

**AGH**

**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

WYDZIAŁ METALI NIEŻELAZNYCH

KATEDRA PRZERÓBKI PLASTYCZNEJ I METALOZNAWSTWA METALI NIEŻELAZNYCH

## PRACA DOKTORSKA

Wpływ parametrów odlewania  
na kształtowanie cech materiałowych miedzi beztlenowej  
dla wysokozaawansowanych aplikacji w elektronice i elektrotechnice

mgr inż. Monika Walkowicz

Promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Knych

Kraków  
czerwiec 2012

## Spis treści

OD AUTORA.....	5
1. WPROWADZENIE.....	9
2. MIEDŹ BEZTLENOWA W ZAAWANSOWANEJ TECHNICIE PRZESYŁU SYGNAŁU ELEKTRYCZNEGO. WSPÓŁCZESNY STAN ZAGADNIENIA.....	13
2.1. Miedź wysokiej czystości chemicznej do wysokozaawansowanych aplikacji w elektronice i elektrotechnice.....	13
2.1.1. Charakteryzacja gatunków miedzi przeznaczonych na cele elektryczne.....	13
2.1.2. Przykłady zaawansowanych technologicznie wyrobów z miedzi w gatunku Cu-OFE.....	16
2.1.3. Wymagania względem miedzi stawiane przez współczesną elektronikę i elektrotechnikę.....	19
2.2. Technologie produkcji materiałów wsadowych i drutów przeznaczonych na cele elektryczne.....	20
2.3. Podstawy teoretyczne przewodnictwa elektrycznego.....	27
2.4. Podsumowanie.....	36
3. TEZA PRACY.....	38
4. CEL I ZAKRES PRACY.....	40
5. KONCEPCJA ROZWIĄZANIA TEMATU PRACY.....	41
6. STANOWISKO DO WYTWARZANIA MATERIAŁÓW WSADOWYCH O UKIERUNKOWANEJ STRUKTURZE.....	42
7. MATERIAŁ DO BADAŃ.....	46
8. PROGRAM BADAŃ.....	49
9. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH I ICH ANALIZA.....	72
9.1. Identyfikacja własności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych.....	72
9.1.1. Makrostruktura.....	75
9.1.2. Własności mechaniczne.....	84
9.1.2.1. Statyczna próba rozciągania.....	84
9.1.2.1.1. Analiza wpływu prędkości odlewania na własności mechaniczne materiałów wsadowych.....	86
9.1.2.1.2. Analiza wpływu wydatku wody chłodzącej krystalizator na własności mechaniczne materiałów wsadowych.....	94
9.1.2.1.3. Analiza wpływu warunków odlewania na powierzchnię materiału po statycznej próbie rozciągania.....	98
9.1.2.1.4. Analiza wpływu obróbki cieplnej na własności mechaniczne materiałów wsadowych.....	106
9.1.2.2. Statyczna próba skręcania.....	111

---

9.1.3. Skład chemiczny .....	112
9.1.4. Gęstość .....	115
9.1.5. Twardość sposobem Brinella .....	116
9.1.6. Własności elektryczne .....	117
9.1.7. Podsumowanie .....	120
9.2. Badania nad procesem ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych .....	121
9.2.1. Analiza wpływu składu chemicznego miedzi na podatność do przetwórstwa w procesach przeróbki plastycznej na zimno .....	126
9.2.2. Analiza umacniania się drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP w procesie ciągnięcia.....	135
9.2.3. Analiza parametrów siłowych procesu ciągnięcia drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP.....	145
9.2.4. Analiza wpływu prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na umacnianie się drutów w procesie ciągnięcia .....	147
9.2.5. Analiza wpływu wydatku wody chłodzącej krystalizator w procesie ciągłego odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na umacnianie się drutów w procesie ciągnięcia.....	159
9.2.6. Analiza wpływu obróbki cieplnej materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na umacnianie się drutów w procesie ciągnięcia.....	167
9.2.7. Analiza procesu ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na druty i mikrodruty w warunkach przemysłowych.....	170
9.2.8. Podsumowanie .....	177
9.3. Badania odporności cieplnej drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP .....	179
9.3.1. Analiza wpływu rodzaju materiału wsadowego do procesu ciągnięcia na podatność do wyżarzania drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na podstawie testów technologicznych.....	184
9.3.2. Analiza wpływu zanieczyszczeń i tlenu na temperaturę rekrytalizacji drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP .....	198
9.3.3. Analiza wpływu umocnienia odkształceniowego na temperaturę rekrytalizacji drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP .....	219
9.3.4. Analiza wpływu prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na temperaturę rekrytalizacji drutów .....	232
9.3.5. Analiza wpływu wydatku wody chłodzącej krystalizator w procesie ciągłego odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na temperaturę rekrytalizacji drutów .....	239
9.3.6. Analiza wpływu obróbki cieplnej materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na temperaturę rekrytalizacji drutów.....	245
9.3.7. Analiza wpływu wyżarzania międzyoperacyjnego na temperaturę rekrytalizacji drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP .....	251
9.3.8. Podsumowanie .....	259

---

9.4. Badania własności elektrycznych drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP .....	262
9.4.1. Analiza wpływu zanieczyszczeń i tlenu na własności elektryczne drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP .....	264
9.4.2. Analiza wpływu umocnienia odkształceniowego na własności elektryczne drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP .....	274
9.4.3. Analiza wpływu parametrów procesu odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na własności elektryczne drutów .....	277
9.4.4. Podsumowanie .....	281
10. BADANIA APLIKACYJNE NAD PRZEMYSŁOWĄ TECHNOLOGIĄ WYTWARZANIA KABLI TELEINFORMATYCZNYCH UTP KATEGORII 6 .....	283
10.1. Technologia produkcji kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6 .....	284
10.2. Pomiarów parametrów transmisyjnych kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6 .....	291
10.2.1. Pomiarów prądem niskiej częstotliwości .....	291
10.2.1.1. Rezystancja elektryczna, asymetria rezystancji elektrycznej .....	292
10.2.1.2. Pojemność skuteczna, asymetria pojemności skutecznej .....	293
10.2.2. Pomiarów prądem wysokiej częstotliwości .....	296
10.2.2.1. Zniekształcenia odbiciowe .....	296
10.2.2.1.1. Impedancja falowa .....	296
10.2.2.1.2. Tłumienność odbiciowa .....	299
10.2.2.2. Zniekształcenia tłumieniowe .....	302
10.2.2.2.1. Tłumienność falowa .....	302
10.2.2.3. Zniekształcenia fazowe .....	305
10.2.2.3.1. Prędkość propagacji .....	305
10.2.2.3.2. Opóźnienie propagacji .....	307
10.2.2.3.3. Przesunięcie fazowe .....	309
10.2.2.4. Zakłócenia zbliżnoprzenikowe i zdalno-przenikowe .....	310
10.2.2.4.1. Tłumienność zbliżnoprzenikowa NEXT, tłumienność zdalno-przenikowa FEXT .....	310
10.2.2.4.2. Tłumienność równoważna sumie mocy przeniku zbliżnego PS NEXT, tłumienność równoważna sumie mocy przeniku zdalnego PS FEXT .....	313
10.2.2.4.3. Odstęp zbliżnoprzenikowy ACR, odstęp zdalno-przenikowy ELFEXT .....	316
10.2.2.4.4. Odstęp równoważny sumie mocy przeniku zbliżnego PS ACR, odstęp równoważny sumie mocy przeniku zdalnego PS ELFEXT .....	319
10.2.3. Podsumowanie pomiarów parametrów transmisyjnych kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6 .....	321
11. PODSUMOWANIE KOŃCOWE PRACY .....	323
12. WNIOSKI .....	329
13. LITERATURA .....	334
ANEKS: TABELLE WYNIKÓW BADAŃ I OBLICZEŃ .....	343

## Od Autora

Nowoczesne rozwiązania materiałowe w obszarze wysokozaawansowanych aplikacji elektrycznych koncentrują się głównie na miedzi. I chociaż ten funkcjonalny technicznie materiał znany jest ludzkości od ponad 10 000 lat – a jako znakomity przewodnik elektryczności od XVIII wieku – to wciąż nie ustają poszukiwania nowych jego odmian oraz możliwości ich wykorzystania. Świadczy o tym ogromna ilość wciąż oryginalnych prac i osiągnięć w tej dziedzinie. Współczesne badania nad tym metalem obejmują dwa główne kierunki rozwoju: pierwszy – aktualny od czasów odkrycia elektryczności, to dążenie do ciągłego wzrostu zarówno konduktywności elektrycznej, jak i odkształcalności w zastosowaniach na druty i mikrodruty. Drugi kierunek to moda ostatnich lat, czyli badania nad wysokowytrzymałymi stopami miedzi również dedykowanymi na cele elektryczne o wytrzymałości istotnie przekraczającej 1000 MPa, a więc charakterystycznej dla stali patentowanej. Ta druga grupa prac obejmuje liczne światowe badania w ośrodkach naukowych i laboratoriach, zwłaszcza w Stanach Zjednoczonych i Japonii. Warto jednakże podkreślić wkład polskich zespołów badawczych w tej dziedzinie – a w tym m.in. zespołów z obszaru inżynierii materiałowej Wydziału Metali Nieżelaznych AGH oraz naukowców z Instytutu Metali Nieżelaznych w Gliwicach.

Podjęta w niniejszej pracy doktorskiej tematyka dotyczy pierwszego ze wspomnianych zagadnień tj. prac nad miedzią beztlenową przeznaczoną do najbardziej technicznie zaawansowanych zastosowań przemysłu elektrotechnicznego takich m.in. jak: kable teleinformatyczne i audio-video, przewody ognioodporne, czy wiązki samochodowe. Taki rodzaj materiału wytwarzany z wyselekcjonowanych katod w gatunku Cu-CATH-1 o wysokiej czystości chemicznej charakteryzuje się ograniczoną ilością pierwiastków zanieczyszczeń. Ponadto wykazuje specjalnie ukształtowaną w procesie ciągłego odlewania strukturę o ukierunkowanych ziarnach i co najważniejsze – jak najmniejszej ich ilości przypadającej na jednostkę długości materiału. Własności te podyktowane są ponadstandardowymi wymaganiami fizycznymi – przede wszystkim względem przewodności elektrycznej omawianych grup aplikacji, a także technologicznymi – tj. wysoką odkształcalnością i nieprzećiętą podatnością do rekryształizacji jako warunku sine qua non procesu ciągnięcia z bardzo wysokimi prędkościami. Materiał taki nazywany miedzią funkcjonalnie doskonałą (Functionally Perfect Copper) o najwyższej jakości posiada znakomite zdolności przesyłu energii elektrycznej.

Takiego zespołu własności nie gwarantuje tradycyjnie stosowana na cele elektryczne miedź tlenowa w gatunku Cu-ETP (Electrolytic Tough Pitch). W szczególności posiada ona znaczne ograniczenia ciągnicze zwłaszcza w zakresie średnic poniżej 100  $\mu\text{m}$ . Mają one swoje źródła głównie w obecności w strukturze tlenków miedzi  $\text{Cu}_2\text{O}$  pochodzenia eutektycznego, które będąc materiałami ceramicznymi, kruchymi i słabo zwilżalnymi przez miedzianą osnowę posiadają wymiary znaczące wobec przekroju poprzecznego materiału i często są przyczyną pęknięć powodujących zerwania podczas ciągnięcia na druty o małych średnicach. Biorąc pod uwagę, że przetwórstwu plastycznemu na zimno w warunkach przemysłowych podlega pasemko składające się równocześnie z kilku do kilkudziesięciu drutów, jakiegokolwiek naruszenie ciągłości technologii jest niedopuszczalne. Miedź funkcjonalnie doskonała wobec znikomej zawartości tlenu (poniżej 3 ppm wag.) nie posiada w swojej budowie wewnętrznej tlenków miedzi, co nadaje jej znakomite zdolności ciągnicze nawet przy bardzo głębokim przetwórstwie.

Dlatego też głównym rodzajem materiału przeznaczonym do omawianych zastosowań stała się miedź beztlenowa w gatunku Cu-OFE (Oxygen Free Electronic), Cu-OFHC (Oxygen Free High Conductivity) oraz jej odmiany o jak najmniejszej ilości kryształów tj. Cu-LGC (Long Grain Crystal) i Cu-LCC (Long Crystal Copper), dzięki czemu transmisja sygnału w konstrukcjach kablowych przesyłu danych, dźwięku i obrazu jest mniej stratna.

Obserwowane współcześnie zainteresowanie takimi materiałami doprowadziło do opracowania laboratoryjnych i przemysłowych rozwiązań produkcji miedzi beztlenowej w postaci bezpośrednio przygotowanej do procesu ciągnięcia. Są to metody ciągłego odlewania, które poprzez sterowanie wielkością, kształtem oraz ilością ziaren w materiale na drodze odpowiedniego doboru parametrów procesu (m.in. prędkość odlewania, wydatek wody chłodzącej w układzie pierwotnym i wtórnym) umożliwiają uzyskanie prętów poddanych następnie operacjom ciągnięcia na mikrodoty o takiej budowie wewnętrznej, która ogranicza powszechny dla kabli teleinformatycznych lub audio-video problem tłumienności. Także i w ramach niniejszej dysertacji został opracowany nowatorski sposób wytwarzania miedzianych materiałów wsadowych o ukierunkowanej budowie strukturalnej.

Wartym podkreślenia jest również i to, że zainteresowanie miedzią beztlenową, jej własnościami fizycznymi i mechanicznymi, a także technologią przetwarzania na druty, wynika z faktu, że w Hucie Miedzi Cedynia została zainstalowana linia do ciągłego odlewania metodą Upcast prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE. Stworzyło to doskonałą podstawę podjęcia tematyki pracy doktorskiej pt. „Wpływ parametrów odlewania na kształtowanie cech materiałowych miedzi beztlenowej dla wysokozaawansowanych aplikacji w elektronice i elektrotechnice”, nad którą miałam przyjemność pracować.

Tematyka dysertacji wpisuje się w działalność naukową Katedry Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych AGH, w której od wielu lat prowadzone są prace badawcze nad nowymi, wysokoprzewodzącymi materiałami na bazie miedzi dla potrzeb nowoczesnej elektroniki i elektrotechniki.

Powstanie niniejszej pracy nie byłoby możliwe bez udziału wielu osób oraz instytucji, zatem w tym miejscu chciałabym podziękować Wszystkim, którzy przyczynili się do jej powstania.

*W szczególności*

Składam podziękowania Władzom Dziekańskim Wydziału Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej za umożliwienie uczestnictwa w Studium Doktoranckim.

Dziękuję Kierownictwu Katedry Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych na Wydziale Metali Nieżelaznych za stworzenie możliwości szerokiego rozwoju naukowego.

Pragnę złożyć podziękowania Ministerstwu Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP za finansowy współudział w realizacji badań objętych niniejszą pracą.

Z uwagi na charakter dysertacji, która wymagała przeprowadzenia szerokiego programu badań doświadczalnych, składam podziękowania Panu Dyrektorowi Zygmuntowi Woźnemu z oddziału Huty Miedzi Cedynia za przekazanie materiału do badań.

Chciałabym również złożyć podziękowania Władzom oraz Kadrze inżynierskiej i technicznej Tele-Fonika Kable w Myślenicach za pomoc w realizacji badań aplikacyjnych nad przemysłową technologią wytwarzania kabli teleinformatycznych.

Dziękuję serdecznie Panom prof. dr hab. inż. Zbigniewowi Trybule z Zakładu Fizyki Niskich Temperatur Polskiej Akademii Nauk w Odolanowie, dr inż. Janowi Ziązi z Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej oraz dr inż. Tomaszowi Tokarskiemu z Katedry Struktury i Mechaniki Ciała Stałego na Wydziale Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej za pomoc w realizacji badań nad własnościami elektrycznymi wytworzonych w ramach pracy doktorskiej materiałów.

*Składam podziękowania wszystkim Pracownikom Katedry Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych oraz Koleżankom i Kolegom ze Studiów Doktoranckich za przyjazną atmosferę oraz życzliwość.*

*Dziękuję moim najbliższym współpracownikom, Koleżankom i Kolegom z Laboratorium Technologii Przetwórstwa Metali Nieżelaznych, w którym powstała niniejsza praca, w szczególności za miłą atmosferę, liczne i pomocne dyskusje, życzliwość i wyrozumiałość.*

*Szczególne podziękowania kieruję do Koleżanki dr inż. Beaty Smyrak oraz Kolegi dr inż. Andrzeja Mamali za ogromną pomoc w realizacji najtrudniejszych fragmentów badań doświadczalnych oraz za merytoryczne konsultacje pracy. Dziękuję również dr inż. Pawłowi Kwaśniewskiemu i mgr inż. Grzegorzowi Kiesiewiczowi za nieocenioną pomoc nad uzyskaniem materiałów do badań w laboratoryjnym procesie ciągłego odlewania.*

*Na zakończenie chciałabym podziękować moim Kochanym Rodzicom, Siostrze i Piotrowi – tak bardzo bliskim mojemu sercu osobom za cierpliwość i okazane zrozumienie oraz duże wsparcie przy pisaniu niniejszej pracy.*

Kraków, czerwiec 2012

Monika Walkowicz

*Przekazuję wyrazy podziękowania oraz najwyższego szacunku Promotorowi pracy Panu Profesorowi Tadeuszowi Knychowi za wnikliwe dyskusje, liczne sugestie i wskazówki, które stały się inspiracją i nieocenioną pomocą w rozwiązaniu problematyki badawczej podjętej w ramach niniejszej dysertacji*



## Rozdział 1

### Wprowadzenie

Podjęmowana w pracy tematyka badań nad nowymi gatunkami miedzi beztlenowej wynika z dynamicznie rozwijającego się rynku wyrobów elektrotechnicznych, w tym kabli, w szczególności do niszowych zastosowań. Zapotrzebowanie na tego typu materiały, a także różne jego modyfikacje, bądź to składu chemicznego za pomocą pierwiastków uszlachetniających lub stanu strukturalnego na drodze zmian parametrów procesu ciągłego odlewania i specjalnych zabiegów obróbki cieplnej determinowane jest zatem potrzebą sprostania przez współczesną elektronikę wysokim wymaganiom klientów, które dotyczą w głównej mierze minimalizacji stratności przesyłu sygnału elektrycznego w konstrukcjach przewodowych. Pociąga to za sobą konieczność stałej poprawy konduktywności miedzianych materiałów przewodzących. Odpowiedzią na te potrzeby stały się nowo opracowane w ostatnich dwóch dekadach innowacyjne metody wytwarzania na skalę przemysłową miedzi beztlenowej o wysokiej klasie czystości wynoszącej 4N (tj. 99,99 % Cu).

Należy podkreślić, że chociaż tematyka dysertacji dotyczy wpływu parametrów odlewania na kształtowanie cech materiałowych miedzi w gatunku Cu-OFE przeznaczonej do aplikacji elektrycznych, to jej cel nie jest ukierunkowany na analizę teorii procesu krzepnięcia. Praca ma charakter eksperymentalny i bazuje na autorskich badaniach doświadczalnych nad zróżnicowanymi parametrami technologicznymi w procesie laboratoryjnego i przemysłowego ciągłego odlewania (prędkość, wydatek wody w układzie chłodzenia pierwotnego – tj. w krystalizatorze oraz wtórnego – tj. poza krystalizatorem) miedzi beztlenowej, których zastosowanie pozwala na świadome sterowanie stanem strukturalnym materiału. Pod tym pojęciem rozumieć należy ilość, wielkość oraz kształt poszczególnych kryształów, które z kolei dostarczają informacji o liczbie występujących w jednostce objętości materiału granic ziaren. Na podstawie powszechnie obowiązującej wiedzy na ten temat wiadomo, że są one zaliczane do powierzchniowych defektów struktury odpowiedzialnych jako jedne z wielu za negatywne zjawisko rozpraszania elektronów przewodnictwa. Tym samym obniżona zostaje konduktywność drutów, co nie pozostaje bez wpływu na wartości parametrów transmisyjnych gotowych konstrukcji kablowych, które decydują o klasie jakości danego wyrobu. Zatem celem niniejszej dysertacji nie są, jak wcześniej nadmieniono, badania analityczne polegające na komputerowym modelowaniu i symulacji procesów odlewniczych, ale analiza doświadczalna procesu odlewania oparta o prostą koncepcję wpływu warunków krystalizacji na kierunkowość struktury odlewanej miedzi i dalsze konsekwencje w zakresie przetwórstwa i kształtowania własności tak otrzymanych materiałów. Realizacja tej koncepcji wymagała opracowania oryginalnego stanowiska badawczego niezbędnego do przeprowadzenia programu badań nad dowodzeniem postawionej w pracy tezy.

Omawiając tematykę niniejszej pracy należy nadmienić o roli tlenu w kształtowaniu cech materiałowych i technologicznych miedzi. Otóż pierwiastek ten posiada bardzo istotny wpływ na zespół własności niektórych gatunków miedzi. Pełni on funkcję rafinatora wiążąc szereg zanieczyszczeń do postaci tlenkowej. Dzięki temu obserwuje się efekt poprawy przewodności elektrycznej i obniżenia się temperatury rekrytalizacji skutkiem jego obecności. W zależności od ilości tlenu i warunków obróbki cieplnej może on rozpuszczać się w osnowie lub tworzyć tlenkowe wtrącenia. Przyjmuje się powszechnie, że wtrącenia tlenu miedzi mogą ułatwiać powstawanie jednorodnej i drobnoziarnistej struktury podczas rekrytalizacji zarówno w warunkach statycznych, jak i dynamicznych. Obecność tlenu w miedzi jest konieczna w większości linii ciągłego odlewania i walcowania – w których to wytwarzana jest walcówka w gatunku Cu-ETP – z uwagi na ryzyko kruchości na gorąco materiału, jaka może ujawnić się podczas walcowania pasma. Z kolei w liniach ciągłego odlewania przeróbka plastyczna na gorąco nie zachodzi, co pozwala na niemal całkowitą eliminację obecności tlenu.

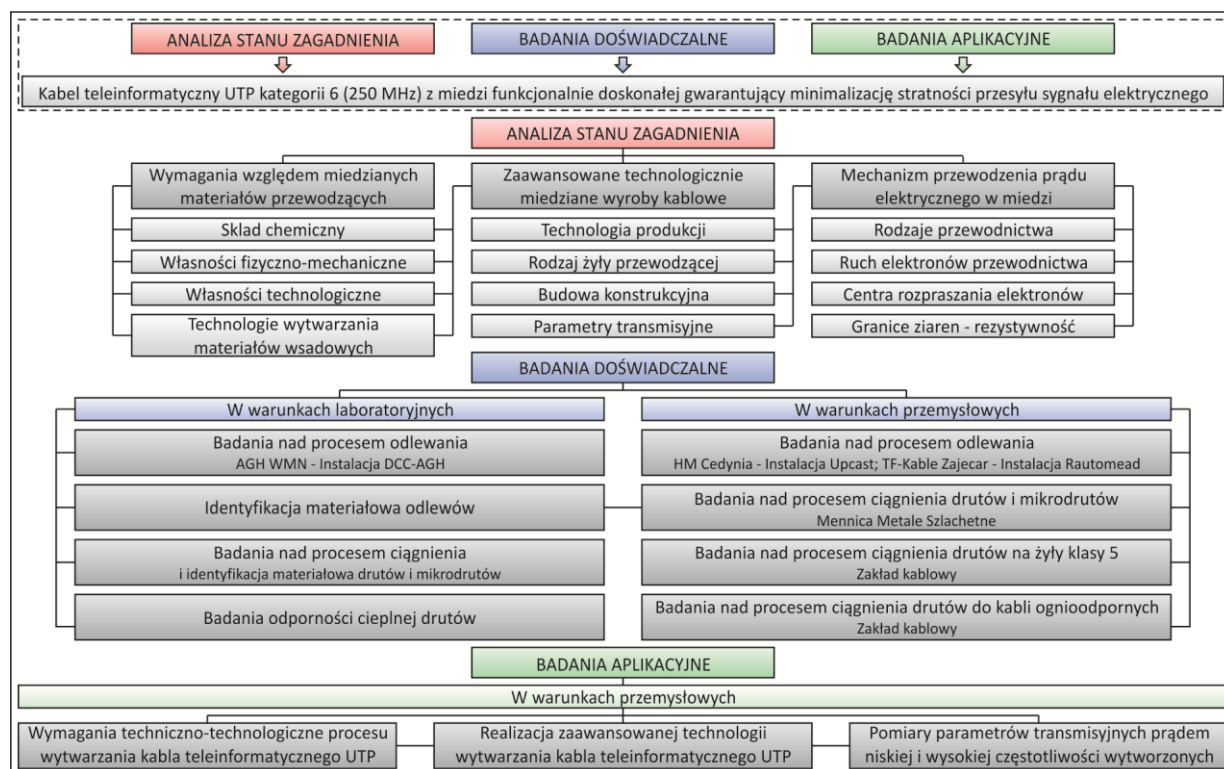
Podczas krystalizacji wlewka praktycznie bez względu na rodzaj instalacji technologicznej powstaje struktura dendrytyczna o różnych rozmiarach kryształów. Co oczywiste wielkość dendrytu jest funkcją prędkości ruchu frontu krystalizacji (a ta zależy od dyfuzji i przechłodzenia) oraz gradientu temperatury w jego okolicach. Z technologicznego punktu widzenia wielkości te zależą od warunków wymiany ciepła i są funkcją głównie takich parametrów procesu jak temperatura ciekłego metalu,

prędkość odlewania, ilość i temperatura wody chłodzącej, budowa krystalizatora itp. Warto zwrócić uwagę, że przy rozpatrywanych w niniejszej pracy gatunkach miedzi tlen istotnie wpływa na sposób procesu krzepnięcia i strukturę materiału, bowiem miedź zawierająca tlen to w istocie stop podeutektyczny krzepnący w pewnym zakresie temperatur. Jest to również dodatek wykazujący pewną skłonność do mikrosegregacji.

Podsumowując powyższe rozważania należy stwierdzić, że chociaż tlen spełnia szereg korzystnych funkcji to jego obecność w miedzi najwyższej czystości dedykowanej do najbardziej specjalistycznych konstrukcji kablowych i przewodowych jest niepożądana z powodu ryzyka obniżania przewodności elektrycznej oraz odkształcalności i podatności do wyżarzania w procesie ciągnięcia. Chociaż walcowanie na gorąco homogenizuje w sposób dynamiczny dendrytyczną strukturę odlewu, to towarzysząca mu wysoka temperatura i powstające na powierzchni tlenki wykluczają aplikację tych materiałów w zaawansowanych kablach do sygnałów o wyższych częstotliwościach. Pogarszają one parametry elektryczne zewnętrznych warstw drutów (o grubości tysięcy angstromów) wytwarzanych z materiału po walcowaniu na gorąco, podczas gdy w przypadku sygnałów o wyższych częstotliwościach istotną rolę dla procesu przewodzenia odgrywa efekt naskórkowy.

Zatem podkreślając, że miedź beztlenowa to materiał o najwyższej klasie czystości, w przypadku którego tlen odgrywa rolę drugorzędą stwierdza się, że najważniejszy wpływ na poziom uzyskiwanych parametrów transmisyjnych kabli z żyłami przewodzącymi z tego materiału posiada struktura, która musi być analizowana pod kątem obecnych w materiale defektów rozpraszających elektrony przewodnictwa elektrycznego.

Omawiana problematyka stanowi zasadniczy przedmiot dysertacji. Jej głównym celem jest uzyskanie na specjalnie zaprojektowanym stanowisku materiałów wsadowych o ukierunkowanej strukturze, a następnie parametryzacja ich własności zarówno pod kątem wpływu zmiennej szybkości, jak i warunków chłodzenia podczas odlewania. Badaniom materiałowym, fizykochemicznym i technologicznym poddane zostały zarówno wytworzone w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych walcówki i pręty o średnicach 8,0 mm oraz uzyskane w procesie ciągnięcia druty o różnorodnych średnicach. Na tej podstawie podjęta została decyzja o wytworzeniu w przemysłowych warunkach zakładu kablowego teleinformatycznych konstrukcji przewodowych UTP kategorii 6 z żyłami przewodzącymi z różnych gatunków miedzi, a następnie poddaniu ich kompleksowym pomiarom parametrów transmisyjnych na profesjonalnym stanowisku badawczym. Schemat ogólny planu pracy zilustrowano na rysunku 1.1.



Rys. 1.1. Schemat ogólny planu pracy

Chociaż zaplanowany w ramach niniejszej dysertacji program badań realizowany był przede wszystkim w Laboratorium Technologii Przetwórstwa Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej, to swoim zakresem obejmował także wiele prób technologicznych, które przeprowadzone zostały w przemysłowych warunkach zakładów metalurgicznych, przetwórczych i kablowych. W szczególności materiały wsadowe do badań w postaci walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz prętów z miedzi beztlenowej o średnicach nominalnych 8,0 mm uzyskane zostały w rzeczywistych liniach technologicznych Southwire (Aurubis AG – Hamburg), Contirod i Upcast (KGHM Polska Miedź – Oddział Huta Miedzi Cedynia, Orsk) oraz Rautomead (Tele-Fonika Kable – Zakład Zajecar, Serbia). Proces ciągnięcia ww. materiałów na druty i mikrodruty o różnych średnicach prowadzono w zakładzie kablowym Tele-Fonika Kable w Krakowie, a także w zakładzie przetwórczym Mennica-Metale Szlachetne w Radzyminie. Ponadto w ramach dysertacji wytworzonych zostało kilka rodzajów kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6 w warunkach parku maszynowego Tele-Fonika Kable w Myślenicach.

Całość pracy doktorskiej obejmuje trzynaście rozdziałów, których tematyka dotyczy trzech obszarów problematycznych. Część pierwszą – teoretyczną stanowią rozdziały od 1 do 8 pełniące funkcję wprowadzającą w tematykę kierunkowego kształtowania struktury miedzi beztlenowej w procesie ciągłego odlewania. Opis na podstawie danych literatury światowej – norm, patentów i publikacji, a także własnej wiedzy i wynikających z niej spostrzeżeń i obserwacji rozpoczęto od przedstawienia w rozdziale 2 aktualnego stanu zagadnienia nad wysokoprzewodzącym materiałem w gatunku Cu-OFE. Ukazano w nim kompleksową charakterystykę gatunków miedzi przeznaczonych na cele elektryczne pod kątem własności, aplikacji oraz wymagań im stawianym przez rynek elektrotechniczny wraz z syntetycznym przeglądem możliwych technologii ich wytwarzania i przetwarzania. Rozważania dopełniają informacje o mechanizmie przewodzenia prądu w metalach skorelowane z aktualnie istniejącymi na temat defektów struktury – przede wszystkim granic ziaren – wynikami eksperymentów badawczych według różnych, światowych naukowców, a także obserwacji własnych. Należy zaznaczyć, że w ramach pracy w celu potwierdzenia słuszności twierdzeń nad zjawiskiem ruchu elektronów w miedzi wysokiej czystości chemicznej w zakresie temperatur kriogenicznych przeprowadzono autorskie badania w Zakładzie Fizyki Niskich Temperatur Polskiej Akademii Nauk w Odolanowie. W związku z tym, iż nie stanowią one z punktu widzenia aplikacji elektrycznych praktycznej wartości – zakłada się bowiem pracę rozpatrywanych grup kabli i przewodów w temperaturach otoczenia – podjęto decyzję o ich przedstawieniu w rozdziale dotyczącym analizy literaturowej. Tym samym ukazane zagadnienia dały podstawę do sformułowania w ramach rozdziału 3 tezy pracy, która w najogólniejszej postaci dotyczy stwierdzenia, że *...odpowiedni dobór parametrów procesu odlewania pozwala na kształtowanie struktury miedzi beztlenowej, która istotnie ogranicza powszechny dla wysokozaawansowanych aplikacji kablowych problem tłumienia sygnału elektrycznego*. Jej rozwinięcie i uzupełnienie obejmuje rozdział 4 traktujący o celu i zakresie dysertacji oraz rozdział 5, w którym omówiono ogólną koncepcję rozwiązania tematu pracy. Informacje zawarte w ww. częściach są zapowiedzią rozdziału 6, w którym czytelnik zapozna się z projektem uruchomionego laboratoryjnego stanowiska DCC-AGH stanowiącego przedmiot dwóch zgłoszeń patentowych, na którym realizowano proces ciągłego odlewania materiałów wsadowych o ukierunkowanej strukturze. Opis dopełniają zamieszczone w celach ilustracyjnych przykłady obliczeń bilansu cieplnego procesu odlewania. Pierwszą – teoretyczną część pracy kończą rozdziały 7 i 8, poświęcone odpowiednio rodzajom materiałów użytych do badań, a także szczegółowemu programowi, którego realizacji podjęto się w ramach niniejszej dysertacji.

Kolejną – drugą, obszerną część pracy stanowi rozdział 9, w którym przedstawione zostały wyniki badań doświadczalnych, przy czym należy podkreślić przyjętą w dysertacji zasadę bieżącego analizowania uzyskanych rezultatów i podsumowywania kolejnych podrozdziałów. Ponadto z uwagi na dużą ilość zagadnień problematycznych poruszanych w ramach tej części, a także potrzebę ich bezpośredniego odniesienia do obserwacji – w zakresie danej tematyki – uzyskanych przez innych światowych badaczy, niniejszy rozdział został rozszerzony o całość analizy literaturowej tematu. Taki zabieg pozwala, zdaniem autora, na interdyscyplinarne poznanie i zrozumienie omawianej problematyki, a jednocześnie umożliwia jej głębsze osadzenie w istniejącym stanie wiedzy. Zatem część ta zawiera wiele odnośników, które pozwolą zainteresowanemu czytelnikowi na pogłębienie wiedzy w tym zakresie. Także z uwagi na dużą ilość ilustracji i tabel w dysertacji przyjęto system

numeracji w ramach poszczególnych jej części. Rozważania w rozdziale 9 rozpoczęto od identyfikacji własności uzyskanych różnymi metodami materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE pod kątem stanu strukturalnego oraz zespołu cech mechanicznych i fizykochemicznych. Zamieszczono także analizę procesu ich dalszego przetwórstwa na druty i mikrodruty, a także badania nad odpornością cieplną i własnościami elektrycznymi.

Część trzecia dysertacji ukazuje natomiast charakterystykę przeprowadzonych w związku z realizacją tematu pracy badań aplikacyjnych nad przemysłową technologią wytwarzania kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6 z żyłami przewodzącymi z różnych gatunków miedzi. Dlatego też opis niniejszego rozdziału 10 rozpoczęto od szczegółowego przedstawienia etapów, procesów, operacji i zabiegów technicznych związanych z uzyskaniem omawianych konstrukcji przewodowych. W dalszej części rozdziału zamieszczono wyniki pomiarów parametrów transmisyjnych kabli zarówno prądem niskiej, jak i wysokiej częstotliwości. W pierwszym przypadku dotyczyły one badań rezystancji i pojemności skutecznej, a także związanej z nimi asymetrii. Z kolei pomiary w zakresie częstotliwości do 250 MHz koncentrowały się na zjawiskach zniekształceń odbiciowych, tłumieniowych i fazowych oraz zakłóceń zbliżoprzenikowych i zdaloprzenikowych występujących w omawianych torach transmisyjnych.

Całość dysertacji kończy syntetyczne podsumowanie ujęte w rozdziale 11, wnioski z części doświadczalnej i aplikacyjnej przedstawione w kolejnym rozdziale 12, a także spis literatury zamieszczony w części 13.

Ponadto do pracy dołączony został aneks, w którym zawarto tabele z wynikami badań i obliczeń. Tym samym stanowi on dokumentację liczbową odnoszącą się do charakterystyk graficznych zamieszczonych w poszczególnych rozdziałach dysertacji.

Nawiązując jeszcze do użytej w niniejszej pracy terminologii warto w tym miejscu także wyjaśnić, że w stosunku do materiału o średnicy 8,0 mm uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach laboratoryjnych lub przemysłowych przyjęto umowną nazwę „pręt”. Mimo, iż normy [1, 2] definiują pręt jako wyrób przerobiony plastycznie powstały w procesie walcowania, wyciskania lub ciągnięcia, a nie sposobem odlewania to na potrzeby dysertacji, w celu ułatwienia szybkiego i intuicyjnego zrozumienia omawianej problematyki zdecydowano się na posługiwanie tą nazwą, w odróżnieniu od poprawnego – z punktu widzenia normy przedmiotowej dotyczącej wyrobów odlewanych z miedzi nie przerobionych plastycznie [3] – terminu „wlewki na drut”.

Należy ponadto podkreślić, że w przemysłowym środowisku zakładów metalurgicznych i przetwórczych realizujących od lat procesy wytwarzania i ciągnięcia miedzi w gatunku Cu-ETP utrwaliła się terminologia nazywania materiałów wsadowych o przekrojach okrągłych dedykowanych do procesów przetwórstwa plastycznego na druty i mikrodruty mianem walcówki. Tę prawidłowość obserwuje się także i w stosunku do materiałów po procesach ciągłego odlewania. Nie dziwi zatem fakt, iż współcześnie można spotkać się z niezgodnym z prawdą stwierdzeniem, że nowatorska i stosowana dopiero od niedawna na cele elektryczne miedź beztlenowa z linii Upcast lub Rautomead to w istocie także wyrób nazywany potocznie walcówką. Zwracając zatem już na początku niniejszej dysertacji uwagę na odmienności walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz miedzi beztlenowej wynikające ze specyfiki ich procesów technologicznych należy silnie zaakcentować, że w pierwszym przypadku jest to wyrób otrzymany na drodze przeróbki plastycznej na gorąco, natomiast w drugim – sposobem ciągłego odlewania. Tematyka różnic omawianych dwóch gatunków materiałów będzie stanowiła przedmiot dalszych analiz w ramach kolejnych podrozdziałów pracy.

## Rozdział 2

# Miedź beztlenowa w zaawansowanej technice przesyłu sygnału elektrycznego. Współczesny stan zagadnienia

### 2.1. Miedź wysokiej czystości chemicznej do wysokozaawansowanych aplikacji w elektronice i elektrotechnice

Dokonujący się w ostatnich latach na świecie dynamiczny rozwój elektroniki i szeroko rozumianej elektrotechniki determinowany jest najnowszymi rozwiązaniami technicznymi i technologicznymi z obszaru metalurgii i przetwórstwa materiałów metalicznych, a zwłaszcza miedzi. Ponadstandardowe wymagania stawiane strukturze i własnościom drutów do najbardziej obecnie wyrafinowanych aplikacji kablowych przekładają się na wysoki reżim technologiczny doskonałego panowania nad całym systemem produkcyjnym miedzi począwszy od rodzaju i kompozycji chemicznej koncentratu oraz jakości anod i katod, poprzez procesy odlewania i walcowania na gorąco, a skończywszy na wieloetapowym ciągnięciu połączonym z obróbką cieplną, aż do uzyskania produktu finalnego. Negatywną rolę w kształtowaniu własności miedzi w wymienionych procesach odgrywają obecność oraz niewłaściwe relacje ilościowe atomów obcych w katodzie, która jest materiałem wsadowym do procesu produkcji drutów. To asortyment i jakość materiałów wsadowych stosowanych do produkcji wyrobów elektronicznych w znacznym stopniu determinuje ich budowę i wspomnianą technologię produkcji, a poprzez to własności użytkowe, w tym także trwałość i niezawodność.

W minionym wieku nastąpił ogromny postęp w technikach wytwarzania produktów z miedzi, szczególnie w gałęziach przemysłu związanych z produkcją materiałów na elementy przewodzące. Niezawodny przesył sygnału stanowi niewyalgiczny punkt prawie każdego typu urządzenia wykorzystującego energię elektryczną. Potrzebne są zatem materiały umożliwiające najszybszy do osiągnięcia i jak najmniej stratny przepływ elektronów z jednoczesnym spełnieniem norm własności wytrzymałościowych stawianych wyrobom. To właśnie miedź z powodu znakomitej w stosunku do innych metali przewodności właściwej długo będzie jeszcze materiałem dominującym.

Obecne trendy nowoczesnych rozwiązań materiałowych w światowej metalurgii bazują na dynamicznym rozwoju technik wytwarzania beztlenowych gatunków miedzi i ich jakości. Technologie te koncentrują się na produkcji miedzi beztlenowej w gatunku Cu-OFE, zainteresowanie którą wynika z faktu braku zawartości w niej tlenu. To z kolei pozwala na uzyskanie niekonwencjonalnych właściwości – niemożliwych do otrzymania z zawierającej tlen tradycyjnej miedzi w gatunku Cu-ETP. Brak tlenu w miedzi najwyższej czystości stanowi główny powód poprawy plastyczności, przewodności elektrycznej oraz odporności korozyjnej materiału [4]. Jej pozyskiwanie musi przy tym następować z katod o najwyższej czystości metalurgicznej, w których zawartość pierwiastków pogarszających przewodność powinna być jak najmniejsza. Taka właśnie miedź o małej zawartości tlenu i małej ilości defektów struktury charakteryzuje się istotnie wyższą przewodnością elektryczną. Ponadto stwarza możliwość nowych zastosowań w procesach zgrzewania i spawania miedzi oraz w procesach realizujących się w obecności atmosfery redukcyjnej – wodoru, ponieważ jest odporna na kruchość wodorową w porównaniu z miedzią tlenową.

#### 2.1.1. Charakterystyka gatunków miedzi przeznaczonych na cele elektryczne

Według polskich i światowych norm miedź wysokiej czystości chemicznej przeznaczona na cele elektryczne obejmuje cztery podstawowe rodzaje materiałów. Jest to: miedź tlenowa, miedź beztlenowa, miedź odtleniona, miedź zawierająca srebro. Kryterium podziału obejmuje tutaj skład chemiczny tj. obecność lub brak określonych pierwiastków, a w szczególności tlenu, fosforu i srebra, które z kolei warunkują zastosowanie powyższych materiałów w konkretnych aplikacjach elektrotechnicznych. Do wytwarzania ww. rodzajów materiałów wykorzystuje się wyselekcjonowane katody w gatunku Cu-CATH-1 zarejestrowane na londyńskiej giełdzie metali jako gatunek Grade-A zgodnie z normami [5, 6] o obniżonej zawartości pierwiastków zanieczyszczeń. Materiał ten

przeznaczony do przetapiania w głównej mierze znajduje zastosowanie do produkcji miedzi o wysokiej przewodności elektrycznej, w postaci półproduktu do ciągnięcia [7]. Charakterystykę omawianych gatunków miedzi pod kątem normalizacji oznaczeń tj. rodzajów, symboli i numerów, a także wymaganego składu chemicznego zamieszczono w tabeli 2.1.1.

Tabela 2.1.1. Charakterystyka gatunków miedzi wysokiej czystości chemicznej przeznaczonej na cele elektryczne wytwarzanej z katod w gatunku Cu-CATH-1 wg norm PN-EN 13601 [2] i PN-EN 1976 [3]

Oznaczenie materiału			Skład chemiczny [ppm wag.]																				
Rodzaj	Symbol	Numer	Cu	Ag	As	Bi	Cd	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	O	P	Pb	S	Sb	Se	Si	Sn	Te	Zn	Suma (bez O <sub>2</sub> )
Miedź tlenowa	Cu-ETP	CW003A	-	25	5 <sup>1)</sup>	2 <sup>2)</sup>	1 <sup>1)</sup>	3 <sup>1)</sup>	1 <sup>1)</sup>	10 <sup>3)</sup>	1 <sup>1)</sup>	3 <sup>1)</sup>	max. 400	1 <sup>1)</sup>	5	15	4 <sup>1)</sup>	2 <sup>2)</sup>	3 <sup>1)</sup>	3 <sup>1)</sup>	2 <sup>2)</sup>	3 <sup>1)</sup>	65
			Rodzaj miedzi produkowany z kontrolowaną zawartością tlenu o wysokiej konduktywności elektrycznej. Przy obróbce cieplnej, spawaniu lub lutowaniu lutem twardym w atmosferach zawierających wodór konieczne jest zachowanie specjalnych środków ostrożności w celu uniknięcia kruchości wodorowej [4].																				
Miedź beztlenowa	Cu-OFE	CW009A	min. 99,99	25	5	2	1	-	-	10	5	10	1 <sup>4)</sup>	3	5	15	4	2	-	2	2	1	-
			Rodzaj miedzi produkowany w środowisku beztlenowym, bez użycia odtleniaczy o bardzo wysokiej konduktywności elektrycznej. Może być obrabiany cieplnie, spawany lub lutowany lutem twardym, bez potrzeby zachowania specjalnych środków ostrożności w celu uniknięcia kruchości wodorowej [4].																				
Miedź odtleniona	Cu-PHCE	CW022A	min. 99,99	25	5	2	1	-	-	10	5	10	1 <sup>4)</sup>	min. 10 max. 60	5	15	4	2	-	2	2	1	-
			Rodzaj miedzi produkowany z dodatkiem kontrolowanej ilości odtleniacza, najczęściej fosforu i zawierający kontrolowaną, małą ilość pozostałości odtleniacza. Materiał wykazuje wysoką konduktywność elektryczną. Może być obrabiany cieplnie, spawany lub lutowany lutem twardym, bez potrzeby zachowania specjalnych środków ostrożności w celu uniknięcia kruchości wodorowej [4].																				
Miedź zawierająca srebro	CuAg0,04	CW011A	reszta	min. 300 max. 500	-	5	-	-	-	-	-	-	max. 400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	min. 600 max. 800
			Miedź tlenowa, beztlenowa, odtleniona może być produkowana z dodatkiem srebra do 0,12 % (udział masowy). Konsekwencją zawartości srebra jest podwyższenie odporności na mięknięcie, bez istotnego wpływu na konduktywność elektryczną [4].																				
W przypadku miedzi o wysokiej czystości chemicznej suma zanieczyszczeń jest ściśle określona. W szczególności wyróżnia się trzy grupy domieszek [6, 7], których sumaryczna zawartość powinna wynosić maksymalnie:																							
1) (As + Cd + Cr + Mn + P + Sb) – 15 ppm wag. (0,0015 %),																							
2) (Bi + Se + Te) – 3 ppm wag. (0,0003 %), w tym (Se + Te) – 3 ppm wag. (0,0003 %),																							
3) (Co + Fe + Ni + Si + Sn + Zn) – 20 ppm wag. (0,002 %),																							
4) zawartość tlenu powinna być kontrolowana przez wytwórcę w tym celu, aby materiał spełniał wymagania dotyczące odporności na kruchość wodorową podane w PN-EN 1976.																							

Wpływ zanieczyszczeń na własności fizyczne miedzi jest uzależniony od tego, czy tworzą one tlenki, czy roztwory w stanie stałym. Generalnie można wyróżnić dwie grupy pierwiastków, które w zależności od stopnia powinowactwa do tlenu w różny sposób wpływają na jej własności. Pierwsza grupa obejmuje pierwiastki całkowicie związane przez tlen, a więc występujące wyłącznie w postaci tlenków: Sn, Fe, Co, P. Do drugiej grupy zalicza się pierwiastki o mniejszym od miedzi powinowactwie do tlenu. Są to między innymi pierwiastki z VI grupy układu okresowego: Se, Te, S.

Wymienione w tabeli 2.1.1 gatunki miedzi charakteryzują się bardzo dobrą odkształcalnością w procesach przeróbki plastycznej na zimno i podatnością do lutowania. Zarówno konduktywność elektryczna, jak i spawalność zmieniają się w zależności od czystości gatunków miedzi. Z uwagi na

fakt, że obecność zanieczyszczeń w miedzi jest efektem natury rud, z których produkuje się metal, neutralizacja ich działania należy do najistotniejszych zadań metalurgii ekstrakcyjnej. Zawartość domieszek w gatunkach miedzi przeznaczonych na cele elektryczne, a więc miedzi tlenowej, beztlenowej, odtlenionej i zawierającej srebro, w zależności od jej zastosowań w konkretnych aplikacjach elektrotechnicznych, kształtuje się zgodnie z danymi zamieszczonymi w tabeli 2.1.1 na poziomie do maksimum 400 – 500 ppm wag. (z wyłączeniem srebra dla miedzi CuAg0,04).

Z uwagi na fakt, iż aplikacje elektryczne bazują na materiałach technicznych o powszechnym zastosowaniu, to na szeroką skalę wykorzystywana jest głównie miedź tlenowa, beztlenowa i odtleniona fosforem. Oprócz zawartości pierwiastków domieszek na różnym poziomie materiały wykazują zróżnicowane zawartości tlenu. Zgodnie z charakterystyką przedstawioną w tabeli 2.1.1 oraz 2.1.2 kształtuje się ona w zakresie od 3 ppm wag. (miedź beztlenowa w gatunku Cu-OFE) do 400 ppm wag. (miedź w gatunku Cu-ETP).

Tabela 2.1.2. Porównanie własności różnych gatunków miedzi przeznaczonych na cele elektryczne [2, 3, 8, 9]

Oznaczenie materiału	symbol		Cu-OFE	Cu-ETP	Cu-PHCE
	numer		CW009A	CW003A	CW022A
Skład chemiczny wg ASTM B152	min. Cu	[%]	99,99	99,9	99,99
	max. O <sub>2</sub>	[%]	0,0005	<sup>1)</sup>	<sup>1)</sup>
		[ppm wag.]	3	400 – 600	50
	P	[ppm wag.]	max. 3	–	10 – 60
Gęstość	wlewek	[g/cm <sup>3</sup> ]	8,90	8,40 – 8,60	8,90
	przerobiony plastyczne	[g/cm <sup>3</sup> ]	8,94	8,89 – 8,94	8,94
Desorpcja gazu w podwyższonych temperaturach			bardzo niska	niska	bardzo niska
Jednorodność struktury			doskonała	dobra	doskonała
Przewodność elektryczna		[%IACS]	102	100	100
Przewodność cieplna		[W/mK]	391	381	339
Odporność na kruchość wodorową			doskonała	dobra	dobra
Odształcalność			doskonała	dobra	dobra
<sup>1)</sup> gwarantująca odporność materiału na kruchość wodorową					

Oprócz badań składu chemicznego, przeprowadzanych zgodnie z określonymi w normach [10] wymaganiami oraz pomiarów własności elektrycznych miedź przeznaczoną do aplikacji elektrotechnicznych poddaje się ponadto pomiarom właściwości mechanicznych i odporności na kruchość wodorową. W szczególności badania własności mechanicznych wyrobów przerobionych plastycznie, które powinny być zgodne z wymaganiami określonymi dla prętów i drutów w normie przedmiotowej [2] obejmują zarówno próbę rozciągania [11], jak i pomiary twardości sposobem Brinella [12] lub Vickersa [13]. Ponadto dla wszystkich omawianych gatunków miedzi przeprowadza się próby odporności na kruchość wodorową polegające na wyżarzeniu odpowiednio przygotowanej próbki w atmosferze zawierającej wodór, a następnie przeprowadzeniu próby jednokrotnego zginania, przeginięcia lub obserwacji mikroskopowych [14]. Jeżeli metal zawiera tlen, to zachodzi reakcja powodująca jego kruchość. Podkreślając zasadność tych badań w kolejnym podrozdziale dysertacji, który traktuje o wysokozaawansowanych konstrukcjach kablowych problematyka ta zostanie poddana szerszej analizie. Warto także podkreślić, że ważną próbą technologiczną, której poddaje się miedź beztlenową w gatunku Cu-OFE jest próba przylegania zgorzeli, która umożliwi przeprowadzenie oceny przydatności materiału do jego stosowania w podzespołach elektronicznych – głównie w zastosowaniach wymagających połączeń szkło-metal, lub innych determinujących utworzenie i obecność na powierzchni przylegającej warstwy tlenku miedzi [15]. Badania przeprowadzane zgodnie z wymaganiami określonymi w normie PN-ISO 4746 polegają na nagraniu do temperatury od 850 °C do 875 °C w czasie 30 minut w atmosferze powietrza próbki, którą stanowi drut o średnicy około 1 – 2 mm lub taśma o maksymalnym przekroju poprzecznym 2 × 12 mm, a następnie szybkim jej schłodzeniu w wodzie i obserwacji powierzchni w celu stwierdzenia ewentualnych ubytków warstewki

tlenkowej lub występowania pęcherzy. Oprócz wspomnianej próby przylegania zgorzeliny miedź najwyższej czystości chemicznej poddaje się także testom na określenie wielkości ziarna, które na przekroju poprzecznym powinny być jednorodne i nie większe niż 0,05 mm lub 0,4 % wymiaru nominalnego [16].

Podsumowując omawiane gatunki materiałów należy podkreślić, że główne zastosowania czystej, pozbawionej domieszek miedzi opierają się na jej wysokiej przewodności elektrycznej i cieplnej oraz dużej odporności na korozję. Niemal wszystkie składniki stopowe mają destrukcyjny wpływ na konduktywność elektryczną, co czyni czystość metalu istotnym zagadnieniem z tego punktu widzenia. Poszczególne gatunki miedzi niedomieszkowanej różnią się pod względem ilości zanieczyszczeń i z uwagi na to zachowują się inaczej, co objawia się zróżnicowanymi właściwościami materiałowymi oraz odmiennym zachowaniem w procesach technologicznych ich przetwarzania na cienkie druty. To z kolei warunkuje zastosowanie materiału do konkretnych aplikacji elektrotechnicznych, o czym traktuje kolejny podrozdział pracy.

### 2.1.2. Przykłady zaawansowanych technologicznie wyrobów z miedzi w gatunku Cu-OFE

W ostatnich latach powszechność stosowania układów elektronicznych i elementów elektrotechnicznych spowodowała rozwój nowej grupy produktów o wysokozaawansowanych właściwościach w postaci kabli, przewodów, mikrodrutów oraz elementów połączeń. W zależności od zastosowania idealny kabel przesyłowy powinien gwarantować wysoką jakość dźwięku i obrazu (kable audio-video), optymalną szybkość transmisji danych (kable informatyczne), odpowiednią moc sygnału oraz minimalizację tłumienności i niebezpieczeństwa wystąpienia zakłóceń.

Nowoczesne rozwiązania materiałowe w tym obszarze zastosowań koncentrują się głównie na omówionych w poprzedniej części dysertacji gatunkach miedzi o wysokiej czystości chemicznej. Standardem w tego typu przewodach jest stanowiąca przedmiot zainteresowania niniejszej pracy miedź beztlenowa Oxygen Free Electronic (Cu-OFE) lub jej odmiana – Oxygen Free High Conductivity (Cu-OFHC) o wysokiej przewodności elektrycznej. Materiały te – jak wspomniano wcześniej, oprócz zawartości tlenu na poziomie około 1 – 3 ppm wag. wykazują sumę zanieczyszczeń na poziomie nie większym niż 25 ppm wag. [3, 8, 9]. Wartym podkreślenia jest, że w elektronicznych zastosowaniach – przede wszystkim specjalistycznych aplikacjach kablowych – wykorzystuje się odmiany miedzi beztlenowej o odpowiednio ukierunkowanej strukturze charakteryzującej się jak najmniejszą ilością ziaren przypadających na jednostkę długości materiału wsadowego do procesu ciągnięcia. Przykładem takich rozwiązań jest miedź długoziarnista Long Grain Crystal (Cu-LGC) oraz długokrystaliczna Long Crystal Copper (Cu-LCC), o których nadmieniono już w części wprowadzającej do dysertacji. W wymienionych gatunkach materiałów ilość ziaren jest zredukowana do poziomu 200 w jednym metrze długości. Pod tym względem przewyższają one miedź w gatunku Cu-OFE, w której ilość ziaren wynosi około 500/mb [17].

Własności zbliżone do miedzi LGC i LCC posiada miedź OCC uzyskiwana wg japońskiej technologii Ohno Continuous Casting, której głównym celem jest zmniejszenie ilości kryształów w przewodniku. Ponadto należy podkreślić, że w wysokospecjalistycznych zastosowaniach np. w technice elektronowej (elementy akceleratorów elektronowych, kriogenika) stosuje się miedź klasy 6N tj. o czystości chemicznej 99,99997 % Cu, natomiast najczystsze uzyskiwane na skalę przemysłową materiały wykazują obecnie czystość na poziomie 8N (99,999999 % Cu). Wysokiej jakości kable w systemach akustyki profesjonalnej wykonuje się często z miedzi 6 – 7N. Takich własności nie gwarantuje tradycyjnie stosowany na cele elektryczne materiał w gatunku Cu-ETP, w którym zawartość tlenu mieści się w wysokim zakresie 200 – 600 ppm wag.

Omawiając asortyment wyrobów z miedzi beztlenowej w gatunku Cu-OFE warto podkreślić, że jest on bardzo szeroki i koncentruje się głównie na wyrobach wysokozaawansowanych. Zgodnie z danymi zamieszczonymi w tabeli 2.1.3 materiał wykorzystywany jest ze względu na swoją wysoką czystość chemiczną w technice elektronowej m.in. na elementy akceleratorów, czy lamp elektronowych, natomiast z uwagi na dobrą podatność do zgrzewania – w aparaturze próżniowej. Ponadto dzięki odporności na kruchość wodorową znajduje zastosowanie w kriogenice tj. elementach pracujących w niskich temperaturach, z kolei z uwagi na niską rezystywność elektryczną w nadprzewodnictwie, a także w technice kablowej jako elementy połączeń, mikrodruty, przewody



emaliowane, a także kable transmisyjne, teleinformatyczne, audio-video itp.

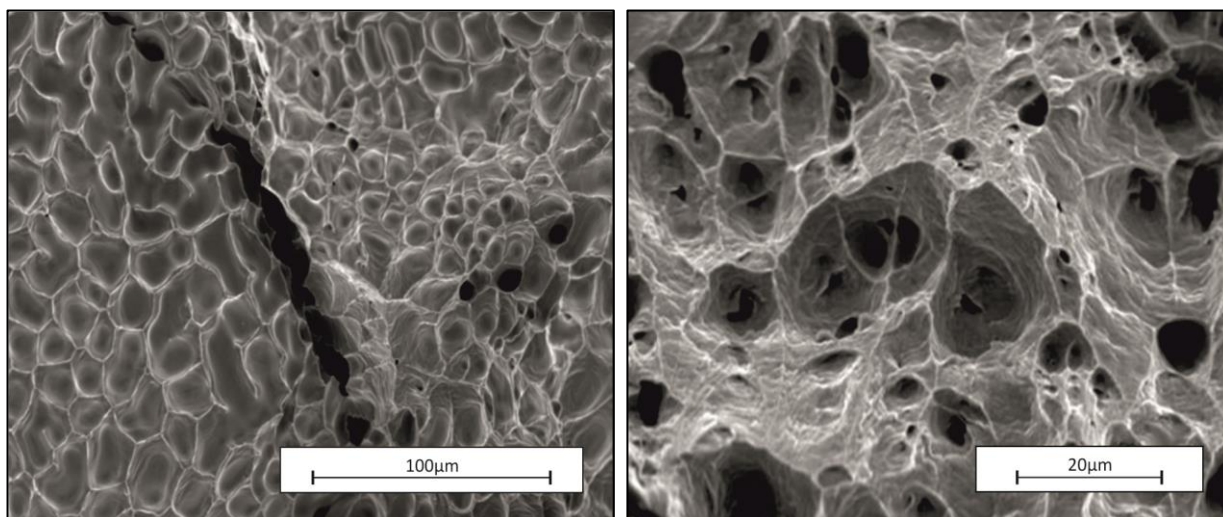
Tabela 2.1.3. Klasyfikacja miedzi beztlenowej wg międzynarodowych norm [18 – 37]

Kraj		Japonia		Stany Zjednoczone		Wielka Brytania		Niemcy
Norma		JIS H 2123		ASTM B170		BS 6017		DIN 1787
Oznaczenie		Grade1	Grade 2	Grade 1	Grade 2	Cu-OFE	Cu-OF	OF-Cu
		C1011	C1020	C10100	C10200	C103	C110	2.0040
Skład chemiczny	Cu, min.	99,99	99,96	99,99	99,95	99,99	99,95	99,95
	[%]							
	O <sub>2</sub> [ppm wag.]	max. 10	max. 10	max. 5	max. 10	max. 10	-	-
Normy dotyczące produktów		JIS H 3510	JIS 3140, 3250,3300	ASTM F68	ASTM B75, B152, B248	BS 2870 – 2875		DIN 40500 Part4
Wyroby		elementy lamp elektronowych, mikrodruty, kable audio-video, taśmy, rury	wlewki, pręty przeznaczone na elementy przewodzące, rury bez szwu	elementy układów w technice elektronowej, mikrodruty, kable	rury, blachy, taśmy, kształtowniki	rury, taśmy, blachy, kształtowniki, wlewki		materiał przewodzący do zastosowań elektrycznych

Zainteresowanie miedzią beztlenową, jej właściwościami fizycznymi i mechanicznymi, a także technologią przetwarzania na druty wynika z faktu, iż jednym z zastosowań tego materiału jest jego przeznaczenie do produkcji materiałów o średnicach poniżej 0,1 mm. Aplikacją związaną z omawianym zagadnieniem są wiązki samochodowe zbudowane z wielu cienkich drutów zgrzewanych ultradźwiękowo. Tradycyjne łączenie kabli samochodowych przy użyciu klasycznych konektorów zdezaktualizowało się ze względu na problem relaksacji sił kontaktowych i grzanie się styków. Szkodliwe tlenki miedzi – występujące w konwencjonalnej miedzi w gatunku Cu-ETP stanowią krucho elementy osadzone w osłonie miedzianej wykazując bardzo małą spójność z osnową i są przy zgrzewaniu miejscami utraty kohezji wobec czego wiązka wykonana z tego materiału nie wykazuje podatności do zgrzewania i jest bardzo krucha [38 – 42].

Drugim głównym typem aplikacji miedzi beztlenowej są przewody ognioodporne cieszące się w ostatnich latach tak dużym zainteresowaniem z uwagi na ataki terrorystyczne, podczas których na ogół palą się miejsca użyteczności publicznej. Zadaniem takich kabli jest utrzymanie zasilania elektrycznego na czas ewakuacji ludzi ze strefy pożaru oraz, aby w jak największym stopniu ograniczyć możliwość rozprzestrzeniania się płomieni i jednocześnie oddalić niebezpieczeństwo powstawania toksycznych dymów. Powyższe wymagania spełniają jedynie kable ognioodporne samogasnące, których powłoka izolacyjna wykonana jest z materiałów bezhalogenowych trudnopalnych. Zawierają one w swoim składzie wodorotlenki metali o niskim progu energetycznego rozpadu. W wysokich temperaturach rozkładają się one bowiem na tlenek i parę wodną gaszącą płomień. Jednak w trakcie procesu palenia dochodzi do pojawienia się wodoru atomowego, który penetruje w sposób błyskawiczny miedź i powoduje jej pęknięcie na granicach ziaren (kruchość wodorowa), a tym samym degradację kabla [43 – 45]. Jest to problem typowy dla tradycyjnej miedzi tlenowej w gatunku Cu-ETP. Potwierdzenie stanowi zilustrowany na rysunku 2.1.1 obraz z mikroskopu skaningowego powierzchni przełomu drutu po procesie wygrzewania w atmosferze wodoru.

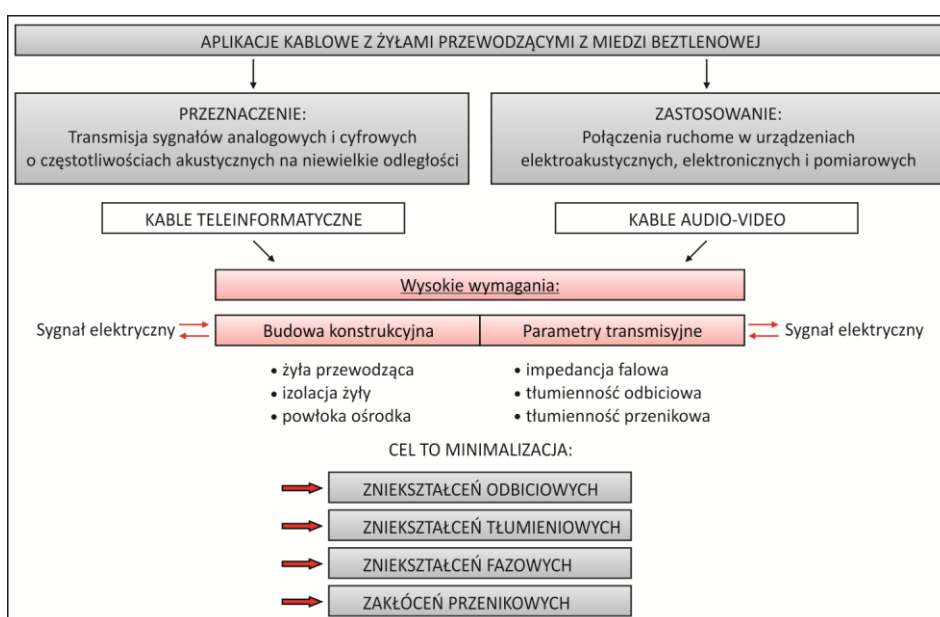
Na podstawie analizy ilustracji przedstawionej na rysunku 2.1.1 można stwierdzić, że struktura miedzi tlenowej charakteryzuje się występowaniem licznych pęknięć po granicach ziaren. Od razu nasuwa się oczywista obserwacja, że niebezpieczeństwo wystąpienia choroby wodorowej w miedzi można oddalić stosując miedź beztlenową. Obraz powierzchni tego materiału przedstawiono na rysunku 2.1.2, który dzięki braku zawartości tlenu oddala niebezpieczeństwo kruchości wodorowej, a tym samym daje gwarancję jak najdłuższej pracy systemów kablowych w warunkach pożaru.



Rys. 2.1.1. Powierzchnia przełomu drutu z miedzi w gatunku Cu-ETP po wygrzewaniu w atmosferze wodoru

Rys. 2.1.2. Powierzchnia przełomu drutu z miedzi w gatunku Cu-OFE po wygrzewaniu w atmosferze wodoru

Omawiając różne aplikacje miedzi beztlenowej dedykowanej do celów elektrycznych należy także wspomnieć o bardzo ważnej grupie kabli przesyłu danych, dźwięku i obrazu (m.in. kable teleinformatyczne kategorii 6 i 7, przewody głośnikowe, przewody do akustyki profesjonalnej), które są przedmiotem szczegółowej analizy w części aplikacyjnej pracy. W szczególności tematykę rozdziału 10 poświęcono konstrukcjom kablowym bazującym na żyłach przewodzących z różnych gatunków miedzi (Cu-ETP, Cu-OFE), które zostały wytworzone w warunkach przemysłowych, a następnie poddane specjalistycznym pomiarom parametrów transmisyjnych. Jednakże powracając do omówienia tej grupy wyrobów należy podkreślić, że współcześnie stawia się jej bardzo wysokie wymagania zarówno odnośnie budowy konstrukcyjnej (żyła przewodząca, izolacja, powłoka zewnętrzna), jak i właściwości transmisyjnych. Te ostatnie, są funkcją sygnału elektrycznego, który w zależności od charakteru może być analogowy lub cyfrowy oraz w zależności od częstotliwości – akustyczny lub radiowy. Im większa częstotliwość sygnału, tym bardziej jest on tłumiony i zniekształcany, toteż kabel musi spełniać określone wymagania dotyczące jego parametrów transmisyjnych, a mianowicie powinien wykazywać możliwe najniższy poziom zniekształceń tłumieniowych oraz strat sygnału i s tłumień przesłuchów obcych pozwalających na uzyskanie wysokich stosunków sygnał / szum [46, 47]. Omawianą problematykę przedstawiono schematycznie na rysunku 2.1.3.



Rys. 2.1.3. Charakterystyka wybranych aplikacji kablowych, do których dedykowana jest miedź w gatunku Cu-OFE pod kątem własności transmisyjnych

Z analizy przedstawionego schematu wynika, że na stratność przesyłu sygnału elektrycznego w wysokozaawansowanych konstrukcjach kablowych składają się zarówno straty w centralnym przewodniku (żyły przewodzącej) – zależne od rodzaju zastosowanego gatunku miedzi tj. jego budowy wewnętrznej i składu chemicznego, jak i straty w izolacji determinowane jakością i geometrią zastosowanego dielektryka, który m.in. wpływa na zjawisko naskórkowości, czyli nierównomierny rozkład prądu na przekroju poprzecznym przewodnika. Zagadnienia te zostaną bardziej szczegółowo wyjaśnione i poddane wnikliwej analizie w ramach wspomnianego aplikacyjnego rozdziału dysertacji.

Podsumowując tą część rozważań dotyczącą wyrobów z miedzi w gatunku Cu-OFE należy stwierdzić, że aby sprostać zwiększonemu popytowi na zaawansowane technologicznie produkty, wytwórcy wprowadzają nowoczesne technologie otrzymywania drutów na skalę masową tj. metody pozwalające na produkcję w sposób ciągły z zachowaniem powtarzalności własności i składu chemicznego. Postęp w technologii wytwarzania doprowadził do opracowania oraz wdrożenia współczesnych i bardzo nowoczesnych metod otrzymywania drutów z miedzi beztlenowej w gatunku Cu-OFE, które stały się wiodącym materiałem w niszowych konstrukcjach przewodowych przemysłu elektronicznego. Z uwagi na fakt, że światowy rynek kablowy jest jedną z najsilniej rozwijających się gałęzi gospodarki, a długoletnie tradycje produkcji i dobrze rozwinięte światowe zakłady spowodowały, że zapotrzebowanie na wysokozaawansowane aplikacje miedzi beztlenowej wciąż będzie wzrastało m.in. dzięki temu, że głównymi klientami są strategiczne i bardzo przyszłościowe gałęzie gospodarki, takie jak: energetyka czy telekomunikacja.

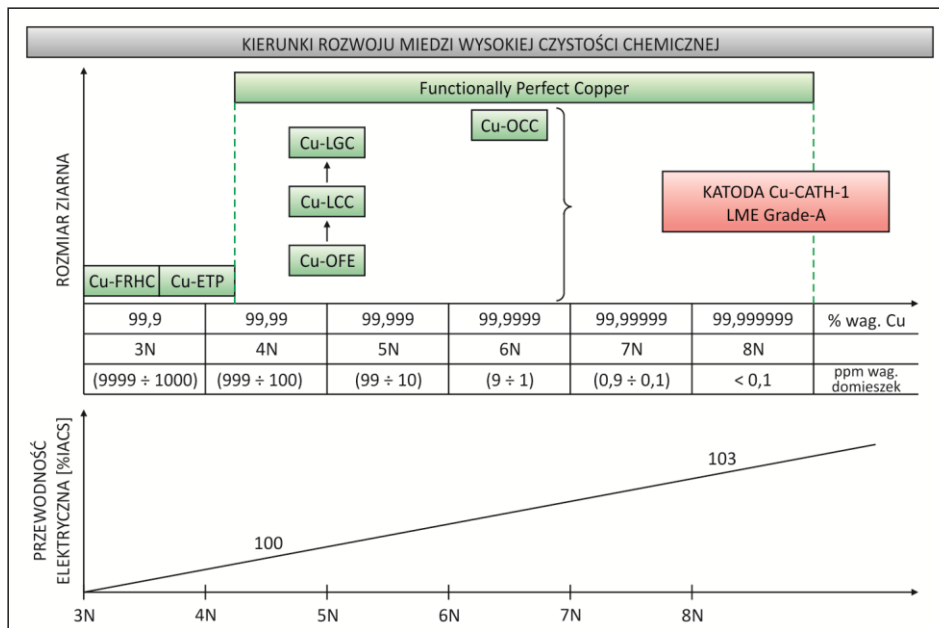
### 2.1.3. Wymagania względem miedzi stawiane przez współczesną elektronikę i elektrotechnikę

Podkreślając, iż miedź jest metalem, który od zawsze znajdował w przemyśle elektrotechnicznym powszechne zastosowanie, należy zauważyć, że więcej niż połowa światowej produkcji miedzi elektrolitycznej, która w 2011 roku osiągnęła poziom 19 milionów ton zużyta została na przewody elektryczne oraz części maszyn, takie jak segmenty kolektorów, szyny zbiorcze, druty nawojowe itp. Ponadto już nie tylko materiał miedziany o czystości chemicznej 4N jest typowany jako główny następcą miedzi konwencjonalnej Cu-ETP – dotychczas najpowszechniej używanej w elektrotechnice, ale opracowywane są wciąż nowe postaci tego materiału, które pod względem budowy strukturalnej, a mianowicie zmniejszonej ilości wydłużonych ziaren umożliwiają uzyskanie wysokich wartości przewodnictwa elektrycznego, przewyższającego tradycyjny tlenowy gatunek o klasie czystości 3N (tj. 99,90 % Cu) w omawianych specjalistycznych grupach aplikacji kablowych.

Biorąc pod uwagę fakt, że współczesna elektrotechnika bazuje na odmianach miedzi o ukierunkowanej strukturze wykazującej jak najmniejszą ilość ziaren dokonano kompleksowej klasyfikacji tego materiału pod względem jego rodzajów i wymagań stawianych przez elektronikę. Posłużono się w tym celu „mapą” dynamicznych kierunków rozwoju tego materiału przedstawioną w postaci diagramu na rysunku 2.1.4. Jest to klasyfikacja odnosząca się do składu chemicznego materiału (oś odciętych) i wielkości ziarna (oś rzędnych).

Dokonując analizy przedstawionego schematu zauważono, że podział rozpoczynają materiały tlenowe – miedź rafinowana ogniowo w gatunku Cu-FRHC (angielski termin: Fire Refined High Conductivity) i materiał w gatunku Cu-ETP o klasie czystości chemicznej 3N (tj. 99,90 % Cu). Miedź beztlenowa Cu-OFE jako punkt wyjścia do nowoczesnych rozwiązań materiałowych charakteryzuje się budową wewnętrzną utworzoną przez ziarna o większych rozmiarach. Ponadto pamiętając, że wysokozaawansowana elektrotechnika bazuje na materiałach o najwyższej czystości chemicznej i dodatkowo o odpowiedniej strukturze to przykładami takich rozwiązań są wspomniane już gatunki miedzi długokryształicznej Cu-LCC oraz długoziarnistej Cu-LGC, a także gatunek Cu-OCC. Wysoka czystość chemiczna omawianych materiałów skorelowana z ich odpowiednio ukierunkowaną strukturą przekłada się na wzrost konduktywności elektrycznej jako dominującej w nowoczesnych aplikacjach kablowych.

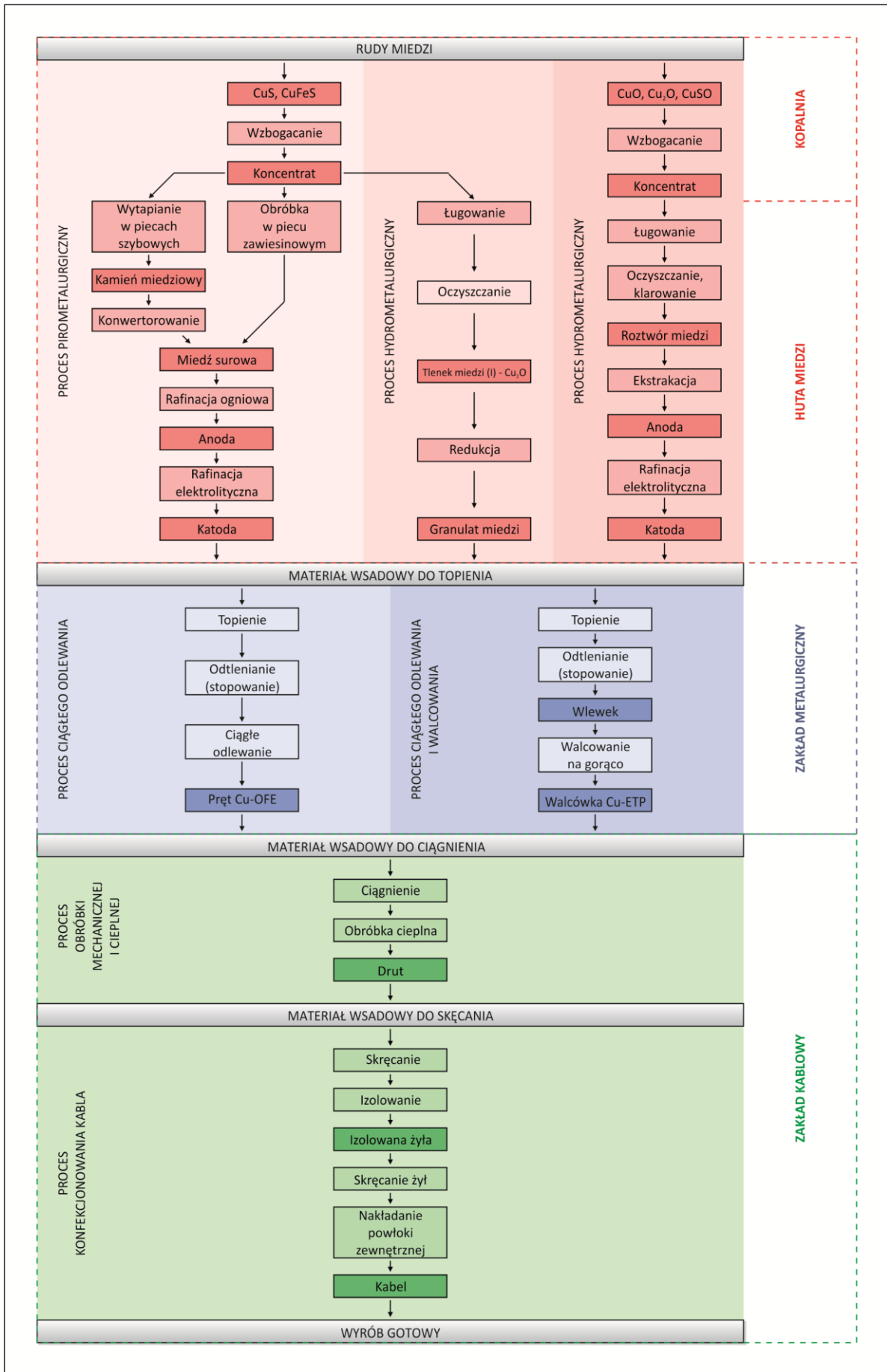
Wobec przedstawionych zróżnicowanych gatunków miedzi wysokiej czystości chemicznej pojawia się pytanie o sposoby ich produkcji, które determinują poziom uzyskiwanych przez nie własności użytkowych – zarówno materiałowych, jak i technologicznych. Problematyka ta stanowi temat kolejnego podrozdziału niniejszej dysertacji.



Rys. 2.1.4. Klasyfikacja miedzi wysokiej czystości chemicznej pod względem wielkości ziarna i składu chemicznego

## 2.2. Technologie produkcji materiałów wsadowych i drutów przeznaczonych na cele elektryczne

Zgodnie z informacjami przedstawionymi we wcześniejszym etapie pracy grupa wyrobów kablowych, dla których dedykowana jest miedź wysokiej czystości chemicznej obejmuje szereg różnorodnych kabli i przewodów do transmisji sygnałów analogowych oraz cyfrowych. Proces wytwarzania rozpatrywanego asortymentu wyrobów kablowych z punktu widzenia przetwórstwa miedzi obejmuje cztery główne etapy: procesy metalurgiczne, procesy odlewnicze, procesy obróbki cieplno-mechanicznej oraz procesy izolowania i konfekcjonowania kabli. Zespół właściwości użytkowych uzyskanych w opisanych wyżej etapach produktów zależy od własności materiałowych zarówno elementów przewodzących, jak i izolacyjnych oraz budowy kabla. W niniejszej pracy skoncentrowano uwagę na zagadnieniach wytwarzania i przetwarzania miedzi wysokiej czystości chemicznej. Parametry wyrobów kablowych uzyskane z materiału tej klasy zależą od jego jakości metalurgicznej, czystości chemicznej oraz stanu struktury, kształtowanego w procesach przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej. Szereg z tych parametrów jest naturalną konsekwencją zastosowanych procesów metalurgicznych, a więc w istocie jakości koncentratu, anody i katody, inne zależą od procesów krystalizacji, pozostałe zaś wynikają z przyjętej ścieżki przetwarzania miedzi w stanie stałym. Na tym tle staje się jasne, że zrozumienie szeregu parametrów nowo opracowanej miedzi najwyższej czystości chemicznej wymaga na wstępie syntetycznego przeglądu możliwych technologii jej wytwarzania i przetwarzania. Technologie te rozdzielić można na trzy podstawowe segmenty w zależności od podmiotów przemysłowych, w których są realizowane. Segment pierwszy to klasyczna lub nowoczesna metalurgia ekstrakcyjna zmierzająca do pozyskania z rud miedzi w postaci katody, która obejmuje procesy odbywające się w hutach miedzi. Segment drugi to przetwarzanie katod do postaci walcówki lub prętów, które stanowią wsad do procesu ciągnięcia. Ten etap przetwarzania odbywa się w zakładach metalurgicznych wyposażonych w linie ciągłego odlewania i walcowania lub ciągłego odlewania. Segment trzeci to wytwarzanie drutów, żył i wyrobów gotowych i odbywa się on w kablowniach. Wspomniane wyżej etapy, procesy operacje i zabiegi technologiczne zilustrowano w syntetyczny sposób za pomocą schematu na rysunku 2.2.1. Dla ułatwienia etapy prowadzone w hutach miedzi przedstawiono w odcieniach koloru czerwonego, etapy odbywające się w zakładach metalurgicznych – niebieskiego, natomiast etapy prowadzone w zakładach kablowych zaznaczono kolorem zielonym. Jaśniejszym odcieniem oznaczone zostały operacje technologiczne, zaś ciemniejszym półwyroby i wyroby uzyskiwane na poszczególnych etapach procesów technologicznych. Z lewej strony schematu ulokowano najważniejsze nazwy realizowanych procesów. Należy traktować je jako reprezentatywne dla większej ilości zabiegów znamienych w danym etapie.



Rys. 2.2.1. Technologia produkcji kabli z żyłami przewodzącymi z miedzi w ujęciu kompleksowym

O jakości miedzi świadczy w głównej mierze jej skład chemiczny, rozumiany nie tylko jako globalny stopień czystości materiału, lecz bardziej szczegółowo – ilustrujący koncentrację szeregu domieszek determinujących zespół własności istotnych przy aplikacjach na cele elektryczne. Należy nadmienić, że w dalszej części pracy (rozdziały 9.1 – 9.4) tematyka ta została poddana wnikliwej weryfikacji, zarówno w oparciu o analizę literaturową problematyki oraz badania własne wpływu składu chemicznego miedzi na podatność materiału do przetwórstwa w procesach przeróbki plastycznej na zimno, a także na odporność cieplną drutów i ich własności elektryczne. Ponieważ procesy metalurgii ekstrakcyjnej nie są procesami doskonałymi to w materiale pozostają zawsze pewne śladowe ilości zanieczyszczeń, które skorelować można z rodzajem stosowanego koncentratu. Chociaż metody uzyskiwania miedzi o czystości chemicznej 8N czy 9N są znane, nie wszystkie istotne dla aplikacji elektrycznych domieszki da się usunąć w zadowalającym stopniu w stosowanych na skalę przemysłową procesach rafinacji podczas produkcji masowej, w której uzyskuje się miedź o klasie czystości rzędu 4N. Należy zaznaczyć, iż analizując segment metalurgiczny wytwarzania miedzi dedykowanej do wyrobów kablowych dla jej jakości rozumianej pod kątem czystości chemicznej kluczowa jest technologia elektrorafinacji. Współcześnie stosuje się dwa sposoby: metodę konwencjonalną, wykorzystującą jednorazowe miedziane podkładki katodowe oraz sposób ISA/KIDD (lub nowszy ISA 2000) bazujący na podkładkach wielokrotnego użycia wykonanych ze stali szlachetnej lub tytanu. Katody uzyskiwane metodą tradycyjną posiadają sumaryczną ilość zanieczyszczeń na poziomie 20 – 30 ppm wag. (z czego około połowę stanowi srebro), podczas gdy katody z procesu ISA 2000 charakteryzują się sumaryczną ilością zanieczyszczeń poniżej 17 ppm wag. (z czego około 7 ppm wag. to srebro) [48, 49]. Obie technologie zapewniają więc czystość miedzi o wiele wyższą niż wymagana przez normy (sumaryczna ilość zanieczyszczeń max. 65 ppm wag. – por. tabela 2.1.1).

Technologia ISA posiada oczywiście szereg zalet w odniesieniu do technologii tradycyjnej. Generalnie zalety te związane są powszechnie ze zmniejszeniem energochłonności procesu i zwiększeniem jego wydajności. Równocześnie jednak omawiany sposób posiada pewne walory techniczne rekomendujące katody uzyskiwane właśnie tą metodą do produkcji miedzi funkcjonalnie doskonałej. Walory te wynikają z optymalizacji kształtu katody, co umożliwia zmniejszenie ilości siarczków poelektrolitowych związanych w katodzie, zmniejszenia ilości dendrytów i osadów powstających na katodzie podczas procesu elektrolizy, co skutkuje pewnym zmniejszeniem ilości domieszek zwłaszcza z grupy pierwiastków nierozpuszczalnych w elektrolicie, które w postaci drobinek szlamu mogą zostać wbudowane w katodę.

Kolejny etap w technologii produkcji miedzi dedykowanej do celów elektrycznych to uzyskanie materiału wsadowego do procesu ciągnięcia drutów i mikrodrutów, którym jest walcówka tlenowa bądź pręt odlewany. Na skalę przemysłową wyroby takie produkuje się odpowiednio za pomocą metod ciągłego odlewania i walcowania (COiW) lub sposobów ciągłego odlewania (CO). Technologie te zdominowały światowe przetwórstwo miedzi na cele elektryczne poprzez podwyższenie jakości wyrobu oraz blisko 25 % redukcję energochłonności. Generalnie linie COiW posiadają zdecydowanie wyższą wydajność niż linie CO i wykorzystywane są do masowej produkcji miedzi konwencjonalnej – tlenowej w gatunku Cu-ETP (dla porównania w linii COiW prędkość wyrobu gotowego wynosi ponad 35 m/s, podczas gdy w linii CO około 0,5 – 4,0 m/min). Linie CO, z kolei, chociaż nie są w stanie konkurować z wydajnością instalacji COiW pozwalają uzyskiwać wyroby specjalistyczne o ściśle zaprojektowanych i dedykowanych własnościach, które stanowią między innymi temat niniejszej pracy. Są zatem w istocie konkurencją jakościową dla walcówki z linii COiW. Instalacje CO nie posiadają ograniczeń dotyczących średnicy produkowanego wyrobu, co jest niebagatelną zaletą zwłaszcza jeśli chodzi o technologie przetwórstwa miedzi bazujące na różnorodnym wsadzie o dużych przekrojach [50].

Pośród dużej grupy linii COiW do produkcji walcówki miedzianej w gatunku Cu-ETP na cele elektryczne znalazły zastosowanie technologie Contirod, Continuus Properzi, Southwire SCR oraz Dip Forming. Pomimo różnorodnej konstrukcji instalacje te posiadają podobne węzły technologiczne. I tak na typową linię COiW do produkcji walcówki miedzianej składa się: segment topielny, gdzie ma miejsce topienie wsadu najczęściej w postaci katod, węzeł obróbki ciekłego metalu, który tworzy piec odstojowy, stanowisko do kontroli i regulacji zawartości tlenu oraz składu chemicznego ciekłego metalu, segment odlewniczy, na który składa się maszyna odlewnicza wraz z układami obróbki mechanicznej czy chemicznej powierzchni wlewka, węzeł walcowniczy, w którym następuje przekształcenie wlewka na walcówkę na drodze przeróbki plastycznej na gorąco i wreszcie segment

konfekcjonowania walcówki, gdzie jest ona zabezpieczana przed działaniem otoczenia, a następnie pakowana. W liniach COiW produkuje się najczęściej miedź w gatunku Cu-ETP oraz CuAg. Linie Southwire SCR posiadają wydajność na poziomie 7 – 48 ton/godzinę, a przekrój poprzecznym odlewanej wlewki wynosi 1350 – 8200 mm<sup>2</sup>. Instalacje Continuus Properzi natomiast zapewniają wydajność 5 – 35 ton/godzinę, przy przekroju wlewki od 1000 mm<sup>2</sup> do 4000 mm<sup>2</sup>. Z kolei technologia Contirod umożliwia osiągnięcie wydajności procesu 10 – 40 ton/godzinę, przy typowym przekroju wlewki dochodzącym do 9000 mm<sup>2</sup>.

Omawiając nieco bliżej instalację Contirod [51] warto podkreślić, że w istocie to połączenie maszyny odlewniczej według koncepcji Hazelleta [52], wytwarzającej wlewki o przekroju prostokątnym z 15 klatkową walcarką Kruppa pracującą w układzie koło-owal-koło. Całość zasilana jest ciekłym metalem topionym w piecu gazowym i kondycjonowanym w piecu elektrycznym. Technologia ta opracowana została na początku lat 70-tych XX wieku i zainstalowana po raz pierwszy w fabryce walcówki w Olen w Belgii. Do zalet technologii zaliczyć należy: laminarny przepływ ciekłego metalu zapobiegający zaciąganiu zanieczyszczeń z powierzchni kąpiel, stosunkowo dobrą wymianę ciepła podczas krystalizacji gwarantującą równomierny odbiór ciepła krzepnięcia, co z kolei zapewnia właściwą makrostrukturę wlewki bez pęknięć i odpowiednią dystrybucję tlenków w jego objętości, a ponadto dobrą jakość powierzchni dzięki zabezpieczeniu materiału po krystalizacji przed jego nadmiernym utlenianiem.

Z kolei linia Southwire SCR opracowana w połowie lat 50-tych XX wieku i zastosowana właśnie w fabryce koncernu pod tą samą nazwą zawiera podobnie jak linia Contirod gazowy piec toplenly oraz piec odstojowy, w którym reguluje się zawartość tlenu w kąpiel. Diametralna różnica tkwi jednak w maszynie odlewniczej, która w przypadku linii SCR konstrukcją jest bardzo zbliżona do rozwiązania zaproponowanego wcześniej dla aluminium przez Properzi. Uzyskany wlewek o przekroju zbliżonym do trapezu i o istotnie mniejszym niż w maszynie Hazelleta przekroju trafia bezpośrednio do walcarki. Dzięki dużej uniwersalności nastaw dysz chłodzących maszyna odlewnicza Southwire pozwala uzyskiwać dobrą, drobną i pozbawioną pęknięć strukturę wlewki. Jest on następnie walcowany w układzie koło-owal-koło. Przyjęty układ wykrojów walcowniczych zapewnia duże gnioły jednostkowe i oddala ryzyko pęknięcia metalu na krawędziach [53].

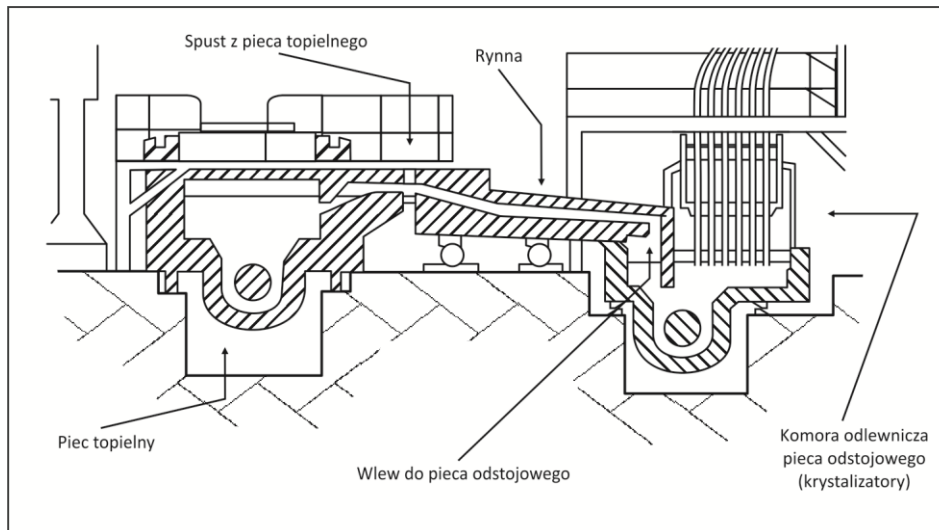
Kolejna instalacja do produkcji walcówki tlenowej – tj. linia Properzi opracowana jeszcze w latach 40-tych dla metali niskotopliwych została dostosowana do produkcji miedzi na przełomie lat 50-tych i 60-tych XX wieku. Technologia wykorzystuje piece gazowe lub elektryczne. W maszynie odlewniczej produkuje się pryzmatyczny wlewek, który jest następnie walcowany na gorąco przez wstępne dwuwalcowe klatki, a następnie przez trójwalcowe. Chociaż koncepcyjnie układ odlewniczy Properzi i Southwire SCR jest podobny to szczegółowe rozwiązania techniczne maszyn odlewniczych w obu liniach są nieco odmienne. Układ wykrojów walcowniczych koło-trójkąt-koło w instalacji Properzi jest bardziej wymagający, jednakże zastosowanie trójwalcowych klatek walcowniczych zwiększa powierzchnię kontaktu pasma z walcami i redukuje obszary swobodnego wydłużenia się materiału bez podparcia narzędzia. Powoduje to zwiększenie jakości powierzchni i tolerancji wymiarowych walcówki.

Warto wspomnieć także o linii Dip-Forming bazującej na bardzo oryginalnej koncepcji wykorzystania drutu w charakterze ruchomego krystalizatora. Opracowana w latach 60-tych XX wieku bazuje na szybkim (z prędkościami sięgającymi 100 m/min.) wprowadzaniu go do kąpiel z ciekłą miedzią. Jeśli proces jest odpowiednio szybki drut nie stopi się, natomiast na jego powierzchni skryształizuje pewna warstewka ciekłej miedzi. W efekcie powstaje wlewek o objętości blisko trzykrotnie większej niż objętość drutu wsadowego, który jest następnie podawany procesowi walcowania na gorąco. Typowe linie Dip-Forming wykorzystują piece elektryczne i umożliwiają także produkcję miedzi beztlenowej [54].

Druga grupa technologii do produkcji materiału wsadowego do procesu ciągnięcia drutów na cele elektryczne to linie ciągłego odlewania. Typowe rozwiązania techniczne tych instalacji zawierają elektryczne piece toplenly często połączone z piecami odlewniczymi, w których ustala się żądany skład chemiczny i temperaturę ciekłego metalu przed krystalizacją oraz węzły odlewnicze najczęściej wielożyłowe połączone z układami do konfekcjonowania wyrobów. Linie tego typu umożliwiają produkcję miedzi beztlenowej (do 10 ppm wag. O), miedzi stopowej (CuAg, CuMg, CuCd, CuSn, CuSi) oraz miedzi odtlenianej fosforem. Miedź na cele elektryczne produkuje się w liniach ciągłego odlewania – fińskiej Upcast, szkockiej Rautomead, hiszpańskiej Conticast oraz japońskiej Ohno.

Technologie Upcast, Rautomead i Conticast umożliwiają odlewanie pionowe z wyciąganiem skryształowanego pręta do góry, natomiast linia Ohno wykorzystuje w tradycyjnym układzie ciągły odlew poziomy. Instalacje Upcast charakteryzują się wydajnością 3000 – 30000 ton/rok i przy największej wydajności wymagają mocy powyżej 2000 kW. Z kolei linie Conticast są mniejsze i posiadają typową wydajność od 600 ton/rok do 4000 ton/rok i przy największej wydajności wymagają mocy przekraczającej 200 kW. Technologie Rautomead w zależności od typu posiadają wydajność z zakresu 1000 – 30000 ton/rok i przy maksymalnej wartości wykorzystują moc na poziomie powyżej 1700 kW.

Linia Upcast doskonalona od początku lat 70-tych ubiegłego wieku zawiera piec topliwny elektryczny indukcyjny średniej częstotliwości, w którym topione są katody, następnie ciekły metal przelewany jest do pieca odlewniczego skąd przepływa do wielożyłowego krystalizatora [55]. Odtlenienie ciekłego metalu odbywa się poprzez jego kontakt z węglem pokrywającym kąpiel. Krzepnięcie następuje w grafitowych krystalizatorach w obudowie miedzianej chłodzonych wodą, które zanurzone są w kąpeli na odpowiednią głębokość w celu wywołania ciśnienia metalostatycznego. Schemat technologiczny instalacji zilustrowano na rysunku 2.2.2. Odlewany pręt posiada strukturę dendrytyczną, zaś parametry technologiczne dobrane są w taki sposób, aby wyeliminować ryzyko występowania porowatości bądź pęknięć. Ponieważ skryształowany pręt znajduje się nad kąpielą ciekłego metalu z przyczyn technicznych nie stosuje się tradycyjnego bezpośredniego chłodzenia wtórnego. Oznacza to, że w ramach chłodzenia pierwotnego należy ostudzić odlany pręt do temperatur gwarantujących brak intensywnego utleniania.



Rys. 2.2.2. Schemat technologiczny instalacji Upcast – 1968 rok [55]

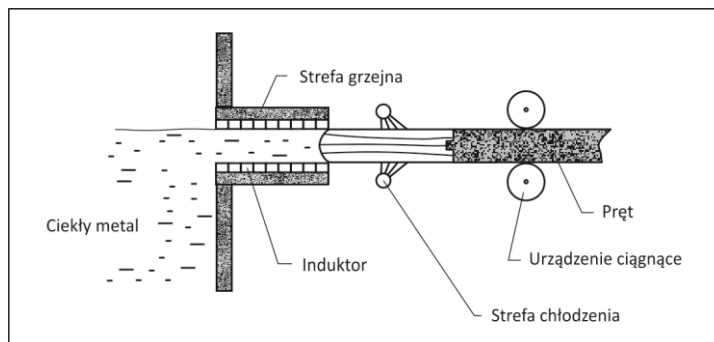
Z kolei linia Rautomead w obecnej formie opracowana została na początku lat 90-tych XX wieku jako rozwinięcie dwudziestu lat doświadczeń w ciągłym odlewaniu. Odtlenianie odbywa się poprzez kontakt ciekłego metalu ze ściankami grafitowego tygła oraz wskutek jego przepływu przez dławik wypełniony cząstkami grafitu. Krystalizacja ma miejsce w grafitowych krystalizatorach z płaszczem miedzianym chłodzonych wodą [56]. W instalacji tej występuje podobne ograniczenie jak w przypadku technologii Upcast dotyczące braku bezpośredniego natrysku wody na skryształowany pręt.

Omawiając sposoby ciągłego odlewania miedzi beztlenowej należy także wspomnieć o linii Conticast bazującej na wieloletnich doświadczeniach technologii Unicast sięgających początku lat 70-tych XX wieku. Linie te konstrukcyjnie są zbliżone do instalacji Rautomead i posiadają piec elektryczny oporowy dwukomorowy z rozdzieloną częścią topliwą i odlewniczą. Krzepnięcie następuje również w krystalizatorach grafitowych, skąd wyrób wyciągany jest do góry. Pomimo podobieństw koncepcyjnych poszczególne linie istotnie różnią się rozwiązaniami konstrukcyjnymi zwłaszcza w zakresie budowy i zasady działania krystalizatorów.

Przedstawione nowe technologie produkcji miedzi beztlenowej stały się siłą sprawczą rozwoju przemysłu kablowego opartego na nowatorskich rozwiązaniach konstrukcyjnych z żyłami przewodzącymi z materiału w gatunku Cu-OFE. W sposób bezpośredni wpłynęło to na nowe możliwości techniczne urządzeń przesyłu sygnałów elektrycznych, ściśle sparametryzowane

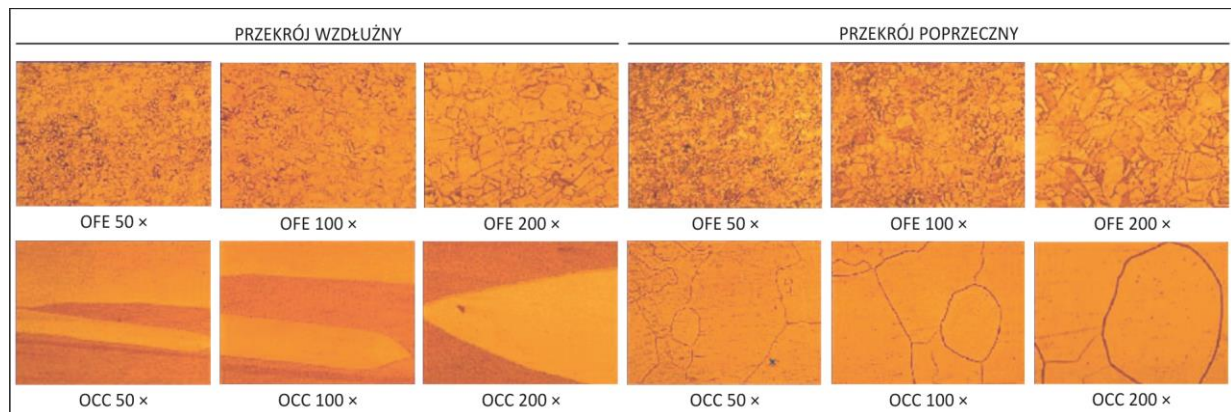


w normach tematycznych [37]. Nieunikniony stał się oczywiście problem tłumienności sygnału docierającego do odbiornika, który zaczęto utożsamiać zarówno ze składem chemicznym materiału przewodzącego, jak i jego strukturą. Dynamiczne badania japońskich inżynierów nad zagadnieniem minimalizacji problemu stratności przesyłu w aplikacjach przewodowych doprowadziły w konsekwencji do opracowania w połowie lat 80-tych XX wieku laboratoryjnej metody ciągłego odlewania miedzi – Ohno Continuous Casting [57 – 61], która funkcjonuje według odmiennej koncepcji niż przedstawione do tej pory instalacje ciągłego odlewania. W technologii zilustrowanej na rysunku 2.2.3 krystalizator ułożony jest poziomo i wyposażony w specjalną nagrzewnicę utrzymującą bardzo precyzyjnie założony gradient temperatury. Krzepnięcie jest możliwe dzięki strumieniowi ciepła ukierunkowanemu wzdłuż osi materiału w stanie stałym, zaś ciepło odbierane jest głównie przez bezpośredni natrysk wody w strefie chłodzenia wtórnego. Dzięki temu uzyskuje się odpowiednio zorientowane duże ziarna, a nawet monokryształy [57 – 64].



Rys. 2.2.3. Schemat linii technologicznej Ohno [57]

Tym samym rok 1986 na stałe wpisał się w historię rozwoju miedzi beztlenowej. Nowa technika znalazła swój wyraz w licznych patentach i artykułach [57 – 64], w których przedstawiane zostały jej cechy charakterystyczne, szczególnie etap kierunkowej krystalizacji i możliwość kształtowania struktury poprzez zmianę temperatury, prędkości odlewania i warunków chłodzenia. Dzięki temu uzyskano miedź OCC najwyższej czystości chemicznej o budowie wewnętrznej utworzonej przez kilka pojedynczych ziaren, którą przedstawiono w dolnej części ilustracji 2.2.4.



Rys. 2.2.4. Struktura miedzi beztlenowej Cu-OFE uzyskiwanej w linii Upcast i materiału Cu-OCC z linii Ohno [65]

Budowa strukturalna innowacyjnego materiału została porównana do miedzi beztlenowej o standardowej klasie czystości chemicznej 4N (por. górna część ilustracji 2.2.4). Istota procesu Ohno polegająca na redukcji ilości ziaren w materiale w swojej istocie koncentruje się na zmniejszeniu udziału granic występujących pomiędzy nimi w strukturze jako miejsc rozpraszających elektrony przewodnictwa w metalach. Niniejsze zagadnienie – istotne z punktu widzenia zastosowania miedzi w wysokozaawansowanych aplikacjach w oparciu o mechanizm przewodzenia prądu zostanie poddane wnikliwej analizie w ramach kolejnego podrozdziału 2.3.

Powracając jeszcze do głównego nurtu rozważań nad technologiami produkcji miedzi przeznaczonej na cele elektryczne warto w tym miejscu wspomnieć również dwie oryginalne metody

wytwarzania walcówki w gatunku Cu-FRHC, a mianowicie sposób Continuus Properzi-La Farga Lacambra oraz Direct to Wire wykorzystujące do produkcji wsad w postaci kwalifikowanych złomów. Technologie tego typu są bardzo zaawansowane metalurgicznie, bowiem z pominięciem procesu elektorafinacji umożliwiają produkcję materiału o własnościach elektrycznych praktycznie identycznych jak miedź elektrolityczna. Materiały tego typu wykazują jednak ograniczoną ciągliwość i zdecydowanie niższą podatność do wyżarzania. Z tego powodu nie są one wskazane do produkcji wysokiej jakości miedzi dedykowanej do aplikacji kablowych.

Uzyskany w wyniku omówionych technologii ciągłego topienia, odlewania i walcowania lub nowatorskich technik ciągłego odlewania materiał wsadowy o średnicy nominalnej 8,0 mm w postaci walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP lub prętów z miedzi beztlenowej podlega na kolejnym etapie technologii produkcji kabli (por. rys. 2.2.1) procesom ciągnięcia odbywającym się w jednożyłowych lub wielożyłowych wielociągach pracujących zanurzeniowo lub w mgle medium smarnego. W zależności od średnicy gotowego drutu operacje odbywać się mogą w kilku etapach. Na maszynach typu grubociąg przetwarza się materiał wsadowy na druty o średnicach 4,5 – 1,0 mm. Typowe maszyny realizują 9 – 15 ciągów z wydłużeniem jednostkowym ok. 1,26 – 1,33. Tradycyjnie są to urządzenia ze zablokowanym napędem, chociaż wprowadza się coraz więcej ciągarek bezpośrednich z indywidualnym napędem, na których można swobodnie dobierać poszczególne jednostkowe współczynniki wydłużenia. Prędkość ciągnięcia na grubociągach wynosi typowo 35 m/s. Na średniociągach natomiast przetwarza się druty o średnicach przedgotowych (tzw. druty podjazdowe) z zakresu 3,5 – 1,0 mm na druty o średnicach do około 0,3 mm. Typowe współczynniki wydłużenia na średniociągach wynoszą 1,24 – 1,26. Maszyny te posiadają najczęściej konstrukcję wrzecionową. Prędkość ciągnięcia wynosi przeciętnie ok. 40 m/s. Cienkociągi współcześnie funkcjonują praktycznie wyłącznie jako maszyny wielożyłowe (tzw. wielobiegi) i są przeznaczone do produkcji sześć do sześćdziesięcioczworo drutowych pasemek o średnicach od 25  $\mu\text{m}$  do około 150  $\mu\text{m}$  z drutów podjazdowych o średnicach 0,1 – 0,3 mm. W tym przypadku proces ciągnięcia jest realizowany w 15 – 30 ciągach z niewielkimi współczynnikami wydłużenia od 1,09 do 1,16. Prędkość ciągnięcia wynosi najczęściej 30 – 40 m/s. Podobnie jak maszyny typu średniociąg, tak i cienkociągi to najczęściej urządzenia o konstrukcji wrzecionowej [66]. Widać zatem wyraźnie, że proces technologiczny ciągnięcia walcówki lub prętów w warunkach przemysłowych wymaga wysokiej ciągliwości materiału wsadowego i jego powtarzalnych własności.

Warto także zaznaczyć, że procesy ciągnięcia na grubociągu, średniociągu i cienkociągu często rozdzielone są obróbką cieplną drutów prowadzoną w sposób ciągły na wyżarzarkach sprzężonych z maszynami ciągniczymi. Są to najczęściej urządzenia oporowe realizujące procesy międzyoperacyjnego wyżarzania materiału. Typowe wyżarzarki po grubociągach posiadają moc z zakresu 200 – 300 kW i prąd żarzenia sięgający 5 kA, z kolei takie maszyny po średniociągach posiadają moc poniżej 100 kW i prądy żarzenia do 2 kA. Natomiast moc wyżarzarek po cienkociągach wynosić może nawet 200 kW z uwagi na dużą liczbę obrabianych drutów w pasemku, zaś prąd wyżarzania na drut nie przekracza na ogół 100 A.

Otrzymany w wyniku omówionych procesów materiał w postaci drutów lub pasemek o ściśle określonych wymiarach geometrycznych i własnościach poddaje się następnie etapowi skręcania w celu uzyskania ośrodka kablowego. W ogólności istnieją różne konstrukcje żył (z drutów okrągłych lub profilowych, żyły zagęszczane, żyły z warstwami skręcanymi naprzemiennie lub o skrętkach regularnych, żyły skręcane w jednym kierunku – „unilay” itp.). W zależności od konstrukcji i rodzaju ich skręcanie może odbywać się na różnych maszynach. Wielowarstwowe żyły z drutów o średnicach powyżej 1,0 mm skręca się najczęściej na skręciarkach koszowych. Jednowarstwowe, proste konstrukcje z drutów grubych wykonuje się natomiast na skręciarkach cygarowych. Żyły skręcane w jednym kierunku zarówno z drutów grubych, jak i bardzo cienkich pasemek wykonuje się na skręciarkach lirowych. Żyły o zmiennym na długości kierunku skręcania wykonuje się natomiast na maszynach typu S-Z [67]. Należy także zaznaczyć, że obok żył przewodzących (sygnałowych) wykonuje się również ekrany lub pancerze kabli oraz przewodów. Służą do tego celu specjalne oplatarki i zbrojarki, umożliwiające nakładanie warstw z taśmy, czy też plecionek z drutów.

Powyższa analiza dotycząca technologii produkcji miedzi wysokiej czystości chemicznej dostarcza informacji, że projektując materiał dedykowany do wysokozaawansowanych aplikacji kablowych należy zagwarantować szereg jego własności takich jak: odpowiedni skład chemiczny – utożsamiany z jak najmniejszą zawartością zanieczyszczeń i kompatybilną zawartością tlenu,

kontrolowaną strukturę – czyli eliminację możliwości wystąpienia wad odlewniczych w materiale, wysoką przewodność elektryczną – determinowaną budową strukturalną walcówki lub prętów tj. ilością granic ziaren w materiale, a także znakomitą odkształcalność na druty i mikrodruty oraz podatność do procesu wyżarzania rozpatrywaną w kontekście temperatury rekrytalizacji materiału. To ostatnie zagadnienie w stosunku do miedzi nabiera szczególnego znaczenia, przede wszystkim w związku z koniecznością doboru w przemysłowych liniach ciągniczych w zakładach kablowych odpowiednich wartości prądów na żarzarkach w celu przyjscia materiału w stan miękki, co odbywa się w ułamkach sekundy. Powracając do zaawansowanych aplikacji elektronicznych, które jak nadmieniono w niniejszym rozdziale bazują współcześnie na gatunkach miedzi o zminimalizowanej ilości granic ziaren w kolejnym podrozdziale została przeprowadzona analiza tego zjawiska pod kątem przybliżenia istoty problemu w odniesieniu do teoretycznych zagadnień związanych z mechanizmem przewodzenia prądu elektrycznego.

### 2.3. Podstawy teoretyczne przewodnictwa elektrycznego

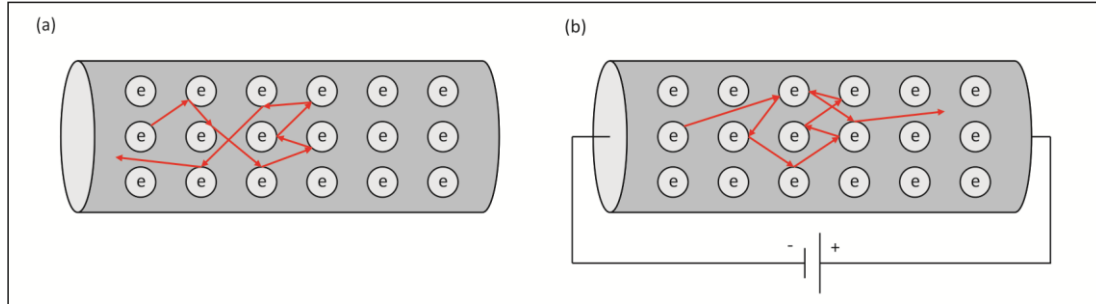
Bardzo duże znaczenie badań własności elektrycznych miedzi, także w ramach niniejszej pracy wiąże się z powszechnym wykorzystaniem energii elektrycznej do zasilania urządzeń stosowanych w komunikacji, automatyce i stanowiącym przedmiot analizowanych w pracy aplikacji kablowych – przetwarzaniu danych. Należy zaznaczyć, iż celem przedstawionego w podrozdziale 2.3 opisu jest korelacja podstaw teorii własności elektrycznych ze stanem strukturalnym miedzi, a szczególnie występującymi w materiale defektami w postaci granic ziaren.

Rozpoczynając od przypomnienia zjawiska odkrycia elektronu przez Thomsona w 1897 roku w czasie prowadzonych przez niego badań nad wyładowaniami elektrycznymi należy stwierdzić, że doprowadziło ono do renesansu zainteresowania problemem określenia struktury atomów. To od struktury atomu zależą wiązania między nimi, które są podstawą podziału materiałów inżynierskich na: metale, materiały ceramiczne oraz polimery. Eksperymenty Thompsona wykazały, że atom składa się z dodatnio naładowanego jądra i zewnętrznej warstwy elektronów, przy czym jądro tworzą protony charakteryzujące się dodatnim ładunkiem elektrycznym ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C) i masą  $1,672 \cdot 10^{-24}$  g oraz neutrony nie posiadające ładunku i nieco cięższe od protonu ( $1,675 \cdot 10^{-24}$  g). Z kolei elektron ma ujemny ładunek elektryczny o wartości bezwzględnej równej ładunkowi protonu, a jego masa wynosi tylko 1/1836 masy protonu. Atomy są elektrycznie obojętne, gdyż w atomach poszczególnych pierwiastków liczba protonów jest równa liczbie elektronów. W celu przypomnienia wartym również podkreślenia jest, że w ogólnym rozumieniu prąd elektryczny to skutek ruchu elektrycznie naładowanych cząstek tzw. nośników ładunku, pod wpływem działających na nie sił od zewnętrznego pola elektrycznego. Cząstki naładowane dodatnio przemieszczają się w kierunku natężenia pola, natomiast naładowane ujemnie w kierunku przeciwnym. Najprostszym nośnikiem ładunku w metalach są elektrony, natomiast w materiałach o wiązaniach jonowych – jony. Istnieją zatem dwie szerokie klasy przewodnictwa – elektronowe i jonowe. Co oczywiste, w ramach niniejszej pracy analizowany będzie pierwszy typ przewodnictwa. Należy także zaznaczyć, że do nośników ładunku należy również tzw. dziura elektronowa, która jest miejscem w ciele stałym, w którym brak jest elektronu w parze wiążącej, przy czym omawiane przewodnictwo dziurowe odgrywa ważną rolę w półprzewodnikach.

Pierwszą próbę wyjaśnienia przewodnictwa ciał stałych podjął Drude, który przyjął, że metal jest zbiorem jonów przenikanych przez „morze” elektronów lub inaczej „gaz elektronowy”. Założył, że pole elektryczne wytworzone w metalu przyspiesza elektrony w kierunku sił pola. Gdy elektrony natkną się na jony w sieci krystalicznej, powinny ulec odchyleniu. Przepływający prąd natrafi w takim razie na opór, a ruch elektronów powinien ustabilizować się w stałej prędkości dryfu zależnej od natężenia pola. Wpływ pola na ruch gazu elektronowego zilustrowano na rysunku 2.3.1.

Na podstawie analizy przypadku a) zilustrowanego na rysunku obserwuje się, że przed przyłożeniem pola ruch dyfundujących elektronów (dyfuzja jako ogólne zjawisko występujące w ciałach stałych, w których atomy nie tylko drgają wokół położenia równowagi, lecz również wędrują z jednego miejsca do drugiego) jest całkowicie bezwładny, tak że średnia prędkość w każdym wybranym kierunku wynosi zero. Po przyłożeniu pola (por. rys. 2.3.1 – b) występuje ogólny dryf elektronów w kierunku elektrody dodatniej. Co oczywiste, odpływ elektronów kompensowany jest przez ich dopływ ze źródła zewnętrznego, co zapewnia ciągłość procesu. Na podstawie tego modelu

Drude wyprowadził wzór na przewodnictwo. W tym celu potraktował gaz elektronowy w metalu jak gaz klasyczny i zastosował zweryfikowane już prawa kinetycznej teorii gazów. Drude założył zatem, że wszystkie będące do dyspozycji elektrony są nośnikami ładunku i przyjął, że średnia droga swobodna między zderzeniami jest rzędu odległości międzyjonowych, a następnie zastosował równania mechaniki klasycznej do ruchu elektronów.



Rys. 2.3.1. Dryf elektronu: a – ruch przypadkowy w nieobecności pola elektrycznego, b – wypadkowy dryf w zewnętrznym polu elektrycznym

Oznaczając przez  $E$  natężenie przyłożonego pola elektrycznego, przez  $\bar{V}_E$  średnią prędkość w kierunku przeciwnym do kierunku pola, przez  $\bar{V}_T$  średnią prędkość termiczną (równoważną odpowiedniej prędkości dla gazu klasycznego) i przez  $\frac{e}{m}$  stosunek ładunku do masy elektronu to w polu elektrycznym na pojedynczy elektron działa siła:  $-eE$ , a zatem przyspieszenie  $\ddot{x}$  w czasie między zderzeniami jest dane wzorem:

$$\ddot{x} = -\frac{e}{m}E \quad (2.3.1)$$

Jeżeli średni czas przelotu między zderzeniami oznaczony zostanie przez  $2\tau$ , to średnia prędkość ruchu wywołana działaniem pola wyniesie:

$$\bar{V}_E = \frac{e}{m}E\tau \quad (2.3.2)$$

Natomiast średnia prędkość dryfu  $\bar{V}_D$  jest wynikiem złożonej średniej prędkości spowodowanej ruchem termicznym (która wynosi zero w każdym dowolnym wybranym kierunku) i średniej prędkości spowodowanej działaniem pola. Zatem średnia prędkość dryfu wynosi:

$$\bar{V}_D = \frac{e}{m}E\tau \quad (2.3.3)$$

Należy podkreślić, że prędkość termiczna jest znacznie większa od prędkości dryfu. Średnią prędkość termiczną  $\bar{V}_T$  ocenia się bez trudu na podstawie teorii kinetycznej, zgodnie z którą:

$$\frac{1}{2}m\bar{v}_T^2 = \frac{3}{2}kT \quad (2.3.4)$$

gdzie  $k$  jest stałą Boltzmanna. Podstawienie wartości  $m$  oraz  $k$  dla temperatury pokojowej daje wartość  $\bar{V}_T = 1,17 \cdot 10^5 \text{ms}^{-1}$ . Z drugiej strony dla typowej wartości natężenia pola  $E = 10 \text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$ , prędkość dryfu  $\bar{V}_D = 17,6 \text{ms}^{-1}$  przy  $\tau = 10^{-14} \text{s}$ . Gęstość prądu w przewodniku równa się iloczynowi całkowitemu ładunkowi w jednostce objętości i średniej prędkości dryfu:

$$J = ne\bar{V}_D \quad (2.3.5)$$

gdzie  $n$  oznacza całkowitą ilość elektronów przypadających na jednostkę objętości i biorących udział w procesie przewodzenia. Podstawiając wartość  $\bar{V}_D$  ze wzoru (2.3.3) do wyrażenia (2.3.5), otrzymuje się:

$$J = \frac{ne^2\tau}{m}E \quad (2.3.6)$$

Natychmiast zauważa się, że ostatni wzór przedstawia prawo Ohma, przy czym oporność właściwa dana jest wzorem:

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau} \quad (2.3.7)$$

a więc przewodnictwo właściwe wynosi:

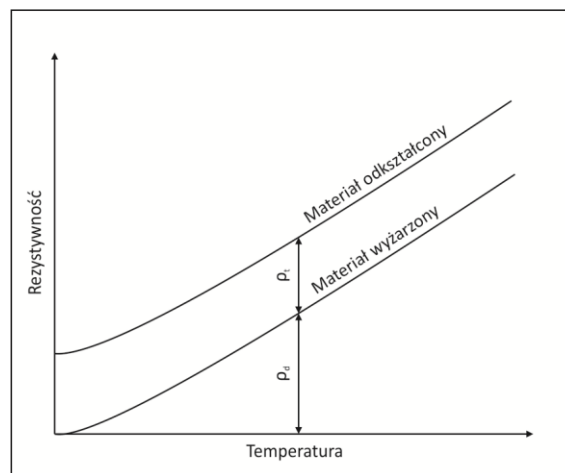
$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} = ne\mu \quad (2.3.8)$$

Parametr  $\mu = e\tau/m$ , zwany ruchliwością definiowany jest jako prędkość dryfu przypadająca na jednostkę natężenia pola elektrycznego. Przewodność elektryczną metali można zmieniać głównie przez zmianę ruchliwości ich nośników ładunków.

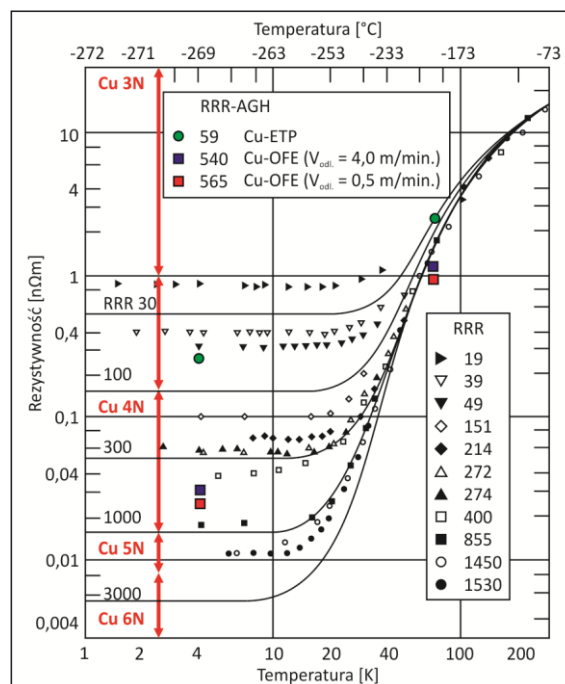
Powyższe zależności sugerowałyby, że dopóki istnieje pole elektryczne, elektrony będą stale przyspieszane i prąd będzie stale wzrastać. Jak jednak wiadomo, niemal natychmiast po przyłożeniu pola prąd wzrasta do wartości określonej przez prawo Ohma i dopóki płynie wydzielane jest ciepło, co wskazuje na to, że poruszające się elektrony poprzez zderzenie przekazują energię sieci krystalicznej. Na podstawie wiedzy z teorii elektronów swobodnych wiadomo również, że elektrony ulegają rozpraszaniu na skutek zaburzeń periodycznej struktury materiału w wyniku ingerencji temperatury, a także występujących defektów struktury krystalicznej, co zostało zawarte w regule Matthiessena w 1864 roku, za pomocą której opór elektryczny właściwy  $\rho$  został zdefiniowany jako zależność:

$$\rho = \rho_t + \rho_d \quad (2.3.9)$$

gdzie  $\rho_t$  i  $\rho_d$  są odpowiednio oporami elektrycznymi właściwymi: cieplnym i pochodzącym od defektów struktury krystalicznej. Udział każdej z tych składowych przedstawiono schematycznie na rysunku 2.3.2.



Rys. 2.3.2. Opór elektryczny właściwy metali wyrażony w funkcji temperatury ( $\rho_t$ ) oraz niezależnego od temperatury członu  $\rho_d$ , pochodzącego od defektów struktury krystalicznej [68]



Rys. 2.3.3. Wpływ temperatury na rezystywność miedzi beztlenuj [70, 71] z naniesionymi wartościami uzyskanymi z niepublikowanych badań własnych nad zagadnieniem własności elektrycznych miedzi w niskich temperaturach (w przygotowaniu do druku)

Jednym z rodzajów rozpraszania silnie zależnym od temperatury jest rozpraszanie na drganiach cieplnych, przy czym teoria prowadzi do wniosku, że jest ono wprost proporcjonalne do temperatury, z wyjątkiem temperatur bardzo niskich tzw. kriogenicznych. Zależność tego typu potwierdzają przeprowadzone w stosunku do miedzi w gatunku Cu-OFE i zilustrowane na rysunku 2.3.3 wyznaczone wartości rezystywności resztkowej (angielski termin: Residual Resistivity Ratio) zależnej od składu chemicznego i stanu strukturalnego – defektów, którą definiuje się jako zależność oporności materiału w temperaturze otoczenia do wartości zanotowanej w temperaturze ciekłego helu [69] zgodnie ze wzorem:

$$RRR = \frac{\rho_{293.2K}}{\rho_{4.2K}} \quad (2.3.10)$$

Obserwowane na podstawie analizy rysunku 2.3.3 zróżnicowane przebiegi charakterystyk oraz zanotowane wartości rezystywności resztkowej zawierające się w dużym przedziale – od 19 do 1500, a nawet do 3000 wynikają z różnic w składzie chemicznym materiałów oraz parametrów zabiegów obróbki cieplnej (temperatura, czas wygrzewania). Powołując się na dane Katoha [71], należy nadmienić, że wynoszą one dla tradycyjnej miedzi beztlenowej o klasie czystości 4N od około 100 do 1000, dla materiału 5N obejmują zakres 1000 – 2000, z kolei dla miedzi 6N kształtują się na poziomie około 16900. Z kolei dla miedzi w gatunku Cu-ETP o czystości chemicznej 3N wartości te wynoszą poniżej 100, przy czym należy zaznaczyć, że przedstawione dane liczbowe dotyczą, co oczywiste materiałów w stanie miękkim. W celach informacyjnych poszczególne zakresy [71] zaznaczono na rysunku 2.3.3 liniami w kolorze czerwonym. Zauważa się zatem, że rezystywność materiału 6N w niskich temperaturach kriogenicznych (do około 10 K) jest o około 50 razy mniejsza w stosunku do materiału o czystości chemicznej 4N. Należy nadmienić, że w ramach dysertacji w celu ustosunkowania się do przedstawionych przez innych autorów wyników oraz zbadania hipotezy jakoby ilość defektów struktury w materiale (zwłaszcza granic ziaren) wywierała wpływ na wartości rezystywności miedzi wysokiej czystości chemicznej także przeprowadzono własne badania doświadczalne w temperaturze ciekłego helu tj. około 4.2 K oraz azotu tj. około 77 K (*Badania własne nad zagadnieniem własności elektrycznych miedzi w niskich temperaturach* – w przygotowaniu do druku). W szczególności wytypowane materiały do badań stanowiły cienkie druty o średnicach 0,2 mm i długościach 10 m nawinięte na nagwintowane teflonowe wałki, które to materiały następnie poddano reżimowi temperaturowemu, czyli była to miedź w stanie miękkim. Należy zaznaczyć, że druty uzyskane zostały z tradycyjnej walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi beztlenowej pochodzących z procesu Upcast z odpowiednio dużą – wynoszącą 4,0 m/min. oraz małą – 0,5 m/min. prędkością. Omawiane trzy rodzaje materiałów różnią się zatem wielkością kryształów. Jak zostało wcześniej nadmienione walcówka tlenowa jest materiałem posiadającym drobne ziarno (ok. 500000 ziaren na przekroju walcówki o średnicy 8,0 mm), z kolei miedź beztlenowa to materiał dendrytyczny wykazujący większe kryształy (kilka ziaren na analogicznym przekroju poprzecznym). Na chwilę obecną, bez wyjaśniania istoty problemu, przyjęte zostanie założenie (co zostanie później wykazane), że materiał uzyskany w procesie odlewania z najmniejszą szybkością (tj. 0,5 m/min.) charakteryzuje się większymi ziarnami, aniżeli pręt uzyskany przy prędkości wyższej wynoszącej 4,0 m/min.

Tematyka rozważań nad wpływem prędkości odlewania na stan strukturalny miedzi będzie stanowić przedmiot szczegółowych analiz w dalszej – doświadczalnej części dysertacji (rozdział 9). Zatem powracając do realizowanych badań własnych nad literaturą przedmiotu należy zaznaczyć, że uzyskane wyniki umożliwią porównanie własności elektrycznych materiałów zarówno pod kątem wpływu zróżnicowanej wielkości ziarna, a także składu chemicznego (Cu 3N, Cu 4N).

Wybrane rezultaty zostały przedstawione w formie graficznej na rysunku 2.3.3 oraz w postaci wartości liczbowych w tabeli 2.3.1. Po to, aby zachować przejrzystość i czytelność ilustracji wyniki ukazano w postaci pojedynczych punktów, a nie ekstrapolowanych linii ciągłych.

Na podstawie analizy przedstawionych na rysunku 2.3.3 wartości zauważa się, że dane zanotowane podczas prób badawczych wpisują się w tendencję przedstawioną przez Cartwrighta [70] i Katoha [71]. Zróżnicowanie wartości rezystancji dla dwóch różnych gatunków miedzi tj. Cu-ETP i Cu-OFE należy w tym przypadku utożsamiać ze zróżnicowanym składem chemicznym materiałów oraz wielkością ziarna. Z kolei odmienne wartości, którymi charakteryzują się druty bazujące na prętach z miedzi beztlenowej uzyskanej przy prędkościach odlewania 4,0 m/min. i 0,5 m/min. są efektem różnej ilości ziaren w materiałach oraz granic pomiędzy nimi w strukturze odlewu. Kompleksowa interpretacja tego zjawiska jest przedmiotem dalszej analizy w niniejszym podrozdziale.

Tabela 2.3.1. Wartości rezystancji w zakresie temperatur 4.2 – 298 K dla miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE – badania własne nad zagadnieniem własności elektrycznych miedzi w niskich temperaturach (w przygotowaniu do druku)

Oznaczenie materiału	Linia technologiczna	Prędkość odlewania materiału wsadowego	Średnica drutu	Pole przekroju drutu	R <sub>4.2K</sub>	ρ <sub>4.2k</sub>	R <sub>77K</sub>	ρ <sub>77</sub>	R <sub>298.2K</sub>	ρ <sub>298.2k</sub>	RRR
		[m/min.]									
Cu-ETP	Contirod	-	0,2	3,21E-08	92,67	0,298	670,91	2,156	5497,95	17,67	59,33
Cu-OFE	Upcast	4,0	0,2	3,21E-08	10,01	0,032	357,90	1,150	5403,05	17,37	539,77
Cu-OFE	Upcast	0,5	0,2	3,21E-08	9,54	0,031	334,22	1,074	5386,65	17,31	564,94

W związku z powyższymi rozważaniami wartym podkreślenia jest, że w 1960 roku reguła Matthiessena [72] została wyraźnie rozgraniczona na trzy źródła zaburzeń wpływające na przepływ elektronów, a jej obowiązująca od tamtego czasu postać brzmi:

$$\rho = \rho_{therm} + \rho_{chem} + \rho_{phys} \quad (2.3.11)$$

gdzie:  $\rho_{therm}$  wynika z drgań cieplnych,  $\rho_{phys}$  jest spowodowane defektami struktury, natomiast  $\rho_{chem}$  determinowana jest zawartością pierwiastków zanieczyszczeń w materiale. W tym miejscu należy zaznaczyć, że jeżeli poddane badaniom własności elektrycznych materiały charakteryzują się takim samym składem chemicznym, a dodatkowo jeżeli przyjęta zostanie taka sama metodyka pomiarów dla wszystkich próbek, to składowa  $\rho_{therm}$  oraz  $\rho_{chem}$  nie ulegną zmianie, a jedyną zmienną wpływającą na wartości rezystywności miedzi będzie ilość zawartych w materiale granic ziaren. Wiadomym jest, że zabiegi wygrzewania miedzi są praktykowane od lat w celu uzyskania wyższej przewodności elektrycznej materiału na dwa sposoby: albo poprzez utlenienie zawartych w materiale o niskiej klasie czystości chemicznej zanieczyszczeń lub – w stosunku do miedzi o wysokiej czystości chemicznej – na drodze odnowy struktury, a więc zmniejszenia ilości granic ziaren poprzez rozrost kryształów. Z uwagi na fakt, iż badania doświadczalne, które zostały zrealizowane w dalszej części dysertacji dotyczą miedzi beztlenowej o powtarzalnej czystości chemicznej na poziomie 4N, zatem w ramach dysertacji zakłada się niezmiennosc zarówno składowej termicznej, jak i wynikającego z obecności atomów domieszek – członu chemicznego. W związku z powyższym praca skupia się na wpływie defektów struktury jakim są granice ziaren na kształtowanie rezystywności elektrycznej miedzi w gatunku Cu-OFE.

Poddając analizie to zagadnienie warto także przypomnieć, że wyróżnia się dwa rodzaje granic ziaren: granice szerokokątowe i wąskokątowe. Granice szerokokątowe mogą być granicami o niskiej lub wysokiej energii. Zostało stwierdzone [73], że wraz ze zmniejszeniem wielkości ziaren zwiększa się ilość niskoenergetycznych granic ziaren. Dowiedziono także [73], że gdy wielkość ziarna jest mniejsza niż 20 μm to granice niskoenergetyczne stanowią 50 %, natomiast, gdy ziarna są mniejsze niż 2 μm to udział wynosi 100 %. Energia granicy ziarna uwzględnia stopień nieuporządkowania sieci krystalicznej spowodowany przez tę granicę. Po tym jak liczba granic ziaren osiągnie pewien poziom wraz ze zwiększaniem się liczby ziaren, proporcja niskoenergetycznych granic ziaren zwiększa się i współczynnik pomiędzy ogólnym nieuporządkowaniem sieci krystalicznej, a liczbą granic ziaren zmniejsza się. Nieuporządkowanie sieci krystalicznej powoduje rozpraszanie elektronów przewodnictwa, co jest istotą omawianego procesu rezystancji elektrycznej. A zatem wpływ granic ziaren na rezystywność nie jest liniowy. Kiedy liczba granic ziaren jest niewielka wpływ granic ziaren na rezystywność drutów miedzianych jest zauważalny, ale kiedy liczba granic ziaren jest duża efekt przestaje być oczywisty. Omawiając wpływ defektów na własności elektryczne miedzi należy zaznaczyć, że związek pomiędzy liczbą dyslokacji, czy wakansów a rezystywnością jest liniowy [74]. Jest tak dlatego, że gdy liczba dyslokacji lub wakansów zwiększa się to nieuporządkowanie sieci krystalicznej spowodowane przez każdą dyslokację lub wakans jest stałe.

Prekursorskimi badaniami, których celem było określenie wpływu granic ziaren na rezystywność miedzi były eksperymenty prowadzone przez Blewitta [75], a podjęte w celu weryfikacji hipotezy na ten temat, którą w swojej pracy postawił Lane [76]. Blewitt badaniami własności elektrycznych poddał trzy rodzaje drutów z miedzi beztlenowej o takim samym składzie chemicznym, a różniące się ilością zastosowanych zabiegów przeróbki plastycznej i obróbki cieplnej. W szczególności: pierwszy materiał badawczy (oznaczony na dalszym etapie omawiania wynikiem numerem 1) poddany został procesowi

wygrzewania, w stosunku do drugiego materiału zastosowano tylko proces ciągnięcia (bez zabiegu wygrzewania), natomiast trzeci poddany został zabiegom przeróbki plastycznej i wyżarzania rekrytalizującego (wartości dotyczące temperatur i czasów obróbki cieplnej materiałów 1 i 3 nie zostały zawarte w publikacji). Analizując zatem ilość granic ziaren w badanych materiałach należy stwierdzić, że największą wartość wykazuje materiał oznaczony jako pierwszy, następnie trzeci oraz drugi. Wyniki uzyskanych przez autora wartości rezystywności zamieszczono w tabeli 2.3.2. Przystępując do analizy danych należy zaznaczyć, że pomiary prowadzone były na drutach uzyskanych z materiałów wsadowych oznaczonych jako: 305D, 305C, 304C oraz 305F różniących się pomiędzy sobą składem chemicznym (brak większej ilości danych na ten temat), ale zgodnie z wcześniejszymi informacjami próbki oznaczone jako 1, 2 i 3 otrzymane z tego samego rodzaju materiału (np. 305D) charakteryzują się zawartością domieszek na takim samym poziomie, zatem pomija się składową chemiczną wpływającą na wartości rezystywności.

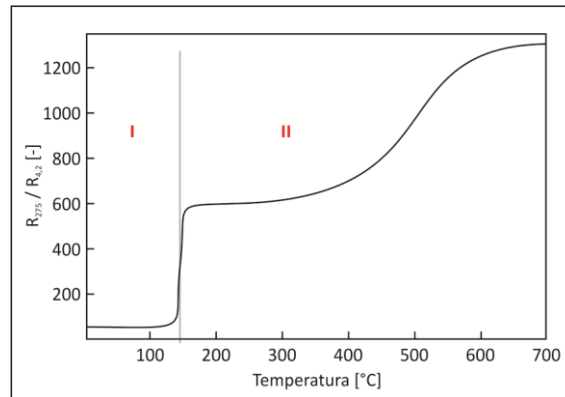
Tabela 2.3.2. Rezystywność drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych z różnych materiałów wsadowych wg Blewitta [75]

Oznaczenie materiału	Rezystywność [ $10^8 \Omega\text{cm}$ ]				
	Temperatura [K]				
	4.2	3.4	2.7	1.67	1.60
„305D”					
1	0,080	-	-	-	-
2	1,308	1,310	1,308	-	1,306
3	0,908	-	-	-	0,933
„305C”					
1	0,036	0,035	0,035	-	0,035
2	1,099	-	-	-	1,101
„304C”					
1	0,080	-	-	-	-
2	1,140	-	-	-	-
3	0,830	-	-	0,846	0,847
„305F”					
1	0,090	-	-	-	-
2	0,720	-	-	-	-
3	0,636	-	-	0,648	0,650

Na podstawie analizy przedstawionych przez autora wyników stwierdza się, że najniższymi wartościami rezystywności charakteryzują się druty o małej ilości granic ziaren (oznaczenie materiału 1). Wniosek dotyczy próbek uzyskanych z wszystkich czterech rodzajów materiałów wsadowych. Wykazujące największą ilość wprowadzonych do materiału na skutek procesu ciągnięcia granic ziaren próbki oznaczone jako materiały o numerze 2 prezentują najwyższe wartości oporności. Ponadto należy zwrócić uwagę na fakt, że rekrytalizacja umocnionej miedzi (materiał numer 3) w wysokiej próżni ( $10^{-5}$  mm lub większej) w temperaturze 1000 °C tylko w nieznaczny sposób wpływa na zmniejszenie rezystywności. Wyniki pomiarów dowodzą decydującego wpływu obecnych w materiale granic ziaren na procesy rozpraszania elektronów na ich powierzchniach.

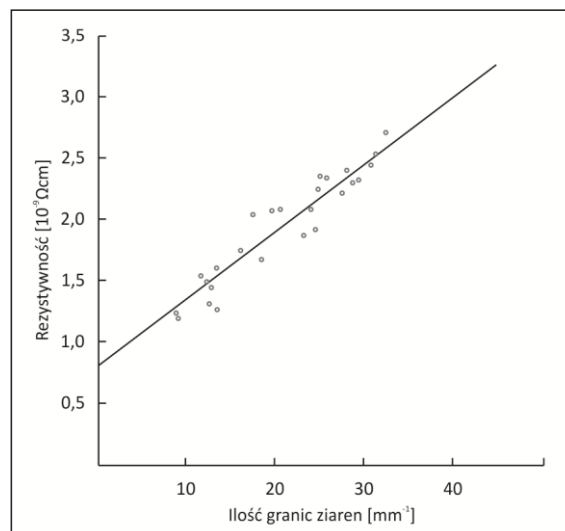
Również wpływ ilości powierzchniowych defektów struktury na rezystywność innych metali – przykładowo złota i cynku stwierdził w swojej pracy Maissner [77]. Bezpośrednią kontynuację badań Blewitta dotyczących redukcji ilości granic ziaren w miedzi, a przez to obserwowanych niższych wartości oporności stanowią prace Pawleka [78], Gregory’ego [79] oraz Andrews [80, 81]. Ten ostatni badaniom poddał miedź o klasie czystości 5N. Próbki drutów o średnicy 0,51 mm po procesie ciągnięcia (odkształcenie 87,5 %), poddał ingerencji temperatury w zakresie od 100 °C do 700 °C w czasie 1 godziny. Na ilustracji 2.3.4 przedstawiono zanotowane przez Andrews wartości rezystywności resztkowej (RRR) materiałów poddanych zmiennym warunkom reżimu temperaturowego.





Rys. 2.3.4. Wyniki rezystywności resztkowej próbek miedzi poddanych wstępnym zabiegom obróbki cieplnej w czasie 1h wg Andrews [80, 81]

Na podstawie analizy przedstawionego wykresu zauważa się, że wzrost temperatury obróbki cieplnej miedzi powoduje wzrost współczynnika rezystywności resztkowej, którego wysokie wartości świadczą o bardzo dobrej jakości materiału rozumianej pod kątem zmniejszonej ilości granic ziaren. Ponadto Andrews zwrócił uwagę, że obserwacja próbek za pomocą metod analizy rentgenowskiej i badań mikrostruktury wykazała, że podczas pierwszego wyraźnego wzrostu rezystywności resztkowej ( $R_{275}/R_{4,2}$ ) materiałów poddanych ingerencji temperatury do około 150 °C stwierdzono ich pełne zrekrytalizowanie, a dalszy wzrost następujący w obszarze drugiego zakresu temperaturowego (200 – 700 °C) związany był z procesem rozrostu ziaren. Ponadto w pracy przedstawione zostały wyniki uzyskanej dla materiałów o rezystywności skorelowanej z ilością występujących w materiale granic ziaren odniesionych do długości próbki. Wyniki zilustrowano w postaci wykresu na rysunku 2.3.5.



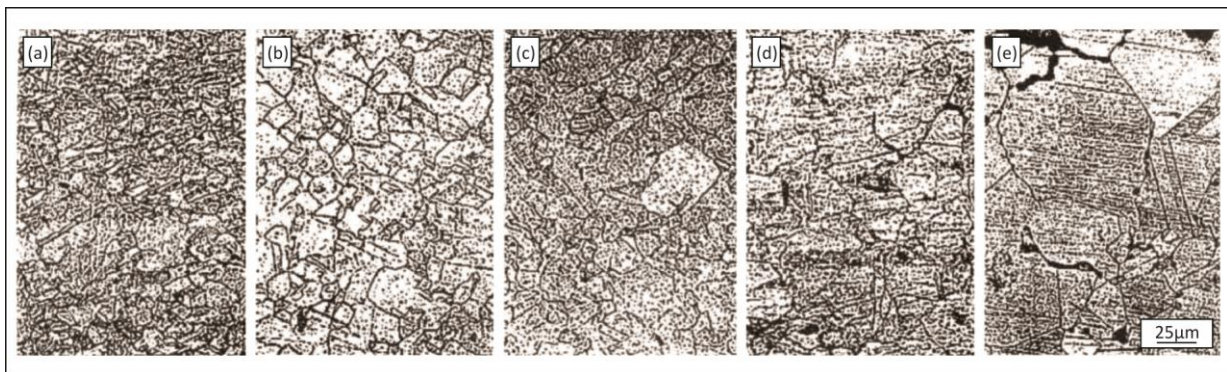
Rys. 2.3.5. Zależność rezystywności elektrycznej od ilości granic ziaren w próbkach miedzi o klasie czystości 5N wg Andrews [80, 81]

Analiza wykresu przedstawionego na rysunku 2.3.5 dowodzi wzrostu rezystywności próbek miedzi wraz ze wzrostem ilości obecnych w materiałach granic ziaren.

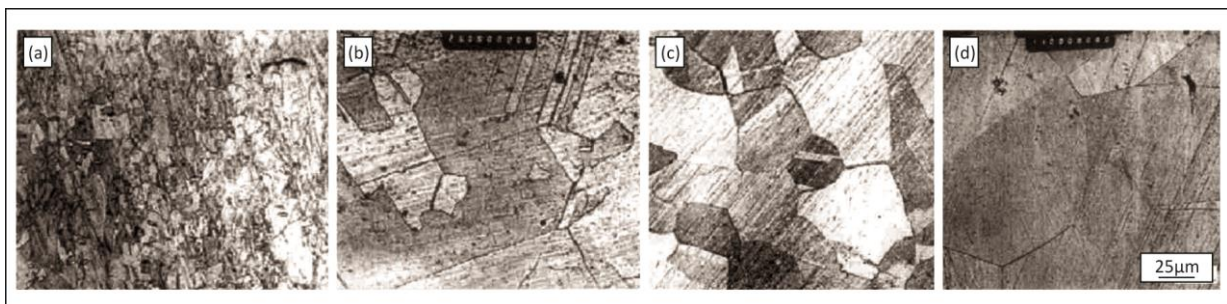
Zagadnieniem wpływu powierzchni granic ziaren na zjawisko rozpraszania elektronów w miedzi zajmował się w swojej pracy także Wu [82], przy czym podobnie jak poprzednio ukazane pomiary prowadzone były w zakresie temperatur od 4.2 K do 293 K w odniesieniu do drutów miedzianych o różnych stanach strukturalnych kształtowanych w wyniku ingerencji temperatury. Autor także dowiódł, że dominującym typem w procesie rozpraszania elektronów w miedzi wysokiej czystości chemicznej są granice ziaren. Współcześnie omawiane zjawisko rozpraszania elektronów na granicach ziaren miedzi nabiera dużego znaczenia w związku z zastosowaniem cienkich drutów miedzianych w układach scalonych. Zagadnienie to porusza w swojej pracy Kimt [83] podkreślając, że stosowane w zminiaturyzowanych urządzeniach cienkie druty miedziane z uwagi na niewielkie długości

charakteryzują się wzrostem rezystywności z powodu obecnych w materiale granic ziaren, co z kolei przekłada się na pogorszenie własności transmisyjnych zastosowanych materiałów. Zwracana jest zatem uwaga autora na konieczność stosowania w wysokozaawansowanych aplikacjach elektrycznych wyłącznie materiałów o wysokiej czystości chemicznej oraz kontrolowanej budowie strukturalnej pod kątem zminimalizowanej ilości granic ziaren.

W poprzednim podrozdziale pracy – 2.2, dotyczącym technologii produkcji drutów dedykowanych do aplikacji elektrotechnicznych zwrócono uwagę na obserwowane w światowym przetwórstwie miedzi tendencje rozwoju zupełnie nowych metod ciągłego odlewania, które ukierunkowane są na uzyskanie materiału o jak najmniejszej ilości ziaren. Opisano nowatorską metodę Ohno uzyskiwania takiej miedzi, która tym samym znalazła swoje zastosowanie w bardzo zaawansowanych aplikacjach kablowych z uwagi na bezpośredni wpływ ograniczonej ilości granic ziaren w materiale na minimalizację niekorzystnych dla tej grupy wyrobów zjawisk tłumienności [84]. Od czasu odkrycia tego materiału charakteryzacja jego własności elektrycznych stała się przedmiotem wielu badań i analiz prowadzonych przez światowych naukowców [64, 85 – 89]. Przykładem takiej pracy jest publikacja Yana [90], który badaniom doświadczalnym poddał druty o średnicy 1,0 mm i długości 1000 mm z miedzi OCC (oznaczenie materiału T2), a w celu porównania uzyskanych rezultatów i jako punkt odniesienia takim samym procedurom badawczym poddał miedź beztlenową o wysokiej czystości chemicznej (materiał oznaczony jako T1) w postaci drutu o takich samych wymiarach. Następnie próbki obu materiałów zostały poddane procesom obróbki cieplnej w czasie 2 godzin i w zakresie temperatur 400 – 900 °C. Badania omawianych materiałów wzbogacone zostały obserwacjami ich mikrostruktur przekrojów wzdłużnych, które zilustrowano na rysunkach 2.3.6 i 2.3.7.



Rys. 2.3.6. Mikrostruktury przekroju wzdłużnego próbek miedzi oznaczonych jako T1 (Cu-OFE) po procesie wygrzewania w czasie 2 h i w temperaturze: a – 500 °C, b – 600 °C, c – 700 °C, d – 800 °C, e – 900 °C wg Yana [90]

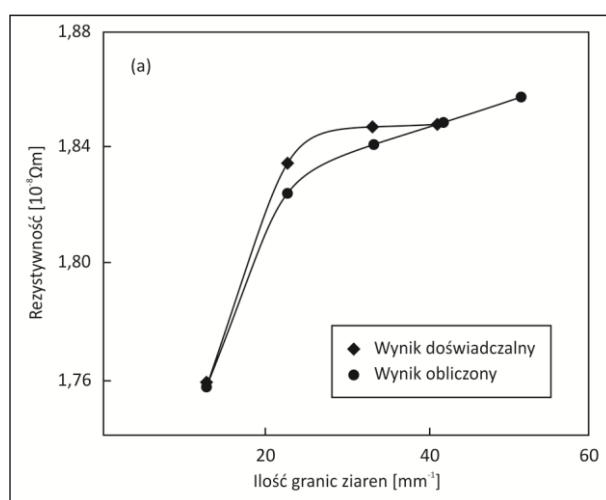


Rys. 2.3.7. Mikrostruktury przekroju wzdłużnego próbek miedzi oznaczonych jako T2 (Cu-OCC) po procesie wygrzewania w czasie 2 h i w temperaturze: a – 400 °C, b – 600 °C, c – 800 °C, d – 900 °C wg Yana [90]

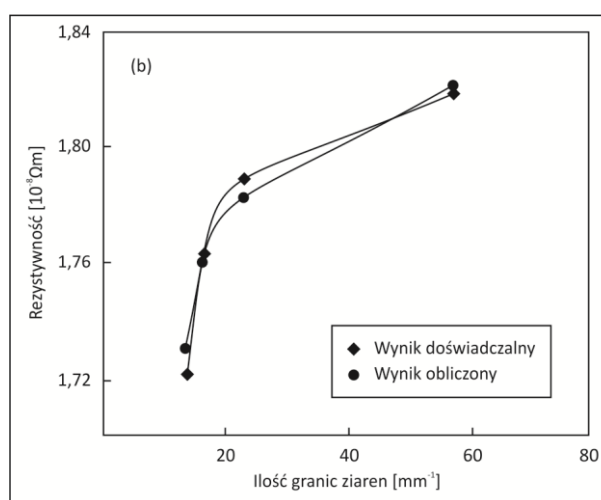
Analiza stanu strukturalnego wskazuje na wzrost rozmiarów ziaren miedzi pod wpływem coraz to wyższych wartości temperatur obróbek cieplnych. Następnie autor określił ilość granic ziaren, którą charakteryzował się każdy z materiałów. Rezultaty zostały zamieszczone w tabeli 2.3.3. Na podstawie analizy danych zamieszczonych w tabeli 2.3.3 zauważa się, że wraz ze wzrostem temperatury obróbki cieplnej zmniejsza się ilość granic ziaren w materiale, czego konsekwencją jest obserwowany spadek wartości rezystywności. Relację tę zilustrowano na rysunkach 2.3.8 i 2.3.9.

Tabela 2.3.3. Wyniki badań ilości granic ziaren i rezystywności miedzi wysokiej czystości chemicznej wg Yana [90]

Temperatura	Ilość granic ziaren	Rezystywność	Ilość granic ziaren	Rezystywność
[°C]	[mm <sup>-1</sup> ]	[10 <sup>-8</sup> Ωm]	[mm <sup>-1</sup> ]	[10 <sup>-8</sup> Ωm]
	Materiał „T1”		Materiał „T2”	
400	-	-	57,15	1,8184
500	51,15	1,8582	-	-
600	42,12	1,8486	23,3	1,7884
700	33,04	1,846	-	-
800	22,46	1,8347	16,3	1,7635
900	12,31	1,757	13,81	1,7226



Rys. 2.3.8. Zależności rezystywności elektrycznej od ilości granic ziaren w próbkach miedzi T1 (Cu-OFE) wg Yana [90]



Rys. 2.3.9. Zależności rezystywności elektrycznej od ilości granic ziaren w próbkach miedzi T2 (Cu-OCC) wg Yana [90]

W przeciwieństwie do innych defektów struktury takich jak dyslokacje lub wakanse obserwowany na podstawie wykresów na rysunkach 2.3.8 i 2.3.9 wpływ granic ziaren na własności elektryczne nie jest liniowy. Gdy początkowo ilość ziaren w materiale jest mała, rezystywność zaczyna gwałtownie wzrastać wraz ze wzrostem ilości granic ziaren. Gdy ilość ziaren w materiale ustabilizuje się to wzrost rezystywności następuje w sposób łagodny i powolny. Zjawisko to obserwuje się także w przypadku aluminium [91]. Gdy wartości rezystywności zaczynają się stabilizować i dalszy wzrost przebiega wolniej to – przykładowo dla miedzi oznaczonej jako T1 (por. tabela 2.3.3, rys. 2.3.8) obserwuje się ilość granic ziaren na poziomie wyższym niż 22, z kolei dla materiału drugiego (oznaczenie T2 – por. tabela 2.3.3, rys. 2.3.9) wynosi mniej niż 22. Relację pomiędzy ilością granic ziaren w materiale, a rezystywnością drutów można wyrazić poprzez zależność:

$$\gamma = ae^{\frac{b}{x}} \quad (2.3.12)$$

gdzie:

x – ilość granic ziaren,

γ – rezystywność drutu miedzianego.

Na podstawie metody regresji danych zawartych w tabeli 2.3.3 średnia wartość dla parametru a wynosi około  $1,86 \cdot 10^{-8}$ , natomiast dla parametru b około - 0,90. Wówczas równanie 2.3.12 przyjmie postać:

$$\gamma = 1,86 \cdot 10^{-8} e^{\frac{-0,90}{x}} \quad (2.3.13)$$

Dokonując analizy przedstawionych na rysunkach 2.3.8 i 2.3.9 zależności rezystywności od

ilości granic ziaren w materiale odniesionych do jego długości dostrzega się podobną tendencję w przebiegu charakterystyk dla obu rodzajów materiałów. Jednakże istnieją pewne zauważalne różnice – przykładowo, gdy analizie podda się wspomniany powolny wzrost rezystywności dla materiału T1, obserwuje się ilość granic ziaren w tym materiale na poziomie wyższym niż około 22, natomiast dla próbki oznaczonej jako T2 wartość ta kształtuje się na niższym poziomie (około 16). Z kolei kiedy odnotowana ilość granic ziaren dla obu materiałów ukształtuje się na takim samym poziomie (materiały po zabiegach obróbki cieplnej w temperaturze 900 °C) dostrzega się wyższe wartości rezystywności dla materiału pierwszego – T1 w porównaniu do próbek T2. Jedyne źródło zróżnicowania pomiędzy badanymi materiałami stanowią rodzaj oraz ilość pierwiastków zanieczyszczeń (w omawianej pracy skład chemiczny materiałów T1 i T2 jest nieco zróżnicowany, pomimo że w obu przypadkach jest to miedź beztlenua wysokiej czystości chemicznej). Analiza rentgenowska omawianych materiałów wykazała obecność 0,4 % Cr w materiale T1, natomiast jedyną obecną domieszką w miedzi T2 (Cu-OCC) były atomy żelaza na poziomie 0,01 %. Wiadomo [92], że parametr w sieci krystalicznej jaką tworzy chrom jest mniejszy niż średnia droga elektronów przewodnictwa w stopie chrom-miedź. Zatem, pomimo że zanieczyszczenie chromu nie może wpływać na przebieg linii trendu omawianej krzywej zależności rezystywności od ilości granic ziaren w materiale, to poprzez kontrolę liczby ziaren w miedzi wpływa na ostateczną wartość uzyskiwanej rezystywności. Dlatego granice ziaren wywierają wpływ nie tylko na rezystancję, ale także na pojemność. Gdy w materiale obserwuje się występowanie zanieczyszczeń, w szczególności tlenu lokującego się na granicach ziaren, omawiana rezystywność i pojemność skuteczna wzrosną. Zatem obecność granic ziaren w przypadku omawianej miedzi najwyższej czystości chemicznej odgrywa decydujący wpływ na zniekształcenie sygnału i jego znaczne osłabienie. Przedstawione negatywne zjawisko w dalszej – aplikacyjnej części pracy, w oparciu o wyniki własnych pomiarów parametrów transmisyjnych kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6 zostanie poddane szczegółowej analizie.

Na podstawie dokonanej w niniejszym podrozdziale analizy należy stwierdzić, że wraz ze wzrostem ilości granic ziaren w miedzi obserwuje się niekorzystny wzrost rezystywności materiału. Ponadto, w przeciwieństwie do innych defektów struktury takich jak dyslokacje lub wakanse wpływ ten nie jest liniowy, a zależność pomiędzy granicami ziaren a rezystywnością miedzi można określić eksperymentalną zależnością (2.3.13). Ponadto należy wyraźnie zaznaczyć, że chociaż obecne w materiale zanieczyszczenia nie wpłyną na zmianę trendu kształtowania się charakterystyk zależności rezystywności od ilości granic dla drutów miedzianych, to zauważalny jest ich wpływ na zmiany wartości rezystywności, które z kolei różnicują wartości parametrów  $a$  oraz  $b$ .

Dokonując podsumowania przeprowadzonych rozważań na temat wpływu obecnych w miedzi granic ziaren na własności elektryczne materiału warto podkreślić, że z uwagi na fakt, iż stanowiące przedmiot zainteresowania niniejszej dysertacji wysokozaawansowane aplikacje kablowe znajdują zastosowanie jako systemy przesyłowe prądu w temperaturach otoczenia, a nie w zakresie temperatur kriogenicznych to całość niniejszej pracy skupia się tylko na pomiarach własności użytkowych materiału w temperaturze otoczenia. Biorąc pod uwagę tradycyjny przypadek stanowiący, że w temperaturze otoczenia wpływ składnika termicznego pochodzącego od drgań cieplnych jest duży, a pochodzące od defektów struktury – granic ziaren zaburzenia kształtują się na istotnie mniejszym poziomie, to zakładając niezmienność składu chemicznego badanych materiałów oraz taki sam cykl badawczy dla wszystkich próbek można wyeliminować składową fononową i chemiczną. Należy pamiętać, że zawsze decydujący wpływ na kształtowanie własności elektrycznych miedzi będzie odgrywała jej struktura utożsamiana z ilością granic ziaren. Ponadto w obliczu obserwowanej współcześnie na świecie ekspansji nowoczesnych metod ciągłego odlewania miedzi (Upcast, Rautomead, Ohno) o ukierunkowanej strukturze i jak najmniejszej ilości granic ziaren na przekroju wpływ ten zawsze będzie zauważalny. Znajomość tej tematyki umożliwia poprawną analizę wyników zarówno własności fizykochemicznych drutów miedzianych, jak i parametrów transmisyjnych gotowych konstrukcji przewodowych, które to zagadnienia stanowiąc będą ciąg dalszy niniejszych rozważań w ramach kolejnych rozdziałów dysertacji.

## 2.4. Podsumowanie

Dynamiczny rozwój rynku wyrobów elektronicznych, w tym kabli i przewodów, w szczególności do niszowych zastosowań (przewody do instalacji czasowo odpornych na działanie ognia, cienkie

przewody emaliowane, kable dla teleinformatyki, mikrodruty wykorzystywane w technologii audio-video, osprzęt i urządzenia elektryczne) determinuje coraz to wyższe wymagania stawianej tej grupie aplikacji. Przekładają się one na wszystkie elementy składowe ich budowy, przy czym biorąc pod uwagę, że metale stanowią tradycyjnie niezmienną część konstrukcji kablowej, to prowadzone współcześnie prace naukowe nad tym zagadnieniem w wielu światowych ośrodkach naukowych i laboratoriach badawczych koncentrują się na poszukiwaniu nowych gatunków materiałów wysokoprzewodzących. Pomijając nadprzewodniki, których uzyskanie stwarza wiele problemów natury technicznej oraz wymaga wysokich nakładów finansowych, to miedź oraz różne jej strukturalne odmiany długo jeszcze będą bezsprzecznie dominować w przemyśle elektrotechnicznym.

Obserwowane dążenie do uzyskiwania coraz to wyższej przewodności elektrycznej miedzi na poziomie każdego, nawet najmniejszego ułamka MS/m ma istotne znaczenie z punktu widzenia efektywności wykorzystania energii elektrycznej. Renesans tej tematyki nie powinien zatem dziwić, tym bardziej, że proces podnoszenia czystości metalurgicznej katod został opanowany – zarówno przy pomocy tradycyjnych technologii elektrorafinacji, jak i metody ISA. Umożliwiają one uzyskiwanie materiałów o bardzo niskich zawartościach atomów pierwiastków domieszek, dzięki czemu możliwe stało się sterowanie i kontrola procesu elektrolizy na poziomie jaki był nieosiągalny jeszcze 20 lat temu. Granicznymi klasami czystości chemicznej materiałów stała się zatem miedź 3N (tj. 99,90 % Cu) oraz 4N (99,99 % Cu) i chociaż znane są próżniowe metody otrzymywania miedzi 8N, to z uwagi na fakt, iż przedmiotem zainteresowania wielu, bardzo zróżnicowanych pod kątem warunków pracy aplikacji elektrycznych są materiały techniczne o powszechnym zastosowaniu, poszukuje się jeszcze nowszych metod wzrostu wartości konduktywności miedzi. Co więcej, to miniaturyzacja i dbałość o najwyższą jakość przesyłu sygnału elektrycznego wymusza stale nowatorskiej rozwiązania techniczne umożliwiające głęboki przerób miedzi o wysokiej czystości chemicznej na druty i mikrodruty o średnicach poniżej 0,1 mm.

Kierunek rozwoju tych prac w ostatnich trzech dekadach dotyczy opracowywania i wdrażania w przemysłowych warunkach zakładów metalurgicznych innowacyjnych technologii ciągłego odlewania miedzi beztlenowej o ukierunkowanej strukturze charakteryzującej się zminimalizowaną ilością granic ziaren w materiale. Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej stanu zagadnienia stwierdzono bowiem, że ilość obecnych w materiale defektów powierzchniowych decyduje o wielkości negatywnego zjawiska rozpraszania elektronów przewodnictwa w miedzi. W szczególności, im liczba granic ziaren jest większa tym bardziej rezystywność materiału wzrasta. Efektem są obserwowane w przypadku wysokozaawansowanych wieloparowych aplikacji kablowych przesyłu danych, dźwięku i obrazu wysokie wartości tłumienności kabli, które odpowiedzialne są za duży poziom sumarycznych strat przesyłanych sygnałów elektrycznych. To właśnie rozwój nowatorskich technologii ciągłego topienia katod najwyższej czystości chemicznej w gatunku Cu-CATH-1 (LME Grade-A), ale w szczególności ekspansja na rynku innowacyjnych sposobów ciągłego odlewania miedzi beztlenowej o strukturze kilkuziarnowej (m.in. Ohno) pozwala na minimalizację występujących zniekształceń i zakłóceń w przesył elektronów.

Należy ponadto zaznaczyć, że cechą charakterystyczną nowych technologii ciągłego odlewania miedzi beztlenowej stała się możliwość sterowania parametrami technologicznymi procesu takimi jak: prędkość odlewania, wydatek wody w strefie chłodzenia pierwotnego, czyli w krystalizatorze, a także na wyjściu materiału z krystalizatora – tj. w układzie chłodzenia wtórnego. Oprócz tego także odpowiednie ukształtowanie relacji ilości przepływu medium chłodzącego w omawianych dwóch strefach umożliwia ukierunkowanie struktury materiału charakteryzującej się, w zależności od przyjętych parametrów technicznych, budową począwszy od kilku ziaren do ich większej ilości na przekroju poprzecznym materiału.

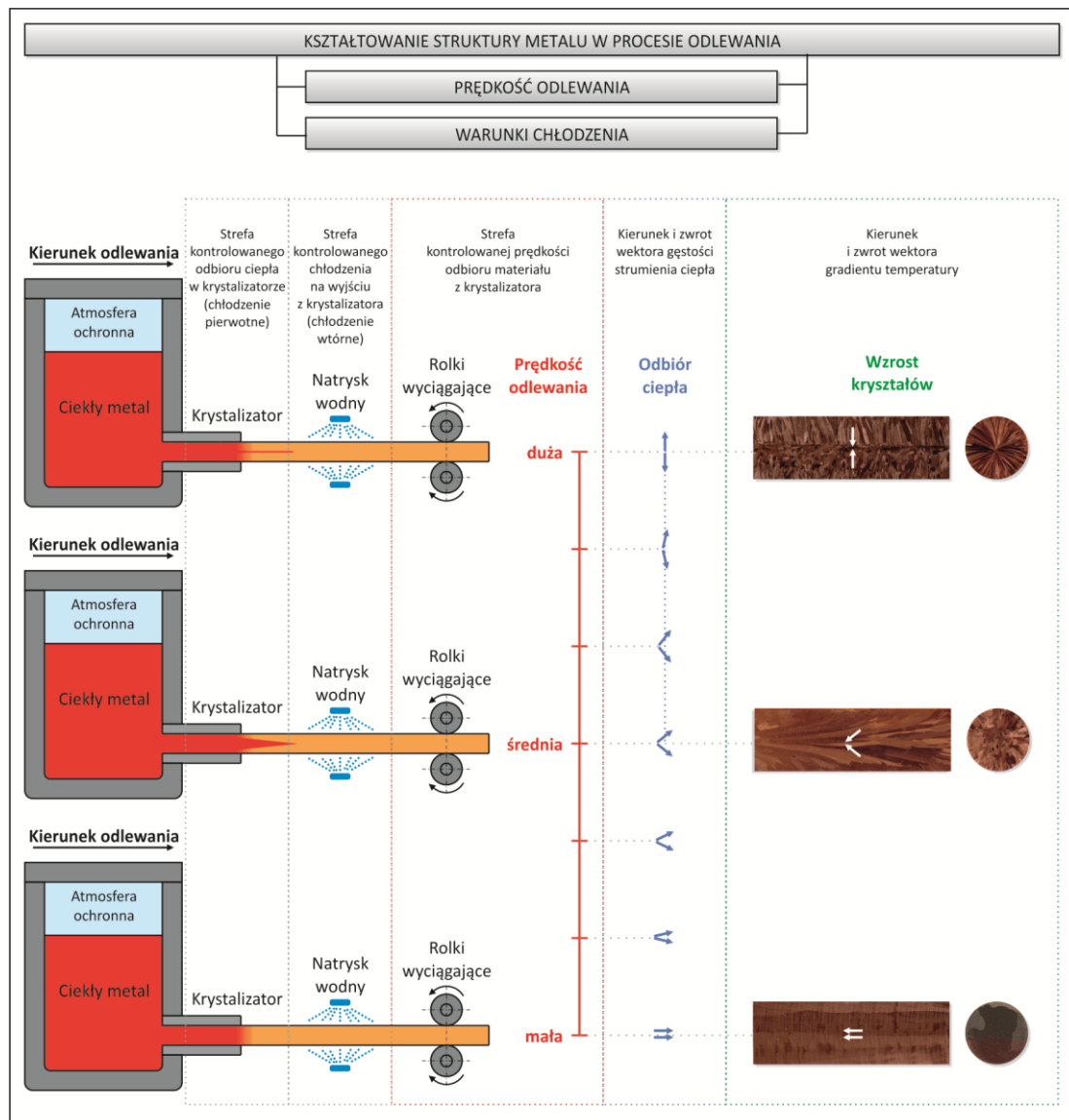
Zatem innowacyjne rozwiązania technologiczne w procesy ciągłego odlewania materiału beztlenowego stworzyły podstawy do postawienia w ramach niniejszej dysertacji pytania: w jakim stopniu proces sterowania stanem strukturalnym miedzi najwyższej czystości chemicznej w gatunku Cu-OFE wpływa na zmianę własności materiałowych i technologicznych drutów oraz parametrów transmisyjnych mierzonych prądem niskiej i wysokiej częstotliwości w przypadku kabli teleinformatycznych przesyłu danych?

Zagadnienia te stanowią przedmiot dysertacji i zostały sformułowane w postaci tezy zamieszczonej w kolejnym rozdziale pracy.

## Rozdział 3 Teza pracy

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej procesu krzepnięcia miedzi wysokiej czystości chemicznej stwierdzono, że strukturę materiału uzyskiwanego sposobem ciągłego odlewania można kształtować poprzez zmianę parametrów prowadzenia procesu. W szczególności obejmują one temperaturę przegrzania ciekłego metalu, prędkość odlewania oraz relację pomiędzy warunkami chłodzenia w strefie pierwotnej (tj. w krystalizatorze) i wtórnej (tj. poza krystalizatorem). Niezmiernie ważnym z materiałowego punktu widzenia jest fakt, że stan strukturalny miedzi określa poziom uzyskiwanych przez materiał własności mechanicznych i elektrycznych w dalszych procesach przetwórczych.

W związku z powyższym pojawia się pytanie o istotność wpływu zróżnicowanych parametrów procesu odlewania na budowę wewnętrzną miedzi beztlenowej – która wyraża się różną ilością oraz ukierunkowaniem ziaren na przekroju wzdłużnym – a także na jej właściwości materiałowe i technologiczne. Odpowiedź w tej kwestii umożliwia analiza ilustracji przedstawiającej omawianą problematykę.



Rys. 3.1. Sposób kształtowania struktury miedzi beztlenowej w procesie ciągłego odlewania

Na rysunku 3.1 zilustrowano trzy schematy kształtowania struktury miedzi beztlenowej metodą ciągłego odlewania, na których wyróżniono najważniejsze etapy procesu obejmujące trzy strefy: kontrolowanego odbioru ciepła w krystalizatorze, kontrolowanego chłodzenia na wyjściu z krystalizatora oraz kontrolowanej prędkości i sposobu odbioru materiału z krystalizatora. Celem pierwszego etapu jest stworzenie optymalnych warunków do kierunkowej krystalizacji, zadaniem drugiego – intensywne i wtórne chłodzenie, natomiast trzecia strefa odpowiedzialna jest za panowanie nad kształtem i położeniem frontu krystalizacji względem płaszczyzny przejścia metalu ze strefy chłodzenia pierwotnego do wtórnego. Taka koncepcja trzech kontrolowanych stref (krystalizacji, chłodzenia i odbioru materiału) umożliwia rotację wektora gradientu temperatury w płaszczyźnie wzdłużnej względem osi odlewanej materiału.

Parametry charakterystyczne dla każdego z trzech wyróżnionych obszarów w procesie ciągłego odlewania zostały skorelowane z wektorami gęstości strumienia ciepła i gradientu temperatury, a także schematycznie zilustrowane przy pomocy strzałek. Obowiązuje przy tym zasada, że zwrot wektora gęstości strumienia ciepła jest zgodny z kierunkiem spadku temperatur, a zwrot wektora gradientu temperatury (tożsamy z wektorem wzrostu kryształów) jest skierowany przeciwnie tj. od temperatury niższej do wyższej. Zauważa się zatem, iż wektory gęstości strumienia ciepła skierowane są zawsze zgodnie z kierunkiem największych zmian temperatury i mają zwrot zgodny ze spadkiem temperatury, czyli odwrotny do jej gradientu.

Idea procesu zawarta w zmianie prędkości odlewania oraz wprowadzeniu zarówno strefy kontrolowanego odbioru ciepła w krystalizatorze, jak i strefy intensywnego chłodzenia na wyjściu materiału z krystalizatora polega na tym, aby kierunek odbioru ciepła stawał się coraz to bardziej zgodny z kierunkiem osi odlewanej materiału. Taki sposób odlewania powinien prowadzić do widocznych zmian w strukturze miedzi, co zostało zilustrowane na powyższym rysunku. Ponadto ilość kryształów w materiale można minimalizować poprzez zmniejszenie szybkości odlewania, natomiast ich wzajemne ukierunkowanie zależne jest od warunków chłodzenia tj. intensywności odbioru ciepła w strefie pierwotnej i wtórnej. Tym samym powyższa koncepcja stała się podstawą do sformułowania tezy, iż:

- 1. Poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu odlewania tj. prędkości oraz relacji ilości wody chłodzącej w układzie pierwotnym i wtórnym możliwe jest kształtowanie struktury miedzi beztlenowej poprzez zmianę kierunku wektora gradientu temperatury na froncie krystalizacji metalu. W szczególności odpowiedni dobór parametrów procesu odlewania pozwoli na redukcję ilości ziaren na przekroju materiału z jednoczesnym ukierunkowaniem ich budowy (morfologii) równoległe do osi odlewanej metalu.*
- 2. Postuluje się, że taki rodzaj materiału określany mianem miedzi funkcjonalnie doskonałej o zminimalizowanej ilości defektów struktury (głównie granic ziaren) gwarantuje ponadstandardowe – w porównaniu do tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne miedzi w gatunku Cu-ETP – własności, które tym samym pozwolą na minimalizację stratności przesyłu sygnału elektrycznego w wysokozaawansowanych aplikacjach kablowych. Ograniczenie problemu stratności w teleinformatycznych konstrukcjach przewodowych tego typu zależy m.in. od rodzaju materiału zastosowanego do budowy centralnego przewodnika tj. żyły przewodzącej. Problematyka ta będzie przedmiotem rewizji w ramach niniejszej pracy.*

## Rozdział 4

### Cel i zakres pracy

Wyraźnie zauważa się, że omawiana grupa zagadnień doprowadziła w ostatnich latach, z jednej strony do ożywienia zainteresowania laboratoriów przemysłowych poszukiwaniem nowych rozwiązań w zakresie kierunkowej krystalizacji struktury miedzi beztlenowej, co przekłada się na wyższe wymagania wobec całego zespołu elektryczno-technologicznych właściwości drutów, z drugiej zaś do potrzeby opracowania oryginalnych sposobów ciągłego odlewania prętów z miedzi o najwyższej czystości chemicznej i jak najniższej ilości defektów. Wobec powyższego w ramach niniejszej pracy za cel naukowy postawiono badania wpływu parametrów procesu odlewania na kształtowanie stanu strukturalnego oraz wynikających z niego własności materiałowych i technologicznych miedzi beztlenowej pod kątem bezpośredniego zastosowania materiału w wysokozaawansowanych aplikacjach kablowych. Jest to realizacja w oparciu o eksperymenty prowadzone w warunkach laboratoryjnych na nowo opracowanej instalacji do wytwarzania prętów z miedzi beztlenowej o ukierunkowanej strukturze w warunkach zmiennej prędkości odlewania oraz przy zróżnicowanym wydatku wody chłodzącej jako metoda umożliwiająca uzyskanie materiałów o ponadstandardowym zespole własności użytkowych. Charakter realizowanych w ramach dysertacji badań w dużym stopniu dotyczy także drugiego – aplikacyjnego kierunku pracy, którym jest wytworzenie konstrukcji przewodowych z żyłami z różnych gatunków miedzi umożliwiających optymalizację pracy kabli z punktu widzenia stratności przesyłu sygnału elektrycznego. Jest to zespół metod badawczych zmierzających do parametryzacji cech materiałowych miedzi wysokiej czystości chemicznej w teleinformatycznych konstrukcjach kablowych.

Zgodnie z przedstawioną tezą problematyka stanowiąca przedmiot pracy obejmuje swoim zakresem dwa główne obszary tematyczne dotyczące badań o charakterze doświadczalnym (rozdział 9) i aplikacyjnym (rozdział 10).

Pierwszy zakres to realizacja w warunkach laboratoryjnych (stanowisko DCC-AGH) oraz przemysłowych (instalacja Upcast i Rautomead) procesu ciągłego odlewania miedzi w gatunku Cu-OFE charakteryzującej się zróżnicowanym stanem strukturalnym kształtowanym pod wpływem zmiennych parametrów technologicznych (szybkość odlewania, wydatek wody chłodzącej).

Uzyskane w ten sposób materiały w postaci prętów o średnicach nominalnych 8,0 mm zostaną następnie poddane szczegółowej identyfikacji materiałowej, zarówno pod kątem składu chemicznego, struktury, jak i zespołu własności mechaniczno-elektrycznych. Badania doświadczalne obejmują także proces ciągnięcia, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych otrzymanych materiałów wsadowych na druty i mikrodruty o różnorodnych średnicach, które następnie poddane zostaną badaniom odporności cieplnej i własności elektrycznych. Cel zawarty jest w określeniu wpływu stanu początkowego materiału na jego podatność do odkształcenia i wyzarzania, a także na uzyskane własności materiałowe. Dla celów porównawczych przeprowadzony zostanie taki sam program badań dla tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne walcówki z miedzi gatunku Cu-ETP z linii Contirod, jako punktu odniesienia.

Drugi zakres tematyczny pracy dotyczy badań aplikacyjnych nad wykonaniem kilku konstrukcji kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6 z żyłami przewodzącymi z miedzi beztlenowej i tlenowej oraz przeprowadzenie serii pomiarów wytworzonych przewodów pod kątem ich parametrów transmisyjnych (badania prądem niskiej i wysokiej częstotliwości).

Realizacja tak przedstawionych w ramach poszczególnych zakresów pracy badań, pozwoli m.in. odpowiedzieć na pytanie, czy zmiana parametrów technologicznych prowadzonego procesu ciągłego odlewania miedzi beztlenowej wpływająca na stan strukturalny oraz na właściwości mechaniczne i fizykochemiczne drutów wpłynie na cechy transmisyjne torów w kablach przesyłu danych, dźwięku i obrazu. Przedstawiona w dysertacji kompleksowa wiedza oparta na analizie korelacji rodzaju budowy wewnętrznej miedzi wysokiej czystości chemicznej z parametrami elektrycznymi konstrukcji przewodowych kabla to zupełnie nowe, innowacyjne podejście do zagadnienia, które może być wykorzystywane przez inżynierów i konstruktorów z obszaru technologii kablowych.



## Rozdział 5

### Koncepcja rozwiązania tematu pracy

Koncepcja rozwiązania tematu pracy polega na opracowaniu nowego sposobu ciągłego odlewania miedzi beztlenowej umożliwiającego sterowanie kierunkiem wektora gradientu temperatury w strefie krzepnięcia, co pozwoli poprzez odpowiedni dobór prędkości odlewania i relacji chłodzenie pierwotne/chłodzenie wtórne na sterowanie ilością i kierunkiem wzrostu kryształów. W szczególności umożliwi dążenie do uzyskania struktury kilkuziarnowej o kierunku kryształów zgodnym z osią odlewanej materiału. Podstawę realizacji pomysłu, stanowiącego część wstępną programu pracy jest projekt, wykonanie i uruchomienie laboratoryjnego stanowiska do procesu ciągłego – poziomego odlewania miedzi wysokiej czystości chemicznej. W związku z powyższym w ramach dysertacji zagadnieniem technicznym wymagającym analizy stało się także opracowanie konstrukcyjne krystalizatora wykonanego z grubościenną ścianką grafitową o małym współczynniku odprowadzania ciepła, którego odpowiednia długość umożliwia ustalenie położenia i kształtu frontu krystalizacji. Warty podkreślenia jest, że opracowany sposób zapobiega krzepnięciu miedzi przy wewnętrznej ściance izolowanego krystalizatora utworzonego przez bimetalową tuleję złożoną z obudowy grafitowej i obejmy stalowej, który to proces rozpoczyna się natychmiast z chwilą kontaktu ciekłego materiału z metalowym elementem startowym.

Zaletą podjętej w ramach dysertacji nowatorskiej koncepcji ciągłego odlewania jest możliwość otrzymywania miedzi o zmniejszonej ilości defektów struktury – jako miejsc rozpraszających elektrony przewodnictwa elektrycznego, co nabiera szczególnego znaczenia w związku z zastosowaniem materiału w gatunku Cu-OFE w wysokozaawansowanych konstrukcjach kablowych. Ponadto omawiana instalacja poprzez doprowadzenie stopionego metalu do układu wyciągającego i jego krzepnięcie w jednym określonym kierunku umożliwia uzyskanie miedzi beztlenowej o budowie strukturalnej podatnej do procesu dalszego przetwórstwa na drodze walcowania lub ciągnięcia i wolnej od wad wewnętrznych.

Zgodnie z opisem przedstawionym w preambule do tezy wykonane i uruchomione stanowisko oprócz wielowarstwowego, grubościennego krystalizatora wyposażone zostało w układ intensywnego, wtórnego chłodzenia znajdujący się tuż przy powierzchni odlewu, co umożliwia kształtowanie budowy strukturalnej o kontrolowanym kierunku wzrostu kryształów. Wynika to bowiem z charakterystyki procesu krzepnięcia, a dokładniej ze sposobu odbierania ciepła przez krystalizator – rozkładu zmieniającego kierunku wektora gradientu temperatur na froncie krystalizacji metalu z promieniowego na osiowy (płaski front krystalizacji). Urządzenie stanowiące przedmiot dwóch zgłoszeń patentowych [93, 94] umożliwia bowiem spełnienie zależności, że różnica temperatur pomiędzy ciekłym metalem w krystalizatorze a jego ściankami ( $\Delta T_1$ ) jest mniejsza niż różnica temperatur pomiędzy ciekłym metalem w krystalizatorze, a skrzystalizowaną już częścią materiału ( $\Delta T_2$ ) zgodnie z zależnością:  $\Delta T_1 < \Delta T_2$ . Zaprojektowana laboratoryjna instalacja umożliwia osiągnięcie tego celu poprzez umiejętne sterowanie zarówno prędkością odlewania, jak i warunkami chłodzenia. Poprzez zmianę szybkości prowadzenia procesu, jak i poprzez wprowadzenie kontrolowanej strefy układu chłodzenia uzyskana zostaje zgodność kierunku odbioru ciepła z kierunkiem osi odlewanej wyrobu. Należy w tym miejscu zacytować pracę grupy japońskich inżynierów z profesorem Ohno [57], w której przedstawili podobną koncepcję sterowania strukturą odlewanej materiału i uzyskali w skali laboratoryjnej pręty miedziane o długiej, kilkuziarnowej strukturze.

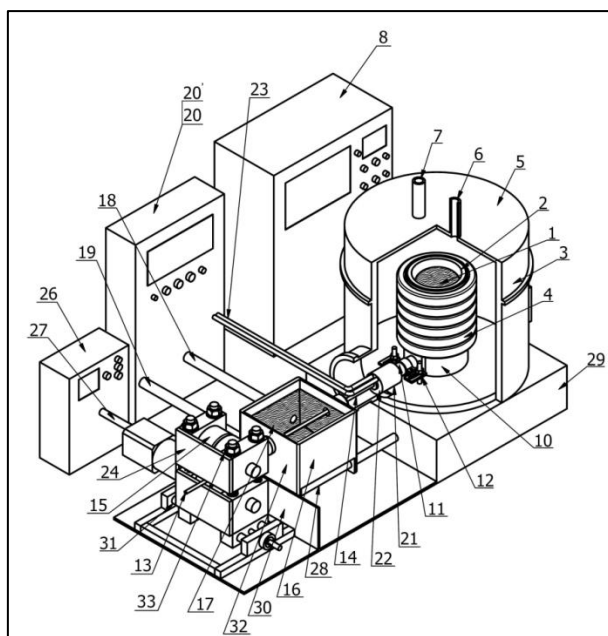
Opracowana w ramach dysertacji autorska technologia produkcji materiału wsadowego o ukierunkowanej strukturze, pozwoli w dalszym przetwórstwie w procesach przeróbki plastycznej na zimno uzyskać mikrodruty pozwalające na zmniejszenie powszechnego dla kabli przesyłu danych, dźwięku i obrazu problemu tłumienności. Przedstawiona koncepcja stwarza podwaliny eksperymentalnego dowodzenia postawionej tezy pracy.

## Rozdział 6

### Stanowisko do wytwarzania materiałów wsadowych o ukierunkowanej strukturze

Zgodnie z przyjętą koncepcją rozwiązania tematu proces ciągłego odlewania realizowano na specjalnie zaprojektowanym do tego celu i wykonanym w oparciu o światowe standardy unikalnym stanowisku odlewniczym w Katedrze Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych na Wydziale Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej.

Instalacja skonstruowana specjalnie na potrzeby pracy doktorskiej umożliwia kompleksowe badania i analizę wpływu zarówno budowy strukturalnej, jak i czystości chemicznej materiału na właściwości drutów analizowane pod kątem stratności przesyłu sygnału elektrycznego w konstrukcjach kablowych. Na rysunku 6.1 przedstawiono schemat urządzenia w widoku perspektywnym, natomiast na kolejnej ilustracji 6.2 widok z boku. Zamieszczone oznaczenia poszczególnych części konstrukcyjnych dotyczą: 1 – ciekła miedź; 2 – tygiel grafitowy; 3 – piec topliwny; 4 – cewka indukcyjna; 5 – pokrywa zamykająca pieca topliwego; 6, 7 – rurki gazoszczelne; 8 – układ regulacji parametrów pieca topliwego; 9 – otwór w ścianie tygla; 9' – tuleja; 10 – ściana boczna tygla; 11 – izolowany krystalizator; 12 – układ mocujący krystalizator; 13 – miedziany element startowy; 14 – odlany materiał; 15 – rolki dociskowe; 16 – strefa układu chłodzenia wtórnego; 17 – medium chłodzące; 18, 19 – gazoszczelne rurki; 20 – układ sterownia strefą chłodzenia; 20' – skrzynka sterownicza; 21 – strefa układu chłodzenia pierwotnego; 22 – tuleja zamykająca; 23 – rurka gazoszczelna; 24 – zestaw wyciągający; 25 – para rolek prowadzących; 26 – układ regulacji sterowania; 27 – zestaw zasilania; 28 – prowadnica; 29 – podstawa pieca topliwego 3; 30 – blacha układu wyciągającego; 31 – prowadnica układu wyciągającego; 32 – obudowa metalowa strefy układu chłodzenia wtórnego; 33 – śruby regulujące siłę docisku rolek.

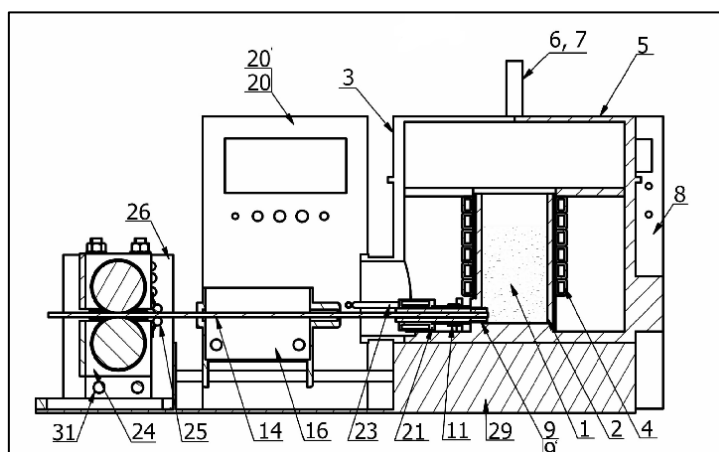


Rys. 6.1. Stanowisko do wytwarzania materiałów wsadowych o ukierunkowanej strukturze w schematycznym widoku perspektywnym – projekt własny (zgłoszenie patentowe nr PL 393457 A1) [93]

Z uwagi na fakt, iż omawiana instalacja umożliwia realizację procesu ciągłego odlewania miedzi beztlenowej (oraz innych materiałów krystalicznych) o ukierunkowanej strukturze charakteryzującej się ziarnami wydłużonymi w kierunku odprowadzania ciepła przyjęta została nazwa własna stanowiska DCC-AGH pochodząca od angielskiego terminu Directional Continuous Casting. Dokonując krótkiej analizy zaprojektowanego urządzenia należy zaznaczyć, że wyposażone zostało w podgrzewany za

pomocą cewki indukcyjnej (4) tygiel (2) znajdujący się w piecu topielnym (3). Od góry zamknięty jest w sposób szczelny pokrywą (5), na powierzchni której zostały umieszczone gazoszczelne rurki (6, 7) służące do wprowadzania gazu ochronnego do wewnętrznej części pieca i jego wyprowadzania. Powierzchnia ciekłej miedzi (1) jest zatem skutecznie chroniona przed utlenianiem, a problem dostępu tlenu do materiału został całkowicie wyeliminowany. Grafitowy tygiel (2) za pomocą układu mocującego (12) znajdującego się w otworze (9) jego ściany bocznej (10) połączony został z grubościennym, izolowanym krystalizatorem (11), który ma kształt przelewowej rynny o wielowarstwowej ściance. Na jego powierzchni znajduje się natomiast strefa układu chłodzenia pierwotnego (21) w formie metalowej tulei (9'). Jak nadmieniono we wcześniejszym etapie pracy na wyjściu odlewu (14) z krystalizatora (11) znajduje się strefa układu chłodzenia wtórnego (16) regulowana za pomocą automatycznego układu sterowania (20) i rozprowadzająca medium (17) na powierzchnię miedzi (14), która kolejno kierowana jest do zestawu wyciągającego (24).

Z kolei proces ciągłego odlewania materiału w gatunku Cu-OFE polega na wprowadzeniu miedzianego elementu startowego (13) poprzez jego przejście przez izolowany krystalizator (11) do pieca topielnego (3) aż do chwili zetknięcia się z ciekłym metalem (1), po czym następuje jego ruch wywołany za pomocą automatycznego zestawu zasilania (27). W początkowym etapie procesu następuje poddawanie ciekłej miedzi (1) procesowi chłodzenia za pomocą medium chłodzącego (17) znajdującego się w metalowej tulei (22) zamykającej w sposób szczelny izolowany krystalizator (11), po czym wraz z wyjściem materiału z krystalizatora (11) następuje zamknięcie obiegu strefy układu chłodzenia pierwotnego (21), a następnie odlana miedź poddawana jest chłodzeniu za pomocą strefy wtórnej (16), która umiejscowiona została na wyjściu z krystalizatora (11) przy powierzchni odlanego materiału. Po przejściu końca pręta przez obszar układu chłodzenia wtórnego (16) materiał kierowany jest do zestawu wyciągającego (27) złożonego z rolek dociskowych (15) i prowadzących (25), których siła regulowana jest za pomocą śrub (33).

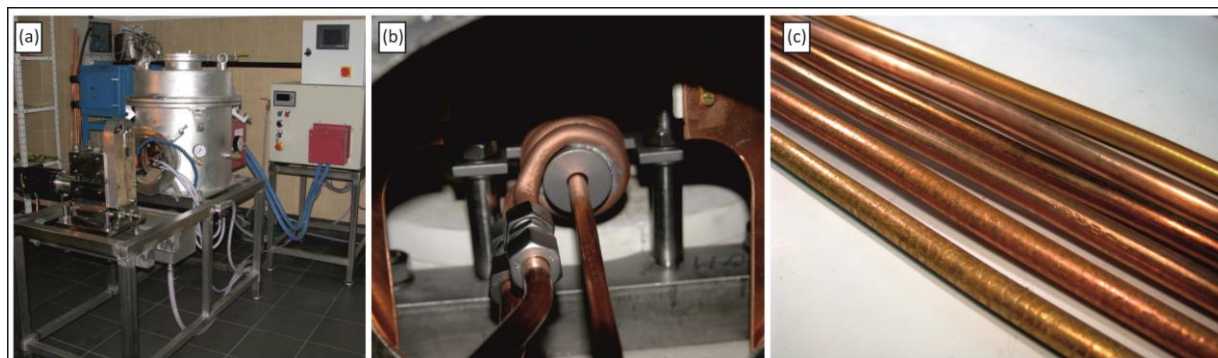


Rys. 6.2. Stanowisko do wytwarzania materiałów wsadowych o ukierunkowanej strukturze w schematycznym widoku z boku – projekt własny (zgłoszenie patentowe nr PL 393457 A1) [93]

Cechą znaną stanowiska jest zastosowanie wysokowydajnego, izolowanego krystalizatora o prostej i nieskomplikowanej budowie oraz układu wtórnego chłodzenia za pomocą m.in. gazów chłodzących – ciekłego azotu, co umożliwia kształtowanie struktury miedzi o ograniczonej ilości ziaren i ich dowolnym ukierunkowaniu. Należy zaznaczyć, iż omawiany krystalizator znajduje się w położeniu poziomym, korzystnie delikatnie pochylony w dół o kąt o wartości od  $1^\circ$  do  $10^\circ$  od jego strony wejściowej w kierunku do strony wyjściowej. Wartości wynikają z prowadzonych w ramach dysertacji wielu doświadczalnych eksperymentów nad procesem ciągłego odlewania i związanych z nimi własnych obserwacji. Dokonując kompleksowej analizy budowy krystalizatora wartym podkreślenia jest, że przyjmuje on formę jedno lub wielowarstwowej tulei bimetalowej składającej się obudowy z grafitu (mały współczynnik odprowadzania ciepła) oraz obejmy stalowej. Opcjonalnie, dla uzyskania odpowiednio wysokiej temperatury ciekłego metalu w strefie krzepnięcia korzystnym jest wykorzystanie wersji krystalizatora wyposażonego w strefę podgrzewania (a nie chłodzenia), co istotnie zmienia relację chłodzenie pierwotne/chłodzenie wtórne i pozwala na ukierunkowanie wektora gradientu temperatury kolinearnie z wektorem prędkości odlewania (zgodnie z osią odlewanej pręta).

Z kolei strefa układu chłodzenia pierwotnego utworzona jest z metalowej spirali zawierającej ciecz chłodzącą i zamykającej w sposób szczelny omawiany krystalizator. Układ chłodzenia wtórnego stanowi natomiast obudowa metalowa o kształcie prostokątnego naczynia składająca się z dyszy (nieuwidocznionej na ilustracjach 6.1 i 6.2) ułożonej przeciwnie do kierunku ruchu odlewanej miedzi beztlenowej.

Na rysunku 6.3 zilustrowano ogólny widok na całą instalację (a), a także zbliżenie na układ krystalizacji (b) i na gotowe pręty (c) dedykowane pod specjalne zastosowania elektryczne.



Rys. 6.3. Widok pieca topielnego do indukcyjnego topienia i odlewania metali – a, układu krystalizacji – b oraz uzyskanych prętów – c – projekt własny (zgłoszenie patentowe nr PL 393457 A1, PL 393656 A1) [93, 94]

W tabeli 6.1 zamieszczono podstawowe dane techniczne pieca do indukcyjnego topienia i odlewania miedzi.

Tabela 6.1. Podstawowe dane techniczne pieca do indukcyjnego topienia i odlewania miedzi

Parametr	Jednostka	Wartość
Napięcie zasilania	[V]	400
Moc podłączeniowa przemiennika	[kVA]	22
Moc czynna przemiennika, max.	[kW]	20
Częstotliwość przemiennika, min./nom./max.	[kHz]	20/25/43
Napięcie wyjściowe, max.	[V]	750
Temperatura wody chłodzącej, min./max.	[°C]	10/28
Ciśnienie wody chłodzącej, min./max.	[MPa]	0,3/0,5
Zużycie wody chłodzącej dla $t_{we}, = 25\text{ °C}$ , $p = 0,3\text{ MPa}$	[l/min.]	20

Prowadzenie procesu odlewania wymaga doboru odpowiednich parametrów w taki sposób, aby spełniona była równowaga bilansu cieplnego. Składowe wpływające na ciepło odebrane od metalu to ciepło przegrzania, ciepło krystalizacji i ciepło chłodzenia odlewu. Na ciepło odebrane przez wodę składa się natomiast jej gęstość i ciepło właściwe, a także temperatura na wejściu i wyjściu z krystalizatora. Zależności te przedstawiono za pomocą wzorów:

$$q_m = q_w \quad (6.1)$$

$$q_m = q_{prz} + q_{kr} + q_{chl} \quad (6.2)$$

$$q_{prz} = \gamma_c c_{pc} (T_{zal} - T_{kr}) \quad (6.3)$$

$$q_{chl} = \gamma_s c_{ps} (T_{kr} - T_{konc}) \quad (6.4)$$

$$q_w = \gamma_w c_{pw} (T_{kw} - T_{pw}) \quad (6.5)$$

gdzie:

$q_m$  – ciepło odebrane od metalu podczas odlewania [J],

$q_w$  – ciepło odebrane od metalu przez wodę [J],

$q_{prz}$  – ciepło przegrzania ciekłego metalu [J],

$q_{kr}$  – ciepło krystalizacji metalu [J],

$q_{chl}$  – ciepło odebrane od metalu podczas stygnięcia [J],

$\gamma_c$  – gęstość metalu (stan ciekły) [ $\text{kgm}^{-3}$ ],

- $\gamma_s$  – gęstość metalu (stan stały) [ $\text{kgm}^{-3}$ ],  
 $\gamma_w$  – gęstość wody [ $\text{kgm}^{-3}$ ],  
 $c_{pc}$  – ciepło właściwe metalu (stan ciekły) [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ],  
 $c_{ps}$  – ciepło właściwe metalu (stan stały) [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ],  
 $c_{pw}$  – ciepło właściwe wody [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ],  
 $T_{zal}$  – temperatura ciekłego metalu podczas zalewania do krystalizatora [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $T_{kr}$  – temperatura krzepnięcia metalu [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $T_{konc}$  – temperatura metalu na wyjściu z krystalizatora [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $T_{kw}$  – temperatura wody na wyjściu z krystalizatora [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 $T_{pw}$  – temperatura wody na wejściu do krystalizatora [ $^{\circ}\text{C}$ ],  
 zatem ostateczna postać bilansu będzie miała charakter:

$$\gamma_c c_{pc} (T_{zal} - T_{kr}) + q_{kr} + \gamma_s c_{ps} (T_{kr} - T_{konc}) = \gamma_w c_{pw} (T_{kw} - T_{pw}) \quad (6.6)$$

Poniżej w tabeli 6.2, w celu ilustracyjnych przedstawiono przykłady obliczeń bilansu cieplnego procesu topienia i odlewania pręta z miedzi. Założenia przyjęte do obliczeń:

- ciepło właściwe  $\text{H}_2\text{O} = 4000$  [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]
- gęstość  $\text{H}_2\text{O} = 1000$  [ $\text{kgm}^{-3}$ ]
- gęstość Cu (stan ciekły) = 7940 [ $\text{kgm}^{-3}$ ]
- gęstość Cu (stan stały) = 8940 [ $\text{kgm}^{-3}$ ]
- ciepło właściwe Cu (stan ciekły) = 490 [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]
- ciepło właściwe Cu (stan stały) = 380 [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] (w temperaturze otoczenia), 531 [ $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] (w temperaturze topnienia)
- ciepło krzepnięcia Cu = 210000 [ $\text{Jkg}^{-1}$ ]
- temperatura krzepnięcia Cu = 1083 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- temperatura ciekłego metalu = 1150 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- temperatura materiału po chłodzeniu pierwotnym = 200 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- temperatura materiału po chłodzeniu wtórnym 80 [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- średnica odlewanej pręta = 8 [mm]

Należy podkreślić, że obliczenia prowadzono dla transportu masy w interwale 1 sekunda, toteż obliczone wartości ciepła liczbowo równoważne są mocy.

Tabela 6.2. Przykładowe obliczenia parametrów bilansu cieplnego procesu topienia i odlewania pręta z miedzi

Prędkość odlewania	[m/min.]	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	1	1	1	1
Przepływ wody chłodzącej w układzie pierwotnym	[ $\text{dm}^3/\text{min.}$ ]	5	5	5	5	5	5	5	5	4	3	2	1
Przepływ wody chłodzącej w układzie wtórnym	[ $\text{dm}^3/\text{min.}$ ]	1	1	1	1	1	1	1	1	0,8	0,6	0,4	0,2
Masa odlewanej materiału	[g/s]	3,7	7,5	11,2	15	18,7	22,5	26,2	29,9	7,5	7,5	7,5	7,5
Ciepło przegrzania ciekłego metalu	[J]	128	257	385	514	642	770	899	1027	257	257	257	257
Ciepło krystalizacji metalu	[J]	786	1572	2358	3144	3930	4716	5502	6288	1572	1572	1572	1572
Ciepło odebrane w warunkach chłodzenia pierwotnego	[J]	1515	3030	4545	6060	7576	9091	10606	12121	3030	3030	3030	3030
Ciepło odebrane w warunkach chłodzenia wtórnego	[J]	171	341	512	683	853	1024	1195	1365	341	341	341	341
Ciepło odebrane całkowite	[J]	2600	5200	7801	10401	13001	15601	18201	20801	5200	5200	5200	5200
Ciepło odebrane na jednostkę masy	[kJ/kg]	694,7											
Przyrost temperatury wody w układzie chłodzenia pierwotnego	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	4,5	9,1	13,6	18	23	27	32	36	11	15	23	45
Przyrost temperatury wody w układzie chłodzenia wtórnego	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	2,6	5,1	7,7	10	13	15	18	20	6,4	8,5	13	26

## Rozdział 7

## Materiał do badań

Badania eksperymentalne prowadzone w ramach prac nad projektowaniem materiału wsadowego o własnościach wymaganych przez wysokozaawansowanej aplikacji elektryczne i elektrotechniczne polegają na określeniu wpływu, jaki wywiera zmiana warunków krystalizacji metalu w procesie ciągłego odlewania miedzi beztlenowej, zarówno techniką Upcast i Rautomead w warunkach przemysłowych, jak i laboratoryjną na stanowisku odlewniczym DCC-AGH, na kształtowanie budowy strukturalnej, która z kolei determinuje fizyczne i technologiczne własności materiału. Specyfika procesu ciągłego odlewania pozwala na zastosowanie zmiennych parametrów prędkości odlewania oraz wielkości wody chłodzącej, zarówno w układzie pierwotnym, jak i wtórnym. Oba te parametry odgrywają istotny wpływ na przebieg procesu krystalizacji ciekłego metalu. Ponadto dla celów porównawczych, jako punkt odniesienia przeprowadzono taki sam program badawczy dla tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne walcówki tlenowej z miedzi w gatunku Cu-ETP pochodzącej z linii Contirod. Podstawą takiej metodyki jest fakt, że miedź w gatunkach Cu-OFE i Cu-ETP to materiały wsadowe do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty o całkowicie odmiennych budowach strukturalnych wynikających ze zróżnicowanych sposobów ich wytwarzania, omówionych detalicznie w rozdziale drugim dysertacji.

Zatem do badań wytypowane zostały materiały wsadowe w postaci prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE o średnicy nominalnej 8 mm, w szczególności:

- uzyskane według fińskiej technologii Upcast, przekazane dla celów niniejszej dysertacji przez KGHM Huta Miedzi Cedynia i pochodzące z różnych prędkości odlewania tj.: 0,5 m/min.; 1,0 m/min.; 2,0 m/min.; 3,0 m/min.; 4,0 m/min.; przy przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie: 40 l/min., 50 l/min., i 60 l/min
- otrzymane według szkockiej technologii Rautomead przy zastosowaniu standardowych parametrów procesu odlewania (wartości podobne jak w przypadku instalacji Upcast) tj. szybkości 4,0 m/min. i wydatku wody chłodzącej wynoszącym 60 l/min. pochodzące z zakładu kablowego Tele-Fonika Kable (zakład Zajecar w Serbii),
- odlewane w warunkach laboratoryjnych na omówionym wcześniej stanowisku DCC-AGH, przy zastosowaniu następujących prędkości odlewania: 0,006 m/min.; 0,03 m/min.; 0,06 m/min.; 0,15 m/min.; 0,2 m/min. oraz wydatku wody chłodzącej na poziomie 0,1 – 0,4 l/min. w układzie pierwotnym i 0,2 – 1,0 l/min. w układzie wtórnym

Zbiorcze zestawienie materiału badawczego zamieszczono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Rodzaje materiałów do badań

Gatunek materiału wsadowego	Linia technologiczna	Producent materiału wsadowego	Średnica materiału wsadowego [mm]	Prędkość odlewania [m/min.]	Wydatek medium	
					chłodzenie pierwotne	chłodzenie wtórne
					[l/min.]	
Cu-OFE	Rautomead	Rautomead Limited	8,0	4,0	60	
	Upcast	KGHM Polska Miedź S.A. wg technologii Upcast OY Pori, Finlandia		4,0	40, 50, 60	
				3,0		
				2,0		
				1,0		
	DCC-AGH	AGH, WMN, KPPiMMN Kraków, Polska		0,5	60	
				0,2	0,5	1,0
				0,15	0,4	0,8
				0,06	0,3	0,6
				0,03	0,2	0,4
0,006			0,1	0,2		

Cu-ETP	Contirod	KGHM Polska Miedź S.A. wg technologii: Umicore – Bruksela, Belgia; Hazelett Strip Casting Corporation – Colchester, Wielka Brytania; Hüttenwerke Krupp Mannesmann – Duisburg, Niemcy	Prędkość walcowania: 30 m/s
--------	----------	--	-----------------------------

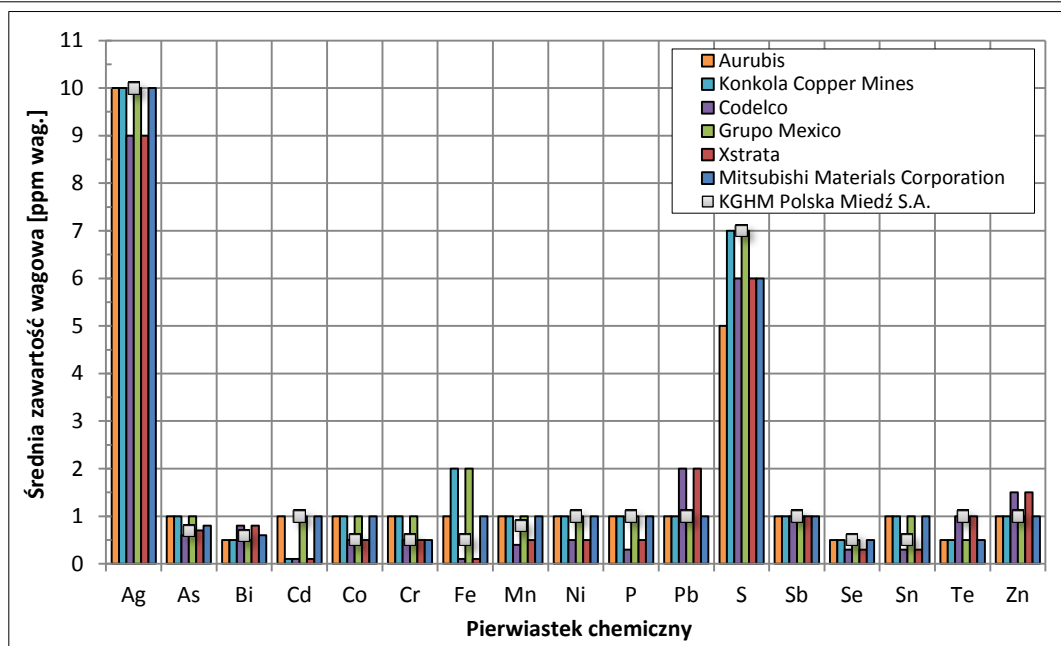
Jako standardowe półprodukty otrzymywane w warunkach przemysłowych oraz dedykowane do aplikacji elektrycznych i elektrotechnicznych uznawane są: walcówka tlenowa z miedzi w gatunku Cu-ETP użyta w niniejszych badaniach oraz pręty z miedzi beztlenowej uzyskane metodą Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej na poziomie 60 l/min. W przypadku drugiego z wymienionych materiałów są to maksymalne parametry instalacji umożliwiającej odlewanie sposobem „do góry”, które zapewniają największą wydajność procesu technologicznego. Jak nadmieniono w części literaturowej stanu zagadnienia niniejszej pracy sposób wytwarzania walcówki i prętów determinuje podstawowe różnice tych odmian miedzi (odmienność budowy strukturalnej, różnice składu chemicznego).

Omawiając wytypowane do badań w ramach pracy materiały w postaci walcówki z technologii Contirod oraz prętów z liniach Rautomead, Upcast i DCC-AGH należy dla porządku nadmienić, iż otrzymywane są w procesach ciągłego topienia katod w gatunku Cu-CATH-1, które na londyńskiej giełdzie metali oznaczane są one mianem Grade-A. Nazwa świadczy, że charakteryzują się najwyższą czystością chemiczną i jak najmniejszą ilością pierwiastków zanieczyszczeń. W Polsce ww. katody otrzymywane są metodą elektrorafinacji w Hutach Miedzi „Głogów I”, „Głogów II” i „Legnica”, a wyniki badań składu chemicznego zamieszczono w tabeli 7.2. Dla porównania przedstawiono także zawartości pierwiastków w katodach wytwarzanych przez największych innych producentów światowych. Na rysunku 7.1 zilustrowano natomiast w postaci graficznej rozkłady poszczególnych domieszek.

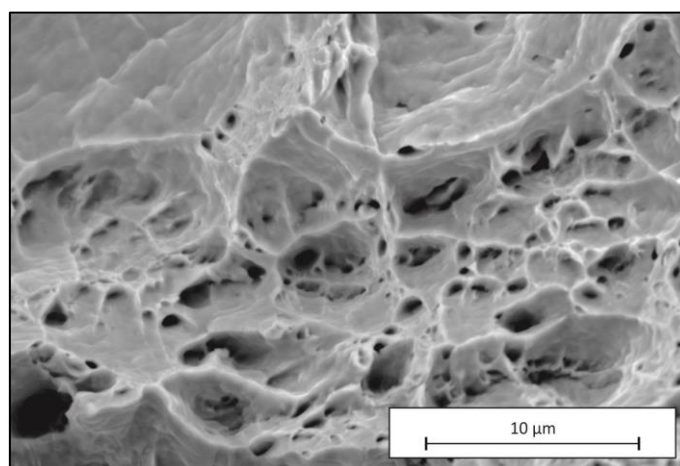
Tabela 7.2. Skład chemiczny katod w gatunku Cu-CATH-1 wg największych światowych producentów

Kontynent	Producent	Kraj	Zawartość wagowa pierwiastków [ppm wag.]																	
			Ag	As	Bi	Cd	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	P	Pb	S	Sb	Se	Sn	Te	Zn	Σ/{Ag}
Europa	KGHM Polska Miedź S.A.	Polska	10	0,7	0,6	1,0	0,5	0,5	0,5	0,8	1,0	1,0	1,0	0,7	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	19
	Aurubis	Niemcy	10	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	19
Afryka	Konkola Copper Mines	Zambia	10	1,0	0,5	0,1	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	7,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	21
Ameryka Południowa	Codelco	Chile	9,0	0,6	0,8	0,1	0,5	0,5	0,1	0,4	0,5	0,3	2,0	6,0	1,0	0,3	0,3	1,0	1,5	16
Ameryka Północna	Grupo Mexico	Meksyk	10	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	7,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	22
Australia	Xstrata	Australia	9,0	0,7	0,8	0,1	0,5	0,5	0,1	0,5	0,5	0,5	2,0	6,0	1,0	0,3	0,3	1,0	1,5	16
Azja	Mitsubishi Materials Corporation	Japonia	10	0,8	0,6	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	6,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	19

Analizując średnie zawartości wagowe pierwiastków na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 7.2 i ich rozkłady w oparciu o wykresy na rysunku 7.1 zauważa się, że wytwarzane w polskich hutach katody charakteryzują się sumaryczną zawartością zanieczyszczeń na poziomie poniżej 20 ppm wag., co pozwala na uplasowanie ich w ścisłej czołówce światowych zakładów metalurgicznych. Warto również nadmienić, że powyższe zestawienia nie uwzględniają zawartości tlenu w katodach. Zgodnie z obowiązującymi normami m.in. PN-EN 1978:2000 („Miedź i stopy miedzi. Katody miedziane”) lub ASTM B49-92 („Walcówka miedziana przeznaczona dla celów elektrycznych”) utrzymywany jest on na poziomie poniżej 50 ppm wag. Na ilustracji 7.2 przedstawiono obraz z mikroskopu skaningowego przełomu katody z miedzi w gatunku Cu-CATH-1 o najniższej zawartości zanieczyszczeń – około 20 ppm wag.



Rys. 7.1. Wykresy średniej zawartości pierwiastków w katodach z miedzi w gatunku Cu-CATH-1 według największych światowych producentów



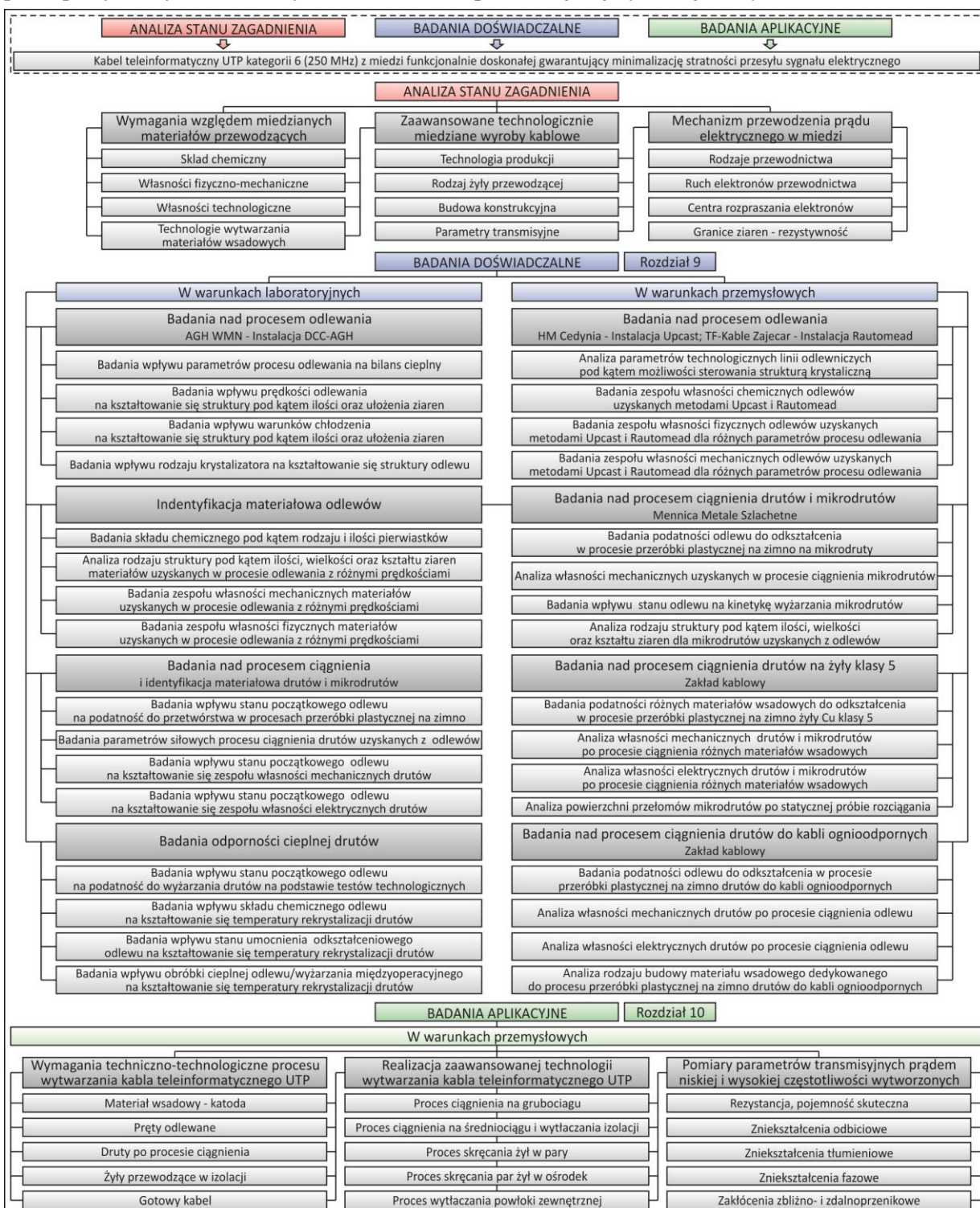
Rys. 7.2. Powierzchnia przekroju katody z miedzi w gatunku Cu-CATH-1. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 2000$

Powyższa ilustracja przedstawia obraz miedzi bardzo plastycznej dedykowanej do procesów przeróbki plastycznej. Ponadto dzięki zminimalizowanej zawartości wydzielin i wtrąceń jest ona stosowana jako podstawowy materiał wsadowy w procesach technologicznych wytwarzania prętów z miedzi beztlenowej i walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP. Te z kolei przeznaczone są m.in. do dalszych procesów ciągnięcia na druty i mikrodruty – okrągłe i profilowe oraz wyżarzania, które narzucają wysokie wymagania względem jakości powierzchni materiałów wsadowych i ich składu chemicznego, w tym przypadku wyselekcjonowanych katod w gatunku Cu-CATH-1.



## Rozdział 8 Program badań

W realizowanym w ramach dysertacji programie badań wyróżniono trzy główne bloki tematyczne, a mianowicie: blok analiz stanu zagadnienia, blok badań doświadczalnych oraz blok badań aplikacyjnych. Ogólny schemat programu badań przedstawiony na rysunku 8.1 stanowi rozszerzenie planu pracy, który zilustrowany został w części wprowadzającej dysertacji na rysunku 1.1.



Rys. 8.1. Schemat blokowy programu badań

Szczegółowy program prac związanych z realizacją badań doświadczalnych zamieszczono w tabeli 8.1. W poszczególnych kolumnach przedstawiono rodzaje badań i ich parametry, badane wielkości oraz szczegółowe cele. Jak nadmieniono wcześniej, prowadzona w ramach dysertacji analiza wyników badań doświadczalnych została bezpośrednio odniesiona do rezultatów zanotowanych przez innych autorów. W związku z powyższym w tabeli zawarto nie tylko program własnych badań eksperymentalnych, ale także program przewidzianych do realizacji analiz literaturowych niezbędnych do kompleksowego opracowania założonych celów pracy. W tabeli 8.2 zamieszczono natomiast szczegółowy program badań aplikacyjnych, przy czym zachowana została konstrukcja analogiczna do tabeli 8.1. Przyjęta kolorystyka obu tabel nawiązuje do barw, które – w stosunku do bloku badań o charakterze doświadczalnym i aplikacyjnym – zastosowano na rysunku 1.1 zamieszczonym w rozdziale 1 ilustrującym ogólny plan pracy oraz na rysunku 8.1 będącym jego kontynuacją.

W związku z tym, że wyniki badań i ich analiza zostały zamieszczone w kolejnych podrozdziałach 9 i 10, przedstawione w tabelach 8.1. i 8.2. programy badań posiadają strukturę odpowiednio rozdziału dziewiątego i dziesiątego, co – z uwagi na szeroki zakres programu badań – powinno zdaniem autora ułatwić orientację w układzie Program badań – Wyniki badań.

Tabela 8.1. Szczegółowy program badań doświadczalnych realizowanych w ramach rozdziału 9 dysertacji

Numer podrozdziału pracy, rodzaj badań doświadczalnych		
Parametry	Wielkość	Cel
9. Wyniki badań doświadczalnych i ich analiza		
9.1. Identyfikacja własności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych		
Idea badań polega na określeniu wpływu, jaki wywiera zmiana warunków krystalizacji metalu w procesie ciągłego odlewania, zarówno techniką Upcast i Rautomead w warunkach przemysłowych, jak i laboratoryjną na stanowisku odlewniczym DCC-AGH, na kształtowanie budowy strukturalnej, która z kolei determinuje fizyczne i technologiczne własności materiału		
9.1.1. Makrostruktura		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Rautomead, Upcast, DCC-AGH</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,2; 0,15; 0,06; 0,03; 0,006</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 50; 40; 1,0; 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1</li> <li>średnica materiału [mm]: 8,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>obraz makrostruktury przekroju wzdłużnego</li> <li>obraz makrostruktury przekroju poprzecznego</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu warunków technologicznych linii COiW oraz CO na kształtowanie stanu strukturalnego badanych materiałów pod kątem ilości i ułożenia ziaren</li> <li>określenie wpływu prędkości odlewania na strukturę prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE pod kątem ilości i ułożenia ziaren</li> <li>określenie wpływu warunków chłodzenia na strukturę prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE pod kątem ilości i ułożenia ziaren</li> </ul>
9.1.2. Własności mechaniczne		
9.1.2.1. Statyczna próba rozciągania		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Rautomead, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>średnica materiału [mm]: 8,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>R_{0,2}</math>, <math>R_m</math> [MPa]</li> <li><math>A_r</math>, <math>A_{250}</math> [%]</li> <li>współczynnik umocnienia (wykładnik potęgi w równaniu Hollomona) [-]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu zróżnicowanych warunków technologicznych linii COiW oraz CO na poziom własności mechanicznych badanych materiałów</li> <li>określenie podatności materiałów do procesu umacniania się w statycznej próbie rozciągania</li> </ul>
9.1.2.1.1. Analiza wpływu prędkości odlewania na własności mechaniczne materiałów wsadowych		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>R_{0,2}</math>, <math>R_m</math> [MPa]</li> </ul>	

<p>ETP, Cu-OFE</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Rautomead, Upcast, DCC-AGH</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,2; 0,15; 0,06; 0,03; 0,006</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 50; 40; 1,0; 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1</li> <li>średnica materiału [mm]: 8,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>R_m/R_{0,2}</math> [-]</li> <li><math>A_r, A_{250}</math> [%]</li> <li>przewężenie [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu zmiennej prędkości odlewania miedzi beztlenowej na zespół własności mechanicznych prętów</li> </ul>
<p>9.1.2.1.2. Analiza wpływu wydatku wody chłodzącej krystalizator na własności mechaniczne materiałów wsadowych</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast, DCC-AGH</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,2; 0,15; 0,06; 0,03; 0,006</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 50; 40; 1,0; 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1</li> <li>średnica materiału [mm]: 8,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>R_{0,2}, R_m</math> [MPa]</li> <li><math>R_m/R_{0,2}</math> [-]</li> <li><math>A_r, A_{250}</math> [%]</li> <li>przewężenie [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu zmiennych warunków chłodzenia w procesie ciągłego odlewania miedzi beztlenowej na zespół własności mechanicznych prętów</li> </ul>
<p>9.1.2.1.3. Analiza wpływu warunków odlewania na powierzchnię materiału po statycznej próbie rozciągania</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast, DCC-AGH</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5; 0,006</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 0,2; 0,1</li> <li>średnica materiału [mm]: 8,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>obraz powierzchni próbek po statycznej próbie rozciągania</li> <li>obraz powierzchni przełomu próbek po statycznej próbie rozciągania [mikroskop skaningowy, powiększenie <math>\times 35, \times 500, \times 1000</math>]</li> <li>obraz przełomu próbki wyciętej wokół osi materiału</li> <li>skład chemiczny walcówki [analiza skaningowa EDX]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu warunków procesu odlewania na powierzchnię próbek po statycznej próbie rozciągania</li> <li>określenie wpływu warunków odlewania na powierzchnię przełomów próbek po statycznej próbie rozciągania</li> <li>określenie rodzaju wydzielań w miedzi w gatunku Cu-ETP</li> </ul>
<p>9.1.2.1.4. Analiza wpływu obróbki cieplnej na własności mechaniczne materiałów wsadowych</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>średnica materiału [mm]: 8,0</li> <li>temperatura wygrzewania [°C]: 20, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>R_{0,2}, R_m</math> [MPa]</li> <li><math>R_m/R_{0,2}</math> [-]</li> <li><math>A_r, A_{250}</math> [%]</li> <li>przewężenie [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu temperatury zabiegu obróbki cieplnej na własności mechaniczne materiałów</li> <li>określenie wpływu czasu zabiegu obróbki cieplnej na własności mechaniczne materiałów</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• czas wygrzewania [h]: 1</li> </ul>		
<b>9.1.2.2. Statyczna próba skręcania</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Rautomead, Upcast, DCC-AGH</li> <li>• prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,2; 0,15; 0,06; 0,03; 0,006</li> <li>• wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 1,0; 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1</li> <li>• średnica materiału [mm]: 8,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• liczba obrotów do momentu zerwania [n]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie podatności materiału do odkształceń plastycznych w statycznej próbie skręcania</li> </ul>
<b>9.1.3. Skład chemiczny</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Rautomead, Upcast, DCC-AGH</li> <li>• prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,2; 0,15; 0,06; 0,03; 0,006</li> <li>• wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 1,0; 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1</li> <li>• średnica materiału [mm]: 8,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zawartość zanieczyszczeń: Ag, As, Bi, Cd, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, O<sub>2</sub>, P, Pb, S, Sb, Se, Sn, Te, Zn [ppm wag.]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie składu chemicznego badanych materiałów pod kątem rozkładu i ilości pierwiastków zanieczyszczeń</li> </ul>
<b>9.1.4. Gęstość</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Rautomead, Upcast, DCC-AGH</li> <li>• prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,2; 0,15; 0,06; 0,03; 0,006</li> <li>• wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 1,0; 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1</li> <li>• średnica materiału [mm]: 8,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>d</math> [g/cm<sup>3</sup>]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie gęstości materiałów uzyskiwanych w przemysłowych liniach COiW oraz CO</li> <li>• określenie wpływu prędkości odlewania na gęstość prętów z miedzi beztlenowej</li> </ul>
<b>9.1.5. Twardość sposobem Brinella</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Rautomead, Upcast, DCC-AGH</li> <li>• prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,2; 0,15; 0,06; 0,03; 0,006</li> <li>• wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 1,0; 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1</li> <li>• średnica materiału [mm]: 8,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• twardość sposobem Brinella [HBW]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie twardości materiałów uzyskiwanych w liniach COiW oraz CO,</li> <li>• określenie wpływu prędkości odlewania na twardość prętów z miedzi beztlenowej,</li> <li>• określenie odporności miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE na odkształcenia trwałe powstałe pod wpływem sił wywołanych naciskiem węgelnika</li> </ul>
<b>9.1.6. Własności elektryczne</b>		

<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Rautomead, Upcast, DCC-AGH</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,2; 0,15; 0,06; 0,03; 0,006</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 1,0; 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1</li> <li>średnica materiału [mm]: 8,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>R [mΩ]</li> <li>ρ [nΩm]</li> <li>ν<sub>a</sub> [MS/m]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie poziomu własności elektrycznych materiałów uzyskiwanych w liniach COiW oraz CO</li> <li>określenie wpływu prędkości odlewania na własności elektryczne prętów z miedzi beztlenowej, a w związku z tym zależności stan strukturalny – własności elektryczne materiałów</li> </ul>
<p>9.2. Badania nad procesem ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych</p>		
<p>Idea badań polega na określeniu w jaki sposób jakość materiału wsadowego z punktu widzenia rodzaju oraz ilości zanieczyszczeń i tlenu oraz stanu strukturalnego kształtowanego w procesie ciągłego odlewania wpływa na właściwości technologiczne drutów przeznaczonych do wysokozaawansowanych aplikacji elektronicznych i elektrotechnicznych</p>		
<p>9.2.1. Analiza wpływu składu chemicznego miedzi na podatność do przetwórstwa w procesach przeróbki plastycznej na zimno</p>		
<p>Analiza literaturowa:</p>		
<p>Wg Fujiwary [95, 104]:</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>klasa czystości chemicznej materiału wsadowego: 3N, 4N, 5N, 6N, 7N, 8N</li> <li>średnica materiału [mm]: 8,0</li> <li>temperatura [°C]: 20, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 600, 800</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>skład chemiczny [ppm wag.]</li> <li>R<sub>0,2</sub>, R<sub>m</sub> [MPa]</li> <li>A<sub>r</sub>, A<sub>250</sub> [%]</li> <li>przewężenie [%]</li> <li>obraz powierzchni przelomu</li> <li>obraz mikrostruktury</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu zawartości pierwiastków domieszek w miedzi na możliwość zastosowania materiału w wysokozaawansowanych aplikacjach elektrycznych i elektrotechnicznych</li> <li>określenie wpływu zawartości pierwiastków domieszek w miedzi na własności mechaniczne i charakter umacniania się materiałów</li> <li>określenie wpływu zabiegów obróbki cieplnej materiałów na własności mechaniczne miedzi o klasie czystości 6N i 8N</li> </ul>
<p>Wg Fujiwary [95], Guixa [96], Davisa [4]:</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-FRHC, Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Continuus Properzi – La Farga Lacambra, Contirod, Southwire, Continuus Properzi, Upcast</li> <li>średnica materiału [mm]: 8,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>skład chemiczny</li> <li>R<sub>m</sub> [MPa]</li> <li>A<sub>250</sub> [%]</li> <li>γ [MS/m, %IACS]</li> <li>ciągliwość [mm]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza porównawcza własności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-FRHC, Cu-ETP i Cu-OFE do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych</li> <li>określenie zakresu możliwych do uzyskania na skalę przemysłową średnic drutów w zależności od sumarycznej zawartości wagowej pierwiastków domieszek i tlenu</li> </ul>
<p>Wg Nieha [108]:</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-OF, Cu-OS (miedź nasycona tlenem)</li> <li>temperatura [°C]: 20, 100, 200, 300, 400, 500</li> <li>czas wygrzewania [h]: 2</li> <li>naprężenie [MPa]: 20</li> <li>odkształcenie [%]: 0,5</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>R<sub>0,2</sub> [MPa]</li> <li>A<sub>250</sub> [%]</li> <li>obraz mikrostruktury</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie własności mechanicznych podczas statycznej próby rozciągania</li> <li>analiza procesu pęknięcia materiałów</li> </ul>
<p>Analiza literaturowa / badania własne:</p>		
<p>Wg Norasethasopona [97], Yoshidy [98, 101], Oyane [99], Ko [100], Chia [102], Tanabe [103]:</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>materiał: druty Cu o różnych średnicach</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>obraz powierzchni przelomu próbki (złom ciągniczy) [mikroskop skaningowy, powiększenie: ×35, ×100,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie najczęściej występujących przyczyn zerwań drutów w procesie ciągnięcia</li> </ul>

	×400, ×1500)	
<b>Wg Popsa [66]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-OFE</li> <li>klasa czystości chemicznej materiału wsadowego: 4N</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>wydłużenie sprężyny [mm]</li> <li>pęknięcia w procesie ciągnięcia [%]</li> <li><math>\gamma</math> [%IACS]</li> <li>przewężenie [%]</li> <li>liczba obrotów do momentu zerwania materiału w statycznej próbie skręcania [n]</li> <li>siła ciągnięcia [N]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu zawartości tlenu w miedzi na własności fizyczne i technologiczne materiału</li> </ul>
<b>Wg Pinskera [105], Kalliomäki'ego [106], Domniny [107]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>rodzaj fazy: Cu<sub>2</sub>O, Cu<sub>4</sub>O<sub>3</sub>, CuO</li> <li>gatunek materiału: Cu-ETP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>parametry sieci krystalicznej a, b, c [<math>\mu\text{m}</math>]</li> <li>twardość [skala Mohsa]</li> <li>d [<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>]</li> <li>T<sub>topn.</sub> [°C]</li> <li>obrazy powierzchni przełomów wlewki z miedzi w gatunku Cu-ETP [mikroskop skaningowy, powiększenie ×30, ×1000, ×4500]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>charakterystyka tlenków miedzi pod kątem wpływu na podatność materiału do procesu ciągnięcia</li> </ul>
<b>Badania własne:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-FRHC</li> <li>linia technologiczna produkcji materiału wsadowego: Continuus Properzi – La Farga Lacambra</li> <li>średnica materiału [mm]: 8,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>obraz powierzchni przełomu walcówki [mikroskop skaningowy, powiększenie ×300]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza powierzchni materiału pod kątem ilości wydzieliń wpływających na podatność materiału do procesu ciągnięcia</li> </ul>
<b>9.2.2. Analiza umacniania się drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP w procesie ciągnięcia</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Rautomead, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>schemat odkształcenia [mm]: 8,00; 7,46; 6,95; 6,43; 5,96; 5,47; 4,95; 4,47; 3,97; 3,48; 3,21; 2,80; 2,43; 2,27; 1,98; 1,68; 1,50; 1,29; 1,14; 1,00; 0,89; 0,80; 0,70; 0,63; 0,56; 0,49</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>R<sub>0,2</sub>, R<sub>m</sub> [MPa]</li> <li>R<sub>m</sub>/R<sub>0,2</sub> [-]</li> <li><math>\Delta R_{0,2}</math>, <math>\Delta R_m</math> [%]</li> <li>A<sub>r</sub>, A<sub>250</sub> [%]</li> <li>k[-] (współczynnik określających przyrost R<sub>0,2</sub> lub R<sub>m</sub> przypadający na jednostkę odkształcenia wyrażoną w postaci <math>(\ln\lambda)^n</math>)</li> <li>n [-] (współczynnik umocnienia)</li> <li>obraz mikrostruktury przekroju wzdłużnego materiałów o średnicach [mm]: 8,0; 3,7; 3,2; 2,7; 2,3; 2,0; 1,8</li> <li>obrazy powierzchni przełomów drutów o średnicy 0,5 mm [mikroskop skaningowy, powiększenie ×2000]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie charakterystyk umocnienia odkształceniowego materiałów w procesie ciągnięcia w celu oceny wpływu ich stanu początkowego uzyskanego w procesach COiW oraz CO na podatność do odkształcenia w procesie przeróbki plastycznej na zimno</li> </ul>
<b>9.2.3. Analiza parametrów siłowych procesu ciągnięcia drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Rautomead, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\sigma_c</math> [MPa] (naprężenie ciągnięcia)</li> <li>R<sub>m</sub> [MPa]</li> <li><math>\gamma</math> [-] (współczynnik wyężenia materiału)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu zawartości tlenu i wielkości ziarna miedzi na odkształcalność materiału w procesie ciągnięcia</li> </ul>

<p>OFE [m/min.]: 4,0</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>schemat odkształcenia [mm]: 8,00; 7,46; 6,95; 6,43; 5,96; 4,95; 4,47; 3,97; 3,48; 3,21; 2,80; 2,43; 2,27</li> </ul>		
<p>9.2.4. Analiza wpływu prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na umacnianie się drutów w procesie ciągnięcia</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast, Rautomead, DCC-AGH</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,2; 0,15; 0,06; 0,03; 0,006</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 50; 40; 1,0; 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1</li> <li>schemat odkształcenia [mm]: 8,00; 7,46; 6,95; 6,43; 5,96; 5,47; 4,95; 4,47; 3,97; 3,48; 3,21; 2,80; 2,43; 2,27; 1,98; 1,68; 1,50; 1,29; 1,14; 1,00; 0,89; 0,80; 0,70; 0,63; 0,56; 0,49</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>R_{0,2}</math>, <math>R_m</math> [MPa]</li> <li><math>A_r</math>, <math>A_{250}</math> [%]</li> <li>obraz mikrostruktury przekroju wzdłużnego drutu z miedzi beztlenowej – prędkość odlewania [m/min.]: 3,0; 2,0; 1,0; wydatek wody chłodzącej [l/min.]: 60; średnica [mm]: 3,7; 3,2; 2,7; 2,3; 1,8</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu stanu strukturalnego miedzi beztlenowej kształtowanego w procesie ciągłego odlewania przy zróżnicowanych prędkościach odlewania na charakter umacniania drutów</li> </ul>
<p>9.2.5. Analiza wpływu wydatku wody chłodzącej krystalizator w procesie ciągłego odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na umacnianie się drutów w procesie ciągnięcia</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 3,0; 2,0; 1,0</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 50; 40</li> <li>schemat odkształcenia [mm]: 8,00; 7,46; 6,95; 6,43; 5,96; 5,47; 4,95; 4,47; 3,97; 3,48; 3,21; 2,80; 2,43; 2,27; 1,98; 1,68; 1,50; 1,29; 1,14; 1,00; 0,89; 0,80; 0,70; 0,63; 0,56; 0,49</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>R_{0,2}</math>, <math>R_m</math> [MPa]</li> <li><math>A_r</math>, <math>A_{250}</math> [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu stanu strukturalnego miedzi beztlenowej kształtowanego w procesie ciągłego odlewania przy zróżnicowanych wydatku wody chłodzącej na charakter umacniania drutów</li> </ul>
<p>9.2.6. Analiza wpływu obróbki cieplnej materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na umacnianie się drutów w procesie ciągnięcia</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>schemat odkształcenia [mm]: 8,00; 7,46; 6,95; 6,43; 5,96; 5,47; 4,95; 4,47; 3,97; 3,48; 3,21; 2,80; 2,43; 2,27; 1,98;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>R_{0,2}</math>, <math>R_m</math> [MPa]</li> <li><math>A_r</math>, <math>A_{250}</math> [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu zabiegów obróbki cieplnej materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE na podatność do odkształcenia w procesie ciągnięcia</li> </ul>

<p>1,68; 1,50; 1,29; 1,14; 1,00; 0,89; 0,80; 0,70; 0,63; 0,56; 0,49</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura wygrzewania materiału wsadowego [°C]: 100, 400, 900</li> <li>czas wygrzewania materiału wsadowego [h]: 1</li> </ul>		
<b>9.2.7. Analiza procesu ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na druty i mikrodruty w warunkach przemysłowych</b>		
<b>Zakład Produkcji Przewodów Elektrycznych Eltrim:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>schemat odkształcenia [mm]: 8,00; 6,35; 5,21; 4,33; 3,64; 3,10; 2,66; 2,57; 2,34; 2,09; 1,86; 1,65; 1,48; 1,32; 1,16; 1,07; 0,92; 0,85; 0,73; 0,66; 0,59; 0,52; 0,45; 0,40</li> <li>przykład aplikacji elektrycznej: żyły klasy 5 o przekroju znamionowym 35 mm<sup>2</sup> jako przewody do odbiorników ruchomych i przenośnych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>R<sub>m</sub> [MPa]</li> <li>A<sub>250</sub> [%]</li> <li>R<sub>20</sub> [Ω/100m]</li> <li>obrazy powierzchni przetomów drutów o średnicy 0,4 mm [mikroskop skaningowy, powiększenie: ×70, ×1000, ×3000]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ocena porównawcza podatności do procesu ciągnięcia zróżnicowanych pod kątem własności i stanu strukturalnego materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej i tlenowej, w szczególności badania prowadzone w warunkach przemysłowych zostały ukierunkowane na: <ul style="list-style-type: none"> <li>porównanie właściwości mechanicznych drutów po procesie ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE</li> <li>porównanie właściwości elektrycznych drutów po procesie ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE</li> <li>porównanie struktury drutów miedzianych po procesie ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE</li> <li>ocena możliwości uzyskania w warunkach przemysłowych mikrodrutów o jak najniższych średnicach z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE</li> </ul> </li> </ul>
<b>Tele-Fonika Kable:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>schemat odkształcenia [mm]: 8,00, 6,55, 5,41, 4,53, 3,84, 3,30, 2,86, 2,77, 2,54, 2,29, 2,06, 1,85, 1,68, 1,52, 1,38</li> <li>przykład aplikacji elektrycznej: żyły przewodzące stosowane w kablach ogniodpornych o przekroju znamionowym 1,5 mm<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>R<sub>m</sub> [MPa]</li> <li>A<sub>250</sub> [%]</li> <li>R<sub>20</sub> [Ω/100m]</li> </ul>	
<b>Mennica Metale Szlachetne:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast, DCC-AGH</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5; 0,006</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 0,2; 0,1</li> <li>schemat odkształcenia [mm]: 3,20; 3,00; 2,80; 2,60; 2,40; 2,20; 2,00; 1,80; 1,60; 1,45; 1,30; 1,20; 1,10; 1,00; 0,90; 0,80; 0,75; 0,70; 0,64; 0,59; 0,54; 0,50;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>R<sub>m</sub> [MPa]</li> <li>A<sub>250</sub> [%]</li> <li>obraz mikrostruktury przekroju poprzecznego i wzdłużnego drutów o średnicach 0,06 mm i 0,03 mm [skaningowy mikroskop jonowy, powiększenie: ×4000, ×8000]</li> </ul>	



<p>0,46; 0,42; 0,39; 0,36; 0,33; 0,30; 0,28; 0,26; 0,24; 0,22; 0,20; 0,18; 0,16; 0,14; 0,12; 0,10; 0,08; 0,06; 0,05; 0,04; 0,03</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura wyżarzania międzyoperacyjnego drutów o średnicach 3,0 mm i 0,8 mm [°C]: 400</li> <li>czas wyżarzania międzyoperacyjnego drutów o średnicach 3,0 mm i 0,8 mm [h]: 1,5</li> <li>temperatura wyżarzania międzyoperacyjnego drutów o średnicach 0,2 mm [°C]: 450 [piec tunelowy, atmosfera N<sub>2</sub>]</li> <li>przykład aplikacji elektrycznej: mikrodruty w wysokozaawansowanych kablach przesyłu dźwięku i obrazu</li> </ul>		
<p><b>9.3. Badania odporności cieplnej drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP</b></p>		
<p>Istota badań polega na ocenie własności miedzi pod kątem podatności do procesów odnowy struktury w warunkach narzuconych przez przemysłowe urządzenia służące do wysokowydajnej redukcji przekroju materiału, z jednoczesną gwarancją odzysku własności plastycznych drutów w komorach oporowego nagrzewania stanowiących integralną część współczesnych ciągarok</p>		
<p><b>9.3.1. Analiza wpływu rodzaju materiału wsadowego do procesu ciągnięcia na podatność do wyżarzania drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na podstawie testów technologicznych</b></p>		
<p><b>Analiza literaturowa:</b></p>		
<p><b>Wg Schmidta [115], Nippon Mining &amp; Metals Co. [116]:</b></p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP</li> <li>test TWS: <ul style="list-style-type: none"> <li>średnica materiału [mm]: 8,00</li> <li>temperatura [°C]: 700,</li> <li>czas wygrzewania [h]: 1,</li> <li>odkształcenie [mm]: 2,5</li> <li>temperatura wyżarzania rekrytalizującego [°C / min. / medium]: 200 / 120 / olej</li> <li>test wydłużenia: sprężyna, obciążenie wywołujące naprężenie [MPa]: 7,0; czas [min.]: 1</li> </ul> </li> <li>test AR: <ul style="list-style-type: none"> <li>średnica materiału [mm]: 8,0</li> <li>odkształcenie [mm]: 6,4</li> <li>temperatura wyżarzania rekrytalizującego [°C / min. / medium]: 260 / 8 / olej</li> <li>test wydłużenia: próba jednoosiowego rozciągania, baza pomiarowa [mm]: 200</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>test TWS: <ul style="list-style-type: none"> <li>wydłużenie sprężyny [mm],</li> </ul> </li> <li>test AR: <ul style="list-style-type: none"> <li>wydłużenie względne A<sub>200</sub> [%]</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>klasyfikacja miedzi na podstawie wyników testu wydłużenia AR i testu wydłużenia sprężyny TWS</li> </ul>
<p><b>Wg Benchabane [119]:</b></p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP</li> <li>test kalorymetryczny DSC: <ul style="list-style-type: none"> <li>schemat odkształcenia [%]: 70</li> <li>przepływ ciepła [μV]: -360; -310; -260; -210; -160; -110</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>T<sub>R</sub> [°C]</li> <li>prędkość przyrostu temperatury [°C/min.]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wartości temperatur rekrytalizacji,</li> <li>analiza efektów energetycznych związanych z rekrytalizacją</li> </ul>
<p><b>Wg Schampa [120]:</b></p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP</li> <li>test PWS-SP850: <ul style="list-style-type: none"> <li>średnica materiału [mm]: 8,0</li> <li>temperatura [°C]: 850</li> <li>czas wygrzewania [min.]: 30</li> <li>odkształcenie [mm]: 1,0</li> <li>temperatura wyżarzania rekrytalizującego [°C / min. /</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>test PWS-SP850: <ul style="list-style-type: none"> <li>wydłużenie sprężyny [mm],</li> </ul> </li> <li>test kalorymetryczny DSC: <ul style="list-style-type: none"> <li>T<sub>R</sub> [°C]</li> <li>powierzchnia piku [J/g]</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie relacji pomiędzy wynikami badań kalorymetrycznych a wynikami testu wydłużenia sprężyny PWS-SP850</li> </ul>

<p>medium]: 200 / 120 / olej</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- test wydłużenia: sprężyna, obciążenie wywołujące naprężenie [MPa]: 6,5; czas [min.]: 1</li> <li>- schemat odkształcenia [%]: 70</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>• test kalorymetryczny DSC: <ul style="list-style-type: none"> <li>- przepływ ciepła [mW/g]: 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3,0; 3,2; 3,4; 3,6; 3,8; 4,0</li> </ul> </li> </ul>		
<b>Badania własne:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>• prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0</li> <li>• wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>• średnica materiału [mm]: 8,0</li> <li>• test wstępny: <ul style="list-style-type: none"> <li>- temperatura [°C]: 260</li> <li>- czas wygrzewania [min.]: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120</li> </ul> </li> <li>a następnie:</li> <li>• test TWS: <ul style="list-style-type: none"> <li>- średnica materiału [mm]: 8,00</li> <li>- temperatura [°C]: 700</li> <li>- czas wygrzewania [h]: 1</li> <li>- temperatura wyżarzania rekrytalizującego [°C / min. / medium]: 200 / 120 / olej</li> <li>- test wydłużenia: sprężyna, obciążenie wywołujące naprężenie [MPa]: 7,0; czas [min.]: 1</li> </ul> </li> <li>• test AR: <ul style="list-style-type: none"> <li>- średnica materiału [mm]: 8,0</li> <li>- odkształcenie [mm]: 6,4</li> <li>- temperatura wyżarzania rekrytalizującego [°C / min. / medium]: 260 / 10 / olej</li> <li>- test wydłużenia: próba jednoosiowego rozciągania, baza pomiarowa [mm]: 200</li> </ul> </li> <li>• test 1H: <ul style="list-style-type: none"> <li>- średnica drutu [mm]: 2,50</li> <li>- temperatura [°C]: 20, 100, 120, 140, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 280, 300, 350, 500</li> <li>- czas wygrzewania [h]: 1</li> </ul> </li> <li>• test kalorymetryczny DSC: <ul style="list-style-type: none"> <li>- przepływ ciepła [W/g]: od -0,168 do -0,163 (Cu-ETP); od -0,1315 do -0,1225 (Cu-OFE)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• skład chemiczny</li> <li>• test wstępny: <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>R_{0,2}</math>; <math>R_m</math> [MPa]</li> <li>- <math>A_r</math>, <math>A_{250}</math> [%]</li> </ul> </li> <li>• test TWS: <ul style="list-style-type: none"> <li>- wydłużenie sprężyny [mm]</li> </ul> </li> <li>• test AR: <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>A_{200}</math> [%]</li> </ul> </li> <li>• test 1H: <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>R_{0,2}</math>; <math>R_m</math> [MPa]</li> <li>- <math>A_r</math>, <math>A_{250}</math> [%]</li> <li>- <math>T_R</math> [°C]</li> <li>- obraz mikrostruktury przekroju poprzecznego i wzdłużnego drutów po procesie wygrzewania w temperaturze [°C]: 20, 160, 210, 300</li> </ul> </li> <li>• test kalorymetryczny DSC: <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>T_R</math> [°C]</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wstępna ocena podatności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE wytwarzanych w liniach technologicznych Contirod i Upcast do procesu wyżarzania rekrytalizującego</li> <li>• określenie wpływu stanu początkowego materiału wsadowego pod kątem składu chemicznego oraz struktury na kinetykę wyżarzania drutów</li> </ul>
9.3.2. Analiza wpływu zanieczyszczeń i tlenu na temperaturę rekrytalizacji drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP		
Analiza literaturowa:		

Wg Popsa [136]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP,</li> <li>zawartość zanieczyszczeń [ppm wag.]: Ag, As, Bi, Pb, S, Sb, Se, Te</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura rekrytalizacji połówkowej [°C]</li> <li>przyrost temperatury rekrytalizacji połówkowej [°C]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu zawartości pojedynczych domieszek w miedzi na kształtowanie temperatury rekrytalizacji połówkowej materiału</li> </ul>
Wg Katoha [71]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>klasa czystości chemicznej materiału wsadowego: 3N, 4N, 5N, 6N</li> <li>zawartość zanieczyszczeń [ppm wag.]: O<sub>2</sub>, P, S</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>R<sub>m</sub> [MPa]</li> <li>T<sub>R</sub> [°C]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu sumarycznej zawartości zanieczyszczeń w miedzi na kształtowanie temperatury rekrytalizacji materiału</li> </ul>
Wg Fujiwary [104]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>klasa czystości chemicznej materiału wsadowego: 3N, 6N, 8N</li> <li>średnica drutu [mm]: 3,3</li> <li>temperatura [°C]: 20, 80, 100, 130, 150, 180, 200, 250, 300</li> <li>czas wygrzewania [min.]: 30</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>twardość sposobem Vickersa [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu składu chemicznego materiału na przebiegi (kął nachylenia) krzywych mięknięcia</li> </ul>
Wg Berina [139]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>klasa czystości chemicznej materiału wsadowego: 3N, 4N, 5N</li> <li>średnica drutu [mm]: 1,2</li> <li>temperatura [°C]: 20, 50, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 275, 300, 325, 350, 375, 400, 425, 450</li> <li>czas wygrzewania [min.]: 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>mikrotwardość [H]</li> <li>wydłużenie sprężyny [mm]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu ilości domieszek oraz tlenu w miedzi na kształtowanie temperatury rekrytalizacji różnych gatunków miedzi</li> </ul>
Wg Prasada [140]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP</li> <li>zawartość tlenu [ppm wag.]: 100, 180, 220, 260</li> <li>szybkość odkształcenia [s<sup>-1</sup>]: 0,01; 10</li> <li>temperatura [(1/T)10<sup>4</sup>]: 8,125; 8,500; 8,800; 9,300; 9,750; 10,25</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>naprężenie pływnięcia [nLog]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu zawartości tlenu w miedzi na opór pływnięcia materiału w podwyższonych temperaturach i przy różnych prędkościach odlewania</li> </ul>
Wg Koka [141]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP</li> <li>zawartość tlenu [ppm wag.]: 250, 300</li> <li>szybkość odkształcenia [s<sup>-1</sup>]: 0,01</li> <li>temperatura [°C]: 20</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>krzywe ściskania w temperaturze otoczenia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu zawartości tlenu w miedzi na charakterystykę umocnienia materiału</li> </ul>
Wg Pitta [131]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP</li> <li>temperatura wygrzewania wstępного [°C]: 700, 800, 900</li> <li>zawartość srebra [ppm wag.]: 8, 14, 15, 28, 29, 34, 51, 54, 66</li> <li>zawartość selenu [ppm wag.]: 4, 5, 47, 50, 52, 77, 81, 90, 94, 105, 155</li> <li>zawartość cyny [ppm wag.]: 7, 20, 43, 80, 118</li> <li>sumaryczna zawartość srebra i selenu [ppm wag.]: 17, 25, 32, 35, 36, 39, 40, 47, 49, 54, 59, 72, 73, 79, 95, 103, 104, 280, 340, 409</li> <li>sumaryczna zawartość cyny i selenu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>T<sub>R</sub> [°C]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie zarówno indywidualnego, jak i sumarycznego wpływu domieszek srebra, selenu oraz cyny na kształtowanie temperatury rekrytalizacji miedzi</li> </ul>

[ppm wag.]: 32, 39, 44, 46, 58, 61, 81, 94, 99		
<b>Wg Jakaniego [142]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP</li> <li>zawartość tlenu [ppm wag.]: 120, 150, 160, 270</li> <li>zawartość srebra [ppm wag.]: 0,02; 0,15; 8,6; 12,0; 16,0</li> <li>zawartość żelaza [ppm wag.]: 1,10; 1,90; 2,80; 2,90; 4,40</li> <li>zawartość ołowiu [ppm wag.]: 0,14; 0,26; 0,32; 0,84; 2,70</li> <li>zawartość siarki [ppm wag.]: 2,4; 27; 3,2; 7,7; 8,7</li> <li>zawartość antymonu [ppm wag.]: 0,00; 0,02; 2,20; 2,30</li> <li>temperatura [°C]: 260</li> <li>czas wygrzewania [min.]: 1, 3, 5, 8, 10, 15</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A<sub>200</sub> [%]</li> <li>mikrotwardość sposobem Vickersa [Hv],</li> <li>względna objętość zrekrystalizowana [%]</li> <li>struktura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu zawartości zanieczyszczeń tlenu, srebra, żelaza, ołowiu, siarki, antymonu na przebieg procesu rekrytalizacji miedzi w gatunku Cu-ETP</li> </ul>
<b>Wg Martinez [143]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP</li> <li>zawartość tlenu [ppm wag.]: 165, 170, 203, 224</li> <li>zawartość srebra [ppm wag.]: 11, 31, 56, 158</li> <li>zawartość żelaza [ppm wag.]: 17, 18, 19, 25</li> <li>zawartość niklu [ppm wag.]: 1, 19, 45, 153</li> <li>zawartość wagowa ołowiu [ppm wag.]: 1, 369, 424, 546</li> <li>zawartość wagowa antymonu [ppm wag.]: 1, 22, 41, 63</li> <li>zawartość wagowa cyny [ppm wag.]: 1, 36, 47, 232</li> <li>zawartość wagowa cynku [ppm wag.]: 1, 18, 22, 61</li> <li>sumaryczna zawartość wagowa innych pierwiastków [ppm wag.]: 22, 512, 690, 958</li> <li>temperatura [°C]: 25, 125, 150, 160, 175, 200, 225, 250, 275, 300, 325, 350</li> <li>czas wygrzewania [h]: 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>R<sub>m</sub> [MPa]</li> <li>A<sub>250</sub> [%]</li> <li>temperatura rekrytalizacji początkowej [°C]</li> <li>temperatura rekrytalizacji połówkowej [°C]</li> <li>temperatura rekrytalizacji całkowitej [°C]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu sumarycznej zawartości tlenu, srebra, żelaza, niklu, ołowiu, antymonu, cyny, cynku oraz innych pierwiastków w miedzi na kształtowanie temperatury rekrytalizacji materiału</li> </ul>
<b>Wg Owena [144]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 450, 780</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność srebra w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności srebra w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
<b>Wg Köstera [145], Raynora [146]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 565, 1037</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność aluminium w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności aluminium w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
<b>Wg Owena [147, 148]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 400, 689</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność arsenu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności arsenu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
<b>Wg Johanssona [149]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność złota w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności złota w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
<b>Wg Lihla [150]:</b>		

<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 1060</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność boru w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności boru w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Gruhla [151]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 400, 575, 864</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność berylu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności berylu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Rauba [152], Vocea [153]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 600, 800</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność bizmutu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności bizmutu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Smarta [124], Bevera [154]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 1083, 1200</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność węgla w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności węgla w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Davisa [4], Bulletin Alloy Phase Diagrams [155]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 910</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność wapnia w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności wapnia w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Rauba [156], Sahmena [157]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 300, 500, 700</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność kadmu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności kadmu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Hashimoto [158]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 1100</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność kobaltu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności kobaltu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Rauba [159], Hibbarda [160], Bungea [161], Doi [162]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 600, 800, 1080</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność chromu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności chromu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Reekiego [163], Knappwosta [164], Nielsena [165]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 600, 760, 833</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność żelaza w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności żelaza w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Hume-Rothery'ego [166, 167]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 620</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność galu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności galu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Schuberta [168], Changa [169]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 830</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność germanu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności germanu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Röntgena [170], Smarta [125]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność wodoru w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności wodoru w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Davisa [4]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność rtęci w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności rtęci w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Welbke'go [171, 172], Owena [148], Jonesa [173]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 400, 574</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność indu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności indu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Davisa [4]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność irydu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności irydu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Bulletin Alloy Phase Diagrams [155]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność lantanu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności lantanu w miedzi pod kątem podatności</li> </ul>

		materiału do wyżarzania
Wg Bulletin Alloy Phase Diagrams [155]:		
• temperatura [°C]: 20	• rozpuszczalność litu w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności litu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Jonesa [174]:		
• temperatura [°C]: 20, 720	• rozpuszczalność magnezu w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności magnezu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Kawasakiego [175]:		
• temperatura [°C]: 400, 685	• rozpuszczalność manganu w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności manganu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Sargenta [176], Lehmerca [177], Siedschlaga [178], Dreiboldza [179]:		
• temperatura [°C]: cały zakres	• rozpuszczalność molibdenu w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności molibdenu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Smarta [125]:		
• temperatura [°C]: cały zakres,	• rozpuszczalność azotu w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności azotu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Davisa [4]:		
• temperatura [°C]: 20	• rozpuszczalność niklu w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności niklu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Phillipsa [180]:		
• temperatura [°C]: 20, 600	• rozpuszczalność tlenu w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności tlenu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Lindego [181]:		
• temperatura [°C]: cały zakres	• rozpuszczalność osmu w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności osmu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Veroea [182]:		
• temperatura [°C]: 20, 500, 700	• rozpuszczalność fosforu w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności fosforu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Chakrabartla [183], Gebhardta [184]:		
• temperatura [°C]: 600, 954	• rozpuszczalność ołowiu w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności ołowiu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Jonesa [185]:		
• temperatura [°C]: 20, 600	• rozpuszczalność palladu w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności palladu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Schneidera [186]:		
• temperatura [°C]: 20	• rozpuszczalność platyny w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności platyny w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Davisa [4]:		
• temperatura [°C]: 20	• rozpuszczalność rodu w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności rodu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Smarta [125]:		
• temperatura [°C]: 20, 600	• rozpuszczalność siarki w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności siarki w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Mertza [187], Schuberta [188]:		
• temperatura [°C]: 20, 300, 800	• rozpuszczalność antymonu w miedzi [%]	• analiza rozpuszczalności antymonu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania
Wg Smarta [125]:		

<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 500</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność selenu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności selenu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Andersena [189], Hofmanna [190]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność krzemu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności krzemu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Kattnera [191]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 250, 350, 550</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność cyny w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności cyny w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Davisa [4], Smarta [125], Anderko [192]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 500, 800</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność telluru w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności telluru w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Rauba [193]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 946</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność toru w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności toru w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Joukainena [194], Rauba [195]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 700, 850</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność tytanu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności tytanu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Rauba [193]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 400, 500, 700, 900</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność talu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności talu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Tsaia [196]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność wanadu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności wanadu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Guillela [197], Rumschottela [198], Schrotera [199]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: cały zakres</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność wolframu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności wolframu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Haase [200]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 450, 900</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność cynku w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności cynku w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Wg Pogodina [201], Ariasa [202], Lundina [203]:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>temperatura [°C]: 20, 600, 925</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>rozpuszczalność cyrkonu w miedzi [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza rozpuszczalności cyrkonu w miedzi pod kątem podatności materiału do wyżarzania</li> </ul>
Badania własne:		
<ul style="list-style-type: none"> <li>materiał wsadowy: katoda Cu-CATH-1 (marka HMG-B), walcówka Cu-ETP (linia Southwire)</li> <li>średnica drutu [mm]: 2,5</li> <li>temperatura [°C]: 20, 100, 120, 140, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 280, 300, 350, 500</li> <li>czas wygrzewania [h]: 1</li> <li>test kalorymetryczny DSC:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>przepływ ciepła [W/g]: od -0,303 do 0,255</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>skład chemiczny</li> <li>obraz mikrostruktury przekroju wzdłużnego</li> <li><math>R_{0,2}</math>; <math>R_m</math> [MPa]</li> <li><math>A_r</math>, <math>A_{250}</math> [%]</li> <li>temperatura rekrytalizacji początkowej [°C]</li> <li>temperatura rekrytalizacji połówkowej [°C]</li> <li>temperatura rekrytalizacji całkowitej [°C]</li> <li>udział tlenu w sumarycznej zawartości pierwiastków [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>wyznaczenie krzywych mięknięcia drutów w teście jednogodzinnego wygrzewania w celu określenia roli pierwiastków domieszek w miedzi na odporność cieplną drutów po procesie ciągnięcia</li> </ul>
9.3.3. Badania wpływu umocnienia odkształceniowego na temperaturę rekrytalizacji drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>obrazy morfologii powierzchni zewnętrznej</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza odporności cieplnej drutów pod kątem umocnienia</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Rautomead, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>średnica drutu [mm]: 7,0; 5,5; 4,5; 2,5; 0,5</li> <li>temperatura [°C]: 20, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 270, 280, 300, 320, 330, 340, 350, 400, 500</li> <li>czas wygrzewania [h]: 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>R<sub>0,2</sub>; R<sub>m</sub> [MPa]</li> <li>A<sub>r</sub>, A<sub>250</sub> [%]</li> <li>temperatura rekrytalizacji początkowej [°C]</li> <li>temperatura rekrytalizacji połówkowej [°C]</li> <li>temperatura rekrytalizacji całkowitej [°C]</li> <li>temperaturowy zakres mięknięcia [°C]</li> <li>współczynniki równań opisujących zależności temperatury rekrytalizacji od wielkości odkształcenia rzeczywistego a, b [-]</li> <li>obraz makrostruktury przekroju wzdłużnego</li> <li>skład chemiczny [ppm wag.]</li> </ul>	<p>odkształceniowego w celu określenia parametrów technologicznych wytwarzania drutów dedykowanych do aplikacji elektrycznych</p>
<b>9.3.4. Analiza wpływu prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na temperaturę rekrytalizacji drutów</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Rautomead, Upcast, DCC-AGH</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,2; 0,15; 0,06; 0,03; 0,006</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 50; 40; 1,0; 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1</li> <li>średnica drutu [mm]: 2,5</li> <li>temperatura [°C]: 20, 100, 120, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 270, 280, 300, 320, 330, 340, 350, 360, 380, 400, 500</li> <li>czas wygrzewania [h]: 1</li> <li>test kalorymetryczny DSC: <ul style="list-style-type: none"> <li>przepływ ciepła [W/g]: od -0,259 do -0,138</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>R<sub>0,2</sub>, R<sub>m</sub> [MPa]</li> <li>A<sub>r</sub>, A<sub>250</sub> [%]</li> <li>temperatura rekrytalizacji początkowej [°C]</li> <li>temperatura rekrytalizacji całkowitej [°C]</li> <li>wydłużenie sprężyny [mm]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu stanu początkowego miedzi beztlenowej kształtowanego w procesie ciągłego odlewania przy zróżnicowanych prędkościach odlewania na kinetykę wyżarzania drutów</li> </ul>
<b>9.3.5. Analiza wpływu wydatku wody chłodzącej krystalizator w procesie ciągłego odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na temperaturę rekrytalizacji drutów</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 3,0; 2,0; 1,0</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 50; 40</li> <li>średnica drutu [mm]: 2,5</li> <li>temperatura [°C]: 20, 100, 120, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250, 260, 270, 280, 300, 320, 330, 340, 350, 360, 380, 400, 500</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>R<sub>0,2</sub>, R<sub>m</sub> [MPa]</li> <li>A<sub>r</sub>, A<sub>250</sub> [%]</li> <li>temperatura rekrytalizacji początkowej [°C]</li> <li>temperatura rekrytalizacji całkowitej [°C]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu stanu początkowego miedzi beztlenowej kształtowanego w procesie ciągłego odlewania przy zróżnicowanym wydatku wody chłodzącej na kinetykę wyżarzania drutów</li> </ul>



<ul style="list-style-type: none"> <li>• czas wygrzewania [h]: 1</li> <li>• test kalorymetryczny DSC:             <ul style="list-style-type: none"> <li>– przepływ ciepła [W/g]: od -0,700 do 0,375</li> </ul> </li> </ul>		
<b>9.3.6. Analiza wpływu obróbki cieplnej materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na temperaturę rekrytalizacji drutów</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>• prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0</li> <li>• wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>• temperatura wygrzewania materiału wsadowego [°C]: 100, 400, 900</li> <li>• czas wygrzewania materiału wsadowego [h]: 1</li> <li>• średnica drutu [mm]: 2,5</li> <li>• temperatura wygrzewania drutu [°C]: 20, 100, 120, 140, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220, 230, 240, 260, 280, 300, 400, 500</li> <li>• czas wygrzewania drutu [h]: 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>R_m</math> [MPa]</li> <li>• <math>A_{250}</math> [%]</li> <li>• <math>T_R, \Delta T_R</math> [°C]</li> <li>• obraz mikrostruktury przekroju wzdłużnego drutu [mikroskop skaningowy, powiększenie <math>\times 5, \times 20, \times 50</math>]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie wpływu zmian w strukturze miedzi beztlenujonej, spowodowanych wpływem temperatury podczas zabiegu obróbki cieplnej materiału wsadowego, na kinetykę wyżarzania drutów po procesie ciągnięcia</li> </ul>
<b>9.3.7. Analiza wpływu wyżarzania międzyoperacyjnego na temperaturę rekrytalizacji drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>• średnica drutu [mm]: 2,5; 0,5</li> <li>• temperatura międzyoperacyjnych zabiegów wyżarzania [°C] drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP: 230</li> <li>• temperatura międzyoperacyjnych zabiegów wyżarzania [°C] drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE: 300</li> <li>• czas międzyoperacyjnych zabiegów wyżarzania drutów [h]: 1</li> <li>• średnice drutów poddanych międzyoperacyjnym zabiegom wyżarzania rekrytalizującego [mm]: 5,0; 4,0; 3,2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>R_{0,2}, R_m</math> [MPa]</li> <li>• <math>A_r, A_{250}</math> [%]</li> <li>• <math>T_R, \Delta T_R</math> [°C]</li> <li>• obraz mikrostruktury przekroju wzdłużnego drutu [mikroskop skaningowy, powiększenie <math>\times 200</math>]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie wpływu stanu strukturalnego miedzi beztlenujowej i tlenowej na odporność cieplną drutów poddanych międzyoperacyjnym zabiegom wyżarzania rekrytalizującego</li> </ul>
<b>9.4. Badania własności elektrycznych drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP</b>		
<p>Istota badań polega na określeniu własności elektrycznych drutów z dwóch gatunków miedzi pod kątem wpływu zarówno składu chemicznego materiału, jak również przyjętych parametrów procesów technologicznych związanych z wytworzeniem i przetworzeniem materiałów wsadowych w postaci walcówek i prętów</p>		
<b>9.4.1. Analiza wpływu zanieczyszczeń i tlenu na własności elektryczne drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP</b>		
<b>Analiza literaturowa:</b>		
<b>Wg Addicksa [205, 206]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• zawartość zanieczyszczeń [% wag.]: 0,0 – 1,0</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\gamma</math> [MS/m, %IACS]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie wpływu różnych zawartości poszczególnych zanieczyszczeń w miedzi na przewodność elektryczną drutów</li> </ul>
<b>Wg Antisellego [207], Hansona [208]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\gamma</math> [MS/m, %IACS]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie wpływu zawartości tlenu w miedzi konwencjonalnej na</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>zawartość tlenu [% wag.]: 0,0 – 0,2</li> </ul>		przewodność elektryczną drutów
<b>Wg Popsa [136]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>klasa czystości materiału sadowego: 3N, 4N, 5N</li> <li>zawartość tlenu [% wag.]: 0,0 – 0,15</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\gamma</math> [%ACS]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu zawartości tlenu w miedzi o różnej klasie czystości na przewodność elektryczną drutów</li> </ul>
<b>Wg Smarta [124 – 126]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-OFE</li> <li>zawartość wybranych zanieczyszczeń [% wag.], w szczególności siarki, selenu, telluru: 0,0 – 0,013</li> <li>temperatura wygrzewania drutu [°C]: 500, 600, 700, 800</li> <li>czas wygrzewania [h]: 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\gamma</math> [MS/m]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływ zawartości różnych zanieczyszczeń w miedzi, w szczególności siarki, selenu i telluru na kształtowanie przewodności elektrycznej drutów</li> </ul>
<b>Wg Martinez [143]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP</li> <li>zawartość tlenu [ppm wag.]: 165, 170, 203, 224</li> <li>zawartość srebra [ppm wag.]: 11, 31, 56, 158</li> <li>zawartość żelaza [ppm wag.]: 17, 18, 19, 25</li> <li>zawartość niklu [ppm wag.]: 1, 19, 45, 153</li> <li>zawartość wagowa ołowiu [ppm wag.]: 1, 369, 424, 546</li> <li>zawartość wagowa antymonu [ppm wag.]: 1, 22, 41, 63</li> <li>zawartość wagowa cyny [ppm wag.]: 1, 36, 47, 232</li> <li>zawartość wagowa cynku [ppm wag.]: 1, 18, 22, 61</li> <li>sumaryczna zawartość wagowa innych pierwiastków [ppm wag.]: 22, 512, 690, 958</li> <li>temperatura wygrzewania drutu [°C]: 25, 125, 150, 160, 175, 200, 225, 250, 275, 300, 325, 350</li> <li>czas [h]: 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\gamma</math> [%ACS]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>analiza wpływu zabiegów wygrzewania na kształtowanie własności elektrycznych drutów o różnym poziomie zanieczyszczeń</li> </ul>
<b>Wg Armstronga [114]:</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>rodzaj materiału wsadowego: katoda, walcówka, pręt</li> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>zawartość tlenu [ppm wag.]: &lt; 3, 3, 13, 170, 650, 2250</li> <li>zawartość srebra [ppm wag.]: &lt; 0,5; 5; 6; 15</li> <li>zawartość arsenu [ppm wag.]: 0,02; &lt; 0,1; 0,1; &lt; 0,5; 1,0</li> <li>zawartość bizmutu [ppm wag.]: 0,02; &lt; 0,05; 0,2; 0,3</li> <li>zawartość kobaltu [ppm wag.]: 0,08; 0,2; 0,4; 0,5</li> <li>zawartość żelaza [ppm wag.]: 1,0; 1,6; 5,0; 7 – 15</li> <li>zawartość niklu [ppm wag.]: 0,01; &lt; 0,1; 2,0; 5,0</li> <li>zawartość ołowiu [ppm wag.]: 0,02; 0,1; 0,2; 1,0; 5,0</li> <li>zawartość antymonu [ppm wag.]: 0,01;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\gamma</math> [%ACS]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu zróżnicowanych ilości pierwiastków domieszek na kształtowanie przewodności elektrycznej drutów z miedzi o różnej klasie czystości</li> </ul>

<p>0,1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• zawartość selenu [ppm wag.]: &lt; 0,1; 0,2; 0,6; 0,2 – 1,5</li> <li>• zawartość krzemu [ppm wag.]: 0,4; 0,5; 1,0; 1,2</li> <li>• zawartość siarki [ppm wag.]: &lt; 0,2; 2,0; 6,0</li> <li>• zawartość telluru [ppm wag.]: &lt; 0,05; 0,01; &lt; 0,1; 0,6</li> </ul>		
<p><b>Wg Smarta [124 – 126 ], Pawleka [206], Hessa [211]:</b></p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• materiał wsadowy: Cu</li> <li>• zawartość tlenu [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość aluminium [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość srebra [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość arsenu [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość berylu [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość kadmu [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość kobaltu [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość chromu [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość siarki [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość fosforu [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość żelaza [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość magnezu [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość niklu [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość ołowiu [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość antymonu [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość selenu [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość krzemu [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość cyny [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość telluru [ppm wag.]: 10</li> <li>• zawartość cynku [ppm wag.]: 10</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\rho</math> [n<math>\Omega</math>m]</li> <li>• wzrost rezystywności [n<math>\Omega</math>m] na 10 ppm wag. zanieczyszczeń</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie przyrostu rezystywności miedzi spowodowanego indywidualnym wpływem domieszek obecnych w roztworze stałym</li> </ul>
<p><b>Badania własne:</b></p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• materiał wsadowy: katoda Cu-CATH-1, walcówka Cu-ETP</li> <li>• zawartość tlenu [ppm wag.]: 52, 53, 56, 160, 230</li> <li>• zawartość zanieczyszczeń [ppm wag.]: 24, 28, 29, 41, 42</li> <li>• średnica drutu [mm]: 2,0</li> <li>• temperatura wygrzewania drutu [°C]: 500</li> <li>• czas wygrzewania drutu [min.]: 30</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• R [m<math>\Omega</math>]</li> <li>• <math>\rho</math> [n<math>\Omega</math>m, %]</li> <li>• <math>\gamma</math> [MS/m, %IACS]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określeniem wpływu sumarycznej zawartości zanieczyszczeń w katodach oraz walcówkach na kształtowanie się własności elektrycznych drutów</li> </ul>
<p><b>9.4.2. Analiza wpływu umocnienia odkształceniowego na własności elektryczne drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP</b></p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Rautomead, Upcast</li> <li>• prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0</li> <li>• wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>• schemat odkształcenia [mm]: 8,00; 7,46; 6,95; 6,43; 5,96; 5,47; 4,95; 4,47; 3,97; 3,48; 3,21; 2,80; 2,43; 2,27; 1,98; 1,68; 1,50; 1,29; 1,14; 1,00; 0,89; 0,80; 0,70; 0,63; 0,56; 0,49</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\rho</math> [n<math>\Omega</math>m, %]</li> <li>• <math>\gamma</math> [MS/m, %IACS]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie wpływu umocnienia odkształceniowego na własności elektryczne drutów z miedzi w celu uzyskania informacji o roli tlenu na kształtowanie przewodności elektrycznej materiałów dedykowanych na cele elektryczne</li> </ul>
<p><b>9.4.3. Analiza wpływu parametrów procesu odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na własności elektryczne drutów</b></p>		

<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast, DCC-AGH</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,2; 0,15; 0,06; 0,03; 0,006</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60; 1,0; 0,8; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1</li> <li>schemat odkształcenia [mm]: 8,00; 7,46; 6,95; 6,43; 5,96; 5,47; 4,95; 4,47; 3,97; 3,48; 3,21; 2,80; 2,43; 2,27; 1,98; 1,68; 1,50; 1,29; 1,14; 1,00; 0,89; 0,80; 0,70; 0,63; 0,56; 0,49</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\rho</math> [n<math>\Omega</math>m, %]</li> <li><math>\gamma</math> [MS/m, %IACS]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie wpływu, jaki wywiera na strukturę oraz na własności elektryczne drutów o różnych średnicach, zmiana warunków krystalizacji metalu w procesie ciągłego odlewania przy zróżnicowanej prędkości odlewania i wydatku wody chłodzącej</li> </ul>
--	---	---

Tabela 8.2. Szczegółowy program badań aplikacyjnych realizowanych w ramach rozdziału 10 dysertacji

Numer podrozdziału pracy, rodzaj badań aplikacyjnych		
Parametry	Wielkość	Cel
10. Wyniki badań aplikacyjnych i ich analiza		
10.2. Pomiary parametrów transmisyjnych kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6		
Idea badań polega na określeniu wpływu odmiennego składu chemicznego i stanu strukturalnego materiałów wsadowych na parametry transmisyjne czteroparowych konstrukcji kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6 z żyłami z różnych gatunków miedzi		
10.2.1. Pomiary prądem niskiej częstotliwości		
Idea pierwszego etapu badań zawarta została w weryfikacji poprawności wykonanej konstrukcji przewodowej z punktu widzenia przydatności kabla do transmisji sygnałów elektrycznych torami symetrycznymi. Przedstawiona koncepcja określi czy wytworzony przewód może zostać poddany dalszym, kompleksowym badaniom prądem wysokiej częstotliwości, które umożliwiają pełną charakterystykę kabli teleinformatycznych o żyłach przewodzących wykonanych z różnych rodzajów materiałów wsadowych pod kątem zniekształceń i zakłóceń		
10.2.1.1. Rezystancja elektryczna, asymetria rezystancji elektrycznej		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>średnica drutu [mm]: 0,58</li> <li>długość kabla [m]: 100</li> <li>ilość torów transmisyjnych kabla [n]: 4</li> <li>długość skoku skrętu poszczególnych torów transmisyjnych kabla [mm]: 10,1; 12,8; 15,4; 17,4</li> <li>częstotliwość prądu [Hz]: 800</li> <li>pomiar prowadzony w torach [nr]: 1, 2, 3, 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>R_a, R_b, R</math> [<math>\Omega/100m</math>]</li> <li><math>R_{ub}</math> [%] (asymetria rezystancji)</li> <li><math>\rho_a, \rho_b</math> [n<math>\Omega</math>m]</li> <li><math>\gamma_a, \gamma_b</math> [MS/m]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie własności elektrycznych (rezystancja) kabli z żyłami przewodzącymi z różnych gatunków miedzi</li> </ul>
10.2.1.2. Pojemność skuteczna, asymetria pojemności skutecznej		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>średnica drutu [mm]: 0,58</li> <li>długość kabla [m]: 100</li> <li>ilość torów transmisyjnych kabla [n]: 4</li> <li>długość skoku skrętu poszczególnych torów transmisyjnych kabla [mm]: 10,1; 12,8; 15,4; 17,4</li> <li>częstotliwość prądu [Hz]: 800</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>C</math> [nF/100m]</li> <li><math>E</math> [pF/100m] (asymetria pojemności torów względem ziemi)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie pojemności skutecznej i asymetrii pojemności względem ziemi dla poszczególnych czterech torów transmisyjnych,</li> <li>określenie poziomu jakości wytworzonej czteroparowej</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• pomiar prowadzony pomiędzy torami [nr]: 1-2, 2-3, 3-4, 4-1</li> </ul>		konstrukcji kablowej UTP kategorii 6
<b>10.2.2. Pomiary prądem wysokiej częstotliwości</b>		
Idea drugiego etapu badań zawarta została w określeniu poziomu występujących w torach transmisyjnych kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6, wykonanych z różnych gatunków miedzi, zniekształceń odbiciowych, tłumieniowych i fazowych, a także zniekształceń przenikowych		
<b>10.2.2.1. Zniekształcenia odbiciowe</b>		
<b>10.2.2.1.1. Impedancja falowa</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>• prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5</li> <li>• wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>• średnica drutu [mm]: 0,58</li> <li>• długość kabla [m]: 100</li> <li>• ilość torów transmisyjnych kabla [n]: 4</li> <li>• długość skoku skrętu poszczególnych torów transmisyjnych kabla [mm]: 10,1; 12,8; 15,4; 17,4</li> <li>• częstotliwość prądu [MHz]: 0,772 – 250, zmiana co 0,623</li> <li>• pomiar prowadzony w torach [nr]: 1, 2, 3, 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>Z [\Omega]</math></li> <li>• zmiana impedancji falowej toru [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie impedancji falowej poszczególnych torów transmisyjnych trzech rodzajów konstrukcji kablowych różniących się materiałami żył przewodzących</li> </ul>
<b>10.2.2.1.2. Tłumienność odbiciowa</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>• prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5</li> <li>• wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>• średnica drutu [mm]: 0,58</li> <li>• długość kabla [m]: 100</li> <li>• ilość torów transmisyjnych kabla [n]: 4</li> <li>• długość skoku skrętu poszczególnych torów transmisyjnych kabla [mm]: 10,1; 12,8; 15,4; 17,4</li> <li>• częstotliwość prądu [MHz]: 0,772 – 250, zmiana co 0,623</li> <li>• pomiar prowadzony w torach [nr]: 1, 2, 3, 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RL [dB]</li> <li>• zmiana tłumienności odbiciowej toru [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie współczynnika odbicia sygnału (echa) w torach transmisyjnych kabli bazujących na żyłach przewodzących z różnych gatunków miedzi</li> </ul>
<b>10.2.2.2. Zniekształcenia tłumieniowe</b>		
<b>10.2.2.2.1. Tłumienność falowa</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>• prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5</li> <li>• wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>• średnica drutu [mm]: 0,58</li> <li>• długość kabla [m]: 100</li> <li>• ilość torów transmisyjnych kabla [n]: 4</li> <li>• długość skoku skrętu poszczególnych torów transmisyjnych kabla [mm]: 10,1; 12,8; 15,4; 17,4</li> <li>• częstotliwość prądu [MHz]: 0,772 – 250, zmiana co 0,623</li> <li>• pomiar prowadzony w torach [nr]: 1, 2, 3, 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\alpha_L</math> [dB]</li> <li>• zmiana tłumienności falowej toru [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie poziomu zniekształceń tłumieniowych torów kabla z żyłami przewodzącymi z różnych gatunków miedzi poprzez wyznaczenie wartości tłumienności falowej</li> </ul>
<b>10.2.2.3. Zniekształcenia fazowe</b>		
<b>10.2.2.3.1. Prędkość propagacji</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>• prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5</li> <li>• wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>• średnica drutu [mm]: 0,58</li> <li>• długość kabla [m]: 100</li> <li>• ilość torów transmisyjnych kabla [n]: 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>v_p</math> [-]</li> <li>• zmiana prędkości propagacji sygnału torów [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie szybkości transmisji sygnału elektrycznego w kablach z żyłami przewodzącymi z różnych gatunków miedzi w stosunku do prędkości światła</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>długość skoku skrętu poszczególnych torów transmisyjnych kabla [mm]: 10,1; 12,8; 15,4; 17,4</li> <li>częstotliwość prądu [MHz]: 0,772 – 250, zmiana co 0,623</li> <li>pomiar prowadzony w torach [nr]: 1, 2, 3, 4</li> </ul>		
<b>10.2.2.3.2. Opóźnienie propagacji</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>średnica drutu [mm]: 0,58</li> <li>długość kabla [m]: 100</li> <li>ilość torów transmisyjnych kabla [n]: 4</li> <li>długość skoku skrętu poszczególnych torów transmisyjnych kabla [mm]: 10,1; 12,8; 15,4; 17,4</li> <li>częstotliwość prądu [MHz]: 0,772 – 250, zmiana co 0,623</li> <li>pomiar prowadzony w torach [nr]: 1, 2, 3, 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>opóźnienie propagacji sygnału torów [ns/100m]</li> <li>zmiana opóźnienia propagacji sygnału torów [%]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie opóźnienia propagacji transmitowanego danym torem kabla teleinformatycznego sygnału elektrycznego</li> </ul>
<b>10.2.2.3.3. Przesunięcie fazowe</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>średnica drutu [mm]: 0,58</li> <li>długość kabla [m]: 100</li> <li>ilość torów transmisyjnych kabla [n]: 4</li> <li>długość skoku skrętu poszczególnych torów transmisyjnych kabla [mm]: 10,1; 12,8; 15,4; 17,4</li> <li>częstotliwość prądu [MHz]: 0,772 – 250, zmiana co 0,623</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>przesunięcie fazowe [ns/100m]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenia różnicy pomiędzy torem o największym i najmniejszym opóźnieniu propagacji w celu wyznaczenie przesunięcia fazowego dla trzech rodzajów konstrukcji kablowych odgrywającego rolę w procesie synchronizacji sygnałów pochodzących z poszczególnych par przewodowych</li> </ul>
<b>10.2.2.4. Zakłócenia zbliznoprzenikowe i zdaloprzenikowe</b>		
<b>10.2.2.4.1. Tłumiennosc zbliznoprzenikowa NEXT, tlumiennosc zdaloprzenikowa FEXT</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>średnica drutu [mm]: 0,58</li> <li>długość kabla [m]: 100</li> <li>ilość torów transmisyjnych kabla [n]: 4</li> <li>długość skoku skrętu poszczególnych torów transmisyjnych kabla [mm]: 10,1; 12,8; 15,4; 17,4</li> <li>częstotliwość prądu [MHz]: 0,772 – 250, zmiana co 0,623</li> <li>pomiar prowadzony pomiędzy torami [nr]: 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>tlumiennosc zbliznoprzenikowa NEXT [dB]</li> <li>tlumiennosc zdaloprzenikowa FEXT [dB]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie poziomu zniekształceń związanych z przenikaniem sygnału z jednego toru do drugiego mierzonych po tej samej i przeciwnej stronie, do której dołączone jest źródło sygnału</li> </ul>
<b>10.2.2.4.2. Tłumiennosc rownowazna sumie mocy przeniku zbliznego PS NEXT, tlumiennosc rownowazna sumie mocy przeniku zdalnego PS FEXT</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5</li> <li>wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>średnica drutu [mm]: 0,58</li> <li>długość kabla [m]: 100</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>tlumiennosc rownowazna sumie mocy przeniku zbliznego PS NEXT [dB]</li> <li>tlumiennosc rownowazna sumie mocy przeniku</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>określenie sumy zniekształceń związanych z przenikaniem sygnału do toru zakłócanego z pozostałych torów zakłócających</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• ilość torów transmisyjnych kabla [n]: 4</li> <li>• długość skoku skrętu poszczególnych torów transmisyjnych kabla [mm]: 10,1; 12,8; 15,4; 17,4</li> <li>• częstotliwość prądu [MHz]: 0,772 – 250, zmiana co 0,623</li> <li>• pomiar prowadzony w torach [nr]: 1, 2, 3, 4</li> </ul>	<p>zdalnego PS FEXT [dB]</p>	<p>w kablu przy pomocy pomiarów po tej samej i przeciwnej stronie, do której dołączone jest źródło sygnału</p>
<p>10.2.2.4.3. Odstęp zbliżnoprzenikowy ACR, odstęp zdalnoprzenikowy ELFEXT</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>• prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5</li> <li>• wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>• średnica drutu [mm]: 0,58</li> <li>• długość kabla [m]: 100</li> <li>• ilość torów transmisyjnych kabla [n]: 4</li> <li>• długość skoku skrętu poszczególnych torów transmisyjnych kabla [mm]: 10,1; 12,8; 15,4; 17,4</li> <li>• częstotliwość prądu [MHz]: 0,772 – 250, zmiana co 0,623</li> <li>• pomiar prowadzony pomiędzy torami [nr]: 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• odstęp zbliżnoprzenikowy ACR [dB]</li> <li>• odstęp zdalnoprzenikowy ELFEXT [dB]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie stosunku tłumienia do przesłuchu jako wskaźnika informującego o poprawności wykonanej konstrukcji kablowej i zachowaniu przez nią wymaganych parametrów transmisyjnych</li> </ul>
<p>10.2.2.4.4. Odstęp równoważny sumie mocy przeniku zbliżnego PS ACR, odstęp równoważny sumie mocy przeniku zdalnego PS ELFEXT</p>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• gatunek materiału wsadowego: Cu-ETP, Cu-OFE</li> <li>• linia technologiczna produkcji materiałów wsadowych: Contirod, Upcast</li> <li>• prędkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [m/min.]: 4,0; 0,5</li> <li>• wydatek wody chłodzącej w procesie odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE [l/min.]: 60</li> <li>• średnica drutu [mm]: 0,58</li> <li>• długość kabla [m]: 100</li> <li>• ilość torów transmisyjnych kabla [n]: 4</li> <li>• długość skoku skrętu poszczególnych torów transmisyjnych kabla [mm]: 10,1; 12,8; 15,4; 17,4</li> <li>• częstotliwość prądu [MHz]: 0,772 – 250, zmiana co 0,623</li> <li>• pomiar prowadzony w torach [nr]: 1, 2, 3, 4</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• odstęp równoważny sumie mocy przeniku zbliżnego PS ACR [dB]</li> <li>• odstęp równoważny sumie mocy przeniku zdalnego PS ELFEXT [dB]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• określenie sumy poziomu zniekształceń elektromagnetycznych toru pochodzących z trzech pozostałych par mierzonych na tym samym i przeciwnym niż dołączone źródło sygnału końcu przewodu</li> </ul>

## Rozdział 9

### Wyniki badań doświadczalnych i ich analiza

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki doświadczalnych badań porównawczych miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP pod kątem poznania własności fizycznych (podrozdziały 9.1, 9.3 i 9.4) materiałów oraz ich zachowania w procesach przeróbki plastycznej na zimno (podrozdział 9.2). Dokonano charakteryzacji cech materiałowych prętów i walcówek poddanych następnie próbom ciągnięcia i rekrytalizacji, czyli dwóm podstawowym operacjom technologicznym, które decydują o całokształcie własności drutów i mikrodrutów przeznaczonych dla współczesnej, wysokozaawansowanej elektroniki.

#### 9.1. Identyfikacja własności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych

Istota tej części badań eksperymentalnych polega na określeniu wpływu, jaki wywiera zmiana warunków krystalizacji metalu w procesie ciągłego odlewania, zarówno techniką Upcast i Rautomead w warunkach przemysłowych, jak i laboratoryjną na stanowisku odlewniczym DCC-AGH, na kształtowanie budowy strukturalnej, która z kolei determinuje fizyczne i technologiczne własności materiału. Specyfika procesu ciągłego odlewania pozwala na zastosowanie zmiennych parametrów szybkości oraz wielkości przepływu wody chłodzącej, zarówno w układzie pierwotnym, jak i wtórnym. Oba te parametry odgrywają istotny wpływ na przebieg procesu krystalizacji ciekłego metalu. Identyfikacja materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty ma zatem na celu ujawnienie różnic w strukturach oraz właściwościach materiałów otrzymywanych przy zastosowaniu różnych technologii oraz parametrów procesu odlewania – co z kolei przyczyni się do wykazania ewentualnych odmienności podczas procesów przeróbki plastycznej i wyżarzania. Będzie to przedmiotem kolejnych podrozdziałów tej części pracy. Jak nadmieniono na wcześniejszym etapie dysertacji dla celów porównawczych, jako punkt odniesienia przeprowadzono taki sam program badawczy dla tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne walcówki tlenowej z miedzi w gatunku Cu-ETP pochodzącej z linii ciągłego topienia, odlewania i walcowania Contirod.

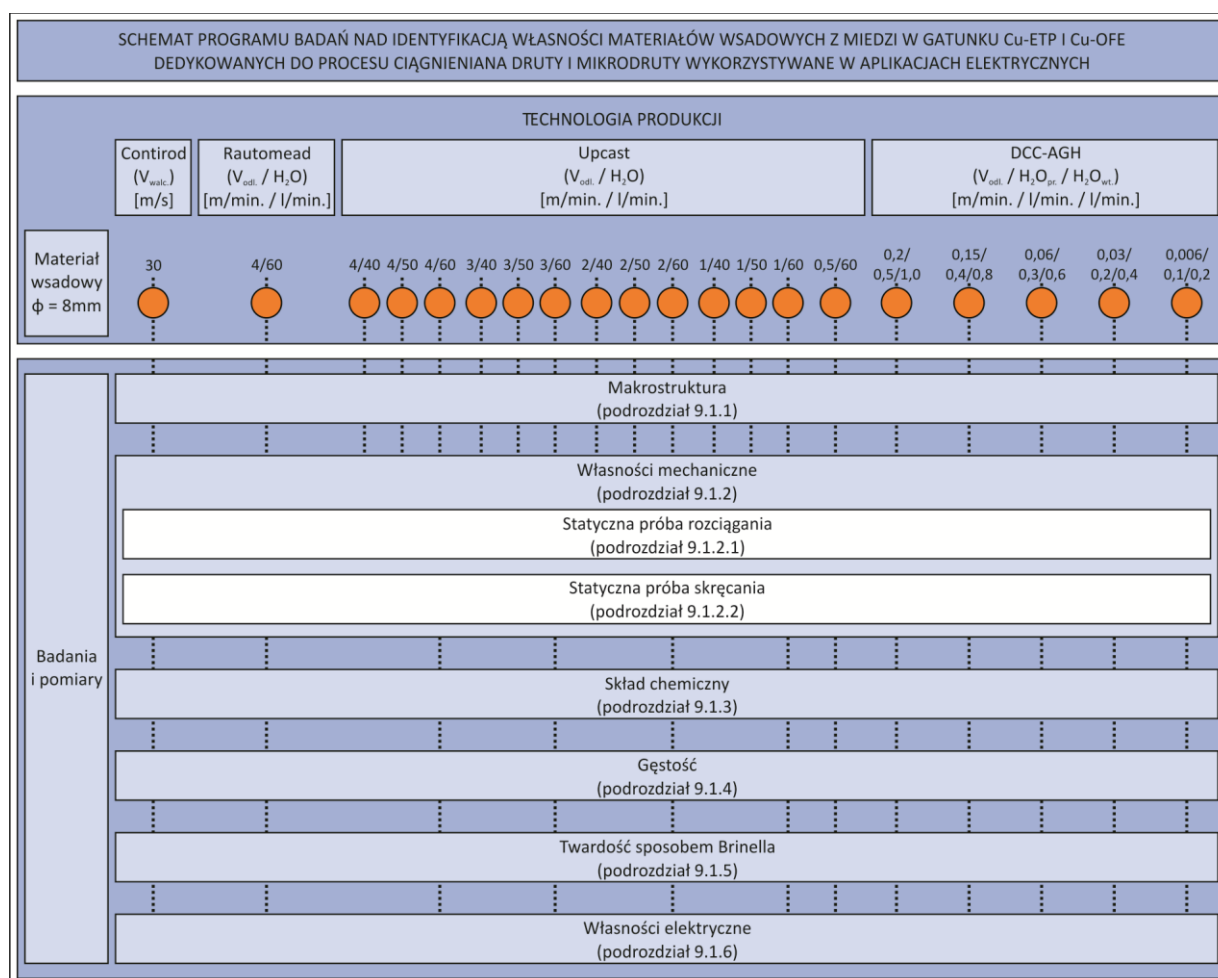
Z uwagi na różnorodność materiałów będących przedmiotem zainteresowania niniejszych pomiarów, a także ze względu na szeroki program badań doświadczalnych mających na celu identyfikację ich właściwości na rysunku 9.1.1 zilustrowano ogólny schemat postępowania realizowanego w ramach niniejszej części pracy. Tym samym stanowi on zbiorcze zestawienie rodzajów materiałów wykorzystanych do badań, a także charakterystykę zaplanowanych eksperymentów wraz z przyporządkowanymi im numerami odpowiednich podrozdziałów dysertacji. Takie podejście do zagadnienia, zdaniem autora, umożliwi czytelnikowi szybkie zaznajomienie się z zaproponowaną tematyką badawczą.

W podrozdziałach 9.1.1 – 9.1.6 zamieszczono wyniki badań własności fizycznych miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP przedstawione w postaci tabel i ilustracji graficznych wraz z ich bezpośrednią analizą. Przedmiotem badań jest materiał w postaci prętów i walcówek o średnicy nominalnej 8,0 mm.

Pierwsza grupa obserwacji stanowiąca temat podrozdziału 9.1.1 dotyczy analizy budowy strukturalnej materiałów wsadowych. Na rysunkach 9.1.2 – 9.1.6 zamieszczono makrostruktury przekrojów wzdłużnych i poprzecznych prętów z miedzi beztlenowej w gatunku Cu-OFE uzyskanych w procesie ciągłego odlewania w warunkach laboratoryjnych na stanowisku DCC-AGH przy prędkościach odlewania z zakresu 0,006 – 0,2 m/min. oraz przy wydatku wody o temperaturze 20 °C na poziomie 0,1 – 0,5 l/min. w układzie chłodzenia pierwotnego i 0,2 – 1,0 l/min. w układzie chłodzenia wtórnego. Na kolejnych ilustracjach 9.1.7 – 9.1.20 przedstawiono makrostruktury przekrojów



wzdłużnych i poprzecznych prętów z miedzi beztlenowej otrzymanych metodami ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych, zarówno w instalacji Upcast przy prędkości odlewania z zakresu 0,5 – 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator o temperaturze 20 °C na poziomie 40 – 60 l/min, jak i w oparciu o technologię Rautomead, w której prędkość odlewania oraz wydatek wody chłodzącej o temperaturze 20 °C wynosiły odpowiednio: 4,0 m/min. i 60 l/min. Uzupełnienie tematyki stanowi rysunek 9.1.21 ilustrujący powierzchnię pręta z miedzi beztlenowej z linii Upcast. Dla celów porównawczych na kolejnym rysunku – 9.1.22 ukazano makrostrukturę walcówki tlenowej z miedzi w gatunku Cu-ETP wyprodukowanej w linii przemysłowej Contirod przy zastosowaniu prędkości walcowania wynoszącej 30 m/s. Całość podrozdziału 9.1.1 uzupełniają rysunki analityczne pełniące rolę zbiorczych podsumowań, które przedstawione na ilustracjach 9.1.23 – 9.1.26 są graficznymi schematami sposobów ukierunkowania krystalitów na przekrojach wzdłużnych i poprzecznych prętów otrzymanych metodami DCC-AGH, Upcast i Rautomead przy zróżnicowanych szybkościach odlewania. Podrozdział zakończono całościowym przedstawieniem na rysunku 9.1.27 makrostruktur wszystkich materiałów poddanych badaniom doświadczalnym.



Rys. 9.1.1. Schemat ogólny programu badań doświadczalnych nad identyfikacją właściwości materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych

Kolejny podrozdział pracy – 9.1.2 dotyczy pomiarów właściwości mechanicznych analizowanych materiałów. W szczególności badania obejmowały statyczną próbę rozciągania (podrozdział 9.1.2.1) oraz statyczną próbę skręcania (podrozdział 9.1.2.2) prętów i walcówek. Wprowadzenie w tematykę pierwszego z podrozdziałów – 9.1.2.1 stanowi zilustrowane na rysunku 9.1.28 porównawcze zestawienie charakterystyk rozciągania walcówki z linii Contirod oraz prętów z miedzi beztlenowej uzyskanych w technologiach Upcast i Rautomead przy standardowych prędkościach odlewania wynoszących 4,0 m/min. Własności mechaniczne tych materiałów zostały natomiast zamieszczone w tabeli 9.1.1.

W dalszej części dysertacji analizie poddano zarówno wpływ prędkości odlewania (podrozdział 9.1.2.1.1), jak i wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator (podrozdział 9.1.2.1.2) na właściwości mechaniczne prętów z miedzi beztlenowej. W tym celu, w ramach pierwszego z wymienionych podrozdziałów obserwacji dokonano na większej grupie materiałów, która rozszerzona została dodatkowo o pręty uzyskane w laboratoryjnej instalacji DCC-AGH przy prędkościach odlewania z zakresu 0,006 – 0,2 m/min. oraz przemysłowej linii Upcast z szybkościami od 0,5 m/min. do 4,0 m/min. i dodatkowo uzyskanych przy zróżnicowanych przepływach wody chłodzącej krystalizator na poziomie 40 – 60 l/min. Krzywe rozciągania wszystkich materiałów zilustrowano na kolejnym rysunku 9.1.29, natomiast w tabeli 9.1.2 zamieszczono ich identyfikację pod kątem własności mechanicznych. Ponadto w dalszej części pracy dokonano charakterystyki materiałów uzyskanych metodą Upcast przy stałej szybkości odlewania i zróżnicowanym przepływie medium chłodzącego, a zarejestrowane przebiegi rozciągania ukazano na rysunkach 9.1.30 – 9.1.32. W tabeli 9.1.3 zestawiono natomiast ich właściwości mechaniczne. Dalsza część niniejszego podrozdziału to zbiorcza i szczegółowa analiza własności mechanicznych wszystkich poddanych obserwacjom materiałów przeprowadzona w oparciu o zilustrowane na rysunkach 9.1.33 – 9.1.38 wykresy dotyczące zmian granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia równomiernego, wydłużenia względnego  $A_{250}$  oraz przewężenia w funkcji prędkości odlewania.

Problematyka badawcza w ramach podrozdziału 9.1.2.1.2 dotyczy analizy wpływu wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator na uzyskane właściwości materiałowe miedzi beztlenowej. W tym celu na kolejnych ilustracjach – od 9.1.39 do 9.1.42 przedstawiono przebiegi charakterystyk rozciągania prętów z instalacji Upcast przy zastosowaniu zróżnicowanych warunków chłodzenia. Następnie dokonano wnikliwej analizy zanotowanych wartości  $R_{0,2}$ ,  $R_m$ ,  $R_m/R_{0,2}$ ,  $A_r$ ,  $A_{250}$  oraz przewężenia, które zestawiono zbiorczo na rysunkach 9.1.43 – 9.1.46 w funkcji przepływu medium chłodzącego.

Kolejnym etapem charakteryzacji miedzianych materiałów wsadowych przeznaczonych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty była analiza ich powierzchni po przeprowadzeniu statycznej próby rozciągania (podrozdział 9.1.2.1.3). Obrazy powierzchni materiałów ukazane na rysunkach 9.1.47 – 9.1.50 dotyczą walcówki oraz prętów uzyskanych sposobem Upcast i DCC-AGH przy prędkościach 4,0 m/min., 0,5 m/min. i 0,006 m/min. W dalszej części pracy na ilustracjach 9.1.51 – 9.1.58 oraz 9.1.63 – 9.1.70 dokonano ponadto obserwacji powierzchni przelomów materiałów przy pomocy mikroskopii skaningowej. Z kolei ilustracje 9.1.59 – 9.1.62 to analiza skaningowa EDX przelomu walcówki wraz z przedstawieniem widma charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego z wtężeń w tym materiale. Zakończenie analizy strukturalnej dwóch gatunków miedzi po statycznej próbie rozciągania stanowią ukazane na rysunkach od 9.1.71 do 9.1.76 powierzchnie przelomów próbek o mniejszych średnicach, które dla lepszego zobrazowania budowy materiałów zostały wycięte wzdłuż osi walcówki i pręta uzyskanego w linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min.

Kontynuację badań własności mechanicznych materiałów stanowi analiza pod kątem przeprowadzonych zabiegów obróbki cieplnej (podrozdział 9.1.2.1.4). Opis rozpoczęto od zilustrowania na rysunkach 9.1.77 i 9.1.78 krzywych zmian wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności prętów i walcówek w funkcji temperatury dla jednogodzinnego i dziesięciogodzinnego testu wygrzewania. Wartości własności mechanicznych, które posłużyły do skonstruowania omawianych charakterystyk zamieszczono w aneksie w tabeli A9.1.1. Na kolejnych ilustracjach 9.1.79 i 9.1.80 przedstawiono wykresy stosunku wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności w funkcji temperatury dla dwóch gatunków miedzi poddanych zabiegom obróbki cieplnej. Następnie przedstawiono analizę wydłużenia względnego i wydłużenia równomiernego próbek w oparciu o charakterystyki ukazane na rysunkach 9.1.81 i 9.1.82. Zakończenie niniejszego podrozdziału stanowi zilustrowana na rysunkach 9.1.83 i 9.1.84 interpretacja krzywych zmian przewężenia dla prętów z miedzi beztlenowej i walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP po cyklu wyżarzania w czasie 1 godziny i 10 godzin.

Druga część badań doświadczalnych nad właściwościami mechanicznymi materiałów wsadowych w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE ujęta w podrozdziale 9.1.2.2 dotyczy statycznej próby skręcania. Wyniki testu w postaci liczby skręceń do momentu zerwania próbek z miedzi beztlenowej i tlenowej w funkcji prędkości odlewania linii DCC-AGH, Upcast i Rautomead zilustrowano na rysunku 9.1.85. Na zakończenie niniejszego rozdziału otrzymane wartości zestawiono w tabeli 9.1.4.

Podrozdział 9.1.3 dotyczy badań doświadczalnych składu chemicznego analizowanych prętów i walcówki. W tym celu dane dotyczące średnich zawartości wagowych pierwiastków zamieszczono

w tabeli 9.1.5, a ich ilustracji graficznej dokonano na rysunkach od 9.1.86 do 9.1.88.

Po dotychczasowym przedstawieniu w niniejszej pracy budowy strukturalnej, a także własności mechanicznych i chemicznych miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP kontynuację badań porównawczych stanowi podrozdział 9.1.4, którego tematyka dotyczy właściwości fizycznych materiałów – gęstości. Wyniki pomiarów metodą hydrostatycznego ważenia zamieszczono w tabeli 9.1.6, natomiast na rysunku 9.1.89 zilustrowano wykresy zmian gęstości w funkcji szybkości odlewania prętów.

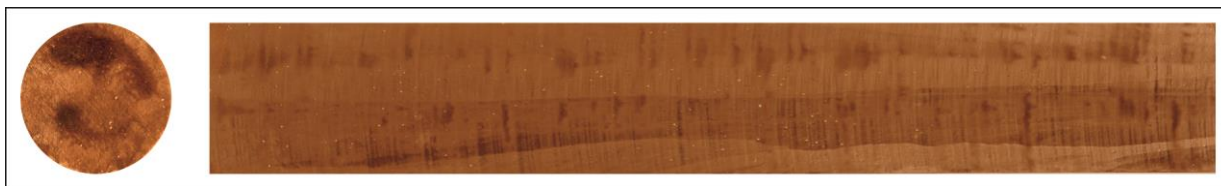
Pomiary twardości sposobem Brinella to kolejna grupa właściwości materiałów poddana obserwacjom w ramach podrozdziału 9.1.5. Uzyskane wyniki badań przedstawione w postaci wartości średnich na rysunku 9.1.90 i w tabeli 9.1.7 dotyczą grupy prętów uzyskanych w procesie ciągłego odlewania przy prędkościach od 0,006 m/min. do 4,0 m/min. oraz walcówki tlenowej.

Ważną grupę badań eksperymentalnych stanowią pomiary własności elektrycznych opisane w podrozdziale 9.1.6. Wyniki badań rezystywności i przewodności elektrycznej prętów i walcówki w postaci wartości liczbowych zamieszczono w tabeli 9.1.8. Natomiast rysunki 9.1.91 i 9.1.92 stanowiące ich ilustracje graficzne odniesione zostały do prędkości odlewania, z kolei przedstawiona na ilustracji 9.1.93 analiza zależności przewodności elektrycznej od szybkości odlewania miedzi beztlenowej skorelowana została z obrazami makrostruktur.

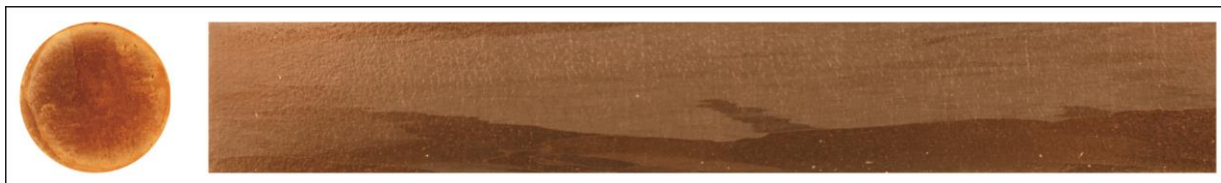
Całość rozdziału kończy podsumowanie czyli zbiorcze ujęcie najważniejszych myśli płynących z analizy wyników badań doświadczalnych nad identyfikacją właściwości materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych.

### 9.1.1. Makrostruktura

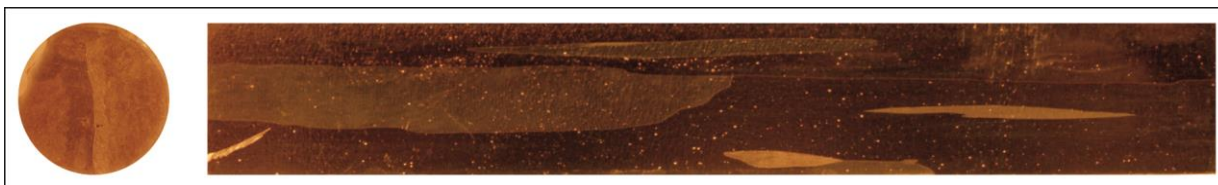
Pierwsze badania doświadczalne, którym poddano materiały wsadowe z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP oraz ich bezpośrednia analiza dotyczyły wpływu warunków chłodzenia, jak i prędkości odlewania na kształtowanie budowy krystalicznej pod kątem ilości i ułożenia ziaren. Obserwację struktur wewnętrznych miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP rozpoczęto od przedstawienia makrostruktur przekrojów wzdłużnych i poprzecznych materiałów uzyskanych w procesach technologicznych prowadzonych zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych. Pierwsza grupa wyników badań doświadczalnych zilustrowana na rysunkach 9.1.2 – 9.1.6 dotyczy prętów z miedzi beztlenowej z instalacji DCC-AGH. Zastosowanie zmiennych parametrów procesu technologicznego tj. szybkości z zakresu od 0,006 m/min. do 0,2 m/min. oraz przepływu wody chłodzącej, zarówno w układzie pierwotnym na poziomie 0,1 - 0,5 l/min., jak i wtórnym 0,2 - 1,0 l/min. wynikało z mocy wydajnościowych zaprojektowanej instalacji i miało na celu ukazanie możliwości zmian w kształtowaniu się struktury prętów podczas procesu odlewania.



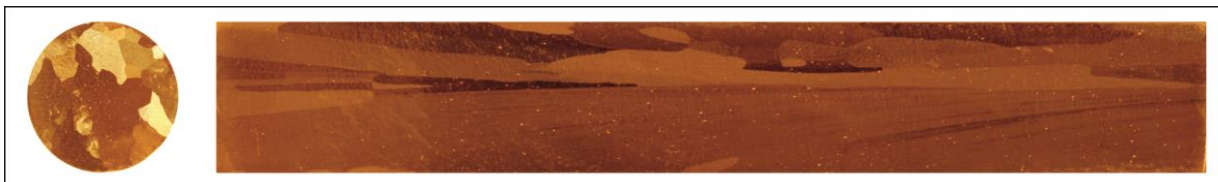
Rys. 9.1.2. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach laboratoryjnych na instalacji DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,006 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej na poziomie 0,1 l/min. w układzie pierwotnym i 0,2 l/min. w układzie wtórnym.



Rys. 9.1.3. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach laboratoryjnych na instalacji DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,03 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej na poziomie 0,2 l/min. w układzie pierwotnym i 0,4 l/min. w układzie wtórnym.



Rys. 9.1.4. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach laboratoryjnych na instalacji DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,06 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej na poziomie 0,3 l/min. w układzie pierwotnym i 0,6 l/min. w układzie wtórnym.



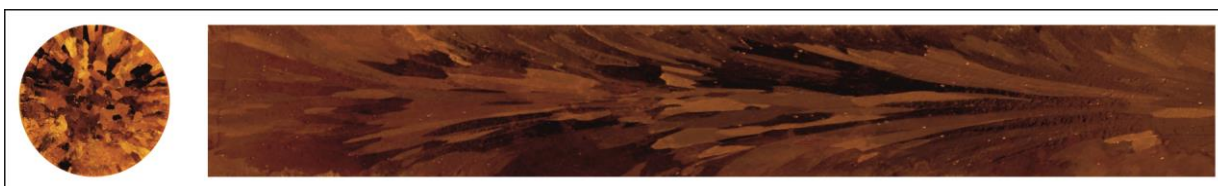
Rys. 9.1.5. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach laboratoryjnych na instalacji DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,15 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej na poziomie 0,4 l/min. w układzie pierwotnym i 0,8 l/min. w układzie wtórnym.



Rys. 9.1.6. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach laboratoryjnych na instalacji DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,2 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej na poziomie 0,5 l/min. w układzie pierwotnym i 1,0 l/min. w układzie wtórnym.

Na podstawie analizy powyższych makrostruktur zauważono, że wraz ze stopniowym wzrostem prędkości odlewania następuje wzrost ilości krystalitów na przekroju poprzecznym i wzdłużnym materiału. Pręt odlany z prędkością najniższą wynoszącą 0,006 m/min. wykazuje strukturę trzyziarnową (por. rys. 9.1.2). Z kolei materiały otrzymane w procesie odlewania przy zastosowaniu wyższych szybkości tj. 0,03 m/min.; 0,06 m/min.; 0,15 m/min. i 0,2 m/min. charakteryzują się występowaniem coraz to większych ilości bardziej drobnych ziaren, których ilość na przekroju poprzecznym materiału kształtuje się średnio na poziomie około 4 (por. rys. 9.1.3), 6 (por. rys. 9.1.4), 8 (por. rys. 9.1.5) i 10 (por. rys. 9.1.6).

Druga grupa materiałów poddana charakteryzacji pod kątem budowy strukturalnej została uzyskana także w procesie ciągłego odlewania, ale tym razem przy zastosowaniu wyższych, przemysłowych prędkości. Miedź beztlenowa w postaci prętów zilustrowanych na rysunkach 9.1.7 – 9.1.19 to makrostrukturalne przekroje materiałów z procesu Upcast przy zastosowaniu zmiennych warunków sposobu odlewania tj. szybkości oraz wydatku wody chłodzącej krystalizator. Pierwsza ze struktur przedstawiona na rysunku 9.1.7 to pręt uzyskany przy prędkości odlewania 0,5 m/min. i przepływie wody chłodzącej 60 l/min.



Rys. 9.1.7. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkości odlewania 0,5 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.

W stosunku do analizowanych poprzednio makrostruktur miedzi otrzymanej na stanowisku

DCC-AGH w przypadku tego materiału zauważono zdecydowaną zmianę w ilości oraz ułożeniu ziaren na przekroju poprzecznym i wzdłużnym. O ile dla miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymanej z instalacji laboratoryjnej istniała możliwość oszacowania ilości pojedynczych, dużych ziaren w materiale, które ukierunkowane były z osią odlewanego pręta, o tyle w omawianym przypadku jest to już utrudnione. Warto nadmienić, że zauważa się ukosowanie krystalitów w kierunku odprowadzania ciepła w materiale tj. do jego zewnętrznej powierzchni.

Dalszy ciąg obserwacji makrostrukturalnej prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych metodą Upcast przy zastosowaniu wyższych prędkości odlewania wynoszących 1,0 m/min.; 2,0 m/min.; 3,0 m/min. i 4,0 m/min. przedstawiono na rysunkach 9.1.8 – 9.1.10. Ponadto, każdy z czterech rodzajów materiałów został uzyskany przy zastosowaniu zmiennego wydatku wody chłodzącej krystalizator wynoszącego odpowiednio 40 l/min., 50 l/min. i 60 l/min. Makrostruktury dostarczają także odpowiedzi na pytanie o wpływ warunków chłodzenia na tworzenie się budowy wewnętrznej miedzi w gatunku Cu-OFE. Pierwsze struktury przedstawione na rysunkach 9.1.8 – 9.1.10 dotyczą materiału otrzymanego przy następujących parametrach: prędkość odlewania – 1 m/min., przepływ medium chłodzącego – 40 l/min., 50 l/min. i 60 l/min.



Rys. 9.1.8. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkości odlewania 1,0 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 40 l/min.



Rys. 9.1.9. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkości odlewania 1,0 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 50 l/min.



Rys. 9.1.10. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkości odlewania 1,0 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.

Na kolejnych rysunkach od 9.1.11 do 9.1.13 zilustrowano makrostrukturalną budowę wewnętrzną prętów odlanych z szybkością 2,0 m/min. przy różnych przepływach wody chłodzącej.



Rys. 9.1.11. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkości odlewania 2,0 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 40 l/min.

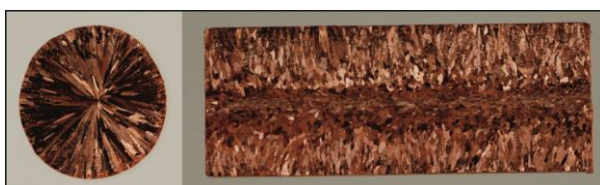


Rys. 9.1.12. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkości odlewania 2,0 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 50 l/min.



Rys. 9.1.13. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkości odlewania 2,0 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.

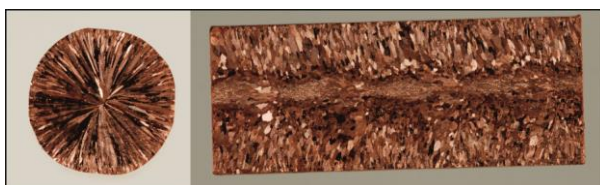
Następne ilustracje 9.1.14 – 9.1.16 to przedstawienie obrazów kształtowania się struktury prętów otrzymanych sposobem Upcast przy szybkości odlewania 3,0 m/min. i wydatku wody w zakresie od 40 l/min. do 60 l/min.



Rys. 9.1.14. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkości odlewania 3,0 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 40 l/min.



Rys. 9.1.15. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkości odlewania 3,0 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 50 l/min.

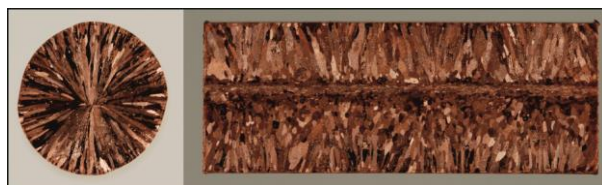


Rys. 9.1.16. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkości odlewania 3,0 m/min. oraz przy przepływie medium chłodzącego krystalizator wynoszącym 60 l/min.

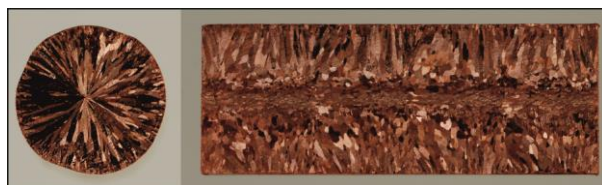
Natomiast rysunki 9.1.17 – 9.1.19 ilustrują budowę strukturalną miedzi beztlenowej otrzymanej przy prędkości 4,0 m/min. i przepływie medium chłodzącego krystalizator wynoszącym 40 l/min., 50 l/min. i 60 l/min.



Rys. 9.1.17. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 40 l/min.



Rys. 9.1.18. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 50 l/min.



Rys. 9.1.19. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.

Na podstawie analizy porównawczej dokonanej w oparciu o budowę krystaliczną prętów otrzymanych w procesie odlewania przy prędkości 1,0 m/min. i wydatku wody chłodzącej podawanej w sposób ciągły na krystalizator w ilości od 40 l/min. do 60 l/min. (por. 9.1.8 – 9.1.10) nie zauważono występowania istotnych różnic w tej grupie materiałów. Podobna sytuacja braku odmienności strukturalnych ze względu na zmienny parametr wydatku wody chłodzącej występuje w przypadku wszystkich pozostałych materiałów uzyskanych w procesie odlewania przy przemysłowych prędkościach z zakresu od 2,0 m/min. do 4,0 m/min. (por. rys. 9.1.11 – 9.1.13, 9.1.14 – 9.1.16, 9.1.17 – 9.1.19). Podsumowując zatem tą część badań doświadczalnych należy zaznaczyć brak wpływu ilości wody chłodzącej na zmianę struktury materiału w gatunku Cu-OFE w warunkach odlewania przy zastosowaniu wysokich – przemysłowych szybkości.

Z uwagi na fakt, że przedmiotem zainteresowania niniejszej dysertacji jest miedź beztlenowa pochodząca z procesów technologicznych prowadzonych zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych, badaniom poddano także materiał w gatunku Cu-OFE w postaci pręta uzyskanego sposobem Rautomead. Jak już nadmieniono w rozdziale drugim niniejszej dysertacji podstawowa idea tej technologii, podobnie jak w metodzie Upcast opiera się o sposób ciągłego topienia i odlewaniu do góry, przy czym etap topienia, redukcji tlenu oraz odlewania realizowany jest – podobnie jak w metodzie DCC-AGH – w tym samym piecu. Z uwagi na zaawansowany charakter szkockiej technologii materiał został uzyskany przy zastosowaniu takich samych parametrów jak w przypadku instalacji fińskiej tj. prędkości – 4,0 m/min. i przepływu medium chłodzącego krystalizator na poziomie 60 l/min. Wyniki badań nad tym materiałem stanowią zatem punkt odniesienia i porównania zarówno dla prętów z linii DCC-AGH, ale przede wszystkim dla miedzi beztlenowej wytwarzanej sposobem Upcast. Poniżej na rysunku 9.1.20 zilustrowano makrostrukturę tego materiału.

Na podstawie analizy poniższego rysunku zauważono, że budowa krystaliczna materiału nie różni się w znaczący sposób od struktury prętów z linii Upcast. I w tym przypadku utworzona została przez dwa typy kryształów. Pierwsze stanowią małe, o regularnych kształtach ziarna rdzenia odlewu, natomiast drugie – to wydłużone, duże dendryty skierowane prostopadle do osi wlewka.



Rys. 9.1.20. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych na instalacji Rautomead przy prędkości odlewania 4,0 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.

Dokonując analizy wszystkich zilustrowanych makrostruktur i nadmienając, że materiały te posiadają typową dla odlewów niejednorodną strukturę, należy również podkreślić aspekty natury technicznej towarzyszące przygotowaniu próbek. W przekroju wzdłużnym materiały prezentują charakterystyczny dla odlewów model składający się z kryształów równoosiowych i otaczających je ziaren kolumnowych. Niekiedy ziarna kolumnowe obejmują cały przekrój pręta, przez co strefa równoosiowa jest znikomo mała i stanowi jedynie cienką linię, w której spotykają się dendryty. Niezwykle trudno jest przygotowując próbkę przeciąć ją dokładnie w punkcie styku ziaren. Nie udało się to np. dla próbek z miedzi w gatunku Cu-OFE odlewanych z prędkością 3,0 m/min. przy przepływie wody chłodzącej na poziomie 40 l/min. i 60 l/min. zilustrowanych na rysunkach 9.1.14 i 9.1.16. Mimo, że fotografia przekroju poprzecznego ujawnia doskonale skupienie dendrytów w jednym punkcie pręta, to na ilustracji przekroju wzdłużnego jest to niedostrzegalne. Powodem jest przesunięcie płaszczyzny cięcia względem jej rzeczywistej osi wyznaczonej przez strukturę.

Przekroje wzdłużne prętów z miedzi beztlenowej zilustrowane na rysunkach 9.1.2 – 9.1.20 ujawniają ponadto okresowość struktury na swojej długości. Zaobserwowano występowanie w budowie strukturalnej powtarzających się sekwencji konfiguracji ułożenia ziaren. Przykładowo dla miedzi beztlenowej otrzymanej w przemysłowym procesie odlewania metodą Upcast z prędkością 3,0 m/min. i przy przepływie wody chłodzącej na poziomie 60 l/min. zjawisko widoczne jest dla ziaren koncentrujących się wokół osi (por. rys. 9.1.16). Z kolei rysunki makrostruktur miedzi w gatunku Cu-OFE odlewanej przy prędkościach np. 0,2 m/min. (por. rys. 9.1.6), 0,5 m/min. (por. rys. 9.1.7), 1,0 m/min. (por. rys. 9.1.10) i 2,0 m/min. (por. rys. 9.1.11) ukazują powtarzającą się sekwencję ułożenia kryształów kolumnowych. Zjawisko, o którym mowa znajduje swoją przyczynę w istocie prowadzenia procesu ciągłego odlewania, zarówno na stanowisku DCC-AGH, jak i w oparciu o technologię Upcast i Rautomead, którą jest ruch posuwisto-zwrotny odlewane go materiału. Objawia się to także na zewnętrznej powierzchni pręta, w postaci poprzecznych prążków będących śladem miejsca zmiany zwrotu wyciąganego z krystalizatora pręta (w istocie śladem miejsca postoju), co ukazane zostało na ilustracji 9.1.21. Ta niejednorodność struktury występująca na długości materiału jest z kolei czynnikiem mogącym utrudnić rzetelne przygotowanie próbki do obserwacji jej przekroju poprzecznego, a ponadto jest przyczyną pewnych problemów w procesie ciągnięcia tworząc m.in. dużą ilość pyłu miedzianego.



Rys. 9.1.21. Zewnętrzna powierzchnia pręta z miedzi beztlenowej w gatunku Cu-OFE uzyskanego w procesie ciągłego odlewania metodą Upcast



W związku z powyższym przeprowadzając rzetelną analizę makrostruktur prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE należy podkreślić skomplikowane ułożenie ziaren we wnętrzu materiału we wszystkich trzech wymiarach przestrzeni. Przykładowo ziarno, które w przekroju poprzecznym wydaje się być drobne, w ujęciu wzdłużnym może wykazać postać wąskiego i długiego dendrytu.

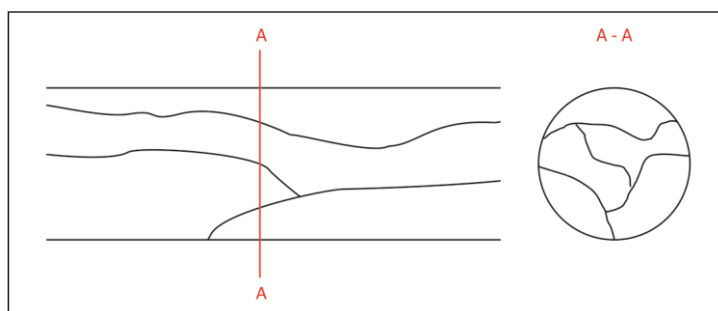
Tego typu problemów nie przysparza walcówka z miedzi tlenowej w gatunku Cu-ETP (por. rys. 9.1.22). Materiał ten, z uwagi na jego bezpośrednie zastosowanie na szeroką skalę w wielu tradycyjnych aplikacjach kablowych stanowi wzorcowy punkt odniesienia dla przedstawionych powyżej makrostrukturalnych obserwacji prętów. Walcówka wykazuje skrajną odmienność budowy strukturalnej od analizowanej miedzi beztlenowej. Charakteryzuje się ona drobnoziarnistą strukturą, której kryształy mają wielkość od 10  $\mu\text{m}$  do 20  $\mu\text{m}$  i cechuje je równomierne ułożenie we wszystkich kierunkach. Tak więc pod względem budowy wewnętrznej walcówka jest materiałem izotropowym.



Rys. 9.1.22. Makrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP uzyskanej w procesie przeróbki plastycznej na gorąco w warunkach przemysłowych na instalacji Contirod przy prędkości walcowania 30 m/s.

Po takim wprowadzeniu w tematykę identyfikacji stanu strukturalnego materiałów wsadowych w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP oraz po stwierdzeniu braku wpływu warunków chłodzenia na tworzenie się zróżnicowanych struktur krystalicznych miedzi beztlenowej, w dalszej części podrozdziału poddano szczegółowej analizie kolejne zagadnienie technologiczne, a w szczególności wpływ prędkości odlewania na kształtowanie się struktury pod kątem ilości oraz ułożenia ziaren. W tym celu, w oparciu o zamieszczone w niniejszej części ilustracje makrostruktur prętów dokonano podziału materiałów na cztery zasadnicze grupy. Pierwszą z nich stanowią materiały odlewane w warunkach laboratoryjnych na stanowisku DCC-AGH przy zastosowaniu niewielkich prędkości odlewania z zakresu 0,006 – 0,15 m/min. Drugą tworzą pręty uzyskane przy szybkościach nieco wyższych wynoszących 0,2 m/min.; 0,5 m/min. i 1,0 m/min. Kolejną kategorię stanowi materiał otrzymany z prędkością 2,0 m/min, zaś ostatnia grupa to miedź otrzymana w procesie odlewania na instalacji Upcast lub Rautomead przy szybkości z zakresu 3,0 – 4,0 m/min.

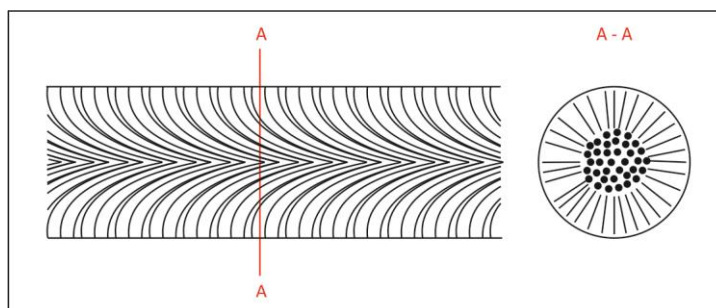
Dla pierwszej z wytypowanych grup prętów kryształy są dużymi ziarnami (por. rys. 9.1.2 – 9.1.5) o dowolnej długości, które ukierunkowane są równoosiowo. Analizując makrostruktury przekrojów poprzecznych i wzdłużnych zauważa się, że im mniejsza prędkość odlewania, tym ziarna stają się większe, w związku z czym ich ilość się zmniejsza. Schematyczne przedstawienie budowy wewnętrznej tych materiałów ilustruje rysunek 9.1.23.



Rys. 9.1.23. Schemat makrostruktury wzdłużnej i poprzecznej pręta z miedzi beztlenowej otrzymywanej metodą DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,006 – 0,15 m/min.

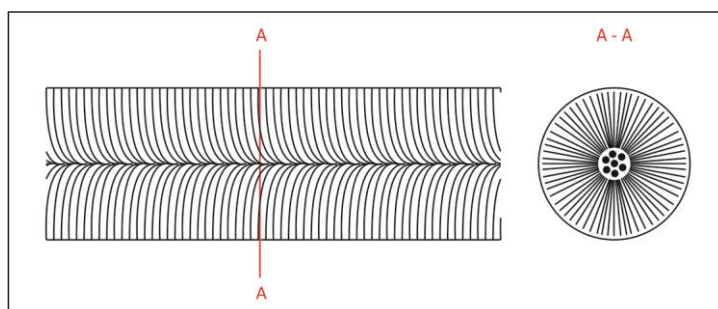
Kolejną grupę materiałów poddanych analizie stanowią pręty otrzymane w procesie ciągłego odlewania z prędkościami w zakresie 0,2 – 1,0 m/min. Materiały te posiadają stosunkowo drobne ziarna (około 100 – 200  $\mu\text{m}$ ), skupione na znacznej powierzchni wokół osi pręta (por. rys. 9.1.6 – 9.1.10). Jest to grupa kryształów, które na przekrojach wzdłużnych są długimi ziarnami (około 1 – 2 mm) skierowanymi równolegle do osi pręta i zukosowanymi w stronę odprowadzania ciepła tj. do

zewnątrznej powierzchni materiału. Uproszczony model dla tej grupy materiałów zilustrowano na rysunku 9.1.24.



Rys. 9.1.24. Schemat makrostruktury wzdłużnej i poprzecznej pręta z miedzi beztlenowej otrzymywanej metodą DCC-AGH i Upcast przy prędkości odlewania 0,2 – 1,0 m/min.

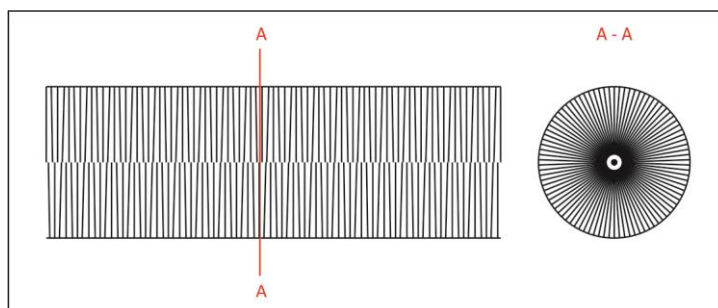
Na podstawie analizy makrostruktur poprzecznych dla kolejnej – trzeciej grupy materiałów uzyskanych w procesie ciągłego odlewania przy prędkości 2,0 m/min. (por. rys. 9.1.11 – 9.1.13) zaobserwowano występowanie bardzo drobnych krystalitów w okolicach osi prętów. Jednakże obszar ich zasięgu jest zdecydowanie mniejszy niż dla miedzi odlanej z prędkościami niższymi wynoszącymi od 0,2 m/min. do 1,0 m/min. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że na potrzeby analizy wzorcowym zgięciem metalograficznym są przekroje zilustrowane na rysunku 9.1.13. W obu płaszczyznach łatwo dostrzegalna jest strefa drobnych krystalitów równoosiowych. Jednak znaczną część powierzchni zajmują kolumnowe dendryty skierowane od osi materiału do jego zewnętrznej powierzchni. Dostrzegalne jest również ich nieznaczne zukośnienie, jednak nie w takim stopniu jak w przypadku prętów otrzymanych w procesie ciągłego odlewania przy niższych prędkościach (zakres 0,2 – 1,0 m/min.). Wynika to ze zwiększonej szybkości odlewania, a co za tym idzie większej intensywności odprowadzania ciepła. Ciekły metal krystalizuje szybciej i w sposób bardziej gwałtowny, co sprzyja powstawaniu ziaren słupkowych, wydłużonych w kierunku odprowadzania ciepła. Poniżej na rysunku 9.1.25 zilustrowano uproszczony schemat struktury prętów otrzymywanych w procesie ciągłego odlewania przy prędkości 2,0 m/min.



Rys. 9.1.25. Schemat makrostruktury wzdłużnej i poprzecznej pręta z miedzi beztlenowej otrzymanego metodą Upcast przy prędkości odlewania 2,0 m/min.

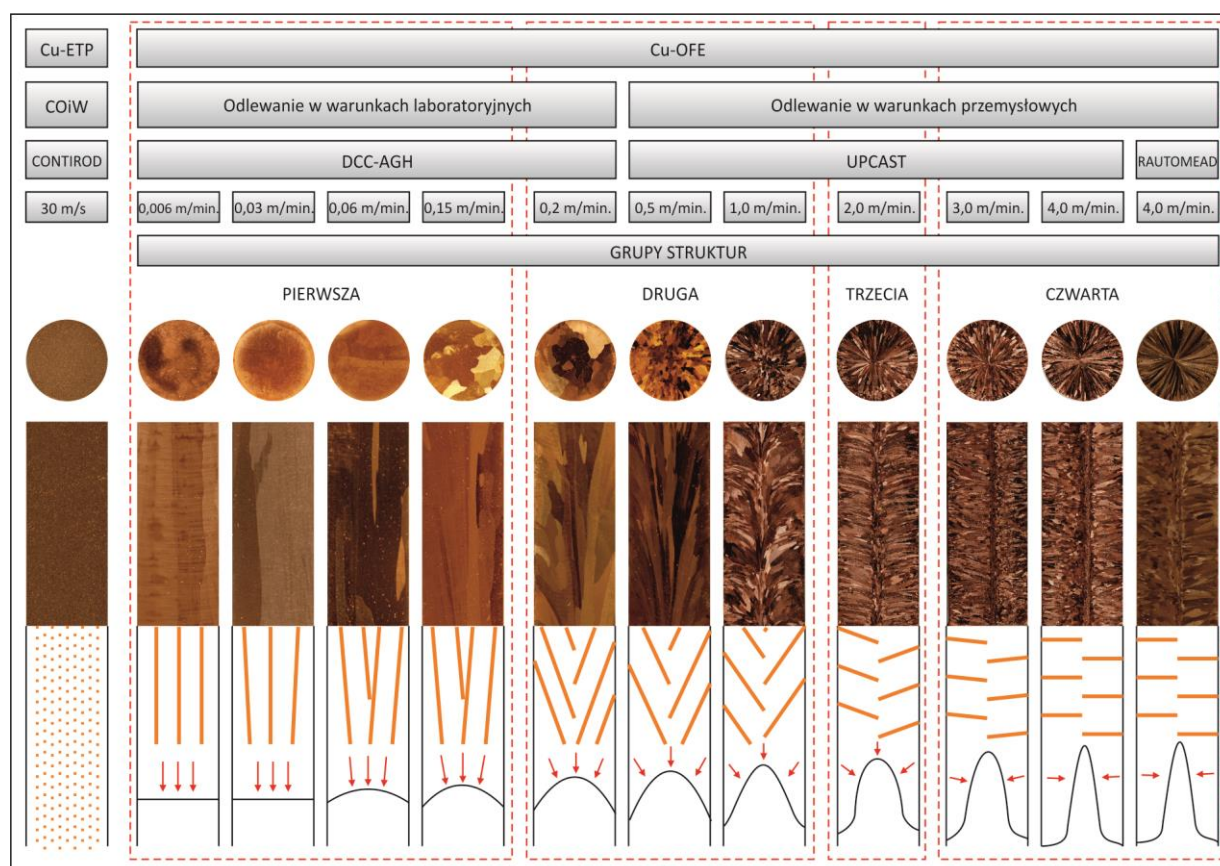
Analiza makrostruktur przekrojów wzdłużnych i poprzecznych kolejnej – czwartej grupy materiałów uzyskiwanych w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych (linia technologiczna Upcast, Rautomead) przy zastosowaniu wysokich prędkości tj. 3,0 m/min. i 4,0 m/min. (por. rys. 9.1.14 – 9.1.16 i 9.1.17 – 9.1.20) dowiodła, że nie występują pomiędzy nimi znaczące różnice. Wszystkie pręty charakteryzują się silną koncentracją prostopadłych do powierzchni zewnętrznej krystalitów słupkowych w swoim centralnym punkcie. Jest to widoczne analizując zwłaszcza makrostruktury przekrojów poprzecznych tych materiałów. Praktycznie nie występuje strefa ziaren równoosiowych. Jest to skutek gwałtownego przebiegu procesu krystalizacji, podczas którego ciepło jest odprowadzane przez ścianki krystalizatora i powoduje wzrost krystalitów w kierunku prostopadłym do osi. Szybkość odprowadzania ciepła, która dla dużych prędkości odlewania jest największa, determinuje wzrost krystalitów kolumnowych, aż do zakrzepnięcia całego metalu. Ponadto ziarna są smuklejsze i przez swoje prostopadłe ułożenie krótsze niż w strukturach prętów pochodzących z niższych prędkości odlewania (proces DCC-AGH). Uproszczony schemat struktury prętów dla tej

grupy materiałów otrzymywanych w procesie ciągłego odlewania z dużymi prędkościami przedstawiono na poniższym rysunku 9.1.26.



Rys. 9.1.26. Schemat makrostruktury wzdłużnej i poprzecznej pręta z miedzi beztlenowej otrzymywanej metodą Upcast lub Rautomead przy prędkości odlewania 3,0 – 4,0 m/min.

Zbiorcze zestawienie wszystkich makrostruktur przekrojów wzdłużnych i poprzecznych analizowanych materiałów zilustrowano na rysunku 9.1.27. Z uwagi na fakt niezauważalnych różnic w strukturach prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE odlewanych metodą Upcast przy niezmienniej prędkości, ale zróżnicowanych warunkach przepływu wody chłodzącej na niniejszym schemacie zamieszczone zostały makrostruktury uzyskane przy zastosowanych warunkach chłodzenia medium na poziomie 60 l/min.



Rys. 9.1.27. Identyfikacja materiałów wsadowych w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty pod kątem stanu strukturalnego [93, 94]

Dokonując całościowej analizy zilustrowanych na rysunku 9.1.27 materiałów stwierdza się, że wszystkie pręty charakteryzują się budową typową dla klasycznych odlewów tj. dla miedzi odlewanej z wysokimi – przemysłowymi prędkościami tj. w zakresie 0,5 – 4,0 m/min. wyróżnić należy wyraźną strukturę ziaren równoosiowych oraz strefę kryształów kolumnowych prostopadłych do osi odlewanej materiału. Z analizy przekrojów wzdłużnych zilustrowanych materiałów wynika ponadto, że im

mniej sza prędkość odlewania tym ziarna stają się większe. Na uwagę zasługuje również fakt, że zmieniają one swoje ułożenie od prostopadłego względem osi pręta dla materiałów odlewanych z dużymi prędkościami do równoosiowych dla materiałów odlewanych z dużo mniejszymi prędkościami. Warto zaznaczyć, że materiał pochodzący z najniższej prędkości odlewania prezentuje strukturę dwu – trzyziarnową o długości dowolnej, gdyż jest to proces ciągłego odlewania. Zatem przeprowadzone badania doświadczalne dowiodły, że odpowiedni dobór parametrów procesu odlewania wpływa na kształtowanie struktury miedzi beztlenowej poprzez zmianę kierunku wektora gradientu temperatury na froncie krystalizacji metalu. Tym samym stanowią jeden z ważniejszych wyników dowodzenia tezy niniejszej pracy.

Na ilustracji 9.1.27 wyróżniono omówione i zdefiniowane cztery grupy struktur (por. rys. 9.1.23 – 9.1.26). W dolnej części rysunku 9.1.27 zaznaczono także schematycznie zmianę kierunku ułożenia ziaren na przekroju wzdłużnym, jak również szacowaną zmianę kształtu frontu krystalizacji, przy czym warto zwrócić uwagę na fakt, że dla bardzo małych prędkości odlewania front krystalizacji staje się płaski. Natomiast po lewej stronie przedstawiono dla porównania budowę strukturalną walcówki ETP jako produktu o odkształceniu ponad 99,99 % (współczynnik wydłużenia 144) realizowanym na gorąco w szesnastu kłatkach walcowniczych, poddanego szesnaście razy procesowi rekrytalizacji dynamicznej z ogromnymi prędkościami odkształcenia, co zapewnia znakomitą jakość drobnoziarnistej struktury, a zarazem znakomitą odkształcalność.

Podsumowując analizę budowy strukturalnej prętów z miedzi beztlenowej w gatunku Cu-OFE z materiałem Cu-ETP stwierdza się ich wyraźną odmienność. Wynika ona z różnic w procesach technologicznych wytwarzania dwóch gatunków materiałów. W przypadku metody Contirod jest to przeróbką plastyczną na gorąco, w wyniku której otrzymuje się walcówkę, a więc materiałem o doskonałej strukturze, podczas gdy pręty pochodzące z metody ciągłego odlewania DCC-AGH, Upcast i Rautomead to klasyczne odlewy. Chociaż odmienność strukturalna miedzi uzyskanej w procesie odlewania i walcowania na gorąco jest oczywista i nie wymaga eksperymentalnego dowodzenia, to jej identyfikacja jest niezbędnym elementem niniejszej pracy. Z jednej strony zostały ukazane możliwości wytworzenia materiałów o strukturze kilkuziarnowej, a to będzie posiadać istotne znaczenie dla dowodzenia drugiej części tezy niniejszej pracy, z drugiej zaś zostaną wykazane ograniczone – w stosunku do miedzi beztlenowej w gatunku Cu-OFE – zdolności ciągnicze walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP o strukturze dedykowanej do procesu ciągnięcia mikrodrutów z uwagi na obecność tlenków miedzi  $Cu_2O$ . Te zagadnienia stanowią bardzo ważne fragmenty dysertacji zamieszczone w dalszej jej części. Zatem kontynuując w stosunku do walcówki i pręta badania porównawcze – m.in. własności mechanicznych podczas statycznej próby rozciągania i statycznej próby skręcania, a także biorąc pod uwagę ich odmienność z punktu widzenia struktury oraz stanu energetycznego należy spodziewać się zróżnicowania właściwości wytrzymałościowych i plastycznych materiałów. Tematyka ta stanowi przedmiot badań i analiz przeprowadzonych w kolejnym podrozdziale pracy tj. 9.1.2.

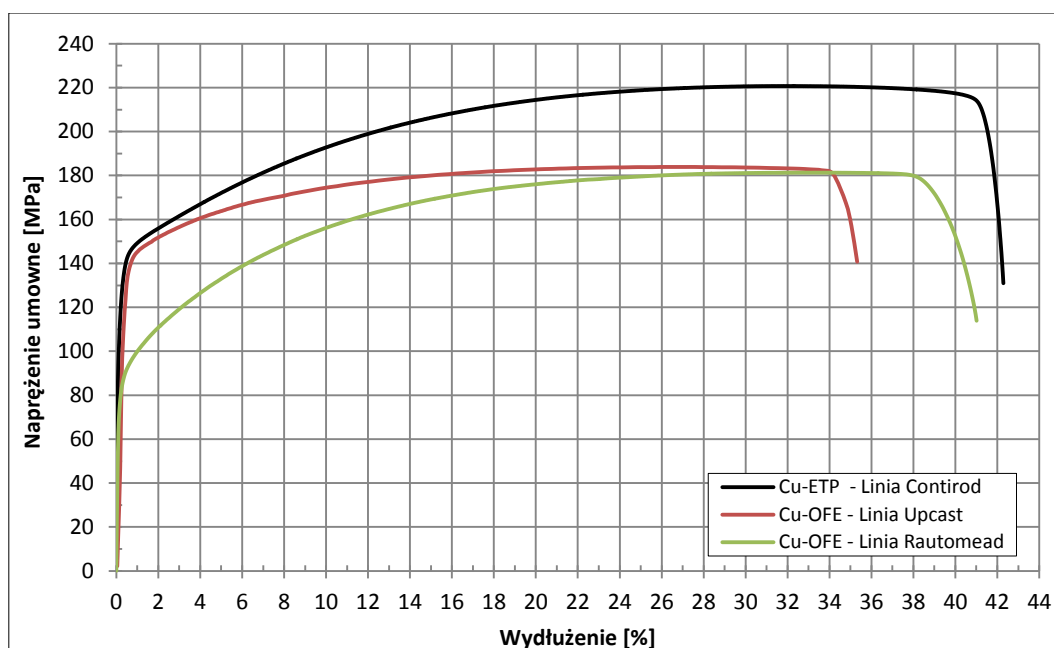
### 9.1.2. Własności mechaniczne

Omawiane dwa gatunki miedzi poddane zostały statycznej próbie rozciągania opisanej w podrozdziale 9.1.2.1 oraz testowi skręcania stanowiącemu główny temat części 9.1.2.2. Obydwie próby mechaniczne różnią się od siebie kierunkiem przyłożenia wektora siły. Celem ich przeprowadzenia jest określenie, czy ujawnione w poprzednim etapie badań doświadczalnych odmienności strukturalne znajdują swoje odbicie w zróżnicowaniu własności wytrzymałościowych i plastycznych jako konsekwencji poddania materiałów różnym schematom odkształcenia.

#### 9.1.2.1. Statyczna próba rozciągania

Analizę właściwości mechanicznych materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP przeznaczonych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty rozpoczęto od przedstawienia porównawczych charakterystyk rozciągania wybranych prętów i walcówki. Na rysunku 9.1.28 zilustrowano wykresy zależności naprężenia od wydłużenia dla prętów uzyskanych metodą Upcast i Rautomead przy zastosowaniu standardowych parametrów prowadzenia procesu ciągłego odlewania tj. dla szybkości 4,0 m/min. i przepływu wody chłodzącej krystalizator 60 l/min., a także dla miedzi

tlenowej otrzymanej w linii Contirod. Z kolei w tabeli 9.1.1 zamieszczono własności mechaniczne tych materiałów.



Rys. 9.1.28. Charakterystyki rozciągania prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych metodą Upcast i Rautomead przy prędkości odlewania 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP otrzymanej sposobem Contirod

Tabela 9.1.1. Właściwości mechaniczne prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych metodą Upcast i Rautomead przy prędkości odlewania 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP otrzymanej sposobem Contirod

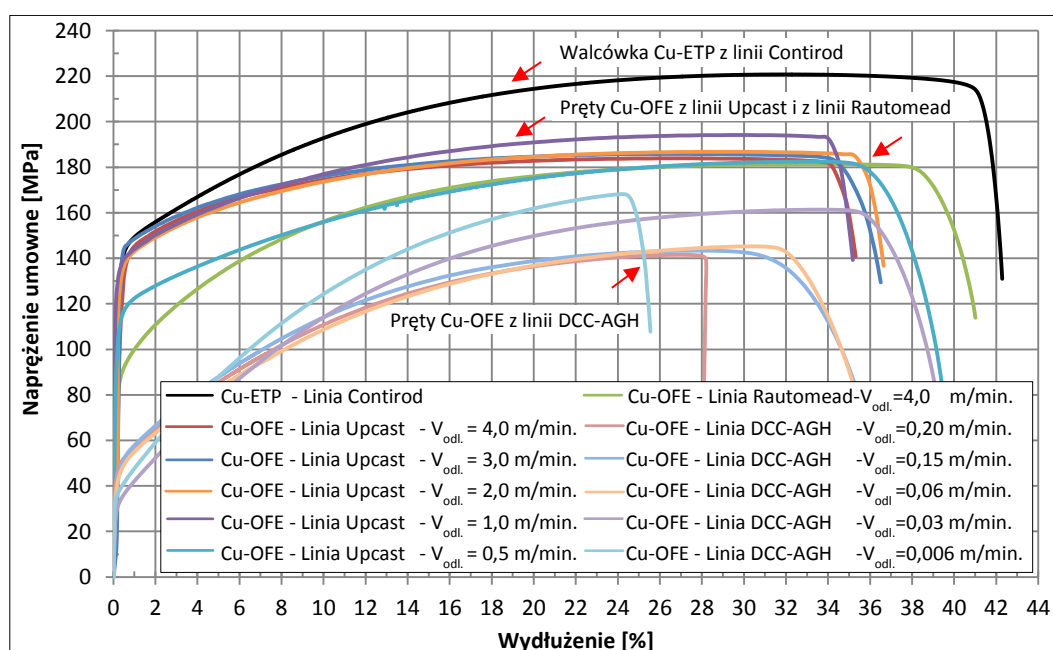
Gatunek materiału	Linia technologiczna	Prędkość odlewania	$R_{0,2}$	$R_m$	$A_r$	$A_{250}$
		[m/min.]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
Cu-OFE	Rautomead	4,0	91,1	181,3	32,7	41,0
	Upcast		138,3	183,9	26,8	35,3
Cu-ETP	Contirod	-	140,0	220,7	31,7	42,3

Na podstawie analizy porównawczej charakterystyk przedstawionych na rysunku 9.1.28 oraz wartości zamieszczonych w tabeli 9.1.1 zaobserwowano znaczną różnicę w procesie umacniania się miedzi beztlenowej i tlenowej. Materiał w gatunku Cu-ETP wykazuje wyższe własności wytrzymałościowe niż pręty z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymane w technologiach Upcast i Rautomead. Różnica pomiędzy wartościami wytrzymałości na rozciąganie dla omawianych dwóch gatunków materiałów wynosi średnio około 40 MPa, a w przypadku wartości granicy plastyczności jest mniejsza i kształtuje się na poziomie średnio około 20 MPa. Świadczy to o tym, że miedź w gatunku Cu-ETP posiada wyższy współczynnik umocnienia. Potwierdzają to obliczone dla powyższych materiałów współczynniki umocnienia tj. wykładniki potęgi w równaniu Hollomona, które dla miedzi w gatunku Cu-ETP wynoszą około 0,31 podczas gdy dla prętów z miedzi beztlenowej otrzymywanej metodą Rautomead i Upcast odpowiednio 0,28 i 0,27. Z porównania charakterystyk rozciągania wynika ponadto, że wydłużenie względne, które dla prętów z miedzi beztlenowej kształtuje się na poziomie średnio około 38,15 % jest mniejsze o ponad 4 % w porównaniu do materiału uzyskanego w linii Contirod. Odmienne zachowanie podczas statycznej próby rozciągania należy tłumaczyć wykazanymi w poprzednim podrozdziale pracy (por. podrozdział 9.1.1) różnicami w budowie strukturalnej materiałów będącymi konsekwencją odmiennych procesów ich wytwarzania. Jak nadmieniono wcześniej miedź w gatunku Cu-ETP jako materiał po procesie walcowania na gorąco posiada drobnokrystaliczną strukturę (por. rys. 9.1.22), którą charakteryzuje wysoka wytrzymałość na rozciąganie oraz stosunkowo niska granica plastyczności (por. rys. 9.1.1). Pręty z miedzi beztlenowej prezentują typową dla odlewu dendrytyczną strukturę, która determinuje niższe od walcówki właściwości wytrzymałościowe, przy zachowaniu podobnej wartości granicy plastyczności. Ten fragment analizy własności wytrzymałościowych materiałów uzyska głębsze

uzasadnienie, po analizie charakterystyk materiałów w procesie skręcania, w którym to wyraźnie ujawniona zostanie relacja orientacji wektora sił zewnętrznych względem wektora orientacji powierzchni ziaren w próbkach odlewanych.

9.1.2.1.1. Analiza wpływu prędkości odlewania na własności mechaniczne materiałów wsadowych

Z uwagi na fakt, że w ramach niniejszej dysertacji statycznej próbie rozciągania poddano większą ilość materiałów powyższa analiza dotycząca właściwości mechanicznych rozszerzona została o charakterystyki rozciągania prętów otrzymanych w procesie ciągłego odlewania DCC-AGH oraz Upcast przy zróżnicowanych prędkościach odlewania. W tym celu na rysunku 9.1.29 zilustrowano krzywe rozciągania materiałów uzyskanych w warunkach laboratoryjnych przy szybkości z zakresu 0,006 – 0,2 m/min. oraz przepływie wody w układzie chłodzenia pierwotnego 0,1 – 0,5 l/min. i wtórnego 0,2 – 1,0 l/min., a także w warunkach przemysłowych na instalacji Upcast przy prędkościach od 0,5 m/min. do 4,0 m/min oraz wydatku wody chłodzącej 40 – 60 l/min. Kolorem czarnym zaznaczono krzywą rozciągania dla miedzi w gatunku Cu-ETP. W tabeli 9.1.2 zamieszczono natomiast wartości liczbowe granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  dla wymienionych materiałów.



Rys. 9.1.29. Charakterystyki rozciągania prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych metodą DCC-AGH (prędkość odlewania 0,006 – 0,2 m/min., przepływ wody chłodzącej w układzie pierwotnym 0,1 - 0,5 l/min. i wtórnym 0,2 - 1,0 l/min.) i Upcast (prędkość odlewania 0,5 – 4,0 m/min., przepływ wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod

Tabela 9.1.2. Identyfikacja materiałów wsadowych w gatunku Cu-OFE uzyskanych w linii Upcast i DCC-AGH przeznaczonych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty pod kątem właściwości wytrzymałościowych

Gatunek materiału	Linia technologiczna	Prędkość odlewania	$R_{0,2}$	$R_m$	$A_r$	$A_{250}$
		[m/min.]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
Cu-OFE	Upcast	4,0	138,3	183,9	26,8	35,3
		3,0	140,1	185,8	27,0	36,5
		2,0	132,3	186,8	29,1	36,6
		1,0	134,6	194,1	29,8	35,2
		0,5	112,2	182,5	33,0	39,5
	DCC-AGH	0,2	46,4	141,5	27,0	28,2
		0,15	41,2	143,4	27,8	36,2
		0,06	40,1	145,3	30,3	35,8
		0,03	39,7	161,4	33,5	39,2
		0,006	36,1	168,2	24,2	25,5

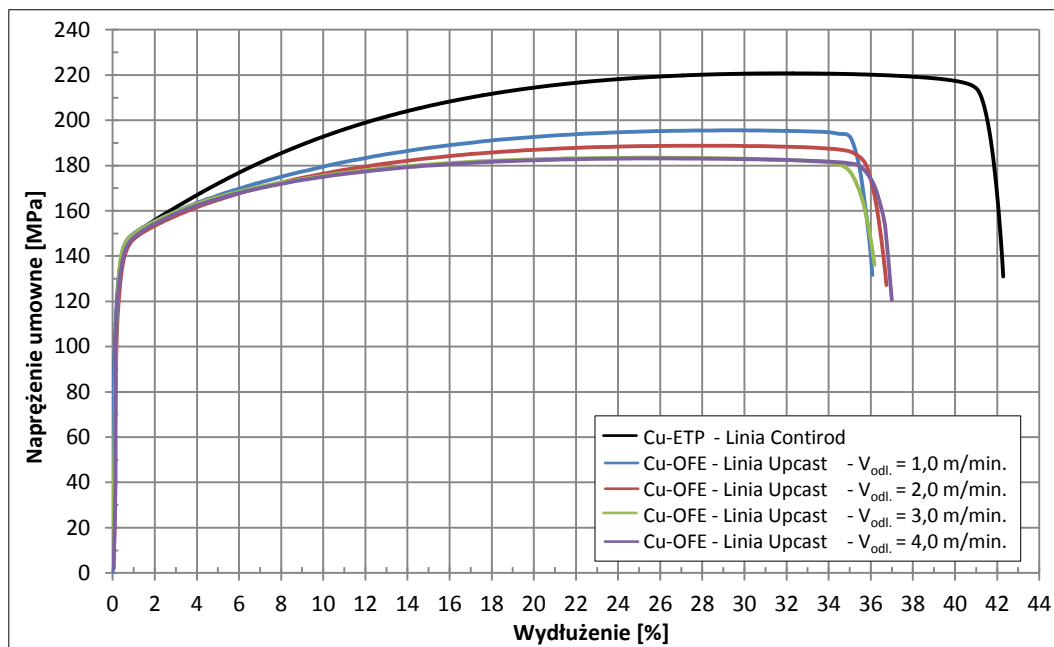
Dokonując analizy zilustrowanych na rysunku 9.1.29 krzywych należy zaznaczyć, że dla niektórych materiałów – np. prętów otrzymanych w procesie DCC-AGH z prędkościami odlewania 0,006 m/min. i 0,2 m/min. oraz metodą Upcast przy szybkości 1,0 m/min. próba rozciągania nie odbywała się w sposób bezproblemowy, czego efektem była lokalizacja odkształcenia w szczęce maszyny wytrzymałościowej. Pomimo wielokrotnych prób dla tych materiałów zanotowano nieco odmienne przebiegi charakterystyk rozciągania. Dokonując jednakże całościowej analizy przedstawionych zależności zauważono podział materiałów na dwie grupy wykazujące odmienne przebiegi charakterystyk rozciągania. Pierwsza obejmuje pręty otrzymane w procesie ciągłego odlewania na instalacji Upcast przy prędkościach przemysłowych z zakresu od 0,5 m/min. do 4,0 m/min., druga – to materiały uzyskane w warunkach laboratoryjnych na instalacji własnej DCC-AGH. Dla obydwu grup zauważono monotoniczny wzrost wytrzymałości na rozciąganie wraz ze spadkiem prędkości odlewania. I tak dla materiału uzyskanego w warunkach przemysłowych metodą Upcast przy największej prędkości odlewania 4,0 m/min. wartość wytrzymałości na rozciąganie wynosi około 184 MPa, natomiast dla prętów otrzymanych tą samą metodą, ale przy mniejszych szybkościach wynoszących 3,0 m/min.; 2,0 m/min. i 1,0 m/min. następuje wspomniany wzrost własności do około 185 – 194 MPa. W przypadku materiałów pochodzących z instalacji własnej DCC-AGH również zaobserwowano podobną tendencję – podczas gdy dla pręta otrzymanego przy najwyższej, laboratoryjnej prędkości – 0,2 m/min. wartość  $R_m$  kształtuje się na poziomie około 142 MPa, dla pozostałych materiałów uzyskanych przy zastosowaniu tej metody i odpowiednio mniejszych szybkości – 0,15 m/min.; 0,006 m/min.; 0,03 m/min. i 0,006 m/min. zaobserwowano jej zwiększenie do poziomu około 143 – 168 MPa. Zarówno w przypadku prętów pochodzących z procesu ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych, jak i laboratoryjnych tak duży zauważalny spadek wytrzymałości na rozciąganie wraz z prędkością odlewania stanowi pewne odstępstwo od reguły Halla-Petcha, zgodnie z którą to materiał o drobnym ziarnie wykazuje wyższe właściwości wytrzymałościowe niż materiał gruboziarnisty. Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych zaobserwowano w makrostrukturach materiałów pochodzących z większych prędkości odlewania większą ilość ziaren. Przyczyny takiego odwrotnego zachowania między beztlenowej uzyskanej przy szybkościach odlewania z zakresu od 0,006 m/min. do 4,0 m/min. należy upatrywać we wspomnianym wcześniej (por. podrozdział 9.1.1) ukierunkowaniu (granic) powierzchni ziaren, które w przypadku prętów otrzymanych przy prędkości 3,0 m/min. i 4,0 m/min. są prostopadłe do kierunku przyłożenia wektora siły w próbie rozciągania. W przypadku odlewów wysokiej czystości granice ziaren są bowiem miejscem pękania materiału. Obserwacja ta stanowi istotną informację o własnościach i specyfice zachowania się tej grupy materiałów podczas przeprowadzania statycznej próby rozciągania, biorąc zwłaszcza pod uwagę fakt regulacji jedynie prędkości odlewania prętów, przy niezmiennym składzie chemicznym materiałów oraz ogólnej zasady ich produkcji. W przypadku małej prędkości odlewania ziarna są duże i ukierunkowane wzdłuż osi odlewanej materiału. Zatem (granice) powierzchnie ziaren posiadają ułożenie równoległe do kierunku wektora zewnętrznej siły rozciągającej. Tak więc wyjaśnienia anormalnego zachowania się odlewanych z różną prędkością prętów należy upatrywać w anizotropii tych materiałów.

W dalszej części dysertacji przeprowadzono bardziej szczegółową identyfikację właściwości mechanicznych materiałów wsadowych, a otrzymane wyniki zestawiono na dwa sposoby – zarówno jako wpływ prędkości odlewania, jak i wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator na kształtowanie własności mechanicznych miedzi beztlenowej. Do analizy pierwszego zagadnienia wykorzystano obserwacje miedzi w gatunku Cu-OFE z linii laboratoryjnej DCC-AGH, jak i przemysłowej Upcast. Z kolei zagadnienie drugie dotyczące zmiany warunków chłodzenia materiałów i ich wpływu na właściwości mechaniczne omówione zostało na podstawie obserwacji zachowania się prętów otrzymanych metodą Upcast (stała prędkość odlewania z zakresu 1,0 – 4,0 m/min., zmienny wydatek wody chłodzącej w ilości od 40 l/min. do 60 l/min.).

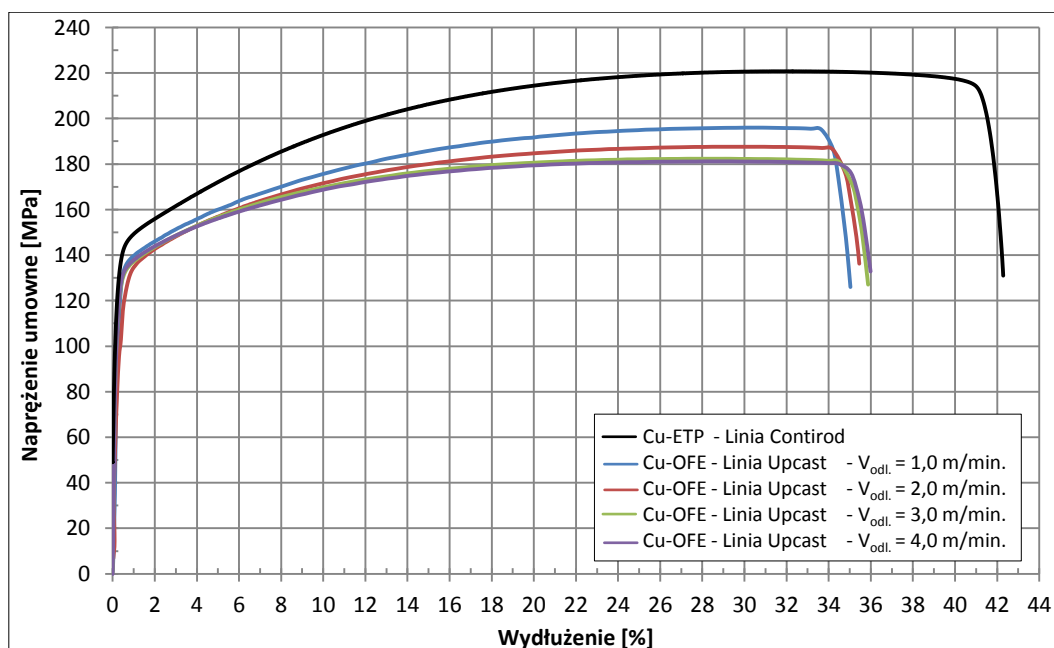
Analiza kształtowania właściwości mechanicznych miedzi beztlenowej pod wpływem zmiennych prędkości odlewania została przeprowadzona w oparciu o zilustrowane na rysunkach 9.1.30 – 9.1.32 charakterystyki rozciągania materiałów z linii laboratoryjnej DCC-AGH odlewanych z prędkością od 0,006 m/min. do 0,2 m/min. oraz przemysłowej Upcast przy prędkościach z zakresu 1,0 – 4,0 m/min. i przepływie medium chłodzącego od 40 l/min. do 60 l/min. Celem jest porównanie materiałów względem szybkości z jaką zostały odlane. Z uwagi na znaczne różnice w wartościach prędkości odlewania materiałów charakterystyki zamieszczono na osobnych wykresach. W przypadku analizy

prętów otrzymanych metodą Upcast nadrzędną domeną w stosunku do prędkości pozostaje parametr przepływu wody chłodzącej krystalizator. Ponadto wszystkie wyniki badań prętów z miedzi beztlenowej odniesione zostały do rezultatów zanotowanych dla tradycyjnej walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP.

Zatem w tym celu prześledzono rozkłady krzywych rozciągania dla omawianych materiałów (por. także rys. 9.1.29) oraz ich właściwości mechaniczne zamieszczone w tabeli 9.1.3 (por. także tabelę 9.1.2).

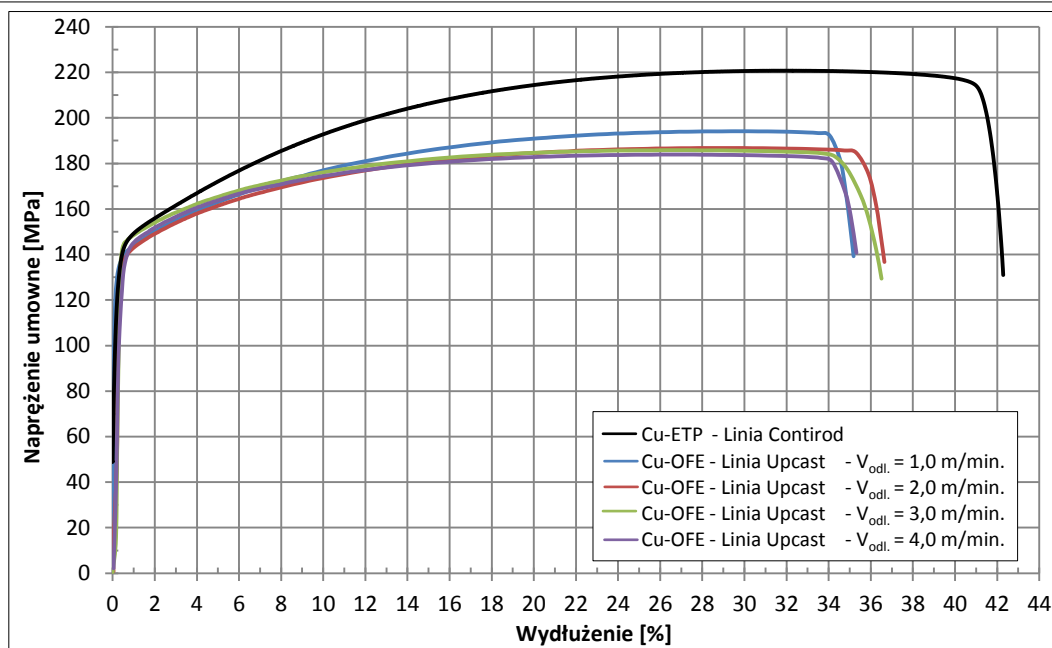


Rys. 9.1.30. Krzywe rozciągania prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymanych metodą Upcast przy różnych prędkościach odlewania i stałym parametrze przepływu wody chłodzącej w krystalizatorze, wynoszącym 40 l/min. oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP



Rys. 9.1.31. Krzywe rozciągania prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymanych metodą Upcast przy różnych prędkościach odlewania i stałym parametrze przepływu wody chłodzącej w krystalizatorze, wynoszącym 50 l/min. oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP





Rys. 9.1.32. Krzywe rozciągania prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymanych metodą Upcast przy różnych prędkościach odlewania i stałym parametrze przepływu wody chłodzącej w krystalizatorze, wynoszącym 60 l/min. oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

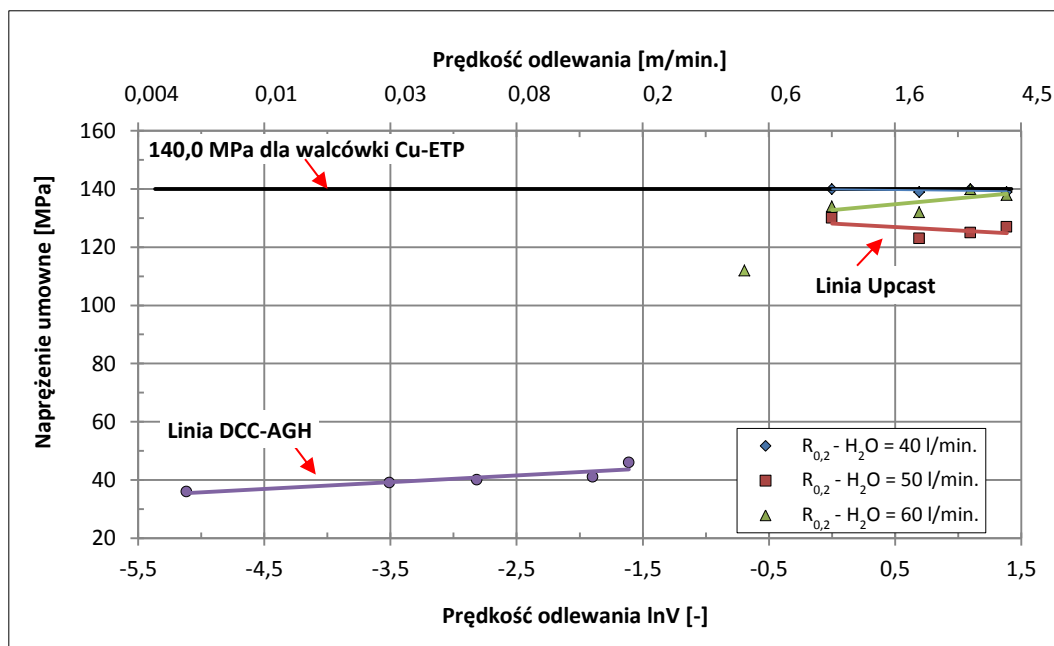
Tabela 9.1.3. Własności mechaniczne prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych w linii Upcast przy różnych kombinacjach parametrów procesu odlewania ciągłego oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Gatunek materiału	Wielkość przepływu wody chłodzącej w krystalizatorze	Prędkość odlewania	$R_{0,2}$	$R_m$	$A_r$	$A_{250}$
	[l/min.]	[m/min.]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
Cu-OFE	40	1,0	140,3	195,6	29,4	36,1
		2,0	139,1	188,7	28,0	36,7
		3,0	140,8	183,5	25,7	36,2
		4,0	139,5	183,1	25,8	37,0
	50	1,0	130,2	196,0	30,4	35,0
		2,0	123,1	187,6	29,7	35,5
		3,0	125,0	182,3	28,5	35,9
		4,0	127,3	181,2	28,9	36,0
	60	1,0	134,6	194,1	29,8	35,2
		2,0	132,3	186,8	29,1	36,6
		3,0	140,1	185,8	27,0	36,5
		4,0	138,3	183,9	26,8	35,3
Cu-ETP	-	-	140,0	220,7	31,7	42,3

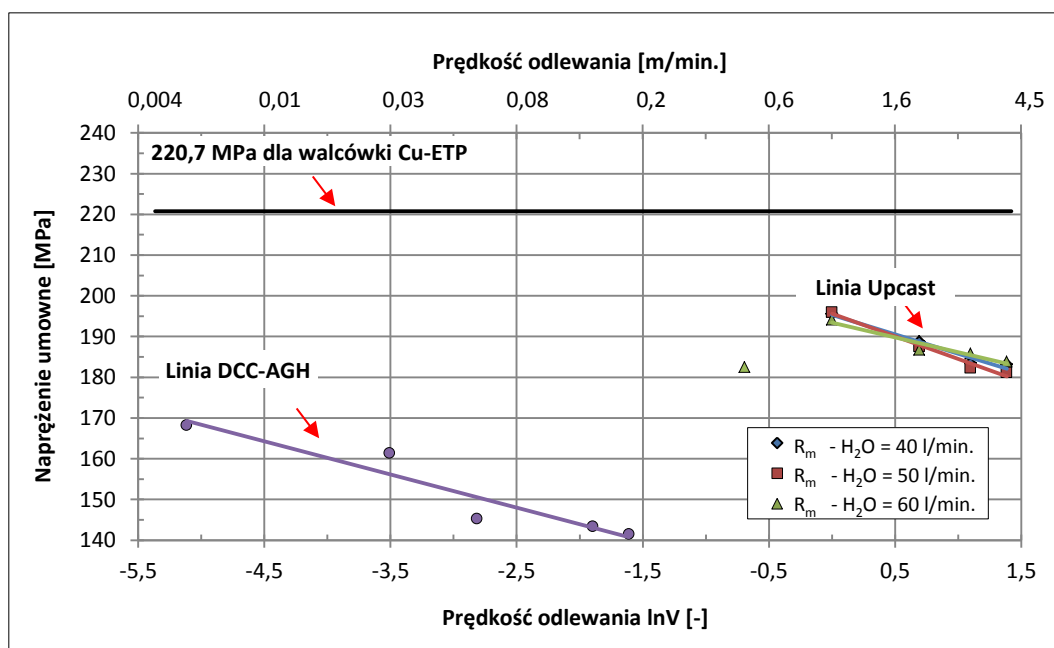
Poddając analizie powyższe krzywe rozciągania stwierdzono podobnie jak w przypadku charakterystyk przedstawionych na rysunkach 9.1.28 i 9.1.29 znaczną różnicę w umacnianiu się miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP. Wynika zatem istotna rola struktury w kształtowaniu się właściwości materiału podczas statycznej próby rozciągania.

W oparciu o powyższe dane dokonano ich interpretacji graficznej za pomocą zbiorczych wykresów zilustrowanych na rysunkach 9.1.33 – 9.1.38. Dla ułatwienia analizy charakterystyk przyjęto dwie osie odciętych: dolną liniową określającą logarytm z prędkości odlewania i górną (nie liniową) określającą prędkość procesu w metrach na minutę. Pierwsze krzywe ukazane na rysunkach 9.1.33 i 9.1.34 przedstawiają wartości granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie miedzi beztlenowej otrzymanej metodami DCC-AGH i Upcast przy różnych warunkach prowadzenia procesu odlewania, a także dla walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP. Za punkt wyjścia do rozważań nad wpływem któregośkolwiek z parametrów odlewania metodą Upcast na własności uzyskanego pręta

przyjęto materiał wyprodukowany przy prędkości 4,0 m/min. i wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator wynoszącej 60 l/min. Są to maksymalne parametry z jakimi pracuje instalacja Upcast, a także jedyne stosowane w produkcji masowej w Hucie Miedzi Cedynia w Orsku.



Rys. 9.1.33. Granica plastyczności prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH i Upcast w funkcji prędkości odlewania oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

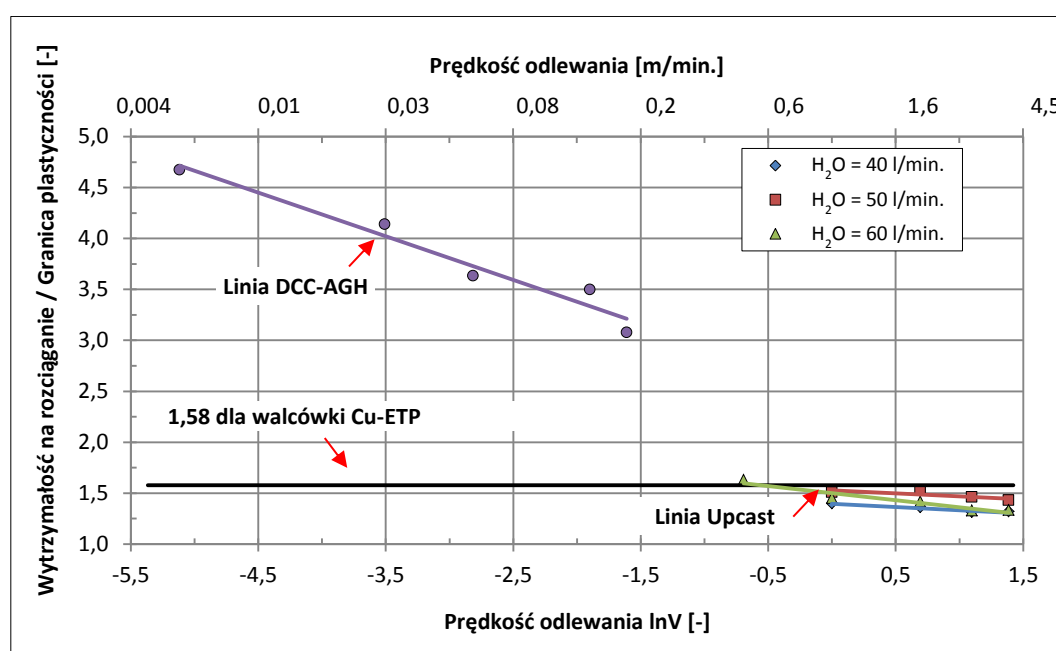


Rys. 9.1.34. Wytrzymałość na rozciąganie prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH i Upcast w funkcji prędkości odlewania oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Na rysunku 9.1.33 przedstawiono zmiany granicy plastyczności badanych materiałów. O ile dla prętów otrzymanych sposobem DCC-AGH zauważono wzrost granicy plastyczności wraz ze wzrostem prędkości, o tyle nie dostrzeżono takiej tendencji dla miedzi z linii Upcast. Poziomo zanotowany przez walcówkę i wynoszący około 140 MPa jest osiągnięty także przez połowę badanych prętów z technologii Upcast. Analizując natomiast charakterystyki przedstawione na rysunku 9.1.34, podobnie jak na podstawie wcześniejszych ilustracji 9.1.29 – 9.1.32 zauważono, że wytrzymałość na rozciąganie uzyskiwana przez walcówkę z miedzi w gatunku Cu-ETP wynosząca około 220 MPa kształtuje się na

znacznie wyższym poziomie niż dla miedzi beztlenowej, oscylującej w granicach około 142 – 168 MPa (instalacja DCC-AGH) i 183 – 194 MPa (metoda Upcast). Ponadto, jak nadmieniono wcześniej dla materiałów uzyskanych w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych zaobserwowano wzrost wytrzymałości na rozciąganie wraz ze spadkiem prędkości odlewania. Na uwagę zwraca także fakt, że znaczące różnice pomiędzy wartościami wytrzymałości na rozciąganie zaobserwowano dla miedzi z instalacji własnej DCC-AGH przy zmniejszeniu szybkości odlewania do 0,03 m/min., natomiast dla prętów pochodzących z linii Upcast do wartości 2,0 m/min. dla przepływów wody chłodzącej 40 l/min. i 50 l/min. oraz do wartości 1,0 m/min. dla wydatku chłodziwa na poziomie 60 l/min.

Więcej informacji na ten temat dostarczają ponadto zmiany charakterystyk zilustrowane na rysunku 9.1.35, przedstawiające stosunek wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych metodą DCC-AGH i Upcast w funkcji prędkości odlewania oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP. Iloraz ten obrazuje stopień umocnienia materiału w próbie rozciągania. Osiąga on wysoką wartość dla materiałów o dużej wartości wytrzymałości na rozciąganie przy jednocześnie niskiej granicy plastyczności, co z punktu widzenia przeróbki plastycznej jest cechą pożądaną. Korzystna jest zatem jak najwyższa wartość tego współczynnika.

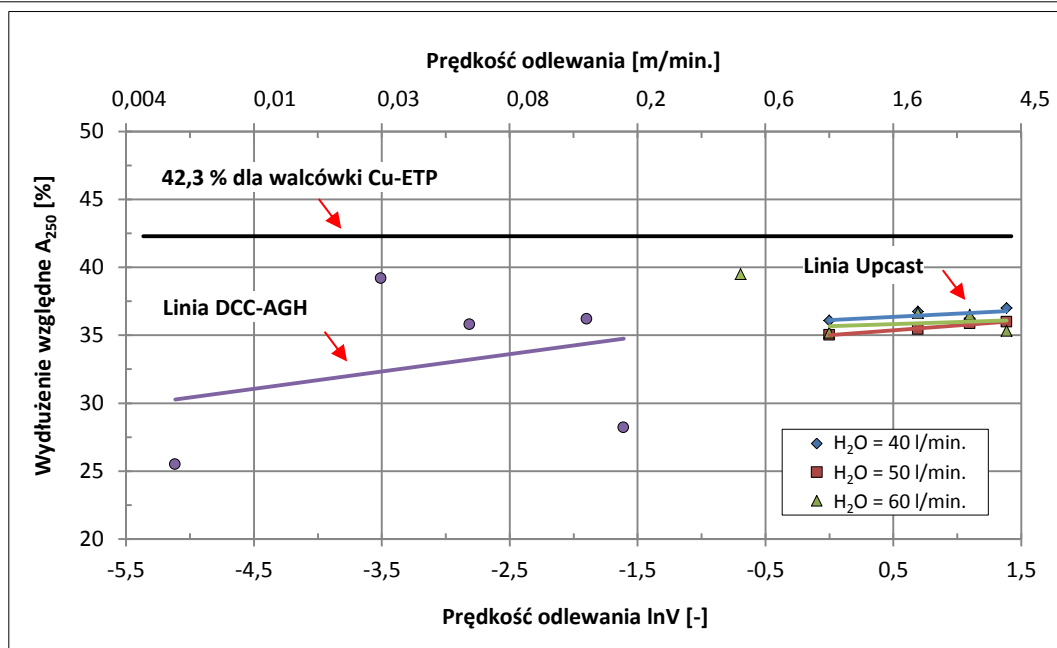


Rys. 9.1.35. Wykresy stosunku wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych metodą DCC-AGH i Upcast w funkcji prędkości odlewania oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Z analizy powyższych krzywych wynika, że najkorzystniejsze wartości stosunku wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności wykazuje materiał otrzymany w procesie ciągłego odlewania przy niskich prędkościach z zakresu 0,006 – 0,2 m/min. Dla walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP zaobserwowano wartość na niższym poziomie wynoszącą 1,58. Podobnie jak materiały uzyskane według technologii DCC-AGH, także pręty z linii Upcast wykazują tendencję niewielkiego wzrostu współczynnika wraz z obniżaniem prędkości odlewania.

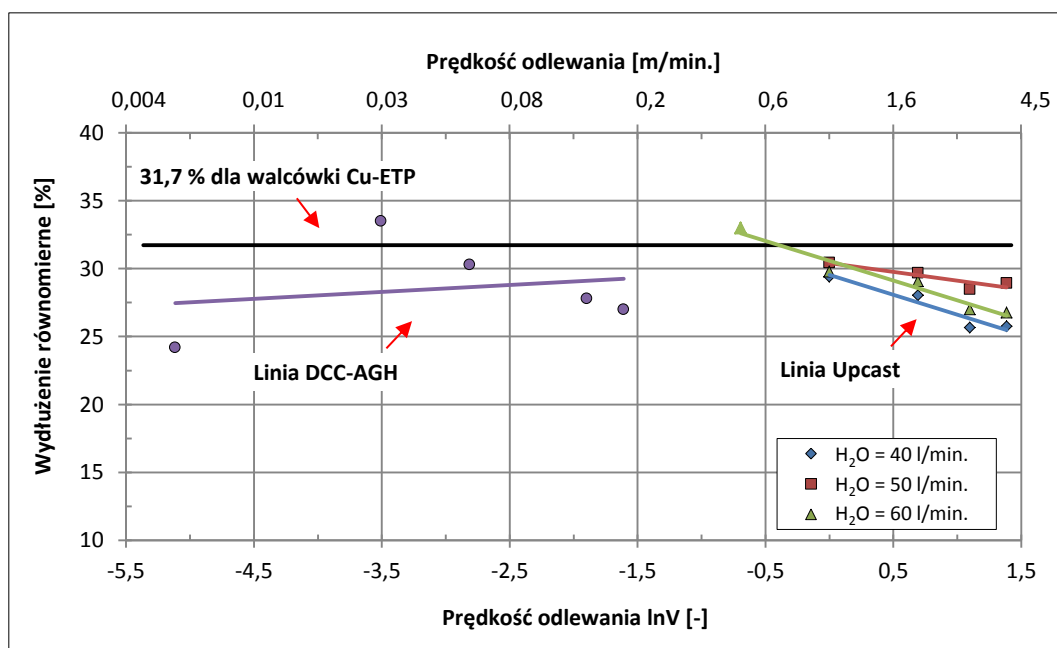
Na kolejnym rysunku 9.1.36 zilustrowano przebiegi krzywych wydłużenia względnego próbek miedzi o długości bazy równej 250 mm z linii DCC-AGH i Upcast w funkcji prędkości odlewania oraz walcówki z linii Contirod.

Poza znacznie lepszym wynikiem wydłużenia względnego dla walcówki sięgającym około 42 %, nie zaobserwowano istotnych różnic pomiędzy materiałami odlewanyymi w procesie DCC-AGH i Upcast. Wyjątek stanowią materiały otrzymane w procesie laboratoryjnym na instalacji własnej przy prędkościach odlewania 0,006 m/min. i 0,2 m/min., dla których wydłużenie względne wynosi odpowiednio 25,5 % i 28,2. Wartości wydłużeń pozostałych materiałów zawierają się w niewielkim przedziale (35 – 39 %) i nie stwierdzono jednoznacznych powiązań tych zróżnicowań z prędkością odlewania.



Rys. 9.1.36. Charakterystyki wydłużenia względnego prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych metodą DCC-AGH i Upcast w funkcji prędkości odlewania oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

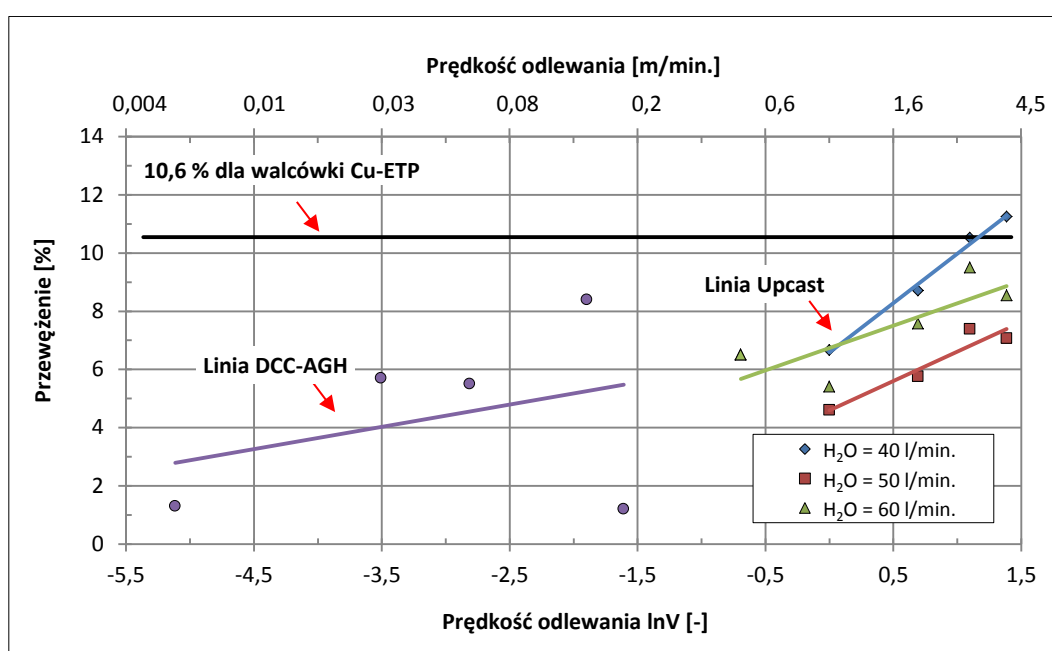
W dalszej części pracy dokonano analizy przebiegów krzywych wydłużenia równomiernego dla materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty. Wykresy zilustrowano na rysunku 9.1.37.



Rys. 9.1.37. Charakterystyki wydłużenia równomiernego prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych metodą DCC-AGH i Upcast w funkcji prędkości odlewania oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Analizując powyższe charakterystyki zmian wydłużenia równomiernego próbek z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymanych metodą DCC-AGH dostrzega się podobieństwo ich przebiegu w stosunku do zilustrowanych na rysunku 9.1.36 wykresów zależności wydłużenia względnego od prędkości odlewania. Materiał uzyskany w laboratoryjnym procesie przy prędkościach z zakresy 0,03 – 0,2 m/min. wykazuje (podobnie jak materiał uzyskany w procesie przemysłowym Upcast) wzrost wydłużenia równomiernego wraz z obniżeniem prędkości odlewania. Wynik ten pozostaje w logicznym związku z analizowanymi wcześniej charakterystykami wytrzymałościowymi odlewanych prętów

w funkcji prędkości odlewania. Jedynie materiał pochodzący z technologii z zastosowaniem najniższej prędkości odlewania wynoszącej 0,006 m/min. wykazuje zdecydowanie niższą wartość wydłużenia, zarówno względnego jak i równomiernego. Ponadto jak wynika z analizy wykresów zamieszczonych na powyższym rysunku 9.1.37 dla tak niejednorodnych struktur odlewniczych jak pręty otrzymane sposobem Upcast, wydłużenie równomierne jest lepszym miernikiem właściwości plastycznych. O ile wydłużenie względne nie dało miarodajnych informacji, o tyle analizując wykres  $A_r$  w funkcji prędkości odlewania zaobserwowano pewną prawidłowość. Im większa prędkość odlewania tym mniejsze wydłużenie równomierne. Przykładowo pręt otrzymany przy prędkości odlewania 4,0 m/min. (przepływ wody chłodzącej krystalizator 40 l/min.) poddaje się odkształceniu na całej długości do 25,5 %, natomiast materiał uzyskany przy prędkości 1,0 m/min. (wydatek wody chłodzącej również 40 l/min.) aż do 29,5 %. Dla walcówki wydłużenie równomierne kształtuje się na poziomie ponad 31 %. Taki rozkład wartości jest niejako skorelowany ze współczynnikiem  $R_m/R_{0,2}$ . Materiały wykazujące wyższe własności wytrzymałościowe charakteryzują się także większą podatnością do odkształceń plastycznych. Różnice te dobrze ilustrują charakterystyki na kolejnym rysunku 9.1.38, na którym pokazano długość tworzącej się szyjki podczas próby rozciągania dla prętów uzyskanych sposobem DCC-AGH i Upcast oraz dla walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP.



Rys. 9.1.38. Przewężenie procentowe prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych metodą DCC-AGH i Upcast w funkcji prędkości odlewania oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

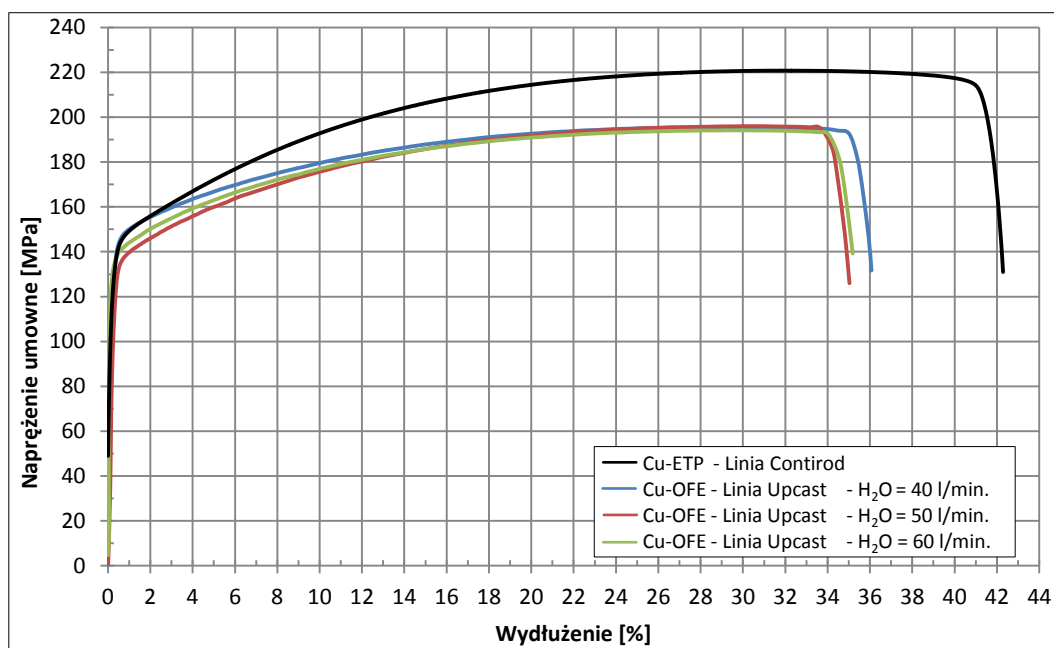
Na podstawie danych zamieszczonych w tabelach 9.1.2 i 9.1.3 oraz z analizy krzywych zilustrowanych na rysunkach 9.1.36 i 9.1.38 wynika, że skrajne wartości wydłużenia względnego  $A_{250}$  dla prętów z miedzi beztlenowej z linii DCC-AGH (po odrzuceniu skrajnych wartości zanotowanych dla materiałów pochodzących z prędkości odlewania 0,006 m/min. i 0,2 m/min) dzieli różnica tylko 4 %, natomiast dla materiałów otrzymanych w linii Upcast tylko 2 %. Z kolei zróżnicowanie długości szyjek dla tych materiałów osiąga wartość odpowiednio od 3 % do 7 %. Miarą podatności materiału do przetwórstwa plastycznego jest jak największe wydłużenie równomierne. Porównując pod tym kątem zachowanie się materiałów z linii DCC-AGH i Upcast dostrzega się, że to pręty uzyskane przy niskich prędkościach odlewania uzyskują najbardziej zbliżone wartości do walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP.

Powyższa analiza dotycząca wpływu prędkości odlewania na właściwości prętów z miedzi beztlenowej z linii DCC-AGH i Upcast dowodzi, że istnieje ścisła korelacja pomiędzy strukturą materiału a jego własnościami mechanicznymi. Warto odnotować również dla porządku, że własności plastyczne odlewów określone w próbie jednoosiowego rozciągania nie są najważniejszą porównawczą miarą oceny materiałów o wysokiej anizotropii strukturalnej, niemniej jednak pozwalają na ocenę przybliżoną zwłaszcza przy wykorzystaniu dodatkowej informacji o ich własnościach

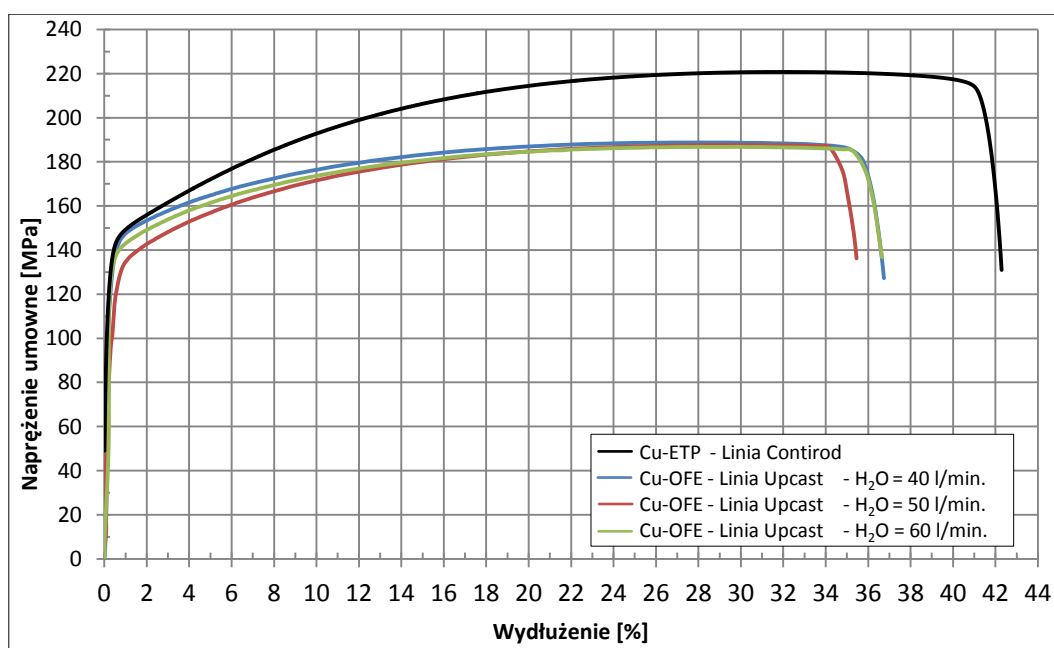
wytrzymałościowych.

9.1.2.1.2. Analiza wpływu wydatku wody chłodzącej krystalizator na własności mechaniczne materiałów wstawowych

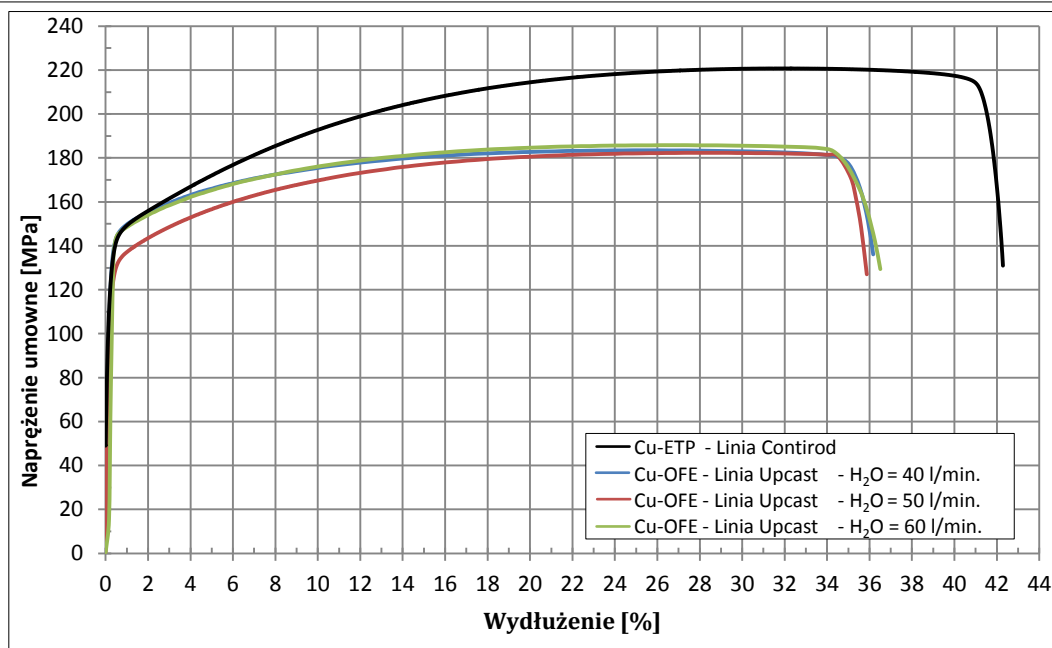
Szczegółową analizę wpływu warunków chłodzenia na zachowanie się miedzi beztlenowej podczas statycznej próby rozciągania przeprowadzono w oparciu o zilustrowane na rysunkach 9.1.39 – 9.1.42 charakterystyki rozciągania prętów otrzymanych metodą Upcast przy zastosowaniu różnych wydatków wody chłodzącej.



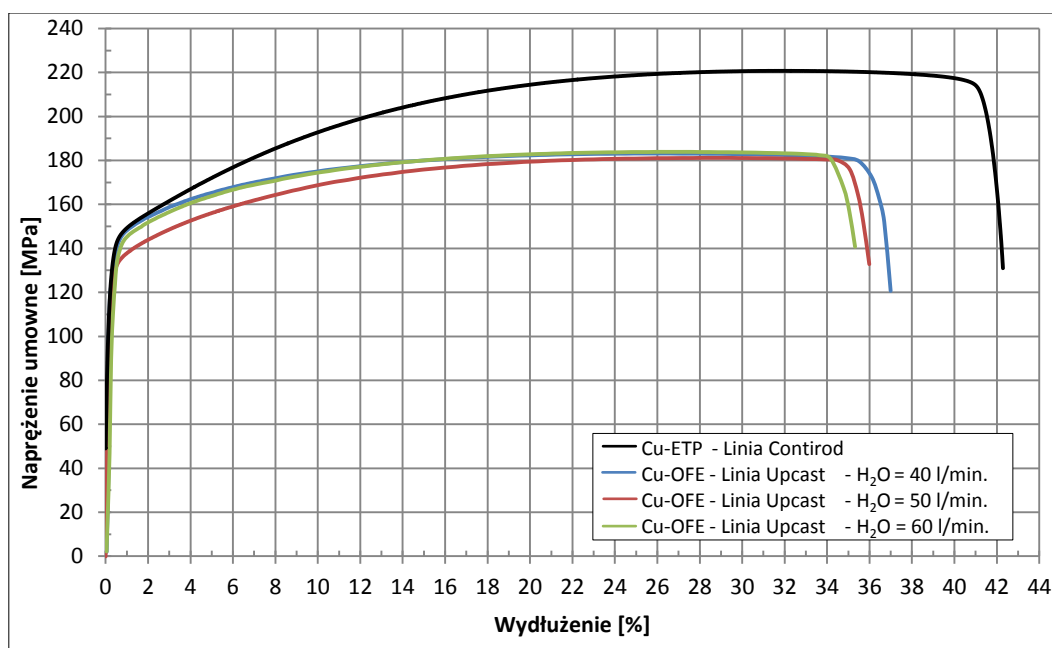
Rys. 9.1.39. Krzywe rozciągania prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymanych metodą Upcast przy stałej prędkości odlewania 1,0 m/min. i różnych wartościach przepływu wody chłodzącej krystalizator oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP



Rys. 9.1.40. Krzywe rozciągania prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymanych metodą Upcast przy stałej prędkości odlewania 2,0 m/min. i różnych wartościach przepływu wody chłodzącej krystalizator oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP



Rys. 9.1.41. Krzywe rozciągania prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymanych metodą Upcast przy stałej prędkości odlewania 3,0 m/min. i różnych wartościach przepływu wody chłodzącej krystalizator oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

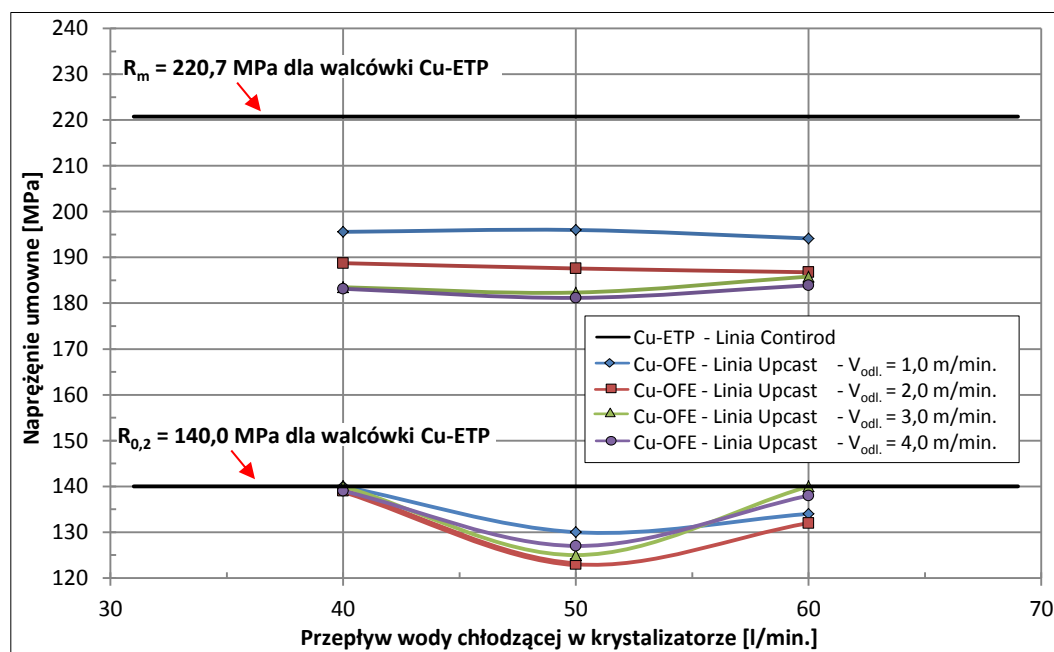


Rys. 9.1.42. Krzywe rozciągania prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymanych metodą Upcast przy stałej prędkości odlewania 4,0 m/min. i różnych wartościach przepływu wody chłodzącej krystalizator oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Na podstawie analizy charakterystyk zwrócono uwagę, że krzywe rozciągania prętów z linii Upcast uzyskanych z daną prędkością mają zróżnicowane przebiegi dla różnych wielkości przepływu wody chłodzącej tylko do pewnego stopnia wydłużenia. Po przekroczeniu tego punktu krzywe rozciągania materiałów pochodzących z tej samej szybkości w znacznym stopniu pokrywają się ze sobą. Należy zaznaczyć, że wraz ze wzrostem prędkości odlewania wielkość odkształcenia, przy której następuje zrównoważenie przebiegu charakterystyk, wzrasta. Dla materiału uzyskanego przy szybkości odlewania 1,0 m/min. jest to wartość około 10 %, z kolei dla pręta otrzymanego z prędkością 2,0 m/min. około 12 % i odpowiednio dla miedzi beztlenowej pochodzącej z procesu Upcast przy prędkościach 3,0 m/min. i 4,0 m/min. – około 16 % i 18 %. Świadczy to o tym, że wzrost szybkości odlewania bardziej różnicuje własności materiału niż zmiana przepływu wody chłodzącej. Jak

wcześniej dowiedziano na podstawie analizy obserwacji makrostruktury prętów (por. podrozdział 9.1.1) ma to swój obraz w budowie wewnętrznej materiałów.

Kolejna obserwacja dotyczy niewielkiego zróżnicowania charakterystyk umocnienia materiałów odlanych z tą samą prędkością, lecz przy różnym wydatku wody chłodzącej (por. rys. 9.1.39 – 9.1.42). Zauważa się różnicę naprężeń uplastyczniających, jednak po pewnym odkształceniu krzywe rozciągania, jak wspomniano powyżej w dużej mierze się ze sobą pokrywają. Potwierdzeniem tego są wykresy zilustrowane na rysunku 9.1.43, które przedstawiają niemalże płaski przebieg wytrzymałości na rozciąganie (górną część wykresu) prętów w funkcji przepływu medium chłodzącego.



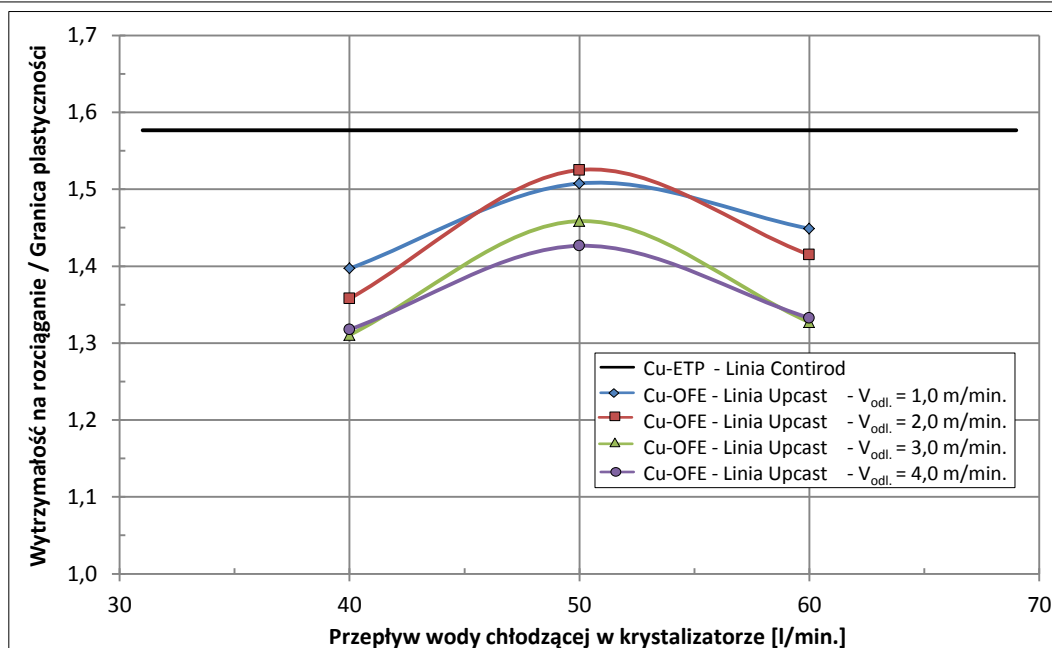
Rys. 9.1.43. Właściwości wytrzymałościowe prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast w funkcji przepływu wody chłodzącej krystalizator i walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Ponadto w dolnej części rysunku 9.1.43 zilustrowano wykresy określające wartości granicy plastyczności prętów z linii Upcast otrzymanych przy różnym wydatku wody chłodzącej krystalizator. Charakterystyki przebiegają w sposób niemonotoniczny. Odnotowano wyraźnie niższe naprężenie uplastyczniające materiałów uzyskanych przy przepływie chłodziwa na poziomie 50 l/min. Różnice sięgają około 10 MPa i występują dla każdego materiału otrzymanego przy każdej prędkości odlewania. Należy również zwrócić uwagę na kształtującą się na tym samym poziomie wartość granicy plastyczności walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i prętów z miedzi beztlenowej uzyskanych przy przepływie wody 40 l/min. Podobną sytuację odnotowuje się przy wydatku medium chłodzącego na poziomie 60 l/min. dla materiałów otrzymanych z prędkościami 3,0 m/min. i 4,0 m/min.

Na rysunku 9.1.44 przedstawiono wykresy stosunku wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności w funkcji wielkości przepływu wody chłodzącej. Z analizy krzywych wynika, że kształt krzywej rozciągania dla prętów otrzymanych przy różnych prędkościach odlewania i stałym wydatku wody chłodzącej wynoszącym 50 l/min. jest najbardziej zbliżony do przebiegu zarejestrowanego dla walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP.

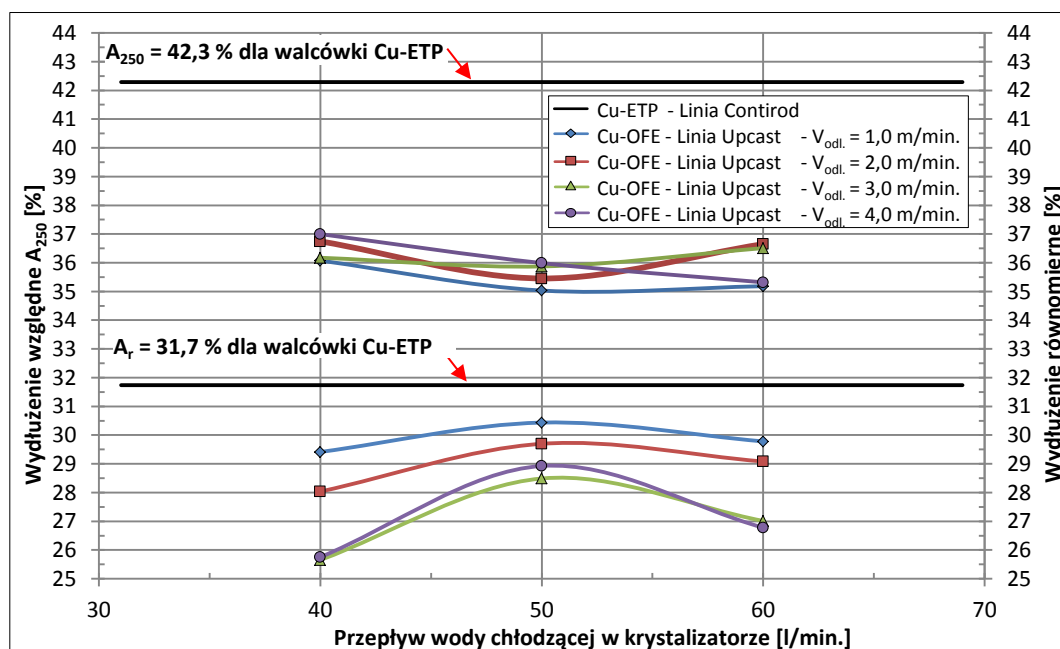
Podatność do większych odkształceń jest jednak w przypadku miedzi w gatunku Cu-ETP dużo większa, co wynika z odmienności tego materiału pod względem strukturalnym. To właśnie wielkość ziaren odpowiada w przypadku zbliżonych pod względem chemicznym materiałów za uzyskiwane w próbie rozciągania maksymalne naprężenie. Natomiast fakt, że miedź beztlenowa w postaci prętów uzyskanych w procesie ciągłego odlewania z różnymi przepływami wody uzyskuje podobny poziom wytrzymałości na rozciąganie świadczy o tym, że jeśli nawet przepływ wody chłodzącej wywiera wpływ na strukturę i na granicę plastyczności, to jest on nieznaczny, gdyż pod wpływem większych naprężeń zostaje całkowicie zniwelowany.





Rys. 9.1.44. Wykresy stosunku wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności w funkcji wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator dla prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych metodą Upcast i walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Poniżej na rysunku 9.1.45 zilustrowano wyniki wydłużenia względnego i wydłużenia równomiernego badanych materiałów.

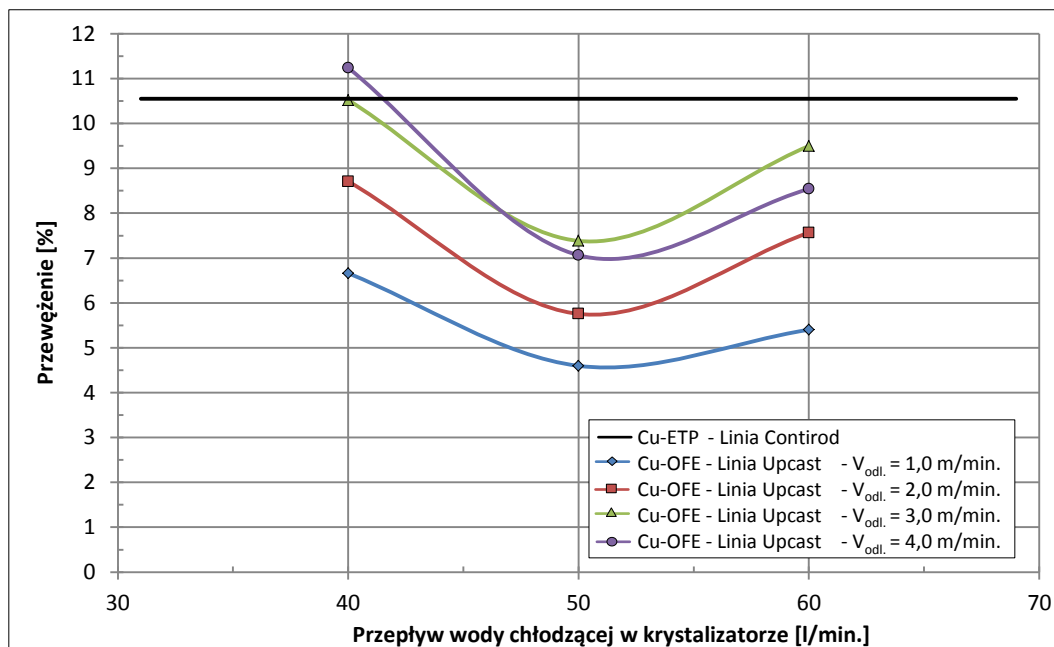


Rys. 9.1.45. Charakterystyki wydłużenia względnego i wydłużenia prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE w funkcji wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Na podstawie analizy zależności wydłużenia względnego od wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator nie zauważa się powtarzalnej tendencji, która pozwalałaby przypisywać warunkom chłodzenia jej występowanie. Ponadto z analizy powyższych krzywych wynika, że różnice wartości są niewielkie (por. także tabela 9.1.3), zwłaszcza w odniesieniu do walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP. Z kolei wydłużenie równomierne prętów z miedzi beztlenowej, które pod kątem podatności do przetwórstwa w procesach przeróbki plastycznej jest bardziej miarodajną cechą materiału kształtuje się na poziomie zbliżonym do walcówki. O ile miedź w gatunku Cu-ETP uzyskuje wartość wydłużenia równomiernego na poziomie niemal 32 %, o tyle wartości te dla miedzi beztlenowej

zawierają się w przedziale od 28 % do 30,5 %. Wyjątek stanowią materiały uzyskane przy największych z badanych prędkościach odlewania (3,0 m/min. i 4,0 m/min.) i przy przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 40 l/min. i 60 l/min., dla których zanotowane wartości oscylują w granicach 25,5 – 27 %.

Kontynuację analizy stanowią zilustrowane na rysunku 9.1.46 charakterystyki zależności przewężenia materiałów uzyskanych w procesie ciągłego odlewania od wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator.



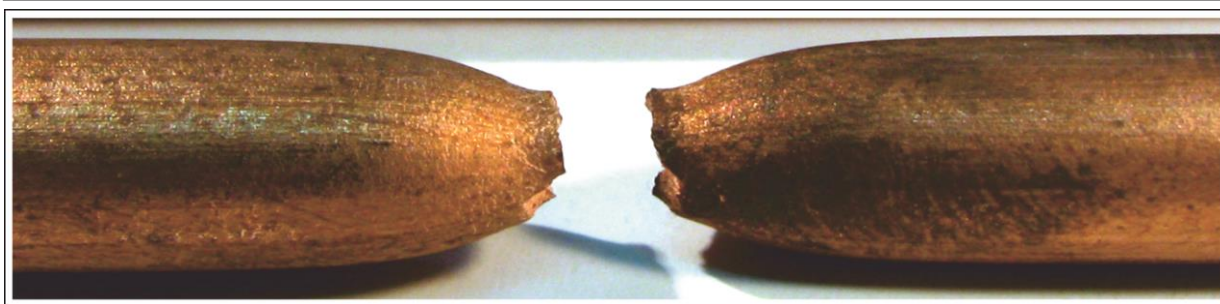
Rys. 9.1.46. Przewężenie procentowe prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE w funkcji wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Zarówno na podstawie analizy krzywych przedstawionych na rysunku 9.1.46, jak i w oparciu o obserwacje charakterystyk zilustrowanych na rysunku 9.1.45 zauważono niemonotoniczną tendencję wyróżniającą pręty uzyskane w procesie przy wydatku chłodziwa na poziomie 50 l/min. Materiały te charakteryzują się zdecydowanie lepszymi rezultatami wydłużenia równomiernego kosztem skrócenia niepożądanego przewężenia, niż ich odpowiedniki pochodzące z tej samej prędkości, lecz innych poziomów wody chłodzącej krystalizator.

Wielkość przepływu wody chłodzącej jest w procesie odlewania metodą Upcast bardzo istotnym parametrem, gdyż odpowiada za odprowadzanie ciepła z krystalizatora i właściwy przebieg krzepnięcia ciekłego metalu. Na podstawie przeprowadzonych powyżej obserwacji zachowania się prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast podczas statycznej próby rozciągania ustalono, że zmiana tego parametru posiada jednakże niewielki wpływ na własności w porównaniu do zmian prędkości prowadzenia procesu.

#### 9.1.2.1.3. Analiza wpływu warunków odlewania na powierzchnię materiału po statycznej próbie rozciągania

Podsumowując tę część analizy dotyczącą różnic właściwości mechanicznych badanych materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE przeznaczonych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty zwrócono uwagę na fakt odmienności ich budowy strukturalnej. O ile walcówka Cu-ETP charakteryzuje się strukturą silnie rozdrobioną i równomierną (por. rys. 9.1.22), o tyle pręty z miedzi beztlenowej Cu-OFE otrzymane metodą DCC-AGH (por. rys. 9.1.2 – 9.1.6), Upcast (por. rys. 9.1.7 – 9.1.19) lub Rautomead (por. rys. 9.1.20) wyróżniają się dużymi, ukierunkowanymi ziarnami. Powyższy fakt został zaobserwowany podczas analizy powierzchni materiałów po przeprowadzeniu statycznej próby rozciągania. Wyniki obserwacji zilustrowane na rysunkach 9.1.47 – 9.1.50 dotyczą miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod i Cu-OFE otrzymanej w procesie ciągłego odlewania metodą Upcast i DCC-AGH przy prędkościach 4,0 m/min., 0,5 m/min. i 0,006 m/min.



Rys. 9.1.47. Powierzchnia próbki walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod po statycznej próbie rozciągania



Rys. 9.1.48. Powierzchnia próbki pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast otrzymanego przy prędkości odlewania 4,0 m/min. po statycznej próbie rozciągania

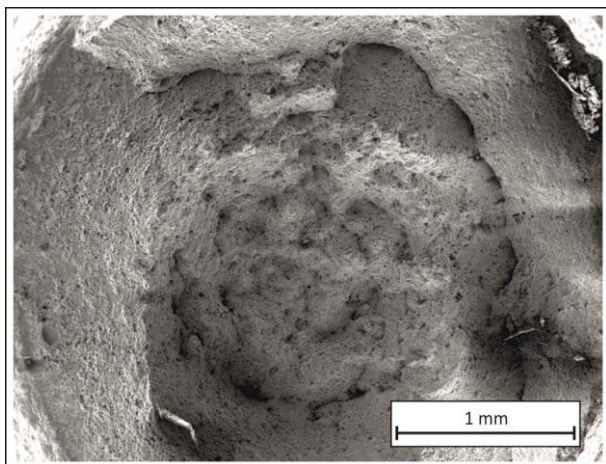


Rys. 9.1.49. Powierzchnia próbki pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast otrzymanego przy prędkości odlewania 0,5 m/min. po statycznej próbie rozciągania

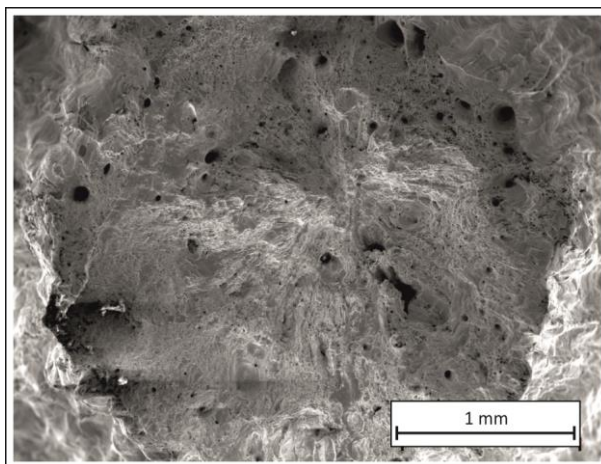


Rys. 9.1.50. Powierzchnia próbki pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH otrzymanego przy prędkości 0,006 m/min. po statycznej próbie rozciągania

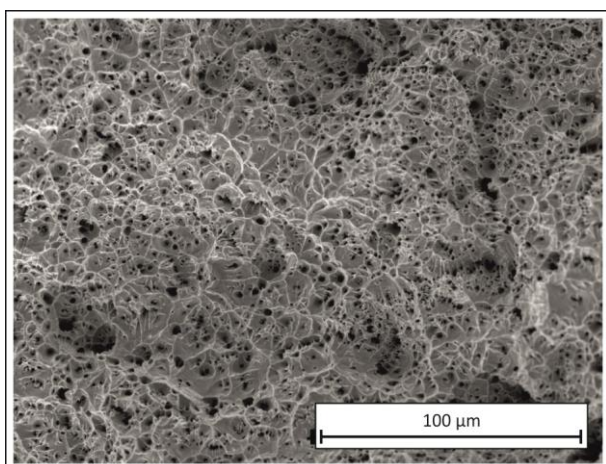
Na podstawie analizy zdjęć przedstawionych na powyższych rysunkach zauważono, że o ile w przypadku miedzi w gatunku Cu-ETP nie występują istotne zmiany powierzchni walcówki po statycznej próbie rozciągania, o tyle w przypadku miedzi beztlenowej powierzchnia jest nierównomierna, co wynika z faktu odkształcania dużych krystalitów o słabych granicach ziaren. Z kolei analiza przełomów materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod i Cu-OFE otrzymanej metodą Upcast przy standardowej prędkości odlewania wynoszącej 4,0 m/min., zilustrowanych na rysunkach 9.1.51 – 9.1.58 pozwala na stwierdzenie, że w obu przypadkach są to materiały plastyczne, o czym świadczą obrazy przełomów.



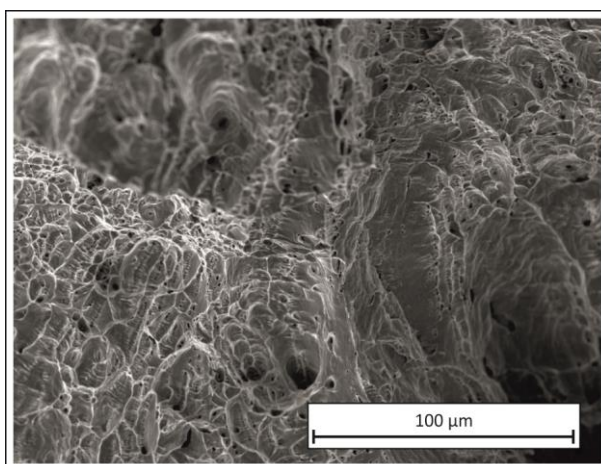
Rys. 9.1.51. Powierzchnia przetomu walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 35$



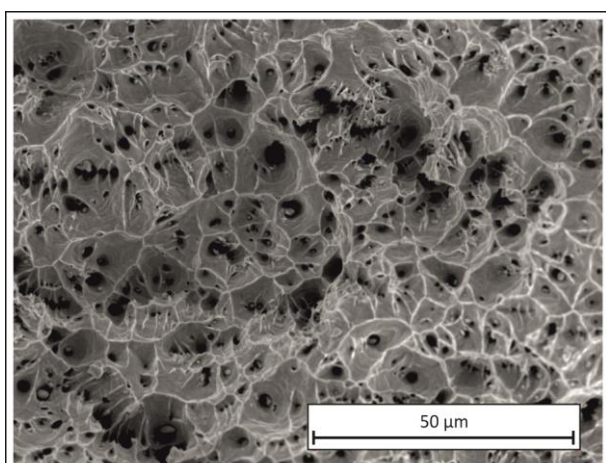
Rys. 9.1.52. Powierzchnia przetomu pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 35$



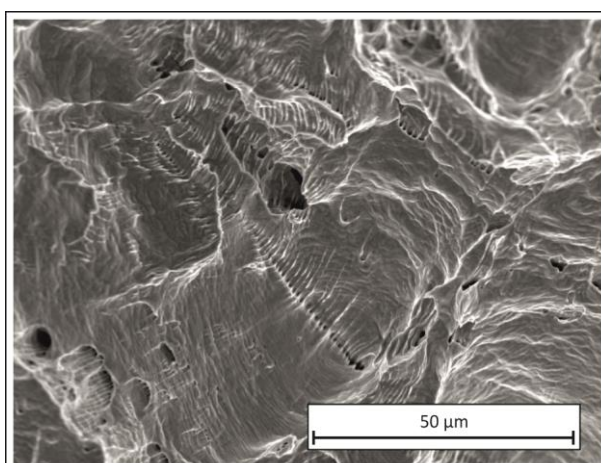
Rys. 9.1.53. Powierzchnia przetomu walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 500$



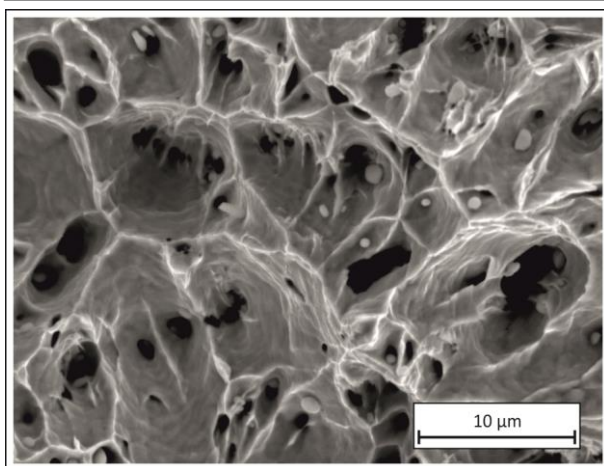
Rys. 9.1.54. Powierzchnia przetomu pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 500$



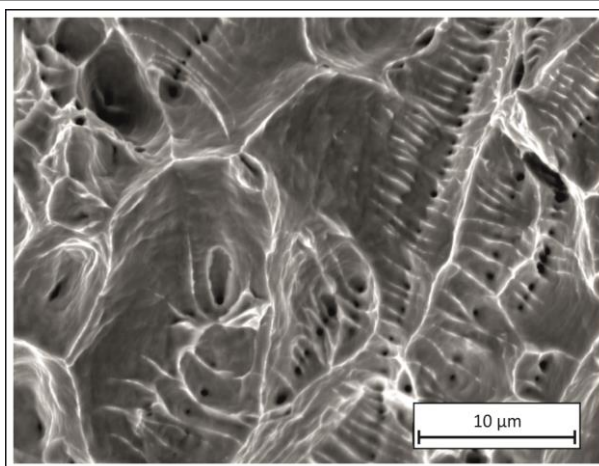
Rys. 9.1.55. Powierzchnia przetomu walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 1000$



Rys. 9.1.56. Powierzchnia przetomu pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 1000$



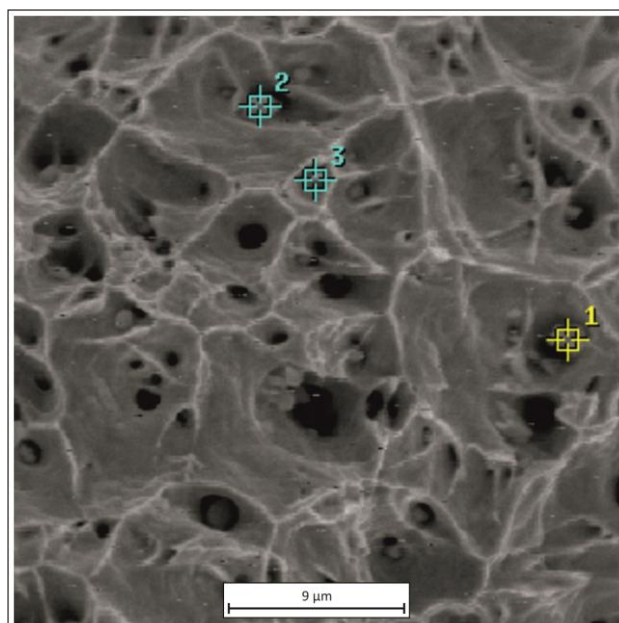
Rys. 9.1.57. Powierzchnia przełomu walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 3000$



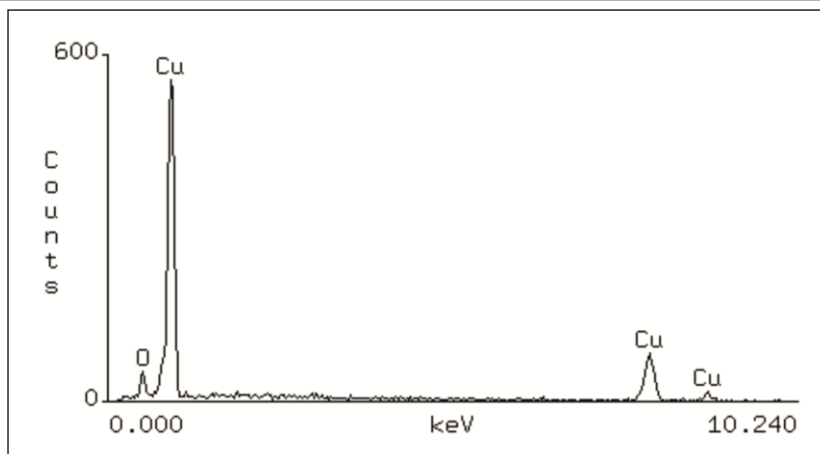
Rys. 9.1.58. Powierzchnia przełomu pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 3000$

Na podstawie analizy powyższych zdjęć strukturalnych wykonanych za pomocą mikroskopu skaningowego stwierdzono, że miedź w gatunku Cu-ETP charakteryzuje się drobnym i równomiernym ziarnem o wielkości około  $10\ \mu\text{m}$ . W miejscu, w którym zaczyna się duży, o okrągłym kształcie przełom, a gdzie kończy się przewężenie zaobserwowano bardzo plastyczne tzw. wargi ścięcia materiału. Z kolei analiza strukturalna przeprowadzona dla miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanej w procesie Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. dowodzi, że materiał charakteryzuje się małym przewężeniem w szyjce, a początek rozdzielania się podczas statycznej próby rozciągania następuje na dużych dendrytach, co pokazane zostało na powyższych rysunkach (por. rys. 9.1.54, 9.1.56, 9.1.58) w postaci drobnych rys znajdujących się przy granicach krystalitów. Na widocznych w powiększeniu lokalnych szyjkach materiał zaczyna się wydłużać.

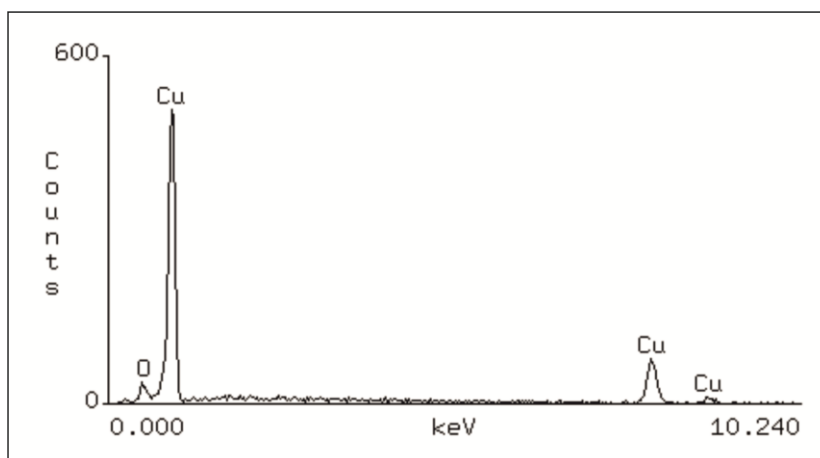
Warto także nadmienić, że przeprowadzona została analiza zdjęć skaningowych powierzchni przełomów walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP. Wykazuje ona obecność wydzielań. Są to charakterystyczne tlenki miedzi, które znajdują się w całej objętości materiału (por. rys. 9.1.55, 9.1.57). Powierzchnię przełomu próbki pobranej do badań zilustrowano na rysunku 9.1.59, z kolei ilustracje 9.1.60 – 9.1.62 to przedstawienie widma charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego z wtrąceń w punktach 1, 2 i 3.



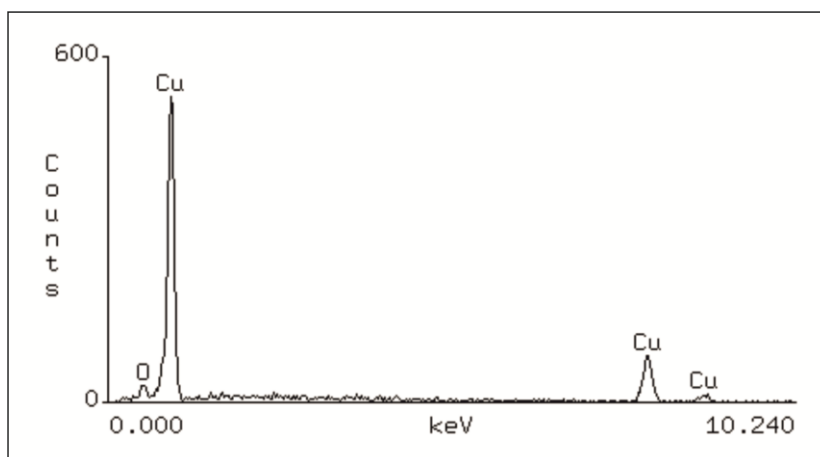
Rys. 9.1.59. Analiza skaningowa EDX przełomu walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP o średnicy 8,0 mm. Na ilustracji zaznaczono wybrane punkty do analizy składu chemicznego



Rys. 9.1.60. Widmo charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego z wtrąceń w punkcie 1



Rys. 9.1.61. Widmo charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego z wtrąceń w punkcie 2

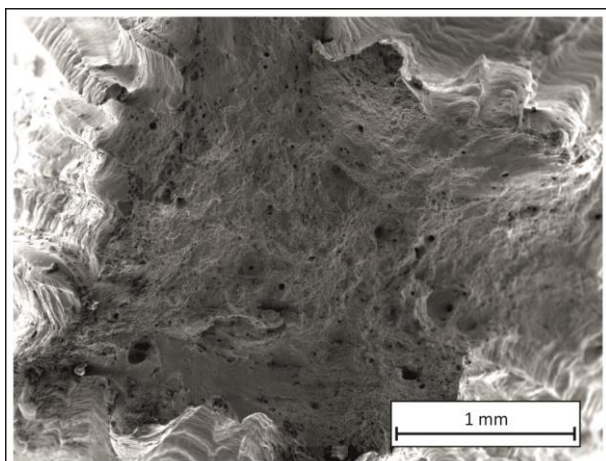


Rys. 9.1.62. Widmo charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego z wtrąceń w punkcie 3

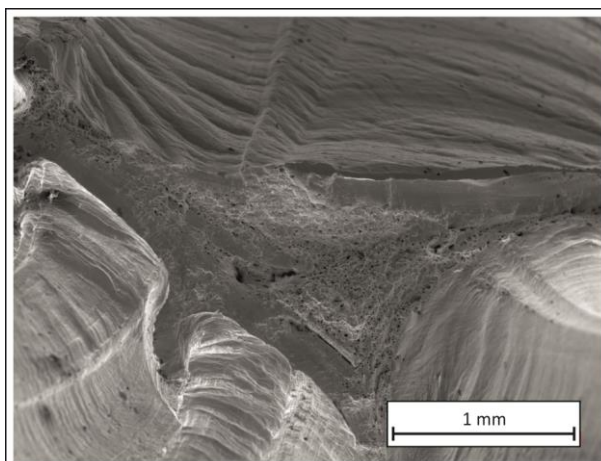
Na podstawie analizy zdjęć zauważa się duże wtrącenia o wielkościach dochodzących do kilku mikrometrów. Są to tlenki pochodzenia eutektycznego, które pierwotnie znajdowały się na powierzchniach ziaren. Z kolei zdjęcia przełomów prętów z miedzi beztlenowej nie wykazują żadnych wydzielen (por. rys. 9.1.54, 9.1.56, 9.1.58).

W dalszej części podrozdziału przedstawiono obrazy powierzchni przełomów materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast – rys. 9.1.63, 9.1.65, 9.1.67, 9.1.69 oraz z technologii DCC-AGH – 9.1.64, 9.1.66, 9.1.68, 9.1.70 przy zmniejszonych szybkościach wynoszących odpowiednio 0,5 m/min. oraz 0,006 m/min. Obserwacje za pomocą mikroskopii skaningowej przy zróżnicowanym powiększeniu dostarczyły informacji o różnicach w budowie

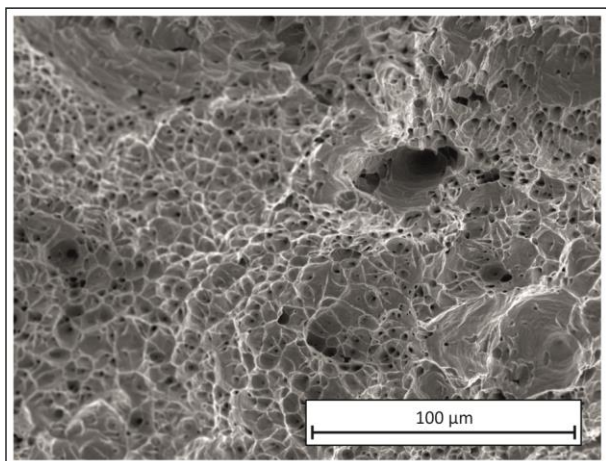
strukturalnej miedzi beztlenowej wynikających ze zmiany parametrów prowadzenia procesu ciągłego odlewania, w tym przypadku prędkości.



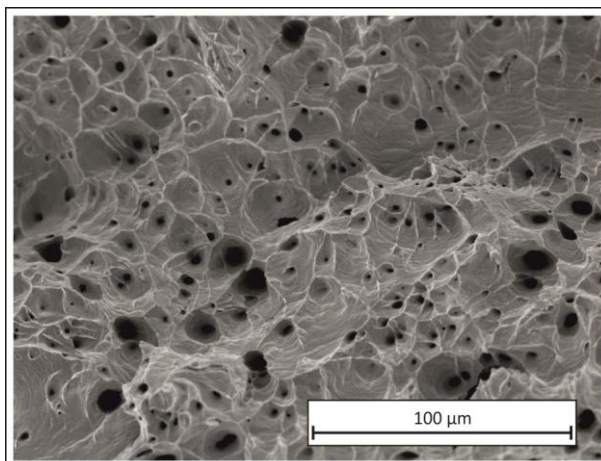
Rys. 9.1.63. Powierzchnia przelomu pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 0,5 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 35$



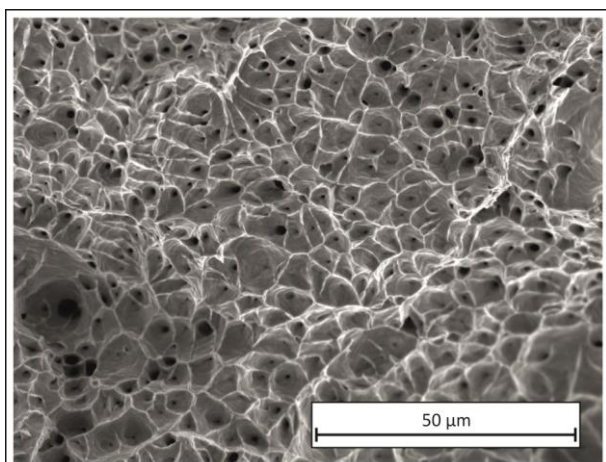
Rys. 9.1.64. Powierzchnia przelomu pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,006 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 35$



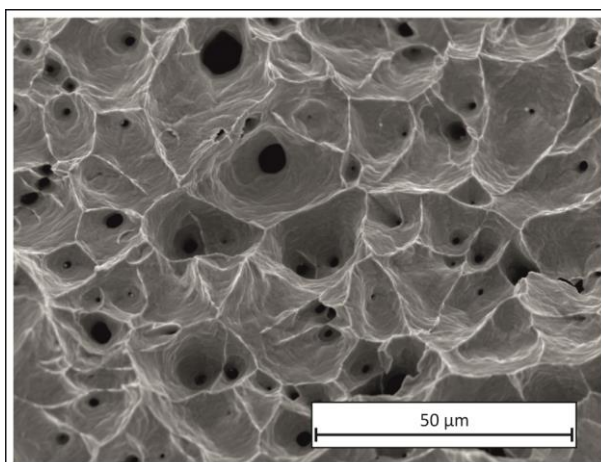
Rys. 9.1.65. Powierzchnia przelomu pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 0,5 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 500$



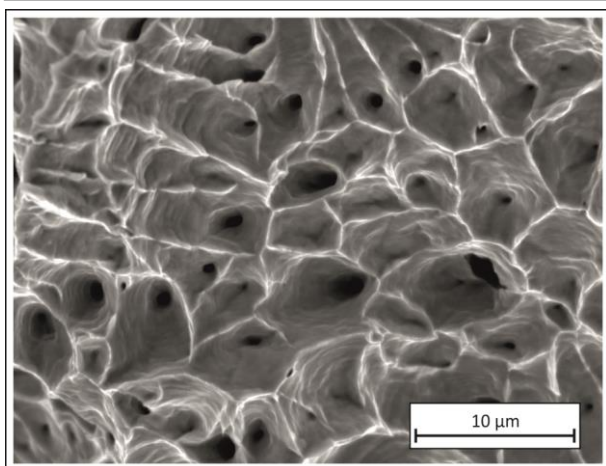
Rys. 9.1.66. Powierzchnia przelomu pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,006 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 500$



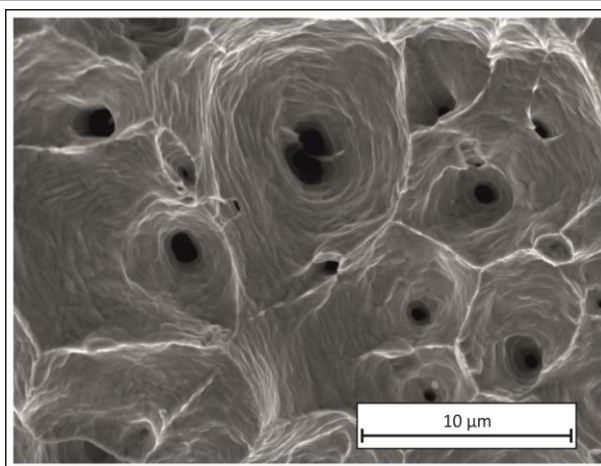
Rys. 9.1.67. Powierzchnia przelomu pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 0,5 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 1000$



Rys. 9.1.68. Powierzchnia przelomu pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,006 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 1000$



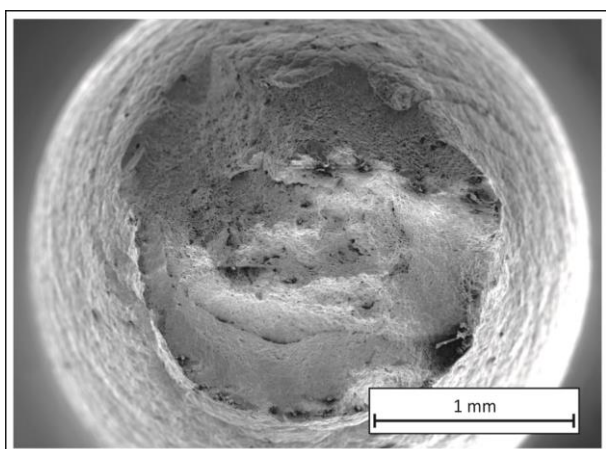
Rys. 9.1.69. Powierzchnia przelomu pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 0,5 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie x 3000



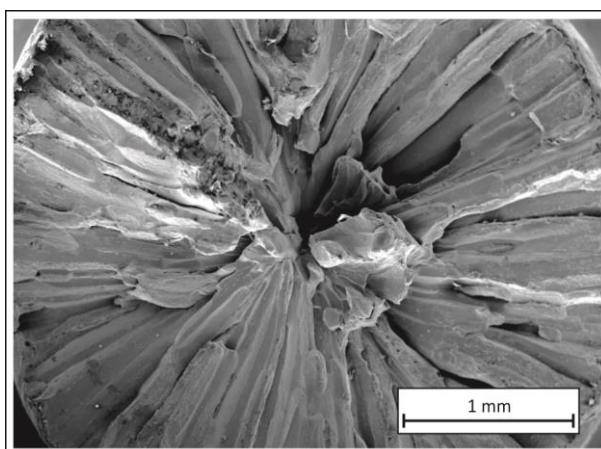
Rys. 9.1.70. Przelom pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,006 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie x 3000

Analiza obrazów przelomów miedzi beztlenowej otrzymanej w procesie przemysłowym i laboratoryjnym przy możliwych, najniższych prędkościach odlewania wskazała na zróżnicowanie materiałów. Pręt z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskany metodą Upcast zilustrowany na rysunkach 9.1.63, 9.1.65, 9.1.67 i 9.1.69 charakteryzuje się występowaniem małego przewężenia z uwagi na obecność granic ziaren pełniących funkcje umacniające i stanowiące tym samym przeszkodę dla ruchu dyslokacji. Co więcej zaobserwowano zmniejszoną ilość ziaren ukierunkowanych do ścian materiału. Nie zauważono występowania rdzenia typowego dla materiału uzyskanego w procesie klasycznego odlewania kryształów równoosiowych, tak jak ma to miejsce dla prętów uzyskanych przy prędkości odlewania 4,0 m/min. (por. rys. 9.1.54, 9.1.56). Z kolei analiza przelomu próbki miedzi beztlenowej uzyskanej na instalacji własnej DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,006 m/min. wskazała na występowanie dużego przewężenia o wygładzonych ściankach. Niewielką część powierzchni tworzy klasyczny, przybierający dołeczkowatą postać przelom. Na podstawie obserwacji zdjęć zauważa się ponadto, że materiał na obwodzie uległ „pomarszczeniu”. To oznaka jego intensywnego odkształcenia i swobodnego płynięcia. Materiał ponadto charakteryzuje się największymi ziarnami spośród wszystkich poddanych obserwacjom strukturalnych prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE.

Dokonując podsumowania budowy strukturalnej miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE po statycznej próbie rozciągania analizie poddano zilustrowane na rysunkach 9.1.71 – 9.1.76 powierzchnie przelomów próbek o mniejszych średnicach, które dla lepszego zobrazowania różnic zostały wycięte wokół osi walcówki i pręta. Podobnie jak w przypadku poprzednio zilustrowanych rysunków lewa kolumna dotyczy miedzi w gatunku Cu-ETP, natomiast prawa miedzi beztlenowej.

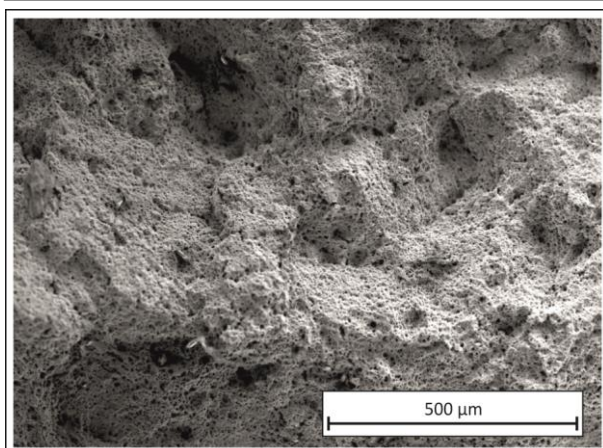


Rys. 9.1.71. Powierzchnia przelomu próbki wyciętej wokół osi walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop skaningowy, powiększenie x 40

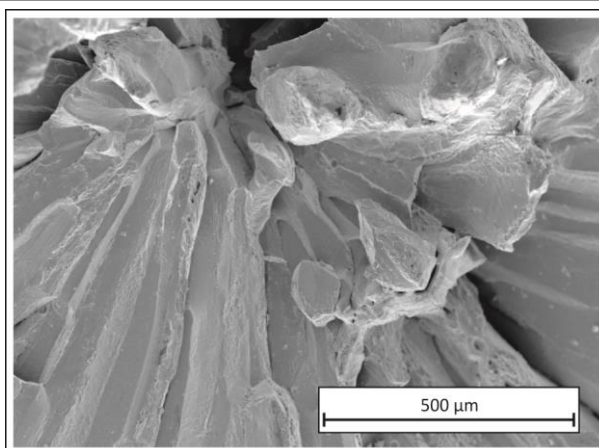


Rys. 9.1.72. Powierzchnia przelomu próbki wyciętej wokół osi pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie x 35

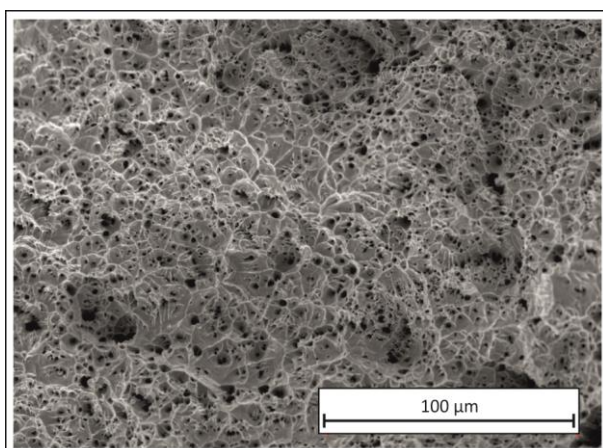




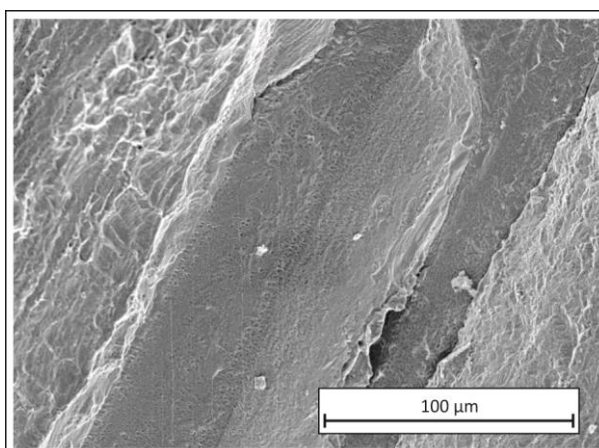
Rys. 9.1.73. Powierzchnia przetomu próbki wyciętej wokół osi walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 100$



Rys. 9.1.74. Powierzchnia przetomu próbki wyciętej wokół osi pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 100$



Rys. 9.1.75. Powierzchnia przetomu próbki wyciętej wokół osi walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 500$



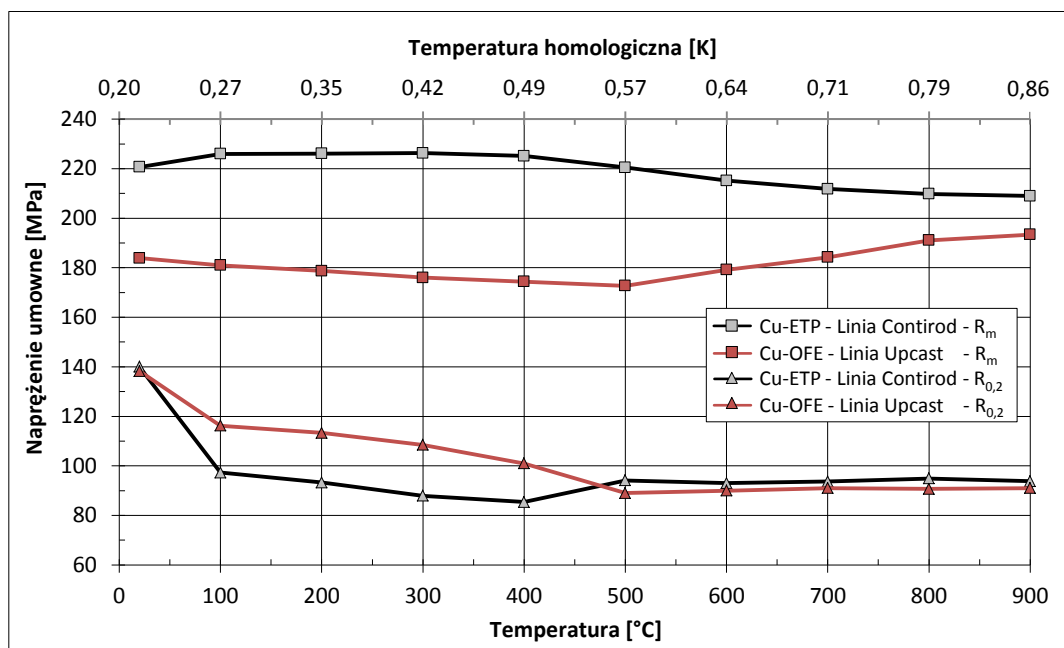
Rys. 9.1.76. Powierzchnia przetomu próbki wyciętej wokół osi pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 500$

Powyższe zestawienia struktur materiałów w gatunkach Cu-ETP i Cu-OFE potwierdziły odmienną ich budowę krystaliczną. Miedź beztlenową charakteryzuje typowa struktura odlewnicza wraz z dużymi ziarnami dendrytycznymi o wielkościach dochodzących do kilku centymetrów, w przeciwieństwie do walcówki tlenowej o jednorodnej na całej długości materiału budowie.

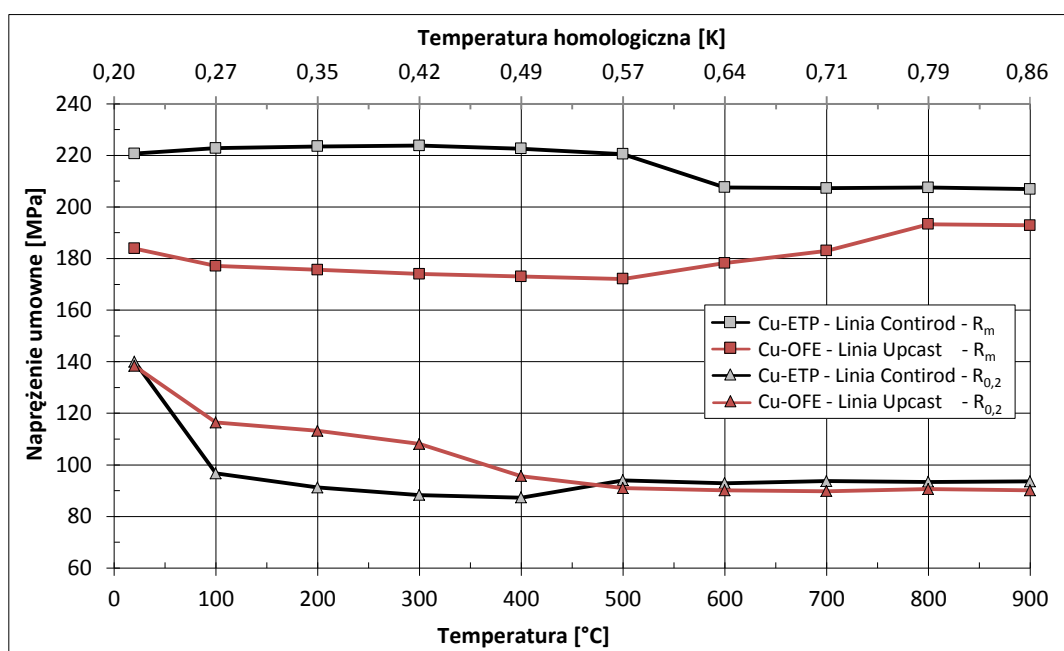
Przeprowadzone do tej pory w ramach dysertacji badania doświadczalne nad miedzianymi materiałami wsadowymi o średnicy 8,0 mm przeznaczonymi do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty dotyczyły prętów i walcówki uzyskanych przy zastosowaniu zmiennych warunków procesu technologicznego ciągłego odlewania. Warto zadać w tym miejscu pytanie – jak kształtować się będą własności tych materiałów jeśli poddane zostaną ingerencji zmiennej temperatury i czasu obróbki cieplnej? Temperatura, jako jeden z parametrów powoduje fizyczne zmiany w strukturze, takie że materiał odpowiada zmianami właściwości m.in. mechanicznych. W szczególności może dojść do wzrostu wytrzymałości na rozciąganie lub granicy plastyczności. Przy czym, w zależności od temperatury procesy te mogą zajść w większym lub mniejszym stopniu. W dalszej części pracy przeprowadzono zatem obserwacje, których celem było określenie wpływu dodatkowych zabiegów obróbki cieplnej na własności mechaniczne prętów z miedzi beztlenowej uzyskanych sposobem Upcast przy standardowych parametrach procesu odlewania tj. prędkości 4,0 m/min. i wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min. oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP. Wyniki badań i ich analiza stanowią temat kolejnego podrozdziału 9.1.2.1.4 pracy. Rozważania dostarczają odpowiedzi na pytanie jak zmieniają się właściwości próbek pod wpływem narzuconego im reżimu temperaturowego.

9.1.2.1.4. Analiza wpływu obróbki cieplnej na własności mechaniczne materiałów wsadowych

Celem tej części badań właściwości mechaniczne prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP poddanych wygrzewaniu było określenie wpływu dwóch parametrów: temperatury i czasu na kształtowanie granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia względnego i wydłużenia równomiernego. Podstawę do przeprowadzenia tych rozważań stanowiła analiza materiałów dokonana w ramach poprzednich podrozdziałów, z której uzyskano informacje o całkowicie różnych strukturach wyjściowych materiałów wynikających z odmiennych sposobów produkcji oraz innych własnościach mechanicznych.



Rys. 9.1.77. Wytrzymałość na rozciąganie i granica plastyczności prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.1.78. Krzywe zmian wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP w funkcji temperatury w teście dziesięciogodzinnego wygrzewania

Na rysunkach 9.1.77 i 9.1.78 zilustrowano wyniki badań zmian wytrzymałości na rozciąganie

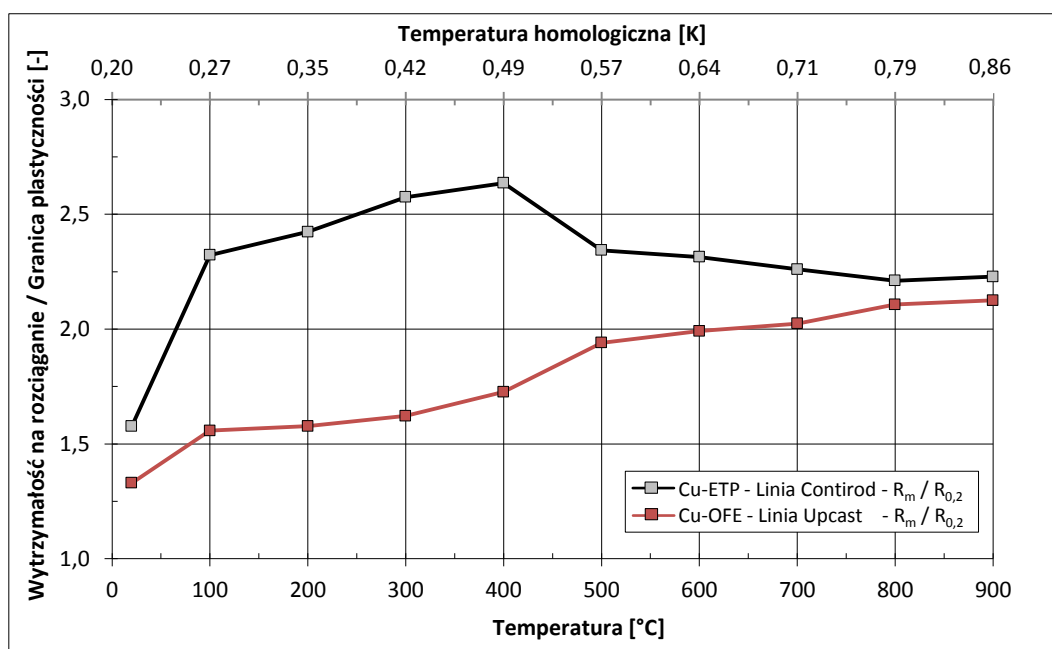
i granicy plastyczności prętów i walcówek w funkcji temperatury z zakresu od 20 °C do 900 °C dla zabiegów obróbki cieplnej prowadzonych zarówno w czasie 1 godziny, jak i 10 godzin. Dla ułatwienia analizy charakterystyk przyjęto dwie osie odciętych: dolną określającą temperaturę wygrzewania w stopniach Celsjusza i górną określającą temperaturę homologiczną w skali Kelvina. Dane liczbowe do konstrukcji tych charakterystyk zamieszczono w aneksie w tabeli A9.1.1.

Przystępując do analizy powyższych charakterystyk warto zaznaczyć, że pręt z miedzi beztlenowej uzyskany w linii Upcast i walcówka otrzymana według technologii Contirod, których krzywe rozciągania zostały zilustrowane na rysunku 9.1.28, a wartości zamieszczone w tabeli 9.1.1 są traktowane jako wyjściowe stanowiąc tym samym punkt odniesienia dla obserwacji materiałów wygrzewanych w zakresie temperatur od 100 °C do 900 °C. Należy również zaznaczyć, że o skutkach procesu wygrzewania decyduje temperatura homologiczna, czyli taka, która odnosi się do temperatury topnienia danego materiału.

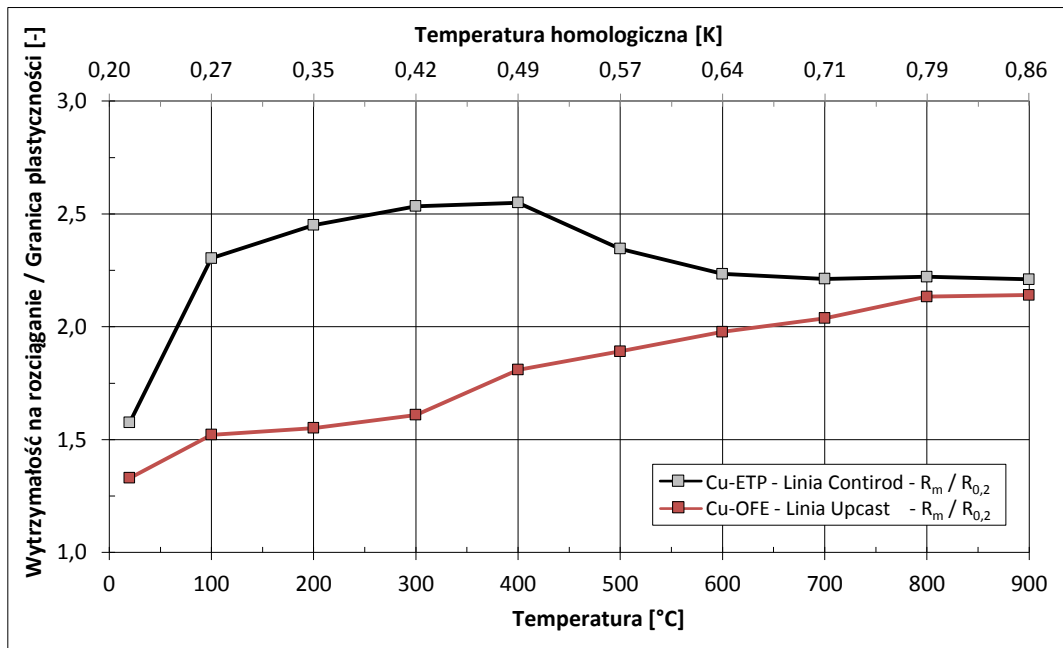
Z analizy powyższych krzywych wynika, że nie zanotowano znaczących różnic w wartościach własności wytrzymałościowych dla obu gatunków materiałów wygrzewanych zarówno w czasie 1 godziny, jak i 10 godzin, chociaż własności wytrzymałościowe obydwu materiałów poddanych ingerencji temperatury w czasie 1 godziny są wyższe. Z technologicznego punktu widzenia nie ma zatem uzasadnienia stosowanie dłuższego czasu wygrzewania.

Ponadto zauważono, że miedź w gatunku Cu-ETP w całym zakresie temperatur wygrzewania i czasu obróbki cieplnej trwającej zarówno 1 godzinę, jak i 10 godzin charakteryzuje się wyższym poziomem wytrzymałości na rozciąganie niż miedź beztlenowa. Dostrzeżono także w temperaturach obejmujących zakres 100 – 500 °C nieznaczny wzrost  $R_m$  o około 10 MPa w stosunku do walcówki bezpośrednio po linii i spadek wytrzymałości dla prętów, natomiast w temperaturach od 600 °C do 900 °C wytrzymałość na rozciąganie dla miedzi w gatunku Cu-ETP maleje, podczas gdy dla miedzi beztlenowej rośnie.

Analizując natomiast wartości granicy plastyczności odnotowano począwszy od temperatury otoczenia do 500 °C jej znaczący spadek dla obydwu gatunków miedzi, przy czym dla walcówek następuje on w sposób gwałtowny, natomiast dla prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE zachodzi łagodnie. Dla walcówek granica plastyczności maleje znacząco z poziomu 140 MPa – dla materiału z linii Contirod do poziomu 98 MPa, którym charakteryzuje się materiał poddany procesowi wygrzewania już w temperaturze 100 °C, natomiast dla miedzi w gatunku Cu-OFE spadek jest mniejszy i wynosi około 20 MPa z wartości 138 MPa do 116 MPa. Wartości granicy plastyczności stabilizują się dla obu rodzajów materiałów poddanych zabiegom wyżarzania w temperaturach począwszy od 500 °C wzwyż i kształtują się w sposób liniowy.

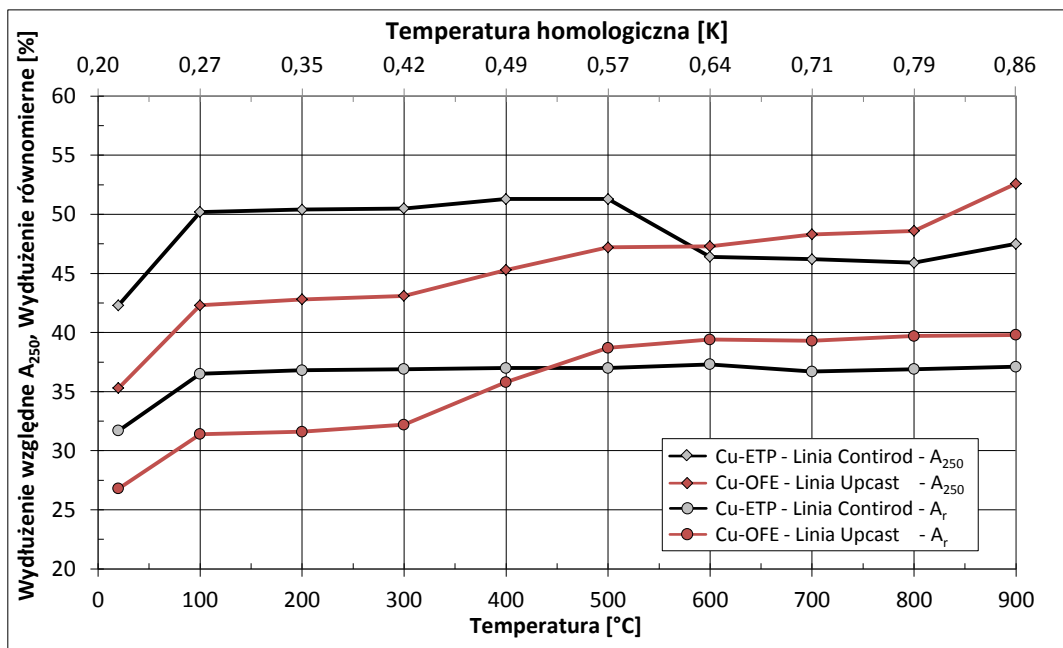


Rys. 9.1.79. Krzywe zmian stosunku wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

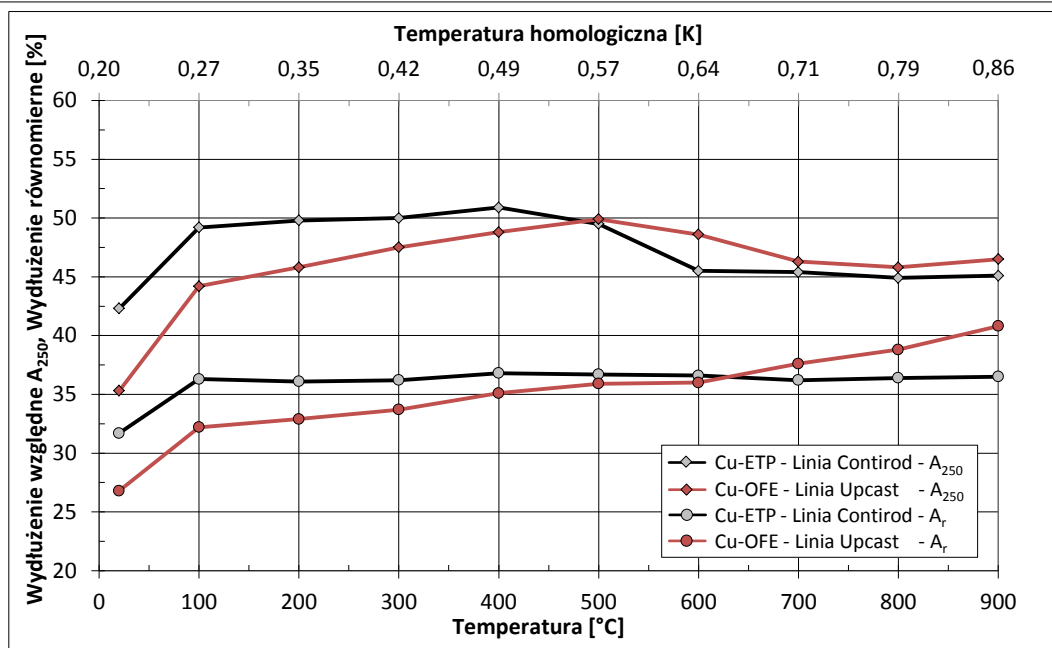


Rys. 9.1.80. Krzywe zmian stosunku wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówkę z miedzi w gatunku Cu-ETP w funkcji temperatury w teście dziesięciogodzinnego wygrzewania

Kolejne krzywe zilustrowane na rysunkach 9.1.79 i 9.1.80 to zmiany stosunku wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności dla prętów i walcówkę w funkcji temperatury po jednogodzinnym i dziesięciogodzinnym teście wygrzewania. Z ich analizy wynika, że dla walcówkę z miedzi w gatunku Cu-ETP zauważa się gwałtowny wzrost omawianego stosunku już po obróbce cieplnej w temperaturze 100 °C – niemal o jeden punkt pomiarowy. Można również przyjąć, że w wyższych temperaturach utrzymuje się on na stałym poziomie wynoszącym średnio około 2,3. Natomiast dla miedzi beztlenowej iloraz ten zwiększa się stabilnie wraz ze wzrostem temperatury, począwszy od wartości około 1,5 dla materiału uzyskanego w linii Upcast do około 2,0 w przypadku prętów poddanych ekspozycji w temperaturze 900 °C. Przedstawiany stosunek wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności dla materiałów poddanych wygrzewaniu w każdej z rozpatrywanych temperatur jest bardziej korzystny dla walcówkę z miedzi w gatunku Cu-ETP niż dla prętów z miedzi beztlenowej.



Rys. 9.1.81. Krzywe zmian wydłużenia względnego i wydłużenia równomiernego prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówkę z miedzi w gatunku Cu-ETP w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



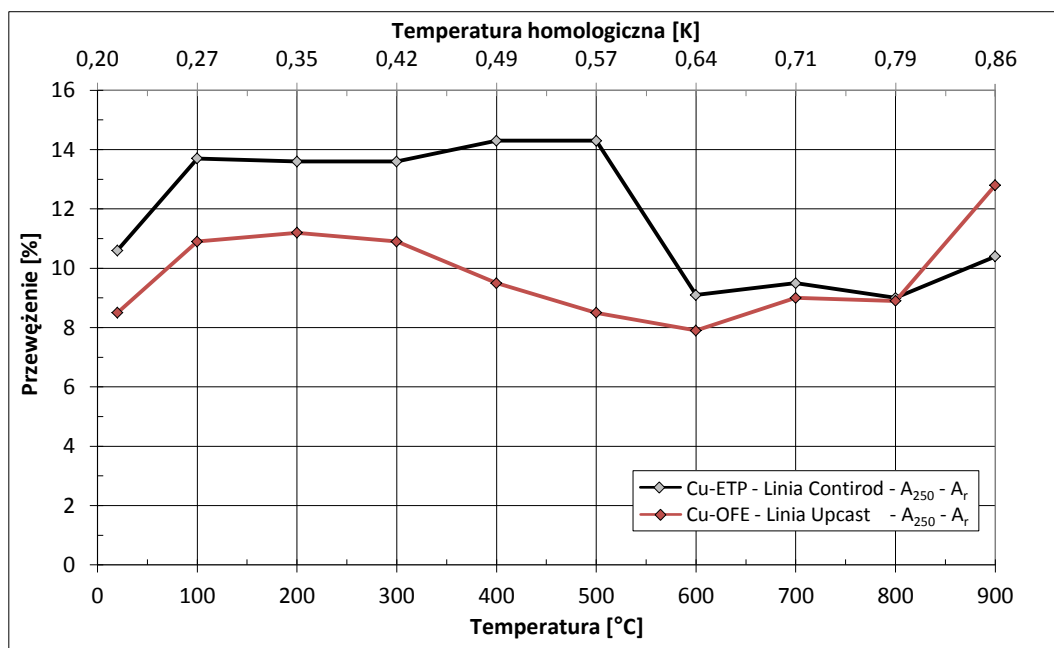
Rys. 9.1.82. Krzywe zmian wydłużenia względnego i wydłużenia równomiernego prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP w funkcji temperatury w teście dziesięciogodzinnego wygrzewania

Na kolejnych ilustracjach 9.1.81 i 9.1.82 przedstawiono wykresy wydłużenia względnego i wydłużenia równomiernego w funkcji temperatury i czasu obróbki cieplnej dla miedzi beztlenowej i tlenowej. Dokonując analizy zmian wydłużenia względnego prętów z miedzi beztlenowej zauważono, że podczas testu jednogodzinnego wygrzewania w całym zakresie analizowanych temperatur tj. od 100 °C do 900 °C, w stosunku do miedzi bezpośrednio po linii Upcast, materiały zareagowały wzrostem wydłużenia całkowitego średnio o ponad 10 %. Z kolei dłuższa ingerencja temperatury w materiał wynosząca 10 godzin spowodowała w zakresie temperatur 100 – 500 °C także wzrost wydłużenia względnego średnio o ponad 10 % w stosunku do materiału wyjściowego uzyskanego sposobem Upcast. Z kolei po poddaniu prętów działaniu wyższych temperatur obróbki cieplnej (600 – 900 °C) zaobserwowano spadek wartości do poziomu około 47 %, co jednakże w stosunku do pręta wyjściowego jest i tak wyższym rezultatem. Z kolei analizując wartości wydłużenia całkowitego dla walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP zarówno po zabiegu wygrzewania w czasie 1 godziny, jak i 10 godzin zauważono, że w temperaturach od 100 do (400 – 500) °C materiał charakteryzuje się jego wzrostem o około 8 %, przy czym w zakresie wysokich temperatur (600 – 900 °C) wydłużenie po przekroczeniu siły maksymalnej obniżyło się i zaczęło oscylować w granicach typowych dla walcówki po linii Contirod.

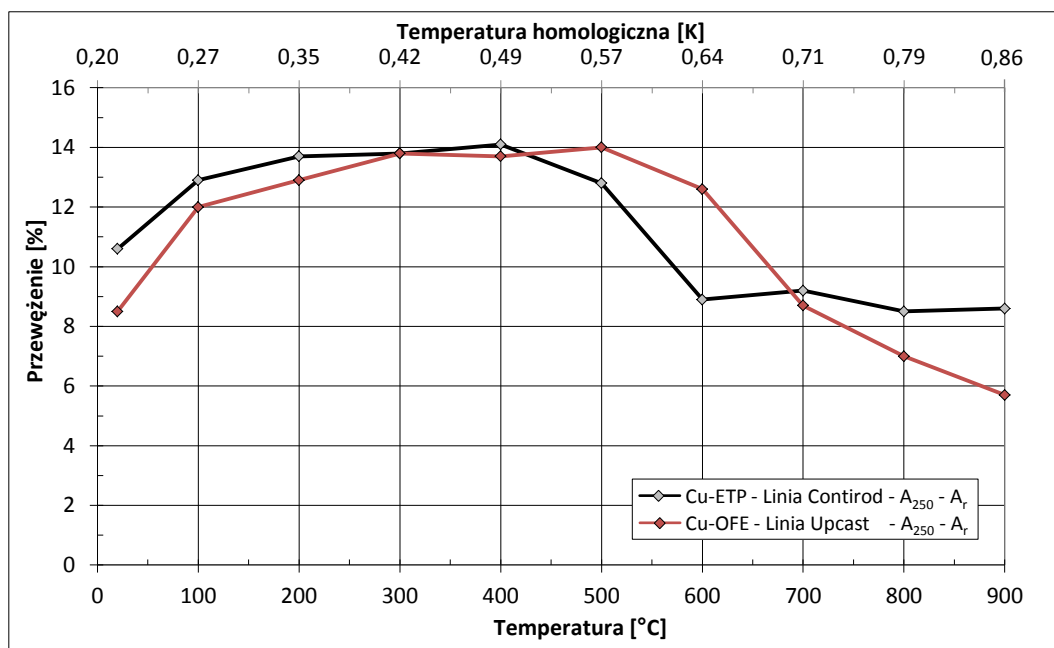
W całym zakresie temperatur obróbki cieplnej i teście zarówno jednogodzinnego, jak i dziesięciogodzinnego wygrzewania pręty z miedzi beztlenowej charakteryzują się podwyższonym wydłużeniem równomiernym w stosunku do materiału po linii ciągłego odlewania. Podobnie jest w przypadku walcówki – tutaj wydłużenie równomierne w całym zakresie temperatur wygrzewania oscyluje w granicach około 37 %, zatem jest niewiele wyższe w stosunku do materiału otrzymanego metodą Contirod. Zatem zauważalny dla walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP, zarówno po czasie wygrzewania 1 godziny, jak i 10 godzin stabilny poziom wydłużenia równomiernego i spadek wydłużenia całkowitego oznacza, że wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania zmniejsza się wydłużenie materiału w „szyjce”. Na rysunkach 9.1.83 i 9.1.84 zilustrowano charakterystyki ukazujące kształtowanie się przewężenia procentowego dla dwóch gatunków miedzi po cyklu jednogodzinnego i dziesięciogodzinnego wygrzewania.

Na podstawie analizy poniższych charakterystyk dla walcówki z miedzi tlenowej dostrzeżono bardzo zbliżony przebieg po cyklu wyżarzania w czasie 1 godziny i 10 godzin. Zanotowano w zakresie temperatur od 100 °C do 900 °C tendencję materiału do spadku długości przewężenia. Z kolei poddając obserwacjom krzywe dla prętów z miedzi beztlenowej zauważono, że o ile w cyklu wygrzewania materiału w czasie 1 godziny charakteryzują się one przewężeniem na poziomie zbliżonym do wartości zanotowanej dla prętów po linii Upcast, o tyle w dłuższym cyklu wyżarzania materiały wykazują

wzrost w zakresie temperatur od 100 °C do 600 °C i spadek pod wpływem ingerencji wysokich temperatur z zakresu 700 – 900 °C.



Rys. 9.1.83. Wykresy zależności przewodzenia procentowego prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP od temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.1.84. Wykresy zależności przewodzenia procentowego prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP od temperatury w teście dziesięciogodzinnego wygrzewania

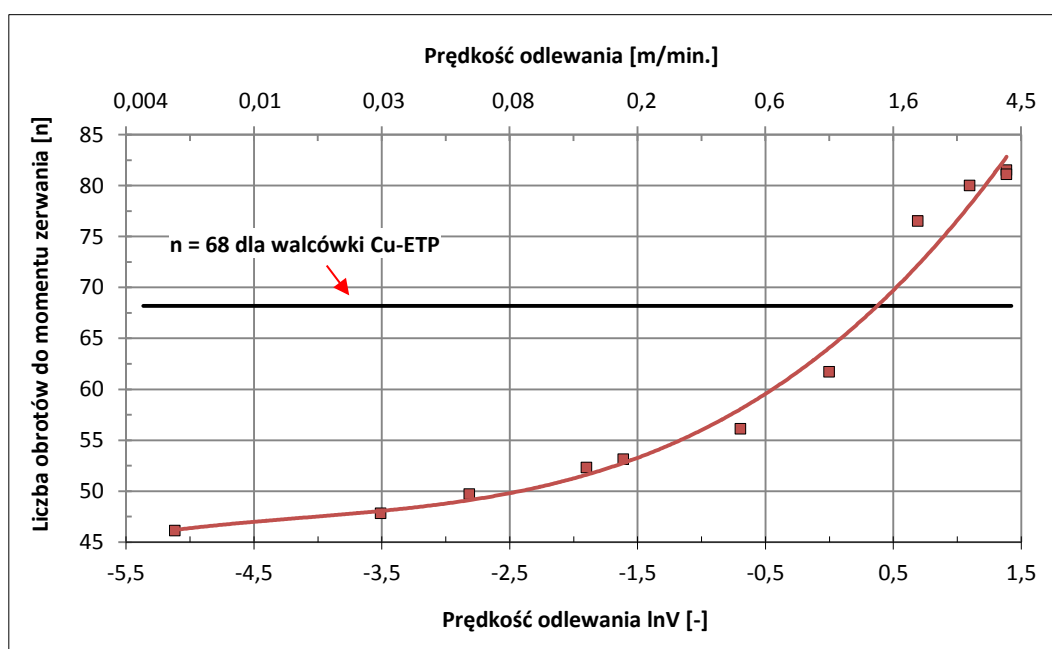
Podsumowując tą część badań dotyczących właściwości mechanicznych prętów z miedzi beztlenowej i walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP poddanych wygrzewaniu należy zaznaczyć, że pomiary dostarczyły informacji o zmianie wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności oraz wydłużenia względnego i wydłużenia równomiernego w zależności od dwóch parametrów tj. temperatury i czasu wyżarzania.

Przeprowadzona zarówno w ramach niniejszego podrozdziału 9.1.2.1.4 analiza wpływu obróbki cieplnej na własności mechaniczne, jak i dokonane wcześniejsze obserwacje zarówno wpływu prędkości odlewania, wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator, jak i warunków odlewania stanowią całościową charakterystykę zachowania się prętów i walcówek miedzianych na działanie siły

zewewnętrznej podczas statycznej próby rozciągania. Drugim testem, który umożliwia określenie podatności materiału do odkształceń plastycznych jest statyczna próba skręcania, której wyniki doświadczalne stanowią temat kolejnego podrozdziału niniejszej pracy. Realizacja zarówno statycznej próby rozciągania, jak i statycznej próby skręcania umożliwiła wnikliwą analizę właściwości technologicznych materiałów i ich przydatności do procesów przeróbki plastycznej.

### 9.1.2.2. Statyczna próba skręcania

Badania doświadczalne związane z realizacją statycznej próby skręcania materiałów wsadowych przeznaczonych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty przeprowadzono na walcówce z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętach z miedzi beztlenowej. Uzyskane zostały w procesie ciągłego odlewania na instalacji Rautomead i Upcast przy prędkościach z zakresu 0,5 – 4,0 m/min. oraz DCC-AGH, w której szybkość wynosiła od 0,006 m/min. do 0,2 m/min. Ze względu na ujawniony we wcześniejszych badaniach brak wpływu ilości wody chłodzącej krystalizator na własności miedzi z linii Upcast, próbę skręcania dla tego materiału przeprowadzono dla prętów uzyskanych przy prędkościach z zakresu od 0,5 m/min. do 4,0 m/min. i wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator wynoszącego 60 l/min.



Rys. 9.1.85. Liczba obrotów do momentu zerwania w statycznej próbie skręcania prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE w zależności od prędkości odlewania oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Tabela 9.1.4. Liczba obrotów do momentu zerwania w statycznej próbie skręcania prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Gatunek materiału	Linia technologiczna	Prędkość odlewania	Liczba obrotów do momentu zerwania
		[m/min.]	[n]
Cu-OFE	Rautomead	4,00	81,2
		4,00	81,5
	Upcast	3,00	80,8
		2,00	76,5
		1,00	61,7
		0,50	56,1
	DCC-AGH	0,20	53,1
		0,15	52,3
		0,06	49,7
		0,03	47,8
0,006		46,1	
Cu-ETP	Contirod	-	68,2

Analizie poddano wyniki badań właściwości mechanicznych materiałów uzyskane w teście skręcania. Posłużono się w tym celu rysunkiem 9.1.85, na którym zilustrowano wynik próby w postaci liczby skręceń do momentu zerwania się próbki w funkcji prędkości odlewania, a także tabelą 9.1.4, w której zestawiono otrzymane wartości.

Zilustrowana na rysunku 9.1.85 zależność liczby obrotów do momentu zerwania materiału od prędkości odlewania wykazuje monotoniczny charakter. Wraz ze wzrostem prędkości odlewania próbki materiałów wytrzymują więcej obrotów do momentu zerwania. I tak dla miedzi uzyskanej w warunkach laboratoryjnych na instalacji DCC-AGH kształtują się one na poziomie od około 46 do 53, z kolei pręty otrzymane w oparciu o technologie przemysłowe przy wyższych prędkościach odlewania charakteryzują się liczbą obrotów do zniszczenia około 56 – 81 tj. na poziomie średnio o niemal 50 % wyższym. Warto także nadmienić, że pręty z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymane w wyniku technologii Rautomead i Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. charakteryzują się bardzo zbliżonymi wartościami liczby obrotów do momentu zniszczenia. Z kolei własność ta dla walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP kształtuje się na poziomie około 68, co pod tym względem przybliża ją do miedzi beztlenowej uzyskanej przy prędkości z zakresu 1,0 – 2,0 m/min. Jako, że liczba obrotów jest miarą podatności materiału do odkształceń plastycznych próbki uzyskane sposobem ciągłego odlewania Upcast i Rautomead przy wysokich prędkościach odlewania wynoszących 3,0 i 4,0 m/min. prezentują najlepszy poziom wytrzymałości w statycznej próbie skręcania. Jest to relacja zgoła odwrotna niż obserwowana w statycznej próbie rozciągania, którą zilustrowano na rysunkach 9.1.33 i 9.1.43. Takie pozornie sprzeczne rezultaty są efektem dwóch czynników. Po pierwsze – próby statycznego skręcania i statyczna próba rozciągania różnią się od siebie zasadniczo kierunkiem wektora przyłożenia sił zewnętrznych, a w związku z tym także schematami odkształcenia. W próbie rozciągania występują wyłącznie przeciwnie zwrócone na kierunku osi pręta siły, czego efektem jest jednoosiowy schemat naprężenia. Natomiast w próbie skręcania siły są przyłożone stycznie do obwodu pręta i odkształcenie odbywa się w płaskim stanie naprężenia. Ponadto pręty otrzymane w procesach ciągłego odlewania przy skrajnych prędkościach – tj. 0,006 m/min. oraz 4,0 m/min. różnią się kierunkiem ułożenia granic ziaren (por. rys. 9.1.2 – 9.1.20). To właśnie granice ziaren są elementem struktury osłabiającym materiał. Granice ziaren prętów otrzymanych w procesach przemysłowych przy prędkościach odlewania 3,0 – 4,0 m/min. są w próbie rozciągania ułożone prostopadle do wektora siły, dlatego też wykazują podczas jej przeprowadzania najmniejszą wytrzymałość (była już o tym mowa przy okazji analizy wyników badań statycznej próby rozciągania). Podczas przyłożenia siły równoosiowej w próbie rozciągania materiały te ulegają rozdzieleniu i pękaniu właśnie na granicach ziaren. Natomiast w próbie skręcania siły styczne leżą w płaszczyznach wyznaczonych granicami ziaren. Odwrotna sytuacja występuje w przypadku prętów uzyskanych w laboratoryjnym procesie DCC-AGH przy niskich prędkościach, których wartości dochodzą do 0,006 m/min. Ślady płaszczyzn granicznych posiadają kierunek zgodny z osią prętów co gwarantuje dużą wytrzymałość na rozciąganie, ale mniejszą ilość skręceń do momentu zniszczenia. Niższy wynik walcówki w stosunku do prętów z miedzi beztlenowej uzyskanych w procesach ciągłego odlewania z wysokimi prędkościami jest spowodowany znacznym umocnieniem się drobnokrystalicznej struktury walcówki. Materiały z miedzi w gatunku Cu-OFE pozyskane w procesach technologicznych przy zastosowanych wyższych prędkościach charakteryzują się występowaniem w kierunku odkształcenia długich kryształów, które posiadają większe rezerwy plastyczności.

Wykazane w niniejszym podrozdziale pracy różnice właściwości mechanicznych omawianych dwóch gatunków miedzi wynikają z ich odmienności strukturalnych. Jak wykazała analiza skaningowa EDX, te z kolei w sposób nieodłączny związane są z różnicami w składzie chemicznym materiałów. Zatem celem badań eksperymentalnych stanowiących treść kolejnego podrozdziału pracy jest analiza składu chemicznego badanych materiałów.

### 9.1.3. Skład chemiczny

Oprócz struktury materiału kształtowanej w procesach technologicznych – ciągłego odlewania w przypadku prętów z miedzi beztlenowej lub przeróbki plastycznej na gorąco, w wyniku której uzyskuje się walcówkę z miedzi w gatunku Cu-ETP drugim ważnym zagadnieniem realizowanym w dysertacji jest aspekt czystości chemicznej materiału pod kątem rodzaju i ilości pierwiastków. To właśnie czystość chemiczna jest determinowana zarówno składem chemicznym katod, jak i specyfiką



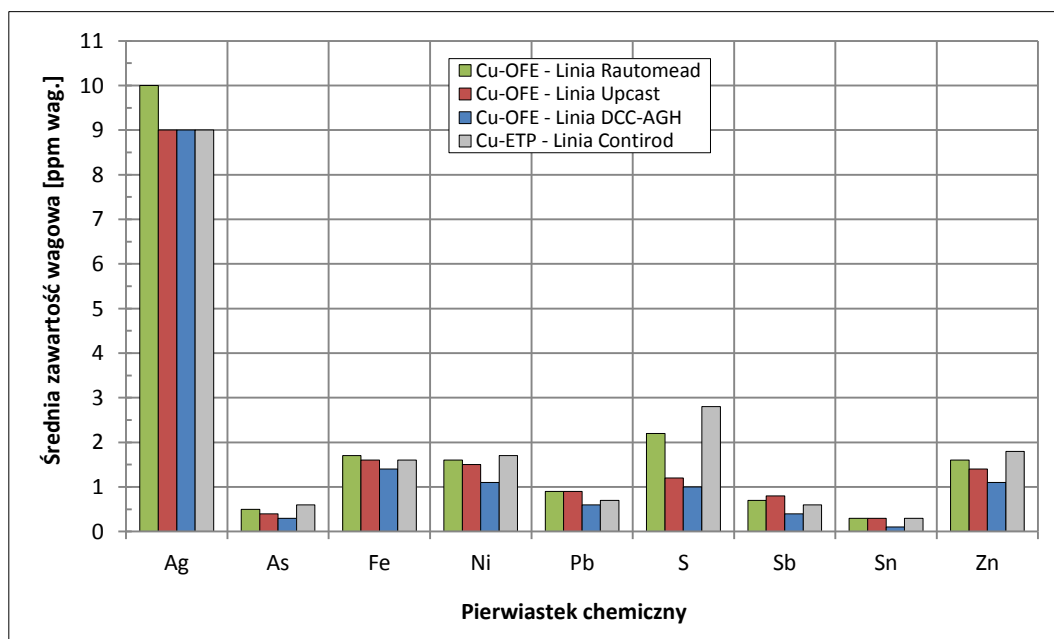
przewodzonego procesu technologicznego.

W tabeli 9.1.5 zamieszczono skład chemiczny prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych w technologii Upcast, Rautomead i DCC-AGH, a także walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP otrzymanej w linii Contirod. Przeprowadzone wstępne badania składu chemicznego prętów z miedzi beztlenowej wytworzonych sposobem Upcast przy różnej prędkości odlewania tj. od 0,5 m/min. do 4,0 m/min. i metodą DCC-AGH z szybkościami z zakresu 0,006 – 0,2 m/min. nie wykazały różnic w rozkładzie i ilości pierwiastków, dlatego też w tabeli 9.1.5 zamieszczono wyniki dotyczące średnich zawartości domieszek w materiałach.

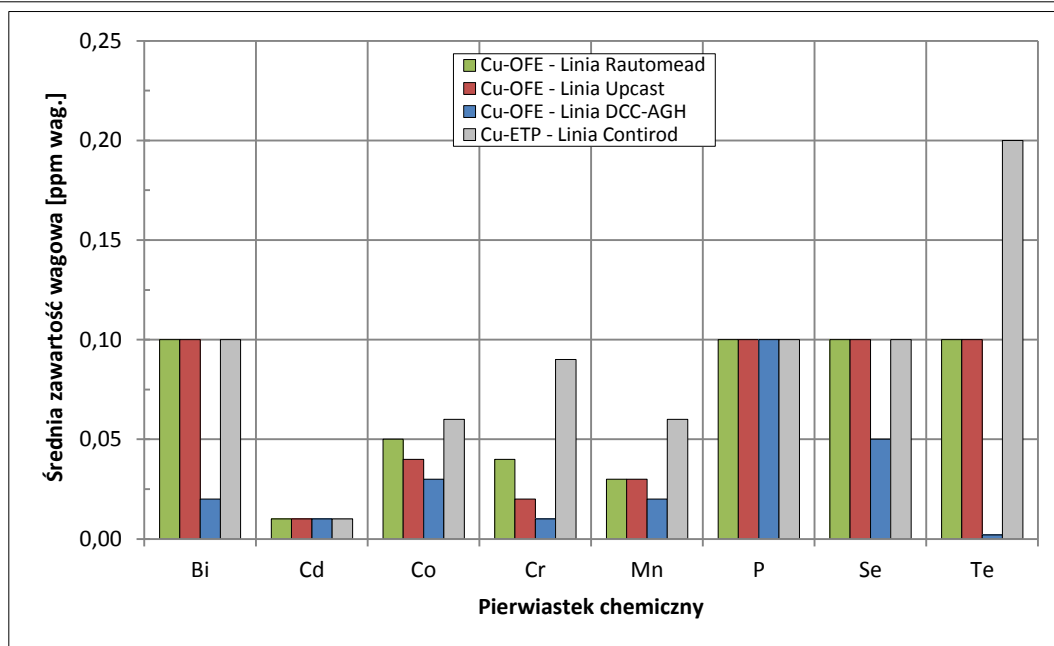
Tabela 9.1.5. Skład chemiczny prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych metodą Upcast, Rautomead i DCC-AGH oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod

Gatunek materiału	Linia technologiczna	Zawartość wagowa pierwiastków [ppm wag.]																		
		Ag	As	Bi	Cd	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	O <sub>2</sub>	P	Pb	S	Sb	Se	Sn	Te	Zn	Σ/{O <sub>2</sub> }
Cu-OFE	Rautomead	10	0,5	0,2	0,01	0,05	0,04	1,7	0,03	1,6	4,0	0,1	0,9	2,2	0,7	0,1	0,3	0,1	1,6	20
	Upcast	9	0,4	0,1	0,01	0,04	0,02	1,6	0,03	1,5	1,5	0,1	0,9	1,2	0,8	0,1	0,3	0,1	1,4	18
	DCC-AGH	9	0,3	0,1	0,01	0,03	0,01	1,4	0,02	1,1	0,7	2,0	0,6	1,0	0,4	0,03	0,1	0,1	1,1	17
Cu-ETP	Contirod	9	0,6	0,1	0,01	0,03	0,09	1,6	0,04	1,7	190	2,0	0,7	2,8	0,6	0,1	0,3	0,2	1,8	22

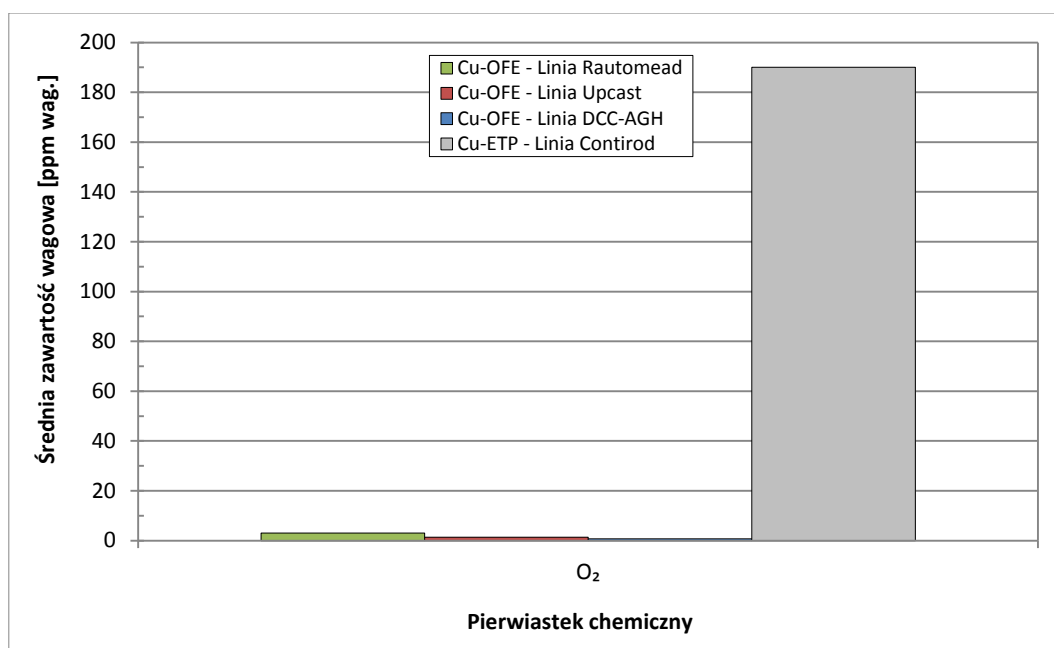
Na podstawie analizy ukazanych w tabeli 9.1.5 danych liczbowych dotyczących średniej zawartości wagowej pierwiastków w miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP zauważono, że mimo ich wytwarzania w procesach ciągłego topienia i odlewania, a dla walcówki dodatkowo przeróbki plastycznej na gorąco z katody w gatunku Cu-CATH-1 o takim samym składzie chemicznym, to i tak charakteryzują się zróżnicowaną zawartością domieszek. Wynika to ze specyfiki prowadzonych procesów technologicznych. Przykładowo dzięki obecności odtleniacza tj. węgla drzewnego, zarówno podczas topienia metalu w procesie Upcast i Rautomead, jak i dzięki zastosowaniu grafitowego krystalizatora w sposobie DCC-AGH dochodzi do reakcji redukcji tlenków miedzi. Bezpośrednim skutkiem tego pręty z miedzi w gatunku Cu-OFE zawierają maksymalnie do 3 ppm wag. tlenu, podczas gdy walcówka z miedzi w gatunku Cu-ETP około 200 ppm wag. Kolejną obserwacją płynącą z analizy danych jest to, że dla miedzi beztlenowej uzyskiwanej zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych zanotowana sumaryczna ilość pierwiastków domieszek wynosi od 17 ppm wag. do 20 ppm wag., podczas gdy dla walcówki kształtuje się na wyższym poziomie 22 ppm wag. Na podstawie danych liczbowych zamieszczonych w tabeli 9.1.5 na kolejnych rysunkach 9.1.86 – 9.1.88 zilustrowano zawartości wagowe pierwiastków w miedzi w gatunku Cu-OFE oraz Cu-ETP. W celu lepszego zobrazowania ich rozkładu, a także z uwagi na zróżnicowane zawartości od 0,002 ppm wag. do 190 ppm wag. dokonano ich przedstawienia na oddzielnych ilustracjach.



Rys. 9.1.86. Średnie zawartości wagowe srebra, arsenu, żelaza, niklu, ołowiu, siarki, antymonu, cyny i cynku w miedzi w gatunku Cu-OFE w postaci prętów uzyskanych metodą Upcast, Rautomead i DCC-AGH oraz Cu-ETP w postaci walcówki z linii Contirod



Rys. 9.1.87. Średnie zawartości wagowe bizmutu, kadmu, kobaltu, chromu, manganu, fosforu, selenu i teluru w miedzi w gatunku Cu-OFE w postaci prętów uzyskanych metodą Upcast, Rautomead i DCC-AGH oraz Cu-ETP w postaci walcówki z linii Contirod



Rys. 9.1.88. Średnia zawartość wagowa tlenu w miedzi w gatunku Cu-OFE w postaci prętów uzyskanych metodą Upcast, Rautomead i DCC-AGH oraz Cu-ETP w postaci walcówki z linii Contirod

Na podstawie powyższych rysunków zauważa się, że miedź w gatunku Cu-ETP charakteryzuje się wyższym poziomem zanieczyszczeń niż miedź beztlenujowa. Warto zwrócić uwagę na zróżnicowanie zawartości tlenu w obu gatunkach miedzi. Stąd też porównując w dalszej części pracy własności fizyczne prętów z miedzi beztlenujowej z walcówką z miedzi w gatunku Cu-ETP należy rozważyć dwa główne źródła różnicowania właściwości tych materiałów: jedno to odmienność budowy strukturalnej (por. podrozdział 9.1.1), drugie to brak obecności tlenu.

Biorąc pod uwagę fakt, że to budowa wewnętrzna i skład chemiczny materiałów warunkują ich własności fizyczne przeprowadzono identyfikację miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP pod kątem gęstości, twardości oraz zdolności do przewodzenia prądu elektrycznego. Problematyka ta stanowi temat kolejnych trzech podrozdziałów pracy (9.1.4 – 9.1.6). Celem tej grupy badań doświadczalnych była obserwacja czy wykazana w pracy odmienność struktury materiałów ujawniająca się m.in.

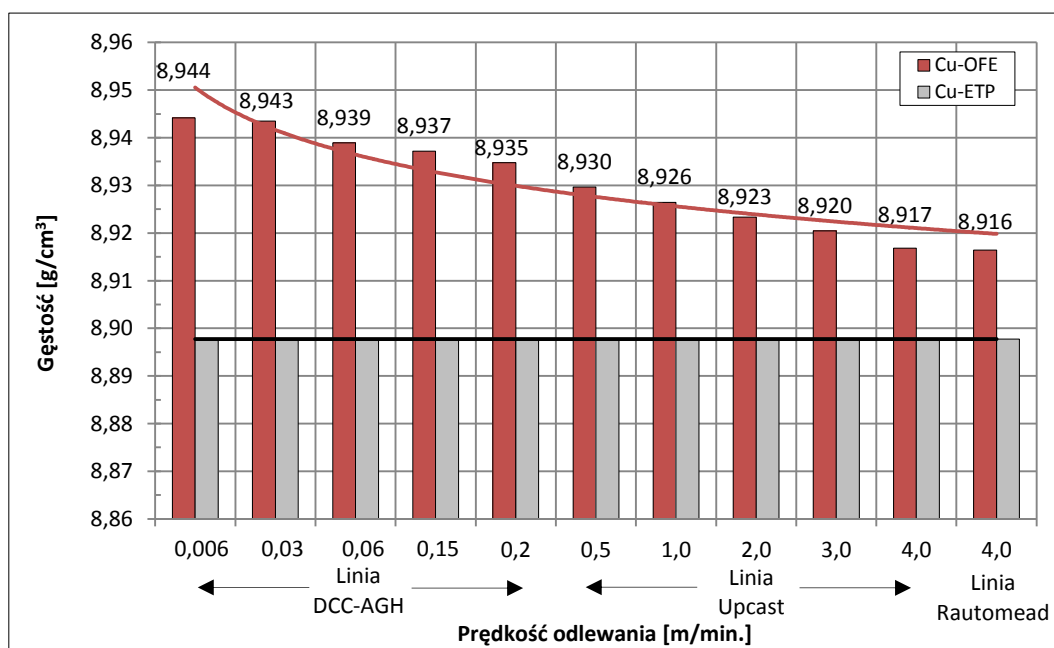
w różnej ilości ziaren i granic pomiędzy nimi oraz zróżnicowanie zawartości pierwiastków domieszek znajduje swoje odzwierciedlenie w wynikach pomiarów gęstości metodą hydrostatycznego ważenia, twardości metodą Brinella i rezystywności.

#### 9.1.4. Gęstość

W kolejnym etapie badań doświadczalnych dwa gatunki materiałów wsadowych przeznaczonych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty poddano identyfikacji właściwości fizycznych pod kątem gęstości. Pomiarowi metodą hydrostatycznego ważenia opartemu na prawie Archimidesa poddano próbki prętów z miedzi beztlenowej uzyskanych w procesach ciągłego odlewania przy prędkościach 0,006 – 4,0 m/min. Uzyskane wyniki w postaci wartości liczbowych zamieszczono w tabeli 9.1.6, a jako ilustrację graficzną zależności gęstości od prędkości odlewania na rysunku 9.1.89. Dla porównania przedstawiono także charakterystykę dla próbki walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP.

Tabela 9.1.6. Gęstość próbek prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Gatunek materiału	Linia technologiczna	Prędkość odlewania	Waga próbki w powietrzu	Waga próbki w wodzie	Temperatura	Gęstość wody w temp. T	Gęstość powietrza	Gęstość próbki
		[m/min.]	A [g]	B [g]	T [°C]	$d_0$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$d_L$ [g/cm <sup>3</sup> ]	
Cu-OFE	DCC-AGH	0,006	4,55	4,04	18,2	0,9986	0,0012	8,944
		0,03	4,74	4,21	11,2	0,9996	0,0012	8,943
		0,06	4,36	3,87	19,6	0,9983	0,0012	8,939
		0,15	5,46	4,85	19,6	0,9983	0,0012	8,937
		0,20	5,09	4,52	19,6	0,9983	0,0012	8,935
	Upcast	0,50	5,29	4,70	19,6	0,9983	0,0012	8,930
		1,00	4,73	4,20	18,2	0,9986	0,0012	8,926
		2,00	4,73	4,20	19,6	0,9983	0,0012	8,923
		3,00	4,55	4,04	18,2	0,9986	0,0012	8,920
		4,00	6,80	6,04	19,6	0,9983	0,0012	8,917
	Rautomead	4,00	5,46	4,85	19,6	0,9983	0,0012	8,916
Cu-ETP	Contirod	-	4,73	4,20	20,0	0,9983	0,0012	8,898



Rys. 9.1.89. Wykresy zależności gęstości od prędkości odlewania dla prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Na podstawie analizy wykresów oraz danych zauważono, że chociaż miedź beztlenowa to klasyczny materiał po procesie ciągłego odlewania to wykazuje wyższe wartości gęstości w stosunku do walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP uzyskanej w procesie przeróbki plastycznej na gorąco. Ponadto zaobserwowano zależność gęstości od prędkości odlewania miedzi w gatunku Cu-OFE, a mianowicie jej wzrost wraz z obniżeniem szybkości procesu. Przykładowo pręt uzyskany metodą Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. charakteryzuje się wartością gęstości na poziomie około 8,92 g/cm<sup>3</sup>, podczas gdy materiał uzyskany przy niższej szybkości np. 0,5 m/min. wykazuje wartość około 8,93 g/cm<sup>3</sup>. Pręty otrzymane natomiast sposobem DCC-AGH prezentują wartości gęstości na jeszcze wyższym poziomie. I tak dla miedzi uzyskanej przy najniższej szybkości wynoszącej 0,006 m/min. wartość ta wynosi około 8,94 g/cm<sup>3</sup>. Należy również zaznaczyć podobieństwo własności fizykochemicznych prętów z miedzi beztlenowych uzyskanych zarówno w procesie Upcast, jak i Rautomead – dla obu materiałów zanotowano niemal taką samą wartość gęstości. Z kolei walcówka z miedzi tlenowej wykazuje wartość gęstości na najniższym spośród wszystkich materiałów poddanych badaniom kształtującą się na poziomie około 8,9 g/cm<sup>3</sup>.

Uzyskane rezultaty należy tłumaczyć zarówno budową strukturalną materiałów, jak i różnicami ich składu chemicznego. Po pierwsze miedź beztlenowa charakteryzuje się mniejszą ilością granic ziaren, a tym samym mniejszą ilością miejsc niedopasowania struktury. Po drugie obecny w materiale Cu-ETP tlen, który dostaje się w procesie topienia i bardzo słabo rozpuszcza się w miedzi, łączy się z nią tworząc do temperatury 380 °C związek CuO, a powyżej 380 °C – tlenek Cu<sub>2</sub>O o mniejszej masie właściwej – wynoszącej 6,0 g/cm<sup>3</sup> niż sama miedź. Ponadto jak wykazano we wcześniejszych podrozdziałach pracy jego zawartość zawiera się zazwyczaj na poziomie około 200 ppm wag.

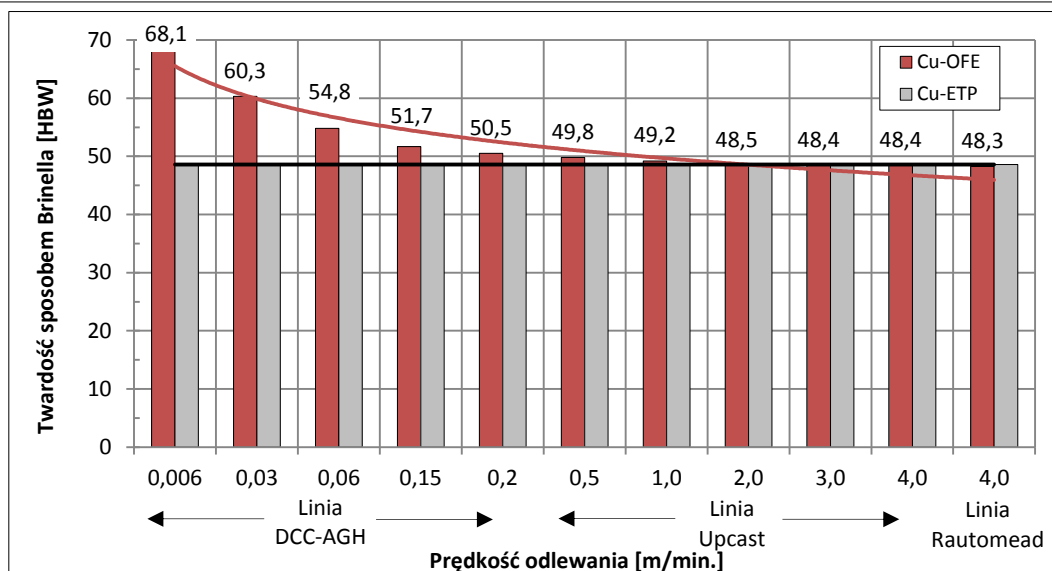
Przedstawione badania gęstości są jedną z grup właściwości fizycznych miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP informujących o zróżnicowaniu materiałów. Kolejną stanowią pomiary twardości metodą Brinella, które umożliwiają dalsze porównanie dwóch gatunków miedzi i odpowiedź na pytanie – czy i ta cecha miedzi zależy od parametrów procesu ciągłego odlewania, a także jakim poziomem własności charakteryzują się te materiały z konstrukcyjnego i technologicznego punktu widzenia?

### 9.1.5. Twardość sposobem Brinella

Kolejny etap badań doświadczalnych obejmował pomiary twardości sposobem Brinella prętów z miedzi beztlenowej uzyskanej w procesie DCC-AGH. Upcast i Rautomead oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP otrzymanej według belgijskiej technologii Contirod. Uzyskane wyniki w postaci wartości liczbowych, przy zastosowaniu określonych wielkości zamieszczono w tabeli 9.1.7. Rysunek 9.1.90 to przedstawienie w postaci graficznej otrzymanych rezultatów.

Tabela 9.1.7. Wyniki pomiarów twardości sposobem Brinella dla prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Gatunek materiału	Linia technologiczna	Prędkość odlewania [m/min.]	Średnica kulki D [mm]	Stosunek siła – średnica $0,102 \cdot \frac{F}{D^2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Siła obciążająca F [N]	Średnia średnica odcisku d [mm]	Twardość sposobem Brinella	
							norma PN-EN ISO 6506-4 [HBW]	$\frac{0,102 \cdot 2F}{\pi D \cdot [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$ [HBW]
Cu-OFE	DCC-AGH	0,006	2,5	5,0	306,5	0,756	68,2	68,1
		0,03	2,5	5,0	306,5	0,802	60,1	60,3
		0,06	2,5	5,0	306,5	0,840	54,8	54,8
		0,15	2,5	5,0	306,5	0,864	51,5	51,7
		0,20	2,5	5,0	306,5	0,874	50,3	50,5
	Upcast	0,50	2,5	5,0	306,5	0,880	49,7	49,8
		1,00	2,5	5,0	306,5	0,885	49,2	49,2
		2,00	2,5	5,0	306,5	0,891	48,6	48,5
		3,00	2,5	5,0	306,5	0,892	48,3	48,4
		4,00	2,5	5,0	306,5	0,892	48,3	48,4
Rautomead	4,00	2,5	5,0	306,5	0,893	48,3	48,3	
Cu-ETP	Contirod	-	2,5	5,0	306,5	0,891	48,6	48,6



Rys. 9.1.90. Wykresy zależności twardości sposobem Brinella od prędkości odlewania dla prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE i walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Na podstawie zanotowanych w próbie twardości wyników stwierdza się, iż miedź w gatunku Cu-OFE otrzymana w procesie ciągłego odlewania metodą DCC-AGH przy prędkościach z zakresu 0,006 – 0,2 m/min. oraz sposobem Upcast z szybkością 0,5 m/min. charakteryzuje się wyższymi wartościami twardości niż materiał tlenowy w gatunku Cu-ETP. Duża twardość tych materiałów świadczy o silnych wiązaniach metalicznych. Dla prętów uzyskanych w wymienionych procesach wartości twardości sposobem Brinella wynoszą od około 50 HBW do około 68 HBW i są o do około 1 – 20 HBW wyższe niż dla walcówki z linii Contirod, dla której wartość ta wynosi 49 HBW. Z kolei miedź w gatunku Cu-OFE pozyskana przy prędkościach z zakresu 1,0 – 4,0 m/min., z technologii Upcast i Rautomead wykazuje wartości twardości na poziomie zbliżonym dla materiału tlenowego. Ważną obserwacją płynącą z analizy danych liczbowych zamieszczonych w tabeli 9.1.7 oraz ilustracji graficznej na rysunku 9.1.90 jest przebieg zmian twardości Brinella w funkcji prędkości odlewania, a dokładniej wzrost wartości wraz z obniżeniem szybkości procesu odlewania. Podobnie jak w przypadku uzyskanych na wcześniejszych etapach badań doświadczalnych wyników m.in. własności mechanicznych lub gęstości zauważa się zbliżony poziom twardości dla prętów otrzymanych sposobem ciągłego odlewania Upcast i Rautomead.

Przedstawione w niniejszym podrozdziale badania twardości sposobem Brinella dostarczyły informacji o odporności miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na odkształcenia trwale powstałe pod wpływem sił wywołanych naciskiem węgelnika. Ukazały także zależność twardości od szybkości prowadzenia procesu ciągłego odlewania.

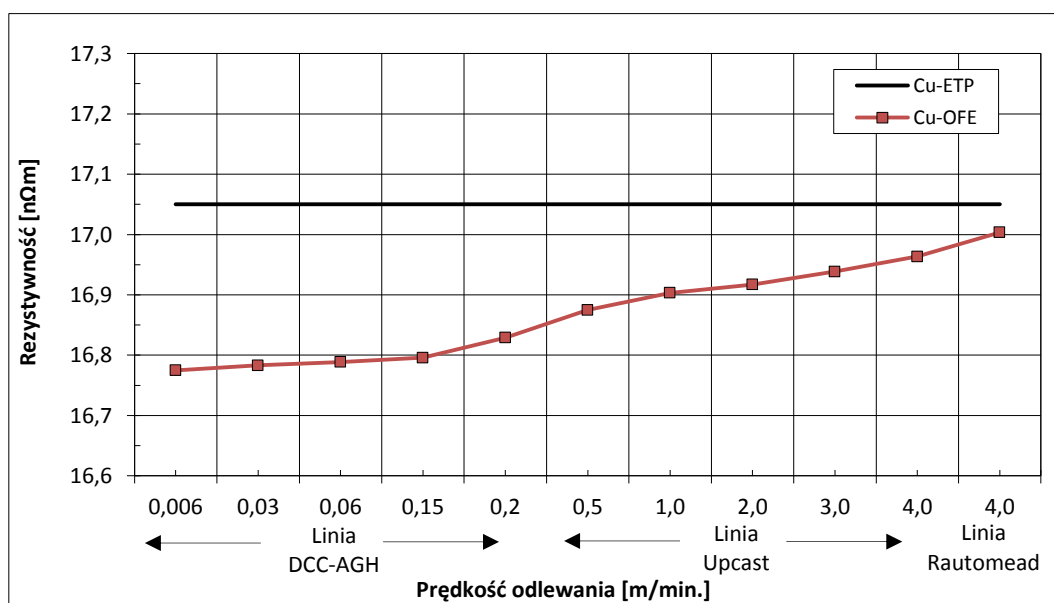
Pomiary twardości są jednymi z najbardziej miarodajnych właściwości materiałów, ponieważ zależą od energii wiązania. Z kolei różnice w energii wiązań atomowych przejawiają się z zróżnicowaniem właściwości fizycznych poszczególnych gatunków miedzi, w tym rezystywności i przewodności elektrycznej, których tematyce poświęcono kolejny podrozdział niniejszej pracy.

### 9.1.6. Własności elektryczne

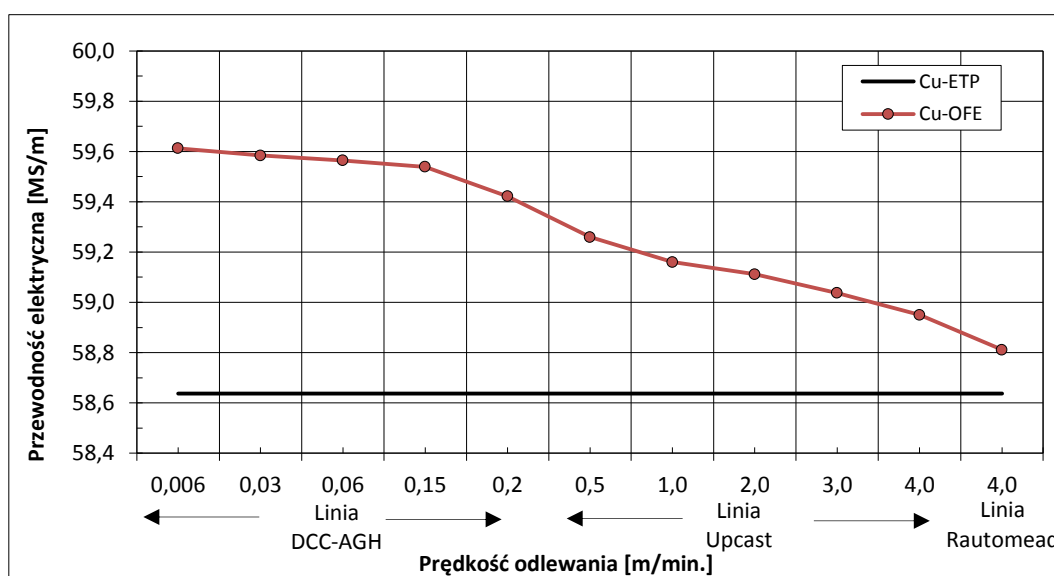
Z uwagi na zastosowanie materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty dedykowane do aplikacji kablowych bardzo ważną grupę badań stanowią pomiary właściwości elektrycznych. Przeprowadzono je na miedzi beztlenowej otrzymanej w procesie ciągłego odlewania metodą DCC-AGH przy prędkościach z zakresu 0,006 – 0,2 m/min. oraz Upcast i Rautomead z szybkościami od 0,5 m/min. do 4,0 m/min. przy przepływie wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. Podobnie jak w przypadku poprzednio wykonanych pomiarów badania przeprowadzono także na walcówce z miedzi w gatunku Cu-ETP. Poniżej w tabeli 9.1.8 zamieszczono otrzymane wartości. Ich ilustracja graficzna przedstawiona na rysunkach 9.1.91 i 9.1.92 obrazuje zależności rezystywności od prędkości odlewania, a także charakterystyki odwrotne tj. przewodności elektrycznej w funkcji szybkości odlewania.

Tabela 9.1.8. Wyniki pomiarów rezystywności i przewodności elektrycznej prętów z miedzi beztlennej i walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Gatunek materiału	Linia technologiczna	$V_{odl.}$ [m/min.]	$R_{20}$ [mΩ]	$\rho$ [nΩm]	$\gamma$ [MS/m]
Cu-OFE	DCC-AGH	0,006	0,334	16,77	59,61
		0,03	0,334	16,78	59,58
		0,06	0,334	16,79	59,56
		0,15	0,334	16,80	59,54
		0,20	0,335	16,83	59,42
	Upcast	0,50	0,336	16,88	59,26
		1,00	0,336	16,90	59,16
		2,00	0,337	16,92	59,11
		3,00	0,337	16,94	59,04
		4,00	0,337	16,96	58,95
	Rautomead	4,00	0,338	17,00	58,81
Cu-ETP	Contirod	-	0,339	17,05	58,64



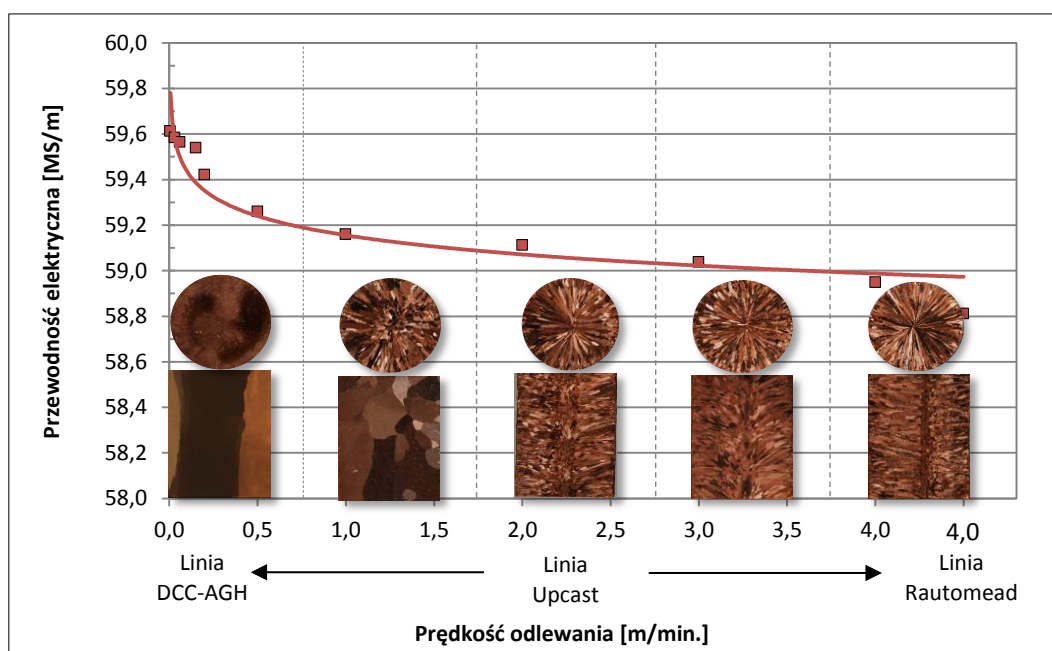
Rys. 9.1.91. Wykresy zależności rezystywności od prędkości odlewania dla prętów z miedzi beztlennej i walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP



Rys. 9.1.92. Charakterystyki przewodności elektrycznej w funkcji prędkości odlewania dla prętów z miedzi beztlennej i walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP

Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały, że miedź w gatunku Cu-OFE charakteryzuje się monotonicznym wzrostem rezystancji wraz ze zwiększeniem prędkości odlewania. Zmniejszenie szybkości odlewania materiałów skutkuje zatem wzrostem ich przewodności elektrycznej. Należy ponadto zwrócić uwagę jak znaczny jest wpływ prędkości odlewania na wzrost przewodności elektrycznej, w stosunku do różnicy jaka dzieli przewodność elektryczną walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP wynoszącą około 58,7 MS/m oraz prętów z miedzi beztlenowej w gatunku Cu-OFE uzyskanych w procesie ciągłego odlewania przy prędkościach z zakresu 0,006 – 4,0 m/min., dla których zanotowane wartości wynoszą od około 58,9 MS/m do około 59,6 MS/m. Czynnikiem warunkującym wyższy opór elektryczny prętów z miedzi beztlenowej otrzymanych w procesie ciągłego odlewania z dużymi prędkościami jest większa ilość ziaren na długości i związana z nimi większa ilość defektów struktury krystalicznej – granic ziaren. Pręty otrzymane w procesie odlewania z dużymi szybkościami z zakresu 2,0 – 4,0 m/min. posiadają strukturę, w której ziarna są ustawione prostopadłe do osi materiału i jest ich zdecydowanie więcej niż w przypadku materiałów uzyskanych metodą odlewania z dużo niższymi prędkościami. Mniejsza ilość granic ziaren w miedzi beztlenowej stwarza mniej przeszkód w swobodnym przepływie elektronów przewodzących. Podobna sytuacja występuje w przypadku miedzi w gatunku Cu-ETP – silnie drobnoziarnista struktura o dużej liczbie granic ziaren skutecznie rozprasza przepływ elektronów przewodzących ładunki elektryczne. Ponadto walcówka jest materiałem dużo bardziej zanieczyszczonym, posiada w swoim składzie chemicznym większą ilość tlenu. Tworzy on z miedzią tlenki, które także są przeszkodą na drodze przepływu elektronów przewodnictwa.

Bezpośrednia korelacja uzyskanych wyników własności elektrycznych miedzi w gatunku Cu-OFE z jej stanem strukturalnym pozwala na analizę zilustrowaną na rysunku 9.1.93.



Rys. 9.1.93. Przewodność elektryczna miedzi w gatunku Cu-OFE w funkcji prędkości odlewania

Na podstawie analizy powyższego zestawienia zauważono, że zdjęcie po lewej stronie rysunku przedstawia strukturę pręta uzyskanego w wyniku procesu odlewania, który posiada na przekroju tylko 3 ziarna. Z kolei fotografia po prawej stronie ukazuje makrostrukturę również pręta otrzymanego metodą ciągłego odlewania, ale z prędkością około 50 razy większą. Materiał posiada dużą ilość promieniowych ziaren układających się w sposób prostopadły do powierzchni. Taki rozkład zależy od zastosowanego sposobu odlewania (kontrola kierunku wektora gradientu temperatury). Tym samym przeprowadzone badania dowodzą słuszności postawionej w pracy tezy, zgodnie z którą miedź beztlenowa o zmniejszonej ilości defektów struktury – głównie granic ziaren gwarantuje ponadstandardowe – w porównaniu do tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne miedzi w gatunku Cu-ETP własności elektryczne.

### 9.1.7. Podsumowanie

Własności uzyskiwanej w procesie ciągłego odlewania miedzi istotnie zależą od parametrów procesu technologicznego m.in. wielkości przepływu i temperatury wody chłodzącej krystalizator, a także prędkości odlewania. Istnieje możliwość regulacji tych parametrów, przy czym wpływ zastosowanej zmiany widoczny jest w strukturze materiału poprzez różną ilość i morfologię krystalitów na przekroju, a także w zróżnicowaniu własności mechanicznych i fizykochemicznych. Z przeprowadzonych w ramach niniejszego rozdziału badań doświadczalnych nad tematem wynika, że istnieje ścisła relacja pomiędzy parametrami prowadzenia procesu odlewania, a własnościami uzyskiwanych miedzianych materiałów wsadowych dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty przeznaczone na cele elektryczne. W szczególności udowodniono, że zmiana np. prędkości odlewania ma istotny wpływ na właściwości mechaniczne oraz na kształtowanie gęstości, twardości i zdolności do przewodzenia prądu elektrycznego miedzi beztlenowej.

Identyfikacja własności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE ujawniła różnice struktury prętów otrzymanych w procesie ciągłego odlewania z różnymi prędkościami. Zaobserwowano, że strefa kryształów kolumnowych, która w przypadku materiałów uzyskanych metodą odlewania z największymi prędkościami jest skierowana prostopadle do osi pręta i stanowi zdecydowaną większość jego objętości, w przypadku skrajnie niskich szybkości zmienia swoje ukierunkowanie i kształt. Ziarna stają się pojedyncze i wydłużone w kierunku odprowadzania ciepła tj. wzdłuż osi materiału. Dokonując porównania makrostruktur materiałów nie zauważono ponadto różnic w budowie pomiędzy prętami otrzymanymi sposobem odlewania przy stałej prędkości i zmiennym wydatku wody chłodzącej krystalizator. O ile miedź beztlenowa będąca typowym materiałem uzyskanym w procesie ciągłego odlewania charakteryzuje się strukturą dendrytyczną o zmniejszonej ilości granic ziaren, o tyle miedź w gatunku Cu-ETP powstała w wyniku przeróbki plastycznej na gorąco wykazuje izotropową, drobnoziarnistą strukturę o zdecydowanie większej liczbie ziaren.

Powyższe odmienności strukturalne znalazły swoje odzwierciedlenie w zróżnicowaniu własności mechanicznych materiałów w wyniku przeprowadzonej statycznej próby rozciągania i statycznej próby skręcania, które różnią się od siebie zasadniczo kierunkiem przyłożenia siły. Na podstawie analizy porównawczej charakterystyk rozciągania zaobserwowano, że miedź w gatunku Cu-ETP wykazuje wyższe własności wytrzymałościowe niż pręty z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymane w technologiach Upcast, Rautomead i DCC-AGH, co bezpośrednio świadczy o wyższym współczynniku umocnienia tego materiału. Z kolei poddając obserwacjom miedź beztlenową zauważono, że najlepsze własności plastyczne wykazują pręty otrzymane przy najniższych prędkościach odlewania, które to charakteryzują się strukturami ziaren wydłużonych w kierunku osi długiej prętów, a więc zgodnie z kierunkiem wektora gradientu spadku temperatury. Ustalono ponadto, że zmiana wielkości przepływu wody chłodzącej ma niewielki wpływ na własności w porównaniu do zmian wywołanych zróżnicowaniem prędkości prowadzenia procesu. W ramach badań eksperymentalnych dokonano także obserwacji powierzchni materiałów po statycznej próbie rozciągania, na podstawie których stwierdzono, że w przypadku miedzi w gatunku Cu-ETP nie występują istotne jej zmiany. Natomiast powierzchnia prętów z miedzi beztlenowej staje się nierównomierna, co jest efektem odkształcania się i obrotu dużych krystalitów. Przeprowadzona analiza przełomów dwóch gatunków materiałów wykazała, że charakteryzują się one typowym przełomem poślizgowym. Większe przewężenie zaobserwowano dla miedzi beztlenowej, co wynika z jej większej plastyczności. W ramach badań po statycznej próbie rozciągania dokonano także analizy skaningowej EDX przełomów materiałów. Okazało się, że o ile pręty z miedzi beztlenowej nie wykazały żadnych wtrąceń, o tyle materiał w gatunku Cu-ETP wykazuje obecność wydzieleni, którymi są tlenki miedzi o wielkościach dochodzących do 5  $\mu\text{m}$  znajdujące się w całej objętości materiału.

W ramach badań własności mechanicznych pręty i walcówki poddano także procesowi wygrzewania, którego celem było określenie wpływu dwóch parametrów: temperatury i czasu na kształtowanie granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia względnego i wydłużenia równomiernego. Uzyskano informacje, że walcówka z miedzi w gatunku Cu-ETP poddana zabiegom obróbki cieplnej charakteryzuje się niższymi własnościami wytrzymałościowymi w stosunku do materiału po linii Contirod. Natomiast pręty z miedzi w gatunku Cu-OFE po procesie wyżarzania wykazują zmienne własności wytrzymałościowe, przy czym w zakresie wyższych temperatur następuje



ich wzrost.

Badania doświadczalne związane z przeprowadzeniem statycznej próby skręcania, w której pręty obciążane były równoważącymi się momentami skręcającymi, działającymi w płaszczyźnie poprzecznej wykazały, że najlepszą plastycznością charakteryzuje się materiał odlewany z najwyższą prędkością o kryształach skierowanych prostopadle do swojej osi.

W wyniku badań eksperymentalnych, które dostarczyły informacji o zróżnicowaniu budowy strukturalnej oraz własności mechanicznych dwóch gatunków miedzi, materiały poddano obserwacjom ich właściwości fizykochemicznych. Przeprowadzona analiza składu chemicznego pod kątem rodzaju i ilości pierwiastków zanieczyszczeń w katodzie w gatunku Cu-CATH-1 wykazała, że sumaryczna zawartość zanieczyszczeń w tym materiale nie przekracza 25 ppm wag. Z kolei obserwacje dotyczące średnich zawartości domieszek w pręcie i walcówce ujawniły, że sumaryczne ich ilości kształtują się na poziomie odpowiednio około 15 ppm wag. i 25 ppm wag. To zróżnicowanie rozkładów wynikające ze specyfiki prowadzonych procesów technologicznych dotyczy także tlenu, którego miedź w gatunku Cu-OFE zawiera maksymalnie do 3 ppm wag., podczas gdy materiał Cu-ETP około 200 ppm wag.

Materiały stanowiące przedmiot zainteresowania niniejszej pracy poddano także pomiarom gęstości metodą hydrostatycznego ważenia. Zaobserwowane dla miedzi beztlenowej wyższe wartości w stosunku do walcówki w gatunku Cu-ETP charakteryzują się ponadto monotonicznym wzrostem wraz z obniżeniem prędkości odlewania. Tłumaczyć należy to zarówno budową strukturalną miedzi w gatunku Cu-OFE, a mianowicie mniejszą ilością granic ziaren tj. miejsc niedopasowania struktury, jak i składem chemicznym materiału a konkretnie brakiem obecności tlenków  $\text{Cu}_2\text{O}$  o mniejszej masie właściwej niż miedź.

Badania twardości sposobem Brinella także dostarczyły informacji o odmiennych własnościach materiałów w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP. Stwierdzono, że miedź beztlenowa charakteryzuje się wyższymi wartościami twardości niż materiał tlenowy w gatunku Cu-ETP. Ponadto zaobserwowano przebieg tych zmian w funkcji prędkości odlewania, a dokładniej wzrost twardości wraz z obniżeniem prędkości odlewania. Uzyskane wyniki świadczą o silnych wiązaniach metalicznych w materiale.

Bardzo ważną grupę badań doświadczalnych w odniesieniu do miedzi mającej bezpośrednie zastosowanie w aplikacjach elektrycznych stanowią pomiary rezystancji. Ujawniły one, że spadek prędkości odlewania prętów wpływa na zmniejszenie oporu elektrycznego. Zgodnie z przedstawioną w dysertacji tezę ma to ścisły związek z pierwotną budową strukturalną miedzi oraz mechanizmem przepływu prądu. Pręty uzyskane przy najniższych prędkościach odlewania posiadają na długości mniejszą liczbę granic ziaren niż pręty otrzymane w procesie przy szybkościach wysokich.

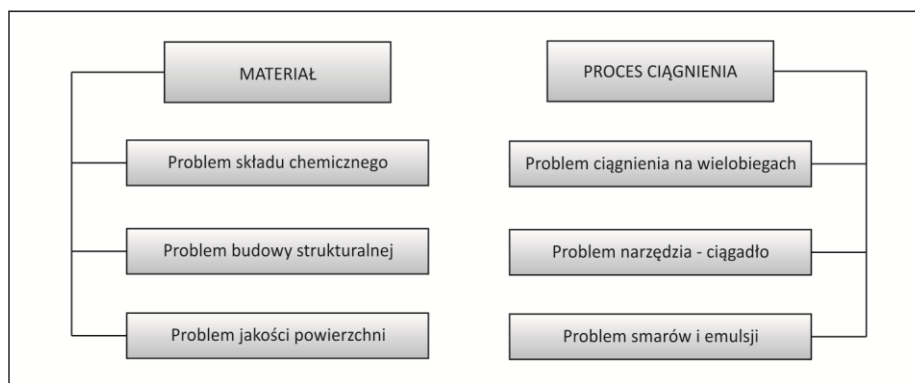
Realizacja przedstawionego w niniejszym rozdziale pracy programu badań oraz analiza wyników dostarczyły nowych i bardzo istotnych informacji na temat wpływu jaki wywiera zmiana parametrów procesu odlewania na kształtowanie stanu strukturalnego oraz własności miedzi beztlenowej w gatunku Cu-OFE. Wiedza ta w odniesieniu do poddawanych obserwacjom półproduktów – prętów miedzianych pozwala na kompleksowe projektowanie materiału wsadowego o własnościach wymaganych przez wysokozaawansowane aplikacje elektrotechniczne. Zatem stosując walcówkę i pręt jako materiały dedykowane do procesu ciągnięcia należy podkreślić, że są to dwa różne materiałami zarówno z punktu widzenia składu chemicznego, struktury, jak i stanu energetycznego, co może przekładać się na zróżnicowanie ich zdolności ciągniczych, o czym traktuje kolejny rozdział dysertacji.

## 9.2. Badania nad procesem ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych

Podstawowym zagadnieniem badawczym w odniesieniu do przetwórstwa w procesach przeróbki plastycznej na zimno miedzi wysokiej czystości chemicznej jest określenie wpływu zarówno składu chemicznego, jak i stanu strukturalnego na jej odkształcalność. O ile w przypadku tradycyjnie stosowanej walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP jako materiału wsadowego do procesu ciągnięcia, wytwarzanej w technologiach Contirod, Southwire lub Continuus Properzi, gwarancją dobrej odkształcalności uzyskuje się przede wszystkim dzięki drobnoziarnistej strukturze materiału, o tyle w przypadku prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymywanych metodą Upcast, Rautomead lub DCC-AGH to wyższa czystość chemiczna materiału z uwagi na brak obecności tlenków zapewnia

dobrą odkształcalność. W obu przypadkach stosowane na skalę przemysłową materiały wsadowe z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty dedykowane do różnorodnych aplikacji elektrotechnicznych stanowią kompromis pomiędzy odpowiednią strukturą, a składem chemicznym. Jednym z aspektów niewystarczającej czystości chemicznej miedzi jest jej ograniczona podatność do wyżarzania, co stanowi podstawowe znaczenie dla procesu obróbki cieplnej drutów w liniach ciągniczych. To zagadnienie będzie przedmiotem oddzielnego opracowania zamieszczonego w podrozdziale 9.3 niniejszej pracy.

Pojęcie tzw. dobrej odkształcalności – z jednej strony należy rozumieć jako podatność materiału do przeróbki plastycznej na zimno w warunkach stworzonych przez duże prędkości ciągnięcia, z drugiej zaś jako jego odpowiednią odporność cieplną. Na rysunku 9.2.1 w sposób schematyczny zilustrowano problemy związane z przetwórstwem materiału w procesie ciągnięcia.



Rys. 9.2.1. Klasyfikacja problemów związanych z przetwórstwem materiału w procesie ciągnięcia

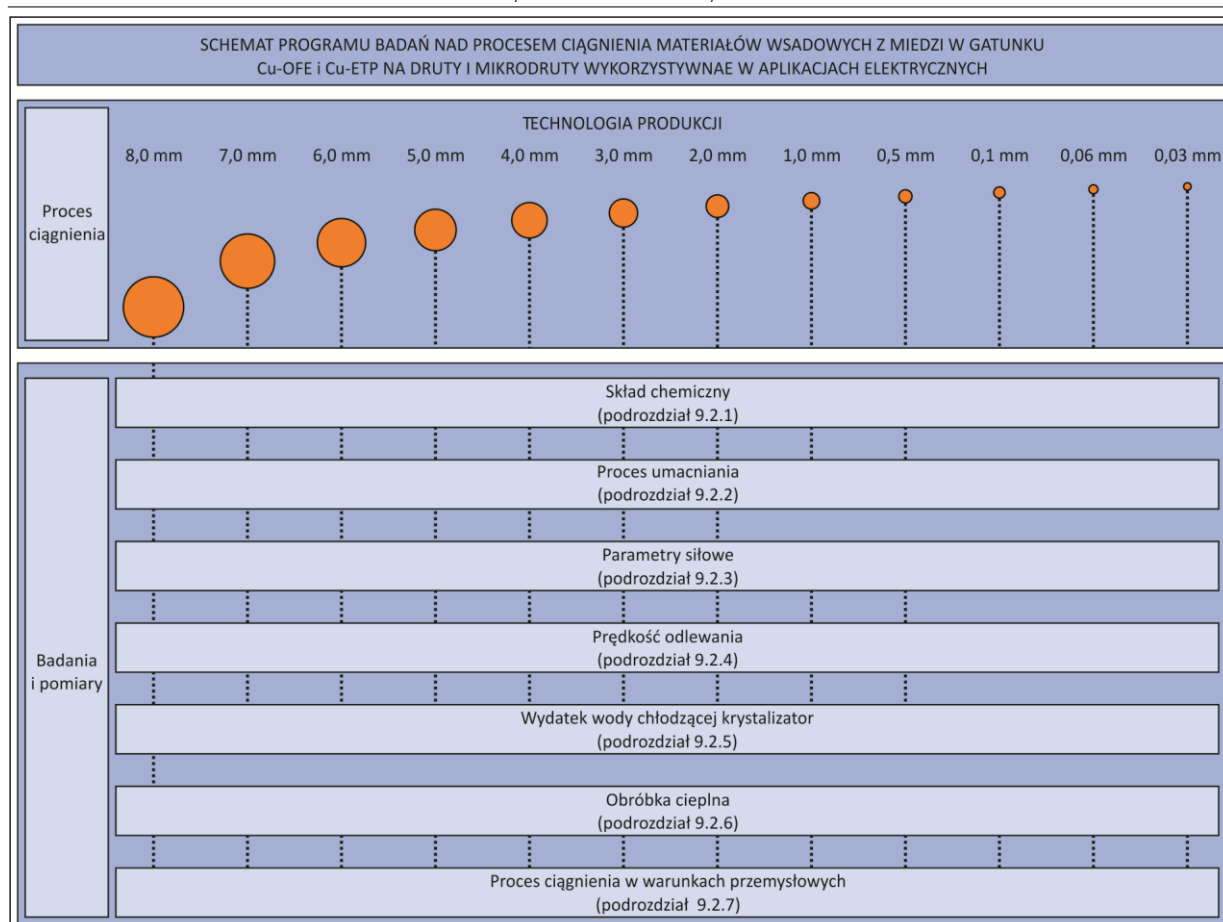
Na podstawie powyższej ilustracji zauważa się, że przystępując do analizy procesu ciągnięcia należy już na początku wyróżnić dwa główne źródła generujące problemy podczas jego realizacji. Pierwszą grupę stanowią problemy związane z właściwościami materiału, natomiast drugą są problemy związane z szeroko rozumianą techniką produkcyjną wykorzystywaną w procesach ciągnięcia (m.in. maszyny ciągnicze, narzędzia, emulsje i smary). Powyższe grupy są ze sobą ściśle powiązane i między sobą zależne. Zmiana, którejkolwiek parametru np. składu chemicznego stosowanego materiału wsadowego, rodzaju struktury lub jakości jego powierzchni wymaga ingerencji w parametry procesów ciągnięcia w celu zapewnienia odpowiedniej jakości uzyskanego wyrobu końcowego.

W szczególności, w przypadku rozważań związanych z procesem ciągnięcia drutów o średnicach poniżej 0,1 mm, znaczenie problemów związanych z jakością materiału (m.in. ilość zanieczyszczeń, rodzaj struktury) wzrasta i ostatecznie decyduje o możliwości jego wykorzystania na mikrodruty. Zagadnienie, o którym mowa będzie poruszane w ramach niniejszego podrozdziału.

W odniesieniu do stanowiącej przedmiot zainteresowania pracy – miedzi beztlenowej otrzymywanej w liniach Upcast, Rautomead lub DCC-AGH istotne jest zagwarantowanie przede wszystkim dobrej odkształcalności. Należy przy tym wziąć pod uwagę, że materiał charakteryzuje się strukturą po procesie ciągłego odlewania, która wiąże się z niebezpieczeństwem wystąpienia typowych wad odlewniczych takich jak rzadzizny, zagazowania, pustki, pory, co z kolei wpływa na podatność materiału do odkształcania w procesie ciągnięcia. Na podstawie przeprowadzonych we wcześniejszych rozdziałach rozważań, w niniejszej pracy dąży się do odpowiedzi na następujące pytanie: w jaki sposób jakość materiału wsadowego z punktu widzenia rodzaju i ilości zanieczyszczeń i tlenu oraz stanu strukturalnego kształtowanego w procesie ciągłego odlewania wpływa na właściwości technologiczne drutów przeznaczonych do wysokozaawansowanych aplikacji elektronicznych i elektrotechnicznych?

Odpowiedź na powyższe pytanie wymaga przeprowadzenia serii badań doświadczalnych umożliwiających określenia wpływu zarówno zawartości tlenu w miedzi na jej odkształcalność w procesach przeróbki plastycznej na zimno – w szczególności w procesie ciągnięcia, jak i wpływu struktury na kształtowanie się zespołu własności mechaniczno-elektrycznych drutów i na ich podatność do wyżarzania. Oprócz niniejszego podrozdziału tej tematyce poświęcono także kolejne podrozdziały 9.3 i 9.4 dysertacji.

Program badań doświadczalnych realizowany w ramach podrozdziału 9.2 w sposób schematyczny zilustrowano na rysunku 9.2.2.



Rys. 9.2.2. Ogólny schemat programu badań doświadczalnych nad procesem ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych

Charakterystykę zachowania się materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP w procesie ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych przeprowadzono w ramach kolejnych ośmiu podrozdziałów pracy (9.2.1 – 9.2.8). W ramach pierwszego – 9.2.1 analizie poddano wpływ składu chemicznego miedzi na podatność do przetwórstwa w procesach przeróbki plastycznej na zimno. W tabeli 9.2.1 zamieszczono rozkłady stężenia pierwiastków domieszek w różnych gatunkach miedzi wysokiej czystości chemicznej według Fujiwary [95]. Z kolei własności przedstawione w tabeli 9.2.2 to charakterystyka porównawcza materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-FRHC, Cu-ETP i Cu-OFE do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty, których ilustrację graficzną ukazano na rysunku 9.2.3. Na ilustracji 9.2.4 przedstawiono natomiast obraz z mikroskopu skaningowego powierzchni przelomu miedzi rafinowanej ogniowo z linii technologicznej Continuus Properzi – La Farga Lacambra. W dalszej części niniejszego podrozdziału omówiono problematykę najczęściej występujących podczas prób technologicznych nad procesem ciągnięcia wad drutów miedzianych. W związku z powyższym na rysunku 9.2.5 zilustrowano przykłady najczęściej obserwowanych przyczyn zerwań drutów w procesie przetwórstwa plastycznego na zimno. Dopełnienie i jednocześnie kontynuację tematyki stanowią zdjęcia z mikroskopu skaningowego wad ciągniczych drutów z miedzi przedstawione na rysunkach 9.2.6 – 9.2.9. Rozważania na temat wpływu poziomu zanieczyszczeń w miedzi na jej podatności do kształtowania w procesach przeróbki plastycznej poparto analizą przeprowadzoną według Fujiwary [104] – zarówno w postaci wyników badań składu chemicznego materiałów zamieszczonych w tabeli 9.2.3, jak i charakterystyk rozciągania walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP o czystości chemicznej 3N (tj. 99,9 % Cu) oraz prętów z miedzi beztlenowej o klasie czystości 6N (tj. 99,9999 % Cu) i 8N (tj. 99,999999 % Cu) zilustrowanych na rysunku 9.2.10. Ponadto na rysunku 9.2.11 ukazano także wyniki badań Fujiwary dotyczące statycznej próby rozciągania miedzi w gatunku Cu-OFE o czystości chemicznej 6N i 8N poddanej zabiegom obróbki cieplnej w zakresie temperatur 20 – 800 °C, a także obrazy przelomów próbek poddanych próbie jednoosiowego rozciągania oraz mikrostruktury materiałów (por. rys. 9.2.12). W dalszej części

omawianego podrozdziału dysertacji dokonano analizy wpływu zawartości tlenu na zdolność do odkształceń miedzi o klasie czystości 4N. W tym celu na rysunku 9.2.13 zilustrowano charakterystyki wpływu tlenu w miedzi na zespół jej właściwości fizycznych i technologicznych. Uzupełnienie tematyki stanowi ilustracja fragmentu układu równowagi miedź – tlen przedstawiona na rysunku 9.2.14 oraz jego analiza w oparciu o charakterystykę rodzajów tlenków miedzi zamieszczoną w tabeli 9.2.4 oraz obrazy ukazujące powierzchnie ziaren miedzi w gatunku Cu-ETP na rysunkach 9.2.15 – 9.2.18. Na kolejnych ilustracjach zobrazowano właściwości mechaniczne podczas statycznej próby rozciągania miedzi beztlenowej (OF – oxygen free) i miedzi nasyconej tlenem (OS – oxygen saturated) w funkcji temperatury według Nieha [108] – rysunek 9.2.19 oraz struktury materiałów po procesie pełzania – rysunek 9.2.20.

W ramach kolejnego podrozdziału pracy – 9.2.2 przeprowadzono badania laboratoryjne i analizę umacniania się drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead oraz Cu-ETP z linii Contirod w procesie ciągnięcia. W tym celu na rysunkach 9.2.21 – 9.2.29 zostały przedstawione krzywe zmian własności mechanicznych drutów uzyskanych z prętów i walcówek w funkcji odkształcenia rzeczywistego oraz ich interpretacja. Dane ilościowe do konstrukcji tych charakterystyk zamieszczono w aneksie w tabelach A9.2.1 i A9.2.2. W ramach niniejszego podrozdziału określono także parametry równań (9.2.1 – 9.2.4) opisujących w matematyczny sposób przebiegi zmian granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie w funkcji odkształcenia, które zamieszczono w tabelach 9.2.5 i 9.2.6. Kolejne ilustracje 9.2.30 – 9.2.43 ukazują obrazy mikrostruktur materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP do procesu ciągnięcia oraz otrzymane w wyniku jego realizacji druty o średnicach od 3,7 mm do 1,8 mm. Kontynuację analizy porównawczej stanu strukturalnego badanych materiałów stanowią zilustrowane na rysunkach 9.2.44 – 9.2.49 obrazy z mikroskopu skaningowego powierzchni przelomów po statycznej próbie rozciągania dla drutów o średnicy 0,5 mm z miedzi beztlenowej i tlenowej.

Tematyka podrozdziału 9.2.3 dotyczy analizy parametrów siłowych procesu ciągnięcia drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP. Zarejestrowane naprężenia ciągnięcia dla drutów otrzymanych z materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej z linii Upcast i Rautomead oraz tlenowej z linii Contirod zamieszczono w tabeli 9.2.7. Wyznaczone w pracy na podstawie równania 9.2.5 współczynniki wyężenia drutów skorelowane z zanotowanymi w procesie ciągnięcia wartościami naprężenia zilustrowano w postaci graficznej na wykresach na rysunku 9.2.50.

Kontynuację badań nad procesem umacniania się drutów z miedzi beztlenowej i tlenowej w procesie ciągnięcia stanowi tematyka następnego podrozdziału 9.2.4. Wraz z badaniami przeprowadzonymi i zaprezentowanymi w ramach kolejnej części 9.2.5 jest całościowym ujęciem wpływu parametrów procesu odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na umacnianie się drutów w procesie ciągnięcia. W szczególności pierwszy z nich – 9.2.4 jest analizą przeprowadzoną pod kątem prędkości odlewania, natomiast tematyka kolejnego podrozdziału 9.2.5 uwzględnia wpływ wydatku wody chłodzącej krystalizator podczas procesu ciągłego odlewania prętów o średnicach nominalnych 8,0 mm.

Obserwacje w ramach podrozdziału 9.2.4 rozpoczęto od zilustrowania na rysunkach 9.2.51 – 9.2.54 zależności granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  w funkcji odkształcenia rzeczywistego dla drutów otrzymanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz miedzi beztlenowej z procesu ciągłego odlewania, prowadzonego zarówno w warunkach laboratoryjnych na stanowisku DCC-AGH przy prędkościach 0,006 m/min.; 0,03 m/min.; 0,06 m/min.; 0,15 m/min.; 0,2 m/min., jak i przemysłowych zgodnie z technologią Rautomead i Upcast – gdzie szybkości procesu odlewania wynosiły 0,5 m/min.; 1,0 m/min.; 2,0 m/min.; 3,0 m/min. i 4,0 m/min. Dane ilościowe do konstrukcji wykresów przedstawionych na rysunkach od 9.2.51 do 9.2.54 zamieszczono w aneksie w tabelach A9.2.1 oraz A9.2.3 – A9.2.6. Przeprowadzona w dalszym etapie niniejszego podrozdziału analiza dotycząca zmiany prędkości odlewania prętów, a w związku z tym wpływu na właściwości mechaniczne drutów omówiona została na wytypowanych grupach materiałów tj. drutach uzyskanych z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE odlewanych metodą Upcast przy prędkościach od 1,0 m/min. do 4,0 m/min. oraz wydatku wody chłodzącej krystalizator w ilości od 40 l/min. do 60 l/min. W tym celu na rysunkach 9.2.55 – 9.2.66 zilustrowano charakterystyki zmian własności mechanicznych w funkcji odkształcenia rzeczywistego dla drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej z linii Upcast przy zmiennych prędkościach odlewania i stałym parametrze przepływu wody chłodzącej krystalizator

– tj. dla charakterystyk na rysunkach 9.2.55 – 9.2.58 w ilości 40 l/min., na rysunkach 9.2.59 – 9.2.62 – 50 l/min. oraz na ilustracjach od 9.2.63 do 9.2.66 dla wydatku 60 l/min. Dane liczbowe do konstrukcji wykresów zamieszczono w aneksie w tabelach A9.1.2 oraz A9.2.3 – A9.2.10. Analiza poparta została zilustrowanymi na rysunkach 9.2.67 – 9.2.81 obrazami mikrostruktur przekrojów wzdłużnych drutów o średnicach od 3,7 mm do 1,8 mm otrzymanych z prętów z miedzi beztlenowej z linii Upcast, dla których zastosowano szybkość odlewania na poziomie 3,0 m/min.; 2,0 m/min. i 1,0 m/min. oraz wydatek wody chłodzącej krystalizator w ilości 60 l/min.

W kolejnym z podrozdziałów, którego problematyka dotyczy wpływu ilości wody chłodzącej krystalizator w procesie ciągłego odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na umacnianie drutów w procesie ciągnięcia na rysunkach 9.2.82 – 9.2.97 zilustrowano krzywe umocnienia drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz Cu-OFE z linii Upcast przy stałej prędkości odlewania i zmiennym przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. W szczególności szybkość odlewania materiałów wsadowych, z których otrzymano druty o charakterystykach zilustrowanych na rysunkach 9.2.82 – 9.2.85 wynosiła odpowiednio: 1,0 m/min., 9.2.86 – 9.2.89 – 2,0 m/min., 9.2.90 – 9.2.93 – 3,0 m/min. oraz 9.2.94 – 9.2.97 – 4,0 m/min.

Podrozdział 9.2.6 dotyczy badań wpływu obróbki cieplnej materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na umacnianie się drutów w procesie ciągnięcia. Analizie poddano charakterystyki zmian własności wytrzymałościowych drutów zilustrowane na rysunkach 9.2.98 i 9.2.99 jako zależności granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie od odkształcenia rzeczywistego. Dane liczbowe do ich konstrukcji zamieszczono w aneksie w tabelach A9.2.11 i A9.2.12. Z kolei wykresy wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  w funkcji odkształcenia rzeczywistego dla drutów uzyskanych z prętów z miedzi beztlenowej i walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP wygrzewanych w temperaturach 100 °C, 400 °C i 900 °C przedstawiono na rysunkach 9.2.100 i 9.2.101.

Tematyka kolejnego z podrozdziałów – 9.2.7 dotyczy analizy procesu ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na druty i mikrodruty w warunkach przemysłowych. Omówiona zrealizowana w Zakładzie Produkcji Przewodów Elektrycznych Eltrim technologiczna próba wytworzenia drutów o finalnych średnicach 0,4 mm stosowanych jako żyły klasy 5 poparta została zamieszczonymi w tabelach 9.2.8 i 9.2.9 własnościami mechanicznymi i elektrycznymi materiałów o średnicach 1,7 mm i 0,4 mm otrzymanych w procesie ciągnięcia walcówki i pręta. Z kolei na ilustracjach 9.2.102 – 9.2.107 przedstawiono obrazy przełomów drutów po statycznej próbie rozciągania. W dalszej części niniejszego podrozdziału omówiono drugą z prób technologicznych przeprowadzoną w zakładzie kablowym Tele-Fonika, która polegała na realizacji procesu przetwórstwa na zimno pręta z miedzi beztlenowej otrzymanego w procesie Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. i wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min. na średnicę finalną 1,4 mm. Dlatego też w tabeli 9.2.10 ukazano charakterystykę własności otrzymanego materiału. Trzecią próbą technologiczną zrealizowaną w warunkach przemysłowych w ramach pracy był proces ciągnięcia prowadzony w zakładzie przetwórczym Mennica Metale Szlachetne. W tym przypadku zabiegom ciągnięcia poddano materiały wsadowe o średnicy nominalnej 8,0 mm w postaci walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz prętów z miedzi beztlenowej wytworzonych zarówno w warunkach przemysłowych metodą Upcast przy dwóch skrajnych prędkościach odlewania tj. 4,0 m/min. i 0,5 m/min., dla których wydatek wody chłodzącej krystalizator wynosił 60 l/min., a także w warunkach laboratoryjnych na stanowisku DCC-AGH z szybkością 0,006 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej na poziomie 0,1 l/min. w układzie pierwotnym i 0,2 l/min. w układzie wtórnym. Na rysunkach 9.2.108 i 9.2.109 zilustrowano wykresy własności mechanicznych otrzymanych mikrodrutów o średnicach 0,08 mm. W tabelach 9.2.11 i 9.2.12 dokonano analizy mikrostruktur przekrojów poprzecznych i wzdłużnych mikrodrutów o średnicach 0,06 mm i 0,03 mm w oparciu o obrazy pochodzące ze skaningowego mikroskopu jonowego. Zastosowane w procesach ciągnięcia w warunkach przemysłowych schematy odkształcenia w układach wielociągowych zamieszczono w aneksie w tabelach A9.2.13 – A9.2.15.

Całość rozdziału 9.2 kończy podsumowanie zamieszczone w podrozdziale 9.2.8 jako całościowa analiza i przedstawione na jej podstawie najważniejsze wnioski płynące z badań doświadczalnych nad procesem ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych.

### 9.2.1. Analiza wpływu składu chemicznego miedzi na podatność do przetwórstwa w procesach przeróbki plastycznej na zimno

Na podstawie informacji zamieszczonych w poprzednim podrozdziale pracy (por. 9.1 pt.: „Identyfikacja własności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych) stwierdzono, że wysoka czystość chemiczna miedzi istotnie wpływa na poprawę szeregu jej właściwości takich jak np. przewodność elektryczna lub własności plastyczne. Dlatego też, w zależności od klasy czystości, materiał ten znajduje powszechne zastosowanie w aplikacjach elektronicznych i elektrotechnicznych o standardowych i ponadstandardowych wymaganiach. W tabeli 9.2.1 zamieszczono zawartości domieszek w miedzi wysokiej czystości chemicznej według Fujiwary.

Tabela 9.2.1. Stężenie domieszek w różnych gatunkach miedzi wysokiej czystości chemicznej wg Fujiwary [95]

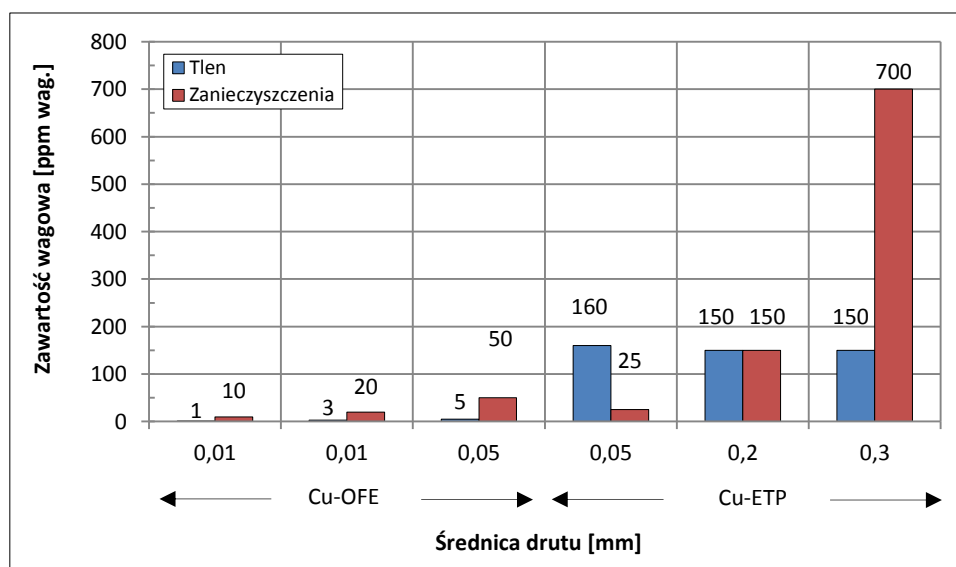
Oznaczenie materiału	Zawartość wagowa pierwiastków [ppm wag.]					
	S	Ag	Al	Si	Fe	Sumaryczna zawartość
4N (99,99 % Cu)	9,9	11	0,95	4,7	1,0	27,55
5N (99,999 % Cu)	1,2	0,11	0,37	0,93	0,03	2,64
6N (99,9999 % Cu)	0,01	0,05	0,06	0,23	0,02	0,37
7N (99,99999 % Cu)	< 0,01	0,03	< 0,01	0,02	0,01	0,05
8N (99,999999 % Cu)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Miedź o najwyższej klasie czystości chemicznej 7N i 8N – o zawartościach wagowych pierwiastków przedstawionych w tabeli 9.2.1 znajduje zastosowanie w wysokozaawansowanych aplikacjach takich jak np. kriotechnika, w której wykorzystuje się fakt, iż oporność elektryczna materiału o tej klasie czystości w niskich temperaturach (np. ciekłego helu – 4.2 K) jest około  $10^2$  razy mniejsza od oporności miedzi 4N w tych samych warunkach. Miedź 4N (t. 99,99 % Cu) znajduje natomiast zastosowanie w aplikacjach elektrotechnicznych, od których nie wymaga się tak rygorystycznych właściwości. Poniżej w tabeli 9.2.2 zamieszczono analizę porównawczą powszechnie stosowanych materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-FRHC, Cu-ETP i Cu-OFE do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane na cele elektryczne [4, 95, 96].

Tabela 9.2.2. Charakterystyka porównawcza własności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-FRHC, Cu-ETP i Cu-OFE do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych [4, 95, 96]

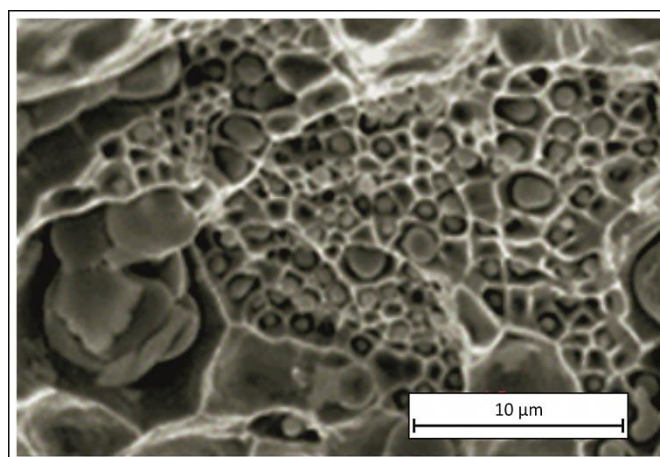
Charakterystyka materiału		Cu-FRHC	Cu-ETP		Cu-OFE		
Linia technologiczna		Continuus Properzi – La Farga Lacambra	-	Contirod, Southwire, Continuus Properzi	-	Upcast, Rautomead	Ohno
Skład chemiczny Cu + Ag	[%]	99,89 – 99,92	99,95 – 99,97	99,98	99,99	99,99	99,999
Zawartość wagowa pierwiastków	[ppm wag.]	700	150	25	50	20	10
Zawartość wagowa tlenu	[ppm wag.]	150 - 400	150 - 400	160 - 200	< 5	< 3	1
Wytrzymałość na rozciąganie	[MPa]	230 – 240	220 – 240	220	180 – 200	180	160
Wydłużenie względne $A_{250}$	[%]	35 - 40	40 – 45	45 – 50	35 – 55	35 – 50	50
Przewodność elektryczna	[MS/m]	58,00 – 58,58	58,58 – 59,16	58,58 – 59,16	58,58 – 59,16	58,58 – 59,16	> 59,16
	[%IACS]	100 – 101	101 – 102	101 – 102	101 – 102	101 – 102	> 102
Ciągliwość	[mm]	0,3	0,2	0,05	0,05	0,01	0,01

Analiza porównawcza powyższych materiałów wskazuje na fakt, iż spośród stosowanej aktualnie na świecie miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP jako materiału wsadowego do procesu ciągnięcia na druty wykorzystuje się jej odmiany o klasie czystości rzędu 4N i wyższej. Tak wysoka czystość chemiczna, która jest uzyskiwana głównie poprzez ograniczenie zawartości zanieczyszczeń oraz niemal całkowitą eliminację zawartości tlenu w materiale umożliwia jego przetwórstwo na mikrodruty o średnicach do 30  $\mu\text{m}$  i mniejszych. Warto w tym celu przeanalizować wykresy na rysunku 9.2.3 przedstawiające ilustrację graficzną danych z tabeli 9.2.2. Są to charakterystyki zależności pomiędzy średnicami drutów możliwych do uzyskania w procesach przeróbki plastycznej na zimno w warunkach przemysłowych, a sumaryczną zawartością zanieczyszczeń w materiałach wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP.



Rys. 9.2.3. Zakres możliwych do uzyskania na skalę przemysłową średnic drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP w zależności od sumarycznej zawartości wagowej pierwiastków i tlenu wg danych z tabeli 9.2.2

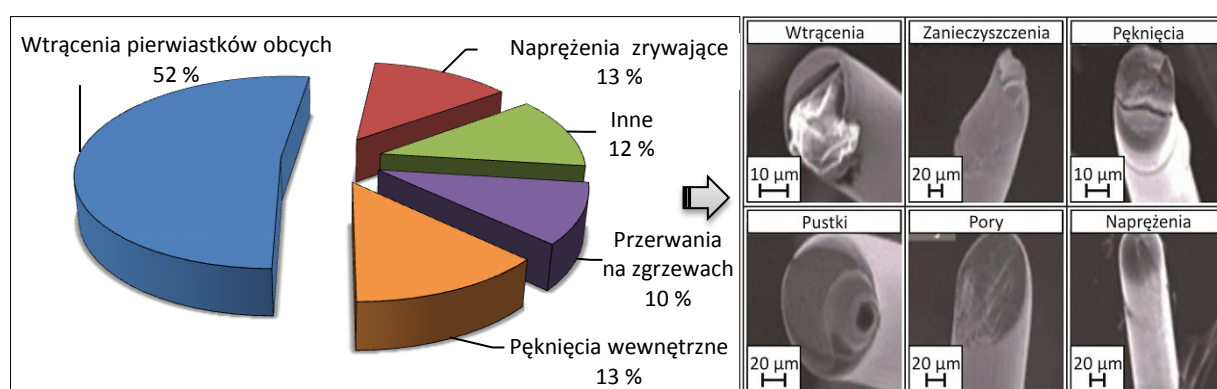
Na podstawie analizy powyższych wykresów zauważono, że spadek sumarycznej zawartości zanieczyszczeń przy takiej samej zawartości tlenu prowadzi do przesunięcia się progu ciągliwości miedzi z poziomu 0,3 mm do 0,2 mm, a więc niemal 2-krotnie. Dalsze ograniczenie zawartości zanieczyszczeń i tlenu lokuje już próg ciągniczy na poziomie średnic drutów wynoszących około 0,05 mm. Zatem uzyskanie drutów o średnicach kilkudziesięciu, a nawet kilku mikrometrów jest możliwe jedynie poprzez całkowitą eliminację ze składu chemicznego tlenu. Potwierdzenie tych wniosków stanowią obrazy z mikroskopu skaningowego przełomów materiałów wsadowych, zarówno z miedzi w gatunku Cu-FRHC na rysunku 9.2.4, jak i walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz pręta z miedzi beztlenowej zilustrowane w poprzednim podrozdziale pracy (por. rys. 9.1.57 i 9.1.58).



Rys. 9.2.4. Powierzchnia przełomu walcówki z miedzi w gatunku Cu-FRHC z linii Continuus Properzi – La Farga Lacambra. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 3000$

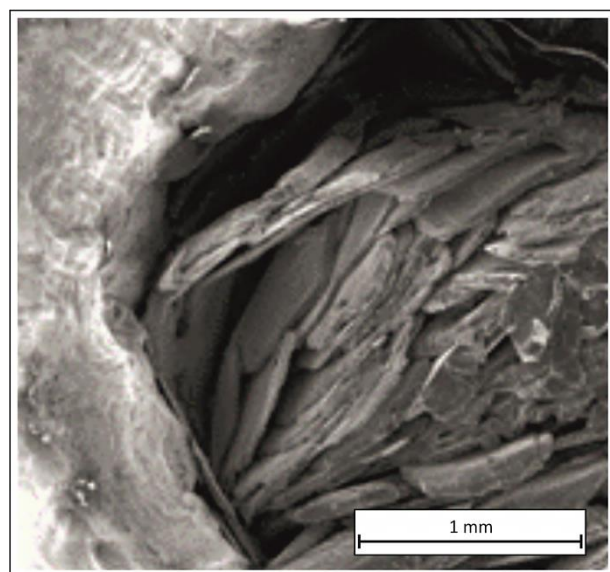
Dokonując analizy porównawczej pomiędzy badanymi materiałami wsadowymi przeznaczonymi do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty zauważa się istotne zróżnicowanie ilości wydzielań, które w przypadku walcówki z miedzi rafinowanej ogniowo w gatunku Cu-FRHC występują w dużych ilościach na przelomie. Ich wielkość kształtuje się na poziomie od 1  $\mu\text{m}$  do nawet około 10  $\mu\text{m}$ , co eliminuje walcówkę z miedzi w gatunku Cu-FRHC jako materiał wsadowy do produkcji mikrodrutów. Także w przypadku omawianej wcześniej (por. podrozdział 9.1.2.1) miedzi w gatunku Cu-ETP zaobserwowano wtrącenia w całej objętości przelomu o maksymalnej wielkości około 5  $\mu\text{m}$ . Natomiast pręty z miedzi beztlenowej charakteryzują się jedynie plastycznymi, rozwiniętymi powierzchniami pozbawionymi jakichkolwiek wydzielań i wtrąceń. Tylko taki materiał wsadowy gwarantuje znakomitą ciągliwość, w szczególności w przeznaczeniu na mikrodruty.

Problem składu chemicznego miedzi stosowanej do procesu ciągnięcia na druty, zarówno pod kątem ilości, jak i rodzaju zanieczyszczeń jest rzeczywistym problemem występującym w praktyce przemysłowej. W wyniku prowadzonych analiz dotyczących problematyki wad ciągniczych stwierdzono, iż najczęściej występującą przyczyną jest czynnik materiałowy [97 – 103]. Na rysunku 9.2.5 w sposób schematyczny zilustrowano analizę najczęściej obserwowanych przyczyn zerwań drutów w procesie ciągnięcia przeprowadzoną przez japońskich naukowców [97].

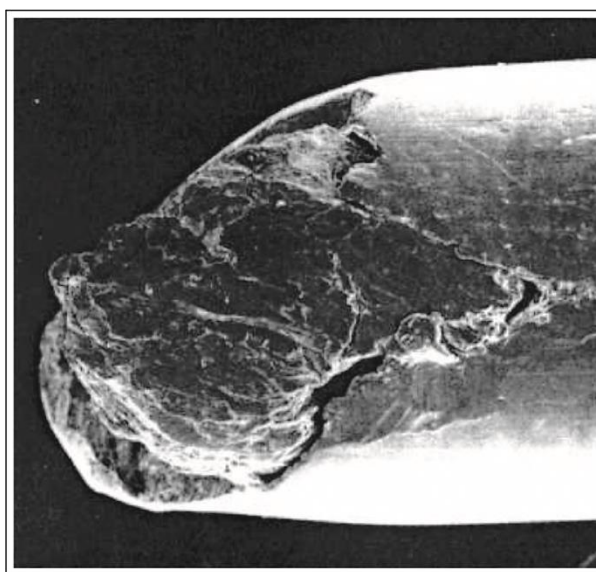


Rys. 9.2.5. Przykłady najczęściej występujących przyczyn zerwań drutów w procesie ciągnięcia [97]

Na podstawie analizy powyższego wykresu stwierdzono, iż najczęściej występującą wadą materiałową są wtrącenia pierwiastków obcych (52 %). Przykłady różnych ujawnionych w procesie ciągnięcia ciągniczych wad drutów z miedzi mających swe źródło w jakości materiału wsadowego przedstawiono na rysunkach 9.2.6 – 9.2.9.

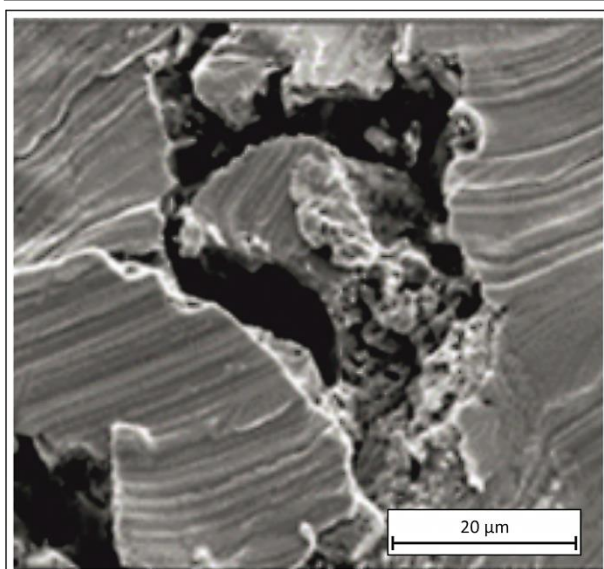


Rys. 9.2.6. Przykład złomu ciągniczego - wtrącenia węgla w drucie miedzianym. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 35$

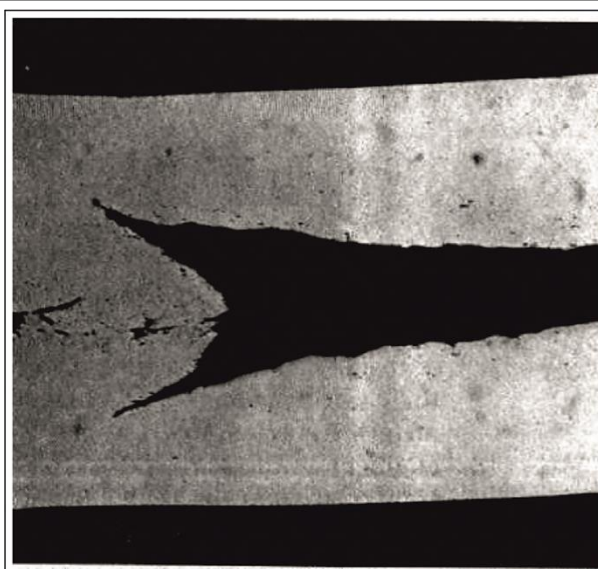


Rys. 9.2.7. Przykład złomu ciągniczego - wtrącenia żelaza w drucie miedzianym. Mikroskop skaningowy powiększenie  $\times 100$  [102]





Rys. 9.2.8. Przykład złomu ciągnicznego - obecność podpowierzchniowej warstwy kruchych tlenków miedzi w drucie miedzianym. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 1500$



Rys. 9.2.9. Przykład złomu ciągnicznego - obecność podpowierzchniowej warstwy kruchych tlenków miedzi w drucie miedzianym. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 400$  [102]

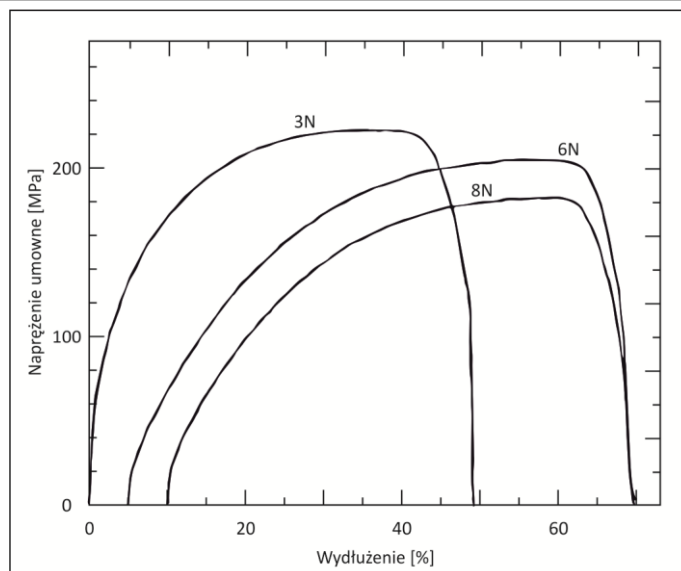
Rozważając w dalszym ciągu wpływ poziomu zanieczyszczeń w miedzi na jej podatność do kształtowania w procesach przeróbki plastycznej, należy wziąć pod uwagę fakt, iż w przypadku miedzi wysokiej czystości niewielkie różnice w składzie chemicznym na poziomie pojedynczych ppm decydować mogą istotnie o plastyczności i charakterze umacniania się materiału. Przykład takiej analizy przeprowadzonej przez autorów pracy [104] przedstawiono poniżej. Do badań wykorzystano trzy rodzaje materiałów o zróżnicowanej klasie czystości tj. Cu – 3N, Cu – 6N i Cu – 8N. W tabeli 9.2.3 zamieszczono składy chemiczne badanych próbek.

Tabela 9.2.3. Skład chemiczny materiałów wykorzystanych do badań wg Fujiwary [104]

Materiał	Zawartość wagowa pierwiastków [ppm wag.]																					
	Ag	Al	As	Bi	C	Cd	Co	Cr	Fe	H	Mn	N	Ni	O	P	Pb	S	Sb	Si	Sn	Ti	Zn
3N - Cu	15	0,006	0,40	0,069	<1	<0,005	0,30	0,009	5,5	0,22	0,19	<1	2,2	240	0,51	1,4	4,6	0,43	0,021	10	<0,005	0,28
4N - Cu	0,32	0,14	<0,01	<0,001	<1	<0,01	0,001	0,12	0,35	0,10	0,006	<1	0,063	0,8	0,012	<0,002	0,014	<0,005	0,068	<0,01	0,020	<0,005
5N - Cu	0,011	0,003	<0,01	<0,001	<1	<0,01	<0,001	<0,002	0,002	0,03	<0,002	<1	<0,002	<0,1	<0,005	<0,002	0,015	<0,005	0,023	<0,01	0,004	<0,005

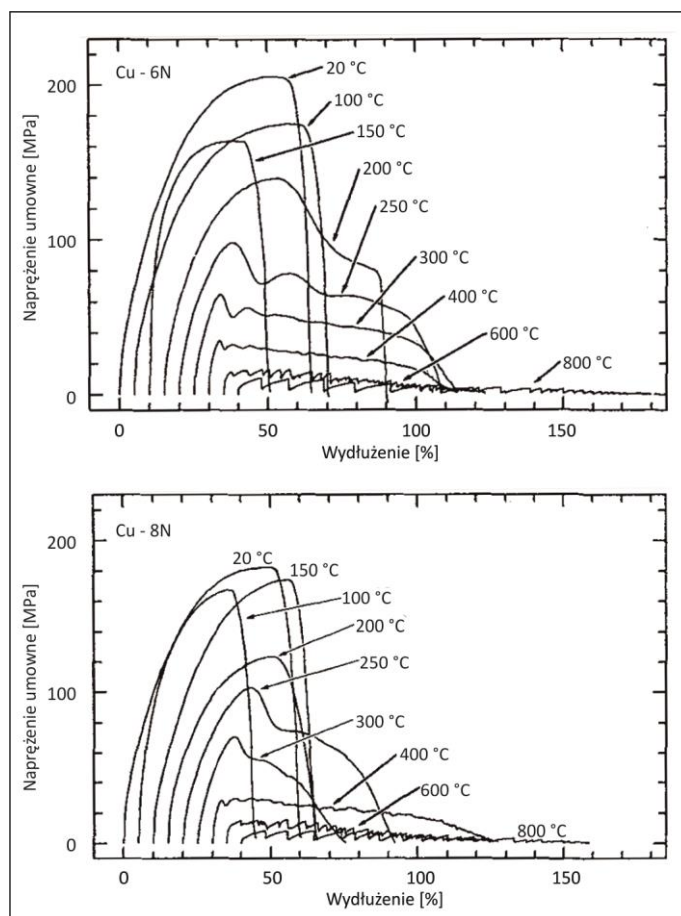
Na podstawie szczegółowej analizy rozkładów pierwiastków w materiałach stwierdzono, iż miedź o klasie czystości chemicznej rzędu 3N to materiał tlenowy (zawartość tlenu wynosi 240 ppm wag.) o sumarycznej zawartości zanieczyszczeń na poziomie 43 ppm wag. Z kolei miedź 6N zawiera już tylko 0,398 ppm wag. zanieczyszczeń, a miedź 8N – 0,0224 ppm wag. Różnica w sumarycznej zawartości zanieczyszczeń łącznie z tlenem wpływa na zróżnicowanie plastyczności i charakteru umacniania się badanych materiałów. Powyższe stwierdzenie ilustruje rysunek 9.2.10, który przedstawia charakterystyki rozciągania miedzi o średnicy nominalnej 8 mm, o różnej czystości chemicznej.

Zaobserwowano, że wraz ze wzrostem czystości chemicznej materiału maleje umowna granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie, przy czym jednocześnie wzrasta jego plastyczność. Fujiwara i współautorzy pracy [104] odnotowali także istotny wzrost przewężenia próbki w chwili zerwania wraz ze wzrostem czystości chemicznej począwszy od 83 % dla miedzi 3N do 96 % dla miedzi 8N. Co ciekawe miedź o wyższej czystości chemicznej (6N, 8N) posiada jak należało się tego spodziewać większe wydłużenie przy zerwaniu w porównaniu z miedzią 3N. Odnotowaną nieco niższą wartość wydłużenia dla miedzi o klasie czystości 8N, w porównaniu do materiału 6N autorzy tłumaczą różnicą w startowej wielkości ziaren. W oparciu o analizę rysunku 9.2.10 zaobserwowano, że o zróżnicowaniu w wydłużeniu całkowitym decyduje głównie wartość wydłużenia równomiernego, zaś wydłużenie szyjki jest w analizowanych próbkach na podobnym poziomie.

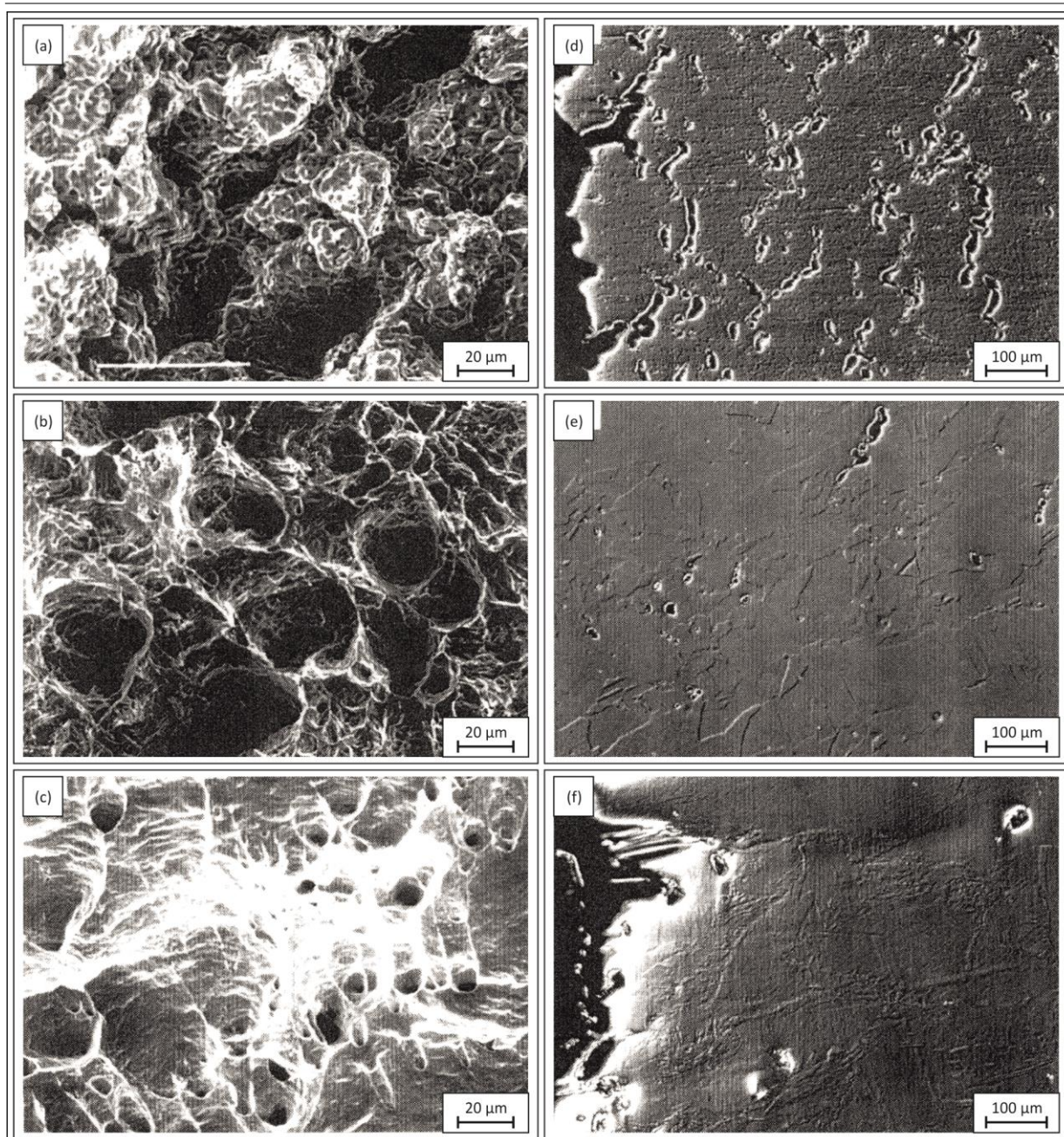


Rys. 9.2.10. Charakterystyki rozciągania walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP o czystości chemicznej 3N oraz prętów z miedzi beztlenuj o czystości chemicznej 6N i 8N wg Fujiwary [104]

Poziom przewężenia jest mocno zależny od czystości chemicznej i temperatury testu. Autorzy publikacji zauważyli ponadto, że zmniejsza się on wraz z temperaturą dla materiału o klasie czystości 6N i wykazuje lokalne minimum w temperaturze około 20 °C. Z kolei dla miedzi o klasie czystości 8N jest prawie stałe w zakresie temperatury od 20 °C do około 800 °C, co ilustrują wykresy na rysunku 9.2.11. Natomiast na rysunku 9.2.12 przedstawiono wyniki obserwacji przełomów i struktur badanych przez Fujiwarę materiałów.



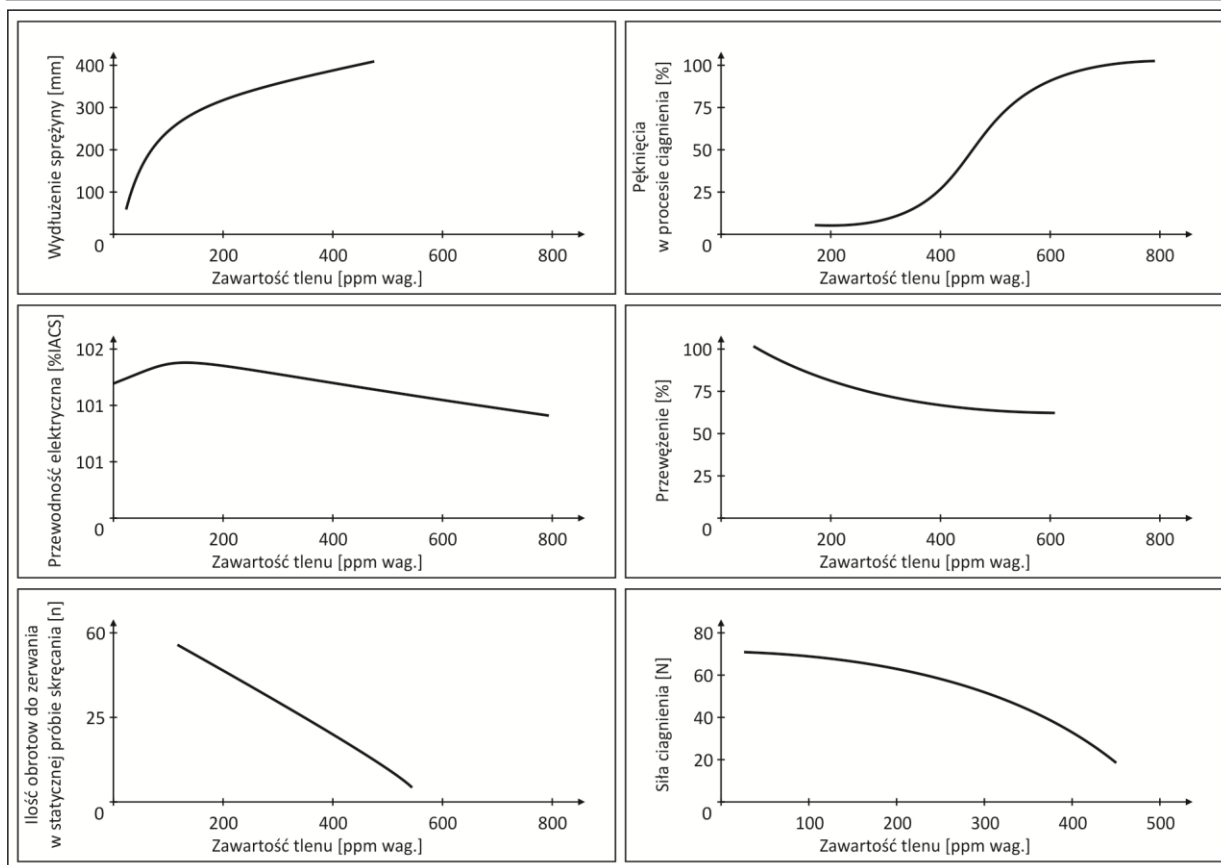
Rys. 9.2.11. Charakterystyki rozciągania prętów z miedzi beztlenuj o klasie czystości 6N (w górnej części rysunku) i 8N (w dolnej części rysunku) w temperaturach z zakresu 20 – 800 °C wg Fujiwary [104]



Rys. 9.2.12. Powierzchnie przelomów próbek poddanych jednoosiowemu rozciąganiu oraz mikrostruktury dla miedzi o czystości 3N, 6N, 8N: a, d – 600 °C, 3N; b, e – 200 °C, 6N; c, f – 150 °C, 8N wg Fujiwary [104]

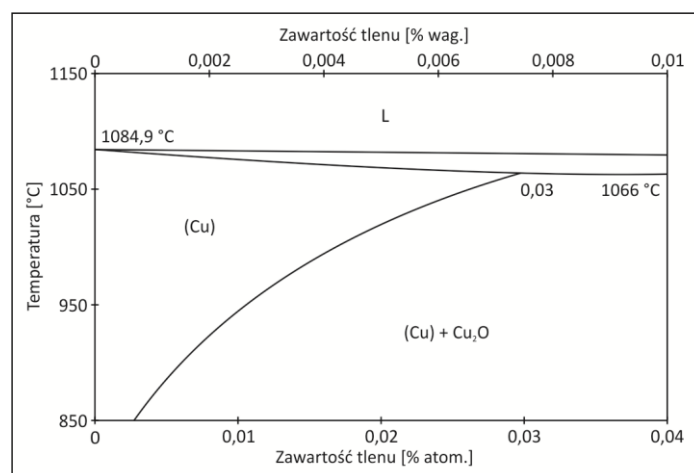
Analizując wpływ składu chemicznego miedzi na jej odkształcalność, osobnej analizy wymaga określenie wpływu zawartości tlenu. Na podstawie ogólnej wiedzy można stwierdzić, iż korzystne działanie dodatku tlenu w miedzi jest ściśle uzależnione od stopnia czystości materiału. W przypadku miedzi o sumarycznej zawartości zanieczyszczeń na poziomie powyżej 20 ppm zawartość tlenu wpływa w sposób pozytywny, ponieważ wiąże pierwiastki zanieczyszczeń w wydzielenia. Z kolei w przypadku materiału o klasie czystości 5N i wyższej obecność tlenu, który występuje w postaci tlenków jest wysoce niepożądana. Na rysunku 9.2.13 przedstawiono schematyczną analizę wpływu zawartości tlenu w miedzi o klasie czystości 4N na zespół jej właściwości fizycznych i technologicznych.

Na podstawie analizy danych zilustrowanych na rysunku 9.2.13 stwierdzono, że wzrost zawartości tlenu w miedzi o czystości chemicznej na poziomie 3N i 4N korzystnie wpływa na poprawę własności plastycznych, zmniejszenia efektu przewężenia i obniżenie siły ciągnięcia. Zawartość tlenu do poziomu 400 ppm wag. istotnie poprawia przede wszystkim przewodność elektryczną, a także wynik testu wyżarzalności (TWS). Niepożądanym działaniem wzrostu zawartości tlenu w miedzi jest natomiast wzrost skłonności materiału do pęknięcia i podatność na kruchość wodorową.



Rys. 9.2.13. Charakterystyki wpływu zawartości tlenu na własności fizyczne i technologiczne miedzi o klasie czystości 4N (tj. 99,99 % Cu) [66]

Tlen do miedzi dodawany jest celowo podczas procesu topienia i odlewania. Typowa zawartość tlenu w materiale w gatunku Cu-ETP wynosi od około 200 ppm wag. do 600 ppm wag. (por. tabela A9.1.5 – 190 ppm wag. dla użytej do badań w ramach dysertacji walcówki z Huty Miedzi Cedynia). Graniczna rozpuszczalność tlenu w miedzi w stanie stałym w temperaturze 1065 °C jest ograniczona i wynosi zaledwie 0,0035 % atomowego. Zgodnie z analizą diagramu przedstawionego na rysunku 9.2.14 miedź tworzy z tlenem układ monotektyczny, w którym występuje eutektyka Cu – Cu<sub>2</sub>O w temperaturze 1065 °C, przy zawartości tlenu 0,39 %. Z analizy układu Cu – O wynika także, że wraz z obniżeniem temperatury następuje istotne zmniejszenie rozpuszczalności tlenu w miedzi, wynoszące w temperaturze 600 °C poniżej 0,001 % atomowego (por. rys. 9.2.14). Podczas szybkiego chłodzenia miedzi o zawartości do 0,0035 % atomowych tlenu tworzy się jednofazowy przesycony roztwór α tlenu w miedzi. Dla wyższych zawartości tlenu – powyżej 0,0035 % atomowych pojawia się eutektyka Cu – Cu<sub>2</sub>O.



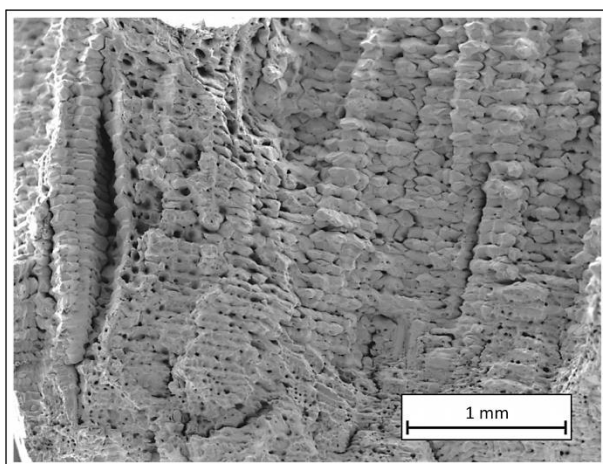
Rys. 9.2.14. Fragment układu równowagi miedź – tlen [4]

Do temperatury 380 °C tworzy się związek CuO, natomiast powyżej 380 °C – Cu<sub>2</sub>O. W tabeli 9.2.4 zamieszczono właściwości tlenków miedzi [105 – 107].

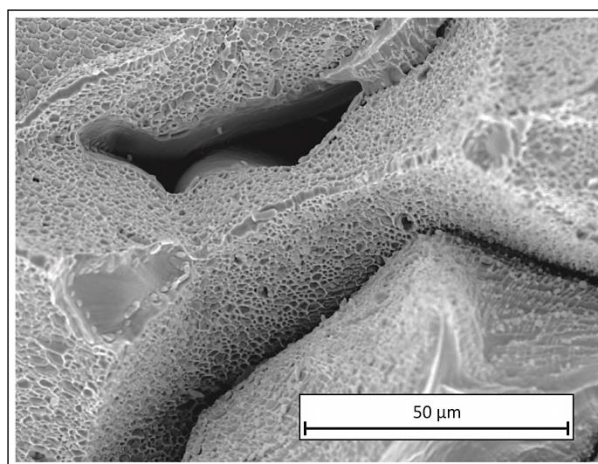
Tabela 9.2.4. Rodzaje tlenków miedzi i ich charakterystyka [105 – 107]

Faza	Zawartość tlenu	Struktura	Parametry sieci krystalicznej			Twardość	Gęstość	Temperatura topnienia
[-]	[% at.]	[-]	a [μm]	b [μm]	c [μm]	[skala Mohsa]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[°C]
Cu <sub>2</sub> O	33,3	kubiczna	0,4259	-	-	3,56	6,00	1235
Cu <sub>4</sub> O <sub>3</sub>	42,9	tetragonalna	0,5837	-	0,9932	3,36	6,00	-
CuO	50,0	-	0,4679	0,3426	0,5127	3,30	-	-

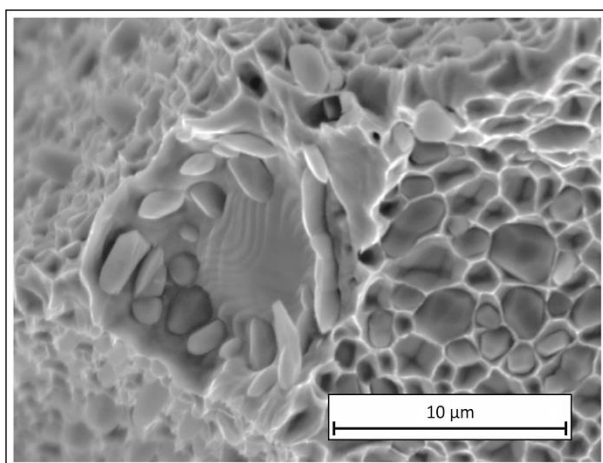
Na rysunkach 9.2.15 – 9.2.18 zilustrowano natomiast zdjęcia z mikroskopu skaningowego powierzchni przelomów wlewków z miedzi w gatunku Cu-ETP, na których widoczne są charakterystyczne tlenki Cu<sub>2</sub>O lokujące się na powierzchniach ziaren. Krystalizują one podczas przemiany eutektycznej w procesie krzepnięcia miedzi.



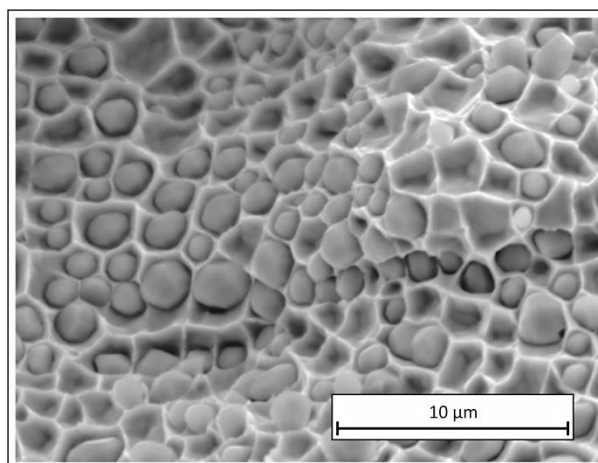
Rys. 9.2.15. Powierzchnia przelomu wlewka z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop skaningowy, powiększenie × 30



Rys. 9.2.16. Powierzchnia przelomu wlewka z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop skaningowy, powiększenie × 1000



Rys. 9.2.17. Powierzchnia przelomu wlewka z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop skaningowy, powiększenie × 4500

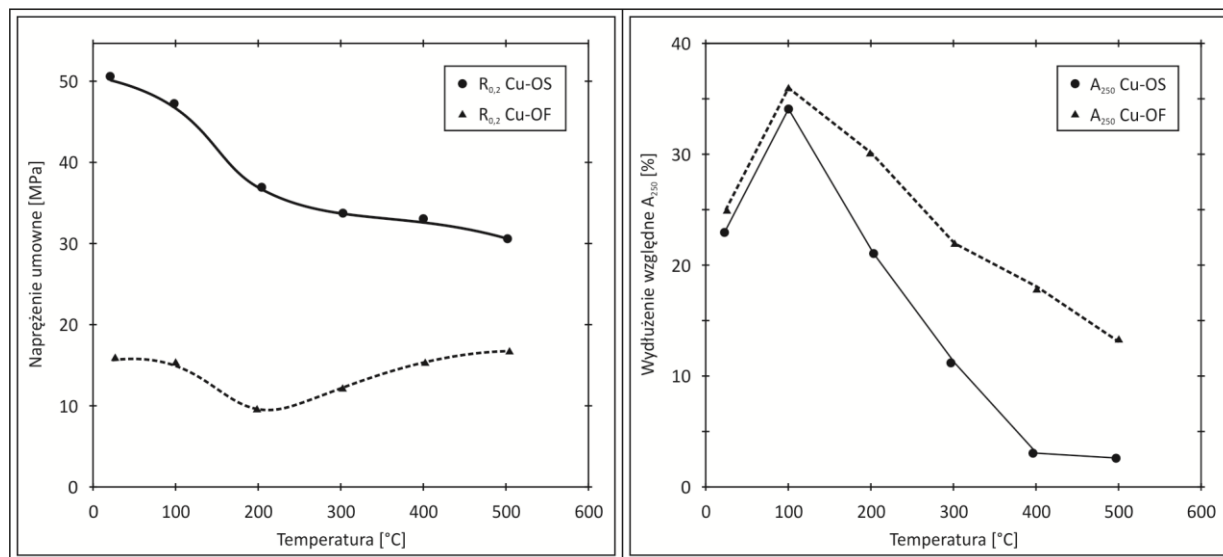


Rys. 9.2.18. Powierzchnia przelomu wlewka z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop skaningowy, powiększenie × 4500

Podobnie jak nadmieniono w poprzednim rozdziale pracy i teraz – na podstawie analizy powyższych zdjęć obserwuje się, iż tlenki miedzi są dużymi wydzieleniami, których wielkość wynosić może około kilku mikrometrów.

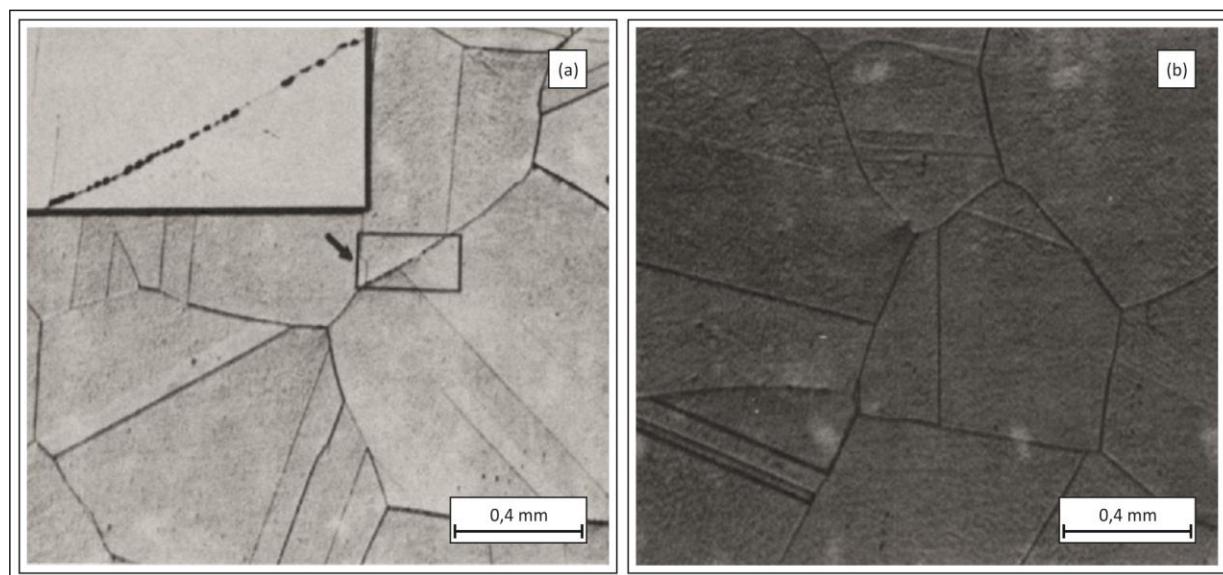
Obecność tlenu w osnowie wpływa na kształtowanie się własności wytrzymałościowych materiału. Pomimo skłonności do segregacji do granicy ziaren, tlen umacnia roztworowo materiał, co

przekłada się na istotne podwyższenie granicy plastyczności (nawet dwukrotne), lecz równocześnie powoduje obniżenie plastyczności, zwłaszcza w podwyższonych temperaturach. Przykłady wyników badań obrazujących opisany powyżej efekt zilustrowano w postaci graficznej na rysunku 9.2.19 [108].



Rys. 9.2.19. Właściwości mechaniczne podczas statycznej próby rozciągania dla miedzi beztlenowej (OF – oxygen free) i miedzi nasyconej tlenem (OS – oxygen saturated, nasycenie przeprowadzono przez wygrzewanie miedzi beztlenowej w atmosferze tlenu w temperaturze 800 °C w czasie 2 godzin) w funkcji temperatury wg Nieha [108]

Przeprowadzone w temperaturze 500 °C próby pełzania umożliwiające lepszą analizę pęknięcia materiałów ujawniły dla miedzi tlenowej występowanie licznych pustek na granicach ziaren (por. rys. 9.2.20), które utożsamiane są z segregacją tlenu. Z kolei miedź beztlenowa zachowała pełną spójność materiału.



Rys. 9.2.20. Struktura miedzi po procesie pełzania w temperaturze 500 °C przy naprężeniu 20 MPa do uzyskania odkształcenia 0,5 % dla miedzi: a – nasyconej tlenem (OS), b – (OF) wg Nieha [108]

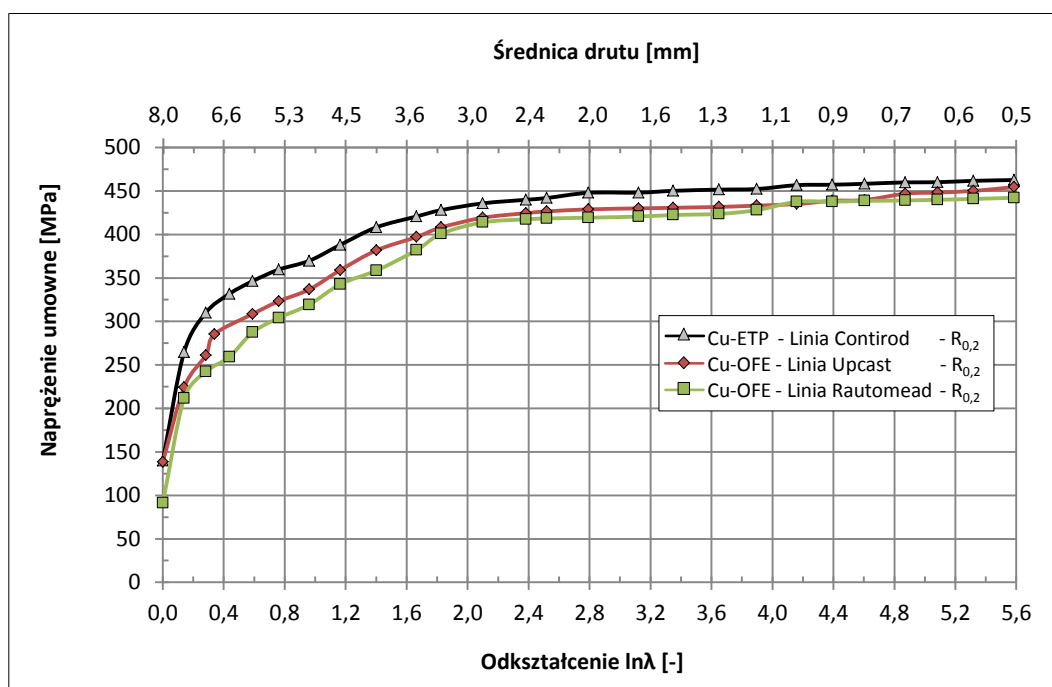
Należy nadmienić, że zawartość tlenu może obniżać temperaturę rekrytalizacji materiału wiążąc zanieczyszczenia do postaci tlenkowej i wyprowadzając je z roztworu. W zależności od warunków obróbki cieplno-mechanicznej część tlenu może się rozpuszczać w miedzi lub przechodzić do wydzielen. Przyjmuje się powszechnie, że wtrącenia tlenków miedzi mogą ułatwiać powstawanie jednorodnej i drobnoziarnistej struktury podczas rekrytalizacji. Równocześnie w bardzo wysokich temperaturach, kiedy dochodzi do wtórnej rekrytalizacji tlen rozpuszczony przekłada się na

nierównomierny rozrost ziaren.

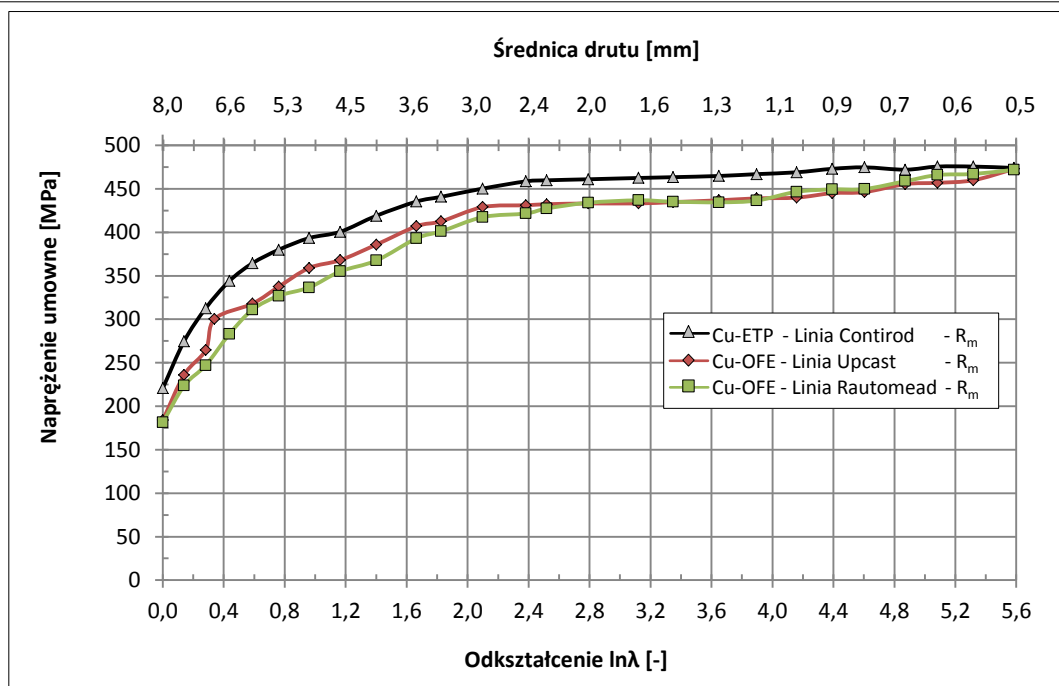
Na podstawie przeprowadzonych wstępnych teoretycznych analiz na temat wpływu tlenu w miedzi na własności mechaniczne i podatność do odkształcenia w procesach przeróbki plastycznej można stwierdzić, iż brak tlenu w miedzi istotnie wpływa na zmianę ww. właściwości, które dodatkowo zależą od metody wytwarzania. W przypadku procesu Contirod uzyskuje się walcówkę, a więc materiał po procesie głębokiego przetwórstwa plastycznego na gorąco, podczas gdy miedź beztlenuowa to klasyczny odlew. Zatem stosując walcówkę z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręt z miedzi beztlenuowej jako materiały wsadowe do procesu ciągnięcia należy zaznaczyć, iż są to dwa różne materiały z punktu widzenia składu chemicznego, struktury, stanu energetycznego oraz podatności do ciągnięcia. W ramach kolejnego podrozdziału niniejszej pracy – 9.2.2 przedstawiono szczegółową analizę charakterystyk umacniania się drutów otrzymanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP. W szczególności obserwacjom poddano technologiczne krzywe umocnienia ilustrujące zmiany granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia równomiernego oraz wydłużenia względnego  $A_{250}$  drutów.

### 9.2.2. Analiza umacniania się drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP w procesie ciągnięcia

Analiza badań umacniania się drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP w procesie ciągnięcia rozpoczęta została od zilustrowania na rysunkach 9.2.21 i 9.2.22 oraz 9.2.24 i 9.2.25 technologicznych krzywych umocnienia. Są to charakterystyki zmian własności wytrzymałościowych i plastycznych drutów o średnicach od 7,5 mm do 0,5 mm uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii technologicznej Upcast i Rautomead oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego. W dalszym etapie pracy materiały te zostały poddane badaniom na odporność cieplną. Wyniki badań i analiz odporności cieplnej drutów szacowane na podstawie testów jednogodzinnego wygrzewania stanowią przedmiot kolejnego podrozdziału pracy – 9.3. Dla ułatwienia analizy charakterystyk przedstawionych na rysunkach 9.2.21 – 9.2.25 przyjęto dwie osie odciętych: dolną liniową określającą odkształcenie logarytmiczne i górną (nieliniową) określającą średnice drutów. Dane liczbowe do konstrukcji wykresów zamieszczono w aneksie w tabeli A9.2.1.



Rys. 9.2.21. Granica plastyczności drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead po procesie ciągłego odlewania z prędkością 4,0 m/min. i przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



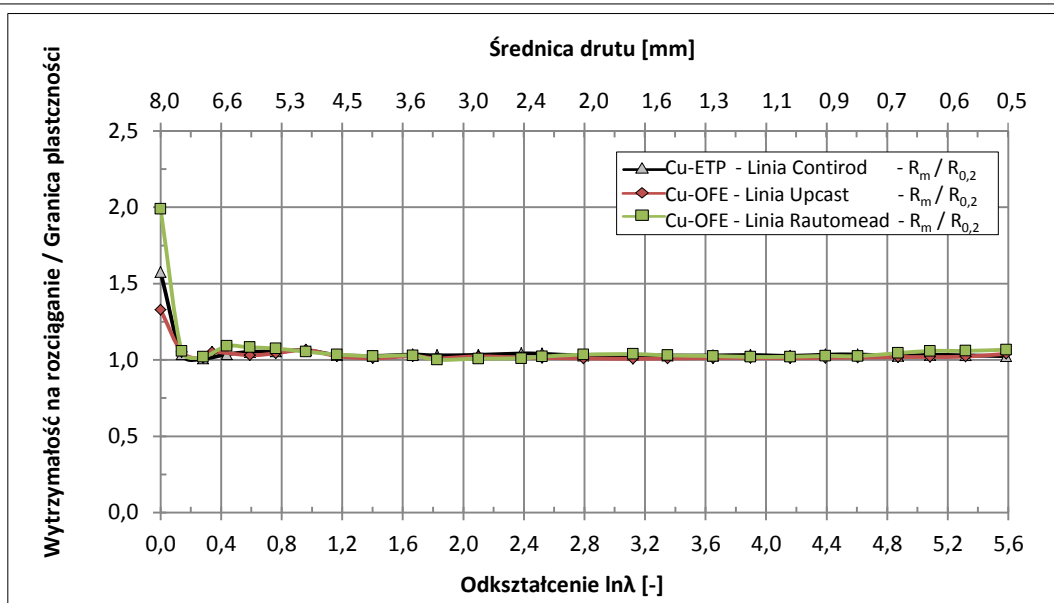
Rys. 9.2.22. Wytrzymałość na rozciąganie drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead po procesie ciągłego odlewania z prędkością 4,0 m/min. i przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego

Na podstawie przedstawionych wykresów zależności naprężenia umownego od odkształcenia rzeczywistego zaobserwowano zróżnicowanie w przebiegu umocnienia dla miedzi w gatunku Cu-ETP, w stosunku do miedzi beztlenowej. Wartości wytrzymałości na rozciąganie materiałów wsadowych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty kształtują się na poziomie około 220 MPa dla walcówki i 180 MPa dla odlewów. Podczas pierwszych ciągów wartość wytrzymałości na rozciąganie, a także granicy plastyczności rośnie w sposób bardziej gwałtowny i stabilizuje się przy mniejszym odkształceniu w przypadku drutów otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP. Ostatecznie z charakterystyk ukazanych na rysunkach 9.2.21 i 9.2.22 (por. także tabele A9.2.1) wynika że, przyrost wytrzymałości na rozciąganie materiału skutkiem umocnienia (odkształcenie rzeczywiste  $\ln\lambda = 5,6$ , odkształcenie względne  $\varepsilon = 99,6\%$ ) w przypadku miedzi beztlenowej, zarówno otrzymanej metodą Upcast, jak i Rautomead jest większy niż w przypadku miedzi w gatunku Cu-ETP o około 50 MPa i wynosi około 300 MPa.

Z kolei analiza charakterystyk zmian granicy plastyczności w funkcji wielkości odkształcenia (por. rys. 9.2.21) ukazuje zbliżone przebiegi dla każdego z badanych materiałów. W tym przypadku granica plastyczności drutów uzyskanych z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE zmienia się z poziomu około 90 MPa (technologia Rautomead) i około 140 MPa (metoda Upcast) do wartości około 450 MPa dla wielkości odkształcenia rzeczywistego  $\ln\lambda = 5,6$  (odkształcenie względne  $\varepsilon = 99,6\%$ ). Natomiast dla drutów otrzymanych z walcówki kształtuje się na poziomie od około 140 MPa do około 460 MPa. Na tej podstawie stwierdzono, że najmniejszy przyrost granicy plastyczności wykazują materiały z miedzi beztlenowej z linii technologicznej Upcast. Natomiast największym przyrostem granicy plastyczności charakteryzują się druty uzyskane z materiału wsadowego z procesu ciągłego odlewania metodą Rautomead. Jednakże poddając analizie przebiegi krzywych umocnienia zilustrowane na rysunku 9.2.21 zauważono, że wartość granicy plastyczności miedzi w gatunku Cu-ETP już po pierwszym ciągu gwałtownie wzrasta w stosunku do wartości granicy plastyczności dla drutów z miedzi beztlenowej bazujących na materiałach wsadowych z technologii Upcast i Rautomead oraz kształtuje się w kolejnych ciągach na wyższym poziomie.

Kontynuację analizy własności wytrzymałościowych drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP, a także potwierdzenie powyższych obserwacji stanowią charakterystyki zilustrowane na rysunku 9.2.23 obrazujące przebiegi zmian stosunku wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności drutów w funkcji odkształcenia rzeczywistego.

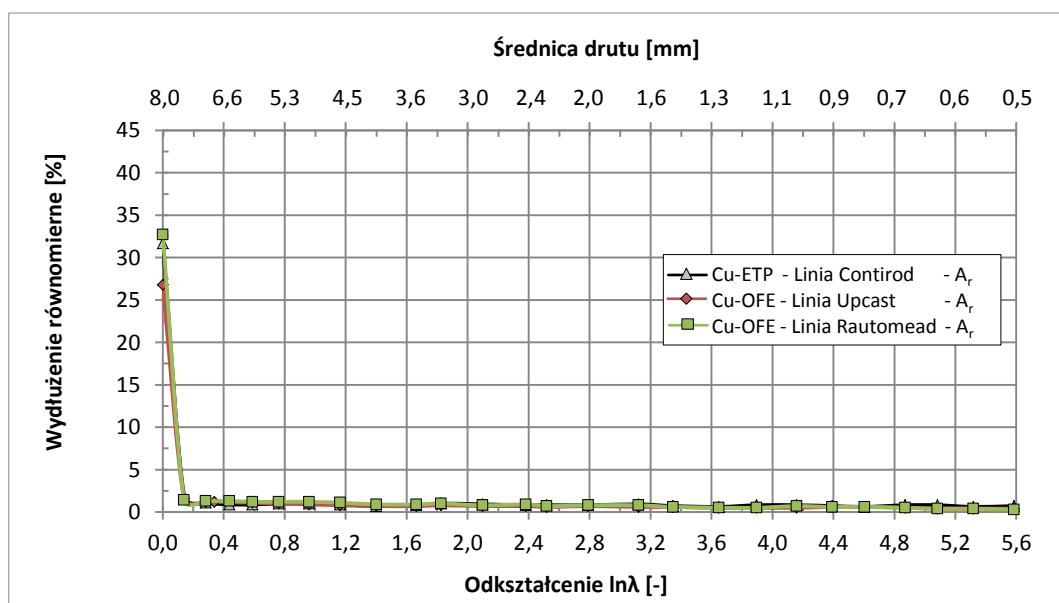




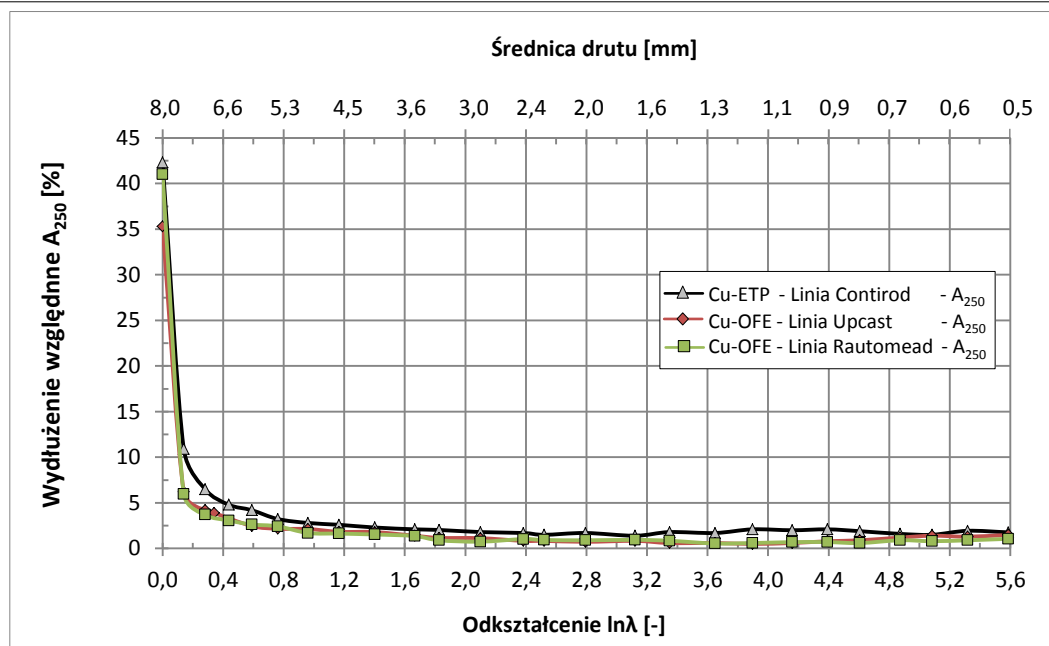
Rys. 9.2.23. Wykresy stosunku wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead po procesie ciągłego odlewania z prędkością 4,0 m/min. i przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego

Na podstawie analizy powyższych wykresów zaobserwowano dużą wartość zależności wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności dla miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Rautomead, która kształtuje się na poziomie około 2,0. Jest zatem o około 50 % większa niż wartość zanotowana dla miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanej metodą Upcast i o około 26 % większa niż w przypadku materiału w gatunku Cu-ETP. Ponadto po pierwszym ciągu zauważono zanikanie wspomnianych już wcześniej różnic w wartościach wytrzymałości na rozciąganie do granicy plastyczności dla drutów z obu gatunków miedzi. Wraz ze wzrostem odkształcenia wartość tej zależności kształtuje się na poziomie około 1,0 dla każdego z omawianych materiałów.

Kolejne charakterystyki zilustrowane na rysunku 9.2.24 i 9.2.25 to wykresy zależności wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  drutów otrzymanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP od odkształcenia rzeczywistego. Dane liczbowe do konstrukcji wykresów także zamieszczono w aneksie w tabeli A9.2.1.



Rys. 9.2.24. Wydłużenie równomierne drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead po procesie ciągłego odlewania z prędkością 4,0 m/min. i przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



Rys. 9.2.25. Wydluzenie wzgledne  $A_{250}$  drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead po procesie ciągłego odlewania z prędkością 4,0 m/min. i przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego

Zanotowane dla dwóch gatunków miedzi wartości wydluzenia równomiernego i wydluzenia względnego  $A_{250}$  maleją wraz ze wzrostem odkształcenia i uzyskują stabilny poziom przy wielkości odkształcenia rzeczywistego na poziomie średnio około  $\ln\lambda = 0,5$  dla wydluzenia równomiernego oraz średnio około  $\ln\lambda = 0,5$  dla wydluzenia względnego  $A_{250}$ . Dla drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP zauważono ponadto spadek własności w sposób bardziej łagodny niż ten zanotowany dla materiałów w gatunku Cu-OFE. Jest to wynikiem dużego zapasu podatności do obróbki plastycznej materiału wytwarzanego technologią Contirod. Plastyczność wynika z drobnokrystalicznej struktury ziaren tego materiału. Pręty otrzymywane w procesie ciągłego topienia i odlewania metodą Upcast i Rautomead jako materiały wyjściowe do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty posiadają zdecydowanie większe ziarno i umacniają się gwałtownie przez poślizg przez ziarna i wzrost dyslokacji.

W celu ilościowej oceny umacniania się badanych drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP w procesie ciągnięcia wyznaczono procentowe zmiany granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie odniesione do wartości zanotowanych dla materiałów wsadowych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty według poniższych równań:

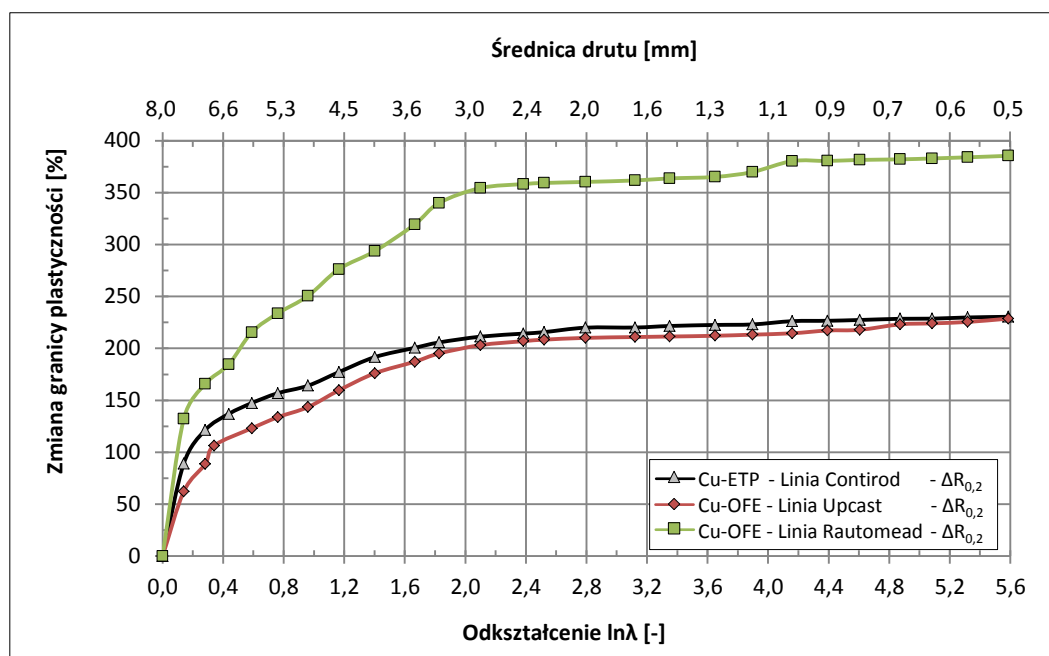
$$\Delta R_{0,2} [\%] = \frac{R_{0,2 \text{ drut}} - R_{0,2 \text{ materiał wsadowy}}}{R_{0,2 \text{ materiał wsadowy}}} \cdot 100 \quad (9.2.1)$$

$$\Delta R_m [\%] = \frac{R_{m \text{ drut}} - R_{m \text{ materiał wsadowy}}}{R_{m \text{ materiał wsadowy}}} \cdot 100 \quad (9.2.2)$$

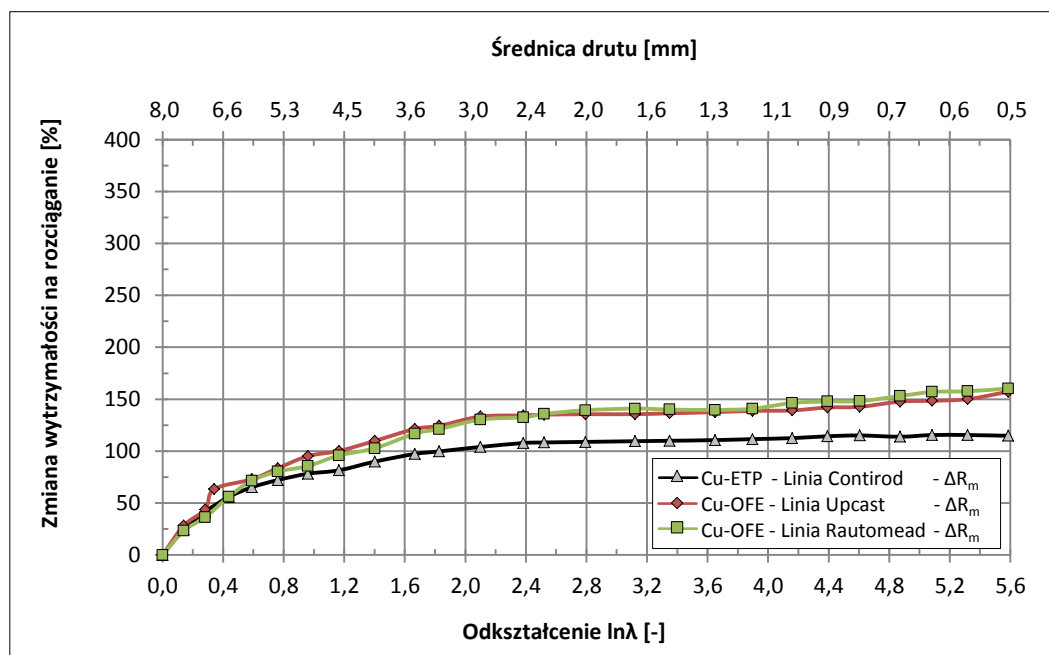
Wyniki obliczeń przedstawiono w aneksie w tabeli A9.2.2, a odpowiednie wykresy zilustrowano na rysunkach 9.2.26 i 9.2.27. Analiza poniższych zależności pozwoliła na stwierdzenie, iż w wyniku umocnienia odkształceniowego w procesie ciągnięcia największy procentowy przyrost wytrzymałości na rozciąganie odnotowano dla drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE.

Zarówno druty uzyskane z materiału wytworzonego w warunkach przemysłowych w technologii Upcast, jak i Rautomead umacniają się o około 150 % w stosunku do wartości początkowej, podczas gdy dla drutów otrzymanych z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-ETP przyrost wartości  $R_m$  wynosi około 100 % w odniesieniu do wartości zanotowanej dla walcówki o średnicy nominalnej 8,0

mm. Natomiast taka sama analiza odniesiona do przyrostu granicy plastyczności wykazuje bardziej wyraźne zróżnicowanie pomiędzy badanymi materiałami. Największym umocnieniem wynoszącym niemal 400 % w stosunku do wartości początkowej charakteryzują się druty uzyskane z prętów z miedzi beztlenowej z instalacji Rautomead, co należy tłumaczyć z jednej strony – najniższą wartością umownej granicy plastyczności materiału wsadowego wynoszącą około 90 MPa, z drugiej zaś zawsze występującym zróżnicowaniem struktury odlewniczej w stosunku do materiału w gatunku Cu-OFE wytworzonego sposobem Upcast.



Rys. 9.2.26. Wykresy zależności procentowej zmiany granicy plastyczności w funkcji wielkości odkształcenia rzeczywistego dla drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead po procesie ciągłego odlewania z prędkością 4,0 m/min. i przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod



Rys. 9.2.27. Wykresy zależności procentowej zmiany wytrzymałości na rozciąganie w funkcji wielkości odkształcenia rzeczywistego dla drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead po procesie ciągłego odlewania z prędkością 4,0 m/min. i przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod

Matematycznie, przebieg zmian granicy plastyczności drutów w funkcji odkształcenia można przedstawić za pomocą zależności potęgowej o postaci:

$$R_{0,2} = R_{0,2_0} + k(\ln\lambda)^n \quad (9.2.3)$$

gdzie:

$n$  – współczynnik umocnienia,

$R_{0,2_0}$  – granica plastyczności pręta lub walcówki,

$k = \frac{\Delta R_{0,2}}{(\ln\lambda)^n}$  – współczynnik określający przyrost granicy plastyczności przypadający na jednostkę odkształcenia wyrażoną w postaci  $(\ln\lambda)^n$ .

Rozważając z kolei umocnienie się materiału na podstawie charakterystyki zmian wytrzymałości na rozciąganie w funkcji odkształcenia uzyskano następujące zależności graficzne:

$$R_m = R_{m_0} + k(\ln\lambda)^n \quad (9.2.4)$$

Wartości współczynników powyższych równań zamieszczono natomiast w tabelach 9.2.5 i 9.2.6.

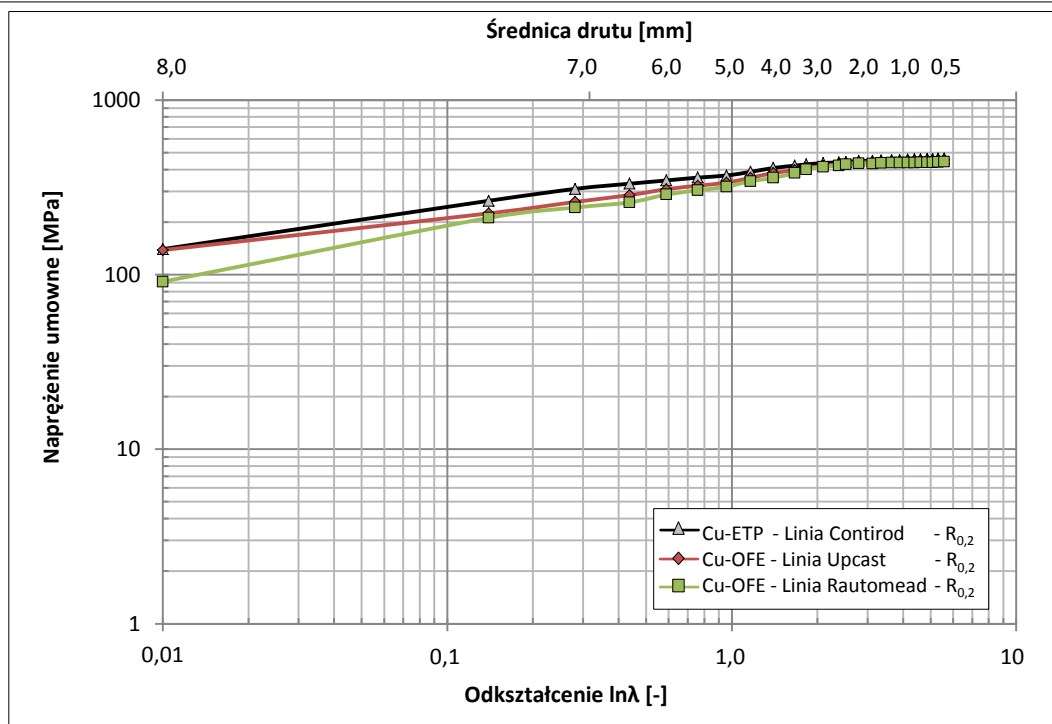
Tabela 9.2.5. Parametry równania  $R_{0,2} = f(\lambda)$  dla drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP

Gatunek materiału	Linia technologiczna	$R_{0,2_0}$	k	n	$\Delta R_{0,2} (\ln\lambda = 5,6)$
[-]	[-]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]
Cu-ETP	Contirod	140,0	231	0,24	323
Cu-OFE	Upcast	138,3	219	0,25	316
Cu-OFE	Rautomead	91,1	244	0,26	351

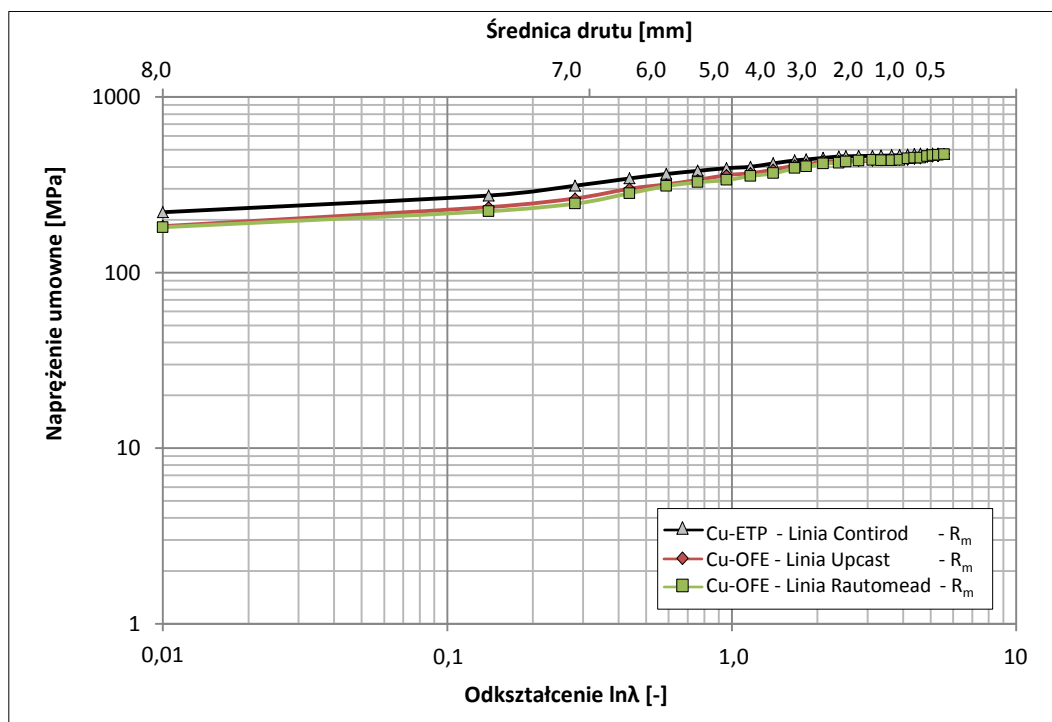
Tabela 9.2.6. Parametry równania  $R_m = f(\lambda)$  dla drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP

Gatunek materiału	Linia technologiczna	$R_{m_0}$	k	n	$\Delta R_m (\ln\lambda = 5,6)$
[-]	[-]	[MPa]	[-]	[-]	[MPa]
Cu-ETP	Contirod	220,7	179	0,24	253
Cu-OFE	Upcast	183,9	156	0,41	289
Cu-OFE	Rautomead	181,3	152	0,42	291

Szczegółowa analiza wartości wyznaczonych współczynników krzywych umocnienia wykazuje, iż o ile w równaniu opisującym zmianę wytrzymałości na rozciąganie w funkcji odkształcenia rzeczywistego istnieje duża różnica pomiędzy współczynnikami umocnienia  $n$  dla miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE, o tyle w przypadku granicy plastyczności współczynnik umocnienia kształtuje się na zbliżonym poziomie. Wynika to z faktu, iż różnica pomiędzy wartością wytrzymałości na rozciąganie dla walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta otrzymanego w procesie ciągłego odlewania metodą Upcast lub Rautomead wynosi około 40 MPa, podczas gdy różnica wartości granicy plastyczności pomiędzy omawianymi dwoma gatunkami miedzi jest mniejsza i kształtuje się na poziomie średnio 20 MPa. Warto ponadto zaznaczyć, iż otrzymane w procesie ciągnięcia druty o średnicy 0,5 mm charakteryzują się już wartościami wytrzymałości na rozciągania oraz granicy plastyczności praktycznie na tym samym poziomie. Zatem podsumowując tę część badań można stwierdzić, iż w przypadku drutów otrzymanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z procesu ciągłego odlewania metodą Upcast i Rautomead zaobserwowano większe umocnienie materiału w procesie ciągnięcia niż w przypadku drutów uzyskanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP. Na rysunkach 9.2.28 i 9.2.29 zilustrowano krzywe umocnienia w układzie logarymicznym, które się linearyzują. Oznacza to, że istotnie własności te są potęgową funkcją odkształcenia rzeczywistego.

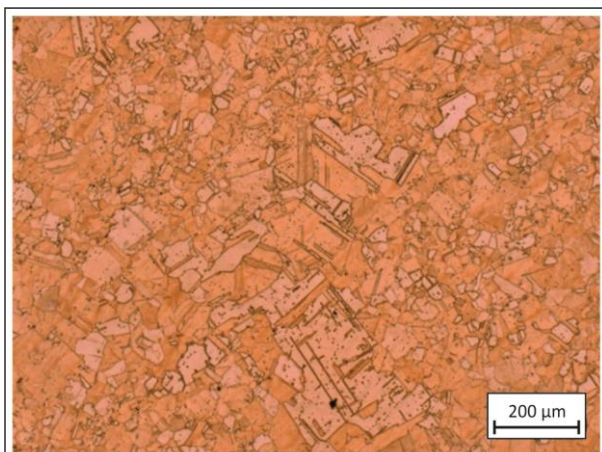


Rys. 9.2.28. Granica plastyczności w funkcji odkształcenia rzeczywistego dla drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead po procesie ciągłego odlewania z prędkością 4,0 m/min. i przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod – układ logarytmiczny

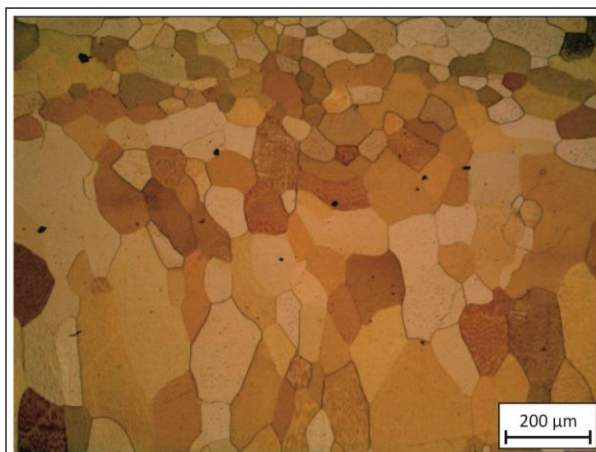


Rys. 9.2.29. Wytrzymałość na rozciąganie w funkcji odkształcenia rzeczywistego dla drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead po procesie ciągłego odlewania z prędkością 4,0 m/min. i przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod – układ logarytmiczny

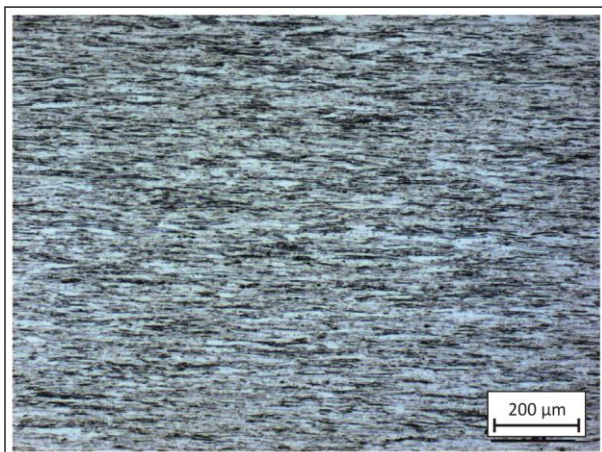
Na rysunkach 9.2.30 – 9.2.43 przedstawiono natomiast mikrostruktury materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE otrzymanych przy zastosowaniu standardowych parametrów procesu odlewania tj. prędkości 4,0 m/min. i wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min. oraz drutów o średnicach od 3,7 mm do 1,8 mm.



Rys. 9.2.30. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego walcówki o średnicy 8,0 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop świetlny



Rys. 9.2.31. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego pręta o średnicy 8,0 mm z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



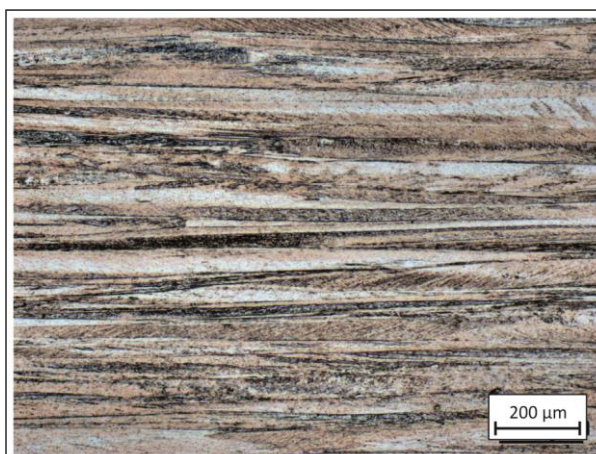
Rys. 9.2.32. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 3,7 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop świetlny



Rys. 9.2.33. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 3,7 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



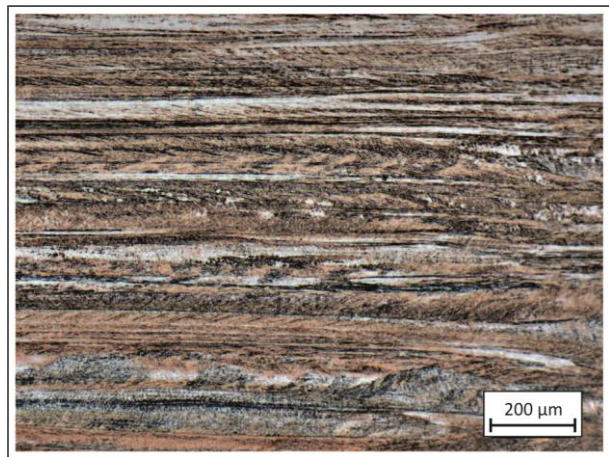
Rys. 9.2.34. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 3,2 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop świetlny



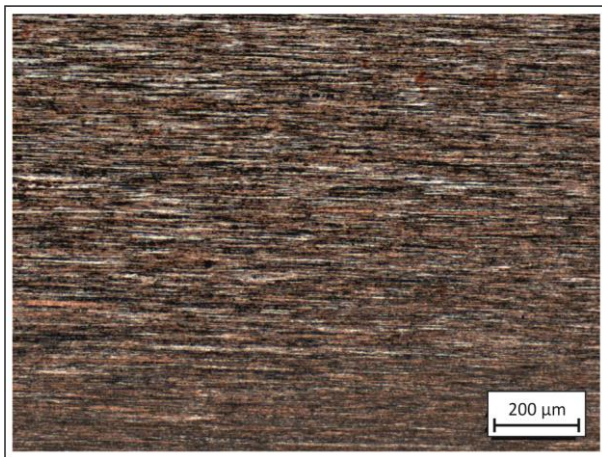
Rys. 9.2.35. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 3,2 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.). Mikroskop świetlny



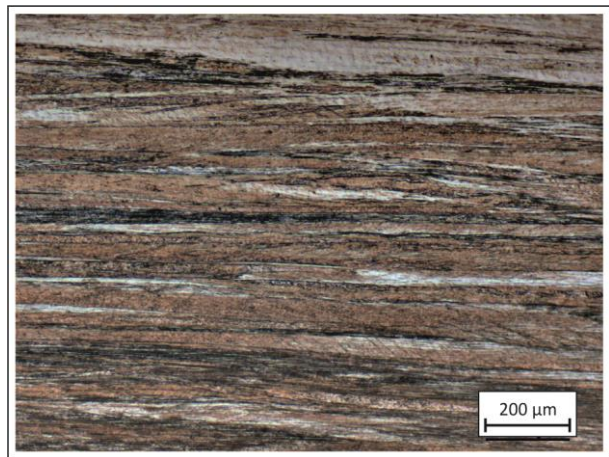
Rys. 9.2.36. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2.7 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop świetlny



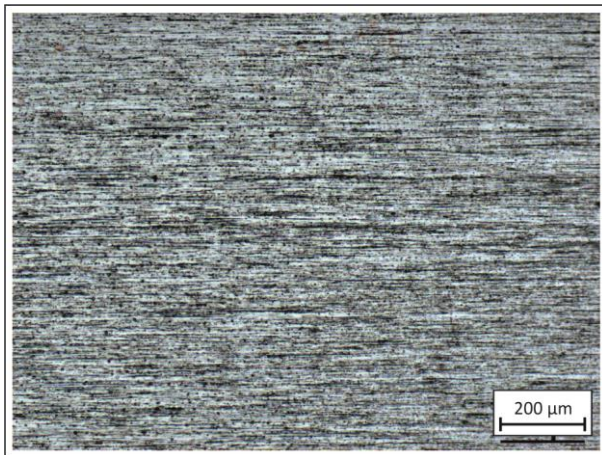
Rys. 9.2.37. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2.7 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4.0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



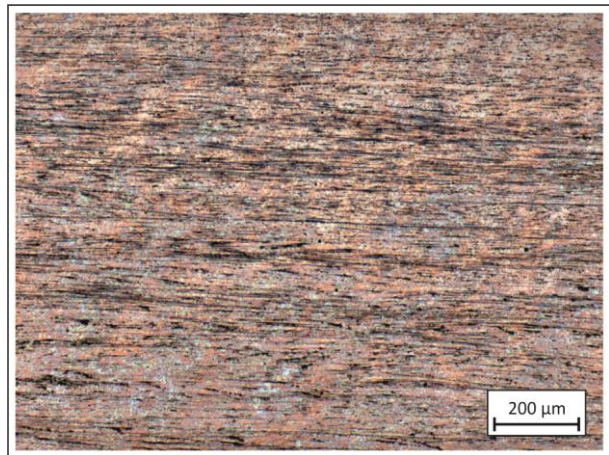
Rys. 9.2.38. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2.3 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop świetlny



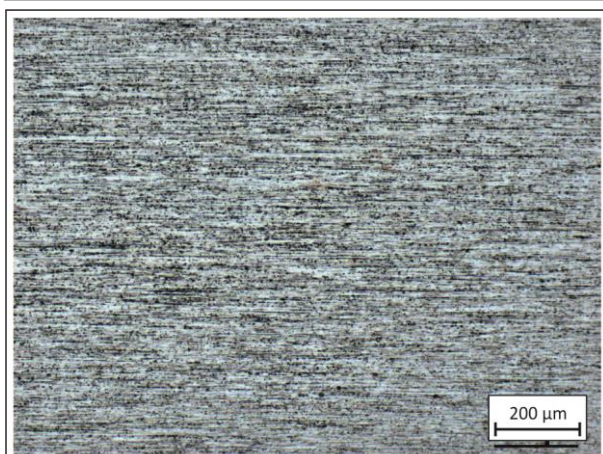
Rys. 9.2.39. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2.3 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4.0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



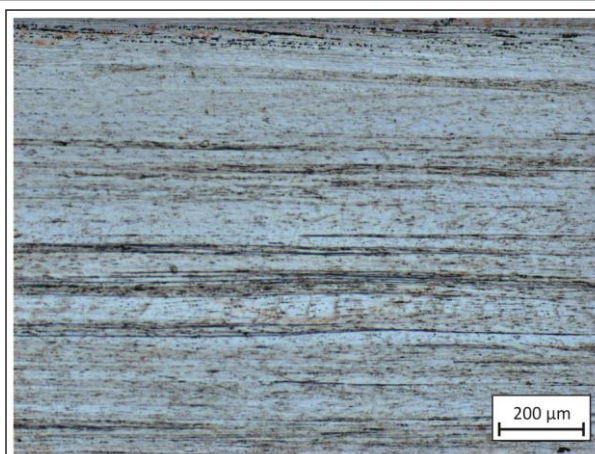
Rys. 9.2.40. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2.0 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop świetlny



Rys. 9.2.41. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2.0 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4.0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.). Mikroskop świetlny



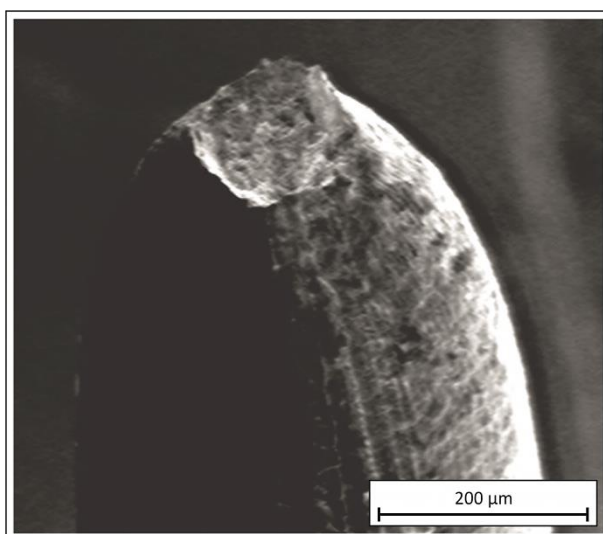
Rys. 9.2.42. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 1,8 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod. Mikroskop świetlny



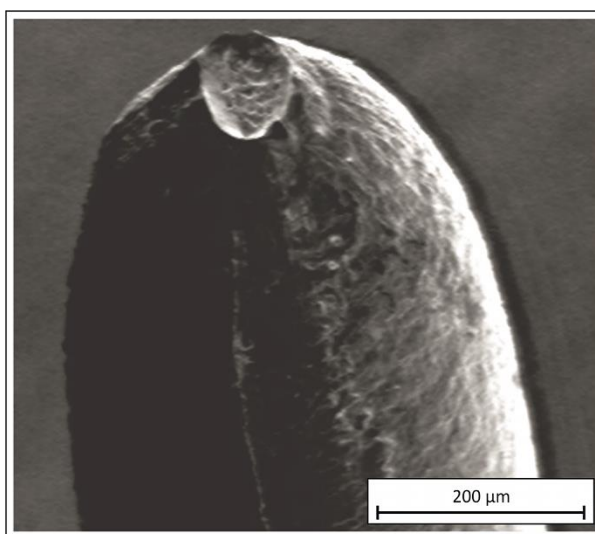
Rys. 9.2.43. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 1,8 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.). Mikroskop świetlny

Szczegółowa analiza mikrostruktur drutów o różnym stopniu umocnienia odkształceniowego wskazuje na różnice pomiędzy dwoma gatunkami miedzi. Mikrostruktura drutów otrzymanych z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-ETP wyróżnia się większą liczbą ziaren (por. rys. 9.2.30, 9.2.32, 9.2.34, 9.2.36, 9.2.38, 9.2.40, 9.2.42). Natomiast druty uzyskane z miedzi beztlenowej charakteryzują się mikrostrukturą pasmową o wydłużonych ziarnach (por. rys. 9.2.31, 9.2.33, 9.2.35, 9.2.37, 9.2.39, 9.2.41, 9.2.43). Ponadto obserwuje się dla nich, zwłaszcza w okolicach osi drutu występowanie pojedynczych i wydłużonych krystalitów będących pochodną odkształcenia kryształów z osi odlanego pręta.

Z kolei analiza porównawcza obrazów przełamów oraz powierzchni po statycznej próbie rozciągania drutów o średnicy 0,5 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod i Cu-OFE z linii Upcast wykonanych za pomocą mikroskopu skaningowego wykazała jednoznacznie, iż druty z miedzi beztlenowej charakteryzują się wyższą plastycznością. Świadczy o tym kształt szyjki zilustrowany na rysunku 9.2.45. Zauważa się ponadto, iż wydłużenie drutu przy zerwaniu jest większe niż w przypadku materiału w gatunku Cu-ETP (por. rys. 9.2.44 – 9.2.49). Warto ponadto zaznaczyć, że oba gatunki materiałów wykazują typowy przełam poślizgowy (por. rys. 9.2.44 i 9.2.45).

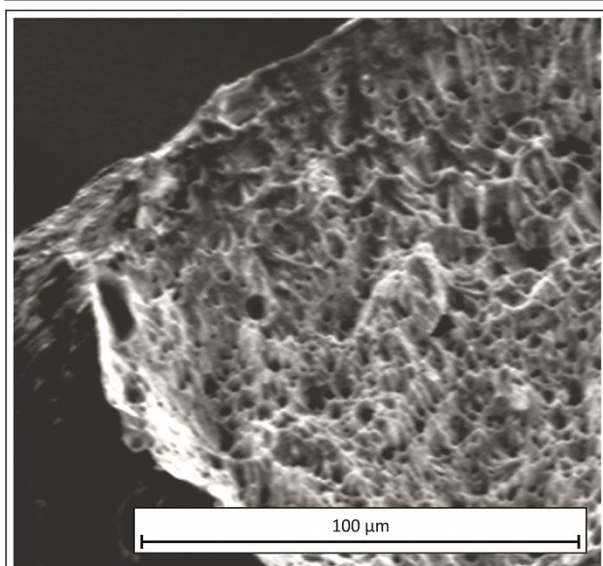


Rys. 9.2.44. Powierzchnia przełomu drutu o średnicy 0,5 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod po statycznej próbie rozciągania. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 2000$

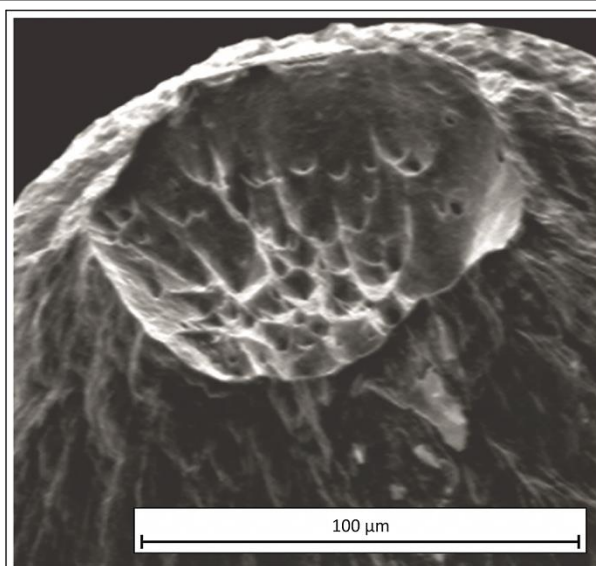


Rys. 9.2.45. Powierzchnia przełomu drutu o średnicy 0,5 mm z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po statycznej próbie rozciągania. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 2000$

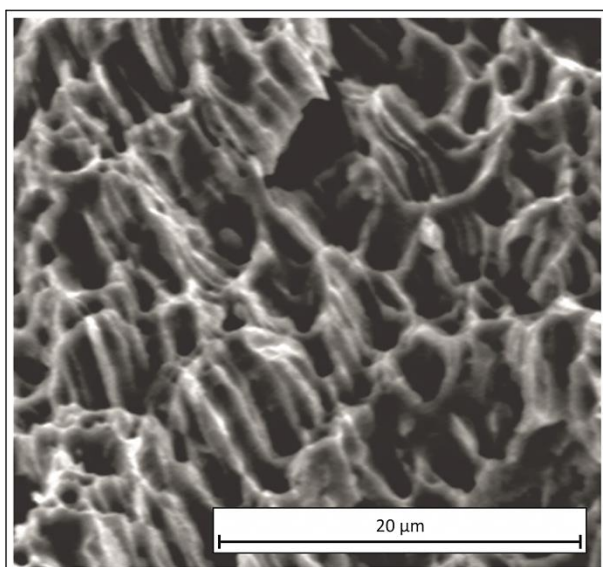




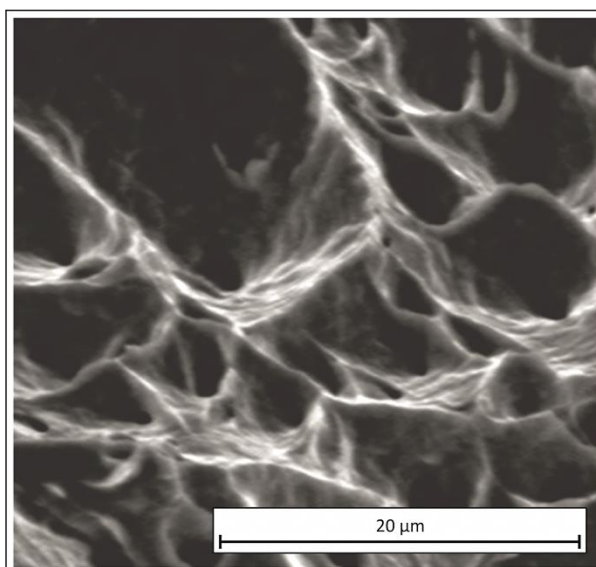
Rys. 9.2.46. Powierzchnia przelomu drutu o średnicy 0,5 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod po statycznej próbie rozciągania. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 2000$



Rys. 9.2.47. Powierzchnia przelomu drutu o średnicy 0,5 mm z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po statycznej próbie rozciągania. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 2000$



Rys. 9.2.48. Powierzchnia przelomu drutu o średnicy 0,5 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod po statycznej próbie rozciągania. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 2000$



Rys. 9.2.49. Powierzchnia przelomu drutu o średnicy 0,5 mm z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po statycznej próbie rozciągania. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 2000$

Kontynuację badań zdolności ciągniczych materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP stanowi analiza parametrów siłowych procesu ciągnięcia będąca tematem kolejnego z podrozdziałów pracy.

### 9.2.3. Analiza parametrów siłowych procesu ciągnięcia drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP

Kolejny etap badań doświadczalnych nad parametrami siłowymi procesu ciągnięcia drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej i tlenowej miał na celu określenie wpływu zawartości tlenu oraz wielkości ziarna miedzi na jej odkształcalność w procesie ciągnięcia. W tabeli 9.2.7 zamieszczono wartości naprężeń ciągnięcia dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead.

Tabela 9.2.7. Wartości naprężeń ciągnięcia i współczynników wyężenia materiału dla drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead po procesie ciągłego odlewania z prędkością 4,0 m/min. i przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod

Nr ciągu	Średnica drutu	Całkowite odkształcenie względne	Odkształcenie rzeczywiste	Cu-ETP Linia Contirod			Cu-OFE Linia Upcast			Cu-OFE Linia Rautomead		
				$\sigma_c$	$R_m$	$\gamma$	$\sigma_c$	$R_m$	$\gamma$	$\sigma_c$	$R_m$	$\gamma$
	[mm]	[%]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]
1	7,5	12,82	0,14	88,1	274,7	3,1	73,0	236,0	3,2	69,8	223,6	3,2
2	7,0	23,96	0,28	173,0	312,6	1,8	130,2	264,5	2,0	115,8	247,0	2,1
3	6,4	34,53	0,43	147,4	344,0	2,3	115,8	300,4	2,6	115,8	282,9	2,4
4	6,0	44,43	0,60	179,0	364,5	2,0	153,6	318,0	2,1	150,2	311,0	2,1
5	5,5	53,17	0,77	201,8	379,9	1,9	162,1	337,4	2,1	160,1	327,0	2,0
6	5,0	61,25	0,96	228,8	393,4	1,7	204,1	359,0	1,8	191,0	336,6	1,8
7	4,5	8,44	1,16	228,4	400,6	1,8	209,9	368,0	1,8	216,6	355,0	1,6
8	4,0	75,15	1,40	282,6	419,1	1,5	250,3	385,9	1,5	243,4	367,5	1,5
9	3,5	81,56	1,66	303,0	435,4	1,4	274,6	407,0	1,5	270,3	393,1	1,5
10	3,2	83,82	1,83	236,0	440,8	1,9	210,7	412,6	2,0	203,4	401,1	2,0
11	2,8	87,51	2,09	366,3	450,3	1,2	320,3	429,0	1,3	316,1	417,5	1,3
12	2,4	90,55	2,37	326,3	458,6	1,4	318,1	431,1	1,4	301,4	421,7	1,4
13	2,3	91,78	2,51	275,4	459,8	1,7	260,4	430,7	1,7	254,2	427,4	1,7

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań sił ciągnięcia dla poszczególnych stopni odkształcenia zaobserwowano, iż druty z miedzi w gatunku Cu-ETP wykazały wyższe wartości naprężeń ciągnięcia w porównaniu z materiałami z miedzi beztlenowej. Stwierdzono ponadto, że największe różnice w wartościach wystąpiły dla drutów charakteryzujących się dużymi średnicami tj. na początku krzywej umocnienia.

Przeprowadzone laboratoryjne próby ciągnięcia drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dostarczyły także informacji o możliwości bezawaryjnej realizacji procesu ciągnięcia powyższych materiałów również w warunkach przemysłowych na maszynach wielociągowych. Świadczy o tym stosunkowo duży współczynnik wyężenia materiału  $\gamma$  określający zapas wytrzymałości na rozciąganie, który wyznaczony został na podstawie zależności:

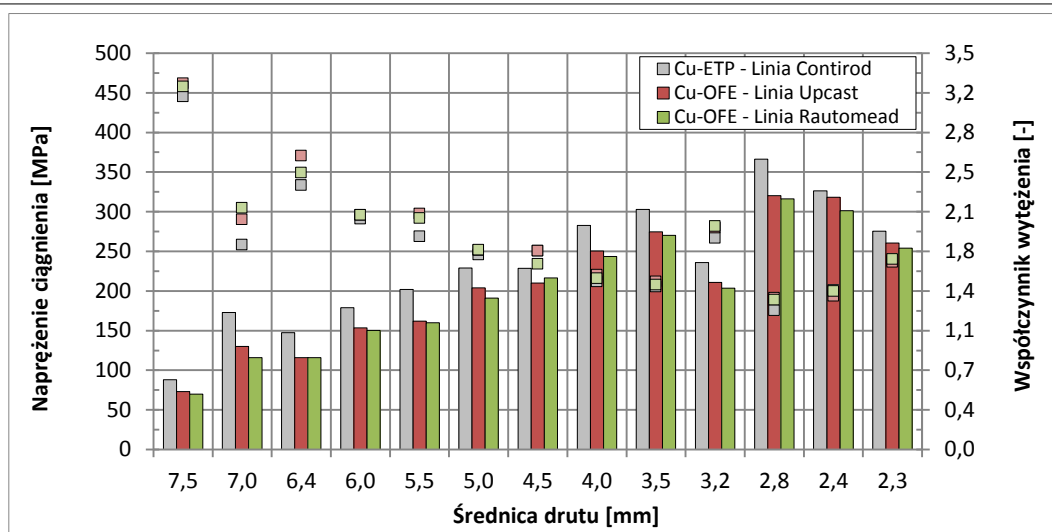
$$\gamma = \frac{R_m}{\sigma_c} \quad (9.2.5)$$

gdzie:

$R_m$  – wytrzymałość na rozciąganie [MPa],

$\sigma_c$  – naprężenie ciągnięcia [MPa].

Współczynnik zapasu wytrzymałości na rozciąganie to stosunek wytrzymałości na rozciąganie drutu za ciągadłem do naprężenia ciągnięcia. Jego wartość określa stopień wyężenia materiału w procesie ciągnięcia lub inaczej – zapas nośności ciągniętego wyrobu. Porównanie wartości naprężenia ciągnięcia z wytrzymałością na rozciąganie drutu na wyjściu z ciągadła dobrze odpowiada istocie procesu ciągnięcia, która – jak wiadomo – polega na przyłożeniu do ciągniętego wyrobu siły ciągnięcia wywołującej w nim stan jednoosiowego rozciągania. Wartości współczynnika zapasu wytrzymałości drutów w procesie ciągnięcia zamieszczono w tabeli 9.2.7. Natomiast ich ilustrację graficzną przedstawiono na rysunku 9.2.50.



Rys. 9.2.50. Wartości naprężenia ciągnięcia i współczynnika zapasu wytrzymałości dla drutów o różnych średnicach z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Analizie powyższych wyników towarzyszyć musi świadomość, że laboratoryjne próby ciągnięcia nie mogą w pełni oddać warunków pracy maszyn wielociągowych z poślizgiem. Chodzi tutaj w szczególności o problem dynamiki pracy maszyny ciągniczej oraz o wpływ przeciwciaгу realizowanego przez koła ciągnicze na parametry siłowe i stabilność procesu. Dodatkowym problemem jest odwzorowanie wpływu przemysłowych prędkości ciągnięcia na zmianę własności materiału oraz na siły ciągnięcia. Powyższe problemy wymagają oddzielnego programu badań, który uwzględniłby warunki przemysłowe procesu ciągnięcia.

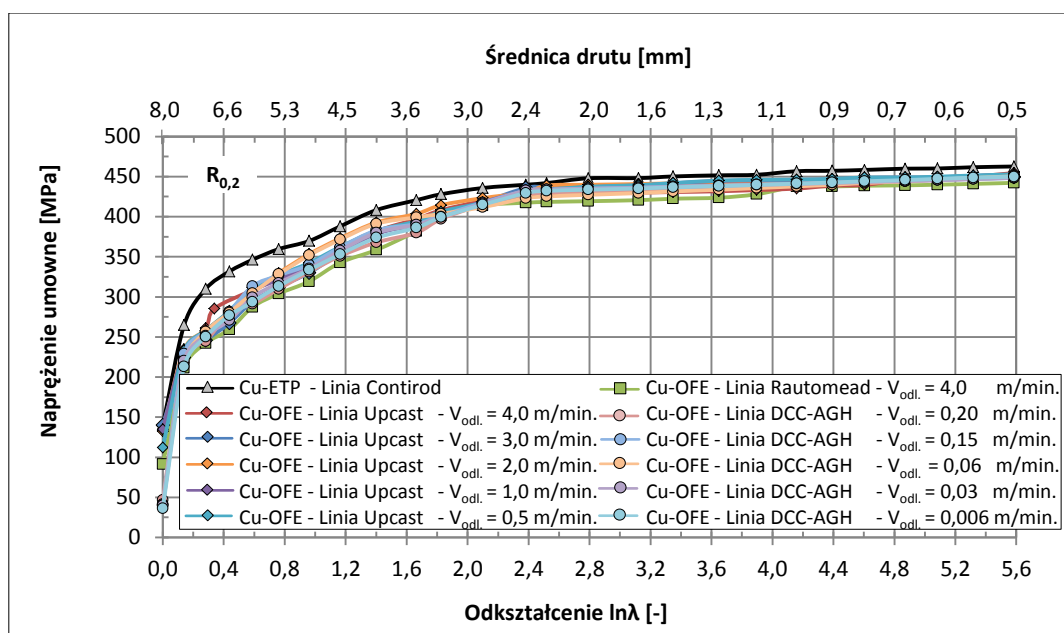
Przeprowadzone do tej pory w ramach podrozdziałów 9.2.1 i 9.2.2 badania dostarczyły informacji o wpływie składu chemicznego i zawartości tlenu, a także wielkości ziarna na charakter umacniania się drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP w procesie ciągnięcia. Kontynuacja tej problematyki została przeprowadzona w ramach szczegółowej analizy wpływu różnych warunków procesu odlewania materiałów wsadowych tj. prędkości odlewania oraz wydatku wody chłodzącej krystalizator na zdolność do zachowania ewentualnych różnic, wynikających z odmienności struktury podczas procesu przeróbki plastycznej na zimno. Tematyka ta stanowi przedmiot kolejnych dwóch podrozdziałów pracy – 9.2.4 i 9.2.5.

#### 9.2.4. Analiza wpływu prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na umacnianie się drutów w procesie ciągnięcia

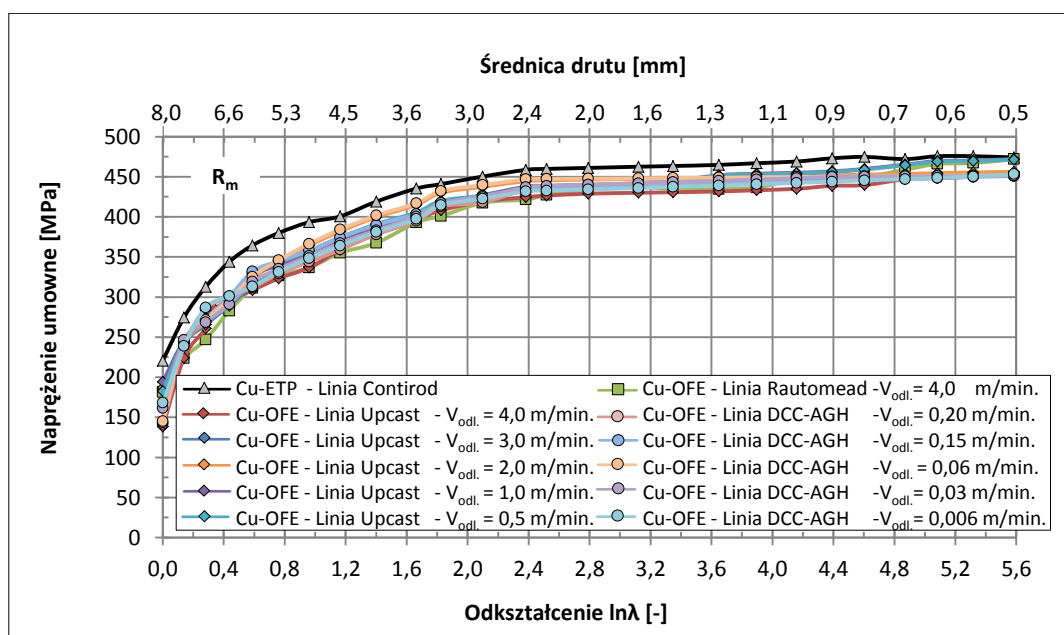
Program badań, na którym opiera się niniejsza praca, został pomyślany jako laboratoryjna symulacja części procesu produkcyjnego drutów miedzianych w linii ciągniczej. W ramach poprzedniego podrozdziału 9.2.3 materiały wsadowe z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead oraz Cu-ETP z linii Contirod poddano próbom badawczym na poszczególnych etapach procesu ciągnięcia. Po dokonaniu ich identyfikacji materiałowej podjęto decyzję o rozszerzeniu programu badawczego o kolejne materiały stanowiące przedmiot zainteresowania niniejszego podrozdziału. Były to druty uzyskane w wyniku procesu przetwórstwa materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej w gatunku Cu-OFE z procesu ciągłego odlewania, zarówno w warunkach laboratoryjnych na stanowisku DCC-AGH (prędkość odlewania: 0,006 m/min., 0,03 m/min., 0,06 m/min., 0,15 m/min., 0,2 m/min.), jak i przemysłowym zgodnie z technologią Rautomead i Upcast (prędkość odlewania: 0,5 m/min., 1,0 m/min., 2,0 m/min., 3,0 m/min., 4,0 m/min.). Cel tej części badań eksperymentalnych polegał na określeniu wpływu stanu strukturalnego miedzi wysokiej czystości chemicznej na stopień umacniania się materiałów. W szczególności poszukiwano odpowiedzi na pytanie: jaka jest różnica w umacnianiu się miedzi w gatunku Cu-OFE charakteryzującej się zróżnicowanym stanem strukturalnym kształtowanym w procesie ciągłego odlewania w zakresie prędkości 0,006 – 4,0 m/min.?

Analiza rozpoczęta została od przedstawienia na rysunkach 9.2.51 i 9.2.52 krzywych umocnienia drutów czyli zależności granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie w funkcji odkształcenia rzeczywistego. Po to, aby w pełni i lepiej sprawdzić otrzymane wyniki zostały one odniesione do

tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne miedzi w gatunku Cu-ETP. Dane liczbowe do konstrukcji wykresów zamieszczono w aneksie w tabelach A9.2.1 i A9.2.3 – A9.2.6.



Rys. 9.2.51. Granica plastyczności drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH (prędkość odlewania 0,006 – 0,2 m/min., przepływ wody chłodzącej w układzie pierwotnym 0,1 – 0,5 l/min. i wtórnym 0,2 – 1,0 l/min.), Upcast i Rautomead (prędkość odlewania 0,5 – 4,0 m/min., przepływ wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego

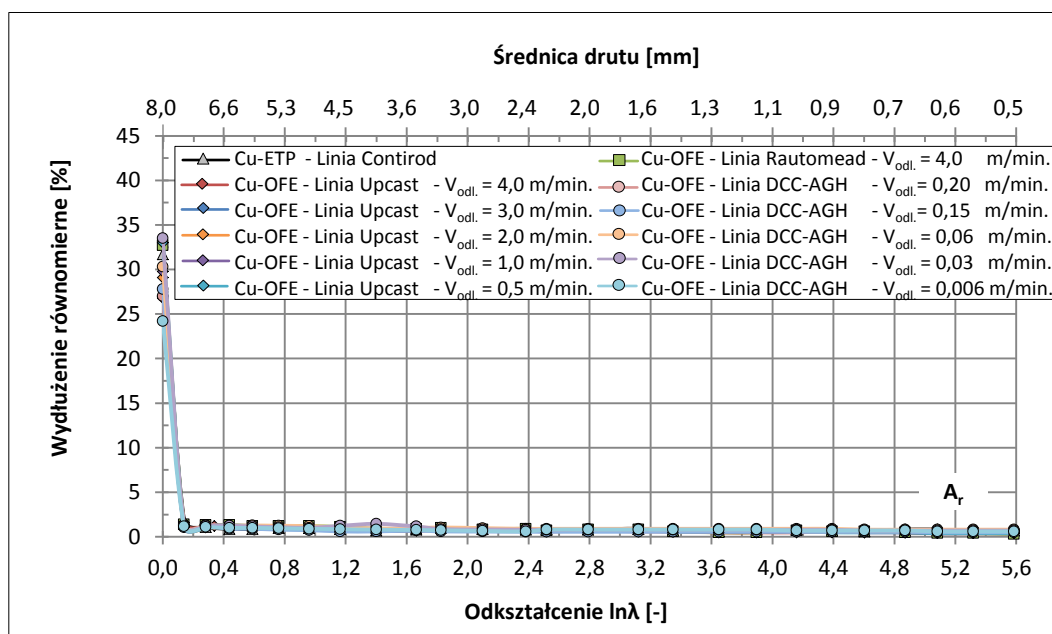


Rys. 9.2.52. Wytrzymałość na rozciąganie drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH (prędkość odlewania 0,006 – 0,2 m/min., przepływ wody chłodzącej w układzie pierwotnym 0,1 – 0,5 l/min. i wtórnym 0,2 – 1,0 l/min.), Upcast i Rautomead (prędkość odlewania 0,5 – 4,0 m/min., przepływ wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego

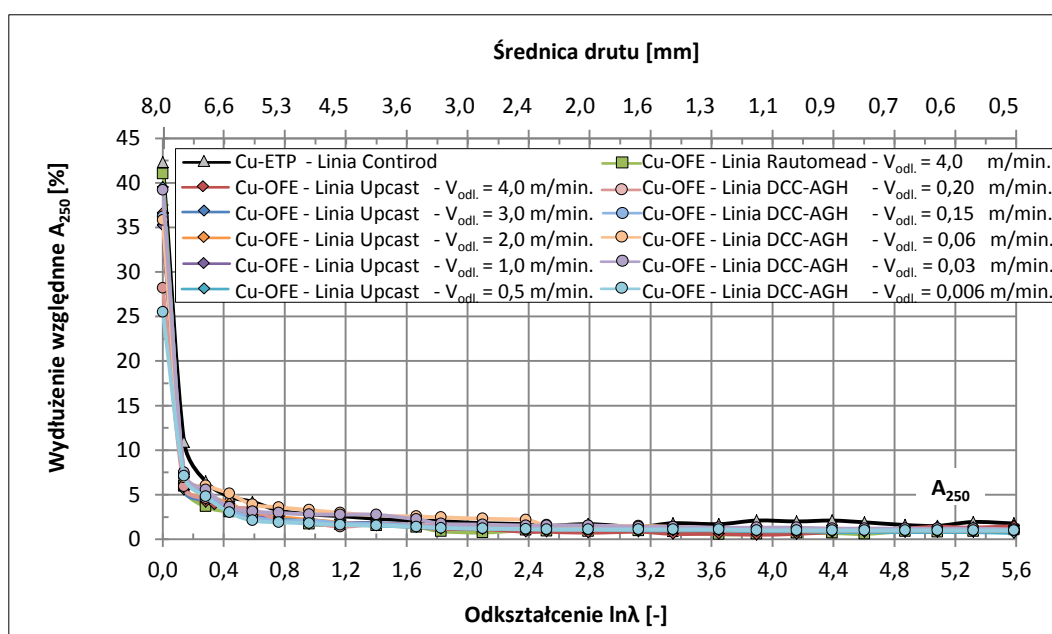
Dokonując analizy zilustrowanych na rysunkach 9.2.51 i 9.2.52 krzywych ukazujących charakterystyki umacniania się drutów pochodzących z prętów z miedzi beztlenowej z procesu ciągłego odlewania przy zastosowaniu zróżnicowanych prędkości odlewania oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP stwierdzono, iż zauważalne dla materiałów o średnicach 8,0 mm z dwóch gatunków miedzi zróżnicowanie własności wytrzymałościowych na poziomie od około 2 MPa do 50 MPa dla wartości

granicy plastyczności oraz od około 33 MPa do 80 MPa dla wartości wytrzymałości na rozciąganie wraz ze wzrostem wielkości umocnienia odkształceniowego zaczyna być minimalizowane. Otrzymane w procesie ciągnięcia druty z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP o finalnej średnicy 0,5 mm charakteryzują się granicą plastyczności i wytrzymałością na rozciąganie na tym samym poziomie tj. 450 – 470 MPa.

Kontynuując badania doświadczalne obserwacjom poddano zmianę własności plastycznych omawianych materiałów – wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  w funkcji odkształcenia rzeczywistego. Wyniki zilustrowano na rysunkach 9.2.53 i 9.2.54.



Rys. 9.2.53. Wydłużenie równomierne drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH (prędkość odlewania 0,006 – 0,2 m/min., przepływ wody chłodzącej w układzie pierwotnym 0,1 – 0,5 l/min. i wtórnym 0,2 – 1,0 l/min.), Upcast i Rautomead (prędkość odlewania 0,5 – 4,0 m/min., przepływ wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego

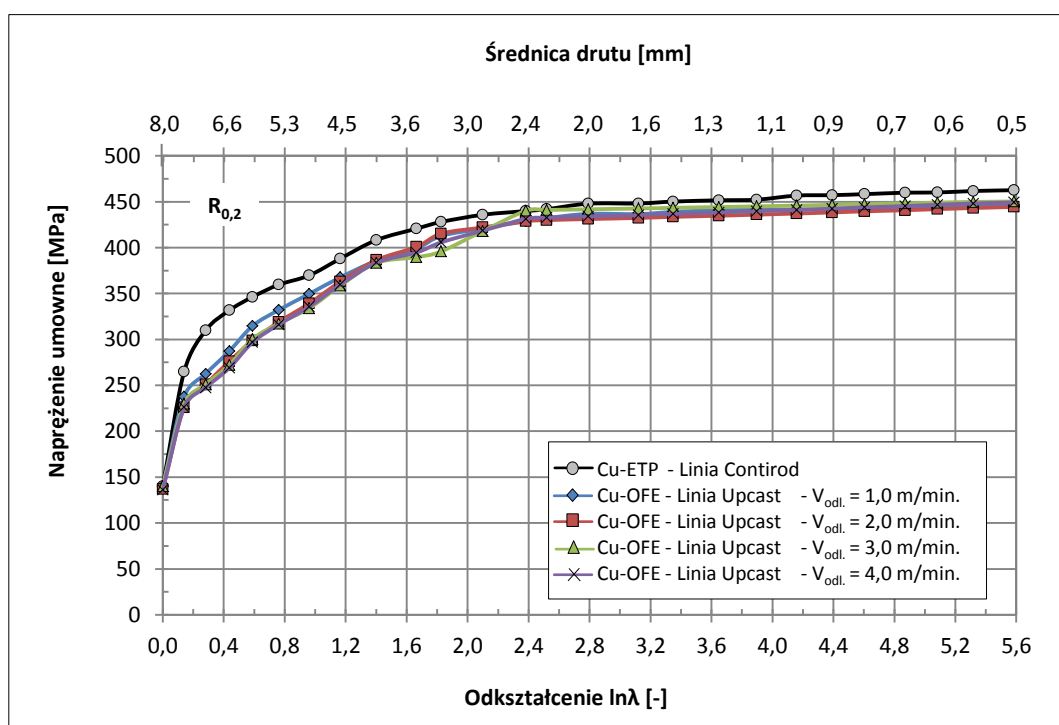


Rys. 9.2.54. Wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH (prędkość odlewania 0,006 – 0,2 m/min., przepływ wody chłodzącej w układzie pierwotnym 0,1 – 0,5 l/min. i wtórnym 0,2 – 1,0 l/min.), Upcast i Rautomead (prędkość odlewania 0,5 – 4,0 m/min., przepływ wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego

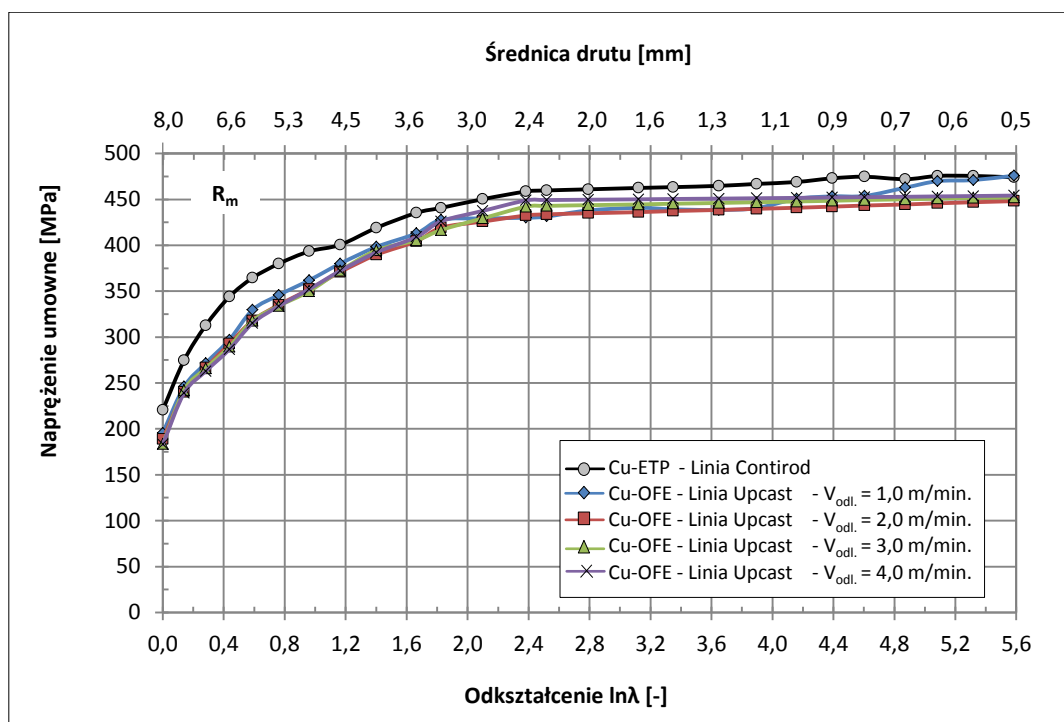
Także i w tym przypadku odnotowane dla prętów i walcówki zróżnicowanie wartości wydłużenia równomiernego już w wyniku przeróbki plastycznej na zimno materiałów w wyniku której otrzymano druty o średnicy 7,5 mm wpłynęło na znaczące zniwelowanie wartości z poziomu od około 24 – 34 % do około 1 – 2 %. Podobne obserwacje wynikły z analizy wykresów zależności wydłużenia względnego  $A_{250}$  od odkształcenia rzeczywistego – następuje zmniejszenie wartości z poziomu od około 25 – 43 % do około 6 – 11 %.

W kolejnych etapach badań nad procesem ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych przeprowadzono bardziej szczegółową analizę procesu umacniania, a otrzymane wyniki zestawiono na dwa sposoby – zarówno pod kątem wpływu prędkości odlewania (temat niniejszego podrozdziału 9.2.4), jak i wydatku wody chłodzącej krystalizator (temat kolejnego podrozdziału 9.2.5) na kształtowanie własności mechanicznych otrzymanych drutów. Z uwagi na dużą ilość drutów poddanych badaniom, w stosunku do których na poprzednim etapie pracy w ramach niniejszego podrozdziału zaobserwowane niewielkie zróżnicowanie własności mechanicznych wytypowano kilka materiałów, w stosunku do których przeprowadzono analizę. Takie podejście do zagadnienia pozwoli, zdaniem autora, na bardziej przejrzystą i czytelną analizę problemu. Zatem tematyka dotycząca zmiany prędkości odlewania oraz warunków chłodzenia materiału i ich wpływu na właściwości mechaniczne drutów została omówiona na podstawie obserwacji zachowania się drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymanych z materiałów wsadowych z procesu ciągłego odlewania metodą Upcast przy prędkości od 1,0 m/min. do 4,0 m/min. oraz wydatku wody chłodzącej w ilości od 40 l/min. do 60 l/min.

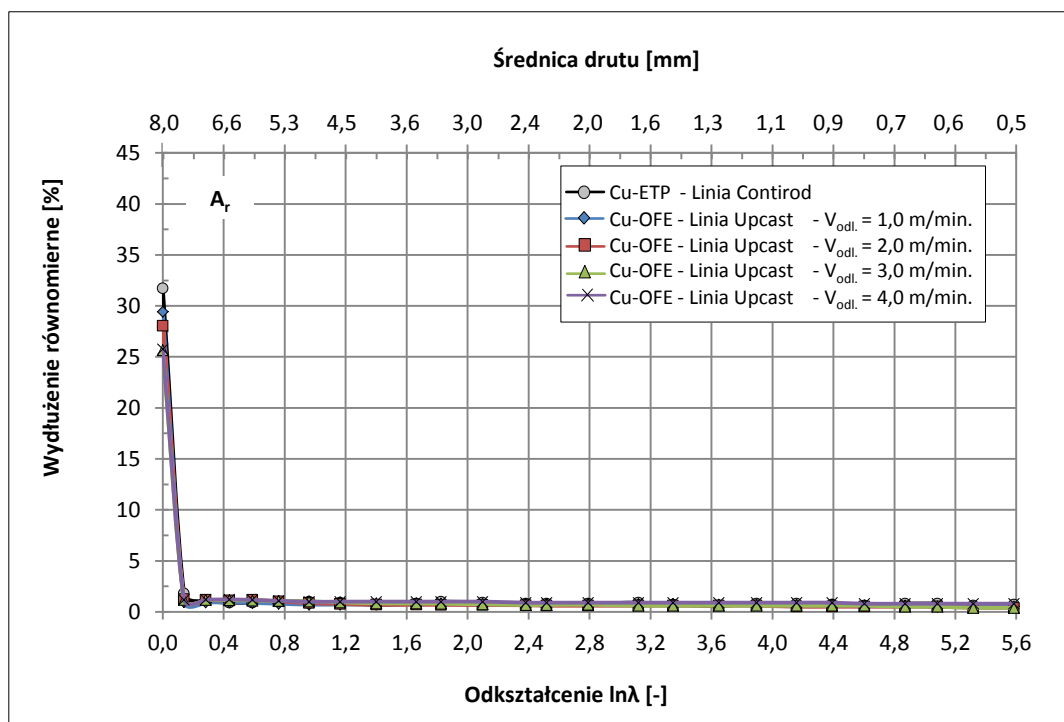
Analizę rozpoczęto od obserwacji przebiegu charakterystyk zmian własności mechanicznych w funkcji odkształcenia rzeczywistego zilustrowanych na rysunkach 9.2.55 – 9.2.66, które dotyczą drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej z linii Upcast przy zmiennych prędkościach odlewania i stałym parametrze przepływu wody chłodzącej krystalizator – tj. dla charakterystyk na rysunkach 9.2.55 – 9.2.58 w ilości 40 l/min., na rysunkach 9.2.59 – 9.2.62 – 50 l/min. oraz dla ilustracji od 9.2.63 do 9.2.66 dla wydatku 60 l/min. Dane liczbowe do konstrukcji wykresów zamieszczono w aneksie w tabelach A9.2.1 oraz A9.2.3 – A9.2.10.



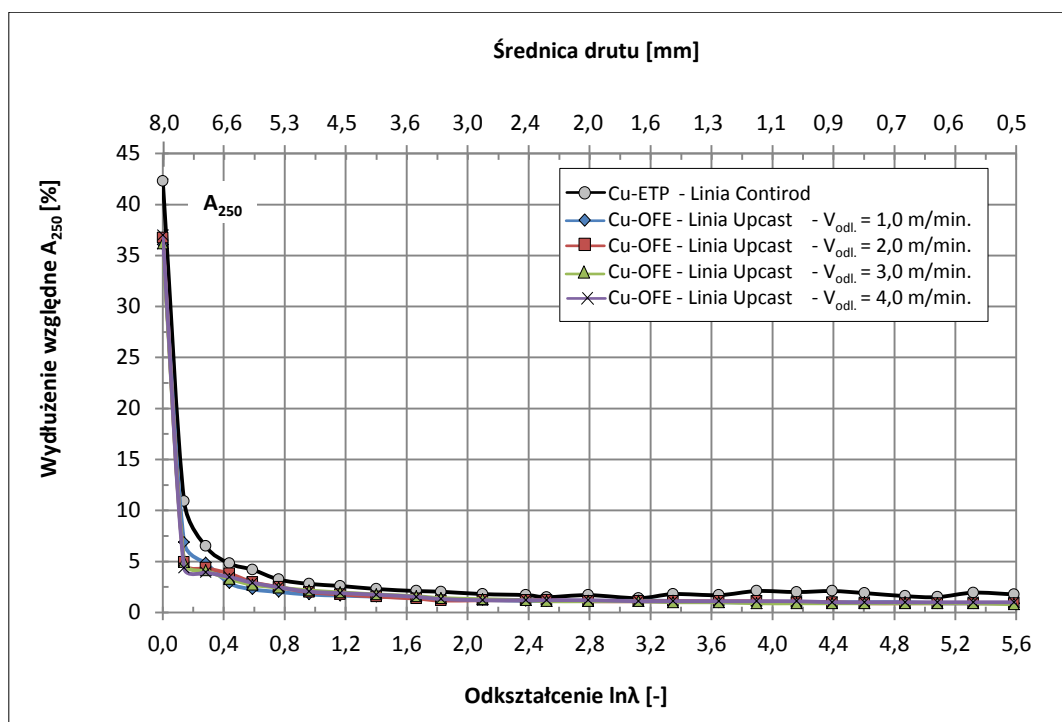
Rys. 9.2.55. Granica plastyczności drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania z zakresu 1,0 – 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 40 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



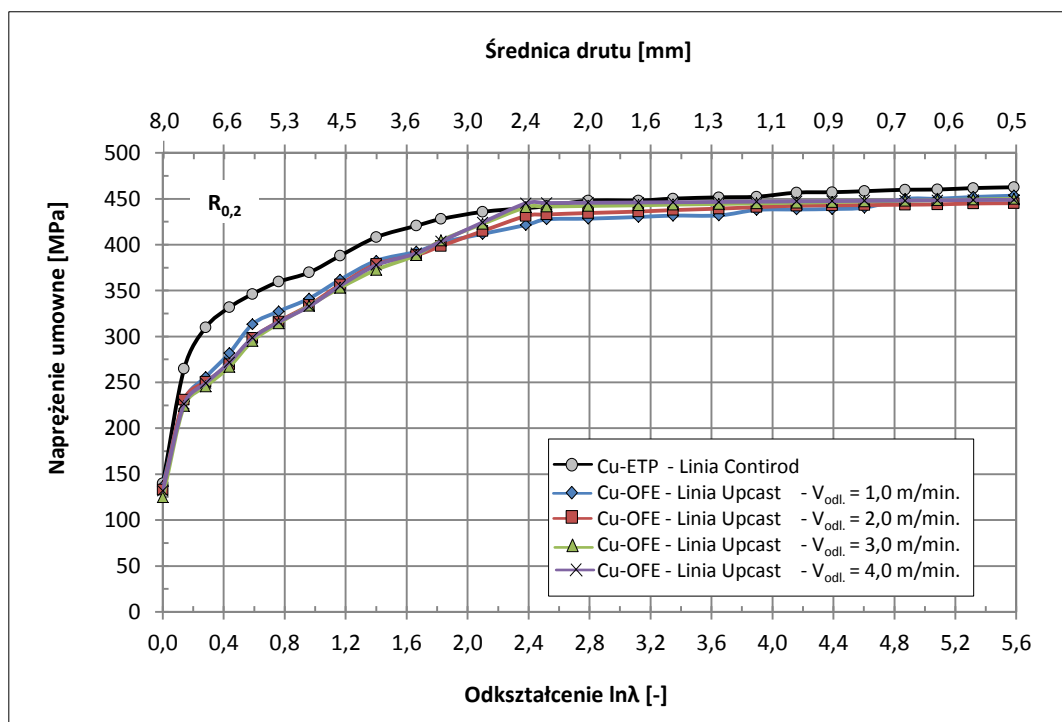
Rys. 9.2.56. Wytrzymałość na rozciąganie drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania z zakresu 1,0 – 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 40 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



Rys. 9.2.57. Wydłużenie równierne drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania z zakresu 1,0 – 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 40 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego

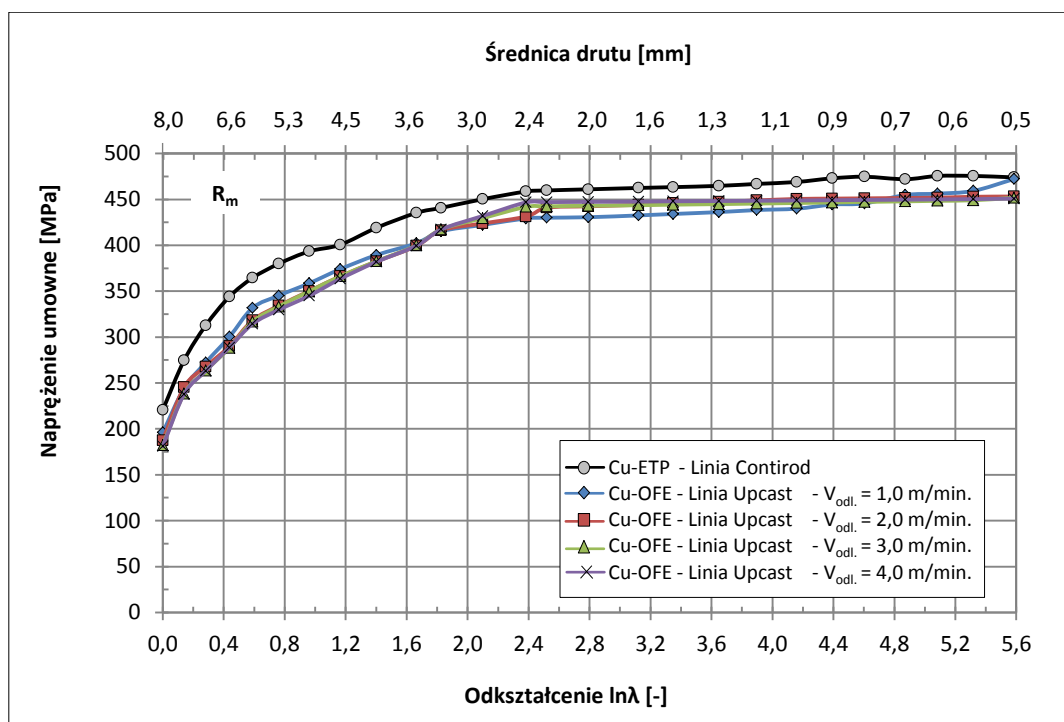


Rys. 9.2.58. Wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania z zakresu 1,0 – 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 40 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego

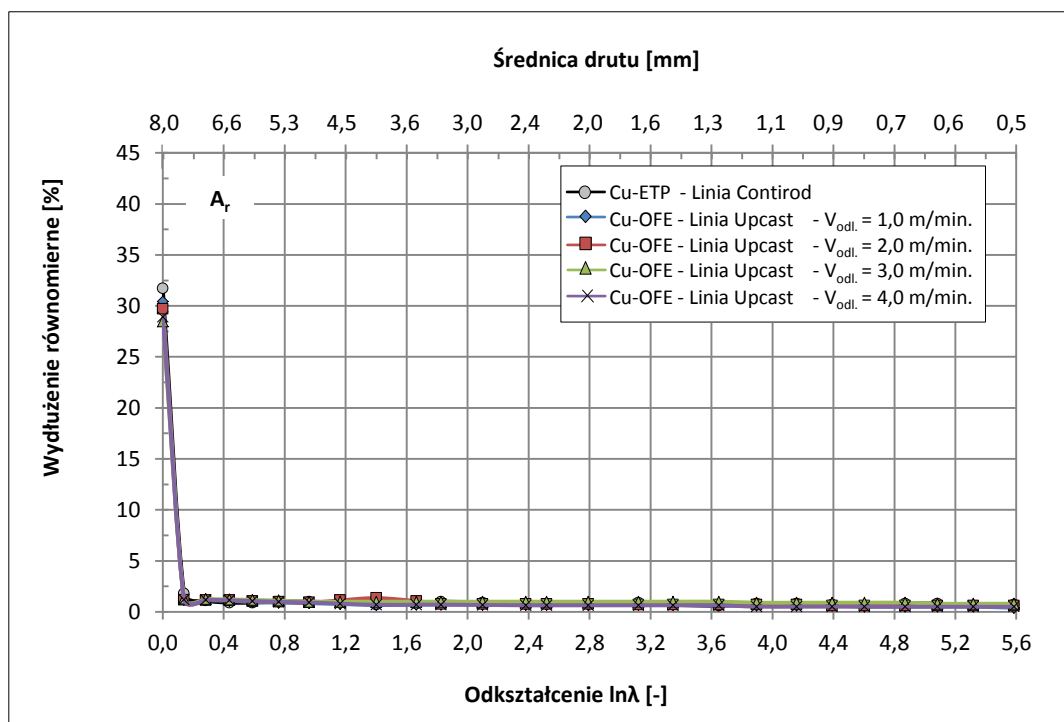


Rys. 9.2.59. Granica plastyczności drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania z zakresu 1,0 – 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 50 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego

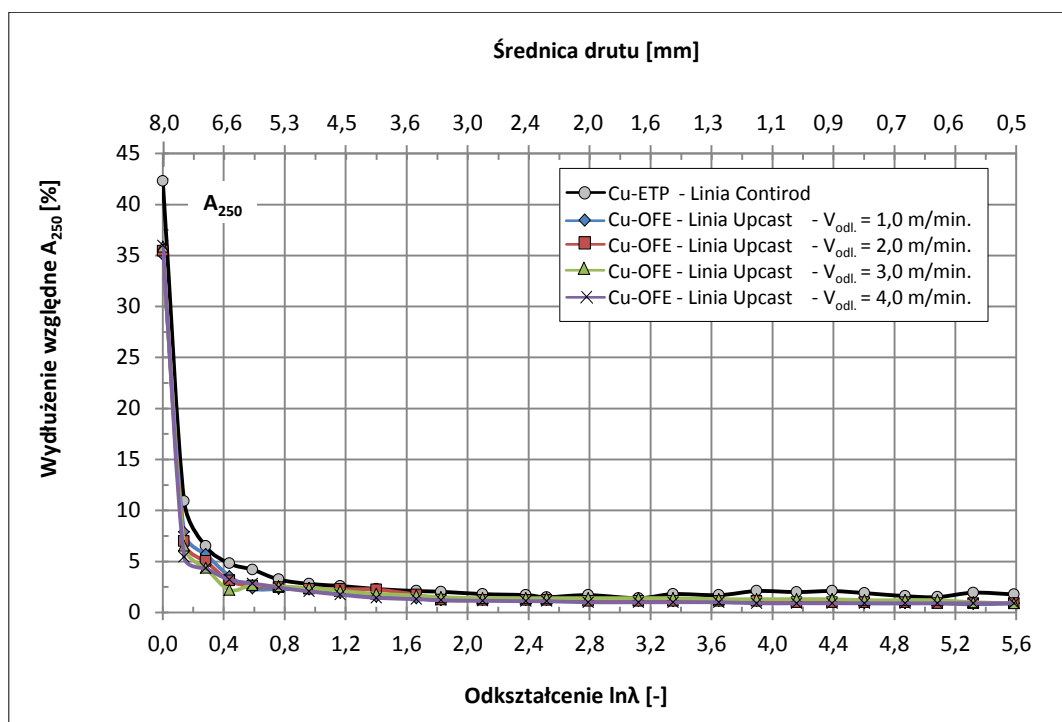




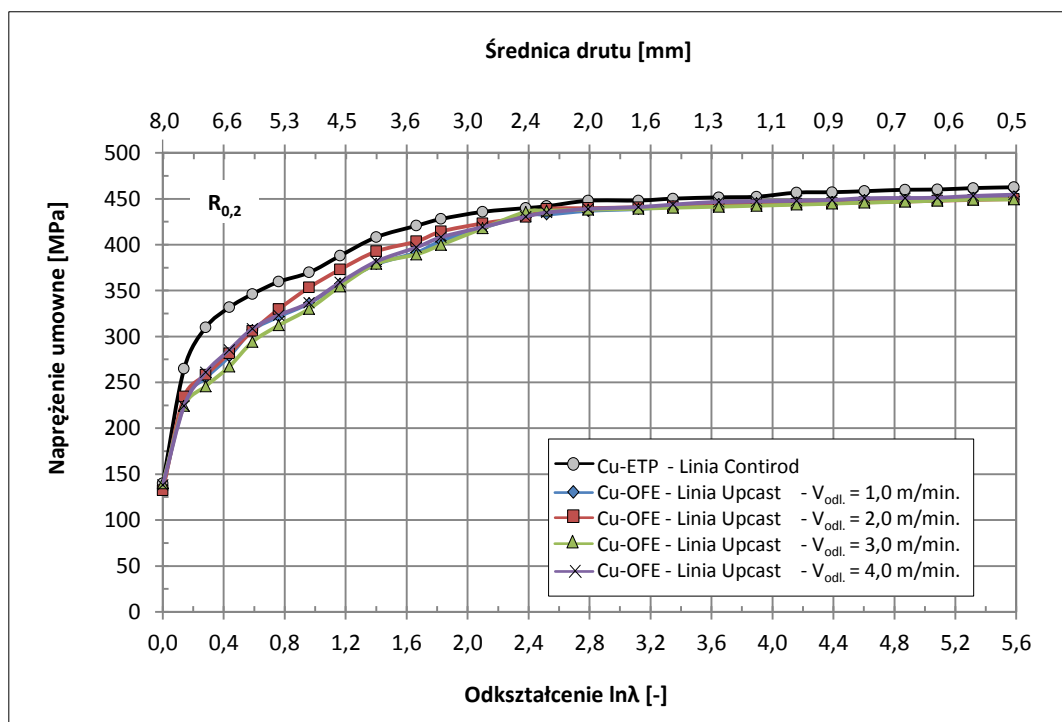
Rys. 9.2.60. Wytrzymałość na rozciąganie drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania z zakresu 1,0 – 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 50 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



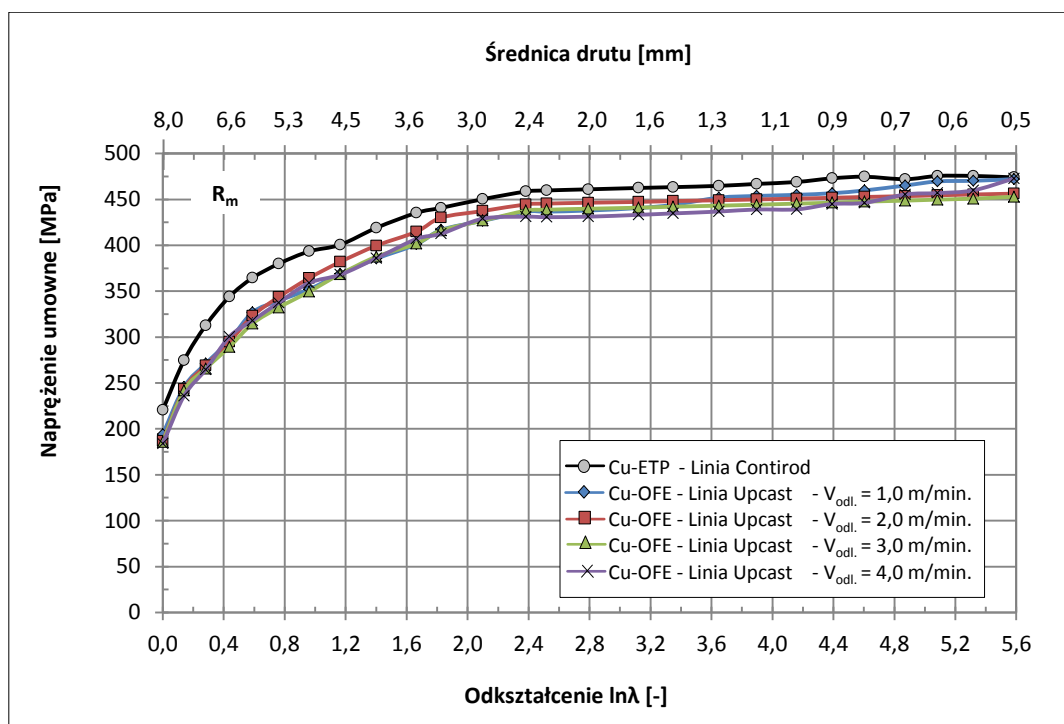
Rys. 9.2.61. Wydłużenie równierne drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania z zakresu 1,0 – 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 50 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



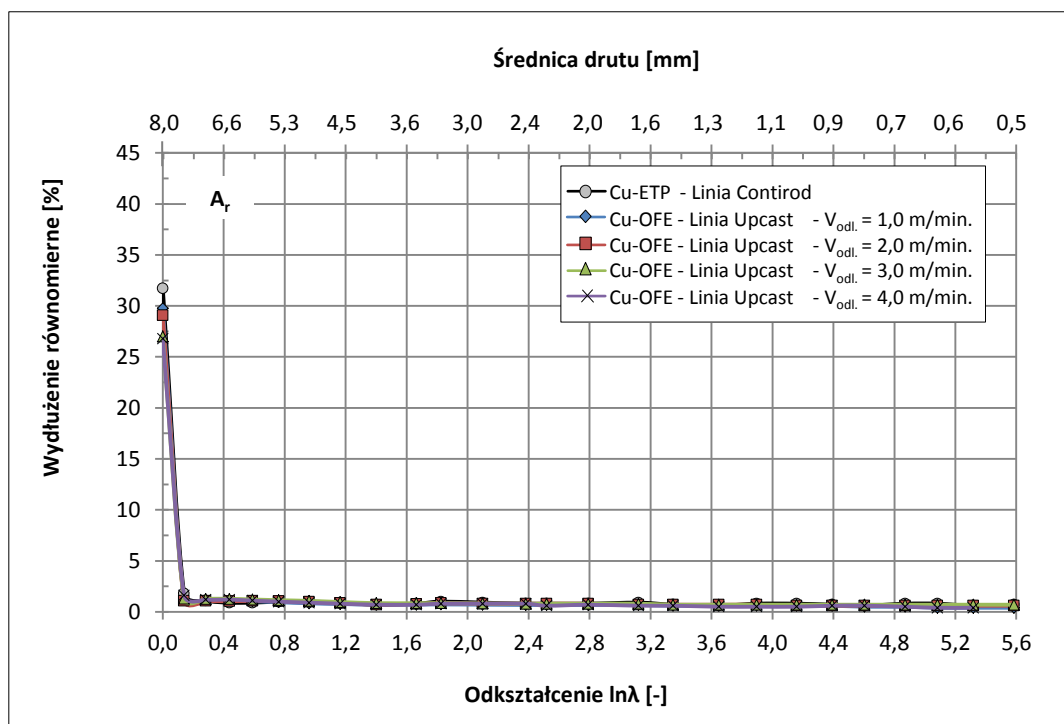
Rys. 9.2.62. Wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania z zakresu 1,0 – 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 50 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



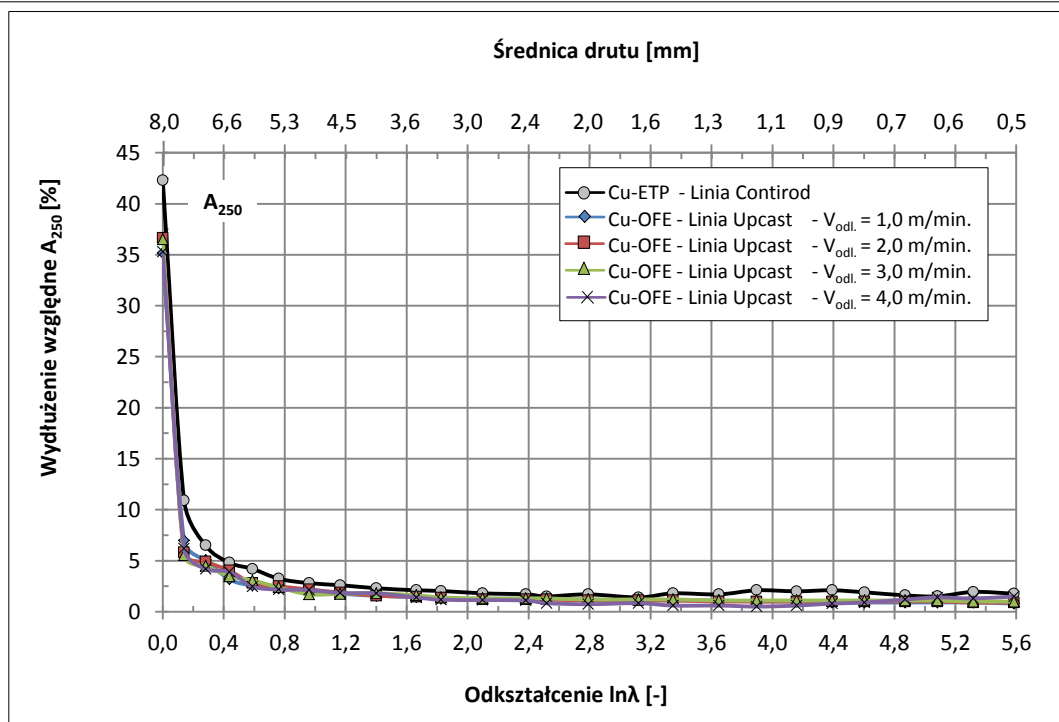
Rys. 9.2.63. Granica plastyczności drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania z zakresu 1,0 – 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



Rys. 9.2.64. Wytrzymałość na rozciąganie drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania z zakresu 1,0 – 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



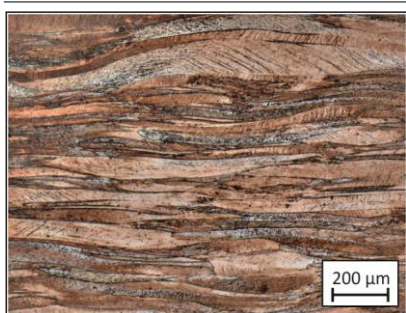
Rys. 9.2.65. Wydłużenie równierne drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania z zakresu 1,0 – 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



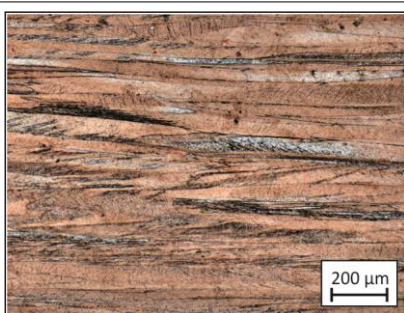
Rys. 9.2.66. Wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania z zakresu 1,0 – 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego

Analizując charakterystyki przedstawione na rysunkach 9.2.55 – 9.2.66 nie stwierdzono istotnych różnic w charakterystykach umacniania się drutów otrzymanych z prętów z miedzi beztlenowej z procesu ciągłego odlewania przy zróżnicowanych prędkościach odlewania. Osiągane przez poszczególne materiały różne poziomy własności mechanicznych zostają zniwelowane już podczas pierwszego stopnia ciągnięcia.

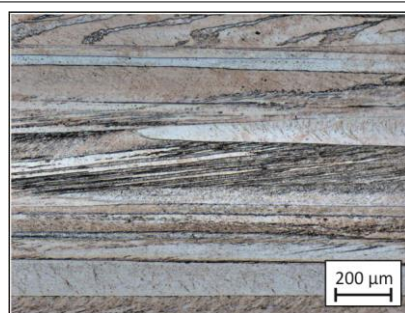
Zaobserwowano natomiast odmienną przebiegu umocnienia dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP w odniesieniu do miedzi w gatunku Cu-OFE. Wytrzymałość na rozciąganie materiałów wyjściowych kształtuje się na poziomie około 180 – 190 MPa dla odlewów i 220 MPa dla walcówki. Podczas pierwszych ciągów wytrzymałość na rozciąganie, a także granica plastyczności rośnie w sposób bardziej gwałtowny i stabilizuje się przy mniejszym odkształceniu w przypadku drutów otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP. Z kolei wydłużenie względne  $A_{250}$  maleje dla drutów z miedzi tlenowej w sposób bardziej łagodny. Jak nadmieniono wcześniej jest to wynikiem większej podatności do obróbki plastycznej materiału wytwarzanego technologią Contirod. Plastyczność determinowana jest strukturą drobnych ziaren tego materiału. Z kolei pręty z linii Upcast jako materiały wyjściowe do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty charakteryzują się dużymi ziarnami i umacniają się gwałtownie na drodze poślizgu i wzrostu dyslokacji. Pomimo, iż druty o przykładowych średnicach od 3,8 mm do 0,5 mm (por. rys. 9.2.32 – 9.2.41) wykonane z obydwu gatunków materiałów prezentują podobne własności wytrzymałości na rozciąganie na poziomie około 440 MPa, a także wydłużenia względnego około 1 % – co jest dowodem na to, że z mechanicznego punktu widzenia materiały zaczynają się do siebie upodabniać, to ich struktura jest zgoła odmienna. Podyktowana jest ona różnicami strukturalnymi wsadu do procesu ciągnięcia. W tym celu warto prześledzić zdjęcia mikrostruktur drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymanych w procesie ciągnięcia prętów pochodzących z procesu ciągłego odlewania Upcast z prędkościami 3,0 m/min.; 2,0 m/min. i 1,0 m/min. Zilustrowane na rysunkach 9.2.67 – 9.2.81, oprócz obrazów przedstawionych poprzednio na ilustracjach 9.2.30 – 9.2.43 stanowią całościową analizę wpływu warunków odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na strukturę drutów po procesie ciągnięcia.



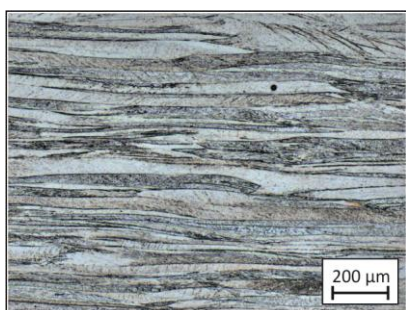
Rys. 9.2.67. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 3,7 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 3,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



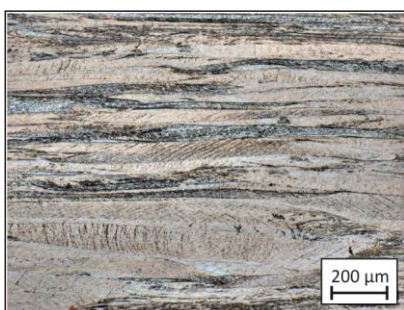
Rys. 9.2.68. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 3,7 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 2,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



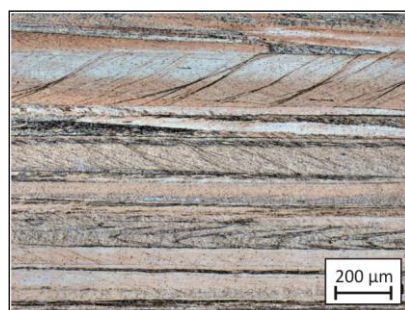
Rys. 9.2.69. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 3,7 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



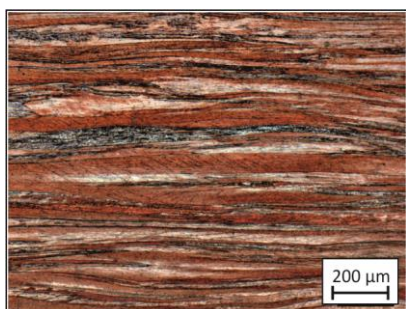
Rys. 9.2.70. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 3,2 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 3,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



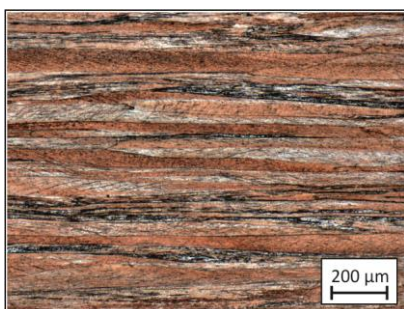
Rys. 9.2.71. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 3,2 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 2,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



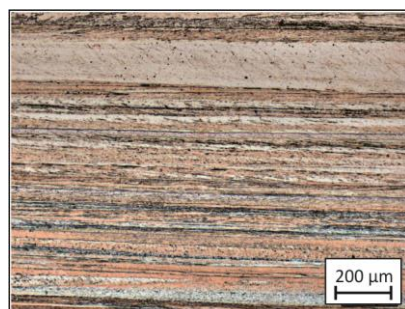
Rys. 9.2.72. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 3,2 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



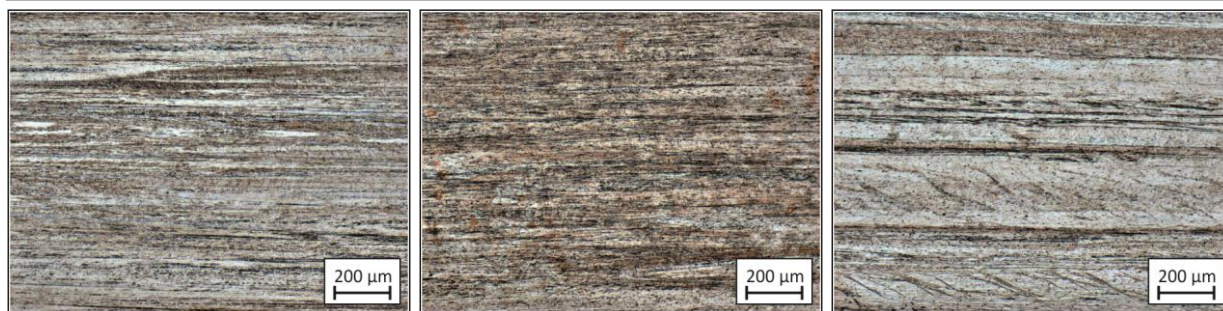
Rys. 9.2.73. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,7 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 3,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



Rys. 9.2.74. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,7 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 2,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



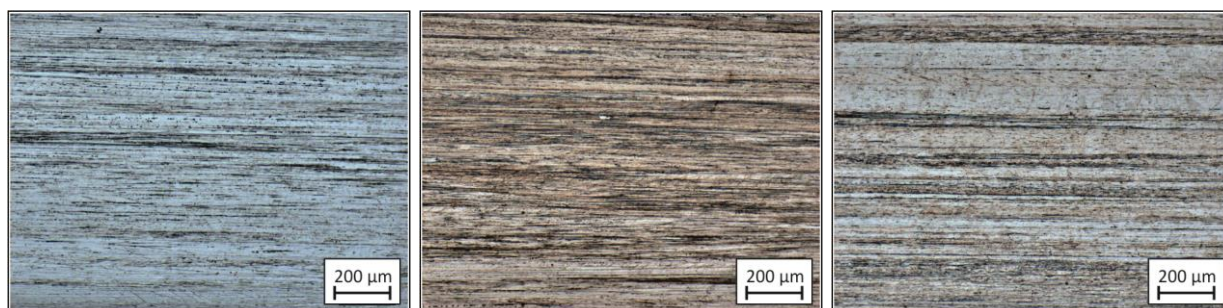
Rys. 9.2.75. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,7 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



Rys. 9.2.76. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,3 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 3,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny

Rys. 9.2.77. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,3 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 2,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny

Rys. 9.2.78. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,3 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny



Rys. 9.2.79. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 1,8 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 3,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny

Rys. 9.2.80. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 1,8 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 2,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny

Rys. 9.2.81. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 1,8 mm otrzymanego z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min). Mikroskop świetlny

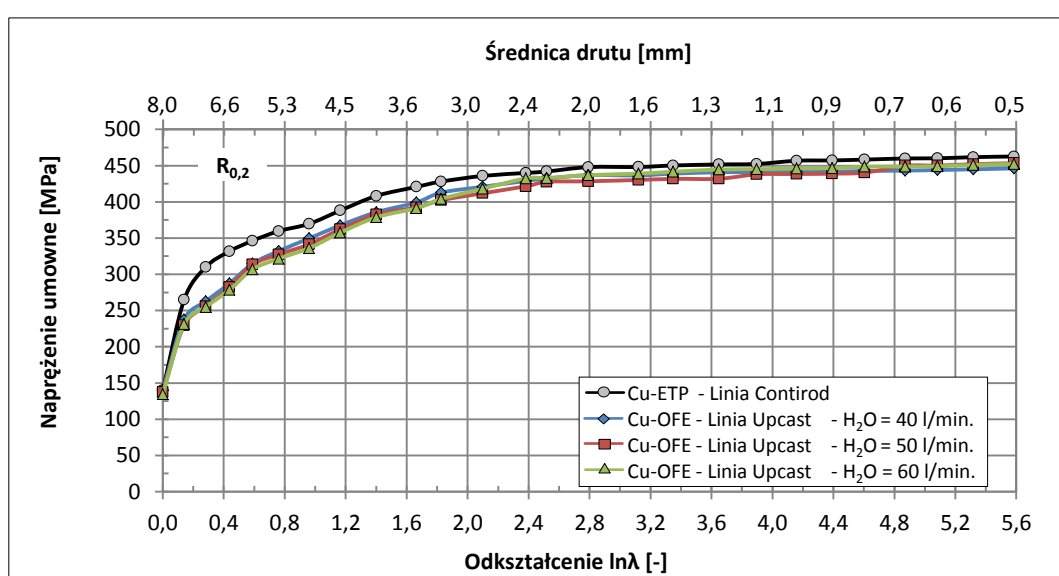
Na podstawie analizy zdjęć mikrostruktur drutów otrzymanych w procesie ciągnięcia zauważono, że im mniejsza prędkość odlewania materiału wsadowego, z którego otrzymano druty o przedstawionych na ilustracjach średnicach tym wykazują one większe, ukierunkowane ziarna. Z kolei analiza struktur drutów otrzymanych w procesie ciągnięcia materiału wsadowego przy tej samej prędkości odlewania (3,0 m/min.; 2,0 m/min. lub 1,0 m/min.) pozwala na stwierdzenie, że wraz ze wzrostem stopnia odkształcenia materiał charakteryzuje się coraz to większą ilością wzdłużnych ziaren.

Zauważone na podstawie obserwacji mikrostruktur różnice pomiędzy drutami otrzymanymi z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP (por. rys. 9.2.30 – 9.2.43, 9.2.67 – 9.2.81) powinny uwidocznąć się w odmiennym zachowaniu drutów podczas badań odporności cieplnej – stanowiącej przedmiot badań w ramach podrozdziału 9.3.

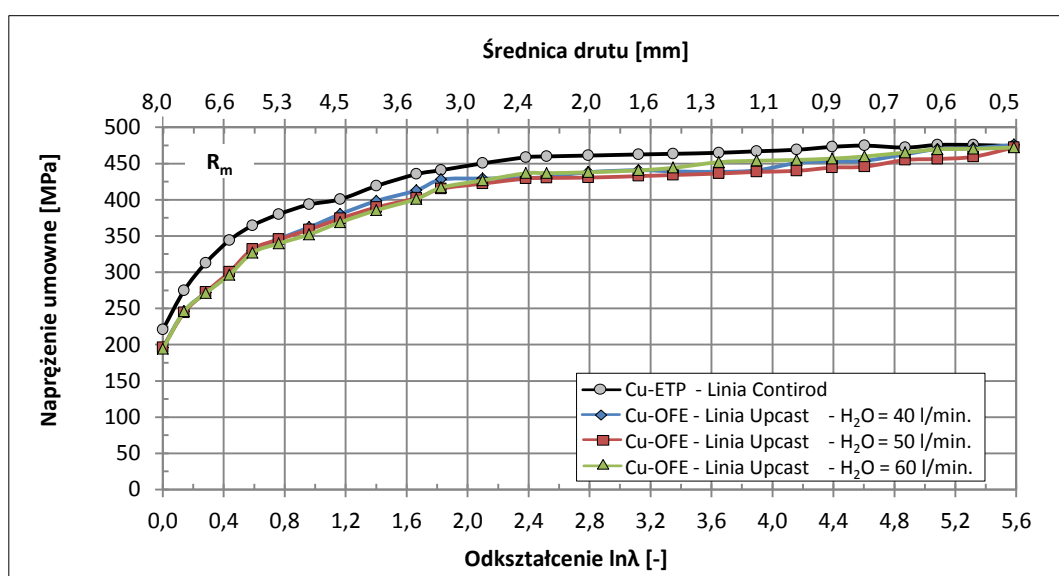
Przeprowadzone w niniejszym podrozdziale badania własności mechanicznych i obserwacje mikrostruktur umożliwiły analizę wpływu prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na proces umacniania się drutów w procesie ciągnięcia. Drugim, istotnym parametrem procesu odlewania analizowanym w ramach charakteryzacji własności drutów po procesie ciągnięcia w niniejszej pracy jest wydatek wody chłodzącej krystalizator. Temat ten stanowi przedmiot analizy w kolejnym podrozdziale 9.2.5.

### 9.2.5. Analiza wpływu wydatku wody chłodzącej krystalizator w procesie ciągłego odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na umacnianie się drutów w procesie ciągnięcia

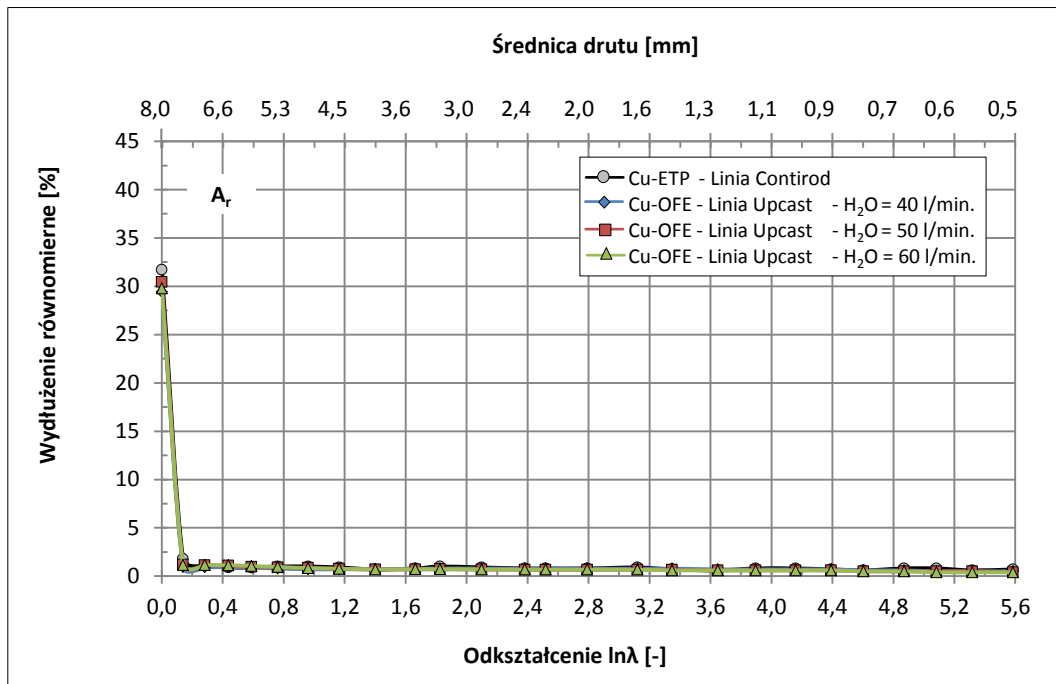
Kontynuując w ramach niniejszego podrozdziału problematykę wpływu parametrów procesu odlewania na własności mechaniczne drutów po procesie ciągnięcia analizie poddano wyniki badań dotyczące granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  dla materiałów otrzymanych przy zastosowaniu podczas procesu ciągłego odlewania sposobem Upcast stałej prędkości odlewania oraz zróżnicowanych przepływów wody chłodzącej krystalizator. W tym celu na rysunkach 9.2.82 – 9.2.85 zilustrowano krzywe umocnienia drutów uzyskanych z materiałów wsadowych, dla których szybkość odlewania oraz wydatek wody chłodzącej kształtowały się na poziomie wynoszącym odpowiednio 1,0 m/min. oraz od 40 l/min. do 60 l/min. Dane liczbowe do konstrukcji wykresów zamieszczono w aneksie w tabelach A9.2.1 oraz A9.2.5 – A9.2.10.



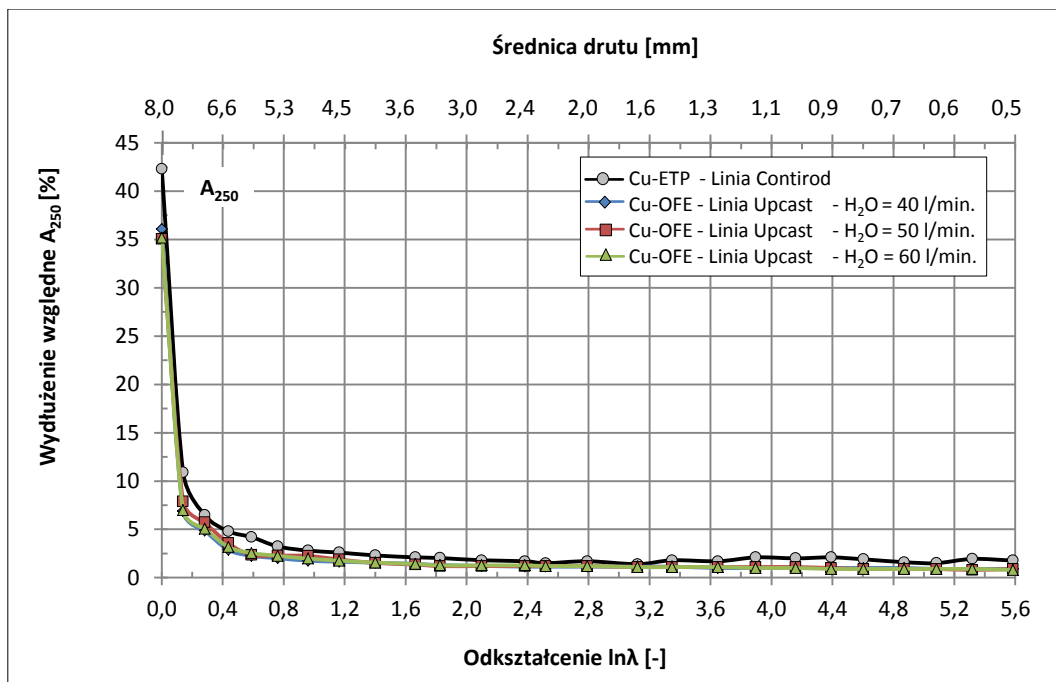
Rys. 9.2.82. Granica plastyczności drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 1,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



Rys. 9.2.83. Wytrzymałość na rozciąganie drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 1,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



Rys. 9.2.84. Wydłużenie równierne drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 1,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



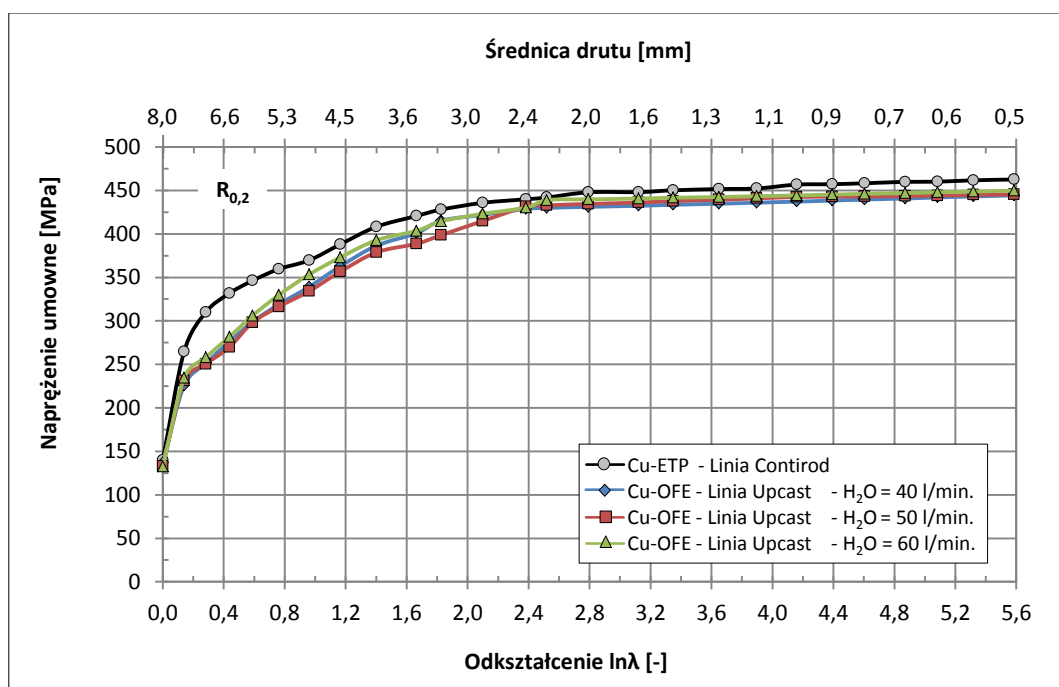
Rys. 9.2.85. Wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 1,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego

Na podstawie analizy przebiegów charakterystyk przedstawionych na rysunkach 9.2.82 – 9.2.85 zwrócono uwagę na fakt, że krzywe umocnienia drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z procesu ciągłego odlewania przy zastosowaniu stałej prędkości odlewania na poziomie 1,0 m/min. oraz zmiennych wydatków wody chłodzącej w ilościach od 40 l/min. do 60 l/min. nie wykazują większego zróżnicowania przebiegów. Zaobserwowano, że dla materiałów poddanych umocnieniu odkształceniowemu do wartości  $\ln\lambda = 5,6$  charakterystyki w znacznym stopniu pokrywają się ze sobą.

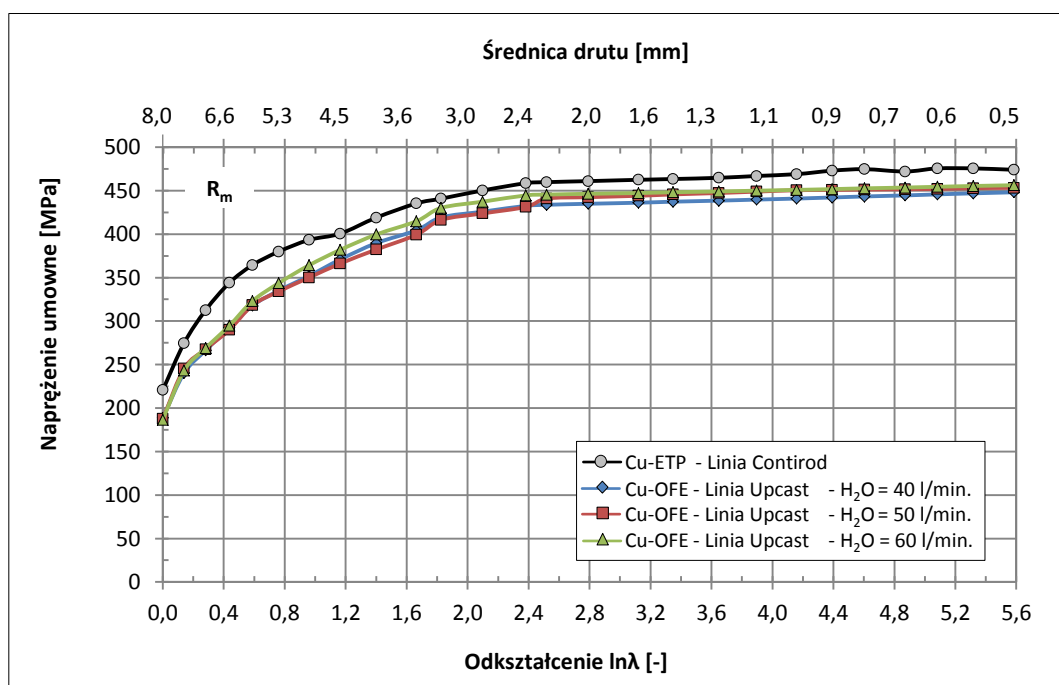
Na kolejnym etapie pracy w oparciu o wykresy przedstawione na rysunkach 9.2.86 – 9.2.97 prześlędzono także jak kształtują się krzywe dla drutów bazujących na materiałach wsadowych z linii



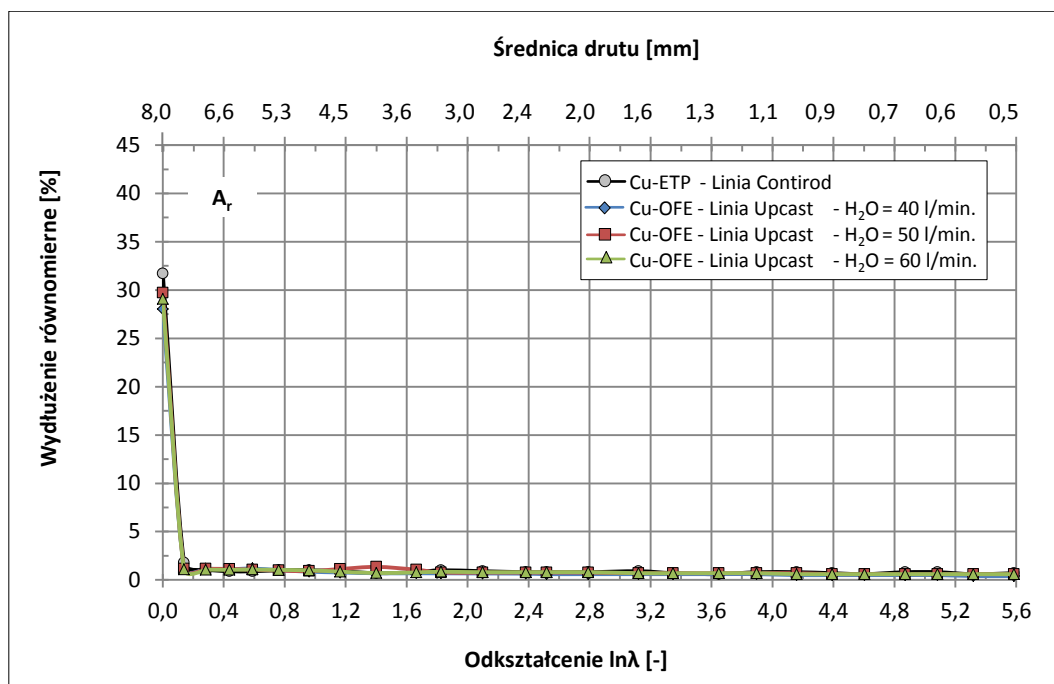
Upcast otrzymanych przy większych prędkościach odlewania i ilości wody chłodzącej na poziomie 40 – 60 l/min. W szczególności charakterystyki ukazane na ilustracjach 9.2.86 – 9.2.89 – dotyczą drutów o średnicach od 7,5 do 0,5 mm otrzymanych z prętów z procesu ciągłego odlewania z szybkością 2,0 m/min.; natomiast kolejne 9.2.90 – 9.2.93 – przy prędkości 3,0 m/min. oraz 9.2.94 – 9.2.97 – 4,0 m/min.



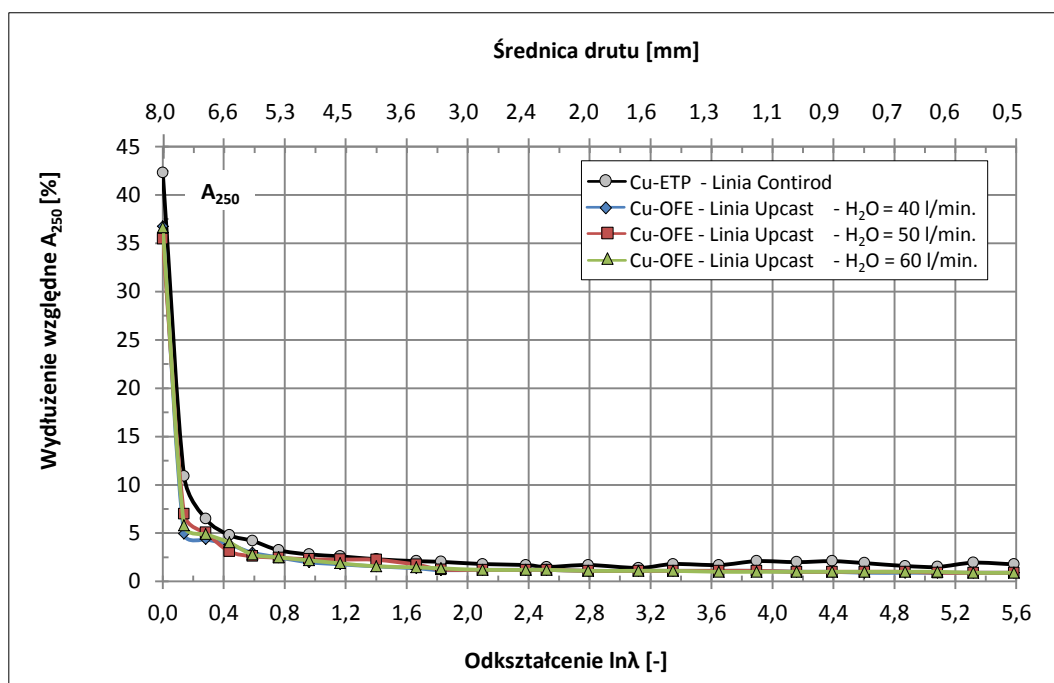
Rys. 9.2.86. Granica plastyczności drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 2,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



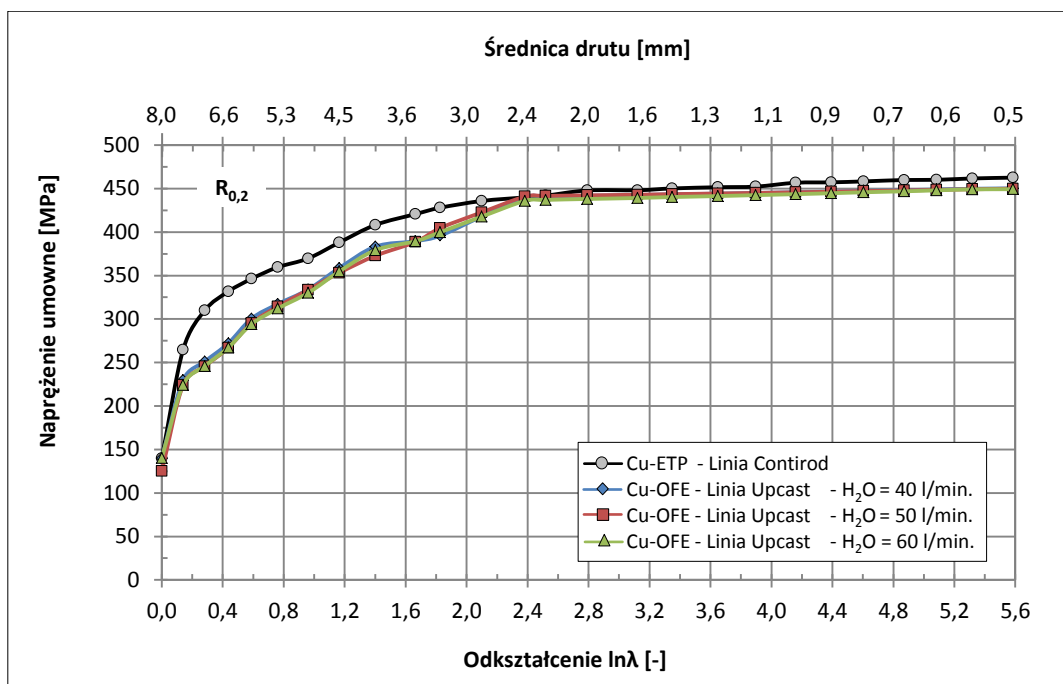
Rys. 9.2.87. Wytrzymałość na rozciąganie drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 2,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



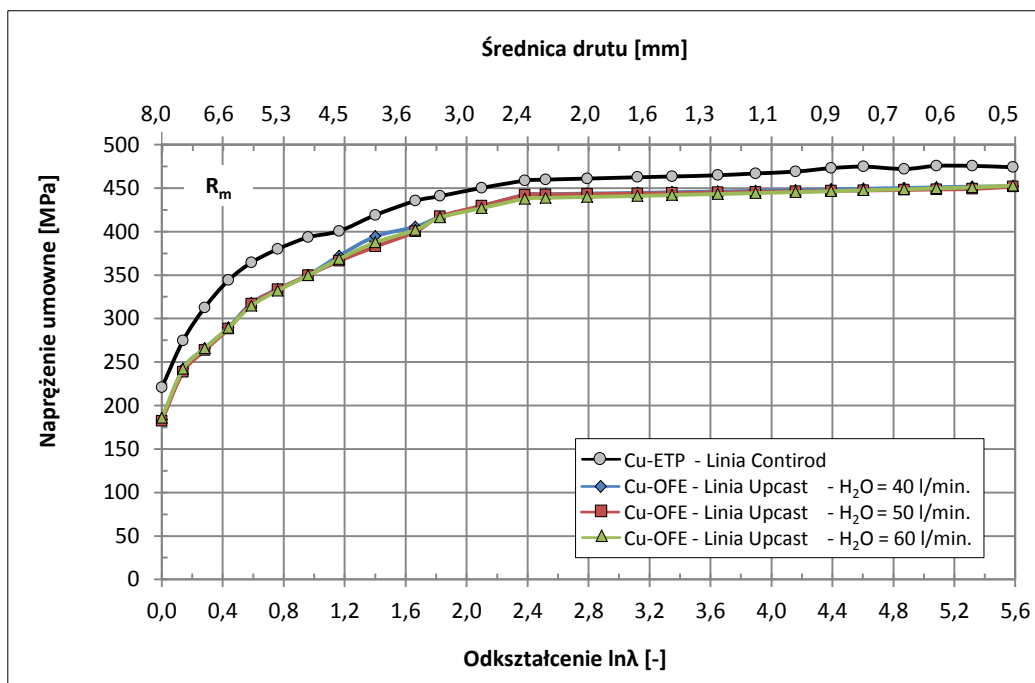
Rys. 9.2.88. Wydluzenie rownomierne drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 2,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odsztalcenia rzeczywistego



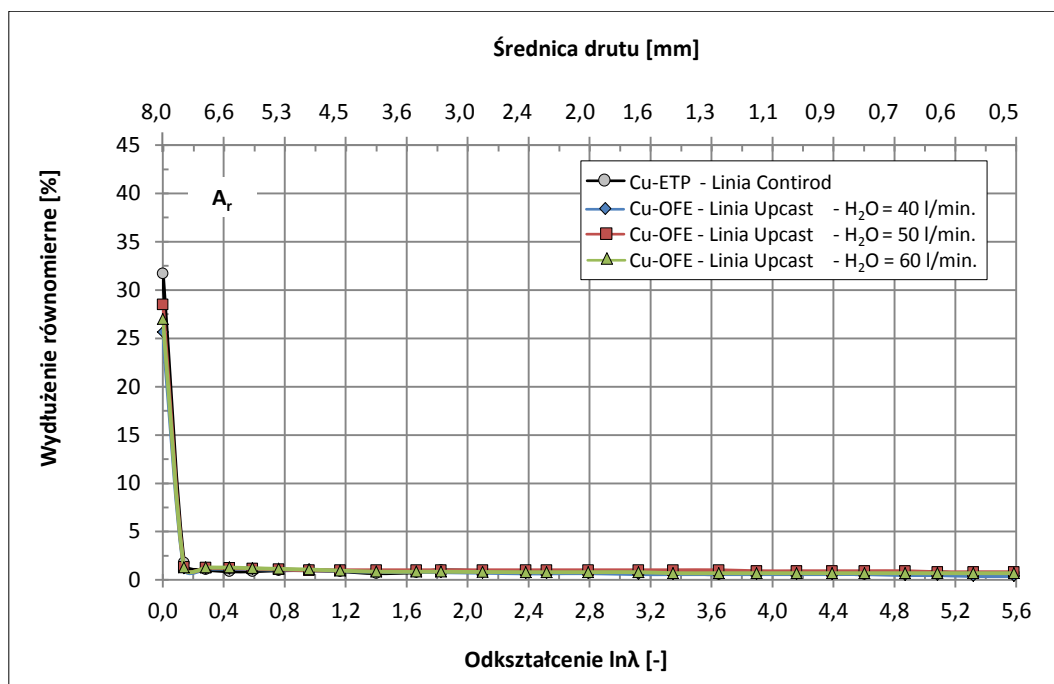
Rys. 9.2.89. Wydluzenie wzgledne  $A_{250}$  drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 2,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odsztalcenia rzeczywistego



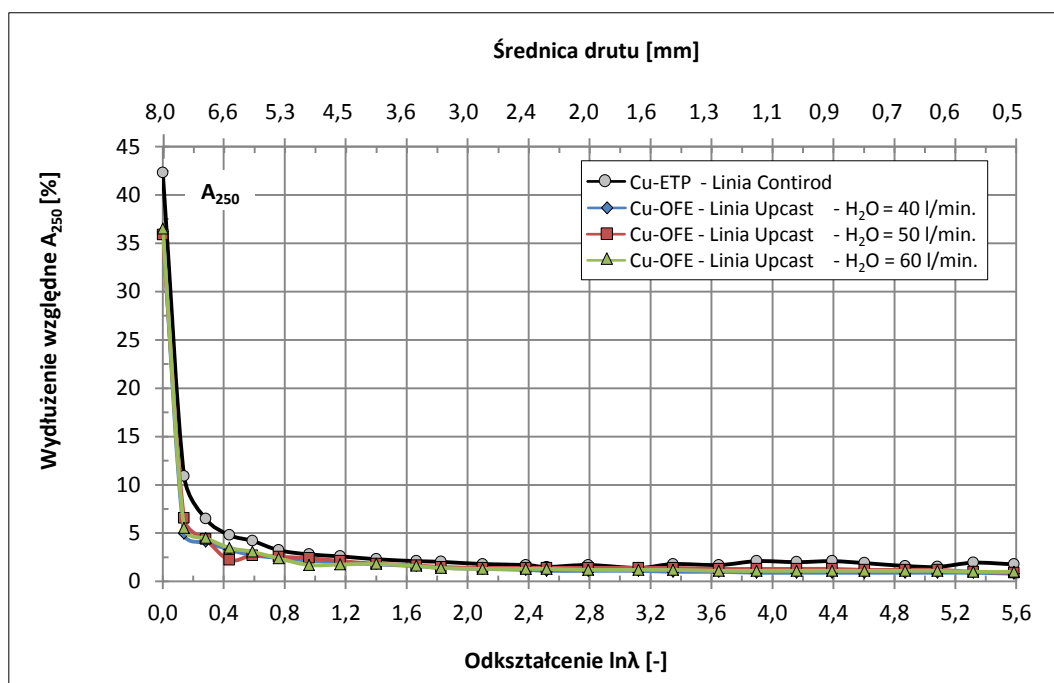
Rys. 9.2.90. Granica plastyczności drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 3,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



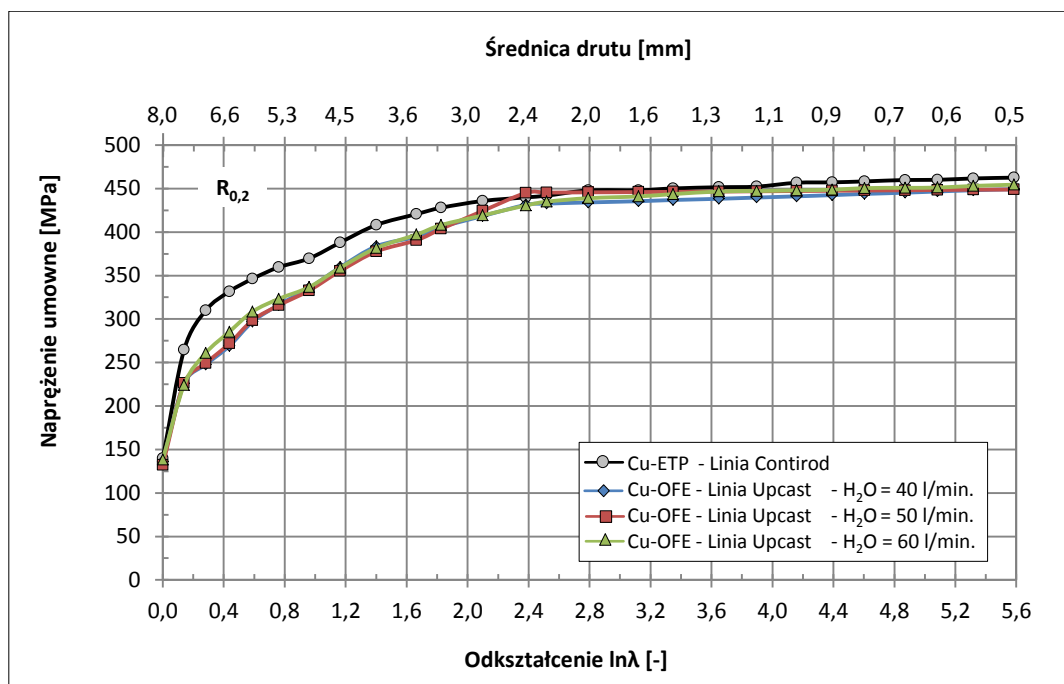
Rys. 9.2.91. Wytrzymałość na rozciąganie drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 3,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



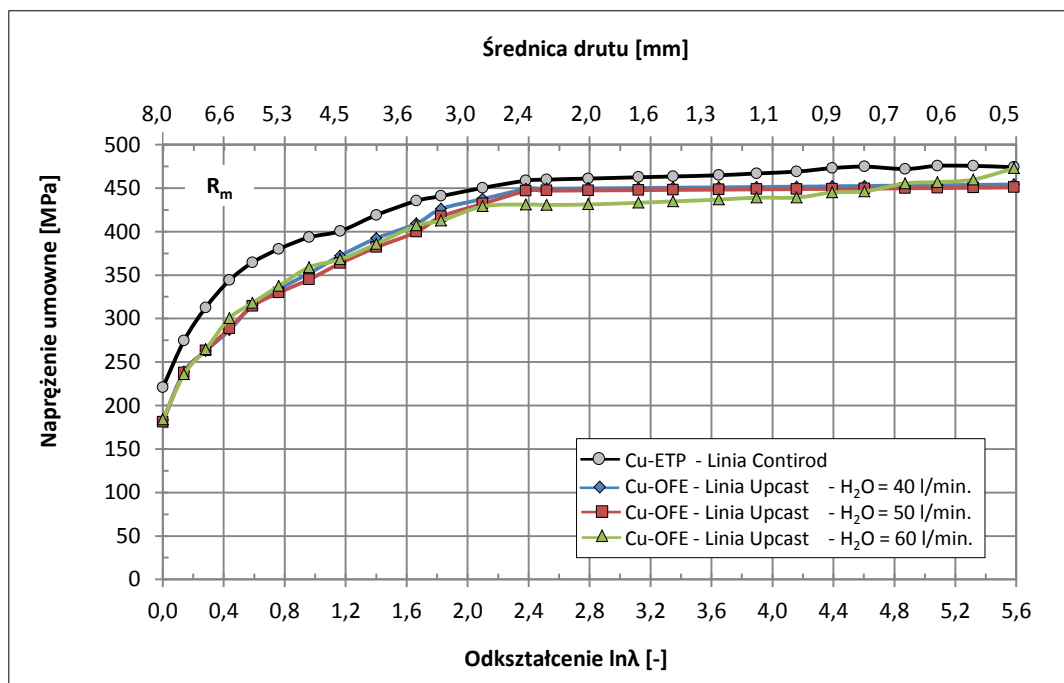
Rys. 9.2.92. Wydluzenie rownomierne drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 3,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



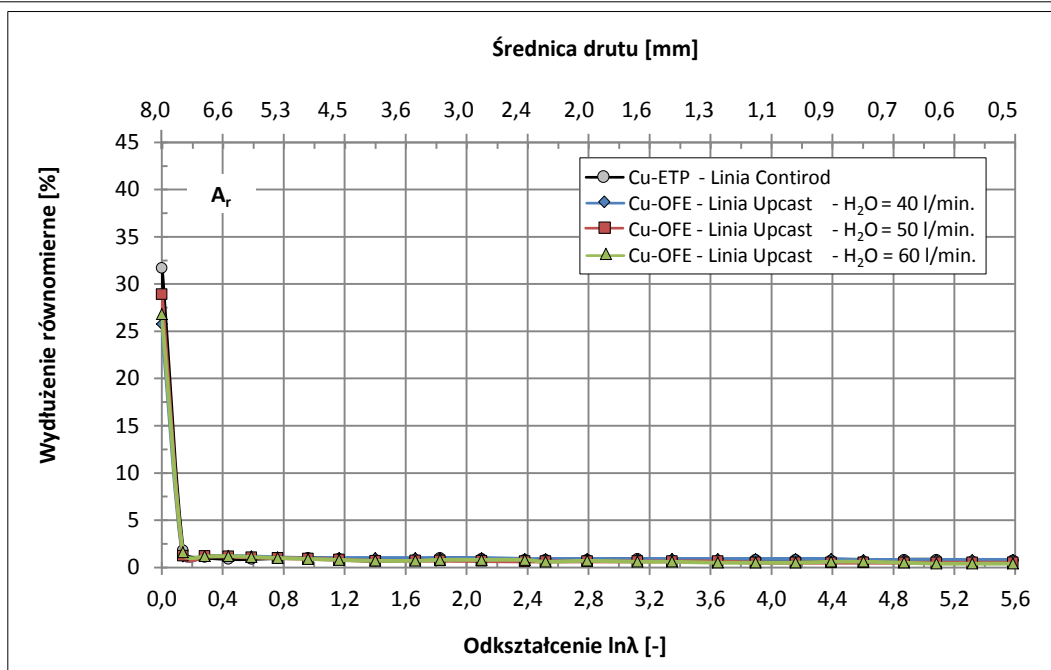
Rys. 9.2.93. Wydluzenie względne  $A_{250}$  drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 3,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



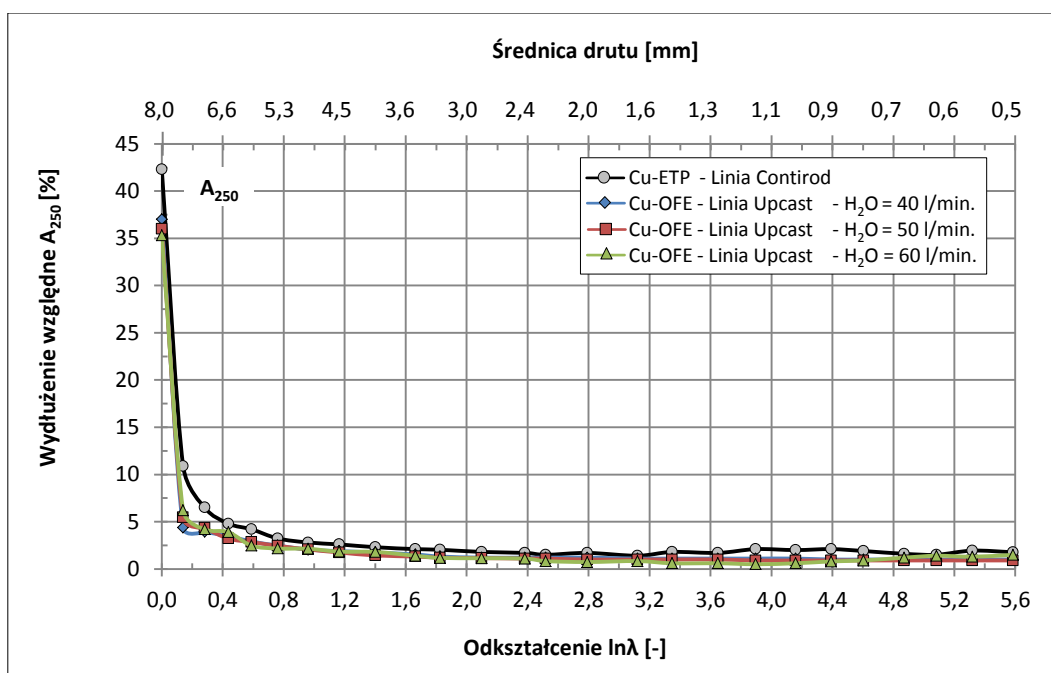
Rys. 9.2.94. Granica plastyczności drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



Rys. 9.2.95. Wytrzymałość na rozciąganie drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



Rys. 9.2.96. Wydłużenie równierne drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego



Rys. 9.2.97. Wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. oraz Cu-ETP otrzymanej w procesie Contirod w funkcji odkształcenia rzeczywistego

Analizując wykresy przedstawione na powyższych rysunkach, a także dane zamieszczone w aneksie w tabelach A9.2.1, A9.2.6 – A9.2.10 dostrzeżono brak wpływu w badanym zakresie ilości wody chłodzącej krystalizator w procesie ciągłego odlewania prętów z miedzi beztlenowej na charakter umacniania się drutów. Obserwacja dotyczy zarówno własności wytrzymałościowych materiałów, jak również ich właściwości plastycznych.

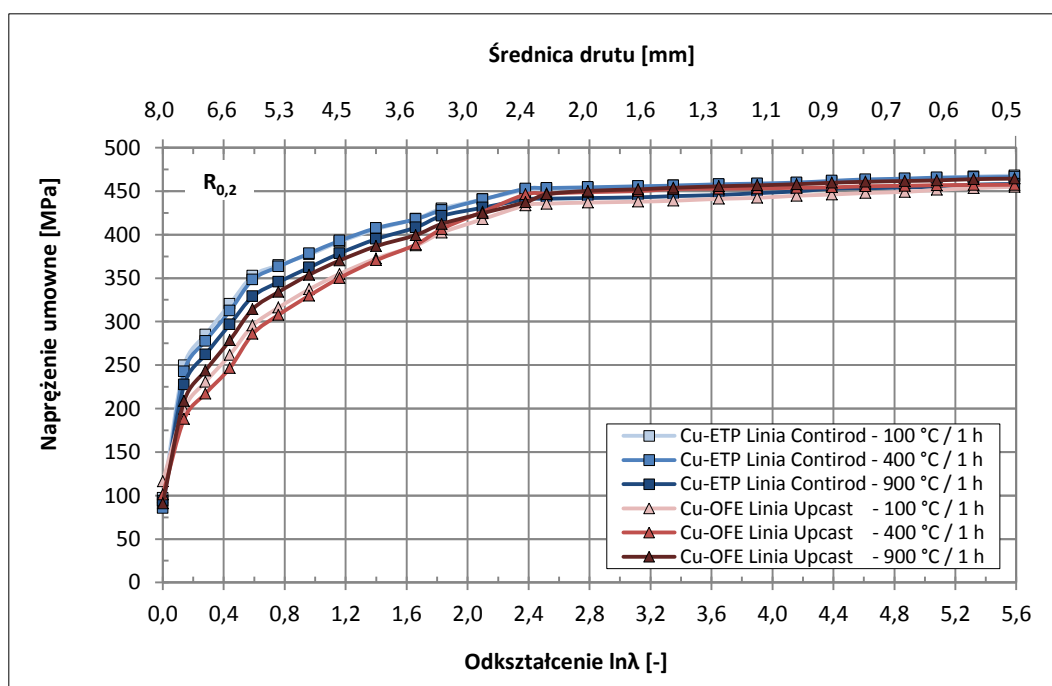
Na podstawie powyższych obserwacji warto nadmienić, że druty z dwóch gatunków miedzi (Cu-OFE, Cu-ETP) o jakże odmiennym pochodzeniu osiągnęły podobny poziom własności wytrzymałościowych i plastycznych po dużym odkształceniu. To dowód na to, że z mechanicznego punktu materiały zaczynają się do siebie upodabniać.

Wobec badań, których celem było określenie wpływu parametrów procesu odlewania materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej i tlenowej na umacnianie się drutów warto zadać pytanie – w jakim stopniu ulegną zmianie i jak ostatecznie kształtować się będą własności drutów z dwóch gatunków miedzi, jeżeli ich materiały wsadowe zostaną poddane ingerencji zmiennej temperatury? Wiedząc na podstawie badań przeprowadzonych w ramach podrozdziału 9.1.2.1.4, iż temperatura powodując fizyczne zmiany w strukturze wpływa na zróżnicowanie właściwości wytrzymałościowych i plastycznych materiałów o średnicach nominalnych 8,0 mm w ramach kolejnego podrozdziału – 9.2.6 przeprowadzono obserwacje, których celem było określenie wpływu dodatkowych zabiegów obróbki cieplnej prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskanych sposobem Upcast przy standardowych parametrach procesu odlewania tj. prędkości 4,0 m/min. i wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min., a także walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP na własności mechaniczne drutów po procesie ciągnięcia. Tym samym badania te stanowiły kontynuację podjętej w podrozdziale 9.1.2.1.4 problematyki nad identyfikacją materiałów wsadowych poddanych zabiegom obróbki cieplnej oraz umożliwiły odpowiedź na pytanie jak w związku z tym zmieniają się właściwości drutów po procesie ciągnięcia.

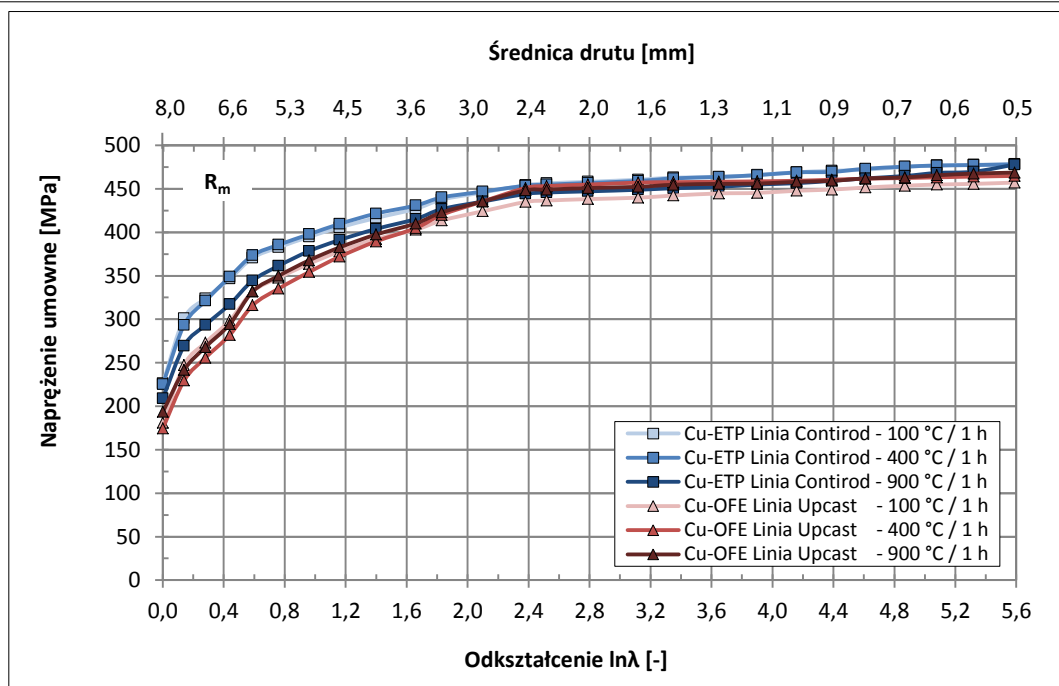
### 9.2.6. Analiza wpływu obróbki cieplnej materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na umacnianie się drutów w procesie ciągnięcia

Istotą tej części badań procesu umacniania się drutów otrzymanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP poddanych zabiegom obróbki cieplnej było określenie jej wpływu na kształtowanie granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  drutów. Podstawą do wykonania tych badań stała się przeprowadzona w ramach podrozdziału 9.1.2.1.4 identyfikacja prętów i walcówek po procesie wygrzewania w różnym zakresie temperatury i czasu obróbki cieplnej, która ujawniła zróżnicowanie własności materiałów.

Na rysunkach 9.2.98 i 9.2.99 zilustrowano wyniki badań zmian wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności drutów uzyskanych z prętów i walcówek poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 100 °C, 400 °C i 900 °C w czasie 1 godziny. Dane liczbowe do konstrukcji tych charakterystyk zamieszczono w aneksie w tabelach A9.2.11 i A9.2.12.



Rys. 9.2.98. Granica plastyczności drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 100 °C, 400 °C i 900 °C oraz czasie 1 h w funkcji odkształcenia rzeczywistego

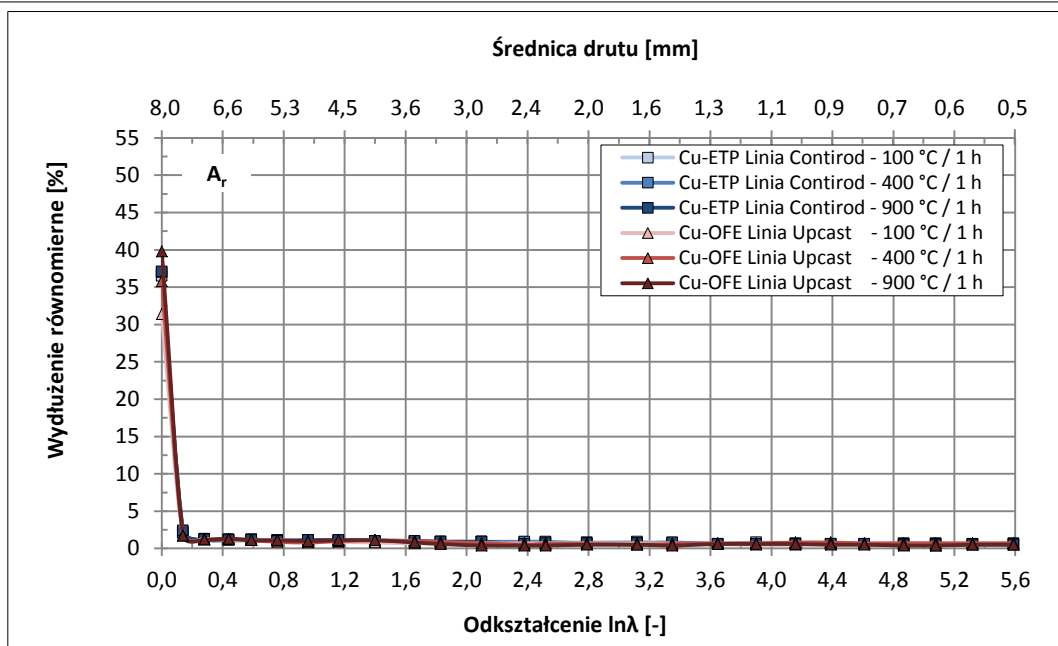


Rys. 9.2.99. Wytrzymałość na rozciąganie drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 100 °C, 400 °C i 900 °C oraz czasie 1 h w funkcji odkształcenia rzeczywistego

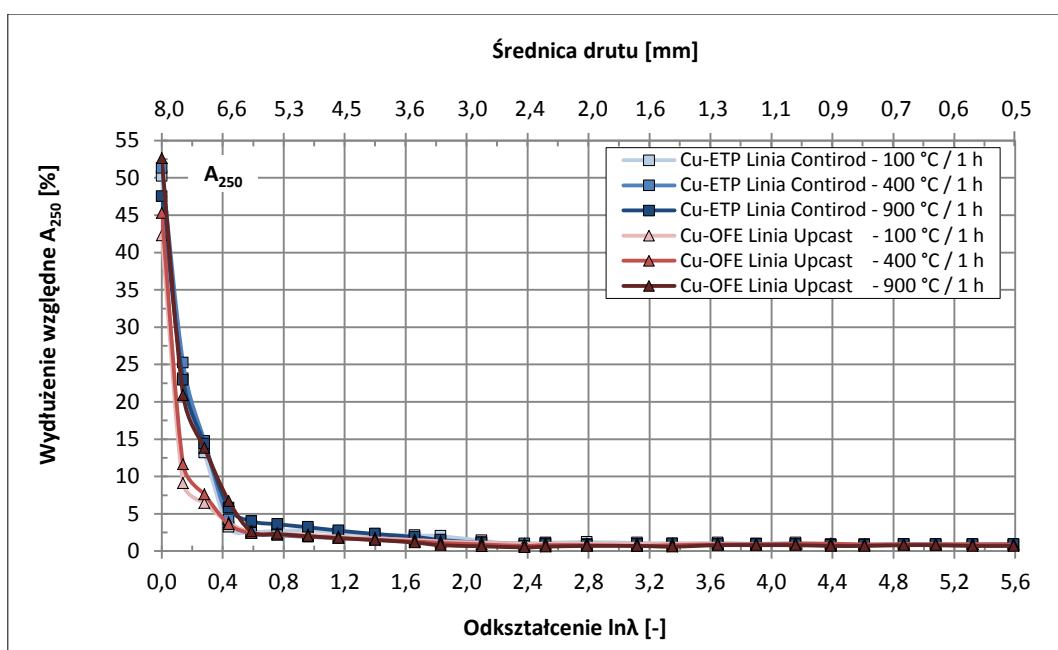
Z przedstawionych charakterystyk wynika, że przyrost granicy plastyczności umocnionych drutów otrzymanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP kształtuje się na poziomie około 360 – 370 MPa. Z kolei przyrost wytrzymałość na rozciąganie materiałów z miedzi beztlenowej na skutek umocnienia wynosi około 280 MPa, natomiast z miedzi tlenowej około 260 MPa. Powyższe obserwacje dotyczą drutów uzyskanych zarówno z prętów, jak i walcówek poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 100 °C, 400 °C i 900 °C. Zanotowana podczas badań różnica pomiędzy wartościami wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności drutów wraz ze wzrostem stopnia redukcji średnicy maleje od około 80 MPa do 8 MPa w przypadku materiału po linii Contirod oraz od około 45 MPa do 18 MPa dla prętów po linii Upcast (por. rys. 9.2.21, 9.2.22, tabela A9.2.1). Z kolei dla drutów po procesie ciągnięcia walcówek i prętów wygrzewanych w temperaturze 100 °C i 400 °C omawiana różnica zmniejszyła się od odpowiednio 130 MPa do 10 MPa (por. rys. 9.2.98, 9.2.99, tabela A9.2.11) oraz od około 70 MPa do 5 MPa (por. rys. 9.2.98, 9.2.99, tabela A9.2.12). Natomiast dla drutów uzyskanych z walcówek i prętów wygrzewanych w najwyższej z temperatur – 900 °C – odpowiednio od około 110 MPa do 20 MPa oraz od około 100 MPa do 4 MPa. Ponadto zaobserwowano stabilizację umocnienia materiałów przy wartości odkształcenia rzeczywistego równego około  $\ln\lambda = 2,4$ . Stwierdzono również, iż najwyższą granicę plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie wykazały druty otrzymane z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP wygrzewanej w temperaturze 100 °C i 400 °C, najniższą natomiast charakteryzowały się próbki bazujące na materiale wsadowym wyżarzonym w temperaturze 900 °C. Z kolei zestawiając właściwości wytrzymałościowe dla drutów z miedzi beztlenowej zaobserwowano, iż najwyższą wartość wytrzymałości na rozciąganie po przeciągnięciu materiału na finalną średnicę 0,5 mm wykazał materiał bazujący na przecie wyżarzonej w temperaturze 900 °C.

W dalszym etapie analizie poddano charakterystyki zmian własności plastycznych drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP uzyskanych z prętów i walcówek po zabiegach obróbki cieplnej. Ilustrują je wykresy zależności wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  przedstawione na rysunkach 9.2.100 i 9.2.101.





Rys. 9.2.100. Wydłużenie równomierne drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 100 °C, 400 °C i 900 °C oraz czasie 1 h w funkcji odkształcenia rzeczywistego



Rys. 9.2.101. Wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 100 °C, 400 °C i 900 °C oraz czasie 1 h w funkcji odkształcenia rzeczywistego

Analizując przedstawione charakterystyki zauważono, że pręt z miedzi beztlenowej o średnicy 8,0 mm poddany zabiegowi obróbki cieplnej w temperaturze 900 °C charakteryzuje się najwyższą wartością wydłużenia względnego  $A_{250}$  na poziomie około 53 %, podczas gdy materiał wygrzewany w temperaturze 400 °C wykazuje wartość wydłużenia około 45 %, natomiast pręt wyżarzony w temperaturze 100 °C – około 42 %. Z kolei walcówka z miedzi w gatunku Cu-ETP, w przeciwieństwie do miedzi beztlenowej po zabiegach obróbki cieplnej w niższych temperaturach tj. 100 °C i 400 °C ujawniła wyższe wartości wydłużenia względnego na poziomie około 51 %, w stosunku do materiału wygrzewanego w temperaturze 900 °C charakteryzującego się wartością  $A_{250}$  na poziomie około 47 %. Ponadto stwierdzono, że pomimo, iż pręty otrzymane metodą Upcast oraz walcówki z linii Contirod wygrzewane w temperaturach 100 °C, 400 °C, jak i 900 °C wykazują

odmienne własności plastyczne to druty po procesie ciągnięcia charakteryzują się stabilizacją wydłużenia i przebiegiem krzywych na takim samym poziomie.

Przeprowadzone na tym etapie pracy badania laboratoryjne pozwoliły na określenie stopnia umacniania się drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP poddanej zabiegom obróbki cieplnej. Otrzymana w wyniku analizy prowadzonej w niniejszym oraz w ramach wcześniejszych podrozdziałów pracy wiedza poddana została weryfikacji podczas prób prowadzonych w warunkach przemysłowych. Tej tematyce poświęcony został kolejny podrozdział dysertacji – 9.2.7.

#### 9.2.7. Analiza procesu ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na druty i mikrodruty w warunkach przemysłowych

W ramach pracy realizowano przemysłowe próby przetwórstwa prętów z miedzi beztlenowej i walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP na druty i mikrodruty. Przeprowadzone badania procesu umacniania materiałów prowadzono w zakładach kablowych Tele-Fonika Kable oraz Zakładzie Produkcji Przewodów Elektrycznych Eltrim, a także w zakładzie przetwórczym Mennica Metale Szlachetne. Podstawowym celem prób technologicznych była ocena różnic w podatności do przetwórstwa plastycznego na zimno drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP. Warto w tym miejscu zaznaczyć, iż realizacja procesu ciągnięcia materiałów w warunkach przemysłowych w sposób nieodłączny związana jest z procesem wyżarzania materiałów w liniach ciągniczych. Proces rekrytalizacji, który jest tematem podrozdziału 9.3 niniejszej pracy prowadzony jest w atmosferze ochronnej pary wodnej, azotu lub argonu. Uzyskany w ten sposób zrekrytalizowany drut miedziany powinien charakteryzować się odpowiednią plastycznością, a także odpowiednią, podwyższoną przewodnością elektryczną właściwą.

Badania realizowane w pierwszym z zakładów kablowych – Eltrim obejmowały proces produkcji powszechnie stosowanych na cele elektryczne żył miedzianych klasy 5 z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz Cu-OFE uzyskanej przy standardowych parametrach procesu ciągłego odlewania tj. prędkości 4,0 m/min. oraz wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min. Z kolei w drugim zakładzie kablowym – Tele-Fonika Kable technologia dotyczyła wytwarzania drutów do kabli ognioodpornych stosowanych w budynkach użyteczności publicznej. Z uwagi na wysokie wymagania stawiane tej grupie specjalistycznych przewodów, dotyczące m.in. ich odporności na chorobę wodorową badania prowadzono na miedzi beztlenowej. W ramach dysertacji została także przeprowadzona przemysłowa próba przetwórstwa walcówek i odlewów na mikrodruty realizowana w trzecim z zakładów przetwórczych – Mennica Metale Szlachetne. W tym przypadku grupa materiałów poddanych badaniom nad procesem ciągnięcia oprócz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta z miedzi beztlenowej z procesu ciągłego odlewania sposobem Upcast przy prędkości 4,0 m/min. i przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min. została rozszerzona o materiał beztlenowy uzyskany w linii Upcast z szybkością 0,5 m/min. i przy przepływie wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min., a także o pręt otrzymany sposobem DCC-AGH przy prędkości 0,006 m/min. i przepływie wody chłodzącej na poziomie 0,1 l/min. w układzie pierwotnym i 0,2 l/min. w układzie wtórnym.

Głównym celem prób technologicznych była ocena porównawcza podatności do procesu ciągnięcia zróżnicowanych pod kątem własności i stanu strukturalnego materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej i tlenowej. W szczególności badania prowadzone w warunkach przemysłowych zostały ukierunkowane na:

- porównanie właściwości mechanicznych drutów po procesie ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE,
- porównanie właściwości elektrycznych drutów po procesie ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE,
- porównanie struktury drutów miedzianych po procesie ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE.

Pierwsza z przemysłowych prób technologicznych obejmowała proces ciągnięcia walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta z miedzi beztlenowej na druty o finalnej średnicy 0,4 mm. Są one stosowane powszechnie na skalę przemysłową do produkcji żył klasy 5 o przekroju znamionowym 35 mm<sup>2</sup> jako przewody do odbiorników ruchomych i przenośnych. W aneksie w tabeli A9.2.13 zamieszczono zastosowany schemat odkształcenia w procesie przetwórstwa w układzie wielociągowym

na linii ciągniczej typu grubociąg i średniociąg. Z kolei w tabeli 9.2.8 przedstawiono identyfikację własności mechanicznych i elektrycznych drutów o średnicy 1,7 mm otrzymanych w wyniku realizacji pierwszego etapu procesu ciągnięcia na linii ciągniczej typu grubociąg.

Tabela 9.2.8. Własności mechaniczne i elektryczne drutu z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE o średnicy 1,7 mm

Gatunek materiału	Linia technologiczna	Średnica drutu po procesie ciągnięcia	$R_m$	$A_{250}$	Rezystancja elektryczna właściwa
		[mm]	[MPa]	[%]	[ $\Omega/100$ m]
Cu-ETP	Contirod	1,699	255,8	37,1	0,737
Cu-OFE	Upcast	1,696	256,9	34,8	0,739

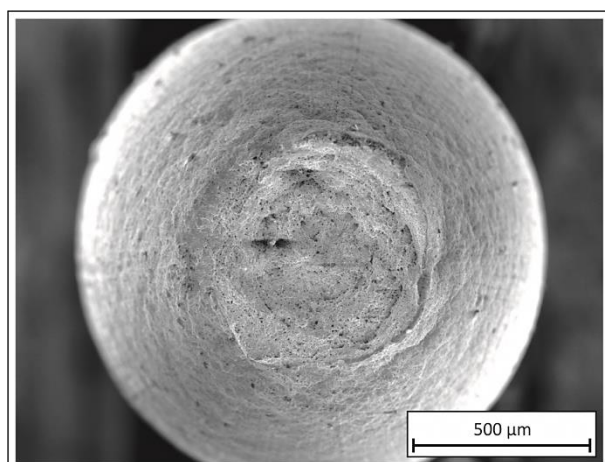
Analizując wyniki własności drutów o średnicy 1,7 mm dostrzeżono, że miedź w gatunku Cu-OFE charakteryzuje się wyższymi własnościami wytrzymałościowymi. Z tego względu siła ciągnięcia materiału także jest większa aniżeli wartość zanotowana dla drutu z miedzi tlenowej. Ponadto materiał wykazał niższą rezystancję. Z kolei zanotowane dla drutów o średnicy finalnej 0,4 mm wyniki zamieszczono w tabeli 9.2.9.

Tabela 9.2.9. Własności mechaniczne i elektryczne drutu z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE o średnicy 0,4 mm

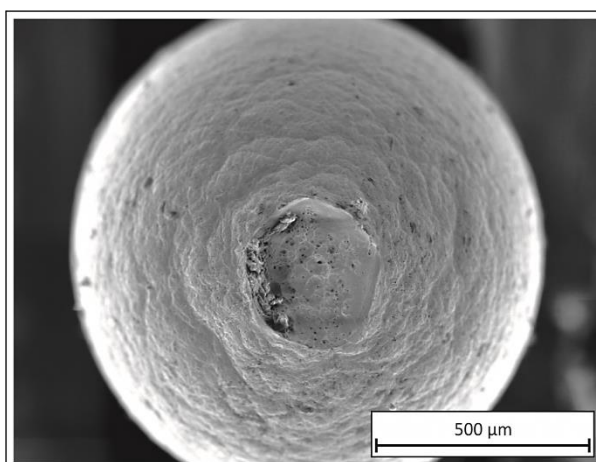
Gatunek materiału	Linia technologiczna	Średnica drutu po procesie ciągnięcia	$R_m$	$A_{250}$	Rezystancja elektryczna właściwa
		[mm]	[MPa]	[%]	[ $\Omega/100$ m]
Cu-ETP	Contirod	0,398	261,1	34,7	13,26
Cu-OFE	Upcast	0,402	216,4	37,5	13,22

Obserwacja wyników własności drutów o średnicy 0,4 mm wskazała na niższe własności wytrzymałościowe oraz wyższe własności plastyczne miedzi beztlenowej w stosunku do miedzi w gatunku Cu-ETP. Druty z miedzi beztlenowej charakteryzują się ponadto niższą wartością rezystancji.

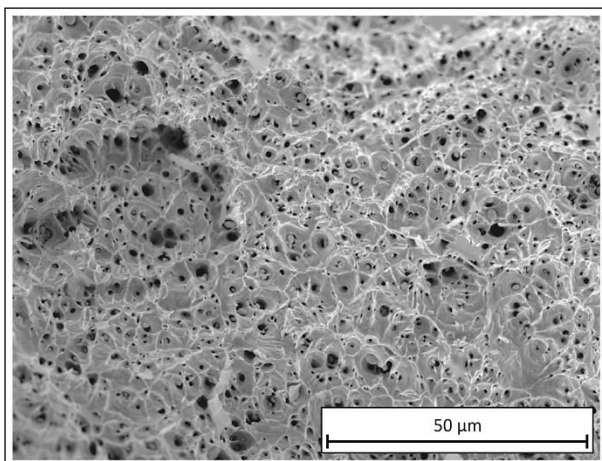
Dla badanej grupy materiałów otrzymanej w warunkach przemysłowych przeprowadzono także obserwacje ich budowy strukturalnej za pomocą mikroskopu skaningowego. Na rysunkach 9.2.102 – 9.2.107 zilustrowano obrazy przelomów drutów o średnicy 0,4 mm po statycznej próbie rozciągania. Warto porównać je z poprzednio zamieszczonymi w niniejszym rozdziale na rysunkach 9.2.44 – 9.2.49 powierzchniami drutów otrzymanych w wyniku procesu ciągnięcia miedzi tlenowej i beztlenowej w warunkach laboratoryjnych.



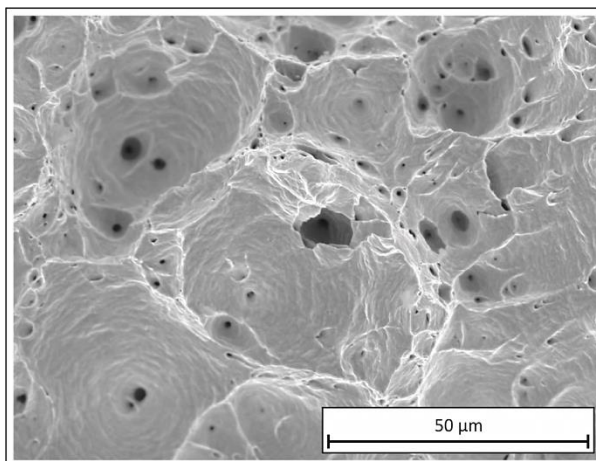
Rys. 9.2.102. Powierzchnia przelomu drutu o średnicy 0,4 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod po statycznej próbie rozciągania. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 70$



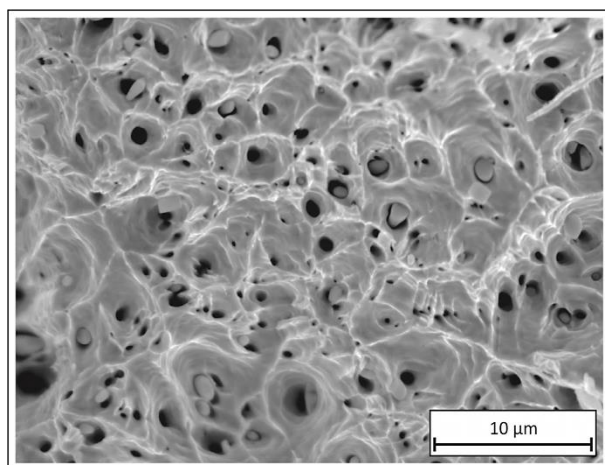
Rys. 9.2.103. Powierzchnia przelomu drutu o średnicy 0,4 mm z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po statycznej próbie rozciągania. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 70$



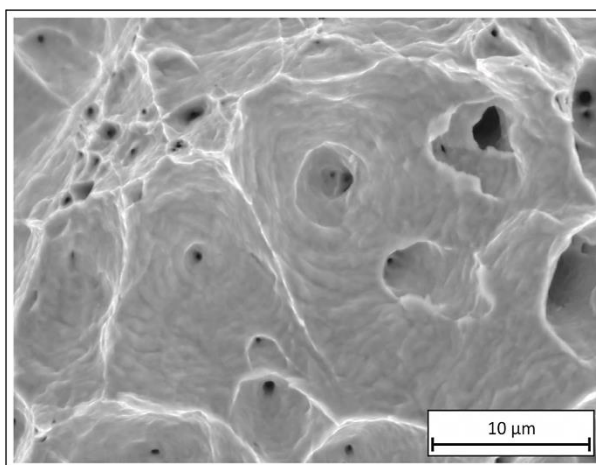
Rys. 9.2.104. Powierzchnia przelomu drutu o średnicy 0,4 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod po statycznej próbie rozciągania. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 1000$



Rys. 9.2.105. Powierzchnia przelomu drutu o średnicy 0,4 mm z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po statycznej próbie rozciągania. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 1000$



Rys. 9.2.106. Powierzchnia przelomu drutu o średnicy 0,4 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod po statycznej próbie rozciągania. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 3000$



Rys. 9.2.107. Powierzchnia przelomu drutu o średnicy 0,4 mm z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po statycznej próbie rozciągania. Mikroskop skaningowy, powiększenie  $\times 3000$

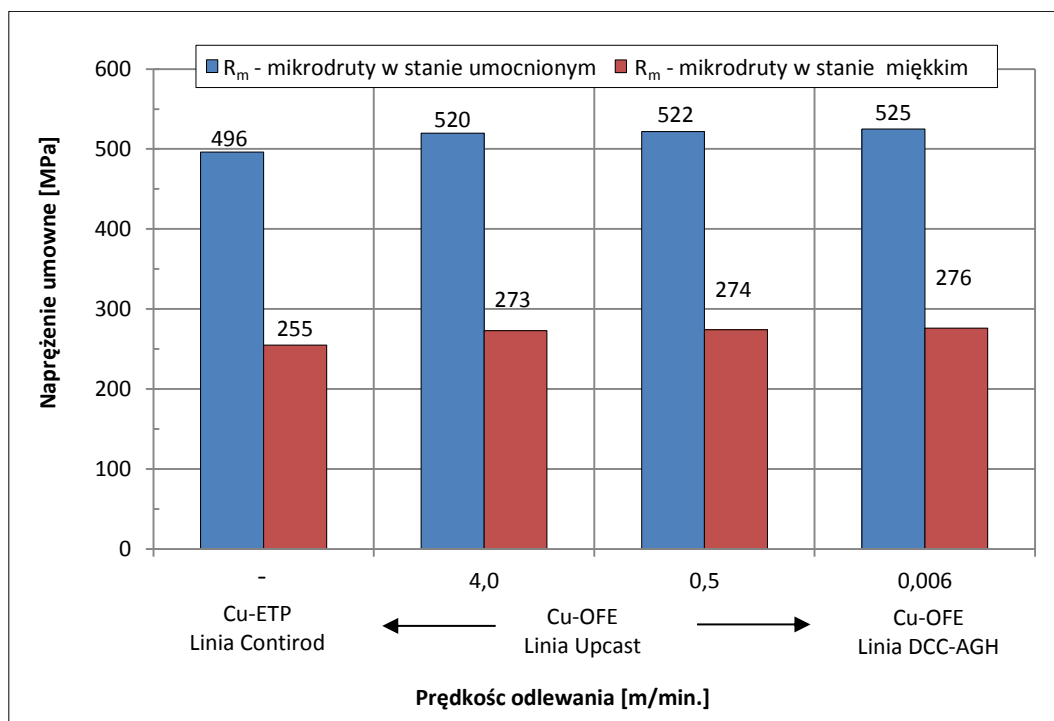
Na podstawie przeprowadzonych badań powierzchni przelomów drutów otrzymanych w procesie ciągnięcia w warunkach przemysłowych potwierdzona została wcześniejsza obserwacja o wysokiej plastyczności obu gatunków materiałów charakteryzujących się przelomami poślizgowymi. Uwagę zwracają także charakterystyczne dla miedzi w gatunku Cu-ETP tlenki o wielkościach dochodzących do kilku mikrometrów (por. rys. 9.2.106), o których była już mowa w ramach poprzednich rozdziałów pracy.

Realizacja drugiej z prób technologicznych prowadzonej w warunkach przemysłowych obejmowała proces ciągnięcia prętów z miedzi beztlenowej otrzymanych w procesie Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. i wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min. na średnicę finalną 1,4 mm. Takie druty stanowią materiał żył przewodzących stosowanych w kablach ognioodpornych, których przekrój znamionowy wynosi 1,5 mm<sup>2</sup>. Schemat odkształcenia w procesie ciągnięcia przedstawiono w aneksie w tabeli A9.2.14, natomiast wyniki pomiarowe poddanej badaniom żyły zostały zamieszczone w tabeli 9.2.10.

Tabela 9.2.10. Własności mechaniczne i elektryczne drutu z miedzi w gatunku Cu-OFE o średnicy 1,4 mm

Gatunek materiału	Linia technologiczna	Średnica drutu po procesie ciągnięcia	R <sub>m</sub>	A <sub>250</sub>	Rezystancja elektryczna właściwa
		[mm]	[MPa]	[%]	[Ω/100 m]
Cu-OFE	Upcast	1,38	260,5	22,1	1,09

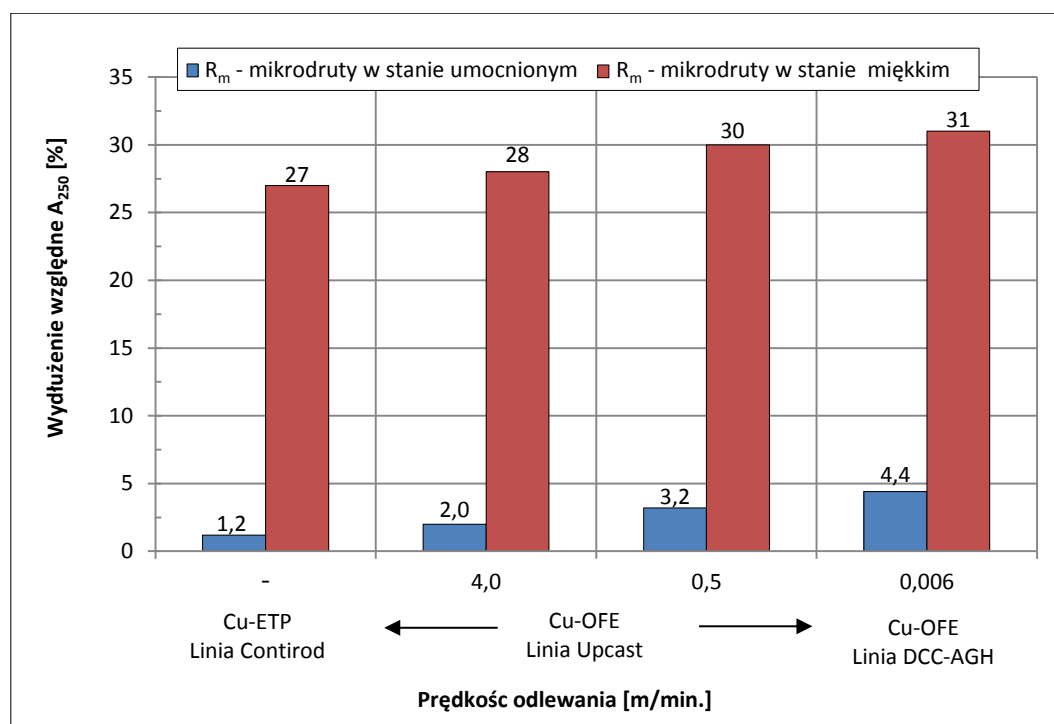
Kolejna próba – przemysłowego procesu ciągnięcia obejmowała materiały o średnicy nominalnej 8,0 mm w postaci walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz prętów z miedzi beztlenowej wytworzonych zarówno w warunkach przemysłowych metodą Upcast przy dwóch skrajnych prędkościach odlewania tj. 4,0 m/min. i 0,5 m/min., dla których wydatek wody chłodzącej krystalizator wynosił 60 l/min., a także w warunkach laboratoryjnych na stanowisku DCC-AGH z szybkością 0,006 m/min. oraz przy przepływie wody chłodzącej na poziomie 0,1 l/min. w układzie pierwotnym i 0,2 l/min. w układzie wtórnym. Celem próby technologicznej był proces przetwórstwa materiałów na mikrodruty o średnicach poniżej 0,1 mm i ocena zdolności uzyskania mikrodrutów o jak najniższych średnicach z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE. Walcówkę i pręty o średnicach nominalnych 8,0 mm w pierwszym etapie procesu przetwórstwa poddano procesowi walcowania do postaci kwadratu o boku 3,2 mm. Następnie zastosowano proces ciągnięcia, dla którego schemat odkształcenia zamieszczony został w aneksie w tabeli A9.2.15. Po przeciągnięciu materiałów na średnicę 3,0 mm, a następnie poddaniu ich procesowi wyżarzania rekrystalizującego w temperaturze 400 °C i czasie 1,5 godziny materiały ponownie poddano procesowi ciągnięcia na średnicę 0,8 mm. Otrzymane w ten sposób druty ponownie poddano zabiegowi obróbki cieplnej w temperaturze 400 °C i czasie 1,5 godziny, po czym przeciągnięto na mikrodruty o średnicy 0,2 mm. Kolejny cykl polegał na zastosowaniu zabiegu wyżarzania rekrystalizującego materiałów w temperaturze 450 °C w atmosferze ochronnej azotu. Kończącym etapem prób technologicznych była realizacja procesu ciągnięcia materiałów aż do uzyskania mikrodrutów o jak najniższych finalnych średnicach. W konsekwencji miedź w gatunku Cu-ETP z uwagi na obecność twardych tlenków obniżających próg ciągliwości materiału została po wielu próbach przeciągnięta na finalną średnicę 0,08 mm. Materiał beztlenowy charakteryzujący się wysoką plastycznością pozwolił natomiast na uzyskanie mikrodrutów o średnicach 0,03 mm i wobec jego zapasu podatności do procesu przetwórstwa plastycznego na zimno stwarzał możliwość uzyskania mikrodrutów o jeszcze niższych średnicach. W celu porównania właściwości mechanicznych dwóch gatunków miedzi statycznej próbie rozciągania poddano mikrodruty o średnicach 0,08 mm, zarówno po procesie wygrzewania w temperaturze 360 °C w atmosferze ochronnej azotu, jak i w tzw. stanie twardym – tj. bez zastosowanego końcowego zabiegu obróbki cieplnej mikrodrutu. Na rysunkach 9.2.108 i 9.2.109 zilustrowano wykresy własności mechanicznych badanych materiałów.



Rys. 9.2.108. Wytrzymałość na rozciąganie mikrodrutów o średnicy 0,08 mm uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min. i 0,5 m/min., przepływ wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) i linii DCC-AGH (prędkość odlewania 0,006 m/min., przepływ wody chłodzącej na poziomie 0,1 l/min. w układzie pierwotnym i 0,2 l/min. w układzie wtórnym)

Na podstawie zależności naprężenia umownego od prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej dedykowanych do procesu ciągnięcia na mikrodruty o średnicach 0,08 mm zauważono, że zarówno w stanie twardym, jak i miękkim materiały wykazały wzrost wartości wytrzymałości na rozciąganie wraz z obniżeniem szybkości odlewania prętów. Zanotowane natomiast dla mikrodrutów z miedzi w gatunku Cu-ETP wartości kształtowały się na niższym poziomie w stosunku do miedzi beztlenowej.

Obserwacjom poddano także charakterystyki zmian własności plastycznych, a konkretnie wydłużenia względnego  $A_{250}$  w funkcji prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE, które zilustrowano na rysunku 9.2.109.



Rys. 9.2.109. Wydłużenie względne  $A_{250}$  mikrodrutów o średnicy 0,08 mm uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min. i 0,5 m/min., przepływ wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) i linii DCC-AGH (prędkość odlewania 0,006 m/min., przepływ wody chłodzącej na poziomie 0,1 l/min. w układzie pierwotnym i 0,2 l/min. w układzie wtórnym)

Na podstawie analizy powyższych wykresów zauważono, że mikrodruty z miedzi beztlenowej uzyskane w procesie ciągnięcia prętów z procesu ciągłego odlewania z coraz to niższymi prędkościami wykazały wzrost wydłużenia względnego  $A_{250}$ . Powyższa obserwacja dotyczy zarówno materiałów poddanych zabiegom obróbki cieplnej, jak i w stanie umocnionym.

W dalszym etapie badań eksperymentalnych nad identyfikacją własności mikrodrutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE materiały poddano obserwacjom struktury za pomocą skaningowego mikroskopu jonowego (FIB – Focused Ion Beam). Ponieważ celem prowadzonych analiz była charakterystyka porównawcza miedzi w dwóch gatunkach podjęto trudną próbę przeciągnięcia mikrodrutów z miedzi w gatunku Cu-ETP na podobne do otrzymanych z miedzi beztlenowej, małe średnice wynoszące 0,06 mm i 0,03 mm. Uzyskane w ten sposób odcinki mikrodrutów z miedzi tlenowej, podobnie jak materiały z miedzi w gatunku Cu-OFE poddano obserwacjom ich stanu strukturalnego, a otrzymane wyniki zilustrowano w tabelach 9.2.11 i 9.2.12. Mikrostruktury przekroju poprzecznego i wzdłużnego mikrodrutów przedstawione w pierwszej z tabel 9.2.11 dotyczą materiałów o średnicach 0,06 mm, z kolei w tabeli 9.2.12 ukazano miedź o średnicy 0,03 mm.

Tabela 9.2.11. Mikrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego mikrodrutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE o średnicy 0,06 mm wygrzewanych w temperaturze 360 °C (piec tunelowy,  $V_{drutu} = 64$  m/min.) w atmosferze ochronnej azotu. Skaningowy mikroskop jonowy, powiększenie  $\times 4000$ ,  $\times 8000$

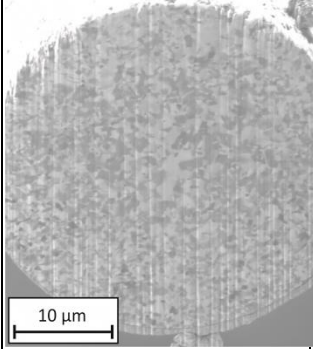
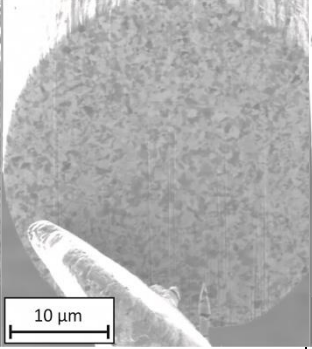
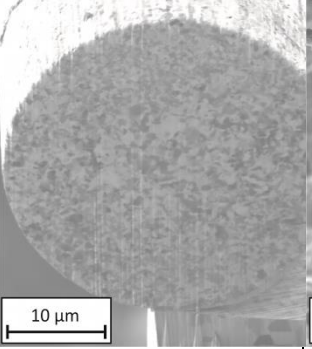
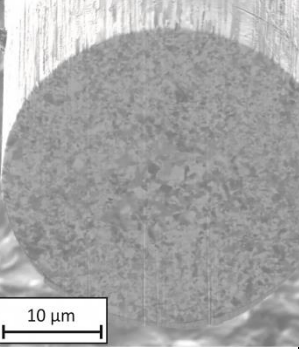
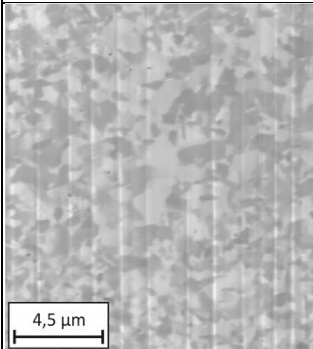
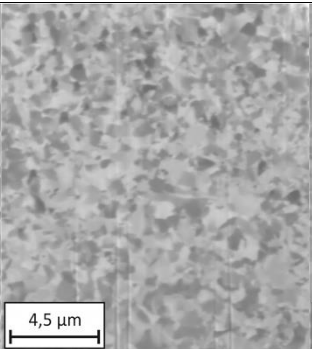
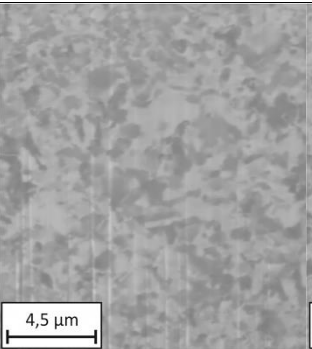
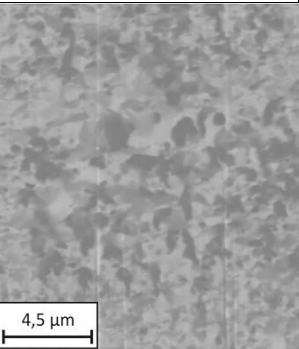
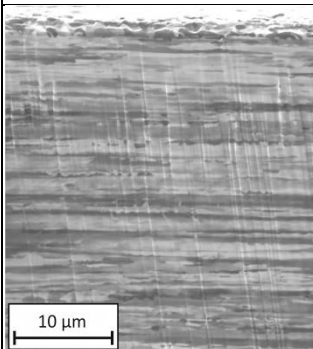
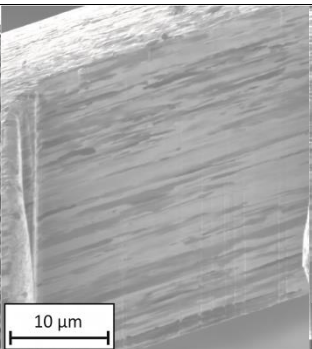
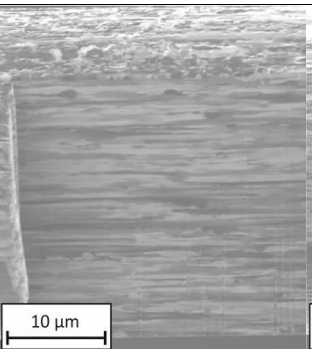
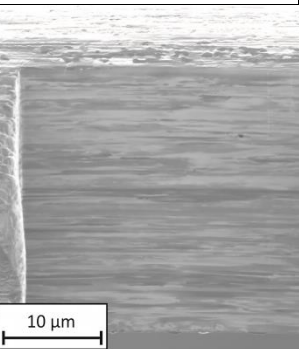
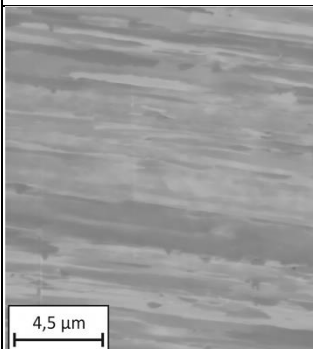
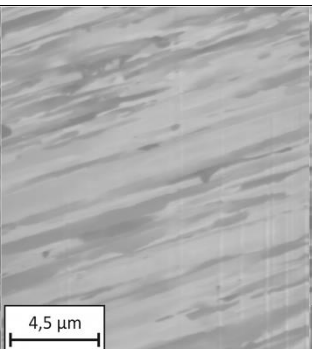
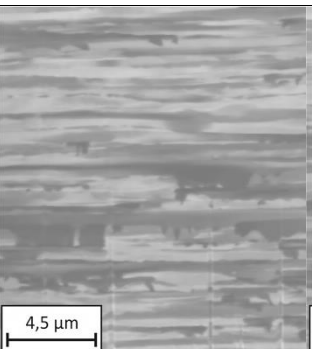
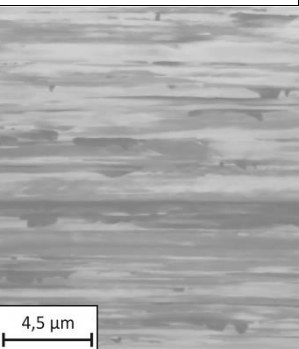
Średnica mikrodrutów 0,06 mm			
Cu-ETP Linia Contirod	Cu-OFE Linia Upcast $V_{odl.} = 4,0$ m/min.	Cu-OFE Linia Upcast $V_{odl.} = 0,5$ m/min.	Cu-OFE Linia DCC-AGH $V_{odl.} = 0,006$ m/min.
Przekrój poprzeczny – powiększenie $\times 4000$			
			
10 $\mu$ m	10 $\mu$ m	10 $\mu$ m	10 $\mu$ m
Przekrój poprzeczny – powiększenie $\times 8000$			
			
4,5 $\mu$ m	4,5 $\mu$ m	4,5 $\mu$ m	4,5 $\mu$ m
Przekrój wzdłużny – powiększenie $\times 4000$			
			
10 $\mu$ m	10 $\mu$ m	10 $\mu$ m	10 $\mu$ m
Przekrój wzdłużny – powiększenie $\times 8000$			
			
4,5 $\mu$ m	4,5 $\mu$ m	4,5 $\mu$ m	4,5 $\mu$ m

Tabela 9.2.12. Mikrostruktura przekroju poprzecznego i wzdłużnego mikrodrutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE o średnicy 0,03 mm wygrzewanych w temperaturze 320 °C (piec tunelowy,  $V_{drutu} = 64$  m/min.) w atmosferze ochronnej azotu. Skaningowy mikroskop jonowy, powiększenie  $\times 4000$ ,  $\times 8000$

Średnica mikrodrutów 0,03 mm			
Cu-ETP Linia Contirod	Cu-OFE Linia Upcast $V_{odl.} = 4,0$ m/min.	Cu-OFE Linia Upcast $V_{odl.} = 0,5$ m/min.	Cu-OFE Linia DCC-AGH $V_{odl.} = 0,006$ m/min.
Przekrój poprzeczny – powiększenie $\times 4000$			
Przekrój poprzeczny – powiększenie $\times 8000$			
Przekrój wzdłużny – powiększenie $\times 4000$			
Przekrój wzdłużny – powiększenie $\times 8000$			



Dokonując obserwacji mikrostruktur przekrojów poprzecznych i wzdłużnych uwagę zwracając charakterystyczne pionowe linie widoczne zwłaszcza dla mikrodrutów o średnicach 0,06 mm (por. rys. 9.2.110). Otóż na wstępie analizy budowy strukturalnej materiałów należy zaznaczyć, że pochodzą one od nierówności powierzchni na próbkach. Uzyskiwany za pomocą skaningowego mikroskopu jonowego obraz tworzony jest przez elektrony wtórne wygenerowane przez pierwotną wiązkę jonów galu w wyniku ich oddziaływania z materiałem. Front rozpylania nie jest równomierny i powoduje powstawanie nierówności w płaszczyźnie przekroju, przy czym należy podkreślić, iż tego typu drobne zaburzenia nie mają wpływu na kontrast orientacji ziaren.

Ponadto dokonując analizy porównawczej mikrostruktur przekrojów wzdłużnych mikrodrutów uwagę zwraca typowa dla materiałów po procesie ciągnięcia pasmowa struktura ziaren. Co więcej obserwuje się powstawanie nowych, zrekrytalizowanych ziaren, zwłaszcza dla próbek miedzi beztlenowej otrzymywanej w warunkach przemysłowych w instalacji Upcast przy prędkości 4,0 m/min. oraz 0,5 m/min. (por. rys. 9.2.110, 9.2.111). Analizując natomiast przekroje poprzeczne materiałów z miedzi w gatunku Cu-OFE zauważono, iż centralna część utworzona jest przez duże ziarna rdzenia odlewu, natomiast najmniejsze ziarna ulokowane są na obrzeżach materiałów. Taki rozkład typowy jest dla materiałów poddawanych procesowi przetwórstwa w procesie ciągnięcia. Otóż rdzeń materiału w najmniejszym stopniu podlega odkształceniu w procesie ciągnięcia, natomiast ziarna ulokowane na obrzeżach materiału w sposób największy.

Zamieszczone w niniejszym podrozdziale wyniki badań doświadczalnych oraz ich analiza dostarczyły informacji o podatności miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE do procesu ciągnięcia w warunkach przemysłowych. W wyniku technologicznych prób ciągnięcia uzyskano wiedzę o własnościach mechanicznych i elektrycznych drutów stosowanych na cele elektryczne (m.in. żyły klasy 5 oraz kable ogniodoporne). Ponadto stwierdzono, iż materiały wsadowe z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskane zarówno w warunkach laboratoryjnego, jak i przemysłowego odlewania dają gwarancję bezproblemowego uzyskania mikrodrutów o średnicach finalnych rzędu 0,03 mm, co jest bardzo trudne do uzyskania z tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne miedzi w gatunku Cu-ETP.

### 9.2.8. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym rozdziale wyniki badań i prowadzona na bieżąco analiza procesu ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych dostarczyły szereg informacji o tej grupie materiałów. Charakterystyka porównawcza podatności omawianych dwóch gatunków miedzi do przetwórstwa metodą ciągnięcia została przeprowadzona zarówno pod kątem jej składu chemicznego tj. zawartości tlenu i innych pierwiastków domieszek, jak i stanu strukturalnego kształtowanego w procesie ciągłego odlewania materiałów wsadowych o średnicach nominalnych 8,0 mm. Na jej podstawie stwierdzono, że spośród stosowanych na świecie gatunków miedzi do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty dedykowane do wysokozaawansowanych aplikacji elektrycznych wykorzystuje się jej odmiany o czystości chemicznej rzędu 4N (tj. 99,99 % Cu) i wyższych. Redukcja zawartości zanieczyszczeń w materiale, a także niemal całkowita eliminacja tlenu są gwarantem przetwórstwa na mikrodruty o średnicach 0,03 mm i mniejszych. Ponadto prowadzone w różnych ośrodkach rozważania nad tym tematem wskazują jednoznacznie, iż spadek sumarycznej zawartości zanieczyszczeń przy obniżonym poziomie tlenu w materiale prowadzi do przesunięcia progu ciągliwości miedzi z poziomu około 0,3 mm do 0,05 mm. Jak nadmieniono wcześniej uzyskanie drutów o średnicach kilkudziesięciu, a nawet kilku mikrometrów pociąga zatem za sobą konieczność całkowitej eliminacji ze składu chemicznego tlenu. Co więcej jego brak wpływa na istotną poprawę własności mechanicznych materiału.

Oprócz wpływu składu chemicznego miedzi na jej zdolność do przetwórstwa w procesach przeróbki plastycznej na zimno w pracy analizowano także strukturę materiałów wsadowych z miedzi tlenowej i beztlenowej oraz jej znaczenie dla procesu umacniania się drutów. Na podstawie skonstruowanych krzywych umocnienia stwierdzono, że przyrost wytrzymałości na rozciąganie materiału skutkiem umocnienia w przypadku drutów z miedzi beztlenowej jest większy niż w przypadku drutów otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP. Zróżnicowanie wynika z faktu, iż własności wytrzymałościowe materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej są niższe o około 20 % w stosunku do walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP, co wynika ze zróżnicowania stanu strukturalnego materiałów wsadowych. Ponadto z uwagi na duże ziarna umocnienie zachodzi w dużym

stopniu przez poślizg. Warto zaznaczyć, że wartości wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności dla dwóch gatunków miedzi gwałtownie wzrastają już po nadaniu materiałom pierwszego odkształcenia plastycznego, a kolejne przyrosty ich wartości nie są już tak duże.

W pracy przeprowadzono także badania parametrów siłowych procesu ciągnięcia drutów, których celem było określenie wpływu zarówno zawartości tlenu w miedzi, jak i wielkości ziarna na odkształcalność materiałów w procesie ciągnięcia. Na podstawie analizy parametrów procesu ciągnięcia stwierdzono, iż w przypadku drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP występują wyższe wartości sił ciągnięcia w porównaniu z materiałami z miedzi beztlenowej. Ponadto zaobserwowane największe zróżnicowanie współczynnika zapasu wytrzymałości występuje dla drutów o dużych średnicach tj. dla materiałów o małym stopniu umocnienia odkształceniowego, przy czym wyższymi wartościami charakteryzuje się miedź beztlenowa. Z kolei w przypadku drutów o mniejszych średnicach, a więc o większej wartości umocnienia odkształceniowego różnice są niewielkie.

Kontynuacja problematyki wpływu zróżnicowanych warunków procesu odlewania materiałów wsadowych tj. prędkości odlewania oraz wydatku wody chłodzącej krystalizator na zdolność do zachowania ewentualnych różnic wynikających z odmienności struktury materiałów podczas procesu przeróbki plastycznej na zimno dotyczyła drutów z miedzi beztlenowej otrzymanych z prętów z procesu ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych metodą Upcast i Rautomead oraz laboratoryjnych na stanowisku DCC-AGH. Podobnie jak poprzednio stwierdzono, że zauważalne dla materiałów o średnicach 8,0 mm z dwóch gatunków miedzi zróżnicowanie własności wytrzymałościowych wraz ze wzrostem wielkości umocnienia odkształceniowego zaczyna być minimalizowane. Ponadto analiza mikrostruktur drutów z procesu ciągnięcia wskazała jednoznacznie na występowanie dla wszystkich materiałów typowej pasmowej struktury o wydłużonych ziarnach – większych dla materiałów bazujących na prętach z najniższych szybkości odlewania. Z kolei przeprowadzona w dalszej części rozdziału analiza wpływu zmiennego wydatku wody chłodzącej nie ujawniła jego znacznego wpływu na kształtowanie przebiegów krzywych zmian własności mechanicznych materiałów.

Przeprowadzone w dalszym etapie pracy badania określające stopień umacniania się drutów otrzymanych z materiałów wsadowych poddanych zabiegom obróbki cieplnej podyktowane były różnicami własności walcówek i prętów, które ujawnione zostały w poprzednim rozdziale pracy. Na podstawie charakterystyk zmian własności mechanicznych materiałów w funkcji odkształcenia rzeczywistego stwierdzono, iż wyższą wytrzymałość na rozciąganie wykazują druty z miedzi w gatunku Cu-ETP otrzymane z poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 100 °C i 400 °C walcówek, w porównaniu do drutów bazujących na materiale wsadowych wygrzewanym w temperaturze 900 °C. Własności wytrzymałościowe drutów z miedzi tlenowej, których materiały bazowe zostały poddane ingerencji najwyższej z temperatur nie odbiegały w dużym stopniu od tych zanotowanych dla materiału nie obrobionego cieplnie. Dla miedzi beztlenowej natomiast zaobserwowano sytuację odwrotną. To wygrzewanie prętów w temperaturze 900 °C spowodowało wzrost wartości wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności drutów.

Ciekawych obserwacji dostarczyły także badania eksperymentalne nad procesem ciągnięcia prowadzone w przeciwieństwie do poprzednich prób nie w warunkach laboratoryjnych, lecz tym razem w warunkach przemysłowych w wytypowanych zakładach. W wyniku prób technologicznych stwierdzono, iż materiały wsadowe z miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskane metodą Upcast i DCC-AGH dają gwarancję bezproblemowego uzyskania mikrodrutów o średnicach końcowych 0,03 mm i wobec zapasu podatności do procesu przetwórstwa plastycznego na zimno stwarzają możliwości uzyskania mikrodrutów o jeszcze mniejszych średnicach. Przeciwnieństwem jest miedź w gatunku Cu-ETP, która z uwagi na obecność twardych tlenków obniżających próg ciągliwości materiału została po wielu próbach przeciągnięta na finalną średnicę 0,08 mm.

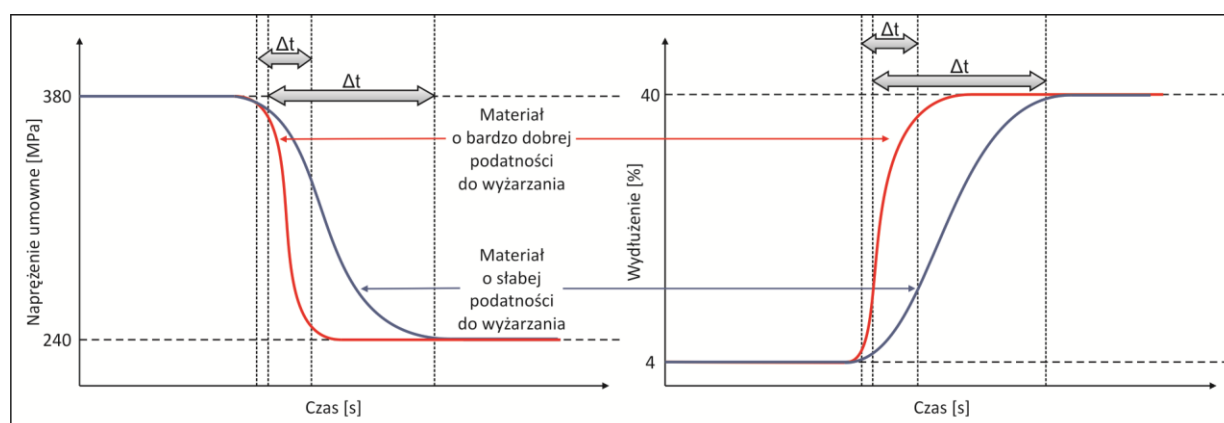
Dokonując całościowego podsumowania badań doświadczalnych nad procesem ciągnięcia miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE należy wyraźnie podkreślić, że uzyskany przez oba gatunki materiałów taki sam poziom własności wytrzymałościowych i plastycznych nie jest dowodem na to, że inne grupy własności zarówno fizycznych, jak i użytkowych drutów będą takie same. W szczególności mowa tutaj o odporności cieplnej materiałów, której wyznacznikiem jest temperatura rekryształizacji, a także o przewodności elektrycznej, które to wielkości istotnie zależą nie tylko od historii metalurgicznej materiału, ale także od historii kształtowania struktury i jej defektów. Tej tematyce poświęcone zostały dwa kolejne podrozdziały pracy – 9.3 i 9.4.

### 9.3. Badania odporności cieplnej drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP

Podstawowymi charakterystykami katod miedzianych, walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz prętów z miedzi beztlenowej decydującymi o jakości wyrobu i przebiegu procesów technologicznych są: skład chemiczny, wartość przewodności elektrycznej właściwej oraz podatność materiału do procesów wyżarzania rekrytalizującego. O ile dwie pierwsze z wymienionych własności wynikają bezpośrednio z podstawowego zastosowania miedzi na cele elektryczne, o tyle wymagania dotyczące podatności do wyżarzania podyktowane są rygiorem technologicznym obowiązującym w procesach ciągnięcia drutów. Gwarancja możliwości wyżarzenia się materiałów w wieloetapowym procesie przetwórstwa plastycznego w zakładach kablowych w liniach ciągniczych typu grubociąg, średniociąg oraz mikrociąg jest podstawowym wymogiem stawianym producentom walcówek i prętów. Aktualność powyższej tematyki wynika z jednej strony z ciągłej konkurencji na rynku wytwórców katod oraz walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i prętów uzyskiwanych w procesie ciągłego odlewania miedzi beztlenowej, z drugiej zaś podyktowana jest wprowadzeniem na rynek nowych wysoko przetworzonych wyrobów (m.in. mikrodruty, druty emaliowane), które wymagają rewizji stosowanych do tej pory tradycyjnych rozwiązań technicznych i technologicznych.

Pomimo powszechnie znanej wiedzy na temat znakomitej podatności miedzi do procesów rekrytalizacji, wprowadzane w dzisiejszych czasach na rynek coraz to nowsze wyroby w obszarze zastosowań wysokozaawansowanej elektroniki i elektrotechniki narzucają wysokie wymagania dotyczące potrzeby ciągłego doskonalenia materiału pod kątem zapewnienia jego właściwej podatności do procesów wyżarzania w liniach technologicznych. Z pojęciem tym często kojarzy się odporność cieplną jako cechę określającą stabilność własności wytrzymałościowych materiału poddanego ekspozycji czasu i temperatury.

W ramach niniejszej dysertacji przeprowadzono szeroki program badań doświadczalnych, którego celem była m.in. ocena miedzi pod kątem jej podatności do procesów odnowy struktury w warunkach narzuconych przez przemysłowe urządzenia służące do wysokowydajnej redukcji przekroju materiału, z jednoczesną gwarancją odzysku własności plastycznych drutów w komorach oporowego nagrzewania stanowiących integralną część współczesnych ciągarok. Na rysunku 9.3.1 w sposób schematyczny zilustrowano omawianą problematykę w postaci wykresów zmian własności mechanicznych miedzi o większej i mniejszej podatności do procesów odnowy struktury w funkcji czasu. Zamieszczone na ilustracji przedziały czasu  $\Delta t$  w rzeczywistych warunkach produkcyjnych wynoszą ułamki sekund.



Rys. 9.3.1. Jakościowa analiza różnych gatunków miedzi z punktu widzenia ich podatności do procesu wyżarzania rekrytalizującego

Stąd też w ramach niniejszego podrozdziału przedstawiono i przeanalizowano wyniki szerokiego programu badań o charakterze analitycznym i eksperymentalnym, w którym wyróżniono siedem obszarów tematycznych dotyczących podatności do wyżarzania drutów z miedzi analizowanej pod kątem:



w tabeli 9.3.4 przedstawiono schematyczny program badań technologicznych oparty o niniejsze testy. W tabeli 9.3.5 ukazano skład chemiczny badanych walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP i prętów z miedzi beztlenowej, natomiast w tabeli 9.3.6 wyniki testu wyżarzalności TWS i AR dla drutów otrzymanych z tych materiałów. Na rysunkach 9.3.4 – 9.3.7 zilustrowano w postaci klasycznych krzywych mięknięcia wyniki badań rekrytalizacji drutów w teście jednogodzinnego wygrzewania. Dane liczbowe do ich konstrukcji zamieszczono natomiast w aneksie w tabeli A9.3.1. Obserwacje wynikające z analizy zmian własności mechanicznych poparto także badaniami kalorymetrycznymi, których wyniki uzyskane w ramach pracy przedstawiono na rysunkach 9.3.8 i 9.3.9, natomiast na ilustracjach 9.3.10 i 9.3.11 ukazano także rezultaty otrzymane przez innych naukowców – Benchabane [119] i Schampa [120]. W dalszej części badań dokonano obserwacji mikrostruktury przekrojów wzdłużnych próbek drutów, które wytypowane zgodnie ze schematem zilustrowanym na rysunku 9.3.12 ukazano na ilustracjach 9.3.13 – 9.3.20. W tabeli 9.3.7 zamieszczono własności mechaniczne materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 260 °C i czasie od 10 minut do 120 minut, natomiast na rysunku 9.3.21 zilustrowano zmiany granicy plastyczności w funkcji czasu wygrzewania walcówek i prętów. Opis niniejszego podrozdziału 9.3.1 kończy się analizą rysunków 9.3.22 i 9.3.23 przedstawiających w postaci graficznej wyniki testów technologicznych TWS i AR drutów otrzymanych z materiałów wsadowych poddanych wstępnym zabiegom wygrzewania.

Podrozdział 9.3.2 to badania doświadczalne mające na celu określenie wpływu zanieczyszczeń i tlenu na podatność miedzi do wyżarzania i kształtowanie się temperatury rekrytalizacji. Analizę zagadnienia rozpoczęto od przedstawienia na rysunku 9.3.24 wyników badań według testu Popsa [136] ukazujących wpływ różnych domieszek na wzrost temperatury połówkowej rekrytalizacji miedzi. Z kolei na rysunku 9.3.25 zilustrowano wpływ sumarycznej zawartości zanieczyszczeń w miedzi na jej temperaturę rekrytalizacji. W tabeli 9.3.8 zamieszczono wyniki badań według Katoha [71], które dotyczą relacji pomiędzy zawartością wybranych pierwiastków w miedzi – konkretnie tlenu, fosforu i siarki a jej podatnością do obróbki cieplnej. Ich ilustrację graficzną stanowią wykresy przedstawione na rysunku 9.3.26. Na kolejnych ilustracjach – od 9.3.27 do 9.3.29 przedstawiono uzyskane przez światowych naukowców rezultaty badań doświadczalnych nad zachowaniem się podczas zabiegów obróbki cieplnej miedzi o różnej czystości chemicznej. Są to odpowiednio wykresy zależności naprężenia umownego od temperatury dla miedzi 5N i 6N według Katoha [71] (rys. 9.3.27), twardości od temperatury dla materiałów o czystości chemicznej 3N, 6N i 8N opracowane przez Fujiwarę [104] (rys. 9.3.28) oraz mikrotwardości i wydłużenia sprężyny od temperatury dla miedzi beztlenowej i tlenowej według Berina [139] (rys. 9.3.29). W dalszej części niniejszego podrozdziału omówiono także wyniki otrzymane przez Prasada [140] dotyczące wpływu zawartości tlenu w miedzi na opór płynięcia materiału w podwyższonych temperaturach i przy różnych prędkościach odkształcenia – rysunek 9.3.30, a także przedstawiono w oparciu o analizę zilustrowanych na rysunku 9.3.31 wykresów skonstruowanych przez Koka [141] relację pomiędzy zawartością tlenu w miedzi a zdolnością do umocnienia materiału na przykładzie krzywych ściskania miedzi wytworzonej w warunkach dynamicznej rekrytalizacji. Ukazane w kolejnym etapie pracy rysunki 9.3.32 – 9.3.36 dotyczą wyników badań Pitta [131] nad wpływem srebra, selenu i cyny na temperaturę rekrytalizacji miedzi, przy czym autor analizie poddał ingerencję pojedynczej domieszki, jak również efekty ich wspólnego działania. W podrozdziale przedstawiono także wyniki badań nad procesem rekrytalizacji miedzi w gatunku Cu-ETP przeprowadzone przez Jakaniego [142]. W tabeli 9.3.9 zamieszczono skład chemiczny i rezultaty testu AR badanych materiałów, natomiast na rysunku 9.3.37 autor zwrócił uwagę na istotną kwestię zróżnicowania twardości miedzi na przekroju podczas procesu wygrzewania w temperaturze 260 °C. Kontynuację obserwacji stanowią wykresy zilustrowane na rysunku 9.3.38 obrazujące względną objętość zrekrystalizowaną rozumianą jako objętość ziaren po rekrytalizacji odniesioną do całkowitej objętości materiału, które poparto przykładami struktur przedstawionych na ilustracji 9.3.39. Jakani [142] analizował także wpływ tlenu w miedzi w gatunku Cu-ETP na przebieg procesu rekrytalizacji. Wyniki jego badań dotyczących zmian mikrotwardości w funkcji czasu wygrzewania zilustrowano na rysunku 9.3.40. Dla porównania w pracy przedstawiono także obserwacje Martinez [143] na temat różnej zawartości tlenu w miedzi na kształtowanie temperatury rekrytalizacji. W tabeli 9.3.10 zamieszczono skład chemiczny poddanych obserwacjom materiałów, natomiast otrzymane wyniki badań własności mechanicznych w funkcji temperatury zilustrowano na rysunku 9.3.41. W swojej pracy autorka przedstawiła szczegółową analizę kinetyki wyżarzania miedzi (por. rys.

9.3.42). Podsumowanie literaturowego wstępu niniejszego podrozdziału stanowią dane dotyczące granicznych wartości rozpuszczalności pierwiastków w miedzi według różnych autorów zestawione w tabeli 9.3.11.

Po tak przeprowadzonym teoretycznym wprowadzeniu w omawianą tematykę w dalszej części podrozdziału w tabeli 9.3.12 zamieszczono skład chemiczny wytypowanych do badań materiałów, których mikrostruktury przekrojów wzdłużnych zilustrowano na rysunkach 9.3.43 – 9.3.47. Kolejne ilustracje 9.3.48 – 9.3.51 są klasycznymi krzywymi mięknięcia o charakterze zależności wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności, wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  w funkcji temperatury drutów otrzymanych z katod z miedzi w gatunku Cu-CATH-1 i walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP o różnym poziomie zanieczyszczeń i tlenu. Dane liczbowe do ich konstrukcji zamieszczono w aneksie w tabeli A9.3.2. Kontynuację tematyki stanowi przedstawiona na rysunku 9.3.52 analiza otrzymanych wartości temperatur początku rekrytalizacji, rekrytalizacji połówkowej oraz rekrytalizacji całkowitej dla badanych materiałów oraz ich interpretacja odniesiona do zawartości wagowej pierwiastków – rys. 9.3.53 oraz do procentowego udziału tlenu w sumarycznej zawartości domieszek – rys. 9.3.54. Przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych badania odporności cieplnej pięciu rodzajów drutów otrzymanych z różnorodnych materiałów wsadowych o odmiennych zawartościach pierwiastków domieszek i wyznaczone dla nich wartości temperatur rekrytalizacji zostały poparte obserwacjami kalorymetrycznymi, których wyniki zarówno w postaci liczbowej, jak i graficznej przedstawiono w tabeli 9.3.13 oraz na rysunkach 9.3.55 – 9.3.59.

Tematyka kolejnego z podrozdziałów dotycząca odporności cieplnej drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE jest analizą wpływu umocnienia odkształceniowego na temperaturę rekrytalizacji materiałów. W ramach przeprowadzonych rozważań na rysunku 9.3.60 zilustrowano morfologię powierzchni walcówki z linii Contirod oraz prętów otrzymanych metodami Upcast i Rautomead. Po krótkim wprowadzeniu w omawianą tematykę w tabeli 9.3.14 zamieszczono zakres temperatur wygrzewania drutów z dwóch gatunków miedzi podczas jednogodzinnego testu w ramach realizacji badań doświadczalnych w podrozdziale 9.3.3. Wykresy ilustrujące klasyczne krzywe mięknięcia materiałów przedstawiono oddzielnie dla drutów o średnicach 7,0 mm; 5,5 mm; 4,5 mm; 2,5 mm i 0,5 mm uzyskanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod na rysunku 9.3.61 oraz dla materiałów otrzymanych z prętów z technologii Upcast i Rautomead na rysunkach 9.3.62 i 9.3.63 jako zakresy naprężenia umownego odpowiadającego granicy plastyczności w teście jednogodzinnej obróbki cieplnej. Dane liczbowe do konstrukcji charakterystyk zamieszczono w aneksie w tabelach A9.3.3 – A9.3.5. Podobną analizę w stosunku do wymienionych materiałów przeprowadzono w oparciu o krzywe zmian własności mechanicznych, tym razem odniesione do wytrzymałości na rozciąganie w funkcji temperatury wygrzewania, które ukazano na kolejnych ilustracjach od 9.3.64 do 9.3.66. Podsumowanie przedstawionych na wyżej wymienionych rysunkach charakterystyk mięknięcia stanowią zilustrowane na rysunkach 9.3.67 – 9.3.71 krzywe dotyczące własności wytrzymałościowych drutów o tych samych średnicach, ale uzyskanych z różnych materiałów wsadowych. Kontynuację tematyki stanowią własności plastyczne drutów przedstawione na rysunkach 9.3.72 – 9.3.76 w postaci wykresów zależności wydłużenie równomiernego i wydłużenie względnego  $A_{250}$  od temperatury. Prowadzona w dalszej części podrozdziału 9.3.3 analiza, oprócz charakteru przebiegów krzywych mięknięcia skupia się także na zanotowanych dla badanych materiałów wartościach temperatur rekrytalizacji, które odniesione zostały zarówno do początku procesu rekrytalizacji, jego trwania, jak i końca, co zamieszczone zostało w tabeli 9.3.15. Ich ilustrację graficzną stanowią ukazane na rysunkach 9.3.77 i 9.3.78 wykresy wpływu wielkości odkształcenia rzeczywistego na zanotowane na poszczególnych etapach procesu rekrytalizacji wartości temperatur dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE, które dodatkowo za pomocą równania 9.3.1 na kolejnych ilustracjach 9.3.79 i 9.3.80 zostały ukazane w układzie logarymicznym. W dalszej części badań na podstawie analizy zamieszczonych na rysunkach 9.3.77 – 9.3.80 charakterystyk wyznaczono wartości współczynników funkcji, które zamieszczone w tabeli 9.3.16. Ich ilustrację graficzną stanowią wykresy przedstawione na rysunkach 9.3.81 i 9.3.82 odniesione do poszczególnych etapów procesu rekrytalizacji. Podsumowanie omawianej w niniejszym podrozdziale tematyki stanowią ukazane na rysunkach 9.3.83 i 9.3.84 obrazy z mikroskopu optycznego mikrostruktur przekrojów wzdłużnych drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE o średnicach 0,5 mm po poddaniu materiałów zabiegom obróbki cieplnej w czasie jednogodzinnego testu w temperaturach odpowiadających ich rekrytalizacji połówkowej tj. dla miedzi w gatunku Cu-ETP – 125 °C, natomiast dla miedzi beztlenowej w temperaturze 170 °C.

W podrozdziale 9.3.4 analizie poddano wpływ prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na temperaturę rekrytalizacji drutów. W tym celu dla drutów o średnicach 2,5 mm uzyskanych z prętów z miedzi beztlenowej z technologii Upcast, Rautomead oraz DCC-AGH, dla których prędkość odlewania obejmowała zakres od 0,006 m/min. do 4,0 m/min., a także jako punkt porównania dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP – sporządzono krzywe mięknięcia zilustrowane na rysunkach od 9.3.85 do 9.3.88. Przedstawiają one zmiany własności mechanicznych drutów w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania, dla których dane liczbowe zamieszczono w aneksie w tabelach A9.3.1 oraz A9.3.5 – A9.3.7. Otrzymane w wyniku ich interpretacji wartości temperatur rekrytalizacji zostały porównane z wynikami badań kalorymetrycznych, które zamieszczono w tabeli 9.3.17. Z kolei uzyskane krzywe kalorymetryczne drutów zilustrowano na rysunkach 9.3.89 – 9.3.95. Kontynuację tematyki wpływu prędkości odlewania prętów z miedzi beztlenowej na odporność cieplną drutów stanowią poddane analizie krzywe mięknięcia przedstawione na rysunkach 9.3.96 – 9.3.101 dla drutów uzyskanych z prętów z procesu ciągłego odlewania przy wydatku wody chłodzącej krystalizator w ilości od 40 l/min. do 60 l/min. ilustrujące zmiany własności wytrzymałościowych i plastycznych drutów w funkcji temperatury. Dane liczbowe potrzebne do sporządzenia niniejszych charakterystyk zamieszczono w aneksie w tabelach A9.3.1 oraz A9.3.7 – A9.3.9. Badane materiały poddano także ocenie podatności do wyżarzania rekrytalizującego za pomocą testu wydłużenia sprężyny. Wyniki próby zamieszczono w tabeli 9.3.18.

Przeprowadzona w ramach kolejnego z podrozdziałów – 9.3.5 analiza dotyczy wpływu wydatku wody chłodzącej krystalizator w procesie ciągłego odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na temperaturę rekrytalizacji drutów. Dokonana w oparciu o klasyczne krzywe mięknięcia będące zależnościami zmian własności mechanicznych materiałów w funkcji temperatury dotyczy drutów uzyskanych z prętów z miedzi beztlenowej, dla których podczas procesu ciągłego odlewania zastosowano stałą szybkość z zakresu od 1,0 m/min. do 4,0 m/min. oraz zróżnicowaną ilość przepływu wody chłodzącej wynoszącą 40 l/min., 50 l/min. oraz 60 l/min. Wykresy zilustrowane na rysunkach 9.3.102 – 9.3.109 dotyczą własności wytrzymałościowych i plastycznych drutów poddanych ingerencji temperatury z zakresu 20 – 500 °C. Dane liczbowe potrzebne do ich skonstruowania zamieszczono w aneksie w tabelach A9.3.1, A9.3.7 – A9.3.9. Ciąg dalszy rozważań nad omawianym zagadnieniem dotyczy analizy badań kalorymetrycznych, których wartości temperatur początku i końca rekrytalizacji przedstawiono w tabeli 9.3.19. Z kolei ilustrację graficzną krzywych kalorymetrycznych badanych drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 1,0 m/min. i 4,0 m/min. oraz wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie od 40 l/min. do 60 l/min. ukazano na rysunkach 9.3.110 – 9.3.113.

Kolejny podrozdział 9.3.6 dotyczy analizy wpływu obróbki cieplnej materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na temperaturę rekrytalizacji drutów. W ramach badań doświadczalnych nad zagadnieniem na rysunkach 9.3.114 i 9.3.115 przedstawiono klasyczne krzywe mięknięcia drutów w teście jednogodzinnego wygrzewania w charakterze zależności wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia względnego  $A_{250}$  w funkcji temperatury. Dane liczbowe do ich konstrukcji zamieszczono w aneksie w tabeli A9.3.10. Zestawienie opracowanych na podstawie analizy krzywych mięknięcia temperatur rekrytalizacji drutów zamieszczono w tabeli 9.3.20. W dalszej części analizy na rysunkach 9.3.116 – 9.3.128 przedstawiono wybrane mikrostruktury przekrojów wzdłużnych drutów widziane w optyce mikroskopu świetlnego, które wytypowane zostały zgodnie z punktami zaznaczonymi w sposób schematyczny na rysunku 9.3.115

Kolejny, siódmy podrozdział badań doświadczalnych nad odpornością cieplną miedzi dotyczy analizy wpływu zabiegów wyżarzania międzyoperacyjnego na temperaturę rekrytalizacji drutów. Na rysunku 9.3.129 zilustrowano wykresy zależności temperatury rekrytalizacji miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE od wielkości odkształcenia rzeczywistego, które stanowią interpretację krzywych przedstawionych w podrozdziale 9.3.3 na ilustracjach 9.3.77 i 9.3.78. W pierwszej części analizy na rysunkach 9.3.130 – 9.3.133 ukazano charakterystyki zmian własności mechanicznych drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE po zabiegach międzyoperacyjnego wygrzewania rekrytalizującego (0w, 1w, 2w, 3w), w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wyżarzania. Wartości liczbowe niezbędne do ich skonstruowania zamieszczono w aneksie w tabeli A9.3.11. Odnotowane na podstawie analizy krzywych mięknięcia wartości temperatur rekrytalizacji materiałów zamieszczono w tabeli 9.3.21, natomiast w tabeli zestawieniowej 9.3.22 przedstawiono mikrostruktury przekrojów wzdłużnych drutów

o średnicach 2,5 mm widziane w optyce mikroskopu świetlnego. Druga analityczna część niniejszego podrozdziału dotycząca własności mechanicznych materiałów o średnicach 0,5 mm została dokonana w oparciu o klasyczne krzywe mięknięcia drutów badane w teście jednogodzinnego wygrzewania w charakterze zależności wytrzymałość na rozciąganie / wydłużenie względne  $A_{250}$  w funkcji temperatury przedstawione na rysunkach 9.3.134 i 9.3.135. Dane liczbowe do ich konstrukcji zawarto w aneksie w tabeli A9.3.12. W tabeli 9.3.23 zamieszczono wartości temperatur rekrytalizacji w teście jednogodzinnego wygrzewania drutów o średnicy 0,5 mm otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE poddanej zabiegom międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego (0w, 1w, 2w, 3w) w temperaturze 230 °C i 300 °C w czasie 1 godziny. Podsumowanie omawianej tematyki stanowią wykresy przedstawione na rysunku 9.3.136 ilustrujące w sposób zbiorczy wpływ odkształcenia rzeczywistego na wartość temperatury rekrytalizacji drutów o średnicach 2,5 mm i 0,5 mm uzyskanych z miedzi beztlenujonej i tlenowej po zabiegach wyżarzania międzyoperacyjnego. Na kolejnej ilustracji 9.3.137 ukazano przebiegi linii trendów dotyczących temperatur rekrytalizacji drutów z dwóch gatunków miedzi oraz ich ekstrapolację. Ilustracja 9.3.138 dotyczy wykresów zależności różnicy wartości temperatur rekrytalizacji drutów w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP w funkcji ilości zabiegów międzyoperacyjnego wyżarzania.

Podrozdział 9.3 kończy się podsumowaniem w formie streszczenia najważniejszych obserwacji dotyczących charakterystyki porównawczej odporności cieplnej drutów z dwóch gatunków miedzi wraz ze wskazaniem praktycznego znaczenia omawianej problematyki.

### 9.3.1. Analiza wpływu rodzaju materiału wsadowego do procesu ciągnięcia na podatność do wyżarzania drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na podstawie testów technologicznych

Aktualnie obowiązujące zalecenia zarówno światowych, jak i krajowych norm i standardów oraz instytucji giełdowych wymuszają na producentach katod z miedzi w gatunku Cu-CATH-1 dopuszczalną zawartość domieszek w miedzi wykorzystywanej na cele elektryczne na poziomie – maksymalnie kilkudziesięciu ppm wag. (wg Londyńskiej Giełdy Metali – London Metal Exchange LME oraz normy PN-EN 1978:2000 – 45 ppm wag. bez srebra). W tabeli 9.3.1, podobnie jak we wcześniejszym etapie pracy (por. tabela 9.1.5 w podrozdziale 9.1 pt.: „Identyfikacja własności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych”) zamieszczono zestawienie sumy zanieczyszczeń w katodach miedzianych produkowanych przez wybranych producentów, jednak poniżej przedstawiono także wymagania sankcjonowane przez Londyńską Giełdę Metali.

Tabela 9.3.1. Dopuszczalne zawartości zanieczyszczeń w katodach z miedzi w gatunku Cu-CATH-1 wg różnych producentów oraz wymagania stawiane przez Londyńską Giełdę Metali

Producent	Kraj	Zawartość wagowa pierwiastków [ppm wag.]																		
		Ag	As	Bi	Cd	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	P	Pb	S	Sb	Se	Sn	Te	Zn	$\Sigma\{Ag\}$	
Aurubis	Niemcy	10	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	5,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	19
KGHM Polska Miedź S.A.	Polska	10	0,7	0,6	1,0	0,5	0,5	0,5	0,8	1,0	1,0	1,0	7,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	19
Xstrata	Australia	9,0	0,7	0,8	0,1	0,5	0,5	0,1	0,5	0,5	0,5	2,0	6,0	1,0	0,3	0,3	1,0	1,5	1,5	16
Londyńska Giełda Metali (LME), max.		25	5,0	2,0	1,0	3,0	1,0	10	1,0	3,0	1,0	5,0	15	4,0	2,0	3,0	2,0	3,0	3,0	45

Na podstawie powyższych danych można jednoznacznie stwierdzić, iż przedstawiona czołówka światowych wytwórców – w tym również KGHM Polska Miedź S.A – produkuje katody miedziane, w których maksymalna zawartość zanieczyszczeń nie przekracza 20 ppm wag. (bez uwzględnienia srebra).

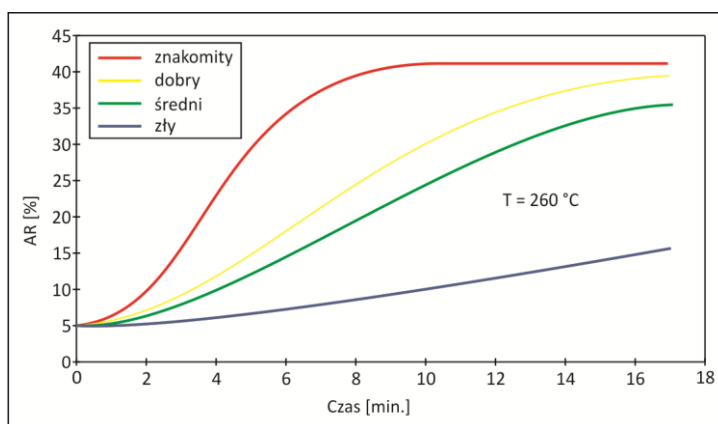
Warto zaznaczyć, iż od początku lat pięćdziesiątych XX wieku obserwuje się dynamiczny rozwój badań doświadczalnych ukierunkowanych na opracowanie metody określenia podatności miedzi do wyżarzania. Ocena odporności cieplnej walcówek miedzianych od wielu lat jest przedmiotem szerokich badań i analiz. Począwszy od 1887 roku kiedy Sorby po raz pierwszy sformułował pojęcie rekrytalizacji, literatura tematu proponuje wiele testów technologicznych i procedur badawczych, których celem jest jak najlepsze odwzorowanie zachowania się materiału poddanego działaniu temperatury. Znane są metody oparte na badaniu własności wytrzymałościowych (np. twardości,



mikrotwardości czy granicy plastyczności), własności plastycznych (test AR, test TWS) czy fizycznych (kalorymetria, badanie wielkości ziarna, analiza objętości zrekrystalizowanej, tłumienie fali akustycznej). Wszystkie metody opierają się jednak w swej istocie na analizie skutku jaki wywołuje temperatura w odkształconym wcześniej na zimno materiale. Spośród wymienionych testów, najbardziej dokładną i rozpowszechnioną metodą oceny podatności walcówki miedzianej do rekrytalizacji jest metoda rozciągania sprężyny opracowana przez Dialektra AG [109] i opatentowana w Niemczech w 1952 roku, a następnie zmodyfikowana przez szwedzką firmę ASEA i AB Svenska Metallverken i w końcu usankcjonowana jako norma [110]. Metoda rozciągania spirali zwana również testem wydłużenia sprężyny (TWS) polega na pomiarze wydłużenia sprężyny wykonanej z drutu miedzianego i stanowi ona miarę podatności miedzi do rekrytalizacji w określonych warunkach obróbki cieplnej. Procedura testu TWS polega na wygrzewaniu walcówki z miedzi w temperaturze 700 °C przez 1 godzinę, a następnie wykonaniu z tak obrobionego cieplnie materiału drutu o średnicy 2,5 mm. Następnie drut umieszcza się w kąpeli olejowej o temperaturze 200 °C na czas 2 godzin. Z tak przygotowanego drutu zwiąja się sprężynę na trzpieniu o średnicy 20 mm i skoku 2,0 mm, którą obciąża się naprężeniem 7 MPa i obserwuje się wydłużenie sprężyny. Jeśli materiał wykazuje wydłużenie sprężyny nie mniejsze niż 400 uznaje się, że walcówka pozytywnie spełnia wymagania testu TWS [111, 112].

Wiele renomowanych firm produkujących miedź zmieniło parametry prowadzenia testu TWS, lub wręcz opracowało własne procedury pozwalające na szybką kwalifikację miedzi. I tak na przykład belgijski zakład Metallurgie Hoboken Overpelt – Olen (obecnie Aurubis) [113] wdrożył w warunkach przemysłowych trzy warianty wyżarzania pośredniego w procedurze TWS, a mianowicie: temperaturę 600 °C dla miedzi niższej czystości chemicznej, temperaturę 850 °C dla miedzi wysokiej czystości (definiowanej jako gatunek uzyskiwany metodą Contirod) oraz bez wyżarzania dla odbiorców, którzy nie stosują zabiegów obróbki cieplnej w stosunku do walcówki. Z kolei francuska firma SCCC – Nexans opracowała własny sposób określania podatności na wyżarzanie poprzez szybki test wydłużenia zwany testem AR [114]. Polega on na przeciągnięciu w jednej operacji walcówki o średnicy 8,0 mm na drut o średnicy 6,4 mm, a następnie jego wygrzaniu w kąpeli olejowej w temperaturze 260 °C przez 8 minut. Tak obrobiony cieplnie drut poddawany jest następnie próbie jednoosiowego rozciągania przy początkowej długości bazy pomiarowej 200 mm. Z próby rozciągania wyznacza się wydłużenie całkowite materiału przy zerwaniu. Jeśli wartość tego parametru nie jest niższa niż 30 % uznaje się, że walcówka pozytywnie spełniła wymagania testu AR.

Jak wynika z przedstawionego wyżej krótkiego opisu test AR jest pomiarem szybkim bowiem już po kilkunastu minutach umożliwia uzyskanie informacji o podatności miedzi do wyżarzania. Na rysunku 9.3.3 będącym dodatkową interpretacją ilustracji 9.3.1 ukazano schematycznie zróżnicowanie podatności do wyżarzania różnych gatunków miedzi. Znakomita podatność do rekrytalizacji materiału oznaczonego kolorem czerwonym, sprawia, że proces ten zakończył się już po około 9 minutach. Natomiast miedź o niskiej podatności do wyżarzania rekrytalizuje w temperaturze 260 °C o wiele wolniej i nawet po 17 minutach materiał nie uległ jeszcze pełnej rekrytalizacji.



Rys. 9.3.3. Jakościowa analiza różnych gatunków miedzi z punktu widzenia ich podatności do procesu wyżarzania rekrytalizującego

Pod względem przeprowadzanych procedur badawczych test AR, w odróżnieniu do testu TWS

jest pomiarem bardziej rygorystyczny, w którym poddaje się badaniom odnowy struktury materiał po odkształceniu na zimno 36 %, a więc o mniejszej sile pędnej w porównaniu z testem TWS. Dzięki temu jego wynik wyraźniej ukazuje zróżnicowanie walcówek wytworzonych w procesie przeróbki plastycznej na gorąco zarówno pod kątem składu chemicznego (rodzaj i ilość atomów pierwiastków zanieczyszczeń), jak i niedoskonałości struktury (wielkość ziarna). Należy zaznaczyć, że stan strukturalny materiału jest wynikiem procesów odkształcania i rekrytalizacji dynamicznej mających miejsce jednocześnie w klatkach walcowniczych oraz rekrytalizacji statycznej zachodzącej pomiędzy nimi. Czas przebywania materiału w kotlinie odkształcenia wynosi od pojedynczych sekund w pierwszych klatkach walcowniczych do tysięcznych części sekundy w klatkach ostatnich, zaś temperatura materiału zawiera się w przedziale od 800 °C do 400 °C. Tak ostry reżim technologiczny musi ujawnić wpływ tej grupy pierwiastków domieszek, które hamują rekrytalizację dynamiczną jak również tych, które hamują rekrytalizację statyczną. Tak więc podejmowany problem należy do bardzo trudnych z badawczego punktu widzenia i nie jest rozwiązywalny w prosty sposób z uwagi na synergiczność efektów pochodzących od pojedynczych pierwiastków. W tym tkwi istota problemu, którego rozwiązanie pozwoliłoby na opracowanie nowego podejścia do technologii przygotowania katod z punktu widzenia rodzaju pierwiastków domieszek i wzajemnych relacji pomiędzy nimi, a w konsekwencji klasyfikacji katod pod kątem ich różnych zastosowań zanim jeszcze zostanie wyprodukowana walcówka miedziana.

Warto nadmienić, iż test wydłużenia w próbie rozciągania odpowiednio przygotowanego drutu (AR) jest metodą szacowania podatności miedzi do wyżarzania, która obok klasycznego testu wydłużenia sprężyny (TWS) weszła na stałe do praktyki produkcyjnej. Ponieważ podatność miedzi do wyżarzania jest ściśle związana z ilością i rodzajem domieszek wspomniane wyżej testy technologiczne w pewnym sensie można traktować jako pośrednią miarę czystości chemicznej walcówki. W tabeli 9.3.2 zamieszczono przedstawione zestawienie porównawcze wyników testu TWS i AR [115, 116].

Tabela 9.3.2. Klasyfikacja miedzi na podstawie wyników testu AR i testu wydłużenia sprężyny TWS [115, 116]

Test AR	Test TWS	Klasyfikacja walcówki
AR < 10 %	TWS < 350	Słaba podatność do wyżarzania
30 % < AR < 10 %	425 < TWS < 350	Średnia podatność do wyżarzania
AR > 30 %	TWS > 425	Bardzo dobra podatność do wyżarzania

W ramach niniejszego podrozdziału przeprowadzono badania doświadczalne, które zostały podzielone na dwie części. Celem pierwszej z nich była wstępna ocena podatności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE wytwarzanych w liniach technologicznych Contirod i Upcast do procesu wyżarzania rekrytalizującego. W szczególności w ramach programu badawczego dokonana została ocena wpływu stanu początkowego materiału wsadowego – pod kątem składu chemicznego oraz stanu strukturalnego na ich podatność do procesów wyżarzania rekrytalizującego. W badaniach wykorzystano standardowe procedury dwóch alternatywnych testów stosowanych powszechnie w praktyce przemysłowej (test wydłużenia sprężyny TWS oraz test wydłużenia AR), a ponadto standardową procedurę stosowaną w laboratoriach badawczych polegającą na teście wyżarzania 1-godzinnego (przyjęte w pracy oznaczenie – 1H). Wszystkie trzy testy stanowią alternatywne oceny podatności do wyżarzania miedzi produkowanej w warunkach przemysłowych. W tabeli 9.3.3 zamieszczono podstawowe parametry ich prowadzenia. Dla celów informacyjnych w poniższej tabeli przedstawiono także procedury obowiązujące przy przeprowadzaniu testu wydłużenia sprężyny PWS – SP850 [117], który także stosowany jest w praktyce przemysłowej.

Tabela 9.3.3. Szczegółowe parametry procedur testów technologicznych wyżarzalności miedzi

Test technologiczny	Materiał wsadowy	Wyżarzanie	Odształcenie względne (średnica drutu)	Wyżarzanie rekrytalizujące	Test wydłużenia	Wyznaczona wielkość
		[°C/min.]	[%]	[°C / min. / medium]		
TWS – ISO	Walcówka / Pręt 8,0 mm	700 / 60	90 (2,5 mm)	200 / 120 / olej	Sprężyna, obciążenie wywołujące naprężenie 7,0 MPa	Wydłużenie sprężyny

					w czasie 1 min.	
PWS – SP850 CUMERIO (obecnie Aurubis)	Walcówka / Pręt 8,0 mm	850 / 30	98 (1,0 mm)	200 / 120 / olej	Sprężyna, obciążenie wywołujące naprężenie 6,5 MPa w czasie 1 min.	Wydłużenie sprężyny
AR	Walcówka / Pręt 8,0 mm	-	36 (6,4 mm)	260 / 8 / olej	Próba jednoosiowego rozciągania, baza pomiarowa 200 mm	Wydłużenie względne A <sub>200</sub>
1H	Walcówka / Pręt 8,0 mm	-	90 (2,5 mm)	20 / 60 / -	Wyznaczenie krzywych mięknienia	Temperatura rekrystalizacji
				100 / 60 / olej		
				120 / 60 / olej		
				140 / 60 / olej		
				160 / 60 / olej		
				170 / 60 / olej		
				180 / 60 / olej		
				190 / 60 / olej		
				200 / 60 / olej		
				210 / 60 / olej		
				220 / 60 / olej		
				230 / 60 / olej		
				240 / 60 / olej		
				250 / 60 / olej		
260 / 60 / olej						
300 / 60 / olej						

Natomiast część druga badań doświadczalnych, która realizowana była także w ramach niniejszego podrozdziału 9.3.1 miała na celu określenie wpływu stanu początkowego materiałów wsadowych tj. walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP – oznaczonej jako materiały A i B oraz pręta z miedzi beztlenuowej tj. próbki C na wynik testów wyżarzalności. W tym celu materiały wsadowe o średnicach 8,0 mm poddane zostały wstępnej obróbce cieplnej polegającej na wygrzewaniu w temperaturze 260 °C w czasie od 10 minut do 120 minut. Powyższy zabieg miał na celu oddalenie zróżnicowania strukturalnego materiałów wsadowych, które zostały otrzymane według różnych technologii.

W tabeli 9.3.4 zamieszczono w sposób kompleksowy parametry przyjętych w ramach podrozdziału 9.3.1 procedur badawczych w odniesieniu do materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE oznaczonych jako próbki A, B i C.

Tabela 9.3.4. Parametry i rodzaje testów technologicznych w ramach analiza wpływu rodzaju materiału wsadowego do procesu ciągnięcia na podatność do wyżarzania miedzi

Oznaczenie materiału	Stan materiału wsadowego								
	Po linii technologicznej	Po zabiegu obróbki cieplnej w temperaturze 260 °C i czasie [min.]							
		10	20	30	40	50	60	120	
A	TWS, AR, 1H	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR
B	TWS, AR, 1H	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR
C	TWS, AR, 1H	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR	TWS, AR

Zatem na podstawie przedstawionego powyżej w tabeli 9.3.4 programu badań w pierwszej kolejności przeprowadzono testy TWS i AR na drutach otrzymanych z materiałów wsadowych w postaci walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP po linii Contirod oraz pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast, których skład chemiczny zamieszczono w tabeli 9.3.5.

Tabela 9.3.5. Skład chemiczny badanych walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP (próbki A, B) i pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE (próbka C) o średnicach nominalnych 8,0 mm

Oznaczenie materiału	Gatunek materiału	Zawartość wagowa pierwiastków [ppm wag.]																	
		Ag	As	Bi	Cd	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	P	Pb	S	Sb	Se	Si	Sn	Te	Zn
A	Cu-ETP	13,0	0,30	0,01	0,02	0,005	0,12	1,11	0,05	0,53	2	0,92	3,1	0,08	0,21	2	0,12	0,009	1,10
B	Cu-ETP	13,7	0,26	0,01	0,02	0,005	0,09	3,80	0,05	1,00	2	2,00	5,7	0,09	0,16	2	0,18	0,006	1,28
C	Cu-OFE	6,0	0,19	0,01	0,03	0,080	0,22	3,00	0,89	0,37	0	2,00	8,1	0,09	0,09	1	0,11	0,002	0,95

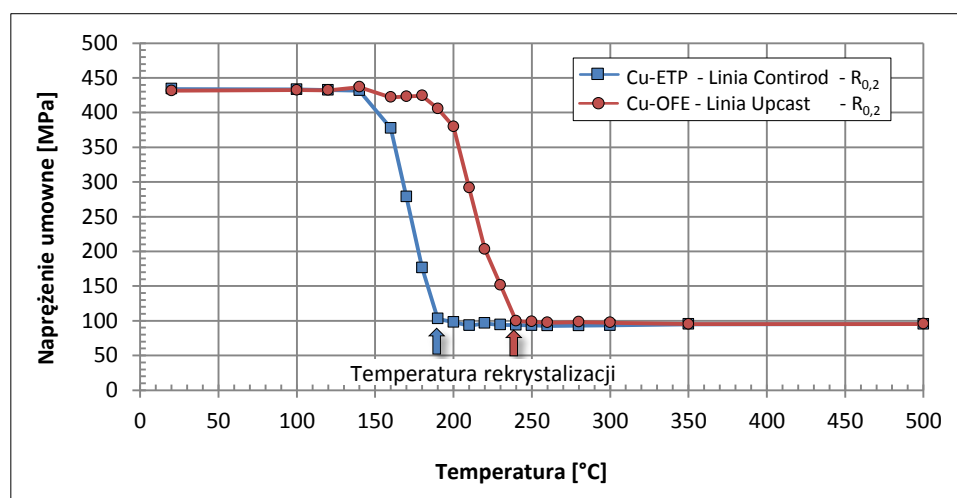
Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych na podstawie przeprowadzonego testu wydłużenia sprężyny TWS drutów o średnicy 2,5 mm oraz pomiaru wydłużenia AR drutów o średnicy 6,4 mm zamieszczono poniżej w tabeli 9.3.6.

Tabela 9.3.6. Wyniki testów wyżarzalności wytypowanych do badań materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP po linii Contirod i Cu-OFE po linii Upcast

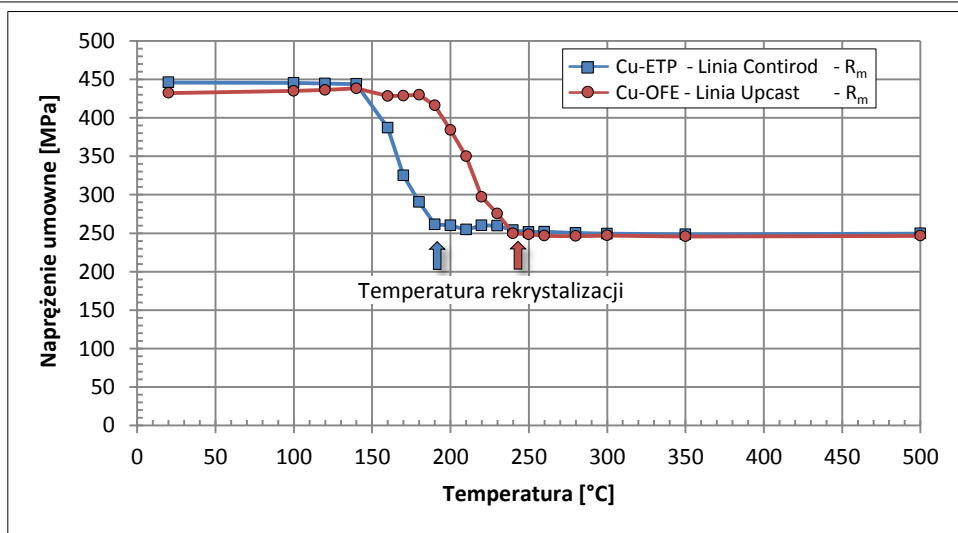
Oznaczenie materiału	Wynik testu wyżarzalności	
	TWS	AR
	[mm]	[%]
A	462	37
B	452	36
C	210	4

Na podstawie analizy wyników testów TWS i AR określających podatność materiałów do wyżarzania jednoznacznie stwierdzono, iż w przypadku miedzi w gatunku Cu-ETP wyniki zastosowanych metod znacznie odbiegają od tych zanotowanych dla materiału uzyskanego z prętów z procesu ciągłego odlewania metodą Upcast. Zauważono, iż zróżnicowanie występuje zarówno w przypadku mniej wymagającego testu wydłużenia sprężyny TWS, jak i bardzo rygorystycznego testu wydłużenia AR. Pojawia się zatem pytanie o przyczynę powyższej odmienności pomimo faktu, iż materiał z miedzi w gatunku Cu-OFE oznaczony jako próbka C charakteryzuje się wyższą czystością chemiczną. W przypadku miedzi A i B sumaryczna zawartość zanieczyszczeń kształtuje się na poziomie około 210 ppm wag. (około 25 ppm wag. zanieczyszczeń i około 180 ppm wag. tlenu), podczas gdy w przypadku materiału C – zawartość domieszek wynosi maksymalnie około 20 ppm wag., gdyż jest to miedź beztlenuj.

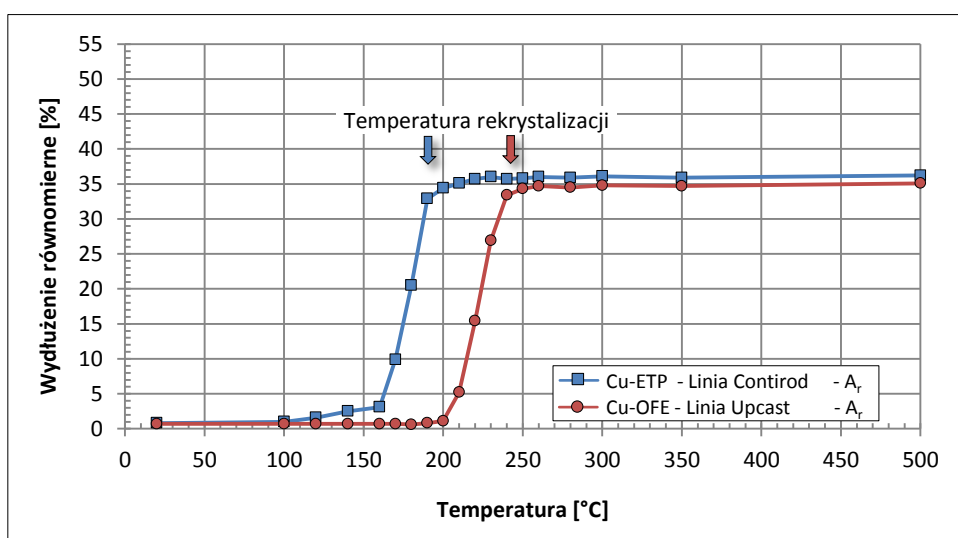
Oprócz przeprowadzonych dwóch metod oceny podatności materiałów do rekrytalizacji w dalszym etapie pracy zrealizowano także badania podatności do wyżarzania drutów uzyskanych z materiałów wsadowych A i C w teście 1-godzinnym wygrzewania (test technologiczny oznaczony jako 1H). Na podstawie wyników badań własności mechanicznych drutów o średnicach 2,5 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz Cu-OFE poddanych wygrzewaniu w zakresie temperatur od 20 °C do 500 °C podjęto próbę wyznaczenia temperatury rekrytalizacji materiałów. Otrzymane w postaci klasycznych krzywych mięknięcia wyniki badań rekrytalizacji drutów po teście jednogodzinnej obróbki cieplnej zilustrowano na rysunkach 9.3.4 – 9.3.7. Dane liczbowe do ich konstrukcji zamieszczono w aneksie w tabeli A9.3.1.



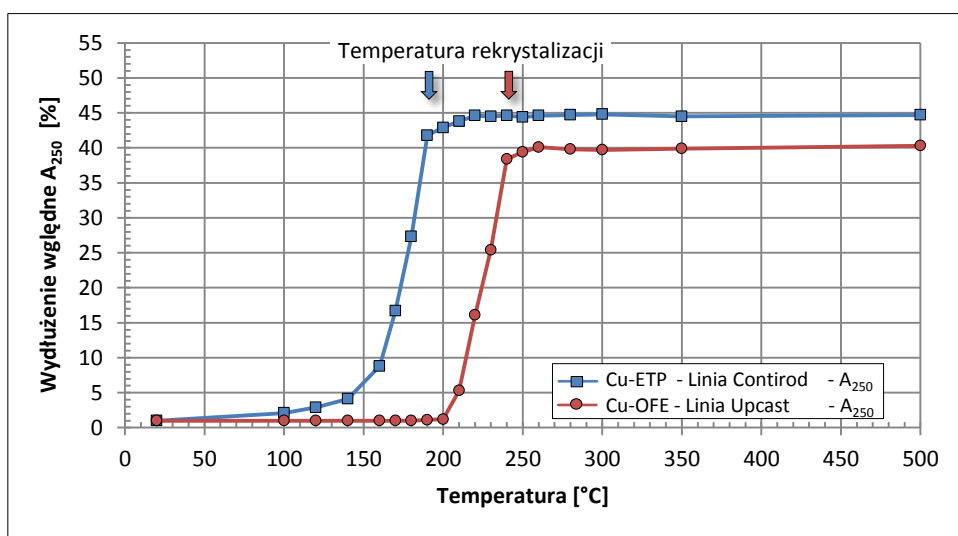
Rys. 9.3.4. Granica plastyczności drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.3.5. Wytrzymałość na rozciąganie drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.3.6. Wydłużenie równomierne drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

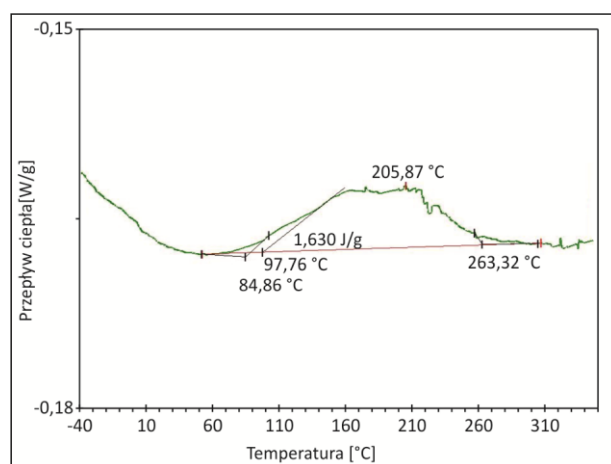


Rys. 9.3.7. Wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

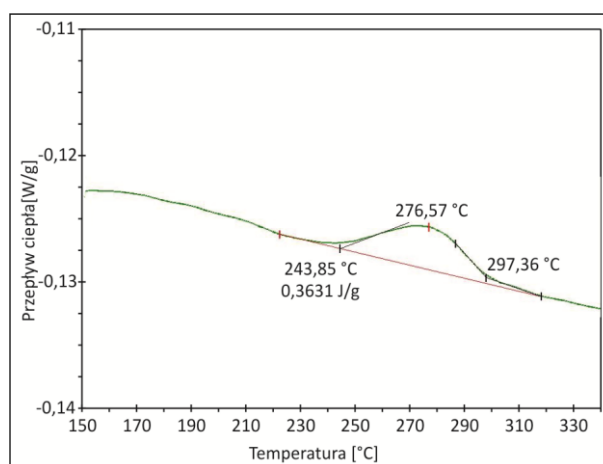
Biorąc pod uwagę fakt, iż własności mechaniczne drutów po rekrytalizacji z dwóch gatunków miedzi kształtują się na poziomie dla granicy plastyczności około 100 MPa, wytrzymałości na rozciąganie około 250 MPa oraz wydłużenia równomiernego około 35 % i wydłużenia względnego  $A_{250}$  około 42 % zauważono, iż temperatura rekrytalizacji drutów zależy od rodzaju materiału wsadowego do procesu ciągnięcia przyjmując niższą wartość dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP. Zgodnie z wykresami zilustrowanymi na rysunkach 9.3.4 i 9.3.5 zaobserwowano, iż o ile w przypadku drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP wygrzewanych w temperaturze 190 °C przez czas jednej godziny nastąpił spadek własności wytrzymałościowych z poziomu około 430 MPa do około 100 MPa dla granicy plastyczności oraz z wartości 450 MPa do około 250 MPa dla wytrzymałości na rozciąganie, o tyle w przypadku drutów z miedzi beztlenowej własności wytrzymałościowe pozostały w dalszym ciągu na tym samym początkowym poziomie, a więc około 430 MPa dla granicy plastyczności oraz około 440 MPa dla wytrzymałości na rozciąganie. Podobny wyniki zaobserwowano w przypadku analizy charakterystyk wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  badanych drutów.

Analiza krzywych mięknięcia jednoznacznie wykazała, iż temperatura rekrytalizacji w przypadku drutów z miedzi beztlenowej jest wyższa od temperatury rekrytalizacji dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP o około 50 °C i wynosi około 240 °C.

Powyższe obserwacje wynikające z analizy zmian własności mechanicznych, zostały potwierdzone w badaniach kalorymetrycznych, których wyniki przedstawiono na kolejnych rysunkach 9.3.8 i 9.3.9. W niniejszej pracy wykorzystywano metodę skaningowej kalorymetrii różnicowej – DSC będącej techniką, w której mierzy się moc cieplną, a w szczególności zmianę różnicy strumienia cieplnego powstającego między próbką badaną i referencyjną w trakcie programu temperaturowego. Pierwotnym sygnałem pomiarowym jest różnica temperatur powstająca między próbką badaną, a próbką odniesienia w trakcie zmian temperatury otoczenia obu materiałów. W analizie uzyskanych krzywych DSC, istotna jest identyfikacja efektów będących wynikiem zachodzących procesów, przemian itp. W zależności od tego, czy występuje proces endoenergetyczny, czy egzoenergetyczny na krzywej pojawia się pik skierowany do góry bądź do dołu.



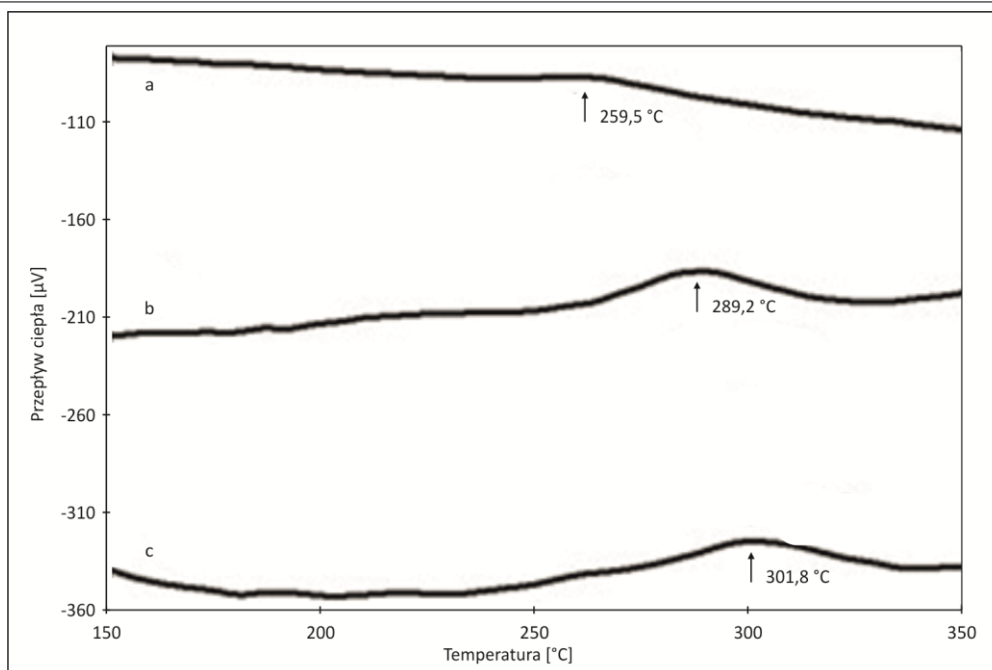
Rys. 9.3.8. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod



Rys. 9.3.9. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast

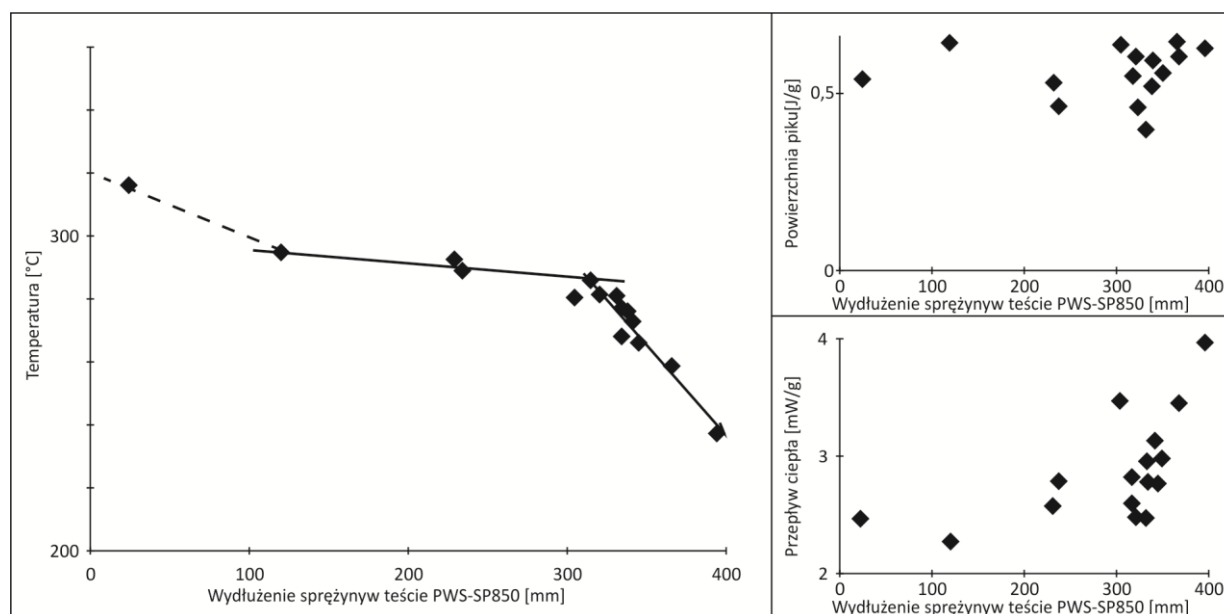
Zauważono, iż w przypadku miedzi w gatunku Cu-ETP (por. rys. 9.3.8) występuje charakterystyczny pik egzoenergetyczny świadczący o końcu procesu rekrytalizacji w temperaturze około 206 °C, natomiast w przypadku miedzi beztlenowej (por. rys. 9.3.9) wystąpił on w wyższym zakresie temperatury tj. przy wartości około 276 °C. Tym samym została potwierdzona obserwacja o zróżnicowanych wartościach temperatur rekrytalizacji badanych materiałów, a także wynikająca z badań kalorymetrycznych zmiana własności mechanicznych drutów.

Warto nadmienić, iż testy kalorymetryczne (DSC) stosowane na szeroką skalę w badaniach prowadzonych przez wielu naukowców w swoich pracach [118] są techniką bardzo czułą i zarazem szybką metodą analiz efektów energetycznych związanych z rekrytalizacją. Przykład takiego testu przedstawiono także na rysunku 9.3.10.



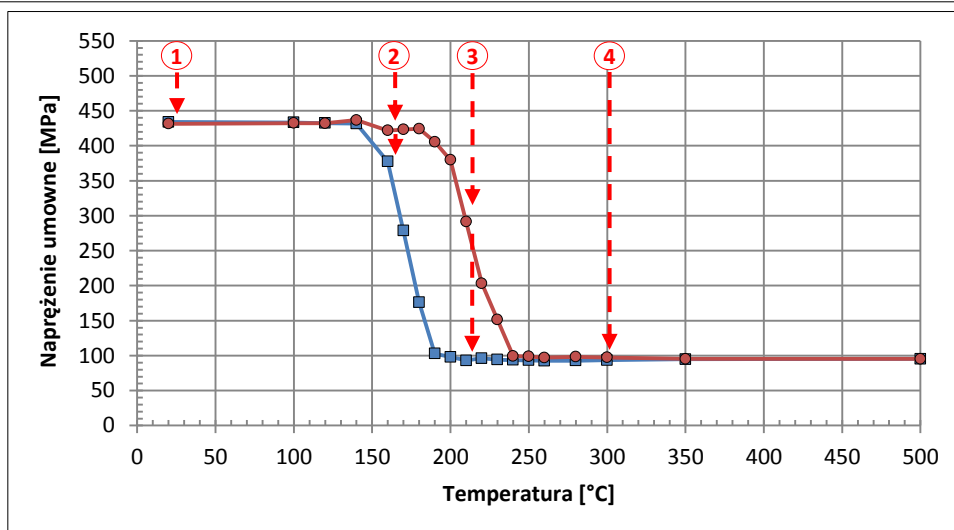
Rys. 9.3.10. Krzywa kalorymetryczna miedzi odkształconej na zimno 70 % wg Benchabane [119]. Prędkość przyrostu temperatury: a - 10 °C / min., b - 20 °C / min., c - 30 °C / min.

Analiza wykresów zależności przepływu ciepła od temperatury ujawniła piki podczas pierwszego nagrzewania, które obrazują przepływ energii podczas przemiany związanej z rekrytalizacją. Z kolei na rysunku 9.3.11 zilustrowano przykłady korelacji wyniku badań kalorymetrycznych z testem wydłużenia sprężyny PWS – SP850 (por. tabela 9.3.3) [120].



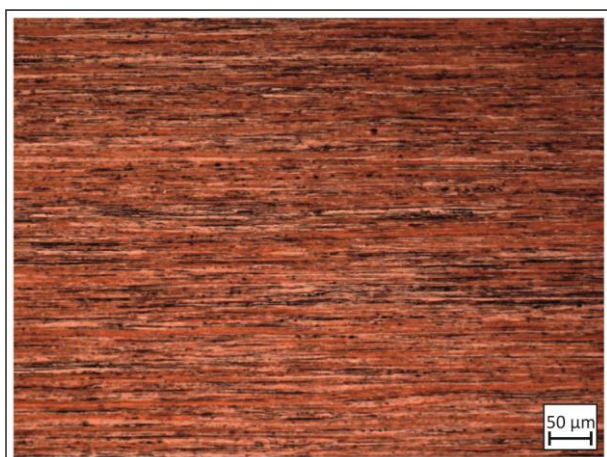
Rys. 9.3.11. Korelacja wyniku testu kalorymetrycznego DSC i wyniku wydłużenia sprężyny wg Schampa [120]

Powracając do głównego nurtu rozważań wpływu rodzaju materiału wsadowego do procesu ciągnięcia na podatność do wyżarzania miedzi określanej w testach technologicznych po raz kolejny nasuwa się pytanie o przyczynę występowania różnicy w wartościach temperatury rekrytalizacji miedzi beztlenowej i miedzi w gatunku Cu-ETP. Odpowiedź umożliwia obserwacja zmian strukturalnych materiałów poddanych wyżarzaniu. Do badań mikrostruktury przekrojów wzdłużnych drutów widzianych w optyce mikroskopu świetlnego zostały wytypowane próbki z dwóch gatunków miedzi według schematu przedstawionego na rysunku 9.3.12.

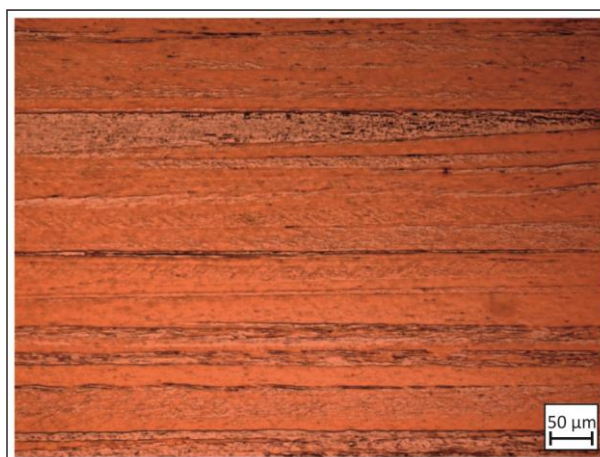


Rys. 9.3.12. Schemat wyboru próbek drutu z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE do badań strukturalnych

Wyniki badań strukturalnych zilustrowano na rysunkach 9.3.13 – 9.3.20, przy czym w lewej kolumnie zestawiono mikrostruktury dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP, natomiast w prawej dla drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE.



Rys. 9.3.13. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP po procesie ciągnięcia



Rys. 9.3.14. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm z miedzi w gatunku Cu-OFE po procesie ciągnięcia

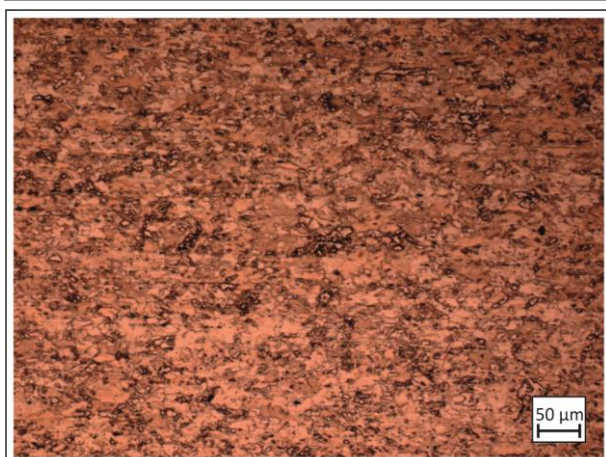


Rys. 9.3.15. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP po procesie wygrzewania w temperaturze 160 °C w czasie 1 h

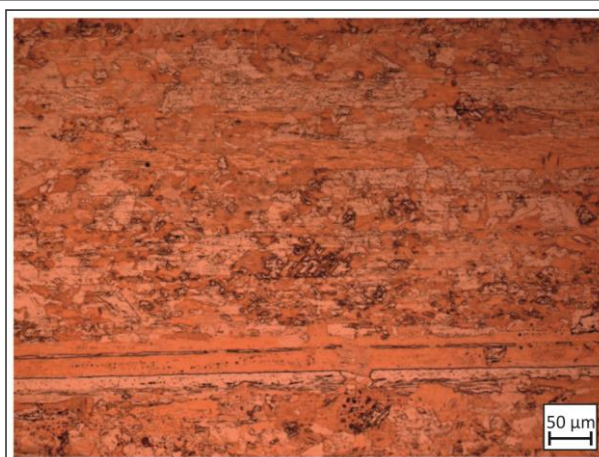


Rys. 9.3.16. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm z miedzi w gatunku Cu-OFE po procesie wygrzewania w temperaturze 160 °C w czasie 1 h

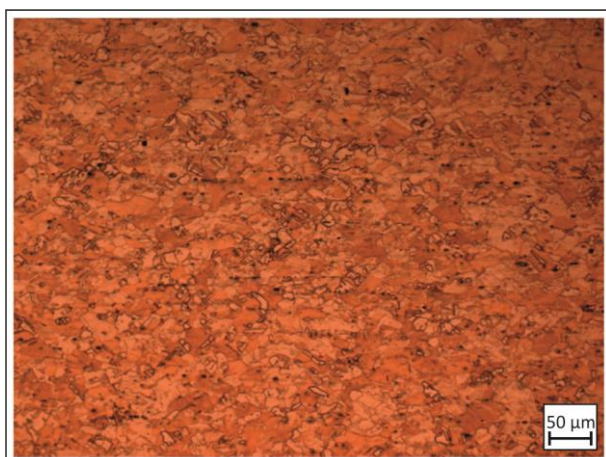




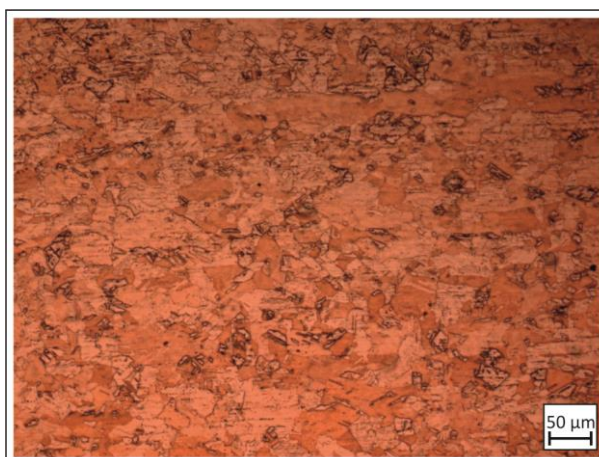
Rys. 9.3.17. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP po procesie wygrzewania w temperaturze 210 °C w czasie 1 h



Rys. 9.3.18. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm z miedzi w gatunku Cu-OFE po procesie wygrzewania w temperaturze 210 °C w czasie 1 h



Rys. 9.3.19. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP po procesie wygrzewania w temperaturze 300 °C w czasie 1 h



Rys. 9.3.20. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm z miedzi w gatunku Cu-OFE po procesie wygrzewania w temperaturze 300 °C w czasie 1 h

Analizując wyniki badań strukturalnych drutów miedzianych wygrzewanych w różnych temperaturach zauważono, iż w przypadku miedzi w gatunku Cu-ETP wygrzewanej w temperaturze 160 °C pojawiły się pierwsze zarodki rekrystalizacji (por. rys. 9.3.15). Próbkę z miedzi beztlenowej wygrzewaną w tej samej temperaturze nie wykazała natomiast żadnych zmian strukturalnych (por. rys. 9.3.16). Dopiero temperatura wygrzewania 210 °C w czasie 1 godziny prowadzi do całkowitej przebudowy struktury miedzi w gatunku Cu-ETP (por. rys. 9.3.17) i pojawienia się dużych, pojedynczych ziaren w miedzi beztlenowej (por. rys. 9.3.18). Mikrostruktury przedstawione na rysunkach 9.3.19 i 9.3.20, które dotyczą drutów wygrzewanych temperaturze 300 °C są już całkowicie zrekrystalizowane. O ile w przypadku miedzi w gatunku Cu-ETP zauważono zdecydowanie większą ilość ziaren, o tyle w przypadku materiału w gatunku Cu-OFE liczba nowych ziaren jest znacznie mniejsza. Wynika to z faktu, iż miedź beztlenowa uzyskana metodą Upcast charakteryzuje się znacznie mniejszą liczbą ziaren, która według różnych źródeł może wynosić około 200 w 1 metrze długości pręta, podczas gdy w typowej walcówce z miedzi w gatunku Cu-ETP występują drobne ziarna o wielkości około 20 μm równomiernie rozdrobnione podczas procesu walcowania na gorąco w linii technologicznej Contirod.

Część druga badań doświadczalnych polegająca na ocenie podatności do wyżarzania walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz odlewu z miedzi w gatunku Cu-OFE poddanych wstępnej obróbce cieplnej miała na celu zniwelowanie resztkowych różnic w stanie strukturalnym materiałów, które są efektem różnych warunków technologicznych ich wytwarzania w liniach produkcyjnych. Obróbka cieplna materiałów wsadowych realizowana w temperaturze 260 °C w czasie od 10 minut do 120 minut

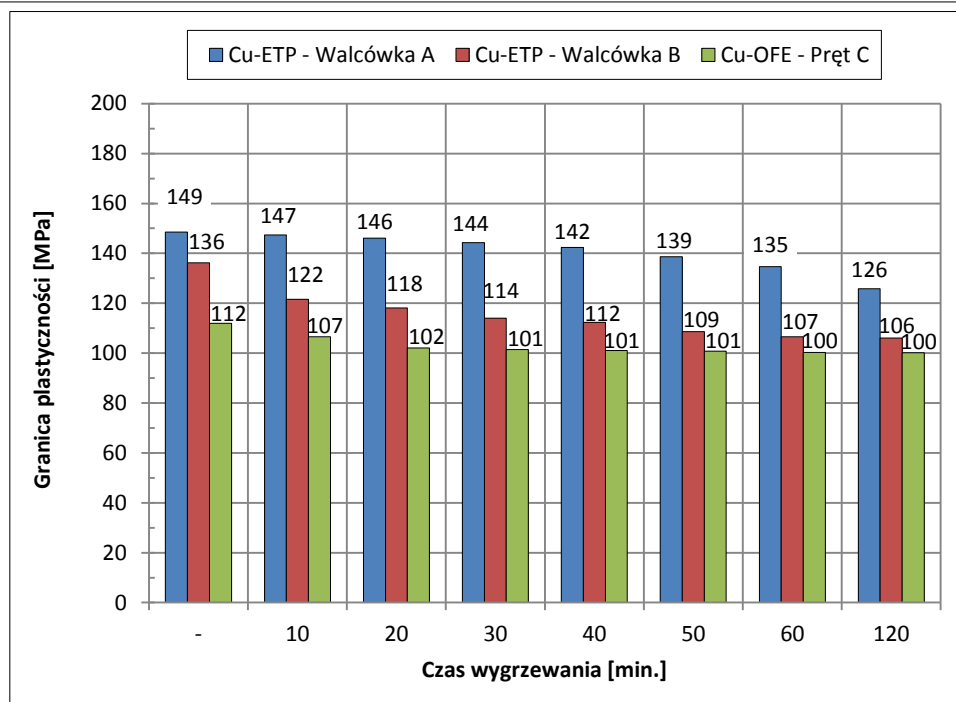
zgodnie z danymi zamieszczonym w programie badań w tabeli 9.3.4 miała dostarczyć odpowiedzi na pytanie: czy walcówka po linii ciągłego topienia, odlewania i walcowania Contirod oraz pręt z linii ciągłego odlewania Upcast znajdują się w stanie miękkim? Następnie tak przygotowane pręty z miedzi beztlenowej i walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP poddane zostały procedurom zgodnym z warunkami przeprowadzania testów technologicznych wydłużenie sprężyny TWS i wydłużenia AR (por. tabela 9.3.3).

Dokonano analizy otrzymanych rezultatów. W tabeli 9.3.7 zamieszczono wyniki granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia równomiernego oraz wydłużenia względnego  $A_{250}$  walcówek i pręta zarówno po linii Contirod i Upcast oraz po procesie wstępnego wygrzewania.

Tabela 9.3.7. Własności mechaniczne materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 260 °C i czasie od 10 minut do 120 minut

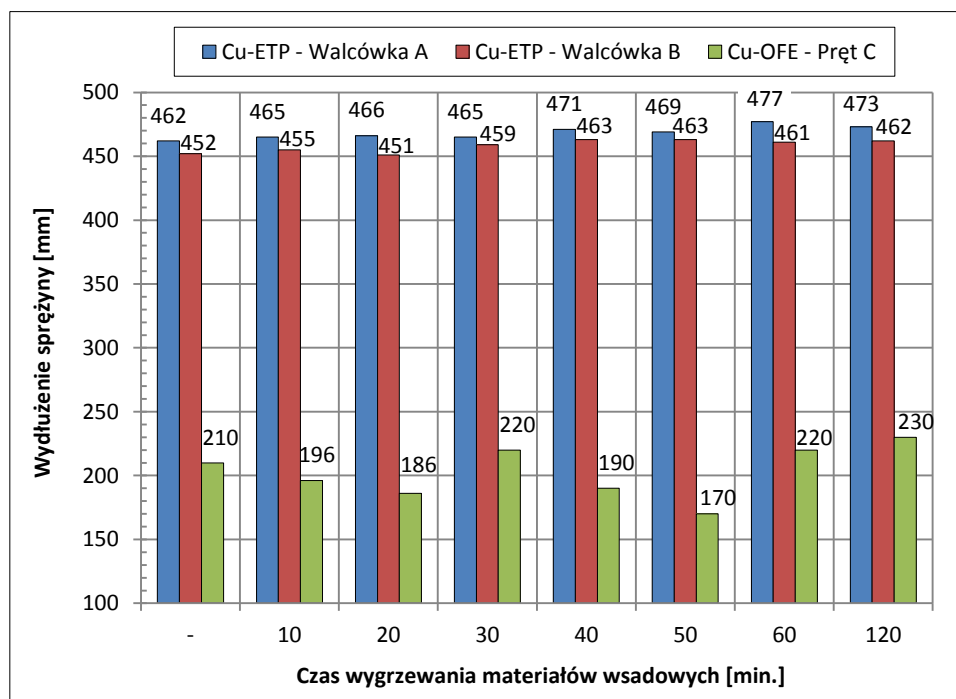
Temperatura	Czas	Oznaczenie materiału											
		A - walcówka z miedzi w gatunku Cu-ETP				B - walcówka z miedzi w gatunku Cu-ETP				C - pręt z miedzi w gatunku Cu-OFE			
		$R_{0,2}$	$R_m$	$A_r$	$A_{250}$	$R_{0,2}$	$R_m$	$A_r$	$A_{250}$	$R_{0,2}$	$R_m$	$A_r$	$A_{250}$
[°C]	[min.]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
-	-	148,5	224,7	35,4	48,3	136,2	220,8	35,3	48,4	112,0	185,5	32,4	35,7
260	10	147,4	224,8	35,2	49,8	121,6	220,5	34,7	49,2	106,5	185,2	32,3	35,5
	20	146,1	224,3	35,6	50,2	118,1	218,9	33,3	46,8	102,1	182,6	33,6	44,3
	30	144,3	220,5	35,8	49,3	114,0	219,4	35,2	49,0	101,4	182,9	33,1	41,8
	40	142,4	220,3	35,3	48,0	112,4	219,1	35,1	48,8	101,1	183,6	32,9	41,6
	50	138,7	219,9	34,9	47,8	108,6	218,9	35,3	48,5	100,8	184,3	32,8	42,0
	60	134,7	219,2	34,6	47,5	106,5	218,6	35,0	48,1	100,3	185,5	32,7	42,5
	120	125,8	220,1	35,0	51,1	106,0	218,2	34,6	52,1	100,1	180,8	32,4	41,1

Na podstawie analizy wyników badań przeprowadzonych w ramach podrozdziału 9.1 (pt.: „Identyfikacja własności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych) niniejszej pracy wiadomo, że własności mechaniczne standardowej walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod kształtują się dla granicy plastyczności na poziomie około 140 MPa, wytrzymałości na rozciąganie około 220 MPa oraz wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  odpowiednio około 32 % i 43 %. Natomiast w przypadku pręta z miedzi beztlenowej otrzymanego metodą Upcast przy zastosowaniu standardowych parametrów procesu odlewania tj. prędkości 4,0 m/min. oraz wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min. własności mechaniczne wynoszą około  $R_{0,2} = 120$  MPa,  $R_m = 180$  MPa,  $A_r = 30$  % i  $A_{250} = 38$  %. Powyższe wartości kwalifikują produkty do grupy materiałów w stanie miękkim. Natomiast na podstawie analizy wyników zamieszczonych w tabeli 9.3.7 dotyczących materiałów wsadowych poddanych procesowi wygrzewania zauważono, że o ile zmianie uległa wartość granicy plastyczności o około 23 MPa w przypadku walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP oznaczonej jako A i około 30 MPa dla materiału B, a także około 14 MPa dla pręta z miedzi beztlenowej, o tyle wytrzymałość na rozciąganie materiałów pozostała na niezmiennym poziomie. Zauważono ponadto, iż niskotemperaturowe wstępne wygrzewanie materiałów o średnicach nominalnych 8,0 mm wpłynęło także na zmianę własności plastycznych materiałów, zwłaszcza wartości wydłużenia względnego  $A_{250}$  miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE na poziomie wynoszącym odpowiednio około 3 % i 9 %. Wynik wpływu czasu wygrzewania materiałów wsadowych na zmianę ich granicy plastyczności zilustrowano na rysunku 9.3.21.



Rys. 9.3.21. Wykresy granicy plastyczności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 260 °C w funkcji czasu wygrzewania

Tak przygotowane materiały wsadowe z dwóch gatunków miedzi poddano testom technologicznym wydłużenia sprężyny TWS i wydłużenia AR. Wyniki przeprowadzonego testu wydłużenia sprężyny określającego podatność do wyżarzania materiałów zilustrowano na rysunku 9.3.22.

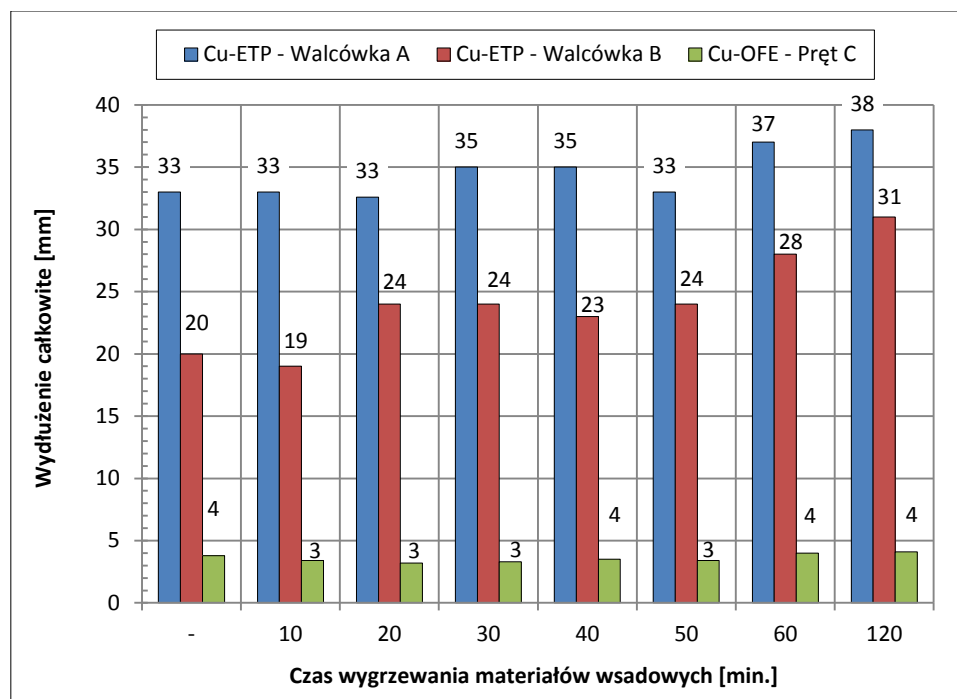


Rys. 9.3.22. Wykresy zależności wydłużenia sprężyny od czasu wygrzewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP (próbki A, B) i Cu-OFE (próbka C) na podstawie testu TWS przeprowadzonego zgodnie z normą PN-EN 12893:2002 [121]

Na podstawie analizy uzyskanych wyników zauważono, iż w teście wydłużenie sprężyny można wyróżnić dwie grupy materiałów. Pierwszą stanowią druty uzyskane z walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP – oznaczone jako materiały A i B, które uzyskały podobne wartości wydłużenia sprężyny na poziomie około 450 mm, natomiast do drugiej grupy należy materiał C – czyli druty z miedzi

beztlenowej, które z punktu widzenia ich podatności do wyżarzania charakteryzują się zupełnie odmiennymi właściwościami. Zanotowane wartości wydłużenia sprężyny dla tej grupy materiałów kształtowały się na poziomie około 200 mm.

Natomiast zbiorcze zestawienie wyników testu wyżarzalności AR wytypowanych do badań materiałów w funkcji czasu wstępnego wygrzewania walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta z miedzi beztlenowej zilustrowano na rysunku 9.3.23.



Rys. 9.3.23. Wykresy zależności wydłużenia całkowitego drutu w teście AR od czasu wygrzewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP (próbki A, B) i Cu-OFE (próbka C)

Analiza danych uzyskanych w teście AR, dostarczyła informacji, że jedynie walcówka z miedzi w gatunku Cu-ETP oznaczona jako materiał A spełniła powyższy test. W przypadku drutów otrzymanych z walcówki B stwierdzono, iż zarówno w stanie po linii Contirod, jak i po zabiegach wstępnego wygrzewania nie uzyskują one pozytywnego wyniku, co można tłumaczyć występowaniem większej ilości zanieczyszczeń w tym materiale. Z kolei w przypadku drutów uzyskanych z prętów z miedzi beztlenowej z linii Upcast (materiał C) zaobserwowano zupełnie odmiennie wartości wydłużenia całkowitego sięgające zaledwie kilku procent. Tak niskie wartości wydłużenia całkowitego w teście AR dla miedzi beztlenowej świadczą o tym, iż druty o strukturze odlewniczej wyżarzane w danych warunkach temperaturowo-czasowych nie rekrystalizują, w przeciwieństwie do drutów otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod.

Jednakże w omawianym przypadku, już wynik testu wydłużenia sprężyny (por. rys. 9.3.22), który dla drutów z miedzi beztlenowej średnio kształtuje się na poziomie około 200 mm, podczas gdy dla walcówki A i B wartość wydłużenia sprężyny wynosi około 450 mm świadczy o odmienności powyższego materiału z punktu widzenia jego podatności do wyżarzania.

Przeprowadzone w ramach niniejszego podrozdziału badania doświadczalne umożliwiły analizę, której celem była wstępna ocena podatności do wyżarzania materiałów wsadowych w postaci walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi beztlenowej po procesie ciągłego odlewania sposobem Upcast. Zaobserwowano zróżnicowanie wyników dla dwóch gatunków miedzi zarówno w teście TWS, jak i w istniejącym od kilku lat, stanowiącym atrakcyjną alternatywę teście AR. O sukcesie tego ostatniego zdecydowały dwa czynniki. Po pierwsze jest to test szybszy i łatwiejszy do wykonania, po drugie jest testem bardziej rozdzielnym. Test TWS przestał ukazywać różnice w podatności na rekrystalizację materiałów o bardzo wysokiej jakości. Natomiast postęp technologiczny związany z coraz głębszym, szybszym i bardziej bezawaryjnym przerobem miedzi na druty i mikrodruty wykorzystuje obecnie materiały o najwyższej czystości. Takie materiały posiadając zanieczyszczenia o wiele niższe niż dopuszcza to norma nie wykazują zróżnicowania w teście TWS,

zaś wykazują go w teście AR. Warto zwrócić również uwagę, że sam test AR ewoluował wraz z postępem technologii rafinacji miedzi. Początkowo stosowano wygrzewanie drutów w temperaturze 260 °C przez około 20 minut. Wraz z poprawą czystości metalu czas wygrzewania systematycznie skracano i dziś wynosi on znamionowo 10 minut chociaż w większości laboratoriów współcześnie chętniej stosuje się czas jeszcze krótszy wynoszący 8 minut. Przyczyny większej „czułości” testu AR różnicującego materiały można także upatrywać w braku wstępnej obróbki cieplnej walcówek i prętów, która niweluje różnice szczytkowych śladów umocnienia powstałych w przypadku miedzi w gatunku Cu-ETP w linii ciągłego odlewania i walcowania, a która stosowana jest w teście TWS.

Co oczywiste o sukcesie testu AR w głównej mierze decyduje systematycznie zmniejszająca się zawartość domieszek w miedzi, co wydatnie zwiększa podatność miedzi do wyżarzania. Należy jednak podkreślić, że wiedza dotycząca zawartości domieszek w miedzi nie jest wystarczająca do oceny jej podatności na wyżarzanie. Niektóre domieszki w całości rozpuszczają się w materiale tworząc roztwór stały. Inne rozpuszczają się jedynie w ograniczonym stopniu i część z nich reagując z miedzią tworzy odrębną fazę, zaś część lokuje się w roztworze. O podatności na wyżarzanie w innym stopniu decyduje domieszka rozpuszczona, w innym zaś stopniu domieszka w wydzieleniu. Na to wszystko nakłada się obecność tlenu, który reaguje nie tylko z miedzią ale i z domieszkami tworząc tlenki. W efekcie chociaż znana jest całkowita zawartość domieszki to nie sposób określić jaka jej część znajduje się w roztworze, a jaka w różnego rodzaju fazach. W związku z powyższym, mimo iż testy TWS, AR oraz 1H dowodzą o istnieniu istotnego czynnika decydującego o podatności miedzi do procesów wyżarzania rekrytalizującego, którym jest mianowicie stan strukturalny konieczna jest także rewizja dotychczasowej wiedzy na temat czynników wpływających na temperaturę rekrytalizacji miedzi w odniesieniu do badanych materiałów wsadowych do dalszego przetwórstwa na druty i mikrodruty. W związku z powyższym w kolejnym podrozdziale – 9.3.2 analizie poddano wpływ zanieczyszczeń oraz tlenu na odporność cieplną miedzi, a w szczególności na kształtowanie jej temperatury rekrytalizacji.

Dokonując jeszcze na bieżąco krótkiego podsumowania zaprezentowanej w niniejszym podrozdziale problematyki związanej z jedną z najważniejszych technologicznych właściwości miedzi tj. jej podatnością do wyżarzania należy wyraźnie zaznaczyć, że chociaż cecha ta przypisywana jest najczęściej walcówce jako uniwersalnemu materiałowi wsadowemu do produkcji drutów dedykowanych do wszystkich zastosowań elektrycznych, to w rzeczywistości dotyczy ona katod i kształtuje się we wszystkich wcześniejszych etapach metalurgii ich wytwarzania. Dlatego też oczekiwane przez zakłady kablowicze wymagania względem podatności drutów do wyżarzania przenoszą się zawsze na katodę jako najbardziej szlachetną pod względem chemicznym postać miedzi produkowanej na skalę przemysłową. Stąd też ocena podatności do wyżarzania – prowadzona tradycyjnie w oparciu o test wydłużenia sprężyny (TWS) jest obowiązkiem każdego producenta miedzi. Jednakże jej praktyczna weryfikacja następuje zawsze dopiero w zakładach przetwórstwa w rzeczywistych warunkach technologicznych, często dopiero w końcowym etapie wytwarzania wyrobu.

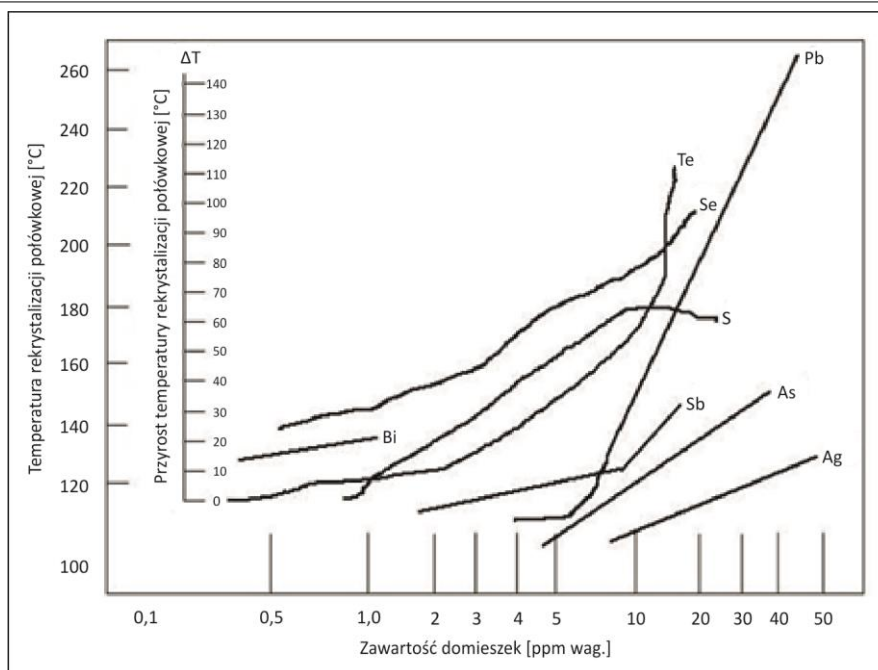
Omawiając istotę niniejszej tematyki warto zaznaczyć jeszcze, że test wydłużenia sprężyny został opracowany i wdrożony do oceny wyżarzalności miedzi do zastosowań przemysłowych w czasach, kiedy jakość chemiczna katod była na dużo niższym niż dzisiaj poziomie, a sam test stanowił doskonałą praktyczną metodę oceny średniego poziomu zawartości pierwiastków zanieczyszczeń. Wówczas katody różniły się istotnie wynikiem testu. Współcześnie produkowane katody zwłaszcza w gatunku Grade-A, dzięki wyrafinowanym technologiom ich wytwarzania, posiadają jakość na poziomie wykraczającym poza rozdzielczość testu wydłużenia sprężyny. Stąd też od lat prowadzone są w różnych laboratoriach zarówno przemysłowych, jak i naukowych prace nad testami alternatywnymi, znacznie skracającymi czas trwania procedury, ale przede wszystkim pozwalającymi na dalszą separację katod z punktu widzenia podatności miedzi do wyżarzania. Problem ten znalazł swoją rangę w propozycji zmian w normalizacji dotyczącej walcówki. W projekcie prEN 1977 [122] z dnia 19 października 2011 r. wprowadza się punkty 6.4 i 8.4 modyfikujące wymagania względem wyżarzalności walcówki oraz sposób jej badania, który jest opisany w dodatku B tego projektu pt. „Rapid elongation test method (AR-Test) for diameter 8 mm Cu-ETP1 wire rod”. W obowiązującej normie BS-EN 1977 [123] wyżarzalność walcówki jest sprawdzana w teście wydłużenia sprężyny (TWS). W nowym teście walcówkę odkształca się w pojedynczym akcie ciągnięcia na drut o średnicy 6,4 mm (odkształcenie 36 %), który poddaje się wygrzewaniu w ciekłym medium o temp. 260 °C

w czasie 8 minut a następnie określa się wydłużenie całkowite tak przygotowanego materiału w próbie jednoosiowego rozciągania na bazie 200 mm. Minimalny wynik testu został ustalony na poziomie 20 %, ale w przypadku jego niespełnienia dopuszcza się alternatywnie minimalną wartość długości sprężyny równą 350 mm badanej tradycyjnie według BS-EN 12893 [3]. Z pierwszej analizy tych danych wynika, że nie istnieje zagrożenie nie spełnienia wymagań projektu normy. Wynika to z dość zadziwiającej relacji pomiędzy liczbą 20 % w teście AR, a liczbą 350 mm w teście TWS. Aby wyjaśnić tę kwestię należy zauważyć, że TWS jest testem bardziej zbliżonym do rzeczywistych warunków przetwarzania walcówki na druty. Bazuje on na wysokiej sile pędnej do rekrytalizacji (odkształcenie drutu – 90 %), temperaturze wygrzewania 200 °C w czasie 120 minut, a ponadto walcówka przed testem poddawana jest normalizacji w temperaturze 700 °C w czasie 60 minut. Tak więc wszyscy specjaliści i praktycy powinni wiedzieć, że uzyskanie sprężyny o długości 350 mm według opisanej w normie PN-EN 12893 [121] procedury nie powinno być zadaniem trudnym w przypadku walcówki produkowanej z katod w gatunku Grade-A. Natomiast w nowym podejściu do kwalifikacji walcówki, zostały istotnie zastrzeżone kryteria oceny jej wyżarzalności, poprzez jednoczesne obniżenie zarówno siły pędnej (wielkość odkształcenia), jak i warunków wygrzewania materiału poddawanego testowi, tj. parametrów decydujących o procesie rekrytalizacji. Co prawda została podniesiona temperatura wygrzewania z poziomu 200 °C na 260 °C, ale parametry 260 °C / 8 min nie są ekwiwalentne (zgodnie z regułą Arrheniusa) do pary 200 °C / 120 minut. W warunkach ekwiwalentnych czas wygrzewania musiałby wynosić 10 minut, i – co oczywiste przy założeniu – że w obydwóch testach będzie ten sam stopień odkształcenia materiału, a tak nie jest, bowiem w teście AR jest on 2,5 razy mniejszy w stosunku do TWS. Ponieważ o kinetyce procesu rekrytalizacji decyduje jego stan energetyczny, więc również zupełnie niezrozumiałe jest dlaczego odchodzi się od procedury normalizacji stanu mechanicznego walcówki przez jej wstępne wygrzewanie, który przecież zależy nie tylko od czystości chemicznej katod „regulującej” warunki rekrytalizacji dynamicznej walcowanej na gorąco miedzi, ale przede wszystkim od prędkości walcowania, a kinetyka procesu rekrytalizacji miedzi jest funkcją trzech podstawowych czynników: składu chemicznego zanieczyszczeń, a zwłaszcza ich obecności w roztworze, stanu energetycznego materiału (stopnia umocnienia) oraz temperatury i czasu wygrzewania. Tak więc procedura nowego testu AR pozwala na uzyskanie różnych wartości wydłużenia drutu określanego w próbie jednoosiowego rozciągania dla walcówek produkowanych z katod o tej samej czystości chemicznej, lecz z różnymi prędkościami walcowania, a to przeczy zasadzie, że dobry test powinien być jednoznaczny.

Jednakże koncepcja wprowadzenia nowego – bardziej wymagającego testu określającego jakość katod jest potrzebna i oczywista, zwłaszcza, że ocena niektórych własności miedzi (m.in. przewodność elektryczna, podatność do wyżarzania) nie jest możliwa do określenia w oparciu o znajomość jej składu chemicznego. Własności te muszą być określane doświadczalnie i to na etapie produkcji materiału wsadowego, a więc katod i walcówki przeznaczonej do dalszego przetwórstwa. Tak więc konsekwencją wprowadzenia nowego testu, o którym mowa w PrEN 1977 [122] może być kolejna propozycja nowej bardziej skwantyfikowanej klasyfikacji katod, w tym również – a istnieją uzasadnione ku temu przyczyny – obejmującej gatunek wyższy od tego, który dzisiaj jest określany jako Grade A. Również istnieje pewne zagrożenie, że część katod w gatunku Grade A utraci swoją pozycję w świetle nowego testu. Kończąc tą ogólną refleksję warto w tym miejscu wspomnieć, że duże zainteresowanie wszystkimi wynikami badań z obszaru przewodności elektrycznej walcówki Cu i jej podatności do wyżarzania wykazuje wielu współczesnych producentów katod i walcówki oraz liczne ośrodki naukowe.

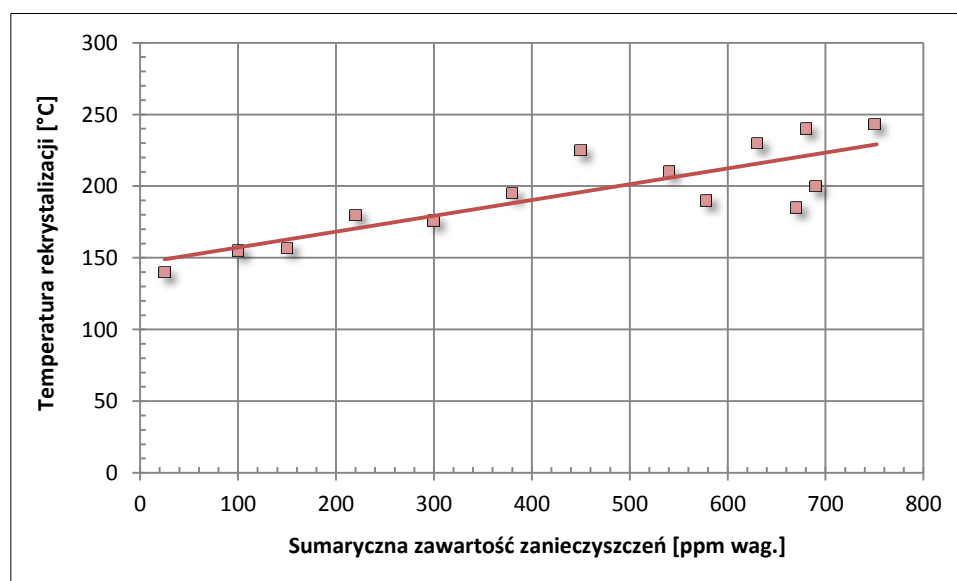
### 9.3.2. Analiza wpływu zanieczyszczeń i tlenu na temperaturę rekrytalizacji drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP

Na podstawie powszechnie obowiązującej wiedzy na temat wpływu składu chemicznego na podatność miedzi do wyżarzania wiadomo, że im mniejsza ilość domieszek w materiale tym lepsza jego zdolność do rekrytalizacji. Równocześnie różne domieszki w odmiennym stopniu wpływają na zmianę temperatury rekrytalizacji materiału. Tradycyjnie temat ten od lat jest przedmiotem wielu badań i analiz [124 – 135]. Jako jeden z przykładów przedstawić można wyniki badań Popsa [136] ukazujące wpływ różnych domieszek na wzrost temperatury rekrytalizacji połówkowej miedzi zilustrowany na rysunku 9.3.24.



Rys. 9.3.24. Wpływ domieszek na temperaturę rekrystalizacji połówkowej miedzi wg Popsa [136]

Przedstawione na rysunku 9.3.24 wyniki dobrze ilustrują wpływ zanieczyszczeń na problem temperatury rekrystalizacji miedzi. Tradycyjnie przyjmowano, że wpływ ten jest przy niskich stężeniach praktycznie liniowy. Jak można zauważyć w pewnym zakresie stężeń jest tak istotnie, jednakże przy bardzo małych zawartościach domieszek wpływ ten wydaje się być znikomy. Obserwacja ta stoi w oczywistej sprzeczności z rzeczywistym zachowaniem się materiału, który nawet przy niskich zawartościach domieszek wykazuje zróżnicowane zachowanie w teście AR. Wynika to z faktu, że w pracy Popsa rozważano wpływ indywidualnych domieszek, zaś w naturze występują one równocześnie i podlegają efektowi synergii. Efekt taki opisuje Feyaerts [137] na przykładzie synergii siarki i ołowiu oraz Kanno [138] omawiając takie pierwiastki jak żelazo, siarka i nikiel. Z analizy wykresów zilustrowanych na rysunku 9.3.24 wynika ponadto, że rekrystalizację hamują intensywnie takie pierwiastki jak selen, bizmut, siarka i tellur, a przy wyższych zawartościach również ołów i antymon. Analiza składu chemicznego walcówki miedzianej pod kątem ilości wymienionych wyższej domieszek posiada fundamentalne znaczenie z punktu widzenia wyniku testu AR oraz wartości temperatury rekrystalizacji. Powyższe stwierdzenie w odniesieniu do miedzi zostało schematycznie zilustrowane na rysunku 9.3.25.



Rys. 9.3.25. Wpływ sumarycznej zawartości zanieczyszczeń w miedzi na temperaturę rekrystalizacji wg Katoha [71]

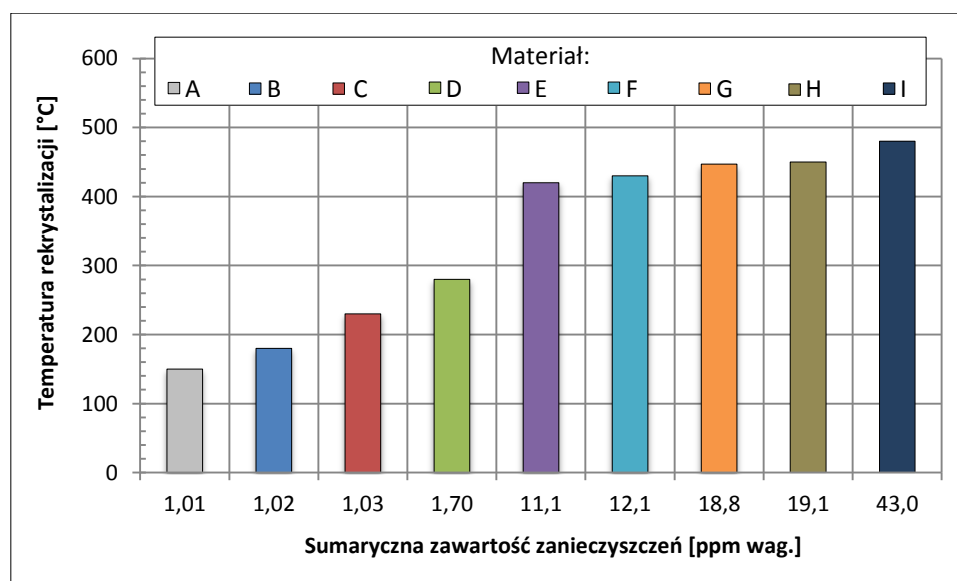
Głębsza analiza problemu wskazuje na fakt, iż kształtowanie się temperatury rekryształacji ściśle zależy od rodzaju i poziomu pierwiastków zanieczyszczeń oraz zawartości tlenu w miedzi. Może on pozornie obniżać temperaturę rekryształacji wiążąc zanieczyszczenia do postaci tlenkowej i wyprowadzając je z roztworu. W zależności od warunków obróbki cieplno – mechanicznej część tlenu może się rozpuszczać w miedzi lub przechodzić do wydzielen. Przyjmuje się powszechnie, że wtrącenia tlenu miedzi mogą ułatwiać powstawanie jednorodnej i drobnoziarnistej struktury podczas rekryształacji. Równocześnie w bardzo wysokich temperaturach, gdzie dochodzi do wtórnej rekryształacji tlen rozpuszczony przekłada się na nierównomierny rozrost ziaren.

W tabeli 9.3.8 zamieszczono wpływ zawartości tlenu, fosforu i siarki na wartość temperatury rekryształacji miedzi [71].

Tabela 9.3.8. Skład chemiczny i temperatura rekryształacji badanych materiałów wg Katoha [71]

Oznaczenie materiału	Zawartość wagowa pierwiastków [ppm wag.]			Sumaryczna zawartość zanieczyszczeń [ppm wag.]	Temperatura rekryształacji [°C]
	O <sub>2</sub>	P	S		
A	1,0	0,005	0,005	1,01	150
B	1,0	0,01	0,01	1,02	180
C	1,0	0,01	0,02	1,03	230
D	1,0	0,1	0,6	1,70	280
E	10	0,1	1,0	11,1	420
F	10	0,1	2,0	12,1	430
G	10	0,2	8,6	18,8	447
H	10	0,3	8,8	19,1	450
I	30	1,0	12,0	43,0	480

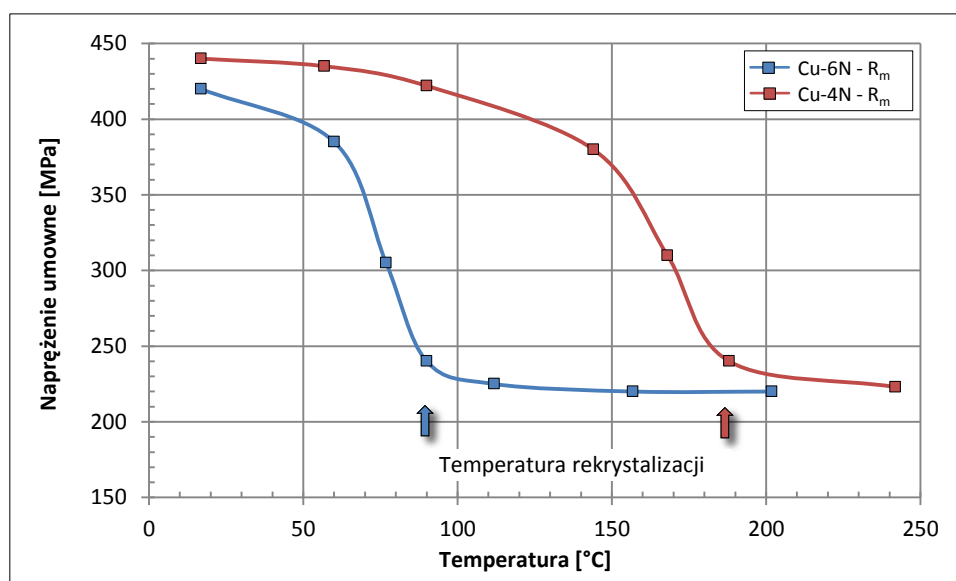
Natomiast ilustrację graficzną przedstawionych w tabeli 9.3.8 wyników badań ukazano na rysunku 9.3.26 jako relację pomiędzy sumaryczną zawartością tlenu, fosforu i siarki oraz wartością temperatury rekryształacji próbek.



Rys. 9.3.26. Wpływ sumarycznej zawartości tlenu, fosforu i siarki na kształtowanie temperatury rekryształacji miedzi wg Katoha [71]

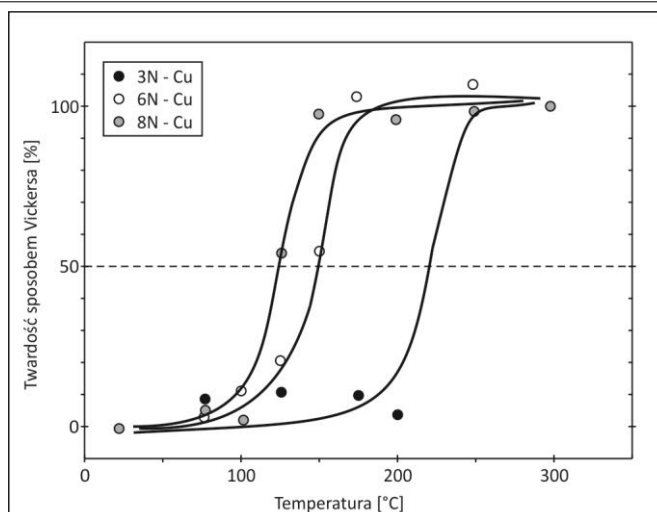


Analiza relacji przedstawionych na powyższym rysunku potwierdza powszechnie znaną wiedzę, iż im mniejsza sumaryczna zawartość zanieczyszczeń tym temperatura rekrytalizacji materiału jest niższa. Zauważono, iż spośród poddanych badaniom doświadczalnym próbek należy wyróżnić dwie grupy materiałów. Pierwszą stanowią próbki miedzi oznaczone jako A – D, natomiast drugą materiały od E do I. Kryterium podziału obejmuje sumaryczną zawartość pierwiastków zanieczyszczeń, która warunkuje z kolei zanotowane wartości temperatur rekrytalizacji. Najniższe wartości temperatur rekrytalizacji wynoszące 150 °C i 180 °C odnotowano dla próbek oznaczonych jako A i B, dla których sumaryczna zawartość zanieczyszczeń wynosi około 1,02 ppm wag. – zatem jest to miedź o klasie czystości 6N. Podobne obserwacje dotyczące stosunkowo niskiej wartości temperatury rekrytalizacji w stosunku do wszystkich poddanych w pracy materiałów dotyczą próbek C i D, dla których zawartość pierwiastków domieszek kształtująca się na poziomie 1,03 ppm wag. i 1,7 ppm wag. sprawia, że uznawane są za miedź o czystości chemicznej 5N / 6N. Stwierdza się zatem, iż w przypadku materiałów o tej klasie czystości, dla których ilość zanieczyszczeń wynosi średnio od około 1 ppm wag. do 2 ppm wag. zanotowane różnice w wartościach temperatur rekrytalizacji wynoszą od 30 °C do 130 °C. Kolejna z próbek miedzi oznaczona jako materiał I – charakteryzujący się największą temperaturą rekrytalizacji wynoszącą 480 °C wykazała sumaryczną zawartością zanieczyszczeń także na najwyższym poziomie sięgającym 43 ppm wag. Jednocześnie na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 9.3.8 i na rysunku 9.3.26 zauważono, iż dla wszystkich próbek miedzi, które posiadają sumaryczną zawartość pierwiastków zanieczyszczeń na poziomie powyżej 10 ppm wag. i według przyjętego kryterium podziału stanowią drugą grupę materiałów temperatura rekrytalizacji jest wyższa od 400 °C, co świadczy o innej klasie czystości materiałów – w tym przypadku od 3N do 5N. Zatem zaobserwowano, że im wyższa klasa czystości badanej miedzi, tym wyższy jest wpływ pojedynczych pierwiastków zanieczyszczeń na temperaturę rekrytalizacji. Podobnie sytuacja występuje w przypadku kinetyki wyżarzania, która została zdefiniowana w poprzednim podrozdziale 9.3.1 niniejszej pracy. Potwierdzeniem powyższych obserwacji są zilustrowane na rysunku 9.3.27 przykładowe krzywe mięknięcia dla drutów o średnicach 2,0 mm z miedzi o klasie czystości chemicznej 6N i 4N [71].



Rys. 9.3.27. Wykresy zależności naprężenia umownego od temperatury dla miedzi o klasie czystości chemicznej 6N (tj. 99,9999 % Cu) i 4N (tj. 99,99 % Cu) wg Katoha [71]

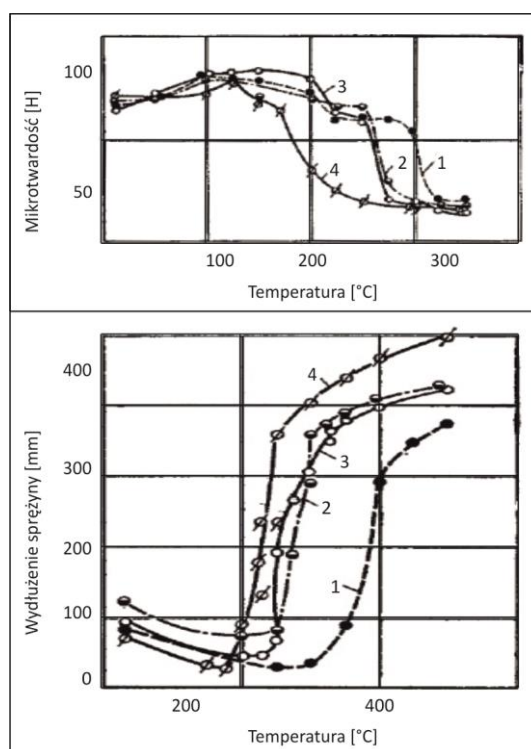
Na podstawie analizy powyższych charakterystyk zauważono, iż różnica pomiędzy temperaturą rekrytalizacji drutów z miedzi o klasie czystości 6N i 4N wynosi około 100 °C. Warto w tym miejscu zaznaczyć, iż na podstawie powyższych wykresów stwierdzono, że czystość miedzi w bardzo dużym stopniu wpływa nie tylko na poziom jej temperatury rekrytalizacji lecz również na przebiegi krzywych mięknięcia. Zilustrowane to zostało także na kolejnym rysunku 9.3.28 dotyczącym wyników badań eksperymentalnych prowadzonych przez Fujiwarę [104]. Są to charakterystyki twardości sposobem Vickersa w funkcji temperatury dla drutów o średnicy 3,3 mm z miedzi o klasie czystości od 3N do 8N poddanych zabiegowi wygrzewania w czasie 30 minut.



Rys. 9.3.28. Wykresy zależności twardości sposobem Vickersa od temperatury dla miedzi o klasie czystości chemicznej 8N, 6N i 3N wg Fujiwary [104]

Dokonując analizy przedstawionych na rysunku 9.3.28 charakterystyk potwierdzono zauważone już na wcześniejszym etapie pracy stwierdzenie, że im czystszy materiał tym jego temperatura rekrytalizacji jest niższa, przy czym różnica między materiałem o czystości 8N i materiałem o czystości 3N wynosi około 100 °C, a więc podobnie do wyników przedstawionych według Katoha [71]. Ponadto warto zwrócić uwagę, że kąt nachylenia analizowanych krzywych w zakresie, gdzie obserwuje się przemiany strukturalne związane z częściową rekrytalizacją jest dla badanych materiałów zbliżony.

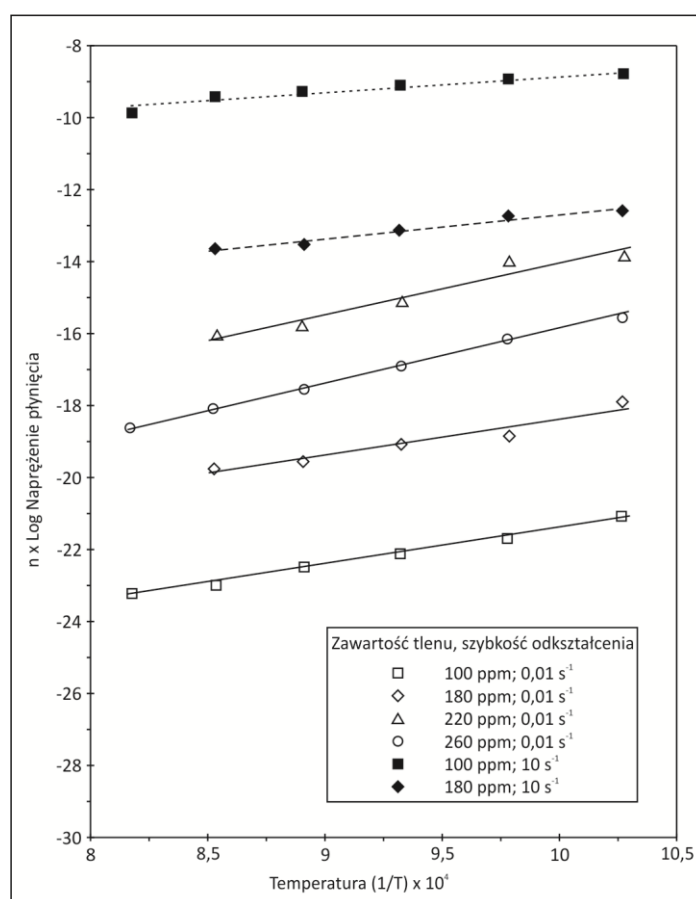
Powracając do głównego nurtu rozważań wpływu ilości domieszek na temperaturę rekrytalizacji oraz roli tlenu warto zwrócić uwagę na badania Berina [139], który analizował ciągliwość różnych gatunków miedzi. Wybrane wyniki jego badań dotyczących mikrotwardości i wydłużenia sprężyny dla drutów o średnicy 1,2 mm wygrzewanych w kąpieli solnej przez 1 minutę zilustrowano na rysunku 9.3.29.



Rys. 9.3.29. Mikrotwardość i wydłużenie sprężyny dla drutów o średnicy 1,2 mm po procesie wygrzewaniu w kąpieli solnej i chłodzeniu w wodzie. Oznaczenie materiałów: 1 - 99,98 % Cu; 0,0005 % O (miedź beztlenowa); 2 - 99,99 % Cu; 0,0005 % O (miedź topiona łukowo); 3 - 99,95 % Cu; 0,02 % O (miedź w gatunku Cu-ETP); 4 - 99,999 % Cu; 0,0001 % O (miedź wysokiej czystości chemicznej o klasie 5N) wg Berina [139]

Analiza wykresów zależności mikrotwardości od temperatury zilustrowanych na rysunku 9.3.29 ukazuje, że temperatura początku rekrytalizacji dla różnych rodzajów materiałów maleje począwszy od wartości około 300 °C do około 150 °C wraz ze zmniejszeniem ilości zanieczyszczeń. Temperatura rekrytalizacji miedzi beztlenu jest o około 50 – 70 °C niższa niż dla miedzi w gatunku Cu-ETP, chociaż w tym materiale ilość pierwiastków jest większa. Tłumaczyć to należy wpływem tlenu, który wiążąc domieszki niweluje ich negatywny wpływ na temperaturę rekrytalizacji. Z kolei wzrost wydłużenia sprężyny materiałów koreluje z temperaturą początku rekrytalizacji. W stanie zrekrystalizowanym wydłużenie sprężyny stabilizuje się na znamionym dla każdego gatunku poziomie. Przebieg tej zależności w funkcji temperatury przypomina charakterystyczny kształt litery S, typowy dla procesów rekrytalizacji.

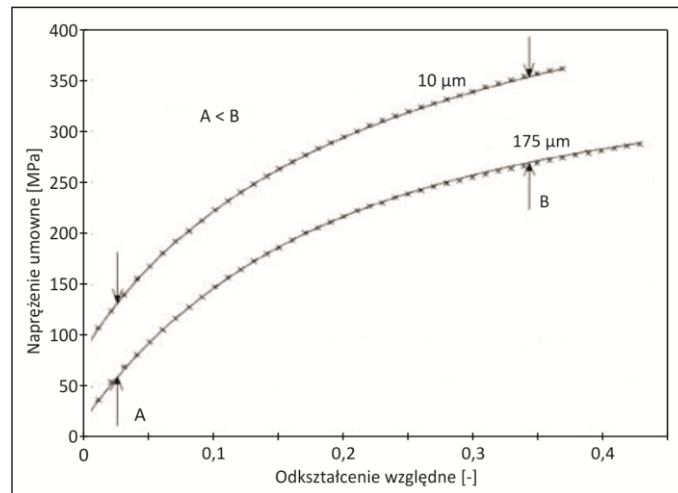
Co oczywiste zawartość tlenu wpływa nie tylko na reakcję materiału podczas wygrzewania np. w teście AR, lecz również posiada bardzo istotny wpływ na kształtowanie się struktury walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP po linii ciągłego odlewania i walcowania, ta zaś obok parametrów temperaturowo-czasowych testu wyżarzalności również limituje reakcje materiału podczas określania AR. Na rysunku 9.3.30 przedstawiono wpływ zawartości tlenu w miedzi na opór płynięcia materiału w podwyższonych temperaturach i przy różnych prędkościach odkształcenia. Tlen wpływa bardzo istotnie na mechanizm rządzący rekrytalizacją dynamiczną jaka ma miejsce podczas walcowania w linii COiW.



Rys. 9.3.30. Zależność naprężenia płynięcia od temperatury dla różnych prędkości odkształcenia dla miedzi w gatunku Cu-ETP o różnych zawartościach tlenu. Na wykresie zaznaczono dwa zakresy rekrytalizacji dynamicznej (linie ciągłe i przerywane) odpowiadające różnym mechanizmom rekrytalizacji dynamicznej wg Prasada [140]

Wpływ zawartości tlenu na charakterystykę umocnienia miedzi można przeanalizować krótko na przykładzie rysunku 9.3.31, gdzie ukazano krzywe ściskania miedzi wytwarzanej w warunkach dynamicznej rekrytalizacji. Warto zwrócić szczególną uwagę na różne początkowe wielkości ziarna tych materiałów, jak również na ich odmienne umocnienie. Miedź o stabilnym ziarnie wielkości 10 μm wykazuje wyższą prędkość umocnienia, co jest zjawiskiem korzystnym z punktu widzenia wyniku testu AR. Wobec powyższego zawartość tlenu, która pośrednio wpływa na wielkość ziarna w walcówce jest

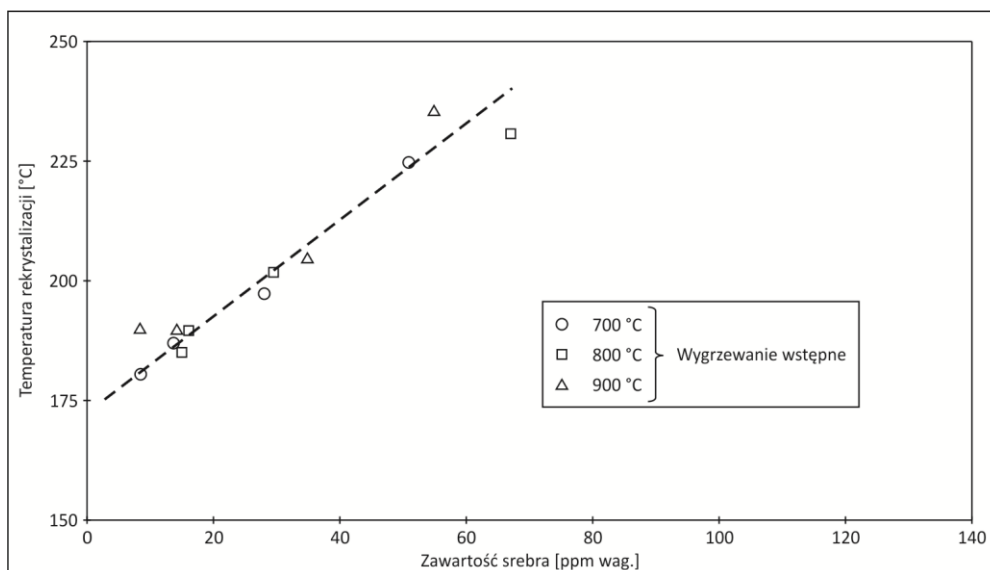
bardzo istotnym parametrem decydującym o wyniku testu technologicznego wyżarzalności miedzi.



Rys. 9.3.31. Krzywe ściskania w temperaturze otoczenia miedzi wytworzonej w warunkach dynamicznej rekrytalizacji. Zawartość tlenu: miedz A - 300 ppm wag., miedz B - 250 ppm wag. wg Koka [141]

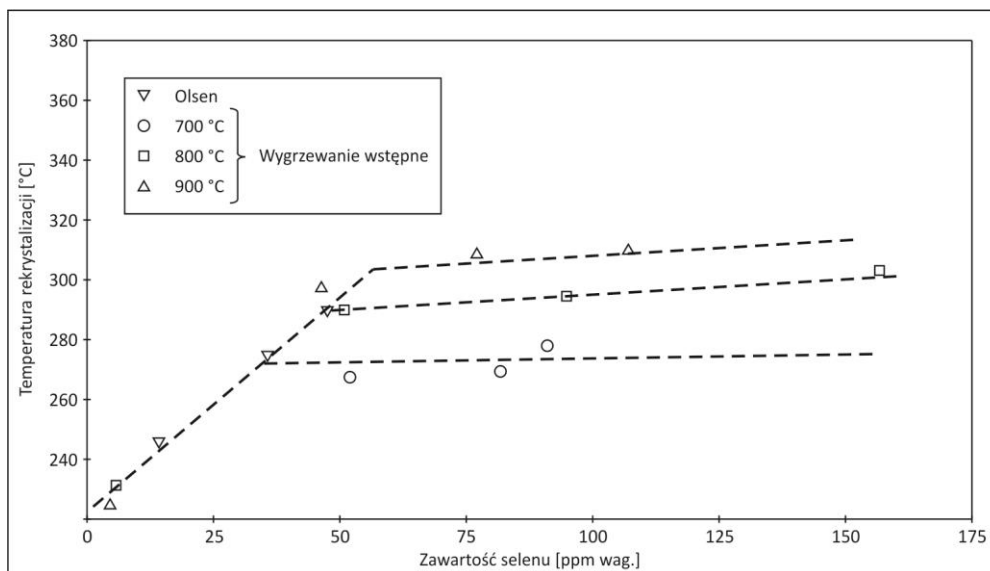
Oprócz tlenu bardzo istotny wpływ na kształtowanie się struktury podczas dynamicznej rekrytalizacji jaka ma miejsce w linii ciągłego odlewania i walcowania posiadają również takie pierwiastki jak ołów, nikiel i srebro. Należy zaznaczyć, że z wymienionych pierwiastków ołów nie rozpuszcza się praktycznie w miedzi, natomiast srebro oraz nikiel lokują się w roztworze stałym. Tak więc działanie ołowiu jest inne niż działania niklu i srebra i jego obecność powodować będzie skłonność do lokalnego rozrostu ziaren. Wobec powyższego jeśli o wyniku testu wyżarzalności miedzi decyduje również w istotnym stopniu początkowa struktura walcówki, to analiza wspomnianych wyżej domieszek w miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP jest kluczowa i jak najbardziej zasadna.

Na kolejnych ilustracjach 9.3.32 – 9.3.36 przedstawiono wpływ srebra, selenu oraz cyny na temperaturę rekrytalizacji miedzi, przy czym analizie poddano wpływ pojedynczego pierwiastka, jak również efekty ich wspólnego działania. Chociaż prowadzone badania dotyczyły znacznych zawartości wynoszących kilkadziesiąt ppm wag. to na wykresach zamieszczono również wyniki dotyczące stosunkowo niewielkich zawartości wynoszących kilka ppm wag. Dokonując analizy tej grupy wykresów warto powrócić na chwilę do analizy rysunku 9.3.24 (pt.: „Wpływ domieszek na temperaturę rekrytalizacji połówkowej miedzi wg Popsa”) i przyrzeć się bliżej wpływowi srebra. Na tej podstawie zauważono, że efekt działania tego pierwiastka na temperaturę rekrytalizacji obserwuje się dopiero powyżej zawartości około 7 ppm wag. Podobny efekt zaznaczono również na rysunku 9.3.32 w zakresie niskich zawartości srebra.



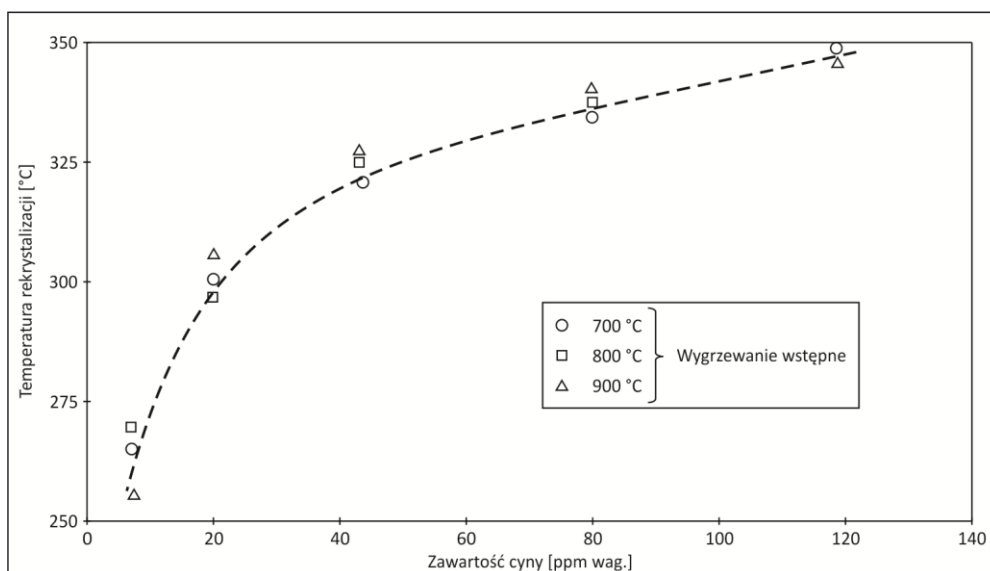
Rys. 9.3.32. Wpływ zawartości srebra na kształtowanie temperatury rekrytalizacji miedzi wg Pitta [131]

Po przekroczeniu pewnej umownej wartości stężenia srebra jego wpływ na temperaturę rekrytalizacji jest praktycznie liniowy. Ważna jest również wyjściowa temperatura rekrytalizacji czystej miedzi, która wynosi ok 175 °C. Obserwując z kolei wpływ selenu (por. rys. 9.3.33) również obserwuje się liniowy wpływ stężenia tego pierwiastka na temperaturę rekrytalizacji z zakresie do około 50 ppm wag. Warto zauważyć, że najniższa z zaobserwowanych temperatur wyniosła około 220 °C, a więc o około 50 °C wyższa niż dla czystego materiału (przy stężeniu selenu wynoszącym 3 – 4 ppm wag.). Koresponduje to z danymi zamieszczonymi na rysunku 9.3.24.



Rys. 9.3.33. Wpływ zawartości selenu na kształtowanie temperatury rekrytalizacji miedzi wg Pitta [131]

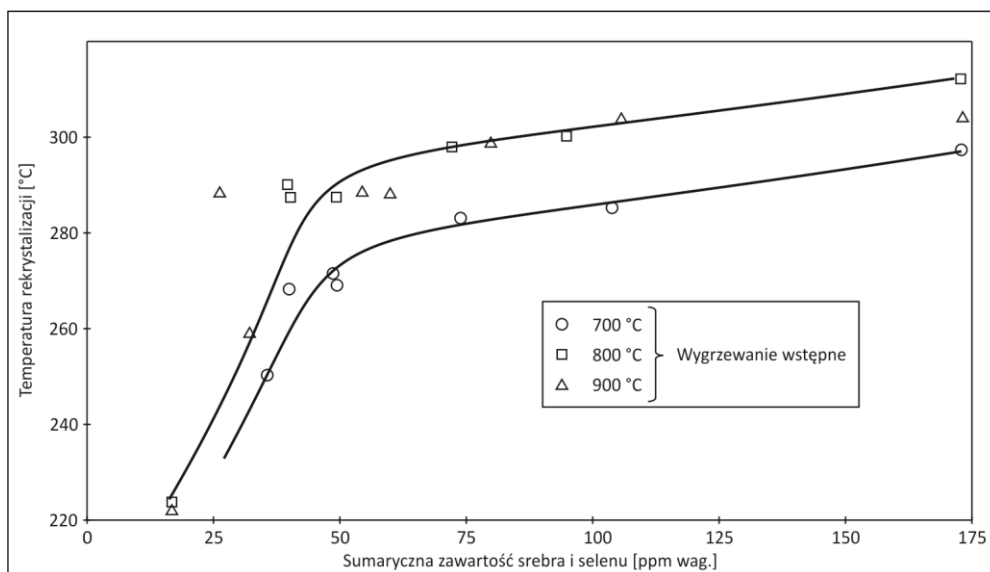
Z kolei wpływ zawartości cyny na kształtowanie temperatury rekrytalizacji miedzi zilustrowano na rysunku 9.3.34.



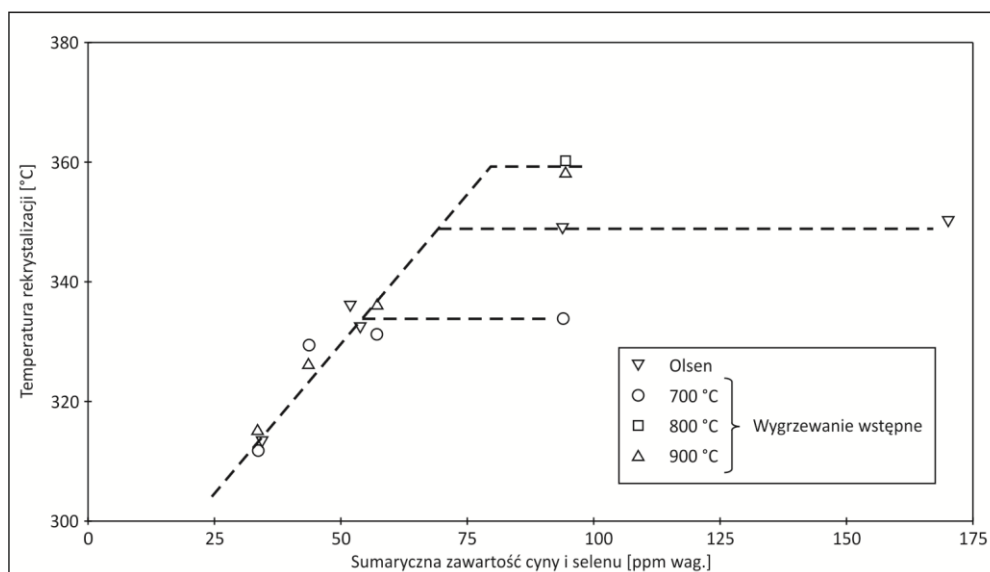
Rys. 9.3.34. Wpływ zawartości cyny na kształtowanie temperatury rekrytalizacji miedzi wg Pitta [131]

Dokonując analizy przebiegu wykresu ilustrującego wpływ zawartości cyny w miedzi na temperaturę rekrytalizacji zaobserwowano nieco odmienny charakter przebiegu w stosunku do innych pierwiastków (por. rys. 9.3.32, 9.3.33) – wykazuje on bowiem wyraźnie nieliniowy charakter. Przy zawartości około 7 ppm wag. cyny temperatura rekrytalizacji miedzi kształtuje się na poziomie około 260 °C, a więc o około 80 °C wyższym niż dla czystego metalu. Analizując te dane łatwo stwierdza się, że spośród badanych pierwiastków najmocniej na temperaturę rekrytalizacji wpływa zawartość cyny, nieco słabiej selenu, zaś najslabiej srebra. Na kolejnych rysunkach 9.3.35 i 9.3.36 przedstawiono wpływ

sumarycznej zawartości dwóch pierwiastków – srebra i selenu oraz cyny i selenu na kształtowanie temperatury rekryształacji miedzi.



Rys. 9.3.35. Wpływ sumarycznej zawartości srebra i selenu na kształtowanie temperatury rekryształacji miedzi wg Pitta [131]



Rys. 9.3.36. Wpływ sumarycznej zawartości cyny i selenu na kształtowanie temperatury rekryształacji miedzi wg Pitta [131]

Zauważa się przy tym, że zanika nieliniowy wpływ cyny (por. rys. 9.3.36). Zakres analizowanych stężeń rozpoczyna się od około 20 – 30 ppm wag., a więc na znacznie wyższych od obserwowanych dla miedzi w gatunku Cu-ETP poziomie. Z analizy powyższych wykresów wynika, iż wpływ zanieczyszczenia na kształtowanie temperatury rekryształacji miedzi jest najsilniejszy przy jego małych zawartościach, o czym świadczy większy kąt nachylenia charakterystyk obrazujących zależność temperatury rekryształacji od stężenia domieszek.

Z punktu widzenia wyników testów technologicznych wyżarzalności miedzi oraz temperatury rekryształacji przedstawione wyniki są jawnym dowodem, że konieczna jest wnikliwa i systematyczna analiza rodzaju i ilości domieszek obecnych w walcówce z miedzi w gatunku Cu-ETP i prętach z miedzi beztlenowej.

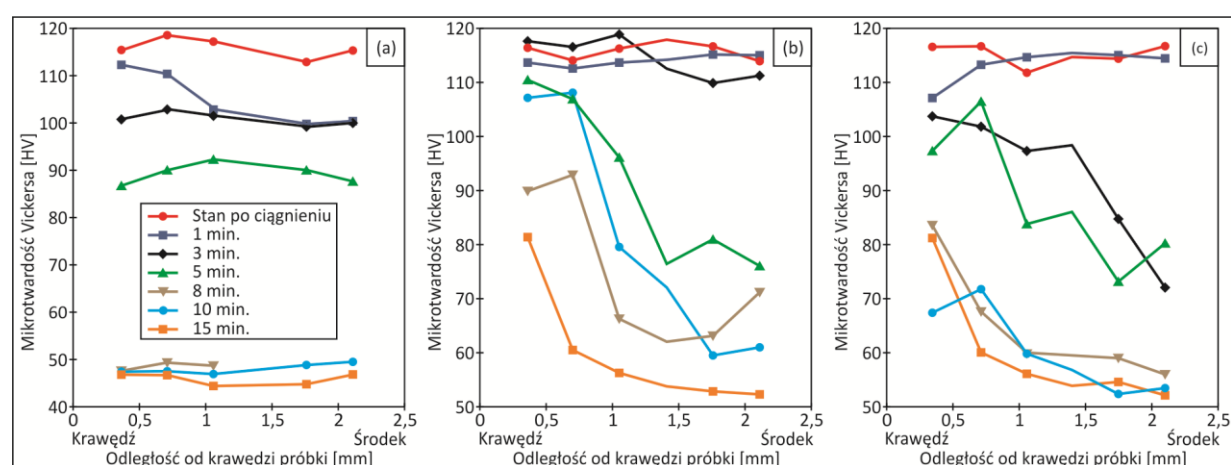
Dokładną analizę wpływu wybranych zanieczyszczeń na przebieg procesu rekryształacji miedzi w gatunku Cu-ETP przeprowadził Jakani [142] w swej pracy doktorskiej. Dysertacja koncentrowała się na analizie wpływu fosforu i siarki oraz tlenu na podatność miedzi do rekryształacji. Skład chemiczny

badanych materiałów przedstawiono w tabeli 9.3.9.

Tabela 9.3.9. Skład chemiczny i wyniki testu AR badanych materiałów wg Jakaniego [142]

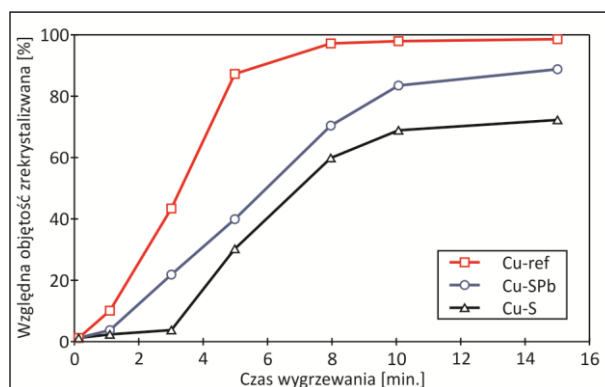
Oznaczenie materiału	Wynik testu AR	Zawartość wagowa pierwiastków [ppm wag.]						Sumaryczna zawartość zanieczyszczeń z wyłączeniem O <sub>2</sub>
	[%]	O <sub>2</sub>	Ag	Fe	Pb	S	Sb	[ppm wag.]
Cu-ref	43	160	0,15	2,8	0,26	3,2	0,0	9,20
Cu-S	23	150	8,60	2,9	0,14	8,7	0,02	25,95
Cu-Pb	31	160	0,02	4,4	2,70	7,7	0,0	12,25
Cu-O270	32	270	12,00	1,1	0,32	2,7	2,3	21,80
Cu-O120	28	120	16,00	1,9	0,84	2,4	2,2	27,80

Jakani w swojej pracy zwrócił uwagę na istotną kwestię zróżnicowania twardości materiału na przekroju podczas wygrzewania w temperaturze 260 °C, co pokazane zostało na rysunku 9.3.37. Należy przy tym zaznaczyć, iż autor nie zamieszcza istotnych informacji na temat rodzaju i pochodzenia próbek do badań.



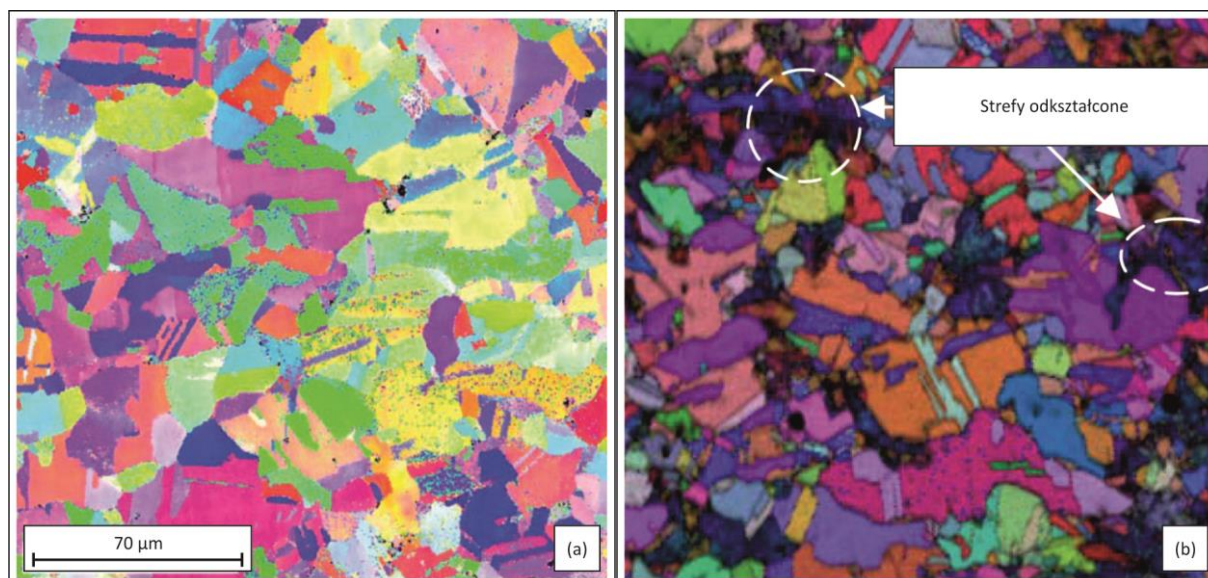
Rys. 9.3.37. Zmiana mikrotwardości na przekroju drutów poddawanych procesowi wygrzewania w temperaturze 260 °C w czasie od 0 minut do 15 minut wg Jakaniego. Oznaczenie materiałów: a - Cu-ref, b - CuS, c - CuSPb zgodnie z danymi w tabeli 9.3.9 [142]

W materiale czystym oznaczonym przez autora jako Cu-ref zróżnicowanie twardości na przekroju pojawiło się po czasie około 3 minut wygrzewania, zaś już po czasie 8 minut materiał był w stanie miękkim. Z kolei w miedzi zawierającej siarkę oraz siarkę i ołów zróżnicowanie twardości na przekroju zaobserwowano nawet przy zastosowaniu czasów wygrzewania sięgających 15 minut. Oznacza to, iż w tych materiałach nie występowała w analizowanym czasie pełna rekrytalizacja i zaobserwowano dla nich występowanie twardszych obszarów. Potwierdzają to wyniki zilustrowane na rysunku 9.3.38 obrazujące względną objętość zrekrystalizowaną rozumianą jako objętość ziaren po rekrytalizacji odniesioną do całkowitej objętości materiału.



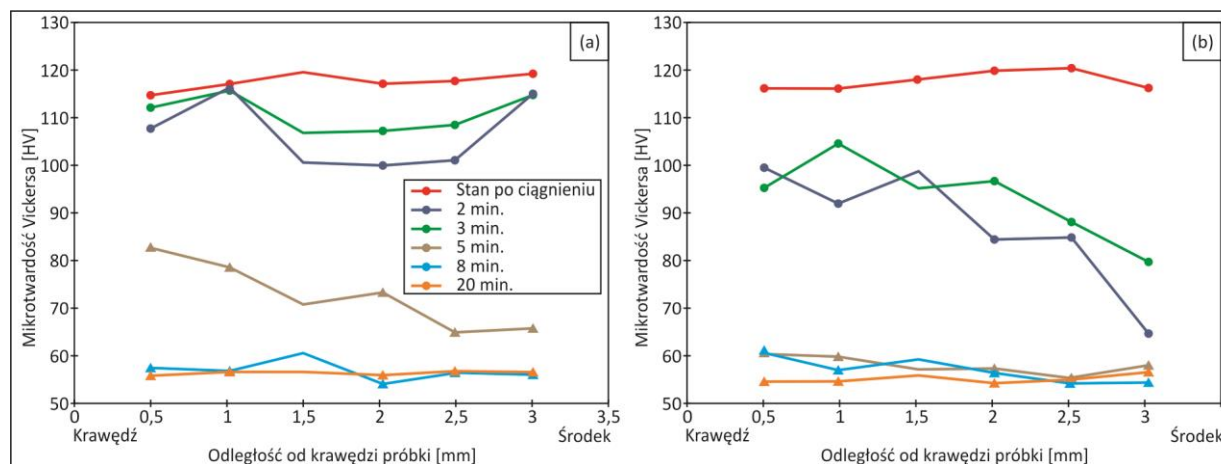
Rys. 9.3.38. Względna objętość zrekrystalizowana w funkcji czasu wygrzewania dla miedzi po zabiegu obróbki cieplnej w temperaturze 260 °C wg Jakaniego. Oznaczenie materiałów zgodnie z danymi w tabeli 9.3.9 [142]

Jak wynika z analizy charakterystyk przedstawionych na rysunku 9.3.38, miedź zanieczyszczona siarką oraz siarką i ołowiem posiada około 20 – 30 % objętości niezrekrytalizowanej. Autor przedstawił ponadto przykłady struktur materiałów poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 260 °C (por. rys. 9.3.39).



Rys. 9.3.39. Przykłady struktur materiałów poddanych procesowi wygrzewania wg Jakaniego. Parametry zastosowanych zabiegów obróbki cieplnej: a – Cu-ref 260 °C / 8 min., b – CuS 260 °C / 10 min. [142]

Jakani analizował również wpływ tlenu w miedzi w gatunku Cu-ETP na przebieg procesu rekrytalizacji. Wyniki jego badań dotyczących zmian mikrotwardości materiału na przekroju w funkcji czasu wygrzewania w temperaturze 260 °C przedstawiono na rysunku 9.3.40.



Rys. 9.3.40. Zmiana mikrotwardości na przekroju drutów poddawanych procesowi wygrzewania w temperaturze 260 °C w czasie od 0 minut do 15 minut wg Jakaniego. Oznaczenie materiałów: a – Cu-O120, b – Cu-O270 zgodnie z danymi w tabeli 9.3.9 [142]

Analizując przedstawione na rysunku 9.3.40 wyniki zauważono, że podwyższona zawartość tlenu wydatnie poprawia skłonność materiału do mięknięcia. Mechanizm tego działania omówiony został już wcześniej.

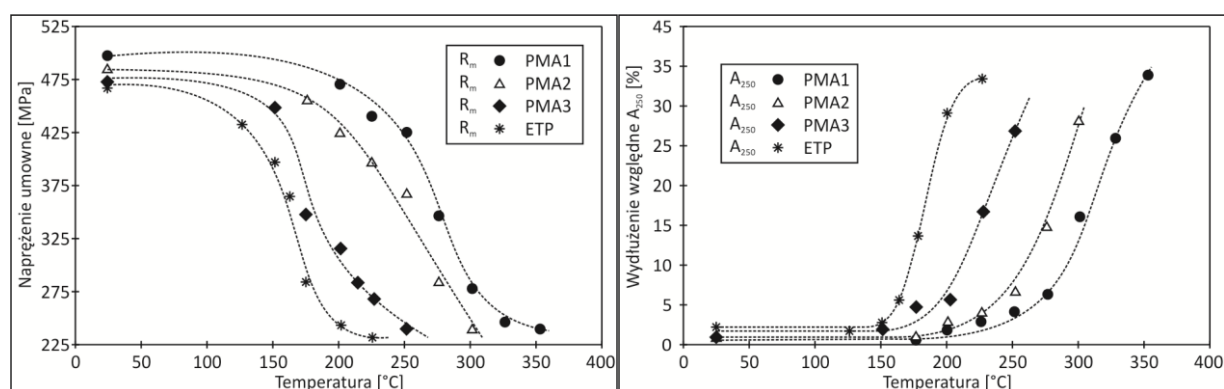
Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań doświadczalnych wyraźnie wynika, że w przypadku miedzi o klasie czystości 4N i niższej tj. w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP problem kształtowania temperatury rekrytalizacji zależy przede wszystkim od relacji zawartości tlenu do pozostałych zanieczyszczeń. Tlen w tych przypadkach jest dodawany do miedzi przede wszystkim w celu rafinacji pierwiastków zanieczyszczeń. Powyższy fakt, może prowadzić do sytuacji, w której miedź o wyższej sumarycznej zawartości pierwiastków zanieczyszczeń, a w tym i tlenu prowadzi w rezultacie do spadku całkowitej temperatury rekrytalizacji. W tabeli 9.3.10 zamieszczono wyniki



badan prowadzonych przez Martinez [143], które wskazują na efekty działania różnej zawartości tlenu w miedzi na kształtowanie się temperatury rekrytalizacji. Do badań wytypowane zostały cztery rodzaje drutów miedzianych uzyskanych z walcówek wyprodukowanych w linii ciągłego odlewania i walcowania metodą Properzi. Autorka pracy porównała trzy materiały oznaczone jako PMA1, PMA2 i PMA3 oraz jako punkt odniesienia druty otrzymane z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP (zob. tabela 9.3.10 i rys. 9.3.41).

Tabela 9.3.10. Skład chemiczny drutów z miedzi wytypowanych do badań wg Martinez [143]

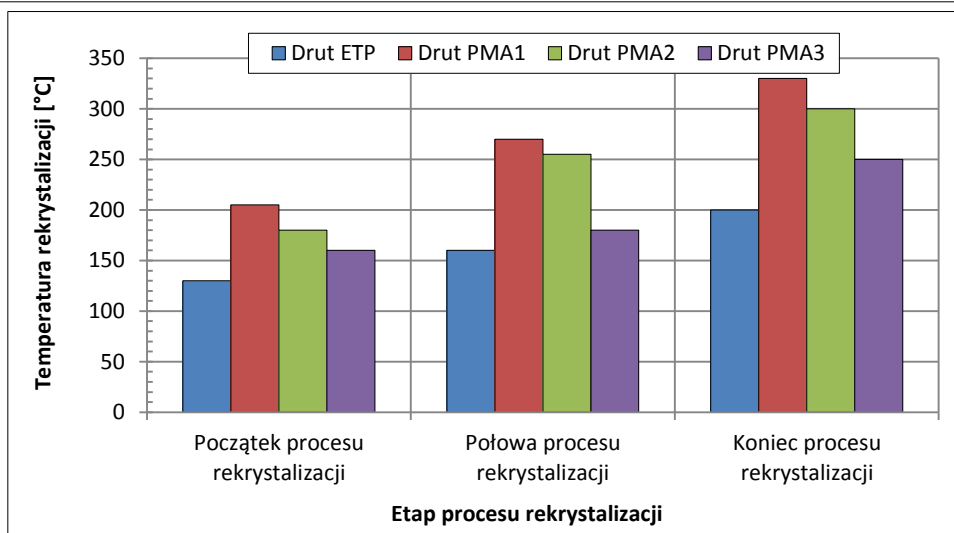
Oznaczenie materiału	Zawartość wagowa pierwiastków, ppm wag.									Sumaryczna zawartość zanieczyszczeń [ppm wag.]
	O <sub>2</sub>	Ag	Fe	Ni	Pb	Sb	Sn	Zn	Inne	
ETP	170	11	17	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	22	225
PMA1	224	158	25	153	424	63	232	61	958	2298
PMA2	203	56	18	19	369	41	47	18	512	1283
PMA3	165	31	19	45	546	22	36	22	690	1576



Rys. 9.3.41. Wpływ temperatury na zmianę wytrzymałości na rozciąganie (lewa strona) i wydłużenia względnego  $A_{250}$  (prawa strona) drutów poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze od 25 °C do 350 °C w czasie 1 h wg Martinez [143]

Na podstawie analizy charakterystyk zilustrowanych na rysunku 9.3.41 zauważono, że spośród badanych materiałów najwyższą temperaturę rekrytalizacji wykazały druty uzyskane z materiału PMA1, w którym sumaryczna zawartość zanieczyszczeń kształtowała się na poziomie około 2300 ppm wag., przy czym zawartość tlenu wynosiła 224 ppm wag., co stanowi około 10 % sumarycznej zawartości domieszek. Analiza przebiegu krzywych dostarczyła także informacji, iż druty uzyskane z miedzi w gatunku Cu-ETP o najniższej zawartości zanieczyszczeń wykazały odpowiednio najniższą wartość temperatury rekrytalizacji. Powyższe obserwacje są zgodne z ogólną wiedzą na ten temat. Natomiast w przypadku drutów oznaczonych jako próbki PMA2 i PMA3 zauważono, iż sytuacja jest odwrotna. Druty o wyższej zawartości zanieczyszczeń wynoszącej 1576 ppm wag. (materiał PMA3) podlegały procesowi rekrytalizacji w zakresie niższych temperatur niż druty PMA2, dla których sumaryczna zawartość zanieczyszczeń kształtowała się na poziomie 1283 ppm wag. Co więcej szczegółowa analiza kinetyki wyżarzania przedstawiona na kolejnym rysunku 9.3.42 wskazała dodatkowo na istotne zróżnicowanie temperatury początku i końca rekrytalizacji. Na podstawie ich analizy zaobserwowano, iż zakres temperatur mięknięcia wynosi w przypadku drutów oznaczonych jako PMA2 – 120 °C, natomiast dla materiału PMA3 – 90 °C.

Wy tłumaczeniem zaobserwowanej anomalii jest zawartość tlenu, która w przypadku drutów oznaczonych jako PMA2 wynosiła około 10 %, a w przypadku materiału PMA3 odpowiednio – 16 % sumarycznej zawartości wszystkich pierwiastków domieszek. Przedstawiony przykład ukazuje doświadczalnie stwierdzony fakt, iż zawartość tlenu w miedzi należy ściśle ustalać z sumaryczną zawartością pozostałych pierwiastków domieszek. W przypadku wyższej zawartości zanieczyszczeń wpływ tlenu jest wysoce korzystny, bowiem reaguje z pozostałymi zanieczyszczeniami tworząc tlenki, które z punktu widzenia procesów rekrytalizacji stanowią korzystny czynnik, bowiem są wydzieleniami ulokowanymi poza roztworem.



Rys. 9.3.42. Porównanie temperatury początku rekrytalizacji, rekrytalizacji połówkowej i rekrytalizacji całkowitej badanych drutów wg Martinez [143]

Stąd też rozważając wpływ zanieczyszczeń na temperaturę rekrytalizacji należy spodziewać się odmiennej roli tlenu w przypadku miedzi wysokiej czystości chemicznej. Wówczas tlen sam staje się zanieczyszczeniem i lokuje się w osnowie miedzi tworząc roztwór. Z analizy stanu wiedzy na temat rekrytalizacji wynika, iż najintensywniejszy wpływ dodatków uwidacznia się przy ich zawartości na poziomie setnych części procenta oraz, że wpływ ten jest tym większy, im większa jest czystość miedzi. W przypadku analizy podatności miedzi do wyżarzania istotne jest rozstrzygnięcie kwestii rozpuszczalności pierwiastków zanieczyszczeń w osnowie. Tego zagadnienia dotyczą zamieszczone w tabeli 9.3.11 graniczne wartości rozpuszczalności pierwiastków w miedzi określone według różnych autorów.

Tabela 9.3.11. Rozpuszczalności pierwiastków w miedzi wg różnych źródeł [144 – 203]

Pierwiastek	Rozpuszczalność	Temperatura	Źródło
	[%]	[°C]	
Ag	0,1	20	Owen E. A, Rogers J. [144]
	1,0	450	
	8,0	780	
Al	9,4	20	Köster W., Zwicker U., Moeller K. [145]
	9,5	565	Raynor G.V., Greenfield P. [146]
	7,5	1037	
As	6,5	20	Owen E. A., Rowlands V. W. [147]
	7,7	400	Owen E. A., Morris D. P. [148]
	8,0	689	
Au	100	20	Johansson C. H., Linde J. O. [149]
B	0,06	20	Lihl F., Fleish O. [150]
	0,09	1060	
Be	0,2	20	Gruhl W., Wassermann G. [151]
	0,4	400	
	1,4	575	
	2,7	864	
Bi	0,0001	20	Raub E., Engel A. [152]
	0,001	600	Voce E., Hallows A. P. C. [153]
	0,01	800	
C	Nierozpuszczalny	20	Smart J. S., Smith A. A., Phillips A. J. [124]
	Nierozpuszczalny	1083	Bever M. B., Floe C. F. [154]
	0,0001	1200	
Ca	Nierozpuszczalny	20	Davis J. R. [4]
	< 0,1	910	Bulletin Alloy Phase Diagrams [155]
Cd	< 0,5	20	Raub E. [156]
	0,9	300	Sahmen R. [157]

	2,4	500	Raub E. [156]
	4,4	700	
Co	0,2	20	Hashimoto U. [158]
	8,0	1100	
Cr	0,03	20	Raub E., Engel M. [159]
	0,07	600	Hibbard W. R., Rosi F. D., Clark H. T., O'Herron R. I. [160]
	0,15	800	Bunge G., Honak E. R., Nielsch W. [161]
	0,70	1080	Doi T. [162]
Fe	0,14	20	Reekie J., Hutchison T. S., Hetherington F. E. [163]
	0,15	600	
	0,6	760	Knappwost A. [164]
	1,0	833	Nielsen F. H. [165]
Ga	20,0	20	Hume-Rothery W., Raynor G.V., Packer H. K. [166]
	20,8	620	Hume-Rothery W., Reynolds P. W., Raynor G.V. [167]
Ge	11,0	20	Schubert K., Brandauer G. [168]
	11,0	830	Chang E. A., Neumann J. P., Mikula D., Goldberg D. [169]
H <sub>2</sub>	Nierozpuszczalny	20	Röntgen P., Möller F. [170]; Smart J. S., Smith A. A. [125]
Hg	Nierozpuszczalny	20	Davis J. R. [4]
In	3,0	20	Welbke F., Eggers H. [171, 172]
	7,8	400	Owen E. A., Morris D. P. [148]
	18,1	574	Jones R. O., Owen E. A. [173]
Ir	1,5	20	Davis J. R. [4]
La	Nierozpuszczalny	20	Bulletin Alloy Phase Diagrams [155]
Li	Nierozpuszczalny	20	Bulletin Alloy Phase Diagrams [155]
Mg	1,0	20	Jones W. R. D. [174]
	2,8	720	
Mn	24	400	Kawasaki M. [175]
	60	685	
Mo	Nierozpuszczalny	Cały zakres	Sargent C. I. [176]; Lehmer C. [177]; Siedschlag E. [178]; Dreibholz L. [179]
N <sub>2</sub>	Nierozpuszczalny	Cały zakres	Smart J. S., Smith A. A. [125]
Ni	100	20	Davis J. R. [4]
O <sub>2</sub>	0,0002	20	Phillips A., Skinner E. N. [180]
	0,0017	600	
Os	Nierozpuszczalny	Cały zakres	Linde J. O. [181]
P	0,5	20	Veroe J. [182]
	0,6	500	
	1,15	700	
Pb	0,02	600	Chakrabarti D. J., Laughlin D. E., [183]
	0,05	954	Gebhardt E., Obrowski W. [184]
Pd	40	20	Jones F.W., Sykes C. [185]
	100	600	
Pt	100	20	Schneider A., Esch U. [186]
Rh	20	20	Davis J. R. [4]
S	< 0,0025	20	Smart J. S., Smith A. A. [125]
	< 0,0002	600	
Sb	2,0	20	Mertz J. C., Mathewson C. H. [187]
	4,0	300	Schubert K., Ilschner M. [188]
	8,0	800	
Se	< 0,002	20	Smart J. S., Smith A. A. [125]
	< 0,001	500	
Si	2,0	20	Davis J. R. [4]
	2,2	100	Andersen A. G. H., Kingsbury A. W. [189]
	4,2	570	Hofmann W., Ziegler J., Hanemann H. [190]
	5,0	800	
Sn	1,2	20	Kattner U. [191]
	2,8	250	
	11	350	
	16	550	
Te	< 0,0005	20	Davis J. R. [4]
	< 0,001	500	Smart J. S., Smith A. A. [125]
	0,007	800	Anderko K., Schubert K. [192]
Th	Nierozpuszczalny	20	Raub E., Engel M. [193]

	0,03	946	
Ti	0,4	20	Joukainen A., Grant N. J., Floe C. F. [194]
	1,7	700	Raub E., Walter P., Engel M. [195]
	3,9	850	
Tl	Nierozpuszczalny	400	Raub E., Engel A. [183]
	< 0,1	500	
	0,15	700	
	0,6	900	
V	6,0	20	Tsai A. P., Inoue A., Masumoto T. [196]
W	Nierozpuszczalny	Cały zakres	Guillet L. [197]; Rumschottel O. [198]; Schroter K. [199]
Zn	30	20	Haase C., Pawlek F. [200]
	39	450	
	32	900	
Zr	< 0,01	20	Pogodin S. A., Shumova I. S., Kugucheva F. A. [201]
	0,28	600	Arias D., Abriata J. P. [202]
	0,9	925	Lundin C. E., McPherson D. J., Hansen M. [203]

Dokonując analizy danych zamieszczonych w tabeli 9.3.11 należy zaznaczyć, że w przypadku pierwiastków rozpuszczalnych wpływ ten jest tym silniejszy, im większa jest różnica średnic atomowych pierwiastka rozpuszczanego (zanieczyszczenia) i rozpuszczalnika (osnowy) oraz im mniejsza jest rozpuszczalność pierwiastka w metalu. Intensywność wpływu dodatków maleje wraz ze wzrostem ich zawartości [140, 204]. Wpływ zanieczyszczeń na własności fizyczne miedzi zależy od tego, czy tworzą one tlenki, czy roztwory w stanie stałym. Wyróżnia się dwie grupy pierwiastków, które w zależności od stopnia powinowactwa do tlenu w różny sposób wpływają na temperaturę rekrytalizacji. Pierwsza grupa obejmuje pierwiastki całkowicie związane przez tlen, a więc występujące wyłącznie w postaci tlenków (Sn, Fe, Co, P). Do drugiej grupy zalicza się pierwiastki, które nie tworzą poniżej temperatury topnienia miedzi tlenków, co wynika z ich mniejszego powinowactwa do tlenu niż do miedzi. Są to głównie pierwiastki z VI grupy układu okresowego tzn. selen, tellur, siarka. Z analizy danych przedstawionych w tabeli 9.3.11 wynika, iż do grupy pierwiastków, które nie rozpuszczają się w stanie stałym w miedzi w temperaturze otoczenia lub w ograniczonym zakresie w temperaturach podwyższonych należą: Bi, Ca, C, Ce, H<sub>2</sub>, Hg, La, Li, Mo, N<sub>2</sub>, Os, O<sub>2</sub>, S, Se, Te, Ti, Ru, W, Zr. Zgodnie z ogólną wiedzą, warunkiem procesu rekrytalizacji jest możliwość zarodkowania oraz migracja granic ziaren. W przypadku domieszek, które rozpuszczają się w miedzi, zwykle dochodzi do ich wbudowywania się do osnowy komórek znajdujących się na granicach ziaren, a więc w miejscach uprzywilejowanych do zarodkowania materiału po odkształceniu w warunkach ku temu sprzyjających. Wpływ domieszek rozpuszczalnych jest intensywniejszy podczas migracji ziaren niż przy ich zarodkowaniu. Z kolei wpływ pierwiastków nierozpuszczalnych nie jest jednoznacznie rozstrzygnięty i dominuje pogląd, iż odgrywają one istotną rolę podczas procesu zarodkowania – a więc w pierwszym etapie procesu rekrytalizacji.

Po tak przeprowadzonym literaturowym wprowadzeniu w tematykę wpływu ilości pierwiastków zanieczyszczeń i tlenu na podatność miedzi do wyżarzania i kształtowanie jej temperatury rekrytalizacji przeprowadzono cykl badań doświadczalnych. Ich celem było określenie roli domieszek w materiale na odporność cieplną drutów po procesie ciągnięcia. Przedmiotem zainteresowania było pięć rodzajów drutów o średnicach 2,5 mm uzyskanych z materiałów wsadowych w postaci katod i walcówek, z których każdy charakteryzował się innym poziomem pierwiastków zanieczyszczeń, w tym tlenu. W tabeli 9.3.12 zamieszczono skład chemiczny poddanych obserwacjom materiałów, z których próbki drutów oznaczone numerami od 1 do 3 otrzymano z katod z miedzi w gatunku Cu-CATH-1 o różnej klasie jakości, które wyprodukowane zostały w Hucie Miedzi „Głogów II” (marka katod: HMG-B), natomiast 4 i 5 uzyskane zostały z walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP z dwóch różnych zakładów przetwórczych (odpowiednio Aurubis – Niemcy oraz Transkat – Rosja) z linii ciągłego odlewania i walcowania Southwire o różnej zawartości tlenu i pozostałych pierwiastków.

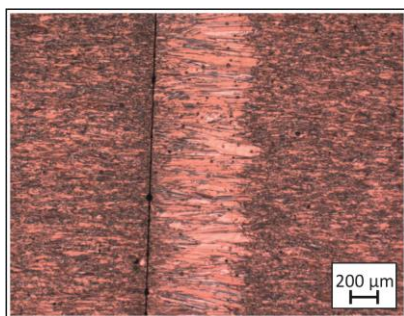
Tabela 9.3.12. Skład chemiczny wytypowanych do badań materiałów wsadowych w postaci katod i walcówek

Oznaczenie materiału	Rodzaj materiału	Zawartość wagowa pierwiastków [ppm wag.]																				
		Ag	As	Bi	Cd	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	O <sub>2</sub>	P	Pb	S	Sb	Se	Si	Sn	Te	Zn	Σ/O <sub>2</sub>	Σ
1	Katoda	10,7	0,22	0,26	0,03	0,04	0,43	3,0	0,19	0,49	53	1,13	0,87	3,0	0,10	0,06	2,0	0,08	0,004	0,9	24	77

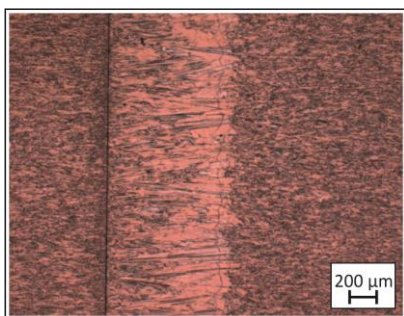
2	Cu-CATH-1 (marka HMG-B)	11,8	0,23	0,36	0,04	0,08	0,51	4,9	0,22	0,54	56	1,12	0,98	4,0	0,11	0,05	2,0	0,12	0,008	1,7	29	85
3		12,2	5,67	0,41	0,03	0,05	0,52	4,2	0,26	0,62	52	1,07	2,72	9,0	0,45	0,47	2,0	0,12	0,039	1,2	41	93
4	Walcówka Cu-ETP	13,4	0,22	0,23	0,07	0,12	0,46	3,5	0,36	0,58	160	1,12	0,81	4,1	0,09	0,06	2,0	0,08	0,004	0,7	28	188
5	(linia Southwire)	14,0	0,4	0,53	0,2	0,23	0,89	8,0	0,5	2,2	230	1,5	2,05	7,0	0,20	0,5	2,2	0,2	0,005	1,3	42	272

Na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 9.3.12 zaobserwowano, że materiały wykazały zbliżone wartości sumarycznej zawartości zanieczyszczeń z wyłączeniem tlenu na poziomie od 24 ppm wag. (próbka oznaczona jako 1) do 42 ppm wag. (materiał numer 5). Porównując natomiast zawartości wagowe wszystkich pierwiastków, poddane badaniom miedziane materiały wsadowe podzielono na dwie grupy, z których pierwsza obejmuje katody charakteryzujące się obecnością zanieczyszczeń na poziomie 77 – 93 ppm wag. (próbki 1 – 3) i druga dotycząca walcówek o wyższej zawartości domieszek sięgającej od około 180 ppm wag. (materiał 4) do około 270 ppm wag. (próbka 5).

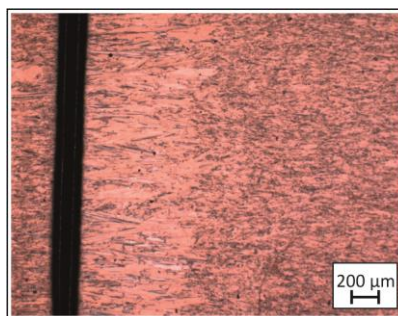
W ramach badań wstępnych przeprowadzono także identyfikację stanu strukturalnego materiałów wsadowych, z których otrzymano druty o średnicach 2,5 mm. Na rysunkach 9.3.43 – 9.3.45 zilustrowano mikrostruktury przekrojów wzdłużnych wytypowanych do badań katod z miedzi w gatunku Cu-CATH-1, natomiast na ilustracjach 9.3.46 i 9.3.47 przedstawiono mikrostruktury walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Southwire otrzymanych w zakładach przetwórczych Aurubis i Transkat.



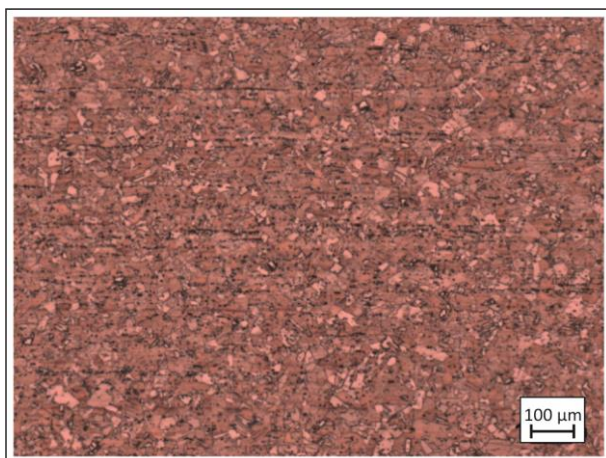
Rys. 9.3.43. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego materiału wsadowego oznaczonego jako 1 – katody Cu-CATH-1 (marka HMG-B). Mikroskop świetlny



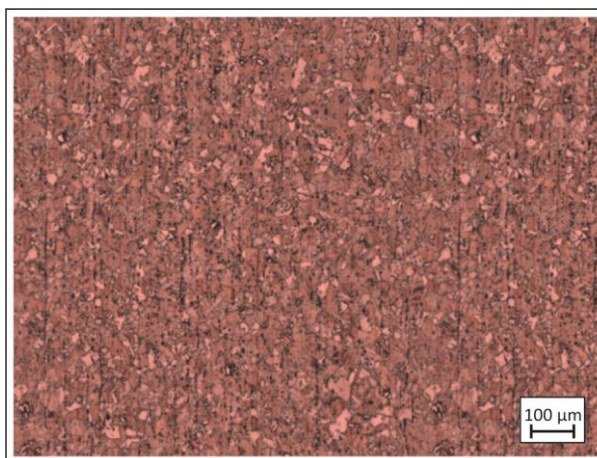
Rys. 9.3.44. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego materiału wsadowego oznaczonego jako 2 – katody Cu-CATH-1 (marka HMG-B). Mikroskop świetlny



Rys. 9.3.45. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego materiału wsadowego oznaczonego jako 3 – katody Cu-CATH-1 (marka HMG-B). Mikroskop świetlny



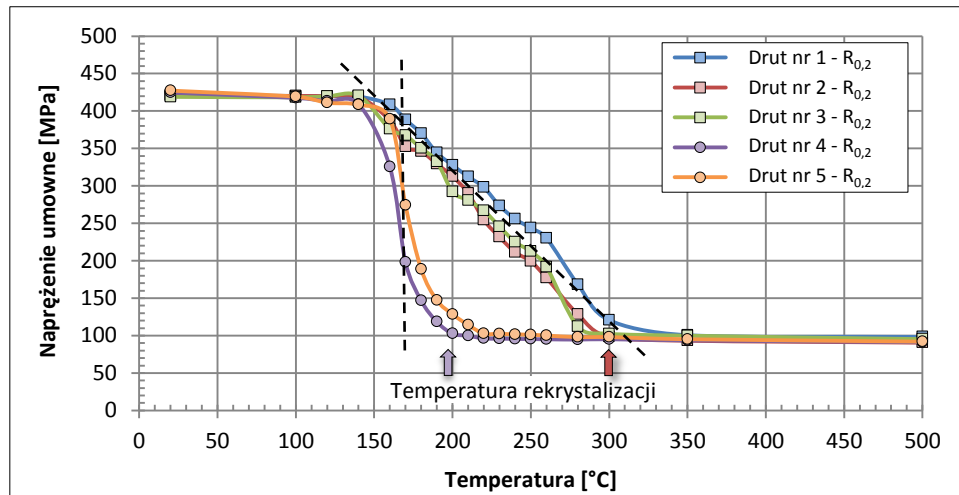
Rys. 9.3.46. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego materiału wsadowego w postaci walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii technologicznej Southwire z zakładu przetwórczego Aurubis. Mikroskop świetlny



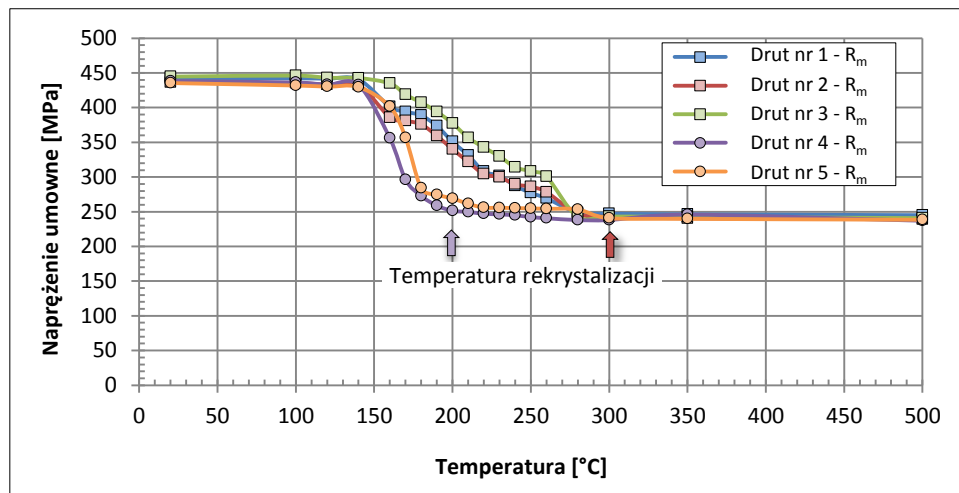
Rys. 9.3.47. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego materiału wsadowego w postaci walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii technologicznej Southwire z zakładu przetwórczego Transkat. Mikroskop świetlny

Na podstawie analizy przedstawionych zdjęć mikrostruktur zauważono, iż z punktu widzenia wielkości ziarna jest to taka sama klasa miedzi. Zasadnicza różnica pomiędzy badanymi materiałami wsadowymi związana jest z ich składem chemicznym, a w szczególności z zawartością zanieczyszczeń oraz tlenu (por. tabela 9.3.12). Do badań wyżarzalności wytypowane zostały druty o średnicy 2,5 mm uzyskane z powyższych materiałów wsadowych. Badania zrealizowano w teście jednogodzinnego wygrzewania w zakresie temperatury od 20 – 500 °C.

Na rysunkach 9.3.48 – 9.3.51 zilustrowano klasyczne krzywe mięknięcia drutów otrzymanych z katod z miedzi w gatunku Cu-CATH-1 i walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP w charakterze zależności wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności, wydłużenie równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  w funkcji temperatury. Dane liczbowe do ich konstrukcji zamieszczono w aneksie w tabeli A9.3.2.



Rys. 9.3.48. Granica plastyczności drutów o średnicy 2,5 mm otrzymanych z materiałów wsadowych w postaci katod i walcówek w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

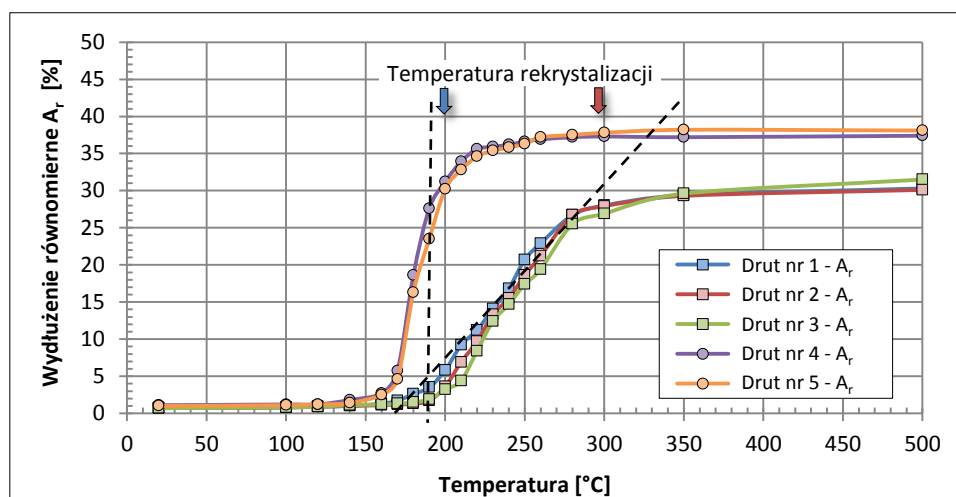


Rys. 9.3.49. Wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicy 2,5 mm otrzymanych z materiałów wsadowych w postaci katod i walcówek w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

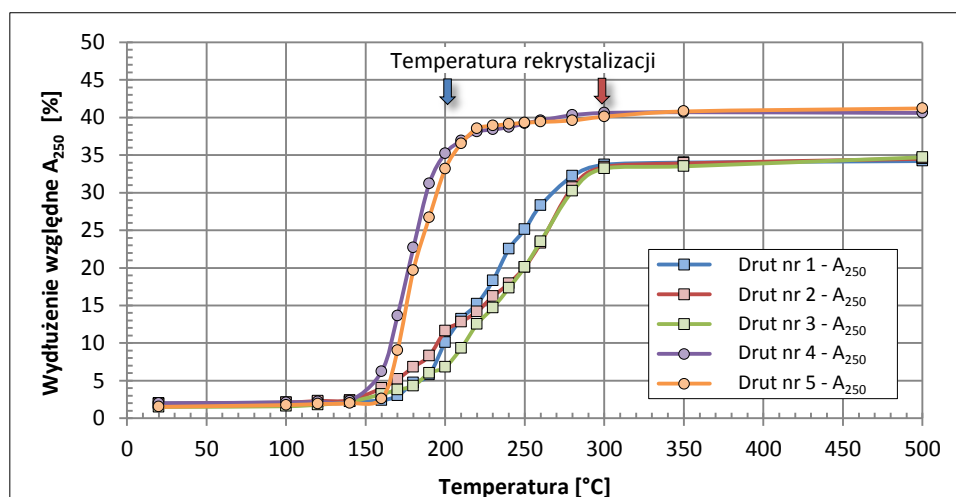
Na podstawie analizy zilustrowanych na rysunkach 9.3.48 i 9.3.49 zależności wpływu temperatury wygrzewania na zmianę granicy plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie zauważono, iż dla drutów oznaczonych jako próbki 1 – 3, które otrzymane zostały z katod z miedzi w gatunku Cu-CATH-1 o różnym poziomie zanieczyszczeń nie odnotowano znaczących różnic pomiędzy ich wartościami. Takie same obserwacje dotyczą drutów oznaczonych jako próbki 4 i 5 uzyskanych z walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP charakteryzujących się wyższą zawartością tlenu niż druty wytworzone z katod. Ponadto analizując przedstawione charakterystyki wyraźnie ujawniły się dwie grupy materiałów o odmiennych przebiegach krzywych mięknięcia. Jedną tworzą materiały bazujące na

katodach, drugą natomiast stanowią druty uzyskane z walcówek. Należy zaznaczyć, iż z punktu widzenia podatności do rekrytalizacji druty otrzymane z materiałów 4 i 5 bardzo wyraźnie odbiegają od drutów oznaczonych jako próbki 1 – 3. Ilustrują to zaznaczone na rysunku 9.3.48 w sposób schematyczny krzywe o charakterze przerywanych linii w kolorze czarnym. W wyniku przeprowadzonego testu jednogodzinnego wygrzewania druty uzyskane z walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP uzyskały stan miękki już w temperaturze 200 °C, podczas gdy dla pozostałych materiałów dopiero ingerencja wyższej temperatury wynoszącej około 300 °C spowodowała ich przejście w stan miękki. Zatem druty uzyskane z walcówek charakteryzują się lepszą kinetyką wyżarzania, niż te uzyskane bezpośrednio z katod.

Przeanalizowano również jak kształtują się zależności wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  od temperatury. Przedstawiono je na rysunkach 9.3.50 i 9.3.51.

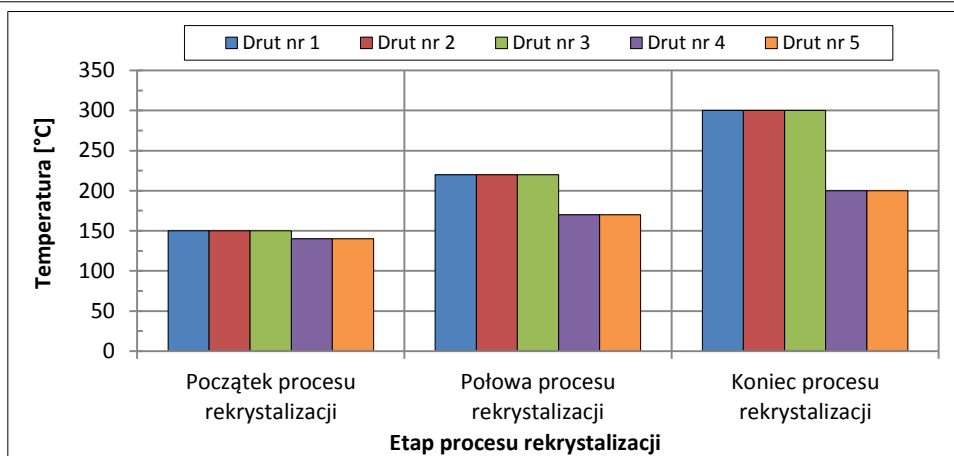


Rys. 9.3.50. Wydłużenie równomierne drutów o średnicy 2,5 mm otrzymanych z materiałów wsadowych w postaci katod i walcówek w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.3.51. Wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicy 2,5 mm otrzymanych z materiałów wsadowych w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

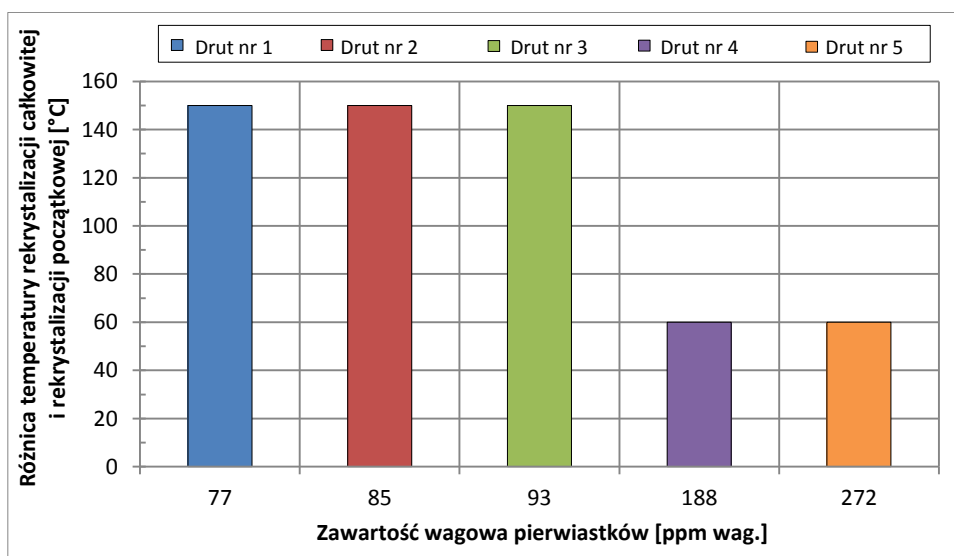
Także i na podstawie przedstawionych wykresów wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  w funkcji temperatury zaobserwowano wspomniane wyżej zróżnicowanie przebiegów charakterystyk oraz związanych z nimi wartości temperatur rekrytalizacji. Podobnie jak na rysunku 9.3.50 przerywanymi, czarnymi liniami zaznaczono tendencje w przebiegach krzywych mięknięcia z punktu widzenia podatności materiałów do procesu wyżarzania rekrytalizującego. Na podstawie tych obserwacji nasunęło się pytanie o przyczynę takiego zróżnicowania. W tym celu dla badanych materiałów wyznaczono wartości temperatur początku rekrytalizacji, rekrytalizacji połówkowej oraz rekrytalizacji całkowitej. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 9.3.52.



Rys. 9.3.52. Wartości temperatury początku procesu rekrytalizacji, rekrytalizacji półówkowej oraz rekrytalizacji całkowitej dla drutów otrzymanych z materiałów wsadowych w postaci katod i walcówek

Z analizy przedstawionych na rysunku 9.3.52 wykresów wynika, że druty oznaczone jako materiały 1 – 3, które otrzymane zostały z katod o zawartości tlenu na poziomie około 50 ppm wag. charakteryzują się niższymi wartościami temperatur rekrytalizacji, zarówno na początku procesu, jak i w trakcie jego trwania oraz po zakończeniu w stosunku do materiałów o numerach 4 i 5 czyli drutów uzyskanych poprzez przeróbkę plastyczną na zimno walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP wykazujących zawartość tlenu na poziomie około 200 ppm wag. Ponadto stwierdzono, że różnica pomiędzy temperaturą rekrytalizacji początkowej i temperaturą rekrytalizacji całkowitej dla drutów bazujących na katodach wyniosła 150 °C, podczas gdy dla pozostałych materiałów (tj. próbek 4 i 5) kształtowała się ona na dużo niższym poziomie wynoszącym około 60 °C. Obserwacja ta dowodzi korzystnego wpływu zawartości tlenu i drobnoziarnistej struktury materiału wsadowego na kinetykę wyżarzania cienkich drutów miedzianych.

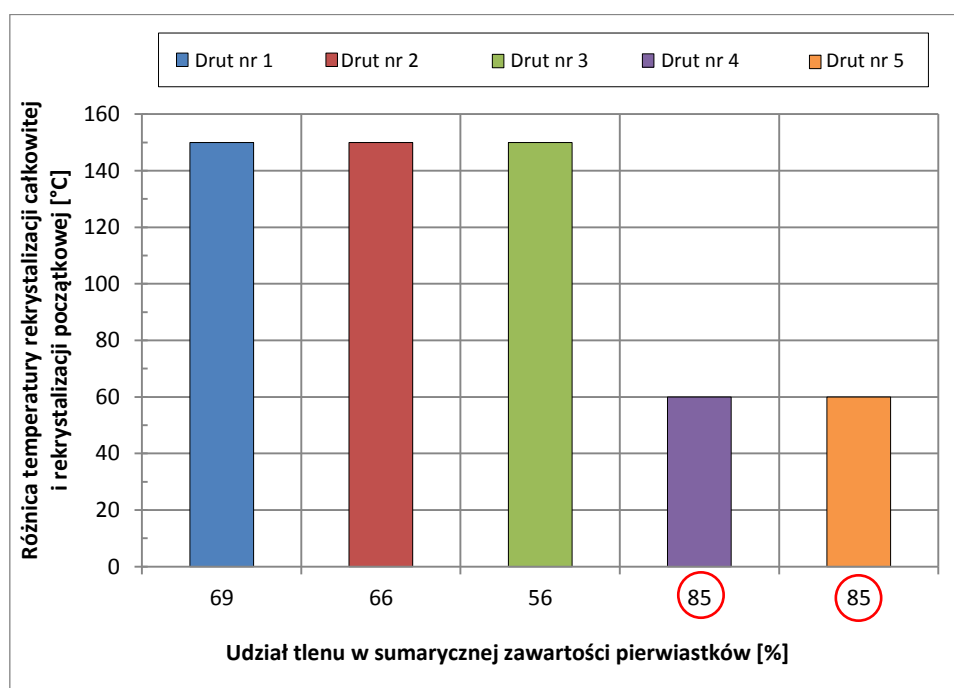
Zatem odpowiedzi na spostrzeżoną podczas badań eksperymentalnych odmienną podatność do wyżarzania rekrytalizującego drutów należy szukać w zróżnicowaniu ich składu chemicznego i struktury. Powołując się na dane dotyczące wagowej zawartości pierwiastków zamieszczone w tabeli 9.3.12 zauważono, iż główną domieszką różnicującą badane materiały jest wspomniany już wcześniej tlen, którego ilość kształtowała się od około 50 ppm wag. dla drutów uzyskanych z katod do około 200 ppm wag. dla drutów otrzymanych z walcówek. Interpretację graficzną tych zależności stanowią wykresy przedstawione na rysunku 9.3.53 obrazujące relację temperatury rekrytalizacji całkowitej i rekrytalizacji początkowej od wagowej zawartości pierwiastków (z uwzględnieniem tlenu) dla badanych grup materiałów.



Rys. 9.3.53. Relacja różnicy temperatury rekrytalizacji całkowitej i rekrytalizacji początkowej od zawartości wagowej pierwiastków dla drutów otrzymanych z materiałów wsadowych w postaci katod i walcówek



Analiza danych przedstawionych na rysunku 9.3.53 pozwoliła na stwierdzenie, iż zanotowany taki sam zakres temperatury rekrytalizacji, zarówno całkowitej, jak i początkowej, a w związku z tym różnicy pomiędzy tymi wartościami w przypadku próbek drutów o numerach 1, 2 i 3 związany był ze zbliżoną zawartością pierwiastków zanieczyszczeń na poziomie średnio około 85 ppm wag. Podobna obserwacja dotyczyła próbek 4 i 5 uzyskanych z walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP. W związku z powyższym pojawiło się pytanie o przyczynę ponad dwukrotnego zmniejszenia temperaturowego zakresu (kinetyki) mięknięcia w przypadku tych materiałów, pomimo iż charakteryzowały się one zdecydowanie wyższą sumaryczną zawartością domieszek. Odpowiedzi na to pytanie poszukiwano w relacji pomiędzy zawartością tlenu i pozostałych zanieczyszczeń. Umożliwiła to interpretacja wielkości zilustrowanych na rysunku 9.3.54 ujmująca różnice temperatury rekrytalizacji całkowitej i rekrytalizacji początkowej od procentowego udziału tlenu w całkowitym składzie chemicznym miedzi dla badanych grup materiałów.



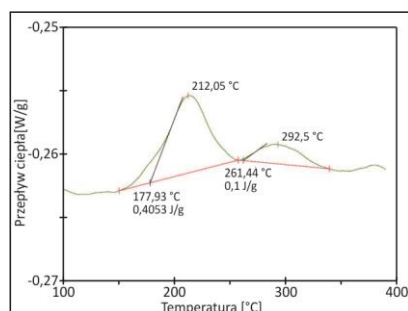
Rys. 9.3.54. Wykresy zależności różnicy temperatury rekrytalizacji całkowitej i rekrytalizacji początkowej od procentowego udziału tlenu w całkowitym składzie chemicznym dla drutów otrzymanych z materiałów wsadowych w postaci katod i walcówek

Przedstawione powyżej relacje pozwoliły na jednoznaczne stwierdzenie, iż wzrost udziału tlenu w całkowitym składzie chemicznym miedzi prowadzi do zmniejszenia zakresu temperatury mięknięcia drutów, co wynika z wiązania przez tlen pierwiastków zanieczyszczeń w tlenki, które lokują się głównie na granicach ziaren zwiększając tym samym ich stan energetyczny, co z punktu widzenia kinetyki rekrytalizacji jest również korzystne.

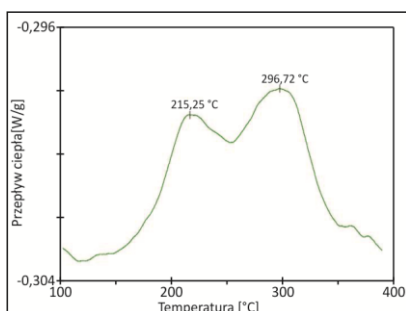
Ponadto w przypadku drutów uzyskanych z walcówek (próbki 4 i 5), w których sumaryczna zawartość wszystkich pierwiastków zanieczyszczeń i tlenu wynosiła średnio około 230 ppm wag. (por. tabela 9.3.12) zanotowano największy udział tlenu – zatem w tych przypadkach istniało duże prawdopodobieństwo, iż niemal wszystkie pierwiastki zanieczyszczeń występowały w postaci wydzielen. Ponadto warto zaznaczyć, iż korzystny wpływ tlenu zaobserwowano szczególnie w przypadku drutów oznaczonych jako materiały 3 i 5, dla których sumaryczna zawartość domieszek wynosiła średnio 40 ppm wag., natomiast zawartość tlenu kształtowała się na poziomie od 53 ppm wag. (próbka nr 3) do 230 ppm wag. (próbka nr 5). W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono zatem, iż odmienna zawartość tlenu w materiałach jest główną przyczyną zróżnicowania ich podatności do wyżarzania. Potwierdzeniem powyższych wniosków są wyniki badań kalorymetrycznych, które stanowią alternatywną metodę oceny skłonności materiału do wyżarzania. Zanotowane wartości temperatury początku i końca rekrytalizacji zamieszczono w tabeli 9.3.13, natomiast na rysunkach 9.3.55 – 9.3.59 przedstawiono krzywe kalorymetryczne wytypowanych do badań drutów Cu.

Tabela 9.3.13. Wartości temperatur początku i końca rekrytalizacji drutów otrzymanych z materiałów wsadowych w postaci katod i walcówek na podstawie wyników badań kalorymetrycznych

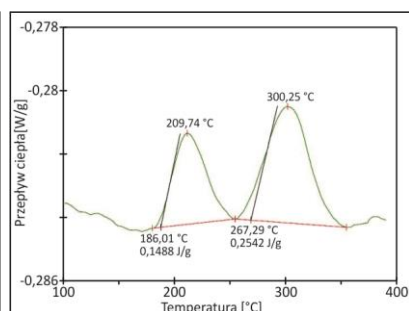
Oznaczenie materiału	Temperatura początku rekrytalizacji	Temperatura końca rekrytalizacji
	[°C]	[°C]
1	177,9	292,5
2	180,4	296,7
3	186,0	300,3
4	195,8	231,0
5	204,6	237,4



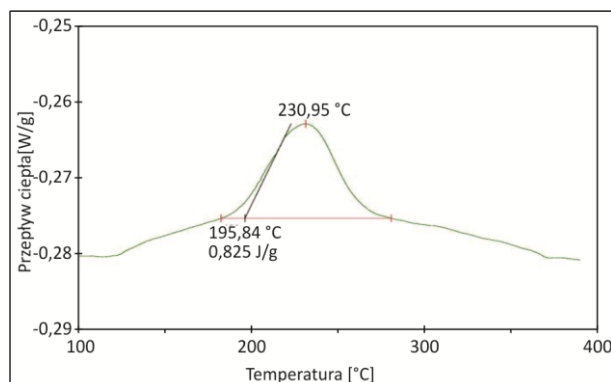
Rys. 9.3.55. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z materiału wsadowego oznaczonego jako 1 – katody Cu-CATH-1 (marka HMG-B)



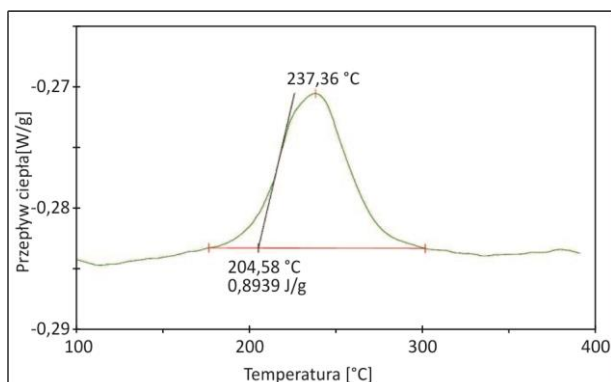
Rys. 9.3.56. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z materiału wsadowego oznaczonego jako 2 – katody Cu-CATH-1 (marka HMG-B)



Rys. 9.3.57. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z materiału wsadowego oznaczonego jako 3 – katody Cu-CATH-1 (marka HMG-B)



Rys. 9.3.58. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z materiału wsadowego oznaczonego jako 4 – walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP (linia Southwire)



Rys. 9.3.59. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z materiału wsadowego oznaczonego jako 5 – walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP (linia Southwire)

Analiza przedstawionych wykresów pozwala na stwierdzenie, iż w przypadku drutów oznaczonych numerami 1, 2 oraz 3 ich krzywe kalorymetryczne wykazują dwa charakterystyczne piki, których nie zaobserwowano w przypadku drutów uzyskanych z walcówek (próbki o numerach 4 i 5), a które jak już na wcześniejszym etapie badań doświadczalnych udowodniono posiadają znakomitą podatność do wyżarzania. Pojawienie się podwójnych pików egzotermicznych w przypadku drutów otrzymanych z katod prawdopodobnie wynika ze stosunku ilości pierwiastków zanieczyszczeń do tlenu, którego ilość nie jest wystarczająca aby związane zostały wszystkie pierwiastki w tlenki.

Przeprowadzone w ramach niniejszego podrozdziału pracy badania doświadczalne były niezbędne w celu wykazania silnej zależności pomiędzy ilością zanieczyszczeń i tlenu w miedzi a jej podatnością do wyżarzania i kształtowaniem temperatury rekrytalizacji. Analizując odporność cieplną drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP należy pamiętać, iż oprócz wpływu rodzaju materiału wsadowego do procesu ciągnięcia oraz jego składu chemicznego inny aspekt badań doświadczalnych powinien być ukierunkowany pod kątem charakteru umacniania odkształceniowego materiałów. Temu zagadnieniu poświęcony został kolejny podrozdział 9.3.3 niniejszej dysertacji.

### 9.3.3. Badania wpływu umocnienia odkształceniowego na temperaturę rekrytalizacji drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP

Powracając do głównego nurtu rozważań nad wpływem parametrów odlewania na kształtowanie cech materiałowych miedzi beztlenowej dla wysokozaawansowanych aplikacji w elektronice i elektrotechnice w ramach niniejszego podrozdziału przeprowadzone zostały porównawcze badania doświadczalne drutów z dwóch gatunków miedzi, a mianowicie Cu-ETP uzyskanej w procesie Contirod oraz Cu-OFE otrzymanej metodami Upcast i Rautomead pod kątem ich umocnienia i jego wpływu na kształtowanie temperatury rekrytalizacji. Na podstawie zrealizowanych badań dokonano analizy porównawczej zachowania się powyższych materiałów w procesie odkształcenia i obróbki cieplnej. Uzyskane wyniki dały podstawę do określenia parametrów technologicznych wytwarzania drutów dedykowanych do aplikacji na cele elektryczne z powyższych gatunków miedzi.

Do badań nad procesem rekrytalizacji wytypowane zostały druty o średnicach 7,0 mm; 5,5 mm; 4,5 mm; 2,5 mm oraz 0,5 mm otrzymane z omówionych wyżej trzech rodzajów materiałów wsadowych w procesie przeróbki plastycznej na zimno. Makrostruktura, własności mechaniczne oraz skład chemiczny walcówki oraz prętów zostały szczegółowo omówione w ramach podrozdziału 9.1 niniejszej pracy. W celu przypomnienia ogólnego widoku materiałów do badań, poniżej na rysunku 9.3.60 zilustrowano zbliżenie na powierzchnię zewnętrzną próbek ujawniającą ich wspomniane już na wcześniejszych etapach pracy zróżnicowanie strukturalne.



Rys. 9.3.60. Morfologia powierzchni walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi beztlenowej z linii Upcast i Rautomead po statycznej próbie rozciągania

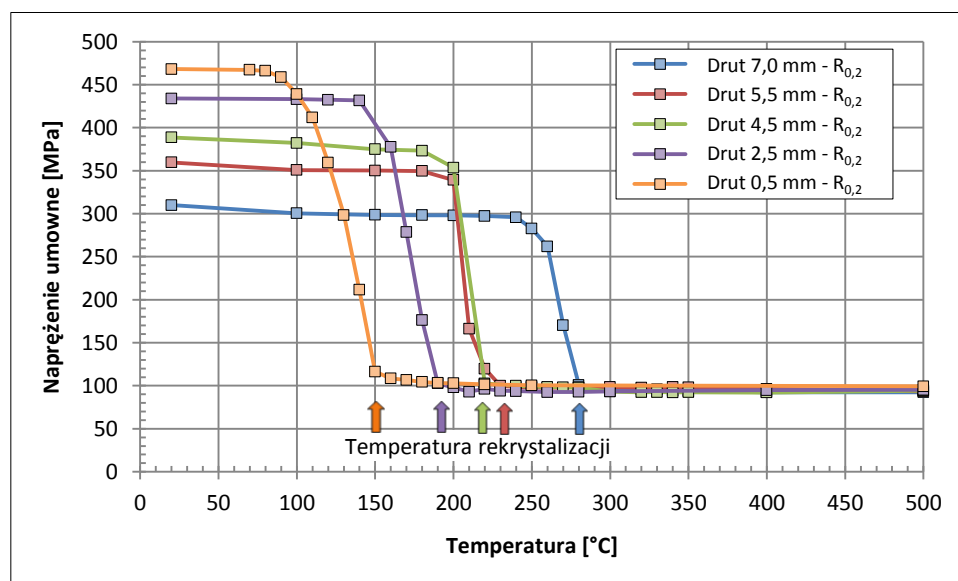
Walcówka z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz pręty z miedzi beztlenowej zostały przeciągnięte ze średnicy początkowej wynoszącej 8,0 mm na średnicę finalną 0,5 mm. Podobnie jak w poprzednim etapie pracy (podrozdział 9.2) zastosowano taką samą ilość ciągów wraz z odpowiadającymi im schematami odkształcenia (por. np. tabele A9.2.1 w aneksie). Natomiast w tabeli 9.3.14 zamieszczono wartości temperatur ekspozycji drutów o wymienionych wyżej średnicach podczas jednogodzinnego testu, przy czym należy zaznaczyć, iż zróżnicowane wartości temperatur wynika z odmiennej kinetyki wyżarzania materiałów o zróżnicowanych przekrojach poprzecznych.

Tabela 9.3.14. Zakres temperatur wygrzewania drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead podczas jednogodzinnego testu w ramach realizacji badań doświadczalnych nad wpływem umocnienia odkształceniowego na temperaturę rekrytalizacji miedzi

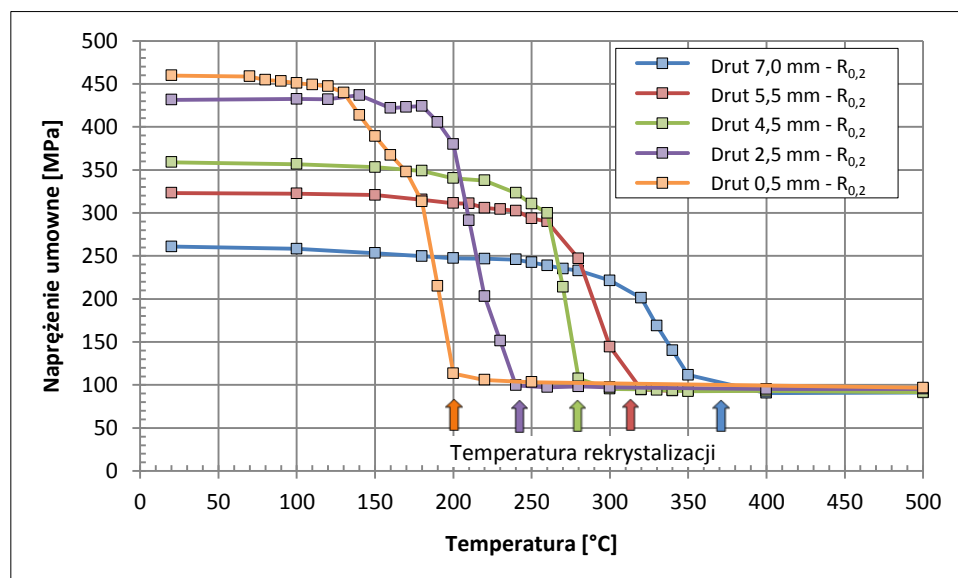
Średnica drutu [mm]	Odkształcenie rzeczywiste [-]	Temperatura [°C]																	
		20	100	150	180	200	220	240	250	260	270	280	300	320	330	340	350	400	500
7,0	0,28	20	100	150	180	200	220	240	250	260	270	280	300	320	330	340	350	400	500
5,5	0,76	20	100	150	180	200	210	220	230	240	250	260	280	300	320	340	350	400	500
4,5	1,16	20	100	150	180	200	220	240	250	260	270	280	300	320	330	340	350	400	500

2,5	2,38	20	100	120	140	160	170	180	190	200	210	220	230	240	260	280	300	400	500
0,5	5,59	20	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	220	250	500

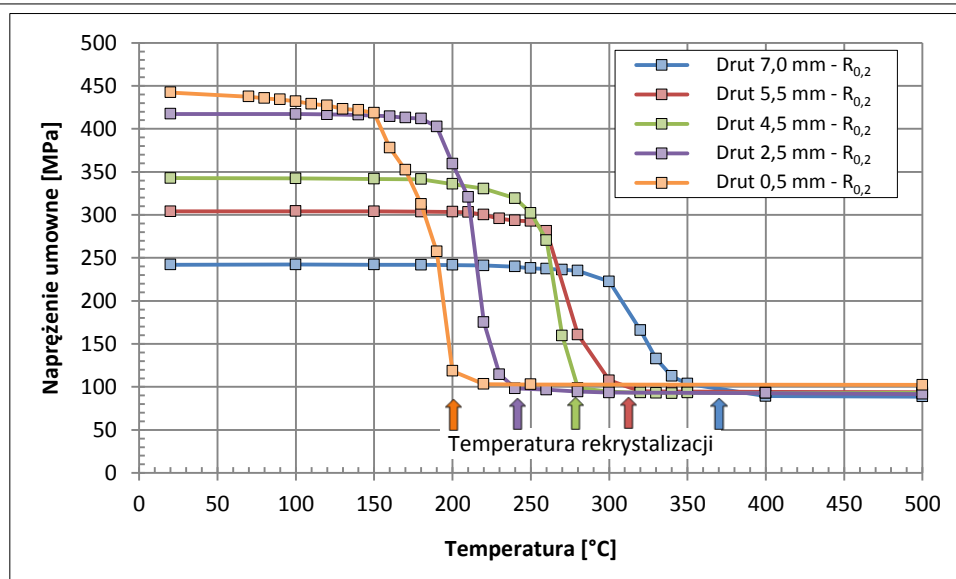
Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych nad obróbką cieplną drutów z dwóch gatunków miedzi o średnicach 7,0 mm; 5,5 mm; 4,5 mm; 2,5 mm oraz 0,5 mm w zakresie temperatur wyszczególnionych w tabeli 9.3.14 wyznaczono wartości granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$ . Ilustrację graficzną stanowią wykresy klasycznych krzywych mięknięcia przedstawiające oddzielnie dla drutów uzyskanych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod na rysunku 9.3.61 oraz dla drutów otrzymanych z prętów z technologii Upcast i Rautomead odpowiednio na rysunkach 9.3.62 i 9.3.63 zakresy naprężenia umownego odpowiadającego granicy plastyczności. W dolnej części wykresów w sposób schematyczny zaznaczono wartości temperatur rekrytalizacji materiałów. Dane liczbowe do konstrukcji charakterystyk zamieszczono w aneksie w tabelach A9.3.3 – A9.3.5.



Rys. 9.3.61. Granica plastyczności drutów o średnicach 7,0 – 0,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



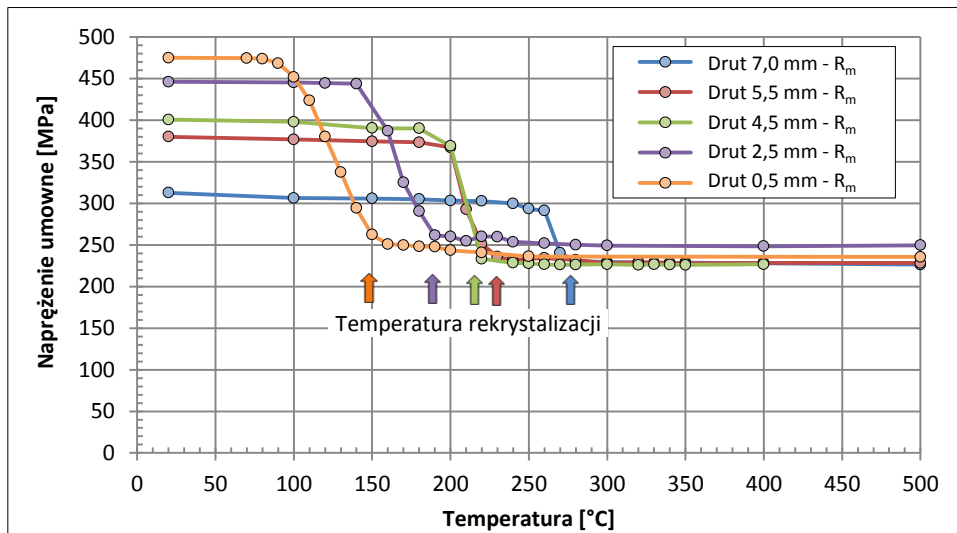
Rys. 9.3.62. Granica plastyczności drutów o średnicach 7,0 – 0,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



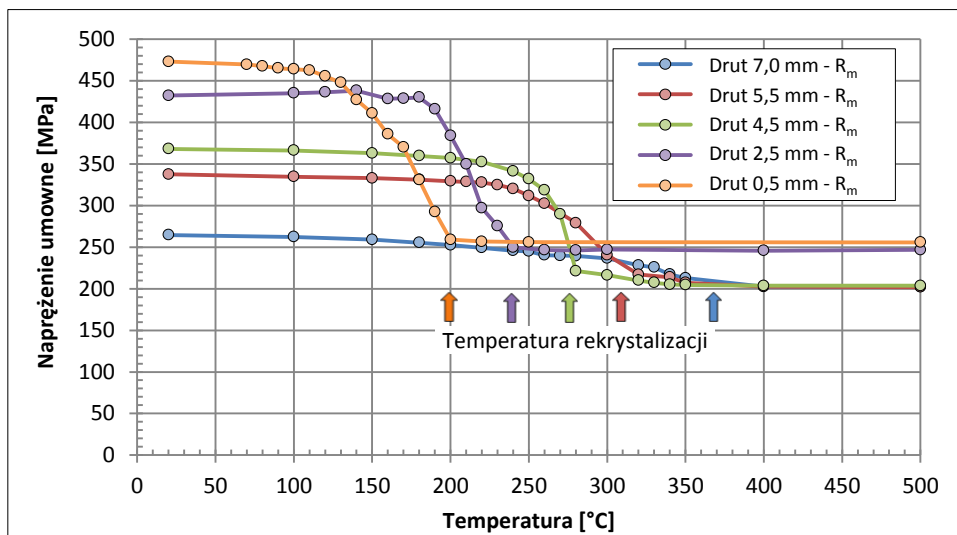
Rys. 9.3.63. Granica plastyczności drutów o średnicach 7,0 – 0,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Rautomead w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

Analiza powyższych charakterystyk pozwoliła na stwierdzenie, iż o kształcie krzywych mięknięcia decyduje, w pierwszej kolejności – wielkość umocnienia odkształceniowego (tj. średnica drutu) oraz co najważniejsze – rodzaj materiału wsadowego do procesu ciągnięcia. Zauważono, iż w przypadku drutów uzyskanych z miedzi w gatunku Cu-ETP (por. rys. 9.3.61) temperatura rekrytalizacji zmieniła się z wartości 150 °C zanotowanej dla drutu o średnicy 0,5 mm do wartości 280 °C odpowiadającej materiałowi o średnicy finalnej 7,0 mm. Natomiast temperaturowy zakres mięknięcia w odniesieniu do zmiany wartości granicy plastyczności dla poszczególnych drutów zmienił się od wartości 50 °C dla drutów o średnicy 0,5 mm do 30 °C w przypadku drutów o największej średnicy – 7,0 mm. Odmienną sytuację zaobserwowano w przypadku analizy krzywych mięknięcia drutów otrzymanych z prętów z miedzi beztlenowej z technologii Upcast i Rautomead (por. rys. 9.3.62, 9.3.63). Temperatura rekrytalizacji drutów zmienia się od wartości około 200 °C dla drutów o średnicy 0,5 mm do wartości około 370 °C – odnotowanej dla materiału o średnicy 7,0 mm. Stwierdzono zatem, iż zanotowane dla drutów z miedzi beztlenowej wartości temperatur rekrytalizacji są średnio o około 70 °C wyższe w porównaniu z wartościami typowymi dla miedzi w gatunku Cu-ETP. Obserwacje te pozostają w zgodzie ze stwierdzonymi wcześniej obserwacjami opisanymi w podrozdziale 9.3.1 niniejszej pracy. Ponadto w przypadku miedzi beztlenowej zanotowany temperaturowy zakres mięknięcia – w odniesieniu do zmiany wartości granicy plastyczności dla poszczególnych drutów z miedzi beztlenowej – jest wyższy niż w przypadku materiału w gatunku Cu-ETP i zmienia się od wartości około 60 °C dla drutów o średnicy 0,5 mm do 120 °C w przypadku drutów o największej średnicy tj. 7,0 mm.

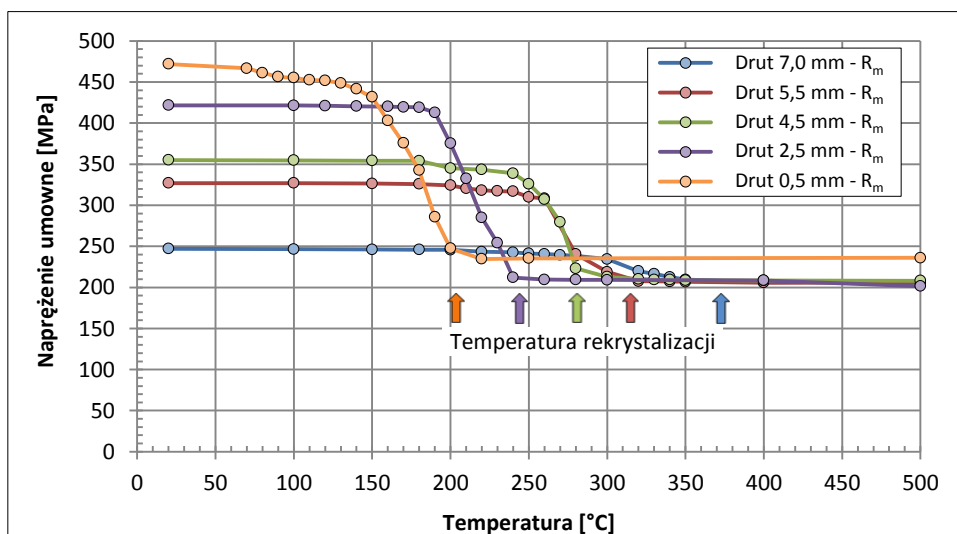
Kolejna obserwacja związana z krzywymi zilustrowanymi na rysunkach 9.3.61 – 9.3.63 dotyczy kinetyki wyżarzania materiałów. Ich szczegółowa analiza pozwala na stwierdzenie, iż zwłaszcza dla drutów o większych średnicach tj. o mniejszym stopniu umocnienia odkształceniowego krzywe mięknięcia posiadają dwa zakresy zmiany granicy plastyczności. Pierwszy charakteryzujący się mniejszym spadkiem wartości  $R_{0,2}$  w funkcji temperatury wygrzewania, który można tłumaczyć jako efekt zdrowienia struktury oraz drugi zakres wykazujący już gwałtowny spadek wartości granicy plastyczności – właściwy dla procesu rekrytalizacji. Zauważa się również, że im większa wielkość odkształcenia tym mniejszy jest udział w krzywej mięknięcia fragmentu łagodnego spadku  $R_{0,2}$ . Powyższą obserwację można tłumaczyć wpływem rodzaju struktury materiału wsadowego. Struktura odlewnicza prętów z miedzi beztlenowej powstała w procesie Upcast lub Rautomead charakteryzuje się mniejszą sumaryczną ilością granic ziaren w stosunku do walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP o drobnoziarnistej budowie, które jak wiadomo decydują o skłonności materiału do procesów rekrytalizacji. Podobne obserwacje można potwierdzić na podstawie analizy charakterystyk zmian wytrzymałości na rozciąganie w funkcji temperatury wygrzewania, które zostały przedstawione na kolejnych rysunkach 9.3.64 – 9.3.66.



Rys. 9.3.64. Wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 7,0 – 0,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Controd w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

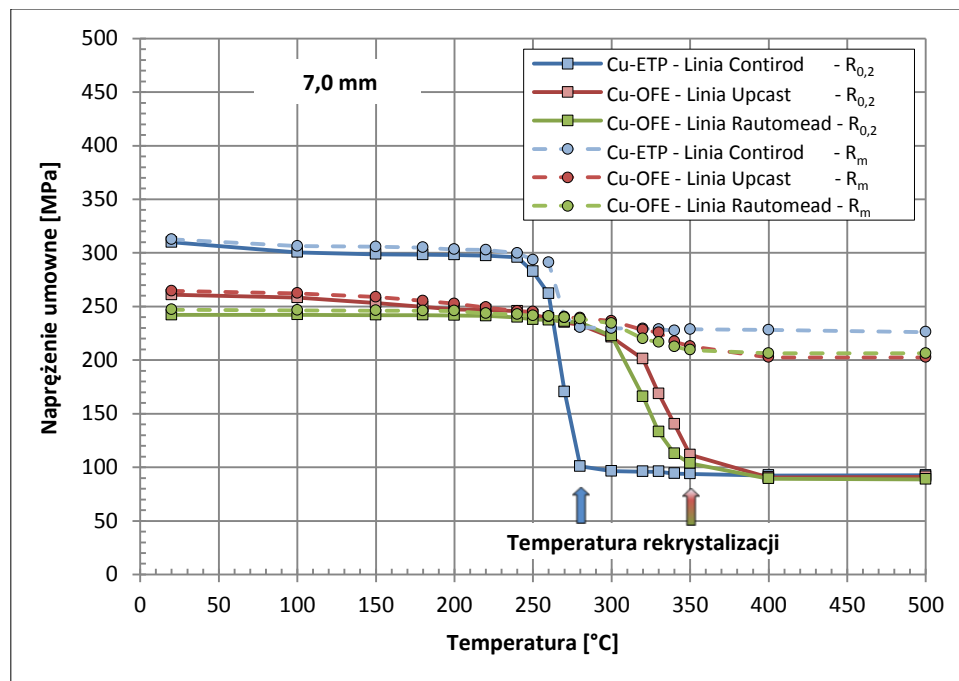


Rys. 9.3.65. Wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 7,0 – 0,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

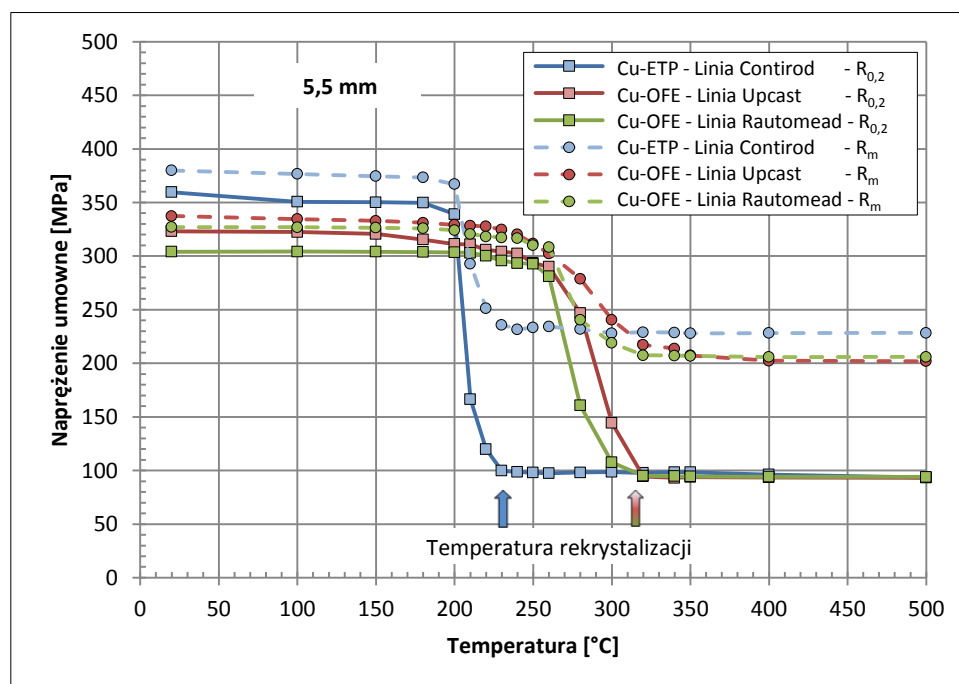


Rys. 9.3.66. Wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 7,0 – 0,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Rautomead w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

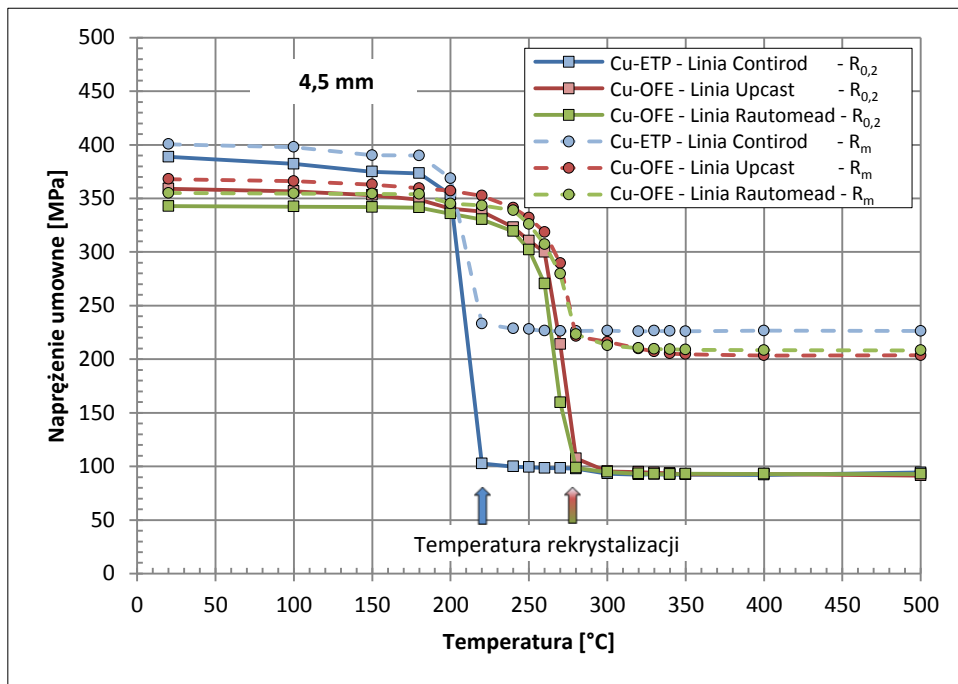
Także i w tym przypadku analizując przebiegi zmian własności wytrzymałościowych drutów z miedzi tlenowej i beztlenowej w funkcji temperatury wygrzewania zaobserwowano dwuzakresowy charakter krzywych mięknięcia. Podsumowanie przedstawionych na powyższych wykresach zróżnicowanych przebiegów charakterystyk mięknięcia dotyczących własności wytrzymałościowych badanych materiałów stanowią przestawione na rysunkach 9.3.67 – 9.3.71 krzywe dla drutów o tych samych średnicach, ale uzyskanych z różnych materiałów wsadowych.



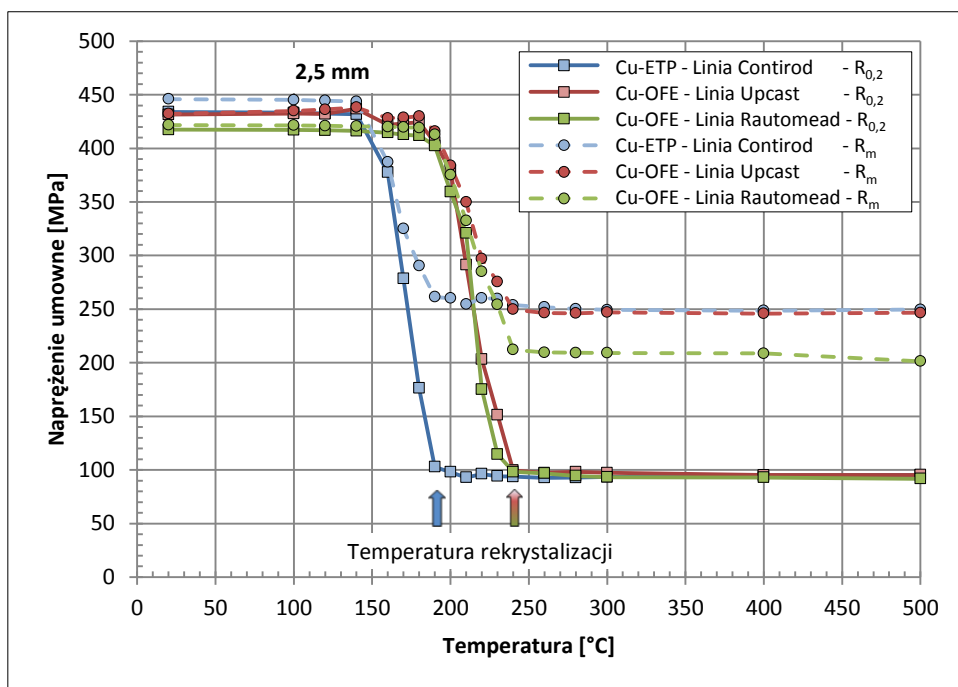
Rys. 9.3.67. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 7,0 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.3.68. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 5,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

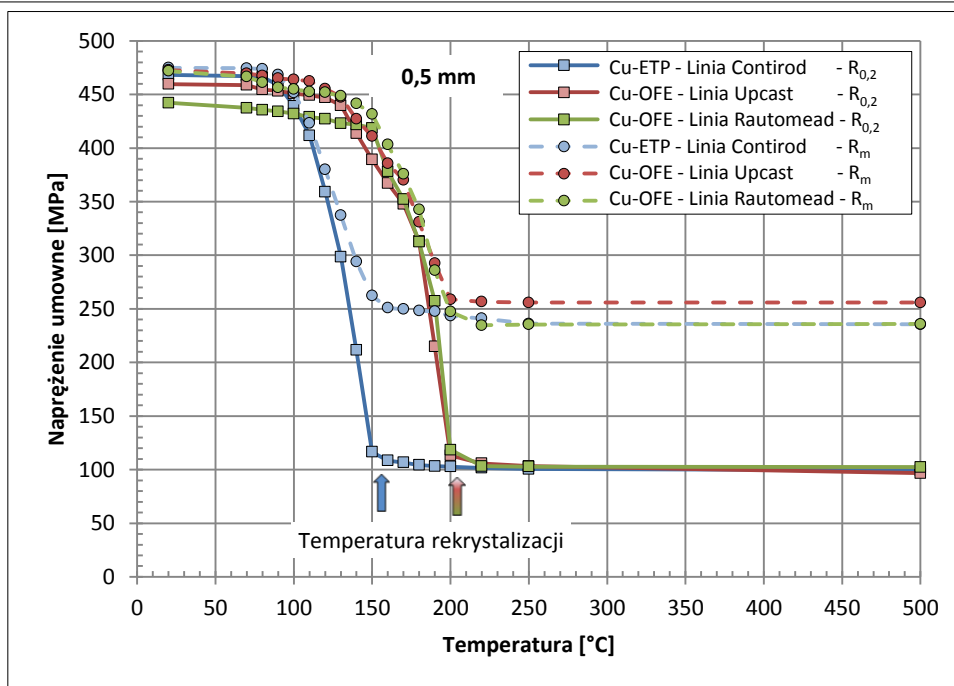


Rys. 9.3.69. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 4,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



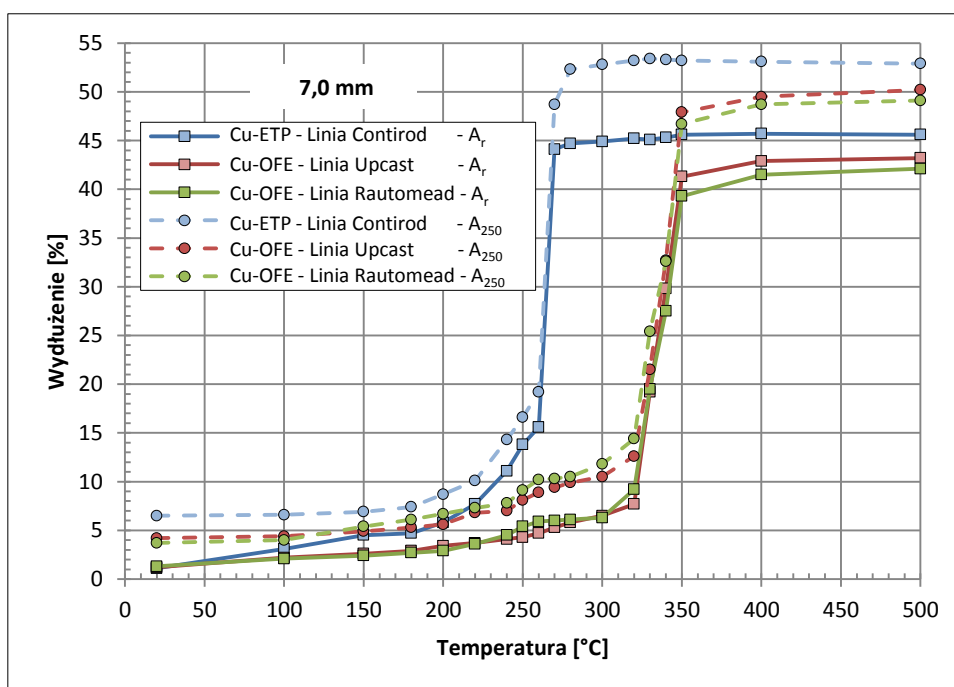
Rys. 9.3.70. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



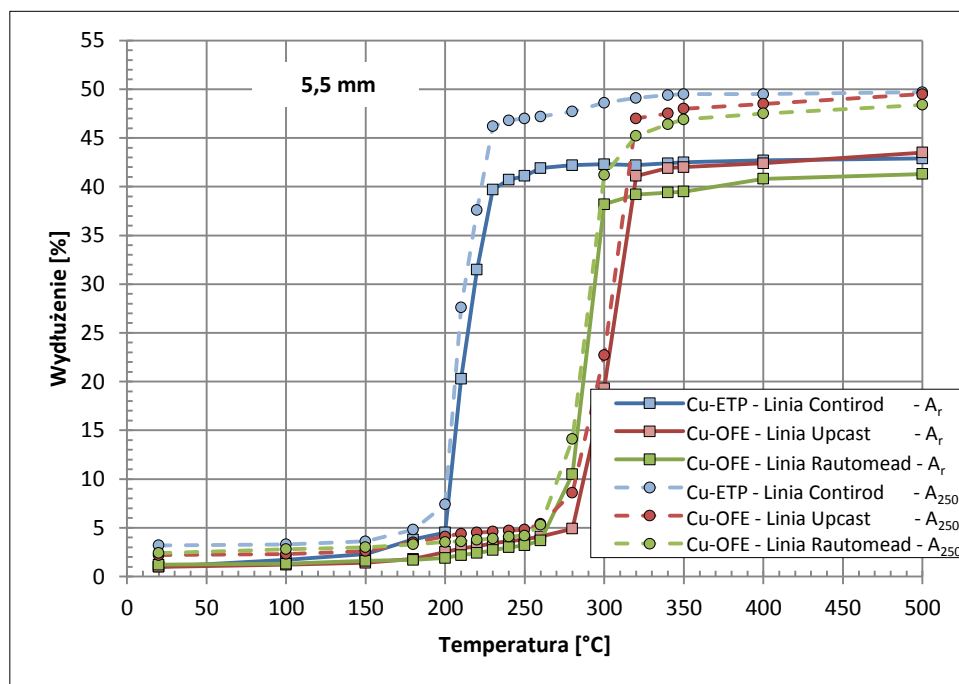


Rys. 9.3.71. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 0,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

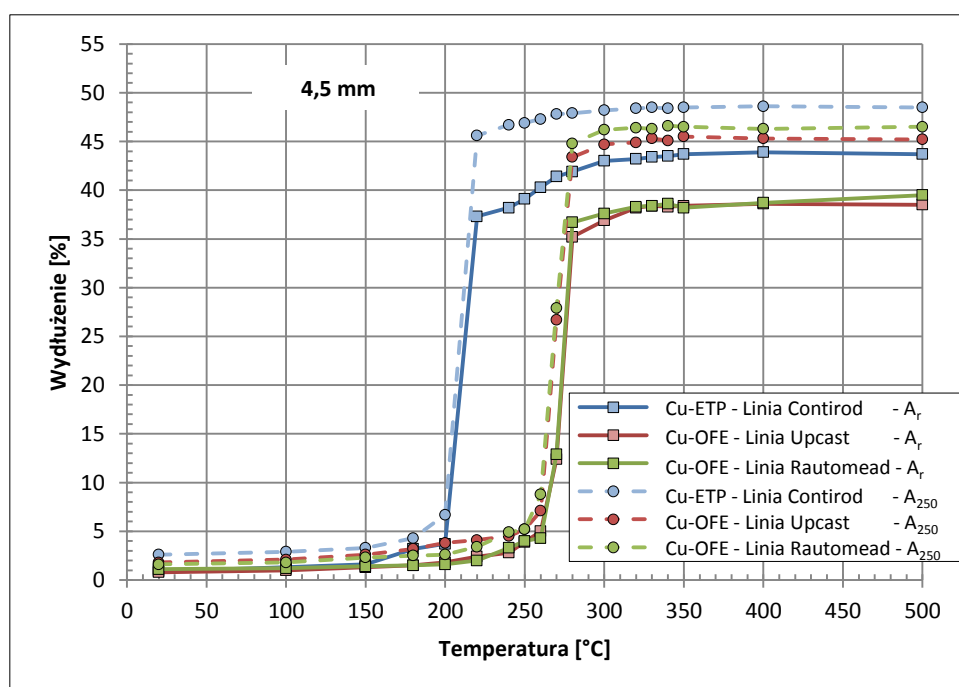
Wpływ rodzaju materiału wsadowego do procesu ciągnięcia na kinetykę wyżarzania drutów ujawnił się również w przypadku analizy własności plastycznych materiałów tj. zmiany ich wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$ . Charakterystyki te w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania zostały zilustrowane – podobnie jak poprzednio – oddzielnie dla drutów o poszczególnych średnicach na rysunkach od 9.3.72 do 9.3.76.



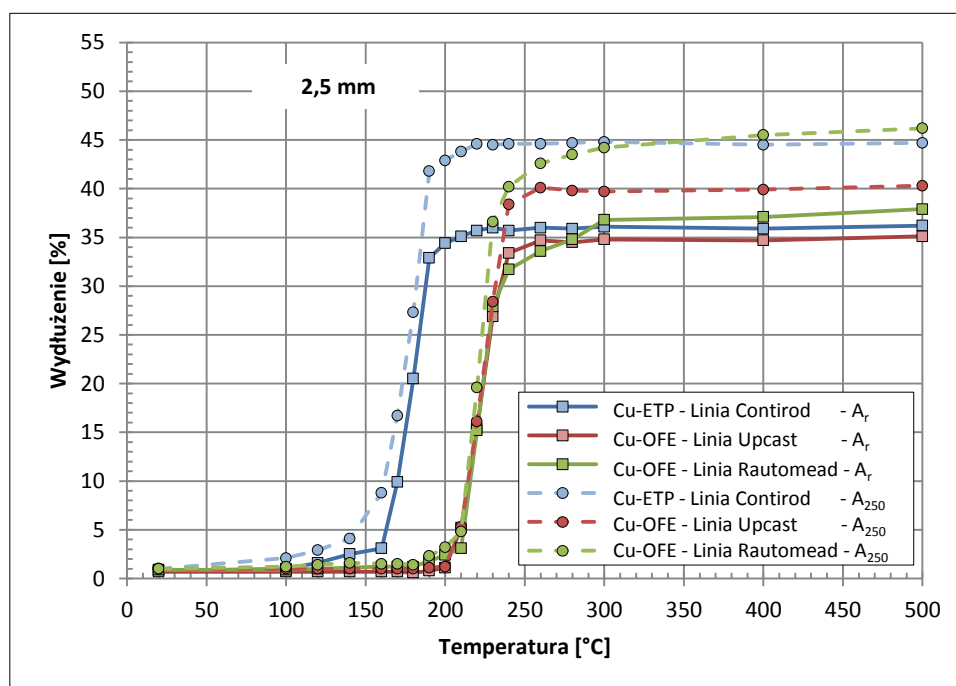
Rys. 9.3.72. Wydłużenie równomierne i wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 7,0 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



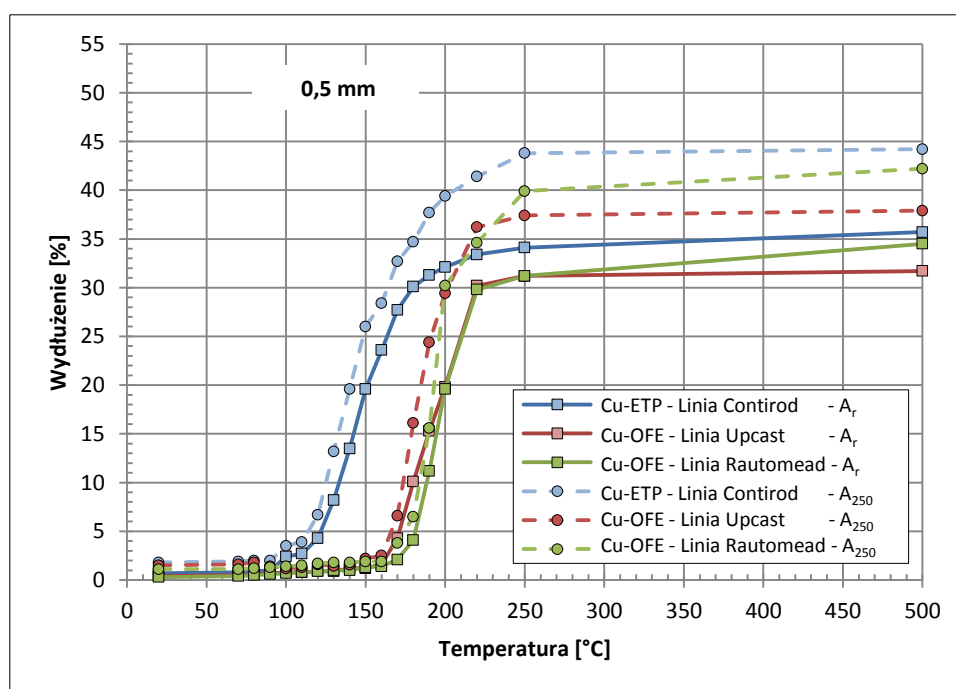
Rys. 9.3.73. Wydłużenie równomierne i wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 5,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.3.74. Wydłużenie równomierne i wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 4,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.3.75. Wydłużenie równomierne i wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.3.76. Wydłużenie równomierne, wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 0,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

Na podstawie przeprowadzonych badań obróbki cieplnej drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE oraz ich wstępnej analizy, w dalszym etapie pracy wyznaczone zostały charakterystyczne dla procesu rekrytalizacji punkty w odniesieniu do dwóch gatunków materiałów. Wartości temperatury początku rekrytalizacji, temperatury rekrytalizacji połówkowej i temperatury końca rekrytalizacji

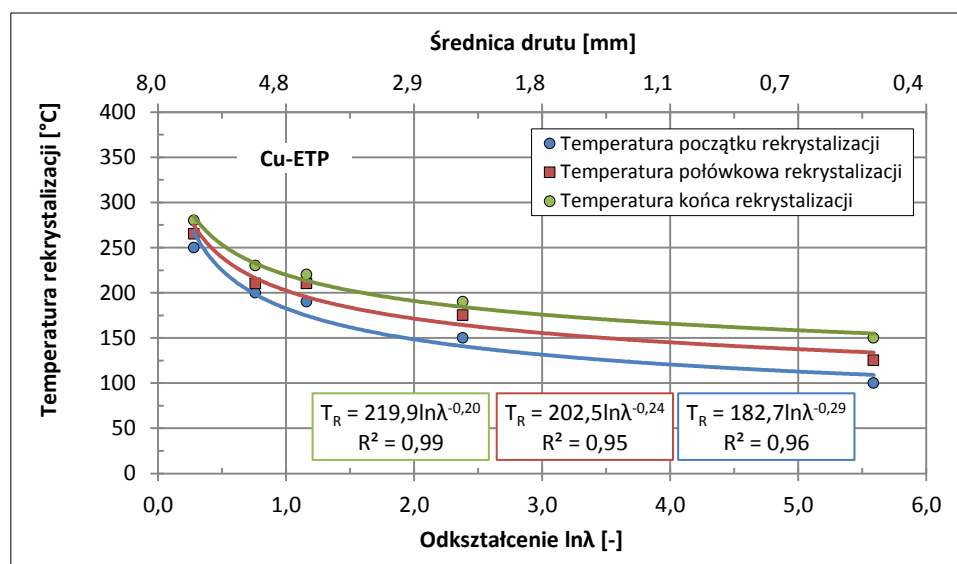
przedstawiono w tabeli 9.3.15. Z uwagi na fakt, iż dla drutów z miedzi beztlenowej otrzymanych z prętów z procesu Upcast i Rautomead zanotowano bardzo zbliżone wartości temperatur rekrytalizacji, w tabeli podano wartości uśrednione, wspólne dla obu materiałów.

Tabela 9.3.15. Wartości temperatur rekrytalizacji drutów o średnicach 7,0 – 0,5 mm uzyskanych otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead w teście jednogodzinnego wygrzewania

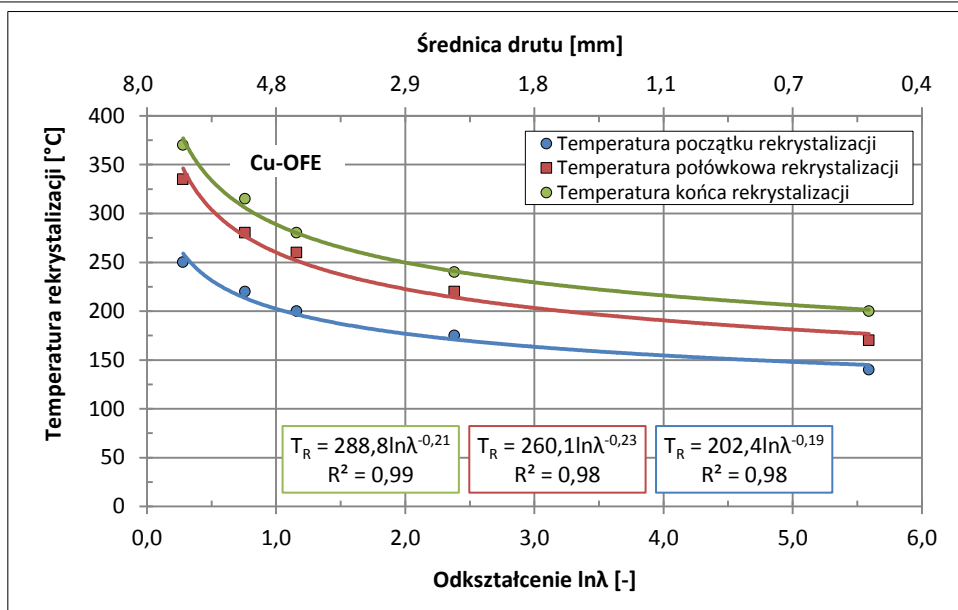
Gatunek miedzi	Linia technologiczna	Średnica drutu	Odształcenie rzeczywiste	Temperatura początku rekrytalizacji	Temperatura połówkowa rekrytalizacji	Temperatura końca rekrytalizacji	Temperaturowy zakres mięknięcia
		[mm]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Cu-ETP	Contirod	7,0	0,28	250	265	280	30
		5,5	0,76	200	210	230	30
		4,5	1,16	190	210	220	30
		2,5	2,38	150	175	190	40
		0,5	5,59	100	125	150	50
Cu-OFE	Upcast, Rautomead	7,0	0,28	250	335	370	120
		5,5	0,76	220	280	315	95
		4,5	1,16	200	260	280	80
		2,5	2,38	175	220	240	65
		0,5	5,59	140	170	200	60

Na podstawie analizy danych zamieszczonych w tabeli 9.3.15 potwierdziło się wspomniane już wcześniej zróżnicowanie temperaturowych zakresów mięknięcia – większe w przypadku drutów z miedzi beztlenowej otrzymanych z prętów po procesie ciągłego odlewania metodami Upcast i Rautomead niż w przypadku drutów uzyskanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP. Zakres ten wraz ze wzrostem wielkości odształcenia umocnieniowego zmniejszył się dla miedzi beztlenowej z wartości 120 °C do wartości 60 °C, podczas gdy dla drutów z materiału Cu-ETP zanotowano jego stabilny poziom wynoszący około 40 °C.

Z kolei na rysunkach 9.3.77 i 9.3.78 zamieszczono ilustrację graficzną wpływu wielkości odształcenia drutów na wartości charakterystycznych punktów temperaturowych rekrytalizacji.



Rys. 9.3.77. Wykresy wpływu wielkości odształcenia rzeczywistego na temperaturę początku rekrytalizacji, temperaturę połówkową rekrytalizacji i temperaturę końca rekrytalizacji drutów otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.3.78. Wykresy wpływu wielkości odkształcenia rzeczywistego na temperaturę początku rekrytalizacji, temperaturę połówkową rekrytalizacji i temperaturę końca rekrytalizacji drutów otrzymanych z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead w teście jednogodzinnego wygrzewania

Zależność temperatury rekrytalizacji w funkcji wielkości odkształcenia drutów opisano matematyczną funkcją o postaci:

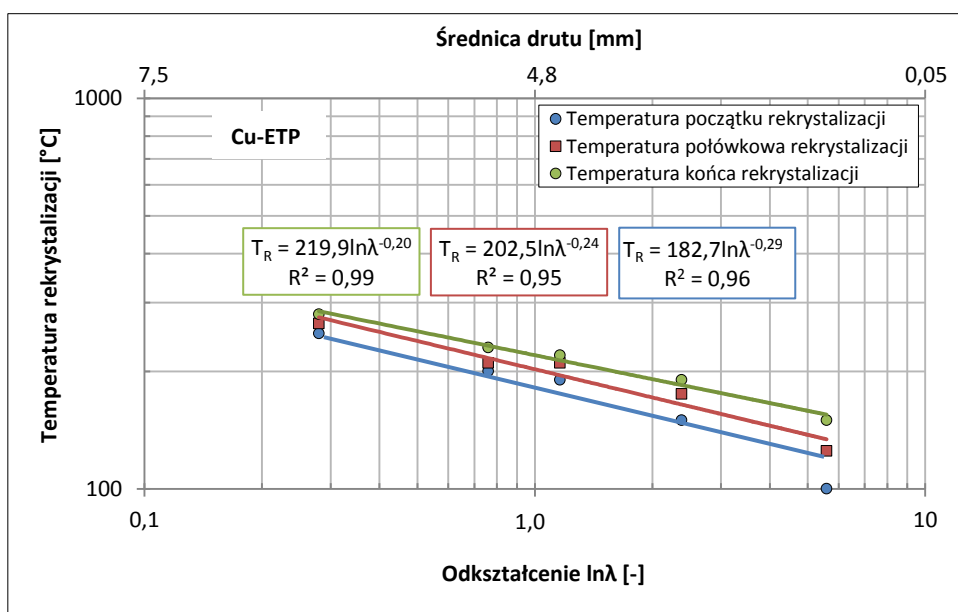
$$T_R = a(\ln\lambda)^b \quad (9.3.1)$$

gdzie:

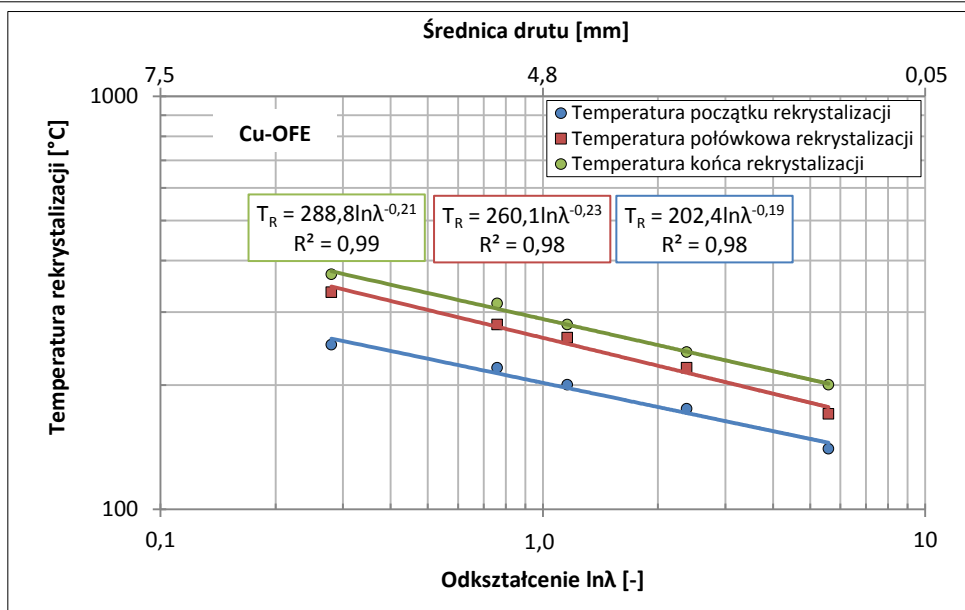
a, b – współczynniki,

$\ln\lambda$  – odkształcenie rzeczywiste.

Warto ponadto zaznaczyć, iż wyznaczone wartości (por. rys. 9.3.77, 9.3.78) dobrze opisuje funkcja potęgowa, która umożliwia linearyzację powyższych zależności, co dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE przedstawiono na ilustracjach 9.3.79 i 9.3.80.



Rys. 9.3.79. Wykresy wpływu wielkości odkształcenia rzeczywistego na temperaturę początku rekrytalizacji, temperaturę połówkową rekrytalizacji i temperaturę końca rekrytalizacji drutów otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod w teście jednogodzinnego wygrzewania – układ logarytmiczny



Rys. 9.3.80. Wykresy wpływu wielkości odkształcenia rzeczywistego na temperaturę początku rekrytalizacji, temperaturę połówkową rekrytalizacji i temperaturę końca rekrytalizacji drutów otrzymanych z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead w teście jednogodzinnego wygrzewania – układ logarytmiczny

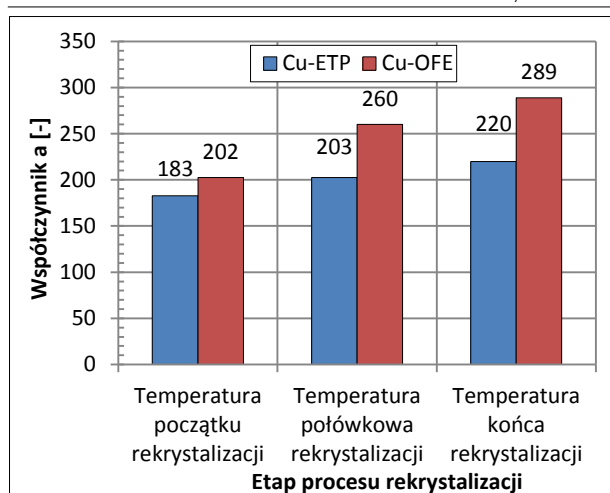
Na podstawie analizy współczynników funkcji opisujących charakterystyki przedstawione na rysunkach 9.3.79 i 9.3.80 zauważono, że w przypadku drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP spadek temperatury rekrytalizacji w funkcji wielkości odkształcenia we wszystkich trzech przypadkach – tj. dla temperatury początku rekrytalizacji, temperatury połówkowej rekrytalizacji i temperatury końca rekrytalizacji charakteryzuje się taką samą dynamiką. Świadczy o tym równoległość wymienionych krzywych, lub mówiąc inaczej taki sam kąt nachylenia krzywych. Co prawda, w przypadku relacji reprezentującej zależność temperatury rekrytalizacji połówkowej w funkcji wielkości odkształcenia rzeczywistego (por. krzywa oznaczona kolorem czerwonym na rys. 9.3.79) kąt nachylenia krzywej odbiega od pozostałych, jednakże należy to utożsamiać z dokładnością wyznaczenia wartości temperatury rekrytalizacji połówkowej. Zaobserwowane zjawisko polegające na tym, że krzywe reprezentujące temperaturę początku i końca rekrytalizacji są do siebie równoległe świadczy o tym, że wielkość odkształcenia miedzi w gatunku Cu-ETP nie wpływa istotnie na zakres jej temperatur mięknięcia. Nieco odmienna sytuacja występuje jednakże w przypadku analizy takich samych relacji dla drutów uzyskanych z miedzi beztlenowej (por. rys. 9.3.80). Dla tej grupy materiałów zaobserwowano mianowicie większy spadek temperatury początku rekrytalizacji w funkcji wielkości odkształcenia (por. krzywa oznaczona kolorem niebieskim na rys. 9.3.80), co można tłumaczyć istotnym wpływem wielkości ziarna na inicjowanie procesów odnowy struktury.

Kontynuację omawianej problematyki stanowią zamieszczone w tabeli 9.3.16 wartości współczynników równań opisujących wykresy zależności temperatury rekrytalizacji od wielkości odkształcenia rzeczywistego.

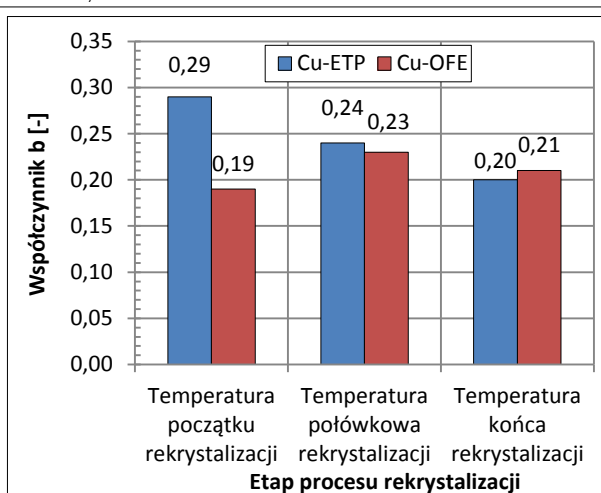
Tabela 9.3.16. Wartości współczynników równań opisujących zależności temperatury rekrytalizacji od wielkości odkształcenia rzeczywistego dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Gatunek miedzi	Linia technologiczna	Temperatura początku rekrytalizacji		Temperatura połówkowa rekrytalizacji		Temperatura końca rekrytalizacji	
		a	b	a	b	a	b
Cu-ETP	Contirod	182,7	0,29	202,5	0,24	219,9	0,20
Cu-OFE	Upcast, Rautomead	202,4	0,19	260,1	0,23	288,8	0,21

Ilustrację graficzną przedstawionych powyżej w tabeli 9.3.16 wartości stanowią relacje zilustrowane na rysunkach 9.3.81 i 9.3.82.

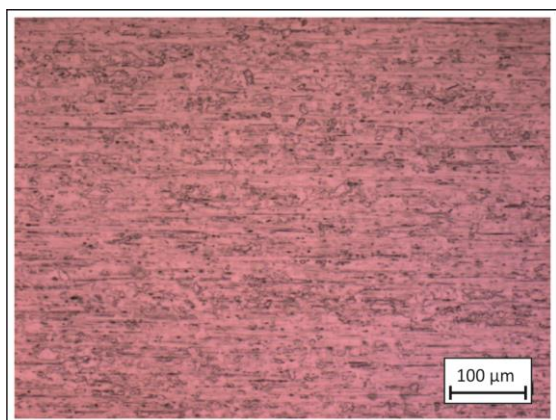


Rys. 9.3.81. Relacje ilustrujące wartości współczynnika  $a$  równań opisujących zależności temperatury rekrytalizacji od wielkości odkształcenia rzeczywistego dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

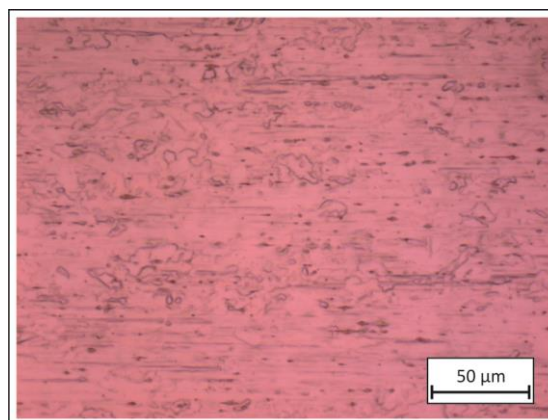


Rys. 9.3.82. Relacje ilustrujące wartości współczynnika  $b$  równań opisujących zależności temperatury rekrytalizacji od wielkości odkształcenia rzeczywistego dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Głównym źródłem obserwowanych różnic w podatności do rekrytalizacji badanych materiałów jest ich zróżnicowanie strukturalne (por. rys. 9.2.30 – 9.2.43 w podrozdziale 9.2). Na rysunkach 9.3.83 i 9.3.84 przedstawiono wyniki badań mikrostruktury drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE o średnicach 0,5 mm po poddaniu materiałów zabiegom obróbki cieplnej w czasie jednogodzinnego testu w temperaturach odpowiadających ich rekrytalizacji połówkowej tj. dla miedzi w gatunku Cu-ETP – 125 °C, natomiast dla miedzi beztlenowej w temperaturze 170 °C.



Rys. 9.3.83. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu z miedzi w gatunku Cu-ETP o średnicy 0,5 mm po procesie wygrzewania w temperaturze 125 °C w czasie 1 h. Mikroskop świetlny



Rys. 9.3.84. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu z miedzi w gatunku Cu-OFE o średnicy 0,5 mm po procesie wygrzewania w temperaturze 170 °C w czasie 1 h. Mikroskop świetlny

Analiza zamieszczonych na rysunkach 9.3.83 i 9.3.84 mikrostruktur przekrojów wzdłużnych drutów o średnicach 0,5 mm wskazała na występującą w dalszym ciągu większą ilość ziaren zrekrystalizowanych w materiale w gatunku Cu-ETP.

Podsumowując przeprowadzoną w ramach podrozdziału 9.3.3 analizę odporności cieplnej drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP pod kątem wpływu umocnienia odkształceniowego należy zaznaczyć, iż jest to jeden ze sposobów dokonania charakterystyki porównawczej badanych materiałów. Podkreślając zróżnicowanie strukturalne drutów przekładające się w sposób bezpośredni na otrzymane wartości temperatur rekrytalizacji kontynuację tego podejścia stanowiły badania ukierunkowane na określenie wpływu zmiennych parametrów procesu odlewania materiału wsadowego, a w szczególności prędkości odlewania i wydatku wody chłodzącej krystalizator na zachowanie drutów podczas procesu rekrytalizacji. Tej tematyce poświęcone zostały dwa kolejne podrozdziały pracy – 9.3.4 i 9.3.5, które dodatkowo oprócz materiałów otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi beztlenowej otrzymanych metodą

Upcast i Rautomead dotyczą także drutów otrzymanych z prętów z laboratoryjnej linii DCC-AGH.

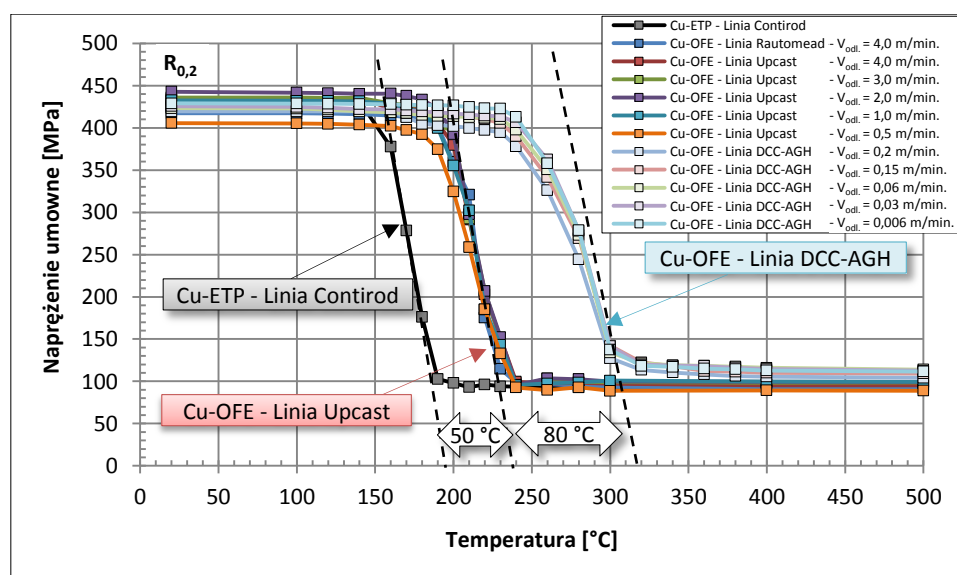
### 9.3.4. Analiza wpływu prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na temperaturę rekrytalizacji drutów

Celem niniejszej części badań doświadczalnych było określenie wpływu, jaki wywiera na strukturę, a w związku z tym na własności drutów zmiana warunków krystalizacji materiału wsadowego w procesie ciągłego odlewania. Analiza realizowana była w oparciu o druty uzyskane z prętów z miedzi beztlenowej z technologii ciągłego odlewania metodą Upcast i Rautomead oraz laboratoryjnej technologii DCC-AGH. Jak przedstawiono w poprzednich etapach niniejszej dysertacji charakterystyka wymienionych sposobów pozwala na ich realizację w sposób ciągły i przy zastosowaniu zarówno zmiennej prędkości odlewania, jak i wydatku wody chłodzącej krystalizator. Jak wykazano we wcześniejszych etapach pracy powyższe parametry mają wpływ na przebieg krystalizacji ciekłego metalu. Zatem analizowane w ramach podrozdziału 9.3.4 wyniki badań miały na celu umożliwienie ujawnienia różnic w strukturach oraz własnościach materiałów otrzymywanych przy zastosowaniu zróżnicowanych prędkości odlewania, a także zdolności do dziedziczenia przez druty cech materiału wsadowego. Podobnie jak poprzednio, dla celów porównawczych przeprowadzono takie same badania dla drutów uzyskanych z tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne walcówki z miedzi w gatunku ETP z linii Contirod, których wyniki zostały potraktowane jako punktu odniesienia.

W pierwszym etapie badań doświadczalnych wykorzystanych zostało 12 rodzajów drutów o średnicach 2,5 mm, które otrzymane zostały w wyniku procesu przetwórstwa plastycznego na zimno walcówki i prętów, a następnie poddaniu ich zabiegom obróbki cieplnej w zakresie temperatur od 20 °C do 500 °C. Jak wcześniej nadmieniono materiałami wsadowymi była zarówno walcówka z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz pręty z miedzi beztlenowej uzyskane zarówno w warunkach laboratoryjnych na stanowisku DCC-AGH – gdzie prędkość odlewania wynosiła: 0,006 m/min.; 0,03 m/min.; 0,06 m/min.; 0,15 m/min.; 0,2 m/min.; jak i przemysłowych według technologii Upcast i Rautomead przy szybkościach odlewania: 0,5 m/min.; 1,0 m/min.; 2,0 m/min.; 3,0 m/min.; 4,0 m/min.

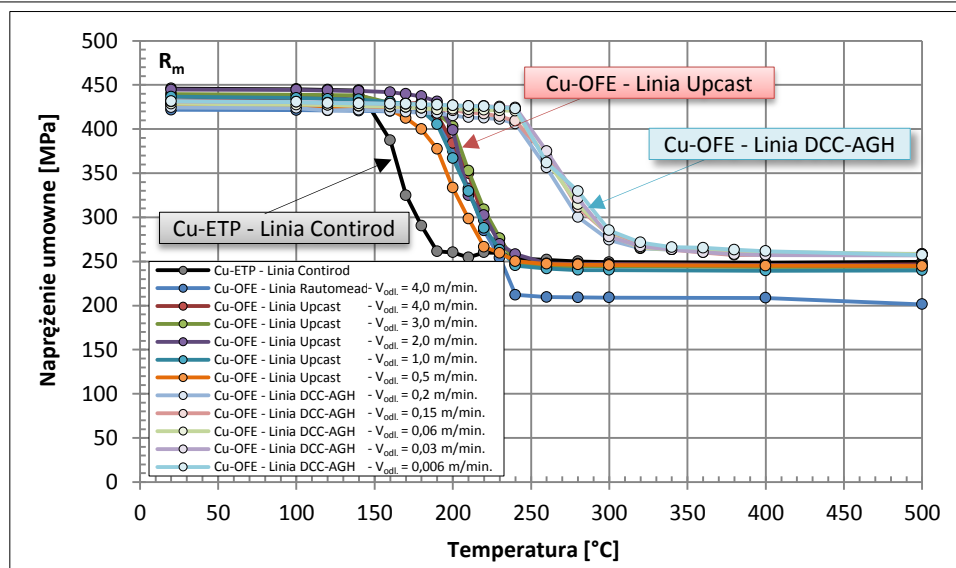
Zasadniczym celem badań doświadczalnych było wyznaczenie wartości temperatur rekrytalizacji drutów. W związku z powyższym dla materiałów po zabiegach wygrzewania, podobnie jak poprzednio skonstruowano klasyczne krzywe mięknięcia. Dane liczbowe do ich konstrukcji zamieszczono w aneksie w tabelach A9.3.1, A9.3.5 – A9.3.7.

Analizę rozpoczęto od przedstawienia na rysunkach 9.3.85 i 9.3.86 własności mechanicznych (granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie) materiałów w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania.



Rys. 9.3.85. Granica plastyczności drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH (prędkość odlewania 0,006 – 0,2 m/min., przepływ wody chłodzącej w układzie pierwotnym 0,1 – 0,5 l/min. i wtórnym 0,2 – 1,0 l/min.), Upcast i Rautomead (prędkość odlewania 0,5 – 4,0 m/min., przepływ wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania





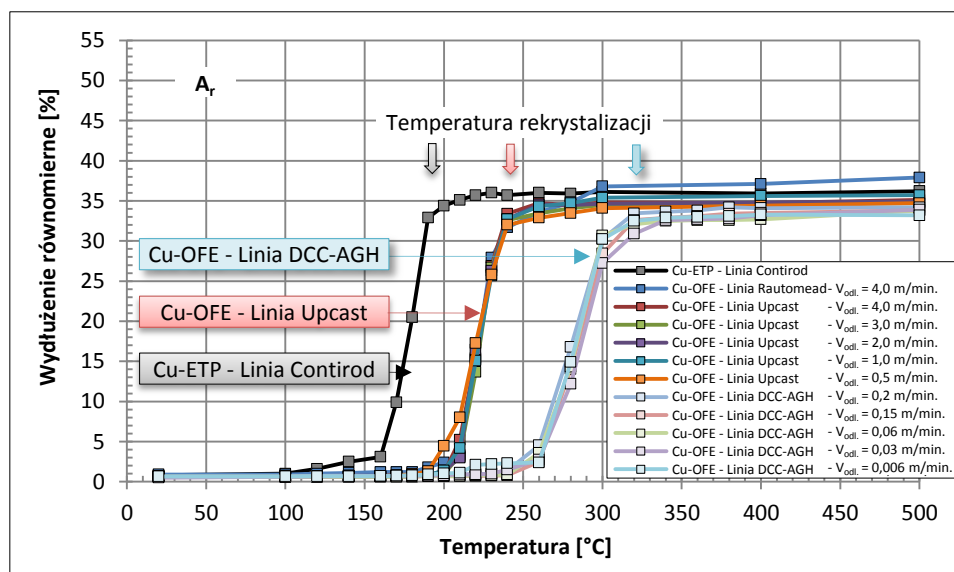
Rys. 9.3.86. Wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH (prędkość odlewania 0,006 – 0,2 m/min., przepływ wody chłodzącej w układzie pierwotnym 0,1 – 0,5 l/min. i wtórnym 0,2 – 1,0 l/min.), Upcast i Rautomead (prędkość odlewania 0,5 – 4,0 m/min., przepływ wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

Pierwszą istotną obserwacją płynącą z analizy zilustrowanych na rysunkach 9.3.85 i 9.3.86 krzywych mięknięcia jest ważna różnica w temperaturze rekrystalizacji pomiędzy drutami uzyskanymi z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP o początkowej drobnoziarnistej strukturze po procesie walcowania na gorąco w linii Contirod oraz drutami z miedzi beztlenowej otrzymanymi z prętów charakteryzujących się strukturą odlewniczą wykształconą w procesie ciągłego odlewania metodą Upcast, Rautomead lub DCC-AGH. Kolejnym nasuwającym się spostrzeżeniem jest zróżnicowanie przebiegów krzywych mięknięcia i wynikającym z nich odmiennymi wartościami temperatur rekrystalizacji dla drutów uzyskanych z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE według technologii Upcast i Rautomead oraz drutów bazujących na materiałach wsadowych z linii DCC-AGH. Zilustrowano to w sposób schematyczny na rysunku 9.3.85 w postaci przerywanych linii. I tak wyznaczone już na wcześniejszym etapie niniejszej pracy (por. podrozdział 9.3.3) temperatury rekrystalizacji drutów o średnicy 2,5 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP wynoszące 190 °C oraz dla materiałów bazujących na prętach z linii Upcast i Rautomead kształtujące się na poziomie 240 °C są niższe aniżeli wartości, którymi charakteryzują się druty uzyskane w wyniku procesu ciągnięcia prętów z linii DCC-AGH odlanych z niskimi, laboratoryjnymi prędkościami z zakresu od 0,006 m/min. do 0,2 m/min. Dla tej grupy materiałów wartości te oscylują w granicach około 320 °C. Jest to aż o 80 °C więcej w porównaniu do wartości temperatury rekrystalizacji zanotowanej dla drutów otrzymanych także z prętów z miedzi beztlenowej, ale z procesów Upcast i Rautomead przy zastosowaniu wyższych, przemysłowych prędkości, a także o 130 °C w porównaniu do materiałów z miedzi w gatunku Cu-ETP.

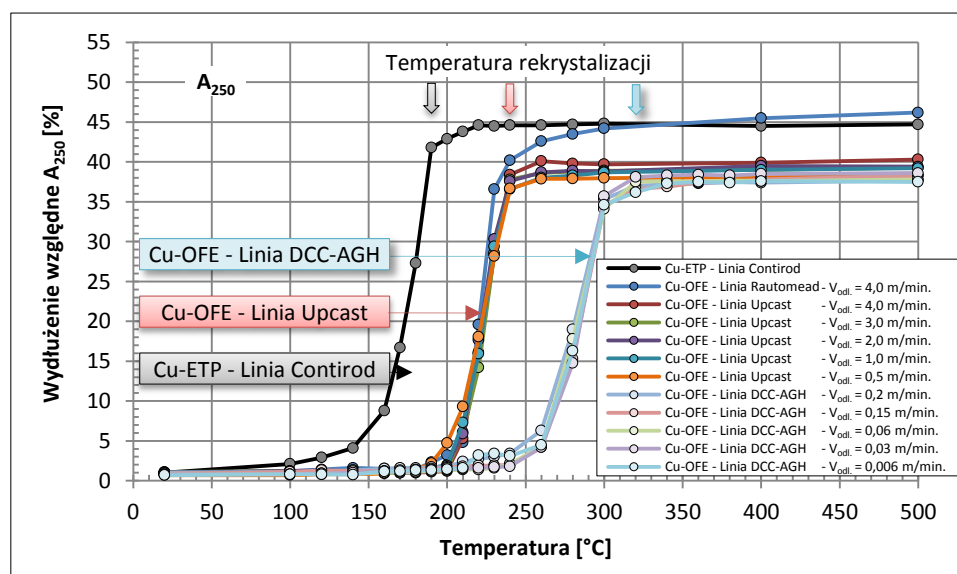
Kontynuując omawianą problematykę przeanalizowano także jak prezentują się zróżnicowane przebiegi krzywych mięknięcia badanych materiałów w postaci wykresów wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  w funkcji temperatury. Przedstawiono je na kolejnych ilustracjach 9.3.87 i 9.3.88.

Analiza zilustrowanych na rysunkach 9.3.87 i 9.3.88 wykresów zależności wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  od temperatury dla poddanych badaniom materiałów ukazała, że dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP dla zanotowanej dla nich temperatury rekrystalizacji, którą jest wartość 190 °C wydłużenie równomierne stabilizuje się i osiąga wartość około 35 %, podczas gdy wydłużenie względne  $A_{250}$  wynosi około 45 %. Z kolei dla drutów z miedzi beztlenowej w temperaturze wygrzewania wynoszącej dla materiałów bazujących na prętach z linii Upcast i Rautomead 240 °C oraz DCC-AGH – 320 °C i wywołującej odnowę struktury oraz wzrost własności plastycznych uzyskanych w procesie przeróbki plastycznej na zimno wartość wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego wynoszą odpowiednio około 35 % i 40 %. Zauważono ponadto, że druty otrzymane z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH dopiero

w wyniku ingerencji temperatury obróbki cieplnej wynoszącej około 260 °C zareagowały wzrostem własności plastycznych, podczas gdy dla materiałów uzyskanych z prętów z procesu ciągłego odlewania metodami Upcast i Rautomead wartość ta była niższa i wyniosła około 210 °C



Rys. 9.3.87. Wydłużenie równomierne drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH (prędkość odlewania 0,006 – 0,2 m/min., przepływ wody chłodzącej w układzie pierwotnym 0,1 - 0,5 l/min. i wtórnym 0,2 - 1,0 l/min.), Upcast i Rautomead (prędkość odlewania 0,5 – 4,0 m/min., przepływ wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

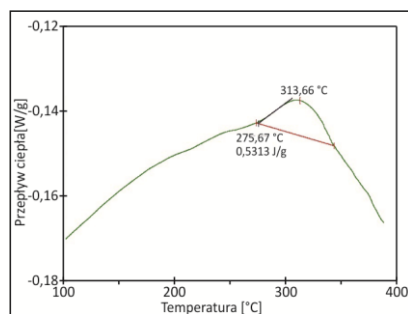


Rys. 9.3.88. Wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH (prędkość odlewania 0,006 – 0,2 m/min., przepływ wody chłodzącej w układzie pierwotnym 0,1 - 0,5 l/min. i wtórnym 0,2 - 1,0 l/min.), Upcast i Rautomead (prędkość odlewania 0,5 – 4,0 m/min., przepływ wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

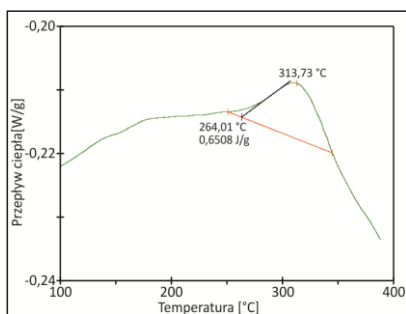
Celem potwierdzenia otrzymanych w wyniku niniejszych analiz doświadczalnych wartości temperatur rekrytalizacji drutów przeprowadzono także badania kalorymetryczne, którym poddano wytypowane próbki materiałów o średnicach 2,5 mm. W szczególności do analiz posłużyły druty uzyskane z miedzi beztlenowej z linii przemysłowej Upcast przy dwóch skrajnych prędkościach odlewania – 0,5 m/min. oraz 4,0 m/min. oraz z technologii laboratoryjnej DCC-AGH z szybkościami: 0,006 m/min.; 0,03 m/min.; 0,06 m/min.; 0,15 m/min. oraz 0,2 m/min. W tabeli 9.3.17 zamieszczono wartości temperatury początku i końca proces rekrytalizacji, których ilustrację graficzną stanowią krzywe kalorymetryczne zilustrowane na rysunkach 9.3.89 – 9.3.95.

Tabela 9.3.17. Wartości temperatur początku i końca rekrytalizacji drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH i Upcast na podstawie wyników badań kalorymetrycznych

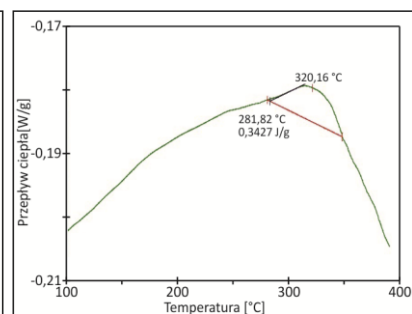
Gatunek miedzi	Linia technologiczna	Prędkość odlewania [m/min.]	Temperatura	Temperatura
			początku rekrytalizacji [°C]	końca rekrytalizacji [°C]
Cu-OFE	DCC-AGH	0,006	275,7	313,7
		0,03	264,0	313,7
		0,06	281,8	320,2
		0,15	262,1	312,1
		0,20	258,6	306,3
	Upcast	0,50	199,7	244,0
		4,00	200,2	241,2



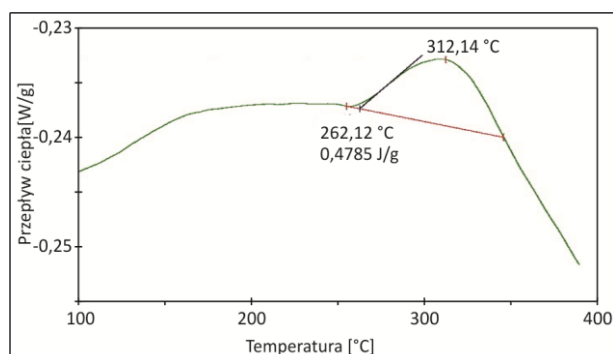
Rys. 9.3.89. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,006 m/min.



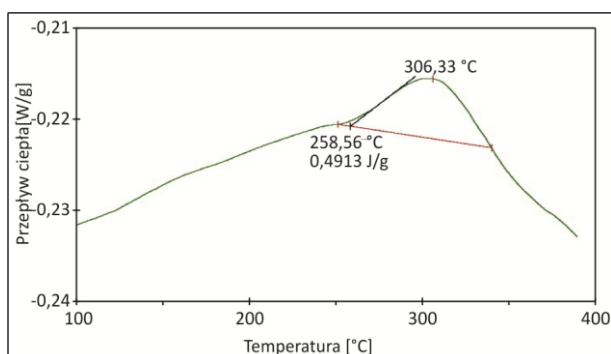
Rys. 9.3.90. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,03 m/min.



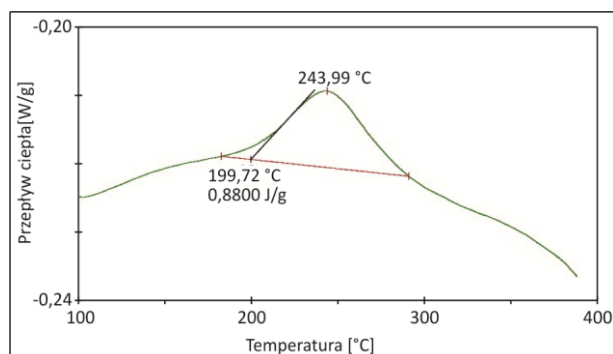
Rys. 9.3.91. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,06 m/min.



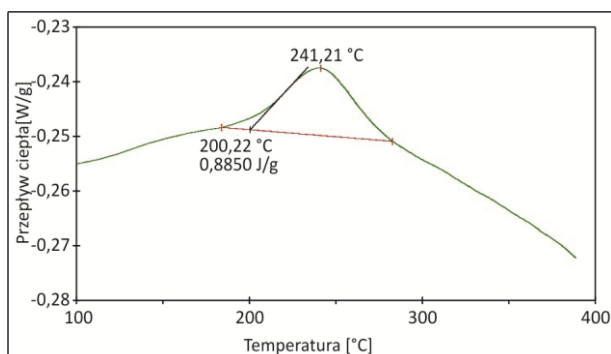
Rys. 9.3.92. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,15 m/min.



Rys. 9.3.93. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,2 m/min.



Rys. 9.3.94. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 0,5 m/min.



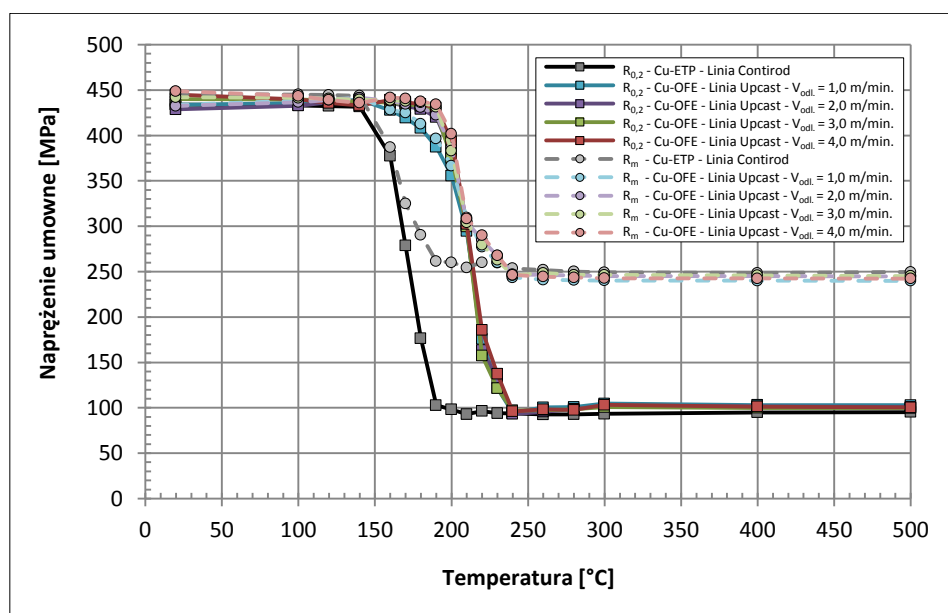
Rys. 9.3.95. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min.

Na podstawie analizy przedstawionych na rysunkach 9.3.89 – 9.3.95 wykresów zauważono, że zarówno druty z miedzi beztlenowej uzyskanej z prętów z linii Upcast, jak i z technologii DCC-AGH charakteryzują się bardzo zbliżonymi przebiegami krzywych kalorymetrycznych wykazującym jeden charakterystyczny pik. Odnotowane dla poddanych badaniom materiałów wartości temperatur rekrytalizacji (por. tabela 9.3.17) są zbliżone z tymi, które odczytane zostały w oparciu o klasyczne krzywe mięknięcia ukazane na rysunkach 9.3.85 – 9.3.88.

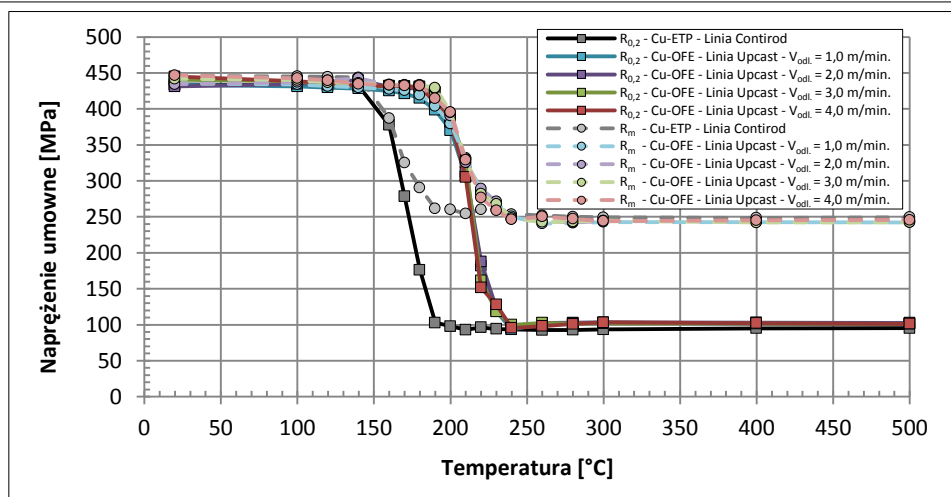
Poddając wnikliwej analizie zróżnicowane wartości temperatur rekrytalizacji zanotowanych dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE zwrócono uwagę na fakt, że wszystkie z wymienionych materiałów otrzymane zostały z tej samej katody z miedzi w gatunku Cu-CATH-1. W związku z powyższym jedna z możliwości interpretacji otrzymanych wyników mogłaby być ukierunkowana na rolę tlenu, który zasadniczo różnicuje te materiały, ale wówczas jak należałoby wyjaśnić jeszcze większą różnicę w wartościach temperatur rekrytalizacji pomiędzy drutami z otrzymanymi z prętów z miedzi beztlenowej różniących się jedynie prędkościami ich odlewania? Otóż powodem takiego stanu rzeczy są pierwotne struktury materiałów. Miedź w gatunku Cu-ETP jako materiał drobnoziarnisty, o znacznym w objętości udziale granic ziaren posiada największą ilość miejsc uprzywilejowanych do zarodkowania rekrytalizującego, natomiast materiał pochodzący z technologii laboratoryjnej DCC-AGH najmniejszą.

Kontynuując tematykę wpływu prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej na odporność cieplną drutów przeprowadzono bardziej wnikliwą analizę, której poddano grupę wytypowanych materiałów także o średnicy 2,5 mm bazujących na prętach z miedzi beztlenowej z linii Upcast otrzymanych w procesie ciągłego odlewania przy zmiennych prędkościach odlewania i stałym parametrze przepływu wody chłodzącej krystalizator. W tym celu analiza przeprowadzona została w oparciu o krzywe mięknięcia przedstawione na rysunkach 9.3.96 – 9.3.101 dla drutów uzyskanych z prętów z procesu ciągłego odlewania przy wydatku wody chłodzącej krystalizator w ilości od 40 l/min. do 60 l/min. Dane liczbowe do konstrukcji wykresów zostały zamieszczone w aneksie w tabelach A9.3.1 oraz A9.3.7 – A9.3.9.

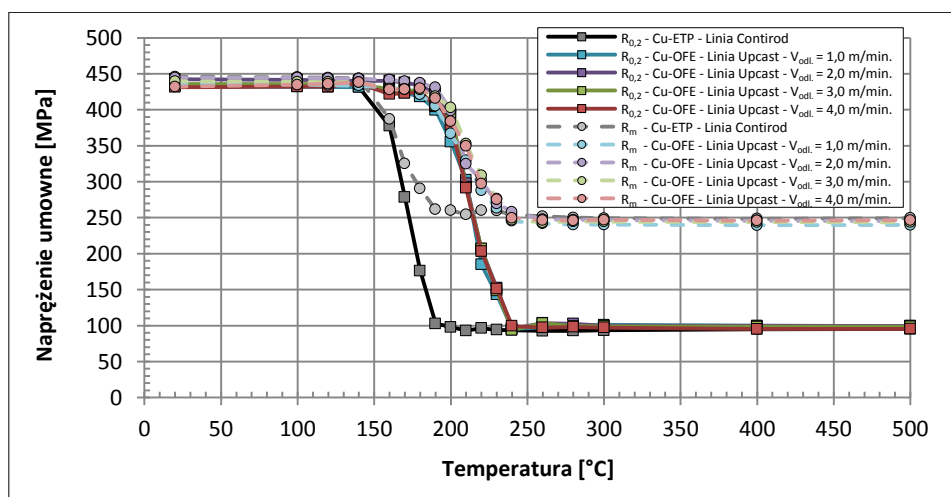
Omawiana problematyka stanowi kontynuację badań doświadczalnych omawianych w poprzednich podrozdziałach pracy, a mianowicie w podrozdziale 9.2.4 pt.: „Analiza wpływu prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na umacnianie drutów w procesie ciągnięcia”. Zatem podobnie jak poprzednio analiza rozpoczęto od obserwacji przebiegów charakterystyk zmian własności mechanicznych drutów w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania.



Rys. 9.3.96. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 – 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 40 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



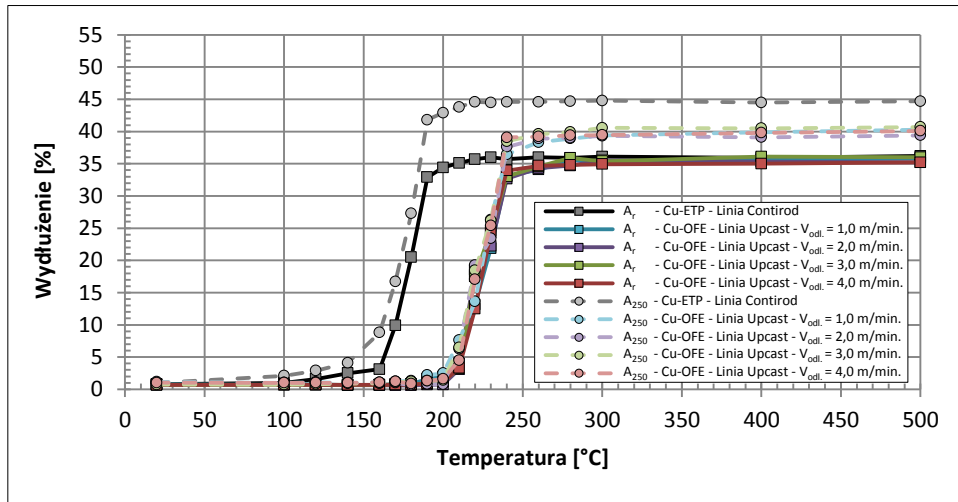
Rys. 9.3.97. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 – 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 50 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



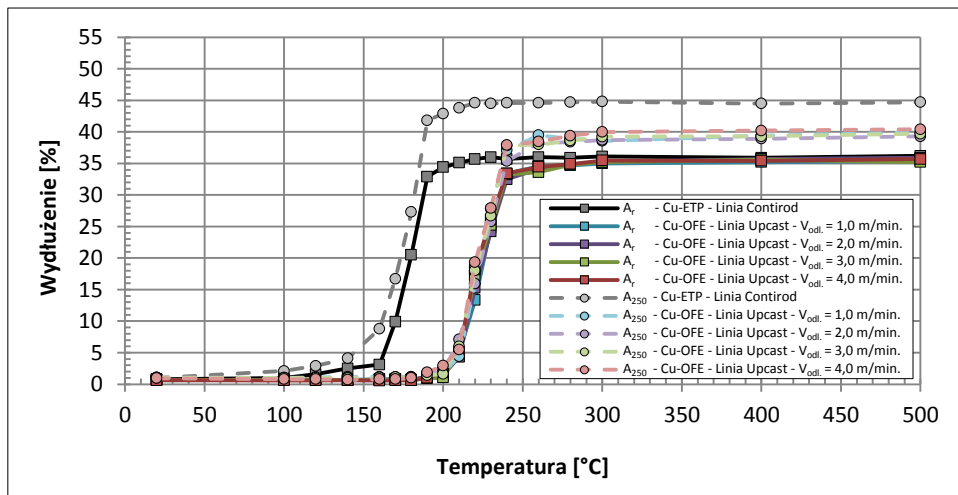
Rys. 9.3.98. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 – 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

Analizując na podstawie rysunków 9.3.96 – 9.3.98 wpływ parametrów procesu odlewania na odporność cieplną drutów z miedzi beztlenowej zauważono subtelne różnice pomiędzy materiałami polegające na odmiennej charakterystyce krzywych mięknięcia. Przykładowo zaobserwowano, że druty uzyskane z prętów odlanych z prędkością 1,0 m/min. w nieco niższych temperaturach zaczęły reagować obniżeniem własnościami wytrzymałościowymi. Zanotowane dla tego materiału wartości wytrzymałości na rozciąganie zaczęły zmniejszać się już w wyniku poddania drutów ingerencji temperatury 160 – 180 °C, podczas gdy dla materiałów otrzymanych z prętów z miedzi beztlenowej z procesu ciągłego odlewania z wyższymi prędkościami pierwsze spadki własności mechanicznych w wyniku obróbki cieplnej zaobserwowano w temperaturze 190 °C. Przebieg krzywych mięknięcia jest zatem bardziej gwałtowny dla drutów uzyskanych z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z technologii Upcast przy szybkościach odlewania od 2,0 m/min. do 4,0 m/min. Oznacza to, że różnice strukturalne prętów pochodzących z procesu ciągłego odlewania z szybkością 1,0 m/min., które ujawniono identyfikując materiały wsadowe, zachowują się w procesie przeróbki plastycznej na zimno i wpływają na przebieg krzywych mięknięcia w procesie rekrytalizacji.

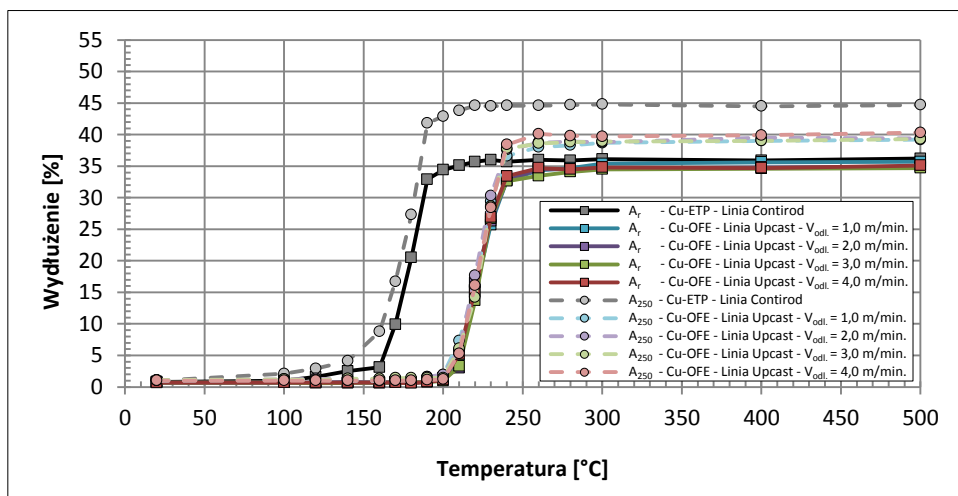
W dalszej części dysertacji analizie badanej grupy drutów poddano ich krzywe zmian własności plastycznych tj. wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania. Zilustrowano je na rysunkach 9.3.99 – 9.3.101.



Rys. 9.3.99. Wydłużenie równomierne i wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 – 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 40 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.3.100. Wydłużenie równomierne i wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 – 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 50 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.3.101. Wydłużenie równomierne i wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 – 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

Analiza zilustrowanych na rysunkach 9.3.99 – 9.3.101 charakterystyk potwierdziła wcześniejsze obserwacje o niewielkim zróżnicowaniu własności mechanicznych materiałów – w tym przypadku wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$ .

Ponadto w celu oceny podatności do wyżarzania rekrytalizującego druty otrzymane z prętów z miedzi beztlenowej z linii Upcast poddano testowi wydłużenia sprężyny. Wyniki badań doświadczalnych zamieszczono w tabeli 9.3.18.

Tabela 9.3.18. Wyniki próby wydłużenia sprężyny przeprowadzonej według normy PN-EN 12893:2002

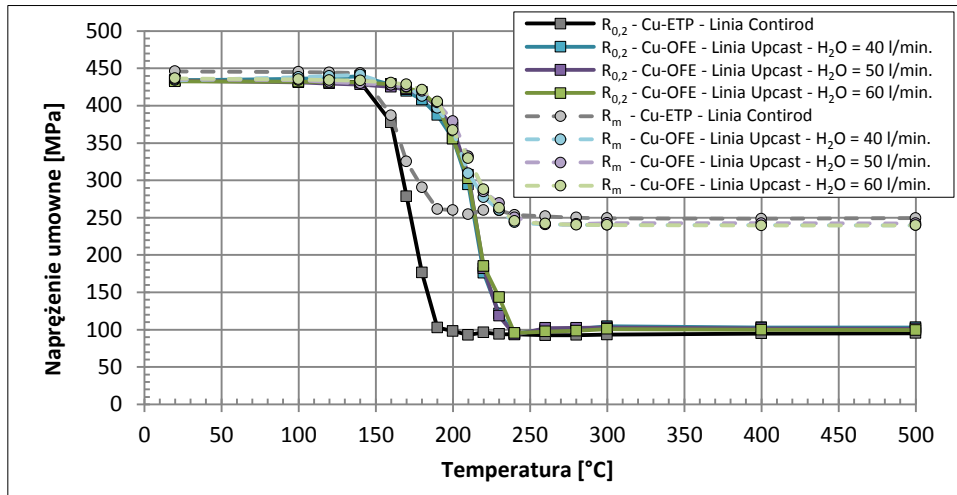
Gatunek miedzi	Linia technologiczna	Wydatek wody chłodzącej krystalizator [l/min.]	Prędkość odlewania [m/min.]	Długość sprężyny		
				Próba nr 1 [mm]	Próba nr 2 [mm]	Średnia arytmetyczna z prób [mm]
Cu-OFE	Upcast	60	1,0	250	205	228
			2,0	222	165	194
			3,0	289	172	231
			4,0	282	190	236
Cu-ETP	Contirod	-	-	470	466	468

Wyniki badań wydłużenia sprężyny zamieszczone w tabeli 9.3.18 są potwierdzeniem gorszej podatności do wyżarzania rekrytalizującego drutów uzyskanych z prętów z miedzi beztlenowej w gatunku Cu-OFE w stosunku do drutów otrzymanych po procesie ciągnięcia walcówki. Objawia się to dużo mniejszym wydłużeniem sprężyny wykonanej z tych drutów, oscylującym w okolicach 50 % wydłużenia spirali uzyskanej z drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP. Reżim temperaturowy – temperatura 200 °C i czas dwóch godzin, jaki jest nadawany drutom po określonym stopniu odkształcenia w próbie wydłużenia sprężyny, okazuje się nie wystarczający, aby druty pochodzące z materiałów odlewanych w pełni zrekrystalizowały. Stąd też zanotowano niższą wartość testu TWS oraz brak powtarzalności wyników zanotowanych podczas dwóch przeprowadzonych prób.

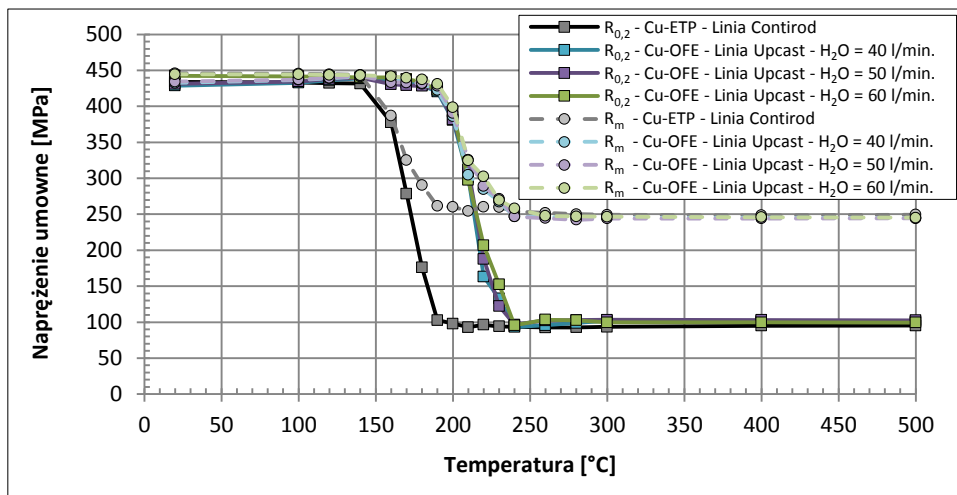
Przedstawione w niniejszym podrozdziale badania doświadczalne nad wpływem prędkości odlewania na odporność cieplną drutów miedzianych to jeden ze sposobów analizy otrzymanych wyników. Drugim parametrem w procesie ciągłego odlewania analizowanym pod kątem jego wpływu na podatność do wyżarzania drutów z miedzi beztlenowej jest wydatek wody chłodzącej krystalizator. Problematyka ta stanowi temat kolejnego podrozdziału dysertacji.

### 9.3.5. Analiza wpływu wydatku wody chłodzącej krystalizator w procesie ciągłego odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na temperaturę rekrytalizacji drutów

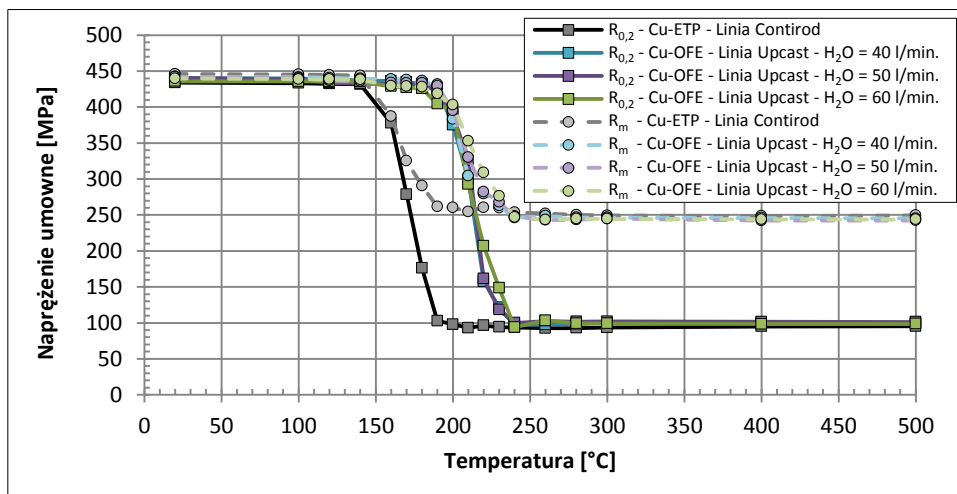
Celem tej części badań doświadczalnych była ocena ingerencji ilości wody chłodzącej krystalizator w procesie ciągłego odlewania prętów z miedzi beztlenowej na odporność cieplną drutów. Przeprowadzona w tym celu na wstępie analiza stanowiąca kontynuację tematyki podrozdziału 9.2.5 (pt.: „Analiza wpływu wydatku wody chłodzącej krystalizator w procesie ciągłego odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na umacnianie drutów w procesie ciągnięcia”) obejmuje wyniki badań granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  drutów uzyskanych z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE, dla której podczas procesu ciągłego odlewania zastosowano niezmienną prędkość odlewania i zróżnicowany wydatek wody chłodzącej krystalizator wynoszący 40 l/min., 50 l/min. oraz 60 l/min. W związku z powyższym na ilustracjach 9.3.102 – 9.3.105 ukazano krzywe zmian własności mechanicznych materiałów – granicę plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie w funkcji temperatury. Dane liczbowe do sporządzenia krzywych zamieszczono w aneksie w tabelach A9.3.1, A9.3.7 – A9.3.9.



Rys. 9.3.102. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contiroid oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 40 – 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

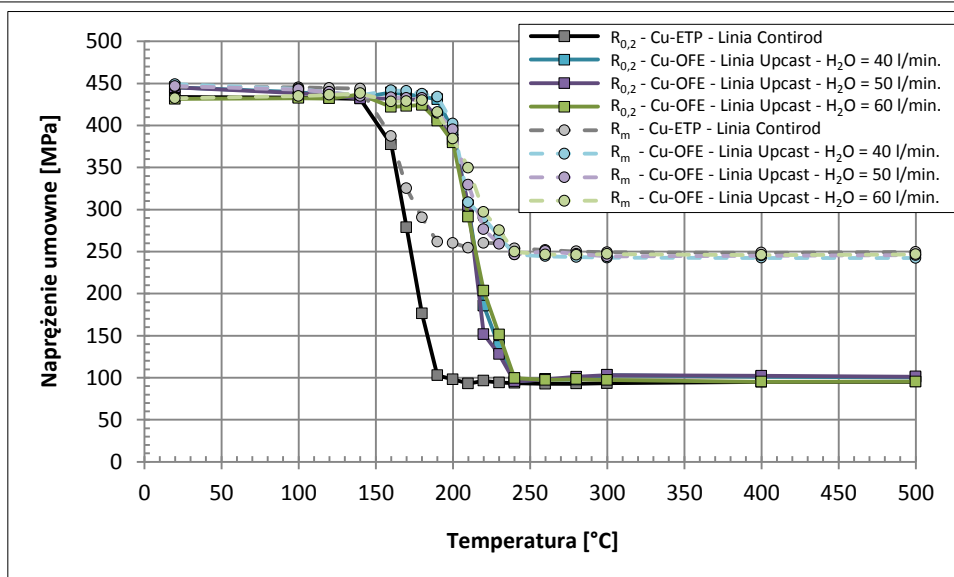


Rys. 9.3.103. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contiroid oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 2,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 40 – 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



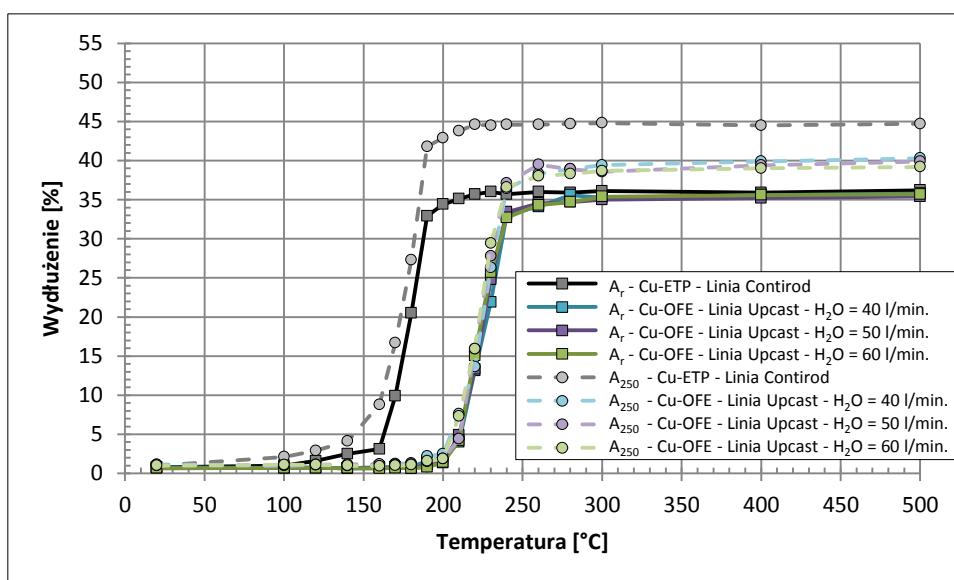
Rys. 9.3.104. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contiroid oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 3,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 40 – 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



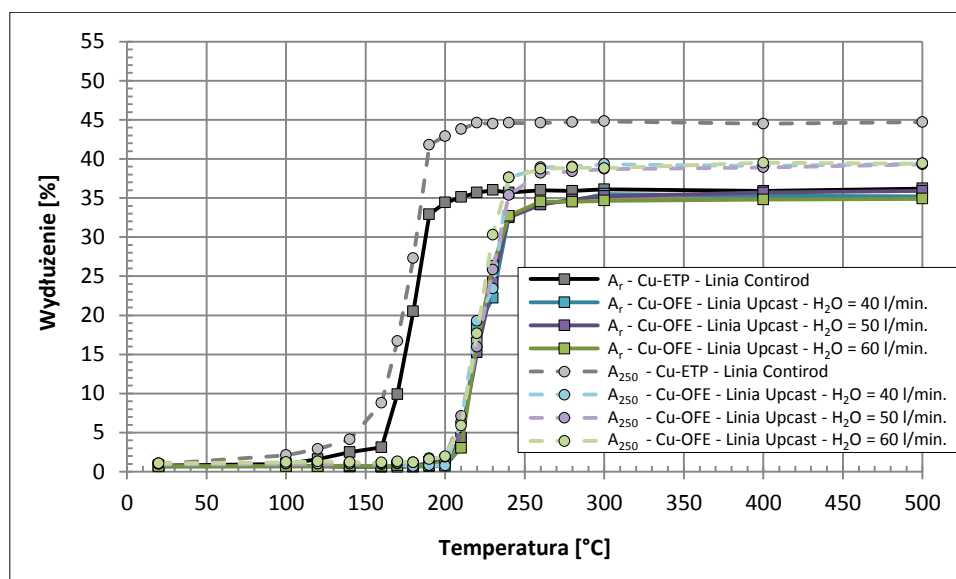


Rys. 9.3.105. Granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 40 – 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

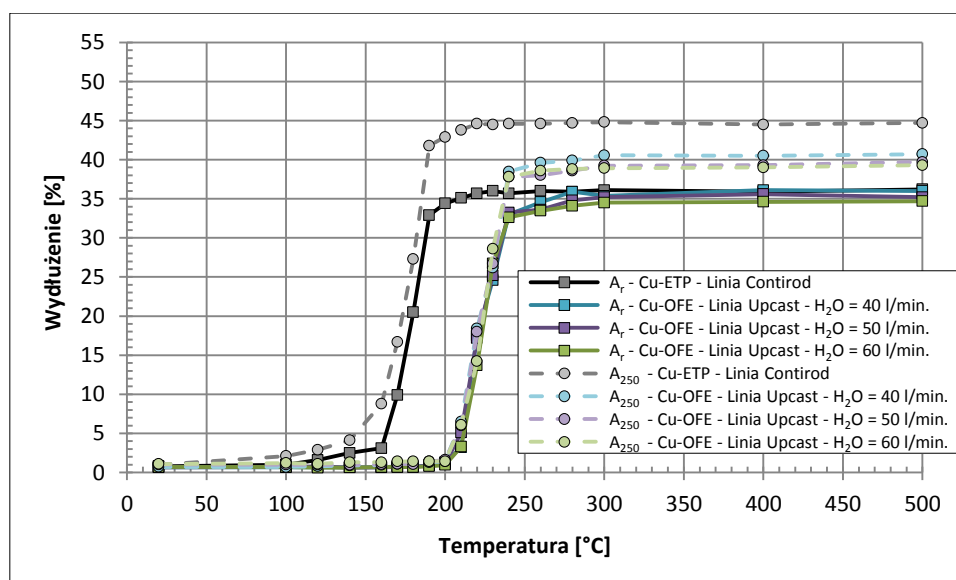
Analiza krzywych mięknięcia dla drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z procesu ciągłego odlewania przy stałej szybkości i zmiennym parametrze przepływu wody chłodzącej krystalizator nie wskazała na odmienności ich przebiegów. Charakterystyki dla drutów z miedzi beztlenowej kształtują się w bardzo zbliżony sposób i pomijając występujące niewielkie różnice w wartościach nie zauważono, aby któryś z materiałów wykazywał zdecydowane różnicowanie. Dopełnienie całościowej analizy wpływu wydatku wody chłodzącej krystalizator w procesie ciągłego odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na temperaturę rekrytalizacji drutów stanowią wykresy zależności wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego  $A_{250}$  od temperatury zilustrowane na rysunkach 9.3.106 – 9.3.109. Dane liczbowe do sporządzenia charakterystyk zamieszczono w aneksie w tabelach A9.3.1, A9.3.7 – A9.3.9.



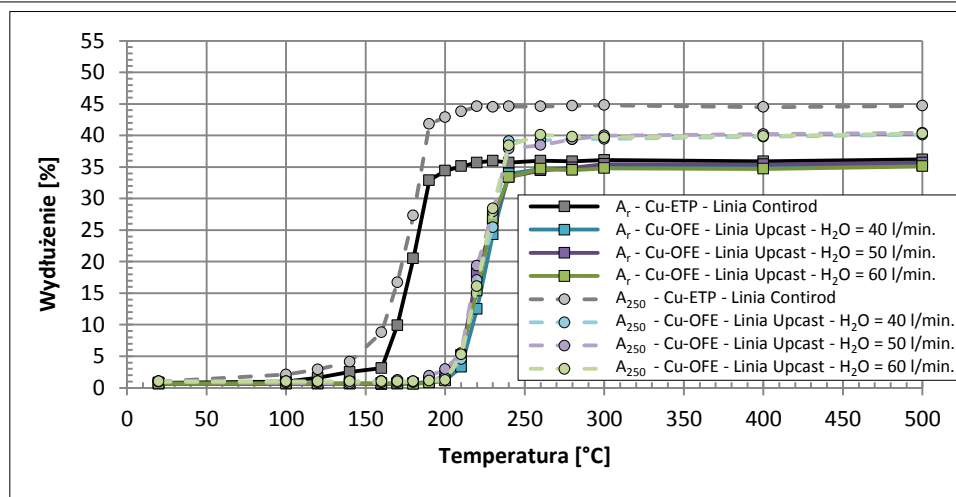
Rys. 9.3.106. Wydłużenie równomierne i wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 40 – 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.3.107. Wydłużenie równomierne i wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 2,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 40 – 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.3.108. Wydłużenie równomierne i wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 3,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 40 – 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

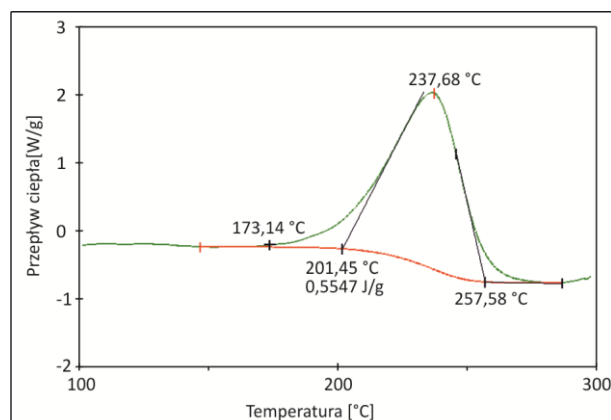


Rys. 9.3.109. Wydłużenie równomierne i wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 40 – 60 l/min.) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

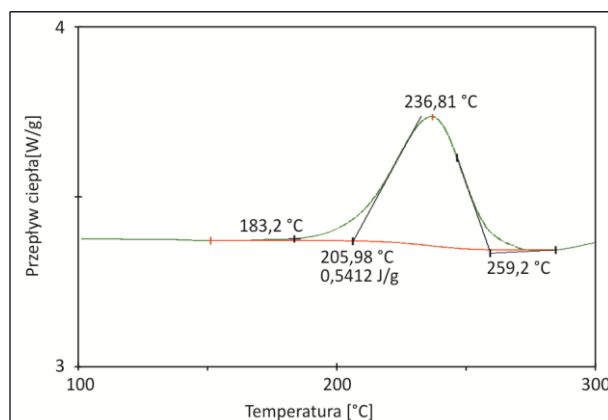
Zilustrowane na powyższych rysunkach zależności wydłużenia równomiernego i wydłużenia względnego drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE potwierdzają uzyskane na wcześniejszych etapach pracy wartości temperatur rekrytalizacji materiałów wynoszące odpowiednio 190 °C i 240 °C. W celu ich potwierdzenia dodatkowo przeprowadzono analizę badań kalorymetrycznych dla próbek drutów otrzymanych z prętów z miedzi beztlenowej z linii Upcast przy dwóch skrajnych prędkościach odlewania – tj. 1,0 m/min. i 4,0 m/min., a także dodatkowo dla ostatniego materiału dokonano badań dla różnego wydatku wody chłodzącej krystalizator tj. 40 l/min., 50 l/min. i 60 l/min. W tabeli 9.3.19 zamieszczono otrzymane wartości temperatur początku i końca rekrytalizacji dla drutów o średnicach 2,5 mm, natomiast ilustracje graficzną w postaci krzywych kalorymetrycznych materiałów przedstawiono na rysunkach 9.3.110 – 9.3.113.

Tabela 9.3.19. Wartości temperatur początku i końca rekrytalizacji drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 m/min. i 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 40 – 60 l/min.) na podstawie wyników badań kalorymetrycznych

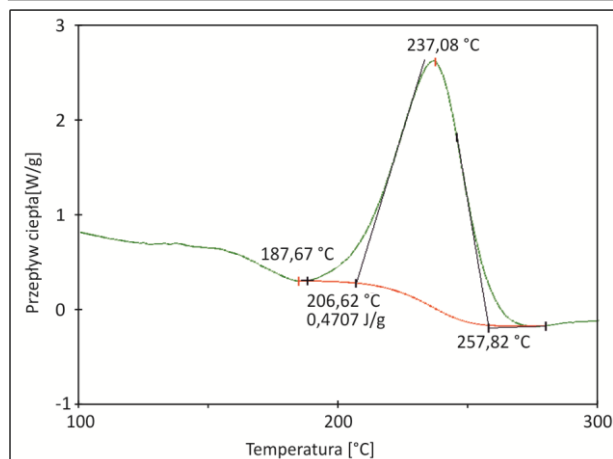
Gatunek miedzi	Linia technologiczna	Prędkość odlewania	Wydatek wody chłodzącej krystalizator	Temperatura początku rekrytalizacji	Temperatura końca rekrytalizacji
		[m/min.]	[l/min.]	[°C]	[°C]
Cu-OFE	Upcast	1,0	50	173,1	237,7
		4,0	40	183,2	236,8
		4,0	50	187,7	237,1
		4,0	60	191,8	242,0



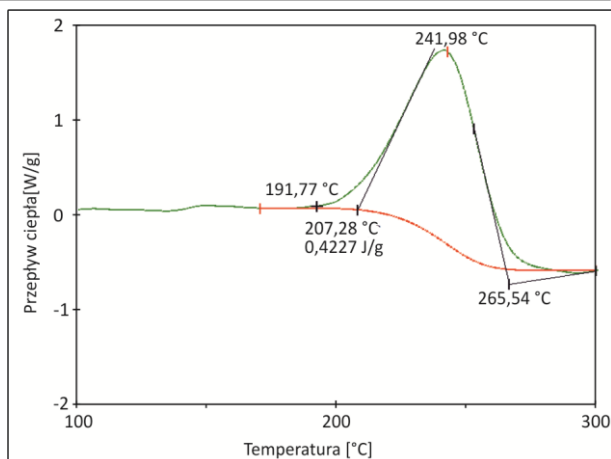
Rys.9.3.110. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 1,0 m/min. i wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 50 l/min.



Rys.9.3.111. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. i wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 40 l/min.



Rys.9.3.112. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. i wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 50 l/min.



Rys.9.3.113. Krzywa kalorymetryczna drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. i wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min.

Badania kalorymetryczne wykazały, że druty uzyskane z prętów z miedzi beztlenowej z linii Upcast przy różnych prędkościach odlewania tj. 1,0 m/min. (por. rys. 9.3.110) i 4,0 m/min. (por. rys. 9.3.111 – 9.3.113) charakteryzują się zbliżonymi wartościami temperatur zarówno początku rekrytalizacji – oscylujących na poziomie średnio około 180 °C, jak i końca rekrytalizacji wynoszących około 240 °C. Odpowiadają one w pełni wartościom, które zostały wyznaczone na podstawie analizy klasycznych krzywych mięknięcia w ramach badań doświadczalnych nad odpornością cieplną drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE (m.in. podrozdział 9.3.3, 9.3.4). Bardziej szczegółowa analiza uzyskanych wartości wskazuje ponadto, że dokładna temperatura rekrytalizacji drutu uzyskanego z pręta odlanego z najmniejszą prędkością tj. 1,0 m/min. wynosi 237 °C (por. rys. 9.3.110), a proces rekrytalizacji rozpoczyna się już w temperaturze 173 °C. Z kolei dla drutów pochodzących z odlewów uzyskanych przy większej prędkości odlewania – 4,0 m/min. proces odnowy struktury kończący się w temperaturze około 237 – 242 °C rozpoczyna się nieco później (183 – 191 °C). Wyniki te stanowią potwierdzenie obserwacji, o której nadmieniono już w oparciu o analizę krzywych mięknięcia (por. rys. 9.3.96 – 9.3.98) w ramach poprzedniego podrozdziału pracy – 9.3.4.

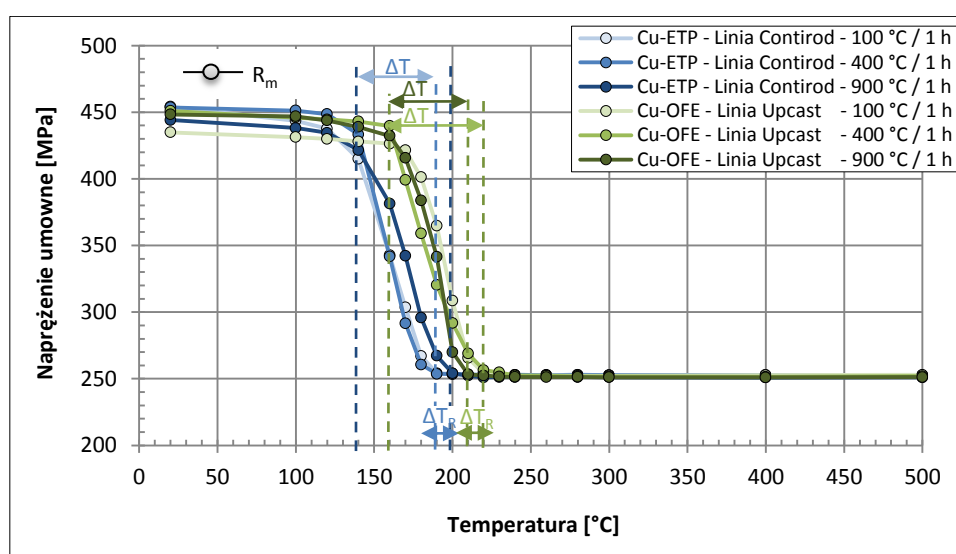
Wyniki badań kalorymetrycznych (por. tabela 9.3.19) dostarczyły także informacji, iż różnice w wielkościach przepływów wody chłodzącej krystalizator w procesie ciągłego odlewania materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej dedykowanej do procesu ciągnięcia na druty nie odgrywają większego wpływu na otrzymane wyniki (por. także rys. 9.3.111 – 9.3.113). Relacje te są z kolei potwierdzeniem obserwacji wyników krzywych mięknięcia (por. rys. 9.3.102 – 9.3.109) dokonanych w ramach niniejszego podrozdziału 9.3.5 dysertacji.

Przedstawione w niniejszym podrozdziale badania doświadczalne wraz z problematyką stanowiącą temat podrozdziału 9.3.4 to całościowa ocena wpływu parametrów procesu ciągłego odlewania prętów z miedzi beztlenowej na zdolność do wyżarzania drutów. Wraz z problematyką poprzednich podrozdziałów pracy dotyczących badań nad odpornością cieplną drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP pod kątem wpływu rodzaju materiału wsadowego do procesu ciągnięcia, składu chemicznego oraz umocnienia odkształceniowego stanowi całościową próbę charakteryzacji własności drutów z dwóch gatunków miedzi poddanych ingerencji temperatury. Jeszcze innym spojrzeniem na własności badanych materiałów jest analiza ich własności uzyskanych w wyniku poddania prętów i walcówek zmiennemu reżimowi temperaturowemu. Możliwość wystąpienia różnic w podatności do procesu wyżarzania materiałów i zanotowanych wartościach temperatur rekrytalizacji można spodziewać się na podstawie wyników badań zamieszczonych w ramach poprzednich podrozdziałów pracy, które wykazały iż temperatura powodując fizyczne zmiany w strukturze, wpływa na zróżnicowanie właściwości wytrzymałościowych i plastycznych materiałów o średnicach od 8,0 mm do 0,5 mm. Tematyka ta stanowi przedmiot analizy prowadzonej w ramach kolejnego podrozdziału 9.3.6 niniejszej pracy.

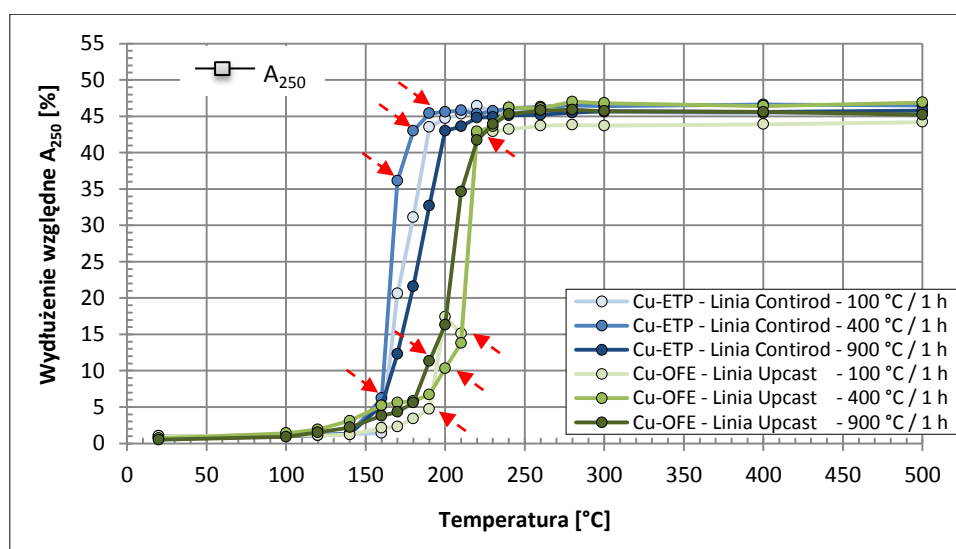
### 9.3.6. Analiza wpływu obróbki cieplnej materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na temperaturę rekrytalizacji drutów

Głównym celem prowadzonych w niniejszym podrozdziale analiz wyników badań doświadczalnych było szacowanie temperatury rekrytalizacji drutów otrzymanych z prętów i walcówek poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturach 100 °C, 400 °C i 900 °C. Problematyka ta stanowi kontynuację badań przeprowadzonych w ramach podrozdziałów 9.1.2.1.4 („Analiza wpływu obróbki cieplnej na własności mechaniczne materiałów wsadowych”) i 9.2.6 („Analiza wpływu obróbki cieplnej materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na umacnianie drutów w procesie ciągnięcia”).

W związku z powyższym analizie poddano przedstawione na rysunkach 9.3.114 i 9.3.115 klasyczne krzywe mięknięcia drutów badane w teście jednogodzinnego wygrzewania w charakterze zależności wytrzymałość na rozciąganie / wydłużenie względne  $A_{250}$  w funkcji temperatury. Dane liczbowe do ich konstrukcji zamieszczono w aneksie w tabeli A9.3.10.



Rys. 9.3.114. Wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (obróbka cieplna w temperaturach 100 °C, 400 °C i 900 °C w czasie 1 h) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania



Rys. 9.3.115. Wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz z prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (obróbka cieplna w temperaturach 100 °C, 400 °C i 900 °C w czasie 1 h) w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania

Analiza dotycząca badań podatności miedzi do wyżarzania wykazała, że charakterystyki zanotowane dla drutów bazujących na walcówkach obrabionych cieplnie w temperaturach 100 °C i 400 °C przebiegają po jednej krzywej spadku i z wartości około 450 MPa osiągają poziom naprężenia umownego odpowiadającego wytrzymałości na rozciąganie około 250 MPa, gdzie niemal idealnie się pokrywają. Z kolei krzywa mięknięcia dla drutów uzyskanych z walcówki wygrzewanej w temperaturze 900 °C przesunięta jest w kierunku wyższych wartości temperatur, w związku z czym zakres  $\Delta T$  w tym przypadku jest większy aniżeli dla drutów otrzymanych z walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturach 100 °C i 400 °C. Dla drutów z miedzi tlenowej zauważono ponadto, że kąt nachylenia wszystkich trzech charakterystyk jest taki, że zmiana temperatury wygrzewania drutów w stosunku do wartości wytrzymałości na rozciąganie obejmuje wartości od 140 °C do 190 °C – dla drutów bazujących na walcówkach wygrzewanych w temperaturze 100 °C i 400 °C oraz od 140 °C do 200 °C dla drutów uzyskanych z materiału wsadowego po zabiegu wygrzewania w najwyższej temperatur – 900 °C. Zatem zakres temperatury rekrytalizacji  $\Delta T_R$  dla tej grupy materiałów obejmuje wartości temperatur od 190 °C do 200 °C i został w sposób graficzny zilustrowany na rysunku 9.3.114. Krzywa spadku własności mechanicznych dla drutów powstałych z walcówek wygrzewanych w temperaturze 100 °C i 400 °C sugeruje spontaniczne zarodkowanie w całej objętości materiałów. Natomiast charakterystyka typowa dla drutów uzyskanych z walcówek poddanych procesowi obróbki cieplnej w temperaturze 900 °C zwraca swoim przebiegiem uwagę na wolniejszy przebiegu procesu rekrytalizacji tzn. materiał nie ma zdolności do stworzenia w strukturze dużej ilości zarodków i poddaniu się rekrytalizacji. Inaczej mówiąc większe ziarno – to mniejsza ilość granic ziaren w danej objętości, które są uprzywilejowanym miejscem dla powstania nowych zarodków w procesie rekrytalizacji. Zauważono ponadto, że druty z miedzi w gatunku Cu-ETP uzyskane z walcówek wygrzewanych w temperaturze 100 °C i 400 °C charakteryzują się temperaturą rekrytalizacji na poziomie 190 °C (por. rys. 9.3.114). W ramach przypomnienia warto nadmienić, iż taką samą wartość zanotowano dla drutów bazujących na walcówce bezpośrednio po linii Contirod (por. np. rys. 9.3.102). Natomiast druty powstałe z materiału wygrzewanego w temperaturze 900 °C cechuje nieco wyższa temperatura rekrytalizacji wynosząca 200 °C (por. rys. 9.3.114). Potwierdza to znaną obserwację doświadczalną, że gruboziarnista struktura początkowa materiału utrudnia uzyskanie materiału drobnoziarnistego po odkształceniu i obróbce cieplnej.

Analizując natomiast w oparciu o wykresy zilustrowane na rysunku 9.3.114 zmiany własności mechanicznych drutów z miedzi beztlenowej w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wygrzewania zwrócono uwagę, że te z nich, które bazują na prętach poddanych obróbce cieplnej w temperaturze 100 °C i 400 °C charakteryzują się temperaturą rekrytalizacji na poziomie około 220 °C. Z kolei wartość wynoszącą około 210 °C zaobserwowano dla drutów powstałych z materiału wygrzanego w temperaturze 900 °C. Obie te wartości kształtują się na poziomie niższym od temperatury rekrytalizacji drutów uzyskanych z pręta po linii Upcast, dla którego wynosi ona 240 °C (por. np. rys. 9.3.102). Ponadto wszystkie charakterystyki przedstawione dla drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE zbiorczo na rysunku 9.3.114 odznaczają się przebiegami niemal po jednej krzywej spadku. Zakres temperatur odpowiadających procesowi rekrytalizacji dla drutów z miedzi beztlenowej uzyskanych z prętów wygrzewanych w temperaturze 100 °C i 400 °C obejmuje wartości od 160 °C do 220 °C, natomiast dla drutów uzyskanych z prętów wyżarzonych w temperaturze 900 °C od 160 °C do 210 °C. W tym przypadku  $\Delta T_R$  dotyczy temperatur z zakresu 210 – 220 °C (por. rys. 9.3.114).

Zestawienie opracowanych na podstawie analizy krzywych mięknięcia temperatur rekrytalizacji drutów zamieszczono w tabeli 9.3.20.

Tabela 9.3.20. Wartości temperatur rekrytalizacji w teście jednogodzinnego wygrzewania drutów o średnicy 2,5 mm uzyskanych z walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP i prętów z miedzi beztlenowej poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 100 °C, 400 °C i 900 °C w czasie 1 h

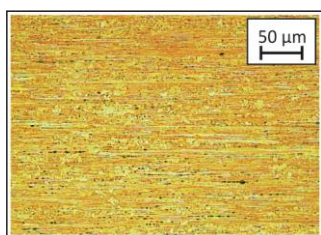
Gatunek miedzi	Warunki obróbki cieplnej materiałów wsadowych	Temperatura rekrytalizacji drutu
	[°C / h]	[°C]
Cu-ETP	100 / 1	190
	400 / 1	190
	900 / 1	200
Cu-OFE	100 / 1	220
	400 / 1	220
	900 / 1	210

Analizując w dalszym ciągu odporność cieplną poddanych badaniom doświadczalnym materiałów warto zaznaczyć, że temperatura rekrytalizacji dla drutów uzyskanych z wygrzewanych w temperaturze 100 °C i 400 °C walcówek z linii Contirod wynosi 190 °C, natomiast dla drutów uzyskanych z poddanych w tych samych temperaturach prętów z linii Upcast jest wyższa i kształtuje się na poziomie 220 °C. Zatem zanotowany zakres temperatur rekrytalizacji  $\Delta T_R$  w tym przypadku osiąga wartość 30 °C. Z kolei dla drutów powstałych z walcówek i prętów poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 900 °C temperatura rekrytalizacji wynosi odpowiednio 200 °C i 210 °C. Zatem  $\Delta T_R$  dla tych materiałów wynosi 10 °C.

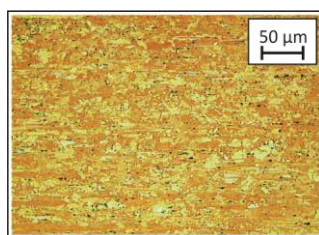
Analiza krzywych zmian własności mechanicznych drutów z funkcji temperatury nasuwa kolejne spostrzeżenie, że temperatura rekrytalizacji drutów bazujących na wygrzewanej w temperaturze 100 °C i 400 °C walcówce jest niższa niż  $T_R$  dla drutów uzyskanych z wyżarzonej w temperaturze 900 °C walcówki. Z kolei w przypadku temperatury rekrytalizacji drutów uzyskanych z poddanej zabiegom obróbki cieplnej miedzi beztlenowej jest natomiast inaczej. Druty uzyskane z wyżarzonej w temperaturze 100 °C i 400 °C miedzi beztlenowej charakteryzują się wyższą wartością temperatury rekrytalizacji niż druty uzyskane z tego samego gatunku materiału wsadowego ale poddanego ekspozycji w temperaturze 900 °C.

Wobec faktu, iż znaczna ilość zarodków rekrytalizacji tworzy się na granicach ziaren (mogą tworzyć się również na dyslokacjach, wydzieleniach), to jeżeli ich liczba jest większa to sam proces rekrytalizacji zachodzi wówczas przy niższej temperaturze i jest bardziej dynamiczny. Obrazują to kształty krzywych, które w wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych zanotowano dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP powstałych z walcówek wygrzewanych w temperaturze 100 °C i 400 °C. Miedź beztlenowa jako materiał charakteryzujący się większym ziarnem, a tym samym mniejszą ilością granic pomiędzy nimi tj. mniejszą ilością miejsc uprzywilejowanych do zarodkowania wymaga wyższej temperatury, aby zaszły mechanizmy rekrytalizacji. Zatem wobec uzyskanych wyników, podobnie jak na poprzednich etapach badań nad odpornością cieplną drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE stawiając pytanie o przyczynę występowania różnicy w wartościach temperatury rekrytalizacji należy identyfikować ją ze zmianami stanu strukturalnego próbek poddanych wyżarzaniu. W związku z powyższym obserwacją mikrostruktur poddano druty według punktów zaznaczonych schematycznie na rysunku 9.3.115.

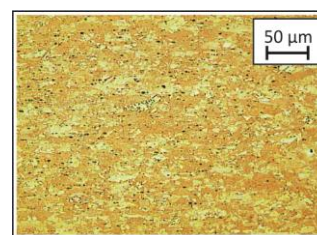
Analizę rozpoczęto od prześledzenia przebiegu krzywej mięknięcia dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP powstałych z wygrzewanej w temperaturze 400 °C walcówki tlenowej. Jak nadmieniono wcześniej przebieg charakterystyki dla tego materiału był zbliżony z krzywą zarejestrowaną dla drutu uzyskanego z walcówki poddanej wyżarzaniu w temperaturze 100 °C. Dlatego w ramach prowadzonej analizy ograniczono się do jednego z wymienionych materiałów. W tym celu oprócz charakterystyki zmiany własności mechanicznych materiału w funkcji temperatury (por. rys. 9.3.114, 9.3.115) posłużono się dodatkowo obrazami mikrostruktur przekrojów wzdłużnych drutów widzianych w optyce mikroskopu świetlnego zilustrowanymi na rysunkach 9.3.116 – 9.3.118.



Rys. 9.3.116. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod (obróbka cieplna w temperaturze 400 °C w czasie 1 h) po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturze 160 °C. Mikroskop świetlny, powiększenie  $\times 20$



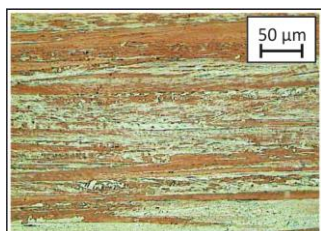
Rys. 9.3.117. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod (obróbka cieplna w temperaturze 400 °C w czasie 1 h) po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturze 170 °C. Mikroskop świetlny, powiększenie  $\times 20$



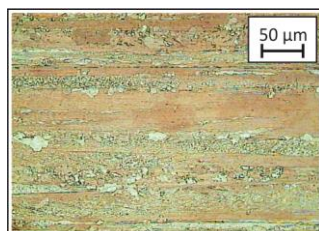
Rys. 9.3.118. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod (obróbka cieplna w temperaturze 400 °C w czasie 1 h) po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturze 190 °C. Mikroskop świetlny, powiększenie  $\times 20$

Na podstawie analizy mikrostruktur zauważono, iż wygrzewanie drutu w temperaturze 160 °C (por. rys. 9.3.116) nie wpływa na zajście zmian strukturalnych w materiale. Dopiero ekspozycja w temperaturze 170 °C (por. rys. 9.3.117) – powoduje pojawienie się pierwszych zarodków rekrytalizacji. Z kolei obraz z mikroskopu świetlnego mikrostruktury przekroju wzdłużnego drutu poddanego procesowi obróbki cieplnej w temperaturze 190 °C (por. rys. 9.3.118) ujawnił jego rekrytalizację.

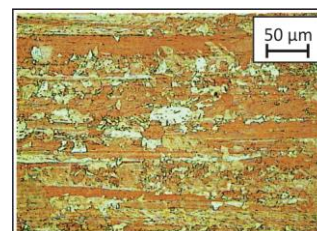
Odnotowano także jakie zmiany w strukturze spowodowane wpływem temperatury zostały wywarte na druty z miedzi beztlenowej otrzymane z pręta poddanego zabiegowi obróbki cieplnej w temperaturze 100 °C. Przeanalizowano w tym celu ponownie krzywe mięknięcia materiału (por. rys. 9.3.114, 9.3.115) oraz obrazy mikrostruktur drutów po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturach 190 °C, 210 °C i 220 °C ukazane na rysunkach 9.3.119 – 9.3.121.



Rys. 9.3.119. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (obróbka cieplna w temperaturze 100 °C w czasie 1 h) po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturze 190 °C. Mikroskop świetlny, powiększenie  $\times 20$



Rys. 9.3.120. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (obróbka cieplna w temperaturze 100 °C w czasie 1 h) po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturze 210 °C. Mikroskop świetlny, powiększenie  $\times 20$



Rys. 9.3.121. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (obróbka cieplna w temperaturze 100 °C w czasie 1 h) po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturze 220 °C. Mikroskop świetlny, powiększenie  $\times 20$

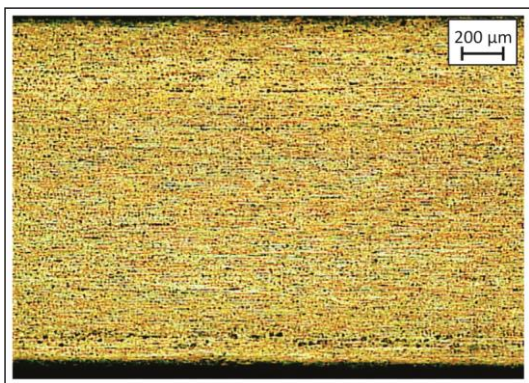
Przedstawione mikrostruktury drutów z miedzi beztlenowej wykazały, że wygrzewanie materiału w temperaturze 190 °C (por. rys. 9.3.119) nie powoduje żadnych zmian. Dopiero w wyniku ekspozycji w temperaturze 210 °C pojawiły się pierwsze zarodki rekrytalizacji (por. rys. 9.3.120). Zaobserwowano strukturę na pół wyżarzoną. Natomiast poddanie materiału zabiegowi obróbki cieplnej w temperaturze 220 °C, którego mikrostrukturę ukazano na kolejnej ilustracji 9.3.121 spowodowało istotny stopień rekrytalizacji (struktura wyżarzona).

Po tak przeprowadzonych wstępnych obserwacjach mikrostruktur drutów z dwóch gatunków miedzi w dalszym części dysertacji kontynuację stanowiła analiza zmian struktury materiałów poddanych procesowi wygrzewania w różnych temperaturach. Dokonana została ona w oparciu o fakt, iż porównywane ze sobą druty z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE charakteryzują się wartościami wytrzymałości na rozciąganie na zbliżonym poziomie (por. tabela A9.3.10) tj.:

- drut Cu-ETP 400 °C / 160 °C i drut Cu-OFE 900 °C / 190 °C –  $R_m$  na poziomie około 342 MPa,
- drut Cu-ETP 400 °C / 170 °C i drut Cu-OFE 400 °C / 200 °C –  $R_m$  na poziomie około 292 MPa,
- drut Cu-ETP 400 °C / 190 °C i drut Cu-OFE 900 °C / 210 °C –  $R_m$  na poziomie około 253 MPa.

W przypadku drutu z miedzi w gatunku Cu-ETP uzyskanego z wygrzewanej w temperaturze 400 °C walcówki i poddanego ingerencji temperatury 160 °C – jak już pokazano na rysunku 9.3.116, a także poniżej na rysunku 9.3.122 przy zastosowaniu pięciokrotnego powiększenia nie zaszły żadne zmiany strukturalne. Z kolei dla próbki porównawczej z miedzi beztlenowej otrzymanej z pręta wyżarzonego w temperaturze 900 °C, a następnie poddanej procesowi wygrzewania w temperaturze 190 °C mikrostrukturę przekroju wzdłużnego przedstawiono na ilustracji 9.3.123.



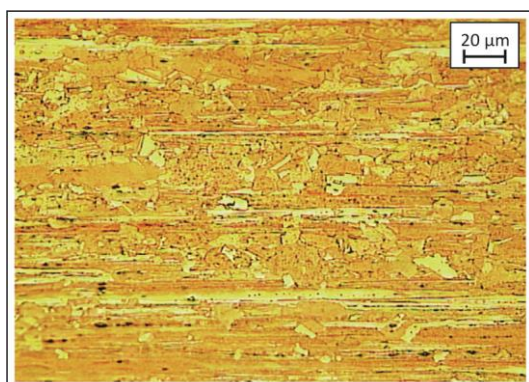


Rys. 9.3.122. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod (obróbka cieplna w temperaturze 400 °C w czasie 1 h) po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturze 160 °C. Mikroskop świetlny, powiększenie  $\times 5$

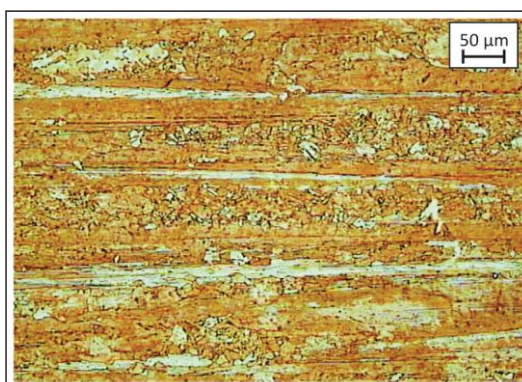


Rys. 9.3.123. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (obróbka cieplna w temperaturze 900 °C w czasie 1 h) po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturze 190 °C. Mikroskop świetlny, powiększenie  $\times 5$

Jak dostrzeżono na podstawie obrazu mikrostruktury zilustrowanej na rysunku 9.3.123 drut z miedzi beztlenowej po zabiegu obróbki cieplnej w temperaturze 190 °C charakteryzuje się podłużnymi, niezrekrystalizowanymi ziarnami. Dodatkowy podgląd strukturalny obu materiałów przy zastosowaniu większych powiększeń – rysunki 9.3.124 i 9.3.125 – potwierdził powyższe stwierdzenie.



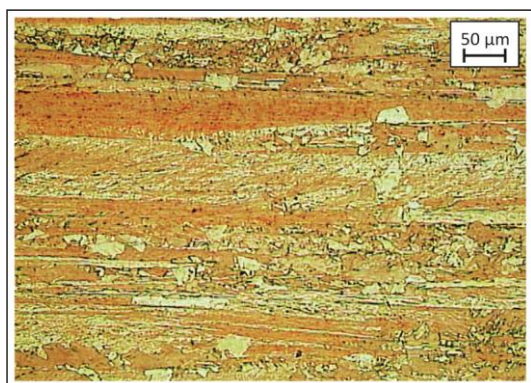
Rys. 9.3.124. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod (obróbka cieplna w temperaturze 400 °C w czasie 1 h) po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturze 160 °C. Mikroskop świetlny, powiększenie  $\times 50$



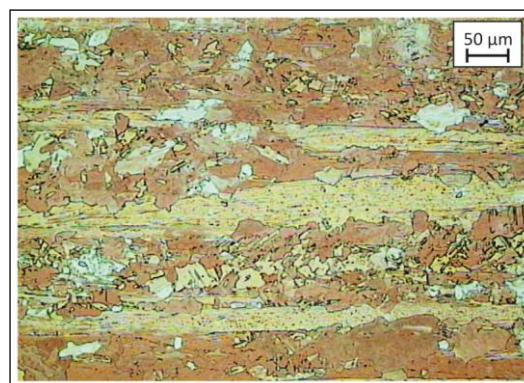
Rys. 9.3.125. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (obróbka cieplna w temperaturze 900 °C w czasie 1 h) po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturze 190 °C. Mikroskop świetlny, powiększenie  $\times 20$

Kolejną drugą grupę materiałów, dla których z uwagi na zbliżone wartości wytrzymałości na rozciąganie dokonano charakterystyki porównawczej stanowi drut z miedzi w gatunku Cu-ETP wygrzewany w temperaturze 170 °C, uzyskany z obrobionej cieplnie w temperaturze 400 °C walcówki oraz drut z miedzi beztlenowej bazujący na wyżarzonym w temperaturze 400 °C pręcie i poddany temperaturowemu reżimowi 200 °C. Jak wykazano za pomocą klasycznych krzywych mięknięcia (ilustracje 9.3.114 i 9.3.115), a także w oparciu o obraz z mikroskopu świetlnego zilustrowany na rysunku 9.3.117 dla pierwszego z wymienionych materiałów, dopiero temperatura wygrzewania 170 °C w czasie 1 godziny doprowadziła do pojawienia się pierwszych zarodków rekrytalizacji. Z kolei dla wymienionego drutu z miedzi beztlenowej temperaturą wygrzewania, w której zaczęły pojawiać się zarodki rekrytalizacji i pojedyncze ziarna była wartość 200 °C. Potwierdzeniem powyższych obserwacji jest zdjęcie strukturalne dla omawianego drutu z miedzi w gatunku Cu-OFE przedstawione na rysunku 9.3.126. Z kolei struktura przedstawiona na rysunku 9.3.118 – dla drutu z miedzi w gatunku Cu-ETP wygrzewanego w temperaturze 190 °C, a powstałego z wyżarzonej w temperaturze 400 °C walcówki oraz obraz ukazany na rysunku 9.3.127 – dla drutu z miedzi beztlenowej poddanego ingerencji temperatury 210 °C i powstałego z wygrzewanego w temperaturze 900 °C pręta są już

całkowicie zrekrystalizowane.

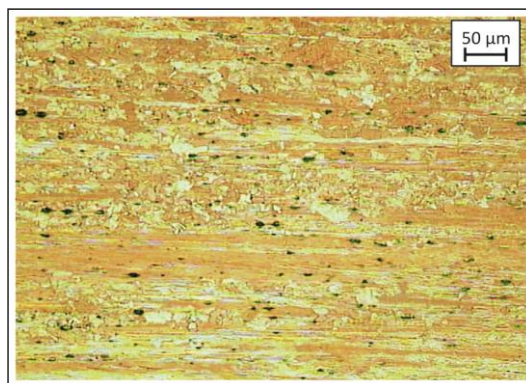


Rys. 9.3.126. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (obróbka cieplna w temperaturze 400 °C w czasie 1 h) po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturze 200 °C. Mikroskop świetlny, powiększenie  $\times 20$



Rys. 9.3.127. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (obróbka cieplna w temperaturze 900 °C w czasie 1 h) po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturze 210 °C. Mikroskop świetlny, powiększenie  $\times 20$

Ponadto zjawiskiem godnym odnotowania są zauważalne zmiany strukturalne zachodzące w drutach z miedzi w gatunku Cu-ETP poddanych zabiegom wygrzewania w temperaturze 170 °C. Mimo, iż zarówno druty uzyskane z walcówki poddanej obróbce cieplnej w temperaturze 400 °C, jak i 900 °C zostały uzyskane z tego samego rodzaju materiału wsadowego tj. miedzi z linii Contirod – to i tak wykazały one odmienną budowę strukturalną. Otóż druty uzyskane z wygrzewanej w 400 °C walcówki poddane ingerencji temperatury 170 °C (por. rys. 9.3.117) charakteryzują się strukturą zrekrystalizowaną. Natomiast drut bazujący na wygrzewanej w temperaturze 900 °C walcówce poddany wyżarzaniu również w temperaturze 170 °C wykazuje strukturę niezrekrystalizowaną, którą przedstawiono na rysunku 9.3.128. Materiał ten wymaga dłuższego czasu ze względu na występowanie większych ziaren, a więc mniejszej ilości granic ziaren w danej objętości, które są uprzywilejowanymi miejscami dla powstawania nowych zarodków w procesie rekrystalizacji.



Rys. 9.3.128. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutu o średnicy 2,5 mm otrzymanego z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod (obróbka cieplna w temperaturze 900 °C w czasie 1 h) po wygrzewaniu w teście jednogodzinnym w temperaturze 170 °C. Mikroskop świetlny, powiększenie  $\times 20$

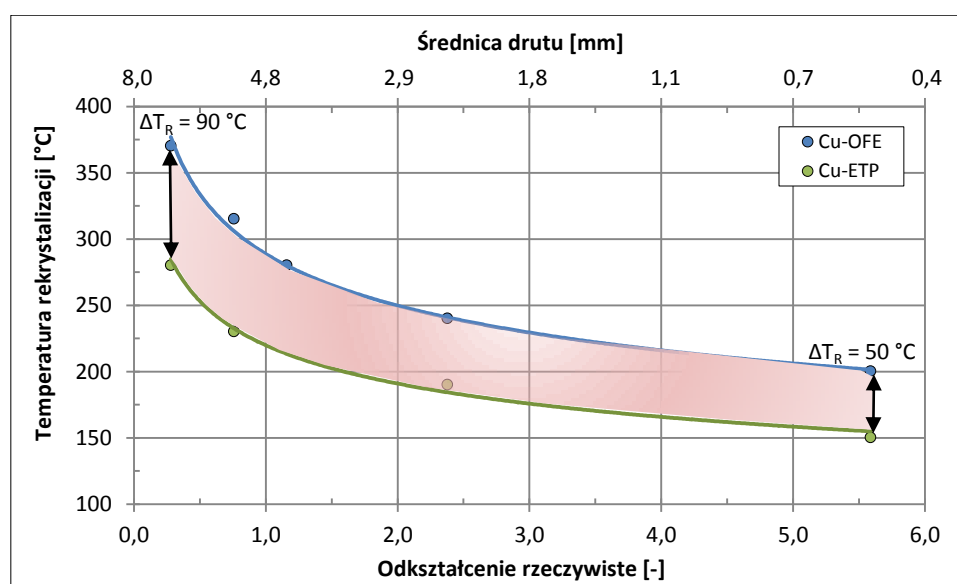
Przeprowadzona w ramach niniejszego podrozdziału analiza wpływu warunków wygrzewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE do procesu ciągnięcia na kształtowanie temperatury rekrystalizacji drutów pozwoliła na kompleksowe określenie odporności cieplnej materiałów i stopnia odnowy ich struktury w oparciu o obserwacje mikrostrukturalne. Fragmentaryczne podsumowanie tematyki dotyczącej podatności do obróbki cieplnej miedzi stanowi kolejny z podrozdziałów pracy – 9.3.7, w którym określono wpływ wyżarzania międzyoperacyjnego na temperaturę rekrystalizacji drutów z miedzi beztlenowej i miedzi w gatunku Cu-ETP. Tematyka ta jest tym bardziej zasadna, iż współczesna, wysokozaawansowana elektronika i elektrotechnika – w odniesieniu do tematu niniejszej pracy w szczególności technologia kablowa – wymusiły taki właśnie, wyraźny podział miedzi na dwa rodzaje. Podkreślając celowość problematyki warto

zaznaczyć, iż materiały te dedykowane są do procesu ciągnięcia w warunkach przemysłowych, gdzie jednym z etapów technologicznych jest operacja ich wyżarzania w liniach ciągniczych. Dlatego też poznanie wartości temperatur rekrytalizacji drutów z dwóch gatunków miedzi poddanych badaniom doświadczalnym dotyczących różnych wariantów międzyoperacyjnego wyżarzania, które odpowiadają rzeczywistym warunkom zakładów kablowych było niezbędne w celu eliminacji dodatkowych problemów jakie mogą generować te materiały w związku z procesami ich przetwórstwa.

### 9.3.7. Analiza wpływu wyżarzania międzyoperacyjnego na temperaturę rekrytalizacji drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP

Celem tej części badań doświadczalnych było określenie wpływu struktury na odporność cieplną miedzi poddanej międzyoperacyjnym zabiegom wyżarzania rekrytalizującego. Zgodnie z informacjami zamieszczonymi w programie badań analizę problematyki przeprowadzono dwuetapowo tj. w pierwszym – w kontekście przyjętego schematu odkształcenia i obróbki cieplnej materiałów – sprawdzono temperaturę rekrytalizacji drutów o średnicach 2,5 mm, natomiast w drugim etapie kontynuowano proces odkształcenia, ale bez operacji wyżarzania międzyoperacyjnego, co z kolei miało na celu sprawdzenie w jakim stopniu zmiana struktury wywołana rekrytalizacją drutów o średnicy 2,5 mm i dalszym ich odkształceniem do średnicy 0,5 mm ma wpływ na temperaturę rekrytalizacji badanych gatunków miedzi. W ramach przypomnienia warto nadmienić, iż w pierwszym etapie badań doświadczalnych przyjęto trzy metody uzyskania drutów o średnicy 2,5 mm z prętów i walcówki o średnicy 8,0 mm – umownie oznaczone symbolami 1w, 2w i 3w, dla których międzyoperacyjne procesy wyżarzania w temperaturze 230 °C dla miedzi w gatunku Cu-ETP oraz w temperaturze 300 °C dla miedzi beztlenowej przeprowadzono dla drutów o średnicach odpowiednio 5,0 mm; 5,0 mm i 4,0 mm oraz 5,0 mm; 4,0 mm i 3,2 mm, natomiast w drugim etapie otrzymane w poszczególnych operacjach technologicznych (1w, 2w, 3w) wstępnej części druty o średnicy 2,5 mm po poddaniu na początku zabiegowi obróbki cieplnej przeciągnięto na średnicę finalną 0,5 mm już bez ingerencji temperatury. Dla porównania przedstawiono także uzyskane we wcześniejszym etapie pracy wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicy 2,5 mm, które nie zostały poddane pośrednim zabiegom wyżarzania (0w). W tej części badań przyjęto schemat odkształcenia obowiązujący w poprzednich etapach pracy (por. tabele A9.2.2, A9.2.4).

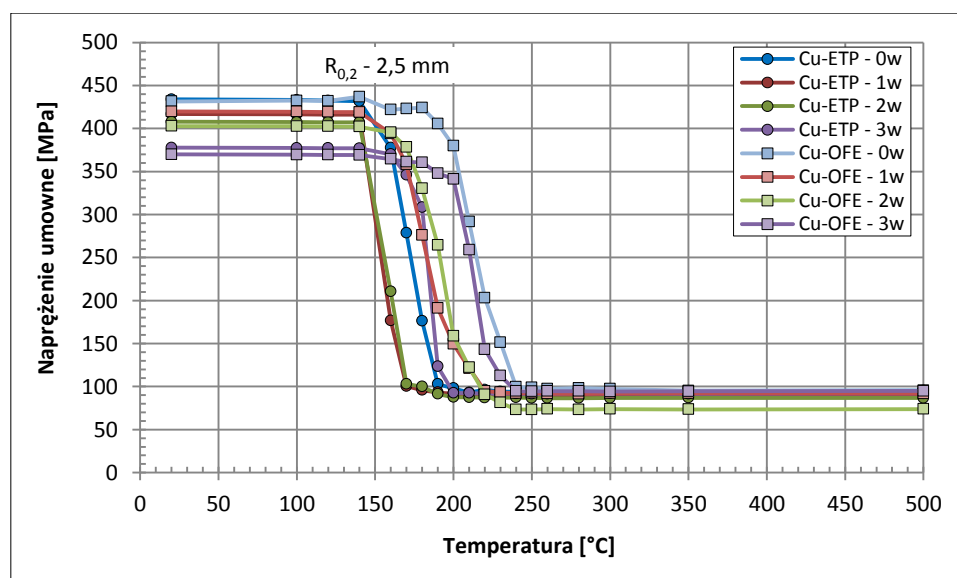
Jako wstęp do omawianej tematyki potraktowano wykresy zilustrowane na rysunku 9.3.129 ukazujące zależności temperatury rekrytalizacji materiału z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE od wielkości odkształcenia rzeczywistego. Stanowią one charakterystykę porównawczą będącą jednoczesną interpretacją przedstawionych we wcześniejszym etapie pracy krzywych zilustrowanych na rysunkach 9.3.77 i 9.3.78.



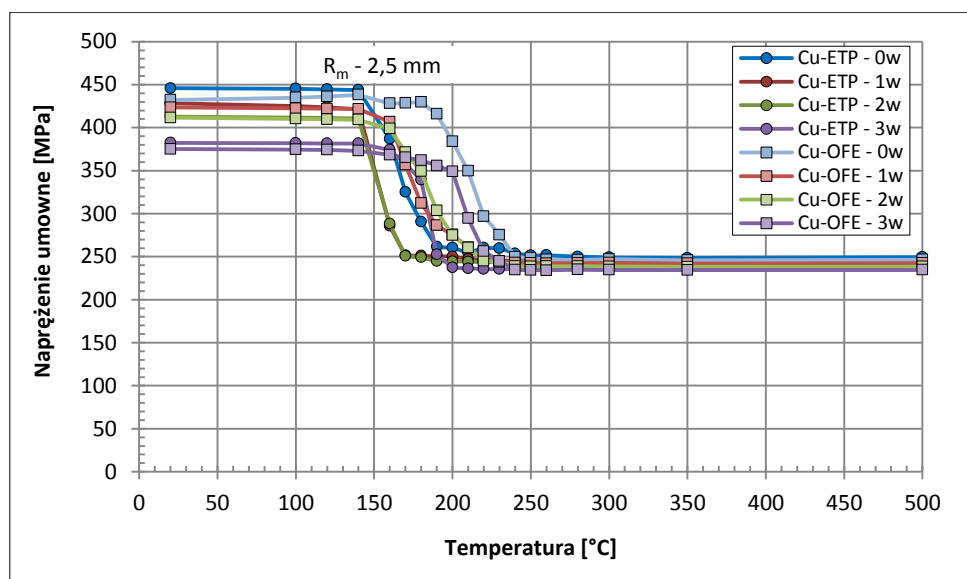
Rys. 9.3.129. Wykresy wpływu wielkości odkształcenia rzeczywistego na temperaturę rekrytalizacji drutów otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod i pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE w teście jednogodzinnego wygrzewania

Na rysunku 9.3.129 zostały przedstawione charakterystyki zmian temperatury rekrytalizacji, która uznawana jest jako temperatura odnowy własności wytrzymałościowych materiałów w teście jednogodzinnej ekspozycji, w funkcji wielkości odkształcenia, dla miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE. Różnica pomiędzy zanotowanymi dla tych materiałów temperaturami rekrytalizacji (por. tabela 9.3.15) jest dość istotna jeśli zauważone zostanie, że są to materiały uzyskiwane z katody o tej samej czystości chemicznej. Warto podkreślić, że przedstawione zależności wykazały przebiegi jak najbardziej klasyczne tzn. wraz ze wzrostem wielkości odkształcenia maleje temperatura rekrytalizacji, ponieważ rośnie siła pędna procesu. Analizując przebiegi charakterystyk na rysunku 9.3.129 zwrócono uwagę na zaznaczone kolorem jasnoczerwonym pole pomiędzy badanymi materiałami. Zanotowana początkowa różnica temperatur rekrytalizacji przy małych odkształceniach wyniosła niemal 100 °C. W miarę odkształcania materiałów zaobserwowano, że maleje ona o połowę do wartości 50 °C. To już pierwszy dowód na to, że w miedzi otrzymanej w procesie ciągłego odlewania w czasie odkształcenia następuje rozbijanie struktury gruboziarnistej, która staje się tym samym bardziej drobnoziarnista, wobec czego materiał reaguje obniżoną temperaturą rekrytalizacji z uwagi na większą ilość defektów. Warto zadać pytanie, czy te dwa materiały mogą charakteryzować się tą samą wartością temperatury rekrytalizacji? Dlatego też zrealizowano program badań doświadczalnych, który miał na celu sprawdzenie tej tezy. Bazował on na tym, że w czasie procesu odkształcania na zimno miedź jest poddawana wielokrotnemu wyżarzaniu międzyoperacyjnemu, którego celem jest odbudowa w miedzi odlewniczej w gatunku Cu-OFE na nowo struktury na sposób rekrytalizacji – w taki sposób, aby materiał „zapomniał”, że pierwotne elementy struktury uzyskane zostały w procesie odlewania.

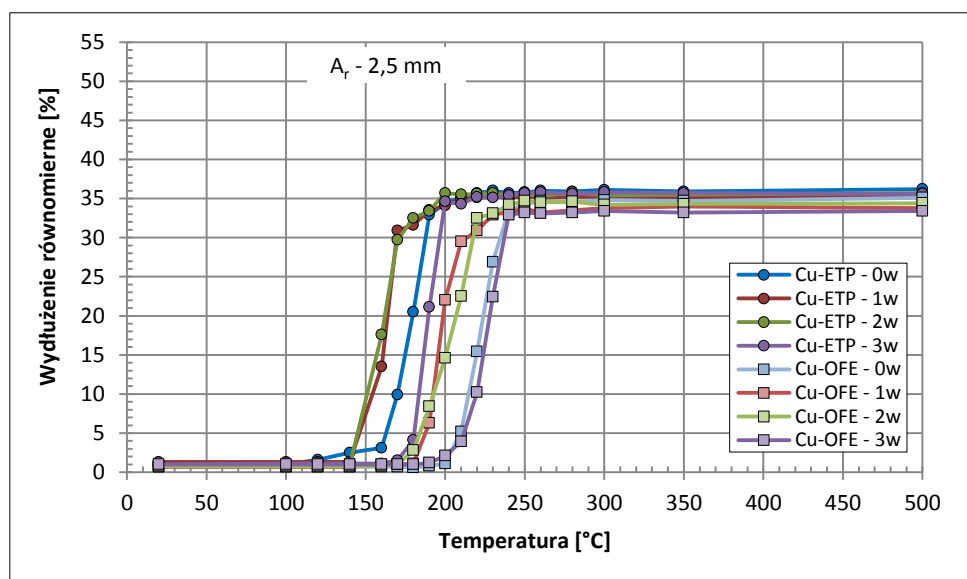
Przystępując do omawiania tematyki warto na wstępie zaznaczyć, iż materiał odkształcony plastycznie na zimno jest w stanie metastabilnym, w temperaturze otoczenia – trwałym. Z kolei w podwyższonych temperaturach wykazuje tendencję do powrotu do stanu stabilnego. W pierwszym etapie analiza wyników badań doświadczalnych dotyczyła zmian własności mechanicznych drutów o średnicy 2,5 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE po różnych wariantach międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego (0w, 1w, 2w, 3w). W tym celu przyjrano się charakterystykom przedstawionym na rysunkach 9.3.130 – 9.3.133 ilustrującym zmiany własności mechanicznych omawianych drutów z dwóch gatunków miedzi w funkcji temperatury w teście jednogodzinnym. Wartości liczbowe niezbędne do ich skonstruowania zamieszczono w aneksie w tabeli A9.3.11.



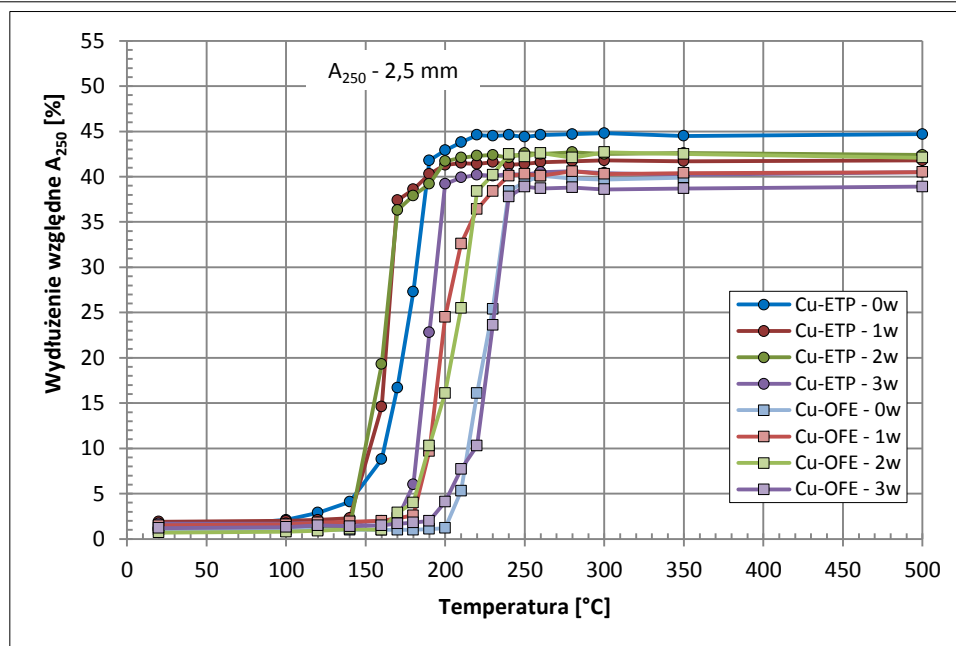
Rys. 9.3.130. Granica plastyczności drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE po zabiegach międzyoperacyjnego wygrzewania rekrytalizującego (0w, 1w, 2w, 3w), w funkcji temperatury w teście jednogodzinnym wyżarzania



Rys. 9.3.131. Wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE po zabiegach międzyoperacyjnego wygrzewania rekrytalizującego (0w, 1w, 2w, 3w), w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wyżarzania



Rys. 9.3.132. Wydłużenie równmierne drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE po zabiegach międzyoperacyjnego wygrzewania rekrytalizującego (0w, 1w, 2w, 3w), w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wyżarzania



Rys. 9.3.133. Wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE po zabiegach międzyoperacyjnego wygrzewania rekrytalizującego (0w, 1w, 2w, 3w), w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wyżarzania

Na podstawie analizy charakterystyk zilustrowanych na rysunkach 9.3.130 – 9.3.133 zauważono, że w zależności od ilości zabiegów wyżarzania międzyoperacyjnego druty obu gatunków miedzi wykazują różne początkowe wartości granicy plastyczności ( $R_{0,2}$  na poziomie około 370 – 434 MPa) i wytrzymałości na rozciąganie ( $R_m$  w zakresie od około 375 MPa do około 445 MPa), które maleją wraz z ilością operacji wyżarzania. Krzywe charakteryzują się zróżnicowanymi przebiegami zmian własności mechanicznych w funkcji temperatury wygrzewania. W rezultacie w zakresie temperatur 20 – 500 °C osiągnęły stałą wartość kształtującą się odpowiednio dla granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie na poziomie około 100 MPa i 250 MPa. Tłumaczy się to wielkością odkształcenia jakiemu poddane były druty po ostatniej operacji wyżarzania i w konsekwencji różnym stopniem umocnienia materiałów.

Analizując bardziej szczegółowo omawiane wykresy zaobserwowano się, że początek zmian własności dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP następuje w niższych temperaturach niż dla drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE. Druty te wykazały mniejszy interwał temperaturowy, w którym następuje powrót do początkowych własności wytrzymałościowych, co pozostaje w zgodzie z analizą przeprowadzoną na wcześniejszym etapie niniejszej pracy. W konsekwencji poszczególne materiały poddane różnym wariantom międzyoperacyjnych zabiegów obróbki cieplnej charakteryzują się niższą temperaturą rekrytalizacji w porównaniu z drutami z miedzi beztlenowej. Zauważyć ponadto należy, że przebiegi krzywych mięknięcia drutów w gatunku Cu-ETP (1w, 2w) mają bardzo zbliżony charakter. Początek zmian dla tych materiałów zanotowano w temperaturze 140 °C, natomiast odnowę struktury uzyskały w temperaturze 170 °C. Zakres temperatur dla tych drutów wynosi zatem  $\Delta T = 30$  °C. Natomiast pozostałe materiały z miedzi w gatunku Cu-ETP (0w, 3w) początek zmian wykazały w temperaturze 150 °C, by w temperaturze 190 – 200 °C osiągnęły stały poziom. Zakres temperatur kształtuje się w tym przypadku na poziomie  $\Delta T = 40 - 50$  °C.

Z kolei druty z miedzi w gatunku Cu-OFE wykazały większy interwał temperaturowy, w którym następuje zmiana ich własności mechanicznych. Początek tych zmian zanotowany dla materiałów poddanych jednemu (1w) oraz dwóm (2w) zabiegom międzyoperacyjnego wyżarzania zaobserwowano w temperaturze 150 °C, po czym osiągnięcie temperatury rekrytalizacji nastąpiło dla wartości  $T_R = 220$  °C. Zakres temperatur dla tych drutów wyniósł  $\Delta T = 70$  °C. Natomiast materiały oznaczone w ramach niniejszych badań doświadczalnych jako 0w i 3w charakteryzują się początkiem zmian własności mechanicznych w temperaturze 160 °C, by dla wartości 240 °C osiągnąć całkowitą odnowę struktury. Zakres temperatur dla tych drutów wynosi  $\Delta T = 80$  °C. Całościowe zestawienie odnotowanych podczas badań doświadczalnych wartości temperatur rekrytalizacji materiałów zamieszczono w tabeli 9.3.21.

Tabela 9.3.21. Wartości temperatur rekrytalizacji uzyskane w teście jednogodzinnego wygrzewania drutów o średnicy 2,5 mm otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE poddanej zabiegom międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego (0w, 1w, 2w, 3w) w temperaturze 230 °C i 300 °C w czasie 1 h

Gatunek miedzi	Ilość zabiegów międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego	Parametry odkształcenie i obróbki cieplnej drutów		Temperatura rekrytalizacji [°C]
		[°C/h]	[mm]	
Cu-ETP	0w	w = 230/1	φ8,0 → φ2,5 → T <sub>R</sub>	190
	1w		φ8,0 → φ5,0w → φ2,5 → T <sub>R</sub>	170
	2w		φ8,0 → φ5,0w → φ4,0w → φ2,5 → T <sub>R</sub>	170
	3w		φ8,0 → φ5,0w → φ4,0w → φ3,2w → φ2,5 → T <sub>R</sub>	200
Cu-OFE	0w	w = 300/1	φ8,0 → φ2,5 → T <sub>R</sub>	240
	1w		φ8,0 → φ5,0w → φ2,5 → T <sub>R</sub>	220
	2w		φ8,0 → φ5,0w → φ4,0w → φ2,5 → T <sub>R</sub>	220 - 240
	3w		φ8,0 → φ5w → φ4w → φ3,2w → φ2,5 → T <sub>R</sub>	> 240

Przeprowadzając badania doświadczalne nad wpływem wyżarzania międzyoperacyjnego na temperaturę rekrytalizacji drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP należy zaznaczyć, iż zabiegi te wykonuje się głównie w celu przywrócenia własności materiałów, a w szczególności obniżenia twardości, zwiększenia plastyczności oraz polepszenia przewodności elektrycznej właściwej. Analizując zatem zilustrowane na rysunku 9.3.131 zależności wytrzymałości na rozciąganie od temperatury wygrzewania zaobserwowano, że temperatura rekrytalizacji drutów poddanych jednemu lub dwóm zabiegom międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego (1w, 2w) jest niższa od wartości zanotowanych dla drutów, dla których nie przeprowadzono takich operacji (0w) lub zastosowano je przy średnicach 5,0 mm; 4,0 mm i 3,2 mm (por. tabela 9.3.21). Wspomniane różnicowanie wynosi dla drutów w gatunku Cu-ETP 20 – 30 °C i dla drutów z miedzi beztlenowej 20 °C. Jest to oczywiście związane nie tylko z inną strukturą materiału wywołaną dodatkowymi zabiegami wyżarzania rekrytalizującego, ale również innym stopniem odkształcenia przed końcowym wyżarzaniem rekrytalizującym.

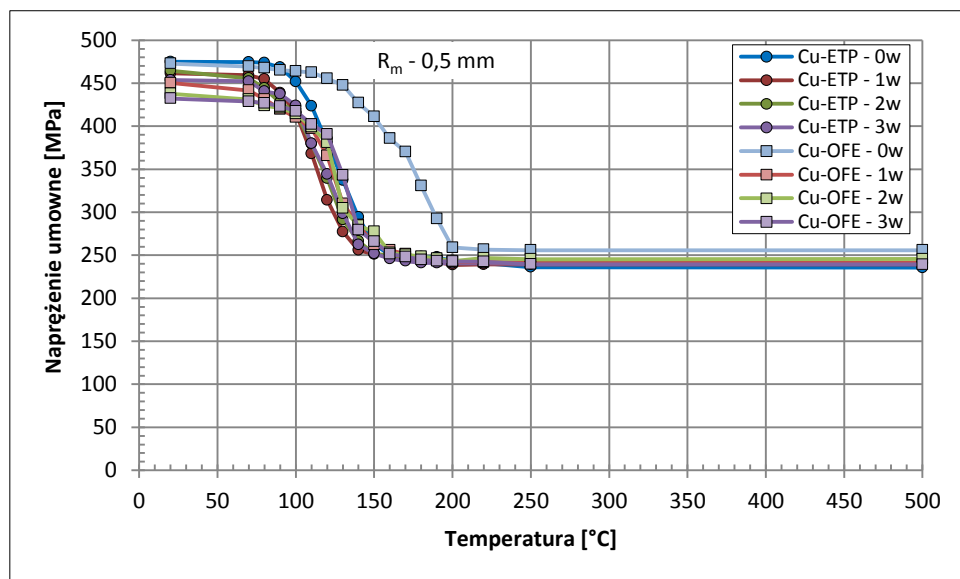
Materiałem wsadowym do badań drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP był materiał o powalcowniczej, drobnoziarnistej strukturze, dlatego też te druty wykazały niższą temperaturę rekrytalizacji. Z kolei materiałem wsadowym do badań nad wpływem wyżarzania międzyoperacyjnego na temperaturę rekrytalizacji drutów z miedzi beztlenowej były pręty uzyskane w procesie ciągłego odlewania metodą Upcast o dendrytycznej strukturze wykazującej duże ziarna. Zatem ten materiał zareagował wyższymi wartościami temperatur rekrytalizacji. Mikrostruktury przekrojów wzdłużnych drutów o średnicy 2,5 mm uzyskanych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE poddanej zabiegom międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego zilustrowano w tabeli 9.3.22.

Tabela 9.3.22. Mikrostruktura przekroju wzdłużnego drutów o średnicy 2,5 mm otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE poddanej zabiegom międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego (0w, 1w, 2w, 3w) w temperaturze 230 °C i 300 °C w czasie 1 h. Mikroskop świetlny, powiększenie × 200

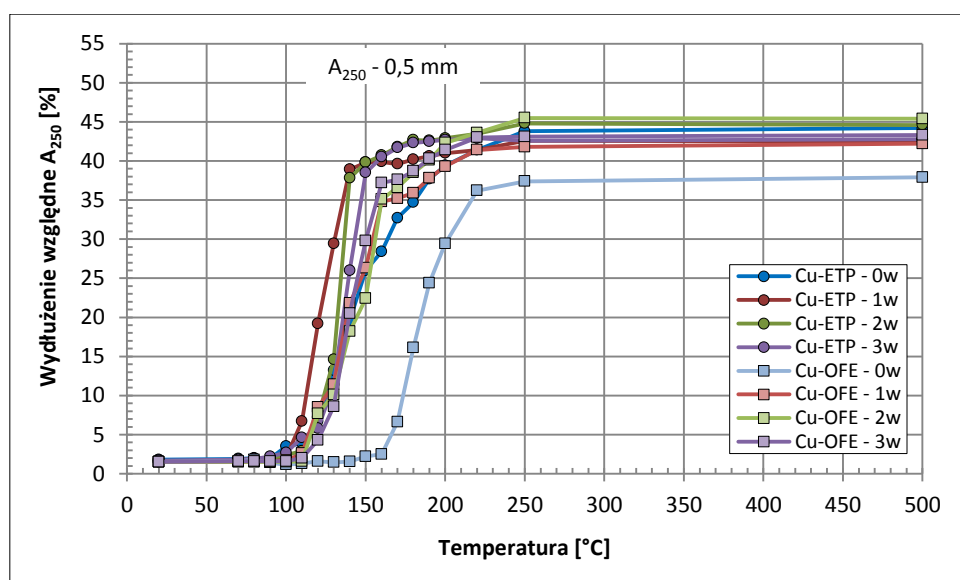


Warto nadmienić, iż charakterystyki przedstawione na ilustracjach 9.3.132 i 9.3.133 dowodzą również, że w wyniku zastosowanych zabiegów międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego dla obydwu gatunków miedzi nastąpił wzrost wydłużenia równomiernego do wartości około 35 % i wydłużenia względnego  $A_{250}$  do około 42 %.

O ile w pierwszy etapie analizy wyniki obserwacji dotyczyły drutów o średnicach 2,5 mm, które poddano odkształceniu i wyżarzaniu międzyoperacyjnemu, o tyle materiały te przed dalszym procesem ciągnięcia zostały ponownie wyżarzone, a następnie odkształcone do średnicy finalnej 0,5 mm. Na rysunkach 9.3.134 i 9.3.135 zilustrowano charakterystyki zmian własności mechanicznych odniesione do wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia względnego  $A_{250}$  omawianych drutów w postaci krzywych mięknięcia. Dane liczbowe do konstrukcji tych wykresów zamieszczono w aneksie w tabeli A9.3.12.



Rys. 9.3.134. Wytrzymałość na rozciąganie drutów o średnicach 0,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE po zabiegach międzyoperacyjnego wygrzewania rekrytalizującego (0w, 1w, 2w, 3w), w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wyżarzania



Rys. 9.3.135. Wydłużenie względne  $A_{250}$  drutów o średnicach 0,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE po zabiegach międzyoperacyjnego wygrzewania rekrytalizującego (0w, 1w, 2w, 3w), w funkcji temperatury w teście jednogodzinnego wyżarzania

Analiza wykresów przedstawionych na rysunkach 9.3.134 i 9.3.135 ukazała zbliżone przebiegi krzywych mięknięcia drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP. Zaobserwowano w nieznacznym stopniu



wpływ historii odkształcenia z pierwszego etapu badań doświadczalnych (1w, 2w, 3w) na przebiegi charakterystyk, co przejawiało się różnicą w początkowych wartościach własności mechanicznych – wytrzymałości na rozciąganie na poziomie około 11 MPa. Chociaż krzywe posiadają różne przebiegi, to w wąskim przedziale temperaturowym od 145 °C do 150 °C wszystkie materiały osiągają stan miękki (zrekrytalizowany). Analizując natomiast krzywe mięknięcia drutów z miedzi beztlenowej zauważono, że ich przebiegi są niemal identyczne. Różnica w początkowych własnościach mechanicznych – wytrzymałości na rozciąganie kształtująca się na poziomie około 20 MPa może wskazywać na różną historię odkształcenia z pierwszego etapu badań. Natomiast krzywe w zakresie  $\Delta T$  mają taki sam przebieg i osiągają temperaturę rekrytalizacji wynoszącą 160 °C.

Dokonując analizy porównawczej własności drutów w temperaturze 20 °C zauważono różne wartości wytrzymałości na rozciąganie obejmujące zakres od około 430 MPa do około 475 MPa dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE. Początek zmian własności mechanicznych dla obu gatunków miedzi jest podobny i rozpoczyna się już w temperaturze około 80 °C. W przedziale temperaturowym  $\Delta T = 70 - 160^\circ\text{C}$  zauważono spadek własności materiałów wynoszący około 200 MPa i osiągnęły one stałą wartość na poziomie około 250 MPa. Zbliżony przebieg krzywych mięknięcia drutów oraz wąski przedział, w którym materiały z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE o średnicy 0,5 mm osiągnęły wartości temperatur rekrytalizacji świadczy o tym, że oba materiały mają podobną strukturę wewnętrzną. W drutach z miedzi beztlenowej kilkukrotne zastosowanie procesów odkształcenia i międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego spowodowało „zniszczenie” odlewniczej struktury. Ponadto na podstawie analizy wykresów przedstawionych na rysunkach 9.3.134 i 9.3.135 zauważono, że im bardziej skomplikowana historia odkształcenia z pierwszego etapu badań (1w, 2w, 3w) tym bardziej materiały wykazują zbliżony przebieg krzywych mięknięcia i charakteryzują się porównywalnymi wartościami temperatur rekrytalizacji. Dla obydwu gatunków miedzi zauważono ponadto wzrost wydłużenia względnego  $A_{250}$  do wartości około 43 % (por. rys. 9.3.135).

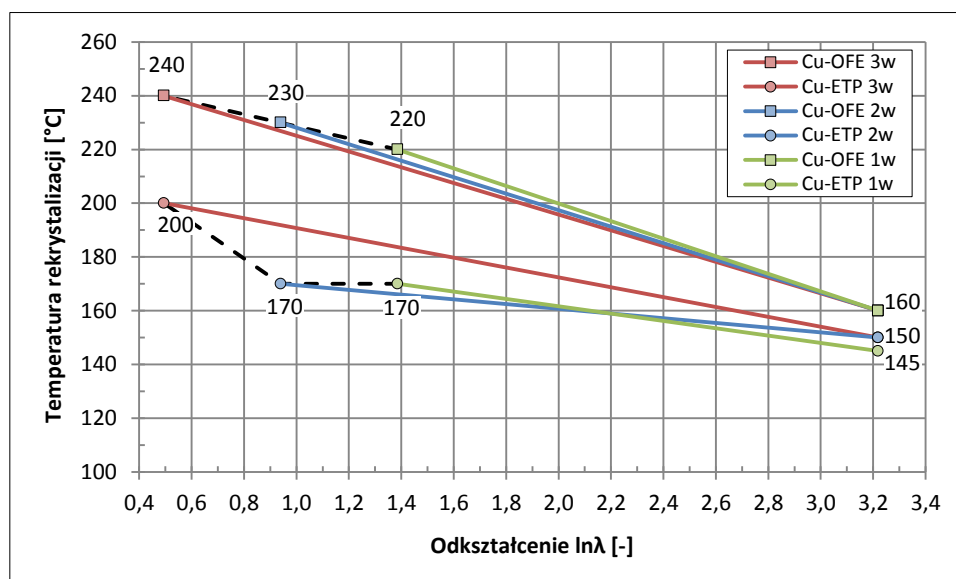
Wyznaczone w oparciu o analizę krzywych mięknięcia materiałów wartości temperatur rekrytalizacji dla drutów o średnicy 0,5 mm przedstawiono w tabeli 9.3.23.

Tabela 9.3.23. Wartości temperatur rekrytalizacji w teście jednogodzinnego wygrzewania drutów o średnicy 0,5 mm otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE poddanej zabiegom międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego (0w, 1w, 2w, 3w) w temperaturze 230 °C i 300 °C w czasie 1 h

Gatunek miedzi	Ilość zabiegów międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego	Parametry odkształcenia i obróbki cieplnej drutów		Temperatura rekrytalizacji [°C]
		[°C / h]	[mm]	
Cu-ETP	0w	w = 230/1	$\phi 8,0 \rightarrow \phi 2,5w \rightarrow \phi 0,5 \rightarrow T_R$	150
	1w		$\phi 8,0 \rightarrow \phi 5,0w \rightarrow \phi 2,5w \rightarrow \phi 0,5 \rightarrow T_R$	145
	2w		$\phi 8,0 \rightarrow \phi 5,0w \rightarrow \phi 4,0w \rightarrow \phi 2,5w \rightarrow \phi 0,5 \rightarrow T_R$	150
	3w		$\phi 8 \rightarrow \phi 5w \rightarrow \phi 4w \rightarrow \phi 3,2w \rightarrow \phi 2,5w \rightarrow \phi 0,5 \rightarrow T_R$	150
Cu-OFE	0w	w = 300/1	$\phi 8,0 \rightarrow \phi 2,5 \rightarrow \phi 0,5w \rightarrow T_R$	200
	1w		$\phi 8,0 \rightarrow \phi 5,0w \rightarrow \phi 2,5w \rightarrow \phi 0,5 \rightarrow T_R$	160
	2w		$\phi 8,0 \rightarrow \phi 5,0w \rightarrow \phi 4,0w \rightarrow \phi 2,5w \rightarrow \phi 0,5 \rightarrow T_R$	160
	3w		$\phi 8 \rightarrow \phi 5w \rightarrow \phi 4w \rightarrow \phi 3,2w \rightarrow \phi 2,5w \rightarrow \phi 0,5 \rightarrow T_R$	160

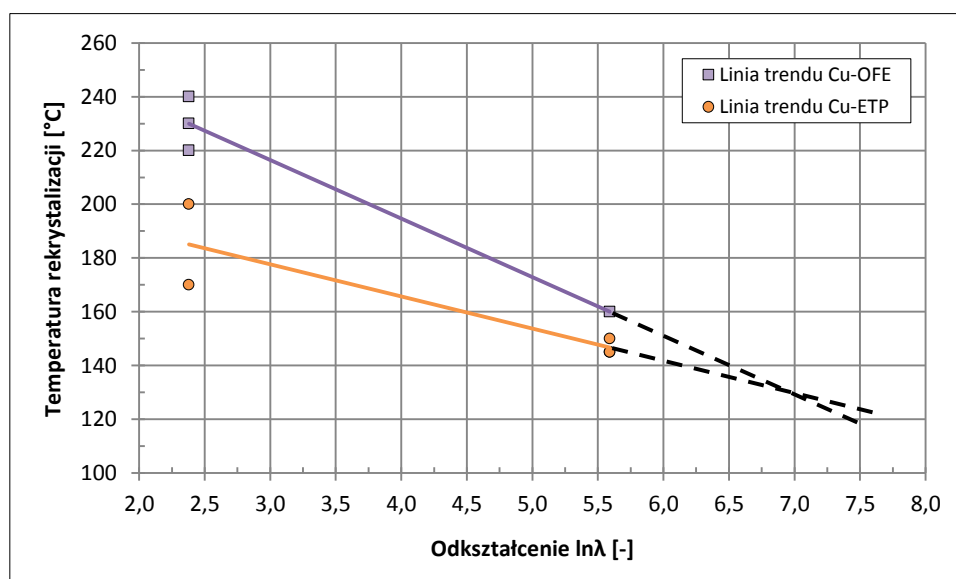
Na rysunkach 9.3.134 i 9.3.135 kolorem niebieskim zaznaczono krzywe mięknięcia badanych drutów o średnicy 0,5 mm, które uzyskane zostały w cyklu ciągnięcia bez zastosowanych zabiegów międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego – oznaczonym jako 0w. Zauważyć należy, że dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP różnica temperatury rekrytalizacji wynosi jedynie 5 °C (por. tabela 9.3.23), a przebiegi krzywych są zbliżone co jest wynikiem tego samego składu chemicznego materiału oraz podobnie ukształtowanej struktury wewnętrznej. Natomiast drut z miedzi beztlenowej z cyklu technologicznego oznaczonego jako 0w wykazał dużo większą odporność cieplną niż materiały poddane zabiegom wyżarzania w ramach operacji 1w, 2w, 3w, a ponadto różnica wartości temperatur rekrytalizacji wyniosła 40 °C (por. tabela 9.3.23). Takie zachowanie materiałów należy tłumaczyć ich różną strukturą wewnętrzną. Analizując zamieszczone w pracy wyniki badań pod kątem czynników jakie wpływają na temperaturę rekrytalizacji (m.in. skład chemiczny, rodzaj struktury wewnętrznej, historia odkształcenia) stwierdza się, że na wartość temperatury rekrytalizacji drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE zasadniczy wpływ wywiera stan strukturalny.

Zbiorną analizę problemu przedstawiono w sposób schematyczny na kolejnym rysunku 9.3.136. Są to zależności temperatury rekrytalizacji drutów w funkcji wielkości odkształcenia rzeczywistego. Zaprezentowano dwie grupy wykresów: górne dotyczące drutów z miedzi beztlenowej, dolne – drutów uzyskanych z miedzi po procesie walcowania na gorąco.



Rys. 9.3.136. Wykresy ilustrujące wpływ odkształcenia rzeczywistego na wartość temperatury rekrytalizacji drutów o średnicach 2,5 mm i 0,5 mm otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE poddanej zabiegom międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego (0w, 1w, 2w, 3w) w temperaturze 230 °C i 300 °C w czasie 1 h

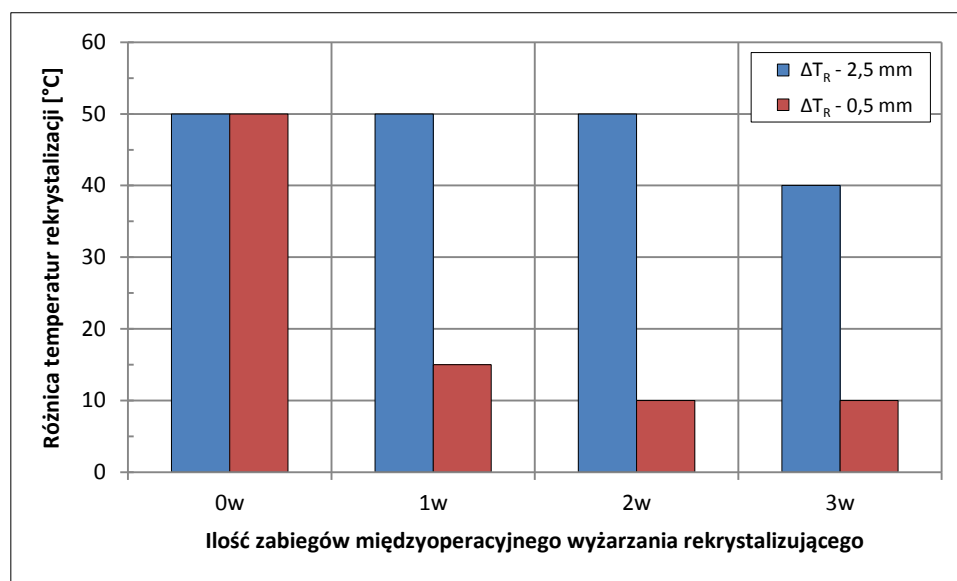
Na podstawie analizy ilustracji 9.3.136 zauważono, że już zastosowanie pierwszego wariantu międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego oznaczonego jako 1w dla materiałów o średnicach 2,5 mm spowodowało wystąpienie różnicy wartości temperatur rekrytalizacji na poziomie 40 °C. Dzięki unormowaniu struktury poprzez obróbkę cieplną, materiały przy dalszym odkształceniu charakteryzują się wartościami temperatur rekrytalizacji, których końcowa różnica kształtuje się na poziomie około 10 – 15 °C. Z kolei na rysunku 9.3.137 przedstawiono linie trendu (linie przerywane) zanotowanych dla drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP wartości temperatur rekrytalizacji.



Rys. 9.3.137. Linie trendu wartości temperatur rekrytalizacji dla drutów o średnicach 2,5 mm i 0,5 mm z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP

Ekstrapolując wyznaczone linie trendu zaobserwowano, że ich przecięcie następuje w punkcie równym około  $\ln\lambda = 6,75$ . Można zatem przypuszczać, że poddanie prętów odpowiednio dużemu odkształceniu doprowadzi do zrównania się temperatur rekrytalizacji obydwu gatunków miedzi. W przypadku średnicy początkowej 8 mm nastąpi to przy średnicy około 0,3 mm.

Podsumowując tę część badań doświadczalnych należy nadmienić, iż wraz ze wzrostem ilości zabiegów obróbki cieplnej wzrasta temperatura rekrytalizacji materiałów. Zauważono to szczególnie wyraźnie dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP. Efekt ten wynika z małej siły pędnej do procesu rekrytalizacji oraz z rozrostu ziarna podczas kolejnych zabiegów obróbki cieplnej. Na rysunku 9.3.138 ukazana różnica wartości temperatur rekrytalizacji drutów w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP w funkcji ilości zabiegów międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego dodatkowo potwierdza powyższe stwierdzenia.



Rys. 9.3.138. Różnica wartości temperatur rekrytalizacji drutów w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP w funkcji ilości zabiegów międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego

Wraz ze wzrostem ilości zabiegów międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego następuje zmniejszanie się różnic w wartościach temperatur rekrytalizacji drutów obydwu gatunków miedzi. Zabiegi wygrzewania międzyoperacyjnego symulują procesy przeróbki plastycznej na gorąco.

Przedstawione w podrozdziale 9.3 wyniki badań doświadczalnych nad odpornością cieplną drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP obejmują charakterystykę wpływu pierwiastków zanieczyszczeń oraz tlenu na zdolność do przetwórstwa i kształtowanie temperatury rekrytalizacji materiałów. Zamieszczone wyniki prac dostarczyły informacji na temat wpływu stanu strukturalnego materiału wsadowego otrzymanego w procesie ciągłego odlewania z zastosowaniem zmiennych parametrów technologicznych na podatność drutów do wyżarzania. Praktyczny aspekt odporności cieplnej miedzi wysokiej czystości chemicznej znajduje swoje miejsce w potrzebie zmiany parametrów procesu wyżarzania materiału w przemysłowych liniach ciągniczych.

### 9.3.8. Podsumowanie

Przedmiotem podrozdziału 9.3 była analiza wyników badań zmierzająca do identyfikacji odporności cieplnej drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP. W szczególności badania doświadczalne przedstawione w ramach siedmiu części tematycznych zostały przeprowadzone zarówno pod kątem analizy wpływu rodzaju materiału wsadowego do procesu ciągnięcia, jego składu chemicznego oraz zastosowanego umocnienia odkształceniowego, jak również stanu strukturalnego na podatność do wyżarzania i kształtowanie temperatury rekrytalizacji materiałów. W opracowaniu obok rozważań teoretycznych i syntetycznej prezentacji wiedzy literaturowej na ten temat przedstawiono wyniki oryginalnego autorskiego programu badań prętów i walcówek pochodzących z procesów technologicznych w liniach Upcast, Rautomead, DCC-AGH i Contirod oraz wytworzonych z nich

drutów.

Analiza wyników badań doświadczalnych, których celem była wstępna ocena podatności do wyżarzania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz Cu-OFE z technologii Upcast wykazała, że walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP o różnym składzie chemicznym poddane testowi wydłużenia sprężyny uzyskują wyniki na poziomie średnio 456 mm, co kwalifikuje je jako znakomite materiały z punktu widzenia wyżarzalności. Zróżnicowanie podatności do wygrzewania tych materiałów zaobserwowano natomiast w bardziej rygorystycznym pod względem warunków przeprowadzania teście AR. Z kolei poddany tym samym procedurom badawczym pręt uzyskany w procesie ciągłego odlewania metodą Upcast charakteryzuje się w teście TWS wydłużeniem sprężyny na poziomie około 20 mm, natomiast podczas testu AR – odpowiednio wartością wydłużenia całkowitego na poziomie około 3 – 4 %, co według wymagań określonych w normach i ogólnie przyjętych dokumentach określających procedury ich przeprowadzania dyskwalifikuje ten materiał z punktu widzenia poprawnej podatności do procesu wyżarzania. Oprócz wykorzystania standardowych procedur dwóch wymienionych alternatywnych testów stosowanych powszechnie w praktyce przemysłowej badane materiały poddano także standardowej procedurze stosowanej w laboratoriach badawczych polegającej na teście wyżarzalności w czasie jednej godziny. Przy jego pomocy wykazano, że druty o średnicach 2,5 mm uzyskane z prętów z miedzi beztlenowej charakteryzują się wyższą temperaturą rekrytalizacji o około 50 °C w stosunku do materiałów otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP. Odczytane na podstawie analizy krzywych mięknięcia drutów badanych w teście jednogodzinnego wygrzewania w charakterze zależności granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie równomierne i wydłużenie względne  $A_{250}$  w funkcji temperatury, wartości temperatury rekrytalizacji dla miedzi w gatunku Cu-OFE na poziomie około 240 °C i dla miedzi tlenowej – 190 °C zostały dodatkowo potwierdzone w badaniach kalorymetrycznych. Powyższe wstępne obserwacje dotyczące zachowania się dwóch gatunków miedzi pod kątem ich podatności do wyżarzania wskazują na dwie główne przyczyny ich zróżnicowania – jedną dotyczącą składu chemicznego materiałów, natomiast drugą odmiennego stanu strukturalnego. Otóż miedź tlenowa charakteryzuje się stanem strukturalnym wykształconym w wyniku procesu walcowania na gorąco z kilkunastokrotną rekrytalizacją dynamiczną, natomiast materiał beztlenowy – w procesie ciągłego odlewania. Stwierdzono, iż drugim istotnym czynnikiem, który może decydować o podatności tych materiałów do procesów wyżarzania rekrytalizującego w warunkach statycznych jest ich stan strukturalny. Stąd też, konieczna była detaliczna rewizja czynników wpływających na temperaturę rekrytalizacji miedzi w odniesieniu do badanych w ramach niniejszej dysertacji różnych materiałów wsadowych dedykowanych do dalszego przetwórstwa plastycznego na druty.

Znalazło to wyraz w przeprowadzonej w dysertacji analizie wpływu zanieczyszczeń i tlenu na temperaturę rekrytalizacji drutów z omawianych dwóch gatunków miedzi, która wykazała wpływ rodzaju, ilości oraz procentowego udziału pierwiastków zanieczyszczeń na podatność miedzi do procesów rekrytalizacji. Tym samym przeprowadzona analiza literaturowa zagadnienia oraz wyniki badań doświadczalnych pozwoliły na stwierdzenie ścisłej zależności wpływu zawartości tlenu na temperaturę rekrytalizacji miedzi od poziomu zanieczyszczeń. W przypadku miedzi w gatunku Cu-ETP jako materiału o klasie czystości 3N wpływ ten jest korzystny, ponieważ dodatek tlenu reaguje z domieszkami, które najczęściej znajdują się w roztworze i wiąże je w wydzielenia posiadające tendencję do lokalizacji na granicach ziaren. Z kolei w przypadku miedzi wysokiej czystości chemicznej tlen pełni funkcję zanieczyszczenia, który swoją obecnością wpływa niekorzystnie na procesy rekrytalizacji. Należy przy tym zaznaczyć, iż w przypadku analizy wpływu tlenu na temperaturę rekrytalizacji istotne jest określenie jego procentowego udziału w sumarycznej zawartości wszystkich pierwiastków zanieczyszczeń. Ponadto badania przeprowadzane na drutach uzyskanych z materiałów wsadowych w postaci katod i walcówek, z których każdy charakteryzował się innym poziomem zanieczyszczeń, w tym tlenu wykazały, że wzrost zawartości domieszek w miedzi prowadzi do zmniejszenia się kinetyki procesu rekrytalizacji. Zauważono, że im więcej jest zanieczyszczeń w materiale, tym krzywa mięknięcia charakteryzuje się większym zakresem temperatur mięknięcia.

O jakości wyrobów uzyskiwanych metodami przeróbki plastycznej na zimno decyduje nie tylko jakość materiałów wsadowych (rodzaj i ilość pierwiastków zanieczyszczeń, czystość powierzchni zewnętrznych), którymi w odniesieniu do segmentu wyrobów z miedzi przeznaczonej na cele elektryczne są tradycyjna walcówka w gatunku Cu-ETP oraz wsad odlewany z miedzi beztlenowej bazujące na katodach o najwyższej czystości chemicznej, ale również parametry przyjętych technologii

ich wytwarzania i przetwarzania. Wobec powyższego w pracy oprócz wpływu czynników materiałowych na zdolność do obróbki cieplnej i kształtowanie temperatury rekrytalizacji drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE obserwacjom poddano także wpływ umocnienia odkształceniowego. Stwierdzono, że druty uzyskane z miedzi beztlenowej z linii Upcast charakteryzują się wyższą temperaturą rekrytalizacji w porównaniu z drutami uzyskanymi z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP bez względu na wielkość umocnienia odkształceniowego, przy czym przebiegi charakterystyk mięknięcia dla drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE wykazują dwa zakresy. Pierwszy o wolniejszym spadku własności mechanicznych w funkcji temperatury wygrzewania jest efektem procesów zdrowienia struktury odlewniczej oraz drugi – charakteryzujący się już bardziej dynamicznym spadkiem własności, właściwym dla procesu rekrytalizacji. Stąd też nasuwa się wniosek, że w przypadku materiałów o strukturze odlewniczej proces rekrytalizacji jest poprzedzony etapem zdrowienia, który nie występuje w przypadku drutów uzyskanych z miedzi z linii Contirod. Stwierdzono także, że obserwowany dwuzakresowy charakter krzywych mięknięcia zanika dla drutów o większym umocnieniu odkształceniowym – na poziomie powyżej  $\ln\lambda = 0,9$ . Na podstawie analizy omawianych charakterystyk mięknięcia, której celem było wyznaczenie wartości temperatur rekrytalizacji drutów uzyskanych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead oraz Cu-ETP z technologii Contirod stwierdzono, że dynamika procesu rekrytalizacji poddanych badaniom materiałów zależy od ich stanu strukturalnego. W przypadku drutów z miedzi beztlenowej stwierdzono większy temperaturowy zakres mięknięcia niż w przypadku drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP. Wraz ze wzrostem wielkości odkształcenia zmniejsza się on z poziomu około 120 °C do wartości około 60 °C, podczas gdy dla miedzi tlenowej kształtuje się na poziomie średnio około 40 °C. Zaobserwowano zatem, że omawiany temperaturowy zakres rekrytalizacji drutów z miedzi beztlenowej zależy w większym stopniu od wielkości umocnienia odkształceniowego aniżeli w przypadku drutów otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP po linii Contirod. Powyższe stwierdzenia wynikające z przeprowadzonych badań doświadczalnych stwarzają podstawę do rewizji dotychczas stosowanej praktyki podczas produkcji drutów miedzianych w przemysłowych warunkach zakładów kablowych. W szczególności kontroli powinna być poddana praktyka związana z procesem żarzenia drutów w liniach ciągniczych. W przypadku wytwarzania drutów z miedzi beztlenowej uzyskanej w linii Upcast bądź Rautomead z uwagi na wyższą temperaturę rekrytalizacji w porównaniu z tradycyjnie stosowaną miedzią w gatunku Cu-ETP należy stosować wyższy prąd w liniach żarowniczych.

Ważną część badań nad określeniem odporności cieplnej drutów z miedzi stanowi analiza wpływu, jaki wywiera na strukturę, a w związku z tym na własności mechaniczne zmiana warunków krystalizacji metalu w procesie odlewania. Badania realizowane na drutach uzyskanych z prętów z miedzi beztlenowej z instalacji Upcast, Rautomead oraz DCC-AGH przy wykorzystaniu technologii ciągłego odlewania prowadzono zarówno pod kątem zmiennych prędkości odlewania, jak i wielkości przepływu wody chłodzącej. Uzyskane wyniki dowiodły, że druty o średnicach 2,5 mm otrzymane z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead rekrytalizują w sposób całkowity w jednakowej temperaturze wynoszącej 240 °C. Zanotowane subtelne różnice pomiędzy badanymi drutami bazującymi na prętach uzyskanych w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych, jak i laboratoryjnych polegają na zróżnicowaniu kąta nachylenia krzywych mięknięcia. Druty uzyskane z materiałów wsadowych przy szybkości odlewania 0,5 m/min. i 1,0 m/min. w nieco niższych temperaturach zaczynają reagować obniżeniem własności mechanicznych. Przykładowo wytrzymałość na rozciąganie drutów otrzymanych w procesie odlewania z szybkością 1,0 m/min. zaczyna się zmniejszać w temperaturze 160 – 180 °C, podczas gdy dla drutów uzyskanych z prętów z procesu ciągłego odlewania przy zastosowaniu większych prędkości pierwsze spadki własności wytrzymałościowych odnotowuje się dla temperatury około 190 °C. Oznacza to, że różnice strukturalne drutów uzyskanych z materiałów wsadowych odlanych z prędkościami 0,5 m/min. i 1,0 m/min., które ujawniono identyfikując materiały wsadowe, zachowują się w procesie przeróbki plastycznej na zimno i wpływają na przebieg krzywych mięknięcia w procesie rekrytalizacji drutów po odkształceniu. Z kolei w stosunku do drugiej grupy materiałów, którą stanowią druty o średnicach 2,5 mm otrzymane z prętów pochodzących z procesu ciągłego odlewania w warunkach laboratoryjnych na instalacji DCC-AGH przy zachowaniu niskich szybkości wynoszących od 0,006 m/min. do 0,2 m/min. zauważono najwyższe wartości temperatur rekrytalizacji kształtujące się na poziomie około 320 °C. Powodem tak wysokiej odporności cieplnej materiału jest jego ukierunkowana budowa strukturalna, charakteryzująca się małą ilością wydłużonych w stronę odprowadzanie ciepła – tj. wzdłuż osi materiału – ziaren i granic

pomiędzy nimi.

W pracy oprócz zastosowania zmiennych parametrów procesu odlewania materiałów wsadowych do procesu ciągnięcia poddano je także ingerencję zmiennej temperatury. Badając podatność drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE do wyżarzania zaobserwowano spadek własności wytrzymałościowych z poziomu około 450 MPa do około 250 MPa, zarówno dla drutów powstałych z walcówek i prętów wyżarzonych w temperaturach 100 °C, 400 °C, jak i 900 °C. Na uwagę zwracają charakterystyki drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE przesunięte względem przebiegów zanotowanych dla miedzi tlenowej w stronę wyższych temperatur, co dowodzi ujawnionej już na wcześniejszym etapie pracy wyższej odporności cieplnej tego materiału. Analiza krzywych mięknięcia jednoznacznie wskazała, iż temperatura rekrytalizacji w przypadku drutów uzyskanych z wygrzewanych w temperaturach 100 °C i 400 °C prętów z miedzi Cu-OFE jest wyższa od wartości zanotowanych dla miedzi gatunku Cu-ETP o około 30 °C i o około 10 °C – w przypadku drutów uzyskanych z materiałów poddanych zabiegom obróbki cieplnej w temperaturze 900 °C. Ponadto temperatura rekrytalizacji drutów uzyskanych z walcówki wygrzewanej w temperaturach 100 °C i 400 °C jest na niższym poziomie niż wartość odnotowana dla drutów bazujących na walcówce wyżarzanej w temperaturze 900 °C. W przypadku miedzi z linii Upcast jest na odwrót – druty powstałe z prętów obrabianych cieplnie w temperaturach 100 °C i 400 °C charakteryzują się wyższą temperaturą rekrytalizacji niż te powstałe z prętów wyżarzanych w temperaturze 900 °C. Wobec faktu, iż znaczna ilość zarodków rekrytalizacji tworzy się na granicach ziaren to jeżeli ich liczba jest większa to sam proces rekrytalizacji zachodzi wówczas przy niższej temperaturze i jest bardziej dynamiczny. Miedź beztlenujona jako materiał charakteryzujący się większym ziarnem, a tym samym mniejszą ilością granic pomiędzy nimi tj. mniejszą ilością miejsc uprzywilejowanych do zarodkowania wymaga wyższej temperatury, aby zapoczątkować mechanizmy rekrytalizacji. Zatem wobec uzyskanych wyników, podobnie jak w poprzednich etapach badań nad odpornością cieplną drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE stawiając pytanie o przyczynę występowania różnicy w wartościach temperatury rekrytalizacji należy identyfikować ją głównie ze zmianami stanu strukturalnego próbek poddanych wyżarzaniu.

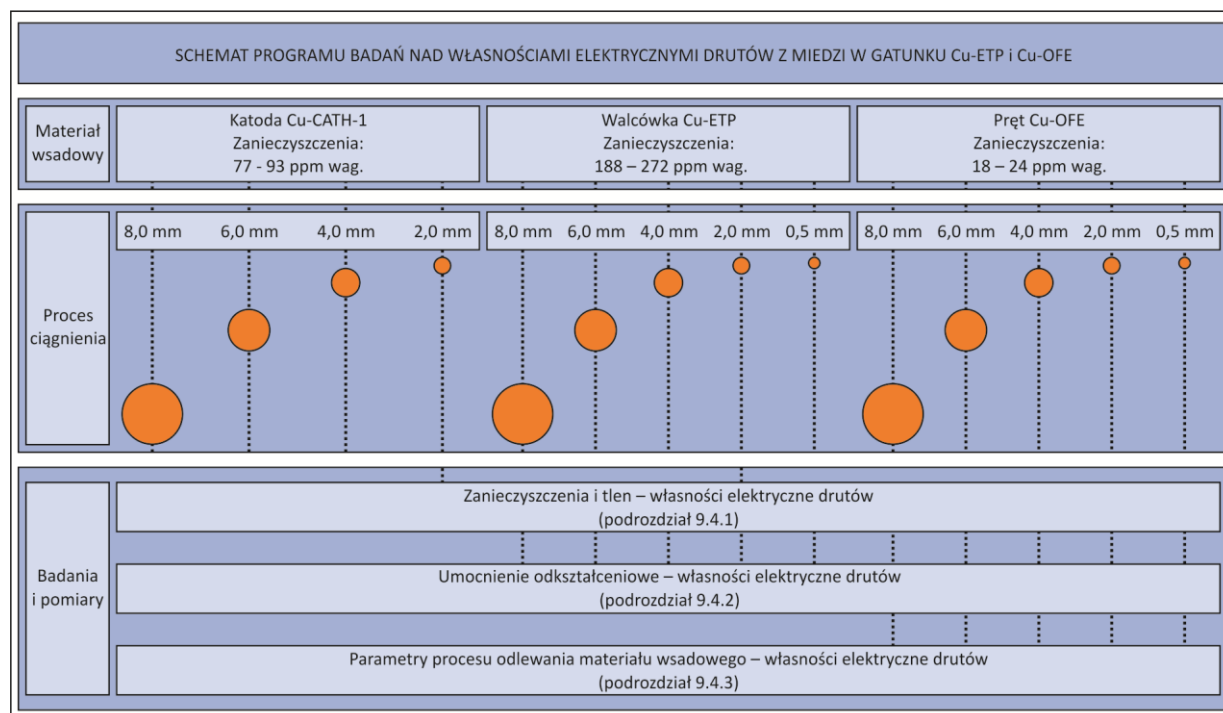
Całość przeprowadzonej w ramach podrozdziału 9.3 analizy badań nad odpornością cieplną miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP uzupełniają obserwacje dotyczące wpływu zabiegów wyżarzania międzyoperacyjnego na kształtowanie temperatury rekrytalizacji drutów z dwóch gatunków miedzi. Pierwszy etap badań doświadczalnych wykazał, że wzrost ilości zabiegów wyżarzania międzyoperacyjnego powoduje wzrost temperatury rekrytalizacji materiałów i obniżenie ich własności mechanicznych. Efekt ten podyktowany jest małą siłą pędna do zajścia procesu rekrytalizacji wraz z rozrostem ziarna podczas kolejnych zabiegów obróbki cieplnej. Odnotowano, że rekrytalizacja drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP zachodzi w węższym zakresie temperatur (mniejszy interwał temperaturowy) niż rekrytalizacja drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE. Jak nadmieniono już na wcześniejszym etapie badań doświadczalnych, druty uzyskane z walcówki z technologii Contirod charakteryzują się niższą temperaturą rekrytalizacji niż druty z miedzi Upcast pomimo, że miedź w gatunku Cu-OFE charakteryzuje się wyższą czystością chemiczną. Ponadto wraz ze wzrostem odkształcenia różnica ta maleje. Powyższa obserwacja wynika z faktu, że wzrost umocnienia odkształceniowego powoduje zwiększenie ilości granic ziaren w materiale. Na zakończenie niniejszego podsumowania warto podkreślić, że przeprowadzona analiza wyników badań materiałów z dwóch gatunków miedzi poddanych takiemu samemu schematowi odkształcenia i obróbki cieplnej jednoznacznie wykazała, że w rozpatrywanym przypadku to struktura wewnętrzna, a nie skład chemiczny materiału ma decydujący wpływ na wartość jego temperatury rekrytalizacji. Powyższa obserwacja po raz kolejny dowodzi słuszności postawionej w pracy tezy.

#### 9.4. Badania własności elektrycznych drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP

Wzrost konkurencyjności rynku i wymagań klientów sprawia, że prowadzone współcześnie badania w wielu światowych instytutach naukowych i laboratoriach zakładów przemysłu miedziowego, kablowego i elektronicznego ukierunkowane są na dążenie do ciągłego wzrostu przewodności elektrycznej miedzi w zastosowaniach na druty i mikrodruty. Prace te trwają począwszy od 1913 roku kiedy według międzynarodowego systemu standardów IACS (International Annealed Copper Standard)

określono, iż minimalna wartość przewodności elektrycznej miedzi dedykowanej dla celów technicznych wynosi 58,00 MS/m, co stanowi 100 %IACS [127] i względem tej wartości zaczęto wyznaczać konduktywność wszystkich innych materiałów przewodzących. Produkowana dzisiaj na skalę przemysłową miedź o klasie czystości 5N (99,999 %) charakteryzuje się wartością przewodności elektrycznej na maksymalnym poziomie 103 %IACS. Zauważalna jest zatem kształtująca się na przestrzeni lat dominująca tendencja wzrostu wartości konduktywności miedzi wysokiej czystości chemicznej znajdującej zastosowanie w branży drutów miedzianych dedykowanych do celów elektrotechnicznych. Ponadto szacuje się, że w ciągu najbliższego dziesięciolecia poziom ten zwiększy się do wartości około 105 %IACS. Należy zaznaczyć, iż o jakości wyrobów uzyskiwanych z miedzi metodami przeróbki plastycznej na zimno decydują nie tylko parametry przyjętych technologii ich wytwarzania, ale również i przede wszystkim jakość materiałów wsadowych, którymi w odniesieniu do segmentu wyrobów przeznaczonych do aplikacji elektrotechnicznych są tradycyjna walcówka uzyskiwana głównie z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz wsad odlewany z miedzi beztlenowej. Poziom, stabilność i powtarzalność własności mechanicznych oraz stanu strukturalnego tych materiałów zależy od stabilności termicznej linii produkcyjnych (Contirod – walcówka; Upcast, Rautomead, DCC-AGH – pręty) i jest decydujący o przebiegu dalszych procesów ich przetwarzania. Stan cieplny linii wynika z kolei z poziomu i stabilności założonych parametrów wszystkich etapów technologii, a poza tym m.in. temperatury ciekłego metalu, temperatury i wydatku wody chłodzącej krystalizator, prędkości odlewania, parametrów procesu walcowania, powtarzalności materiałów eksploatacyjnych itd. Z kolei o poziomie i powtarzalności własności elektrycznych drutów decyduje natomiast jakość katody – rodzaj i ilość pierwiastków zanieczyszczeń oraz czystość jej powierzchni zewnętrznych. Materiały wsadowe w postaci walcówek i prętów przeznaczone są do procesów ciągnięcia (druty okrągłe i profilowe), walcowania (druty profilowe) lub do procesu ciągłego wyciskania metodą Conform (wyroby okrągłe i profilowe). Wymienione procesy narzucają dodatkowe wymagania względem jakości materiałów wsadowych.

Tematyka niniejszego podrozdziału obejmuje analizę wyników badań własności elektrycznych drutów z dwóch gatunków miedzi pod kątem wpływu zarówno składu chemicznego materiału, jak również przyjętych parametrów procesów technologicznych związanych z wytworzeniem i przetworzeniem materiałów wsadowych w postaci walcówek i prętów na druty o różnych średnicach. Na rysunku 9.4.1 zilustrowano schematycznie, dla przypomnienia, program badań doświadczalnych realizowanych w tej części dysertacji.



Rys. 9.4.1. Schemat ogólny programu badań doświadczalnych nad własnościami elektrycznymi drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Analiza dotycząca kształtowania własności elektrycznych drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP w ramach pierwszego z podrozdziałów została przeprowadzona pod kątem wpływu zawartości zanieczyszczeń i tlenu. Na rysunkach 9.4.2 i 9.4.3 zilustrowano wykresy wpływu ilości zanieczyszczeń na kształtowanie przewodności elektrycznej miedzi w gatunku Cu-ETP według Addicksa [205, 206]. Z kolei ilustracje 9.4.4 i 9.4.5 obrazują zależności konduktywności od zawartości tlenu zgodnie z wynikami badań doświadczalnych Addicksa [205], Antisellego [207], Hansona [208] oraz Popsa [136]. Na rysunku 9.4.6 przedstawiono wyniki obserwacji Smarta [126] dotyczące kształtowania własności elektrycznych miedzi w gatunku Cu-OFE w odniesieniu do różnej zawartości atomów pierwiastków domieszek, natomiast na rysunku 9.4.7 w stosunku do wytypowanych zanieczyszczeń – siarki, selenu i teluru. W podrozdziale 9.4.1 w oparciu o charakterystyki ukazane na ilustracji 9.4.8 przedstawiono także wyniki pracy Martinez [143] dotyczące analizy wpływu zabiegów wyżarzania na własności elektryczne drutów uzyskanych z materiałów o zróżnicowanych poziomach domieszek. W tabeli 9.4.1 zamieszczono skład chemiczny badanych materiałów wg Armstronga [114], natomiast ilustracje graficzne wpływu zawartości tlenu na przewodność elektryczną miedzi przedstawiono na rysunku 9.4.9. W dalszej części pracy dokonano całościowej charakterystyki porównawczej wyników wzrostu rezystywności wywołanej wpływem poszczególnych domieszek uzyskanych w pracach Smarta [124 – 126], Pawleka [206] i Hessa [211], które zamieszczono w tabeli 9.4.2. Analiza wyników w postaci ilustracji graficznej zawarta została na rysunku 9.4.10.

W ramach podrozdziału 9.4.1 oprócz analizy literaturowej wpływu zanieczyszczeń i tlenu na własności elektryczne miedzi zamieszczono także wyniki badań doświadczalnych, którym poddano pięć rodzajów drutów uzyskanych z materiałów wsadowych w postaci katod i walcówek o różnych poziomach atomów domieszek. W tabeli 9.4.3 zamieszczono wyniki badań rezystywności materiałów o średnicach 2,0 mm; natomiast ilustrację graficzną stanowią przedstawione na rysunku 9.4.11 wykresy jako zależności rezystywności od zawartości wagowej pierwiastków domieszek. Uzupełnieniem analizy są także przedstawione na ilustracji 9.4.12 wyniki obliczeń względnej oporności dla badanych drutów.

W ramach podrozdziału 9.4.2 analizie poddano wpływ umocnienia odkształceniowego na własności elektryczne drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z linii ciągłego topienia, odlewania i walcownia Contirod oraz ciągłego odlewania Upcast i Rautomead. W tabeli 9.4.4 zamieszczono odnotowane dla walcówki i prętów wartości rezystywności elektrycznej według normy PN-EN 1977:2000 [8] oraz otrzymane w wyniku realizacji badań własnych. Na rysunku 9.4.13 zilustrowano wykresy zależności rezystywności elektrycznej od wielkości odkształcenia rzeczywistego dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE. Interpretację charakterystyk stanowią krzywe ukazane na kolejnej ilustracji – 9.4.14 dotyczące procentowej zmiany rezystywności drutów o średnicach od 8,0 mm do 0,5 mm. Z kolei na rysunkach 9.4.15 i 9.4.16 zaprezentowano zależności odwrotne, czyli konduktywności materiałów w funkcji odkształcenia rzeczywistego, przy czym wartości przewodności elektrycznej przedstawione na drugiej z ilustracji zostały odniesione do skali IACS.

Kolejny podrozdział – 9.4.3 dotyczy analizy wpływu parametrów procesu odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na własności elektryczne drutów o średnicach od 8,0 mm do 0,5 mm. Na rysunkach 9.4.17 i 9.4.18 zilustrowano wykresy zależności rezystywności elektrycznej drutów od wielkości odkształcenia oraz od prędkości odlewania prętów z miedzi beztlenowej. Na ilustracjach 9.4.19 i 9.4.20 przedstawiono wykresy procentowej zmiany rezystywności drutów od wielkości odkształcenia i od szybkości odlewania materiałów wsadowych w liniach technologicznych Upcast i DCC-AGH. Ukazane na rysunkach 9.4.21 – 9.4.24 krzywe dotyczą natomiast zależności odwrotnych, czyli zmiany przewodności elektrycznej od wielkości odkształcenia i od prędkości odlewania prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE, przy czym wartości konduktywności ukazane na rysunkach 9.4.23 i 9.4.24 podano zgodnie z międzynarodową skalą IACS.

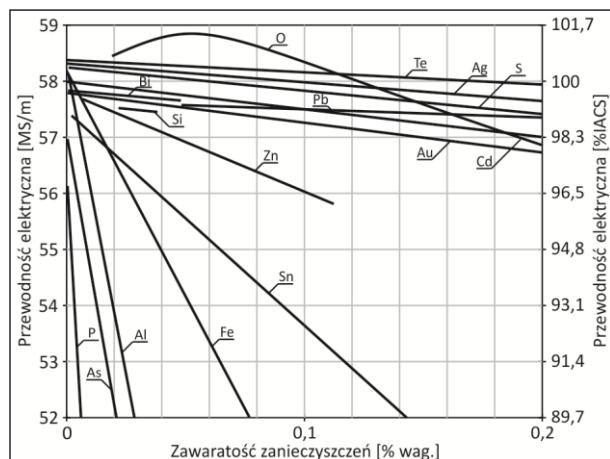
Analiza przeprowadzonych badań własności elektrycznych drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP zakończona została podsumowaniem ujętym w ramach podrozdziału 9.4.4.

#### 9.4.1. Analiza wpływu zanieczyszczeń i tlenu na własności elektryczne drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP

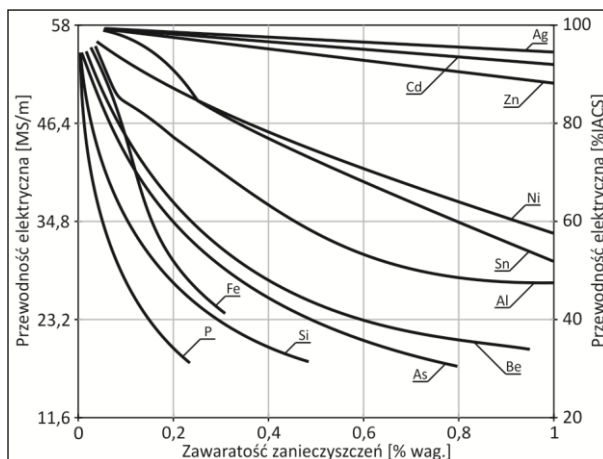
Badania doświadczalne nad wpływem zanieczyszczeń zawartych w miedzi na przewodność elektryczną materiału od zawsze były przedmiotem wielu analiz i obserwacji eksperymentalnych. Na podstawie ogólnie istniejącej wiedzy na ten temat wiadomo, że wpływ ten jest zawsze ujemny,



aczkolwiek w stopniu niejednakowym. Prekursorskie badania, w wyniku realizacji których stwierdzono, że tlen może powodować wzrost przewodności elektrycznej miedzi w gatunku Cu-ETP przeprowadził Addicks [205] w 1906 roku, na podstawie których stwierdził, że zawartość 0,057 % (tj. 570 ppm wag.) tlenu powoduje maksymalny możliwy do uzyskania wzrost konduktywności materiału do wartości 58,87 MS/m (101,5 %IACS), podczas gdy wszystkie inne zanieczyszczenia powodują jednolity spadek. Wyniki obserwacji zilustrowane na rysunku 9.4.2 odniesione zostały do maksymalnej zawartości 0,2 % domieszek, natomiast ukazane na ilustracji 9.4.3 stanowią kontynuację badań autora tym razem w odniesieniu do wpływu większej ilości zanieczyszczeń – na poziomie do 1,0 %.



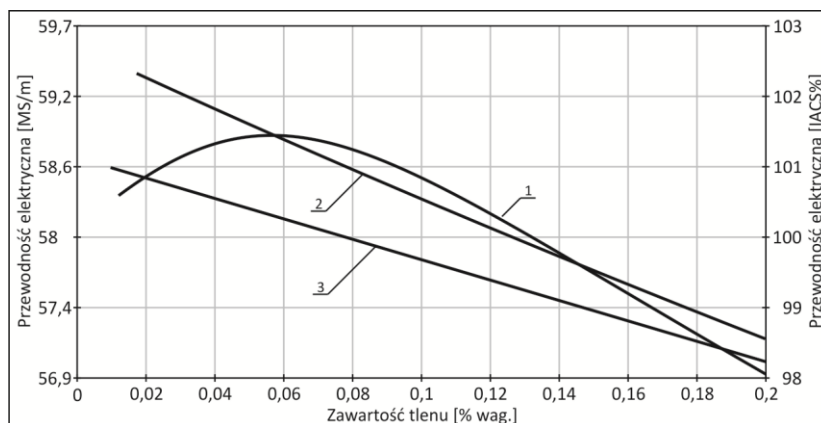
Rys. 9.4.2. Wpływ zanieczyszczeń (0 - 0,2 %) na przewodność elektryczną miedzi w gatunku Cu-ETP wg Addicksa [205]



Rys. 9.4.3. Wpływ zanieczyszczeń (0 - 1,0 %) na przewodność elektryczną miedzi w gatunku Cu-ETP wg Addicksa [206]

Na podstawie analizy powyższych wykresów zaobserwowano, że już niewielkie ilości pierwiastków atomów domieszek w gwałtowny i liniowy sposób mogą znacząco obniżyć przewodność elektryczną miedzi oraz jak wykazano w podrozdziale 9.3 niniejszej pracy zahamować proces rekryształizacji. Na ogół obowiązuje reguła, że przewodność elektryczną miedzi najbardziej zmniejszają te dodatki stopowe, które tworzą z materiałem roztwory stałe, najmniej zaś te, które występują w postaci osobnej fazy, jak na przykład bizmut i ołów.

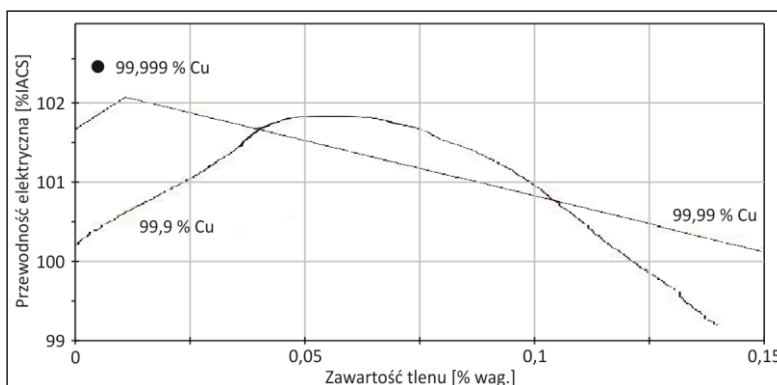
Także Antiselle prowadził badania na temat wpływu zawartości tlenu w miedzi na kształtowanie własności elektrycznych materiału. W swojej pracy [207] przedstawił wyniki eksperymentalne stanowiące opozycję do rezultatów badań Addicksa, bowiem wykazał, że przewodność elektryczna miedzi maleje wraz ze wzrostem zawartości tlenu od 0,015 % do 0,2 % (tj. 150 - 2000 ppm wag.). Podobne obserwacje w swojej pracy zamieścił także Hanson [208]. Poddając jednak interpretacji przedstawione przez wymienionych naukowców wyniki należy uwzględnić, iż autorzy nie zamieścili w swoich pracach informacji o klasie czystości miedzi poddanej badaniom. Ilustrację graficzną wpływu tlenu na konduktywność miedzi w stanie wyżarzonym według Addicksa [205], Antisellego [207] i Hansona [208] zilustrowano zbiorczo na rysunku 9.4.4.



Rys. 9.4.4. Wpływ tlenu na przewodność elektryczną miedzi w stanie wyżarzonym wg: 1 - Addicksa [205], 2 - Hansona [208], 3 - Antisellego [207]

Zaobserwowane przez Addicksa, Hansona i Antisellego) wartości przewodności elektrycznej na poziomie wyższym niż nominalna tj. 58,00 MS/m (100 %IACS) przy zawartościach tlenu nie przekraczających 0,08 % (800 ppm wag.) nie są wynikiem działania samego tlenu, lecz utleniania domieszek tlenem i z związku z tym wydzieleniem ich z roztworu stałego.

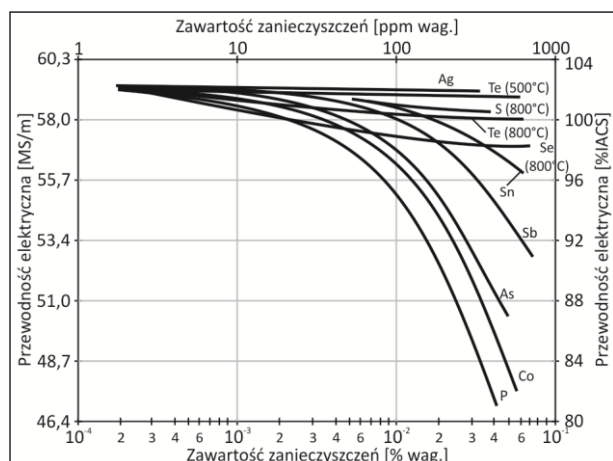
Badania na temat wpływu zawartości tlenu na kształtowanie własności elektrycznych miedzi były także przedmiotem analizy Popsa [136], który obserwacjom poddał miedź o klasie czystości od 3N do 5N. Wyniki rezultatów przedstawiono na rysunku 9.4.5 jako zależności przewodności elektrycznej w funkcji zawartości tlenu w materiale.



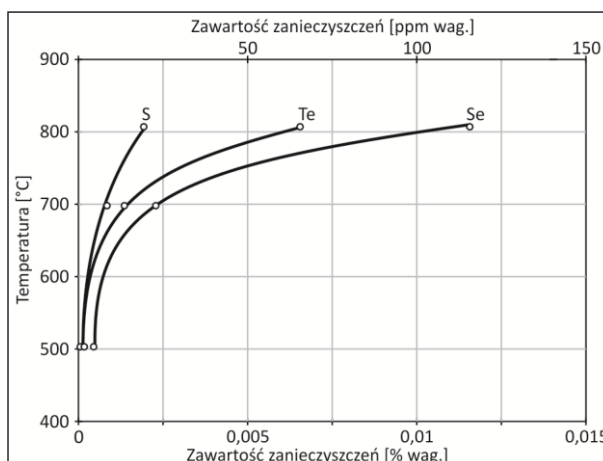
Rys. 9.4.5. Wpływ zawartości tlenu na przewodność elektryczną miedzi o klasie czystości 3N – 5N wg Popsa [136]

Podobnie jak Addicks [205], Pops w swojej pracy zaobserwował wzrost przewodności elektrycznej miedzi o klasie czystości 3N wraz ze wzrostem zawartości tlenu do poziomu około 0,06 % wag. (600 ppm wag.) Ponadto autor przedstawił wyniki zanotowane dla miedzi w gatunku Cu-OFE o klasie czystości 4N, dla którego to materiału graniczną zawartością tlenu wpływającą na podwyższenie konduktywności jest poziom około 0,012 % wag. (120 ppm wag.) Z kolei poddana obserwacjom miedź beztlenujowa o czystości chemicznej 5N wykazała wartość konduktywności około 102,5 %IACS.

Wielu z naukowców oprócz wpływu tlenu na kształtowanie rezystywności miedzi badaniom poddało wpływ różnych domieszek. W serii trzech prac Smart [124 – 126] zwłaszcza w odniesieniu do zawartości siarki, selenu i telluru określił kształtowanie przewodności elektrycznej miedzi beztlenujowej, lecz w nieco innym ujęciu niż miało to miejsce na poprzednich wykresach, a mianowicie w zależności od temperatury wyżarzania rekrystalizującego materiału po przeróbce plastycznej, co przedstawiono na rysunku 9.4.6 oraz jako zmianę rozpuszczalności tych pierwiastków wraz ze wzrostem temperatury na kolejnej ilustracji 9.4.7.



Rys. 9.4.6. Wpływ zanieczyszczeń na przewodność elektryczną miedzi w gatunku Cu-OFE wg Smarta [126]



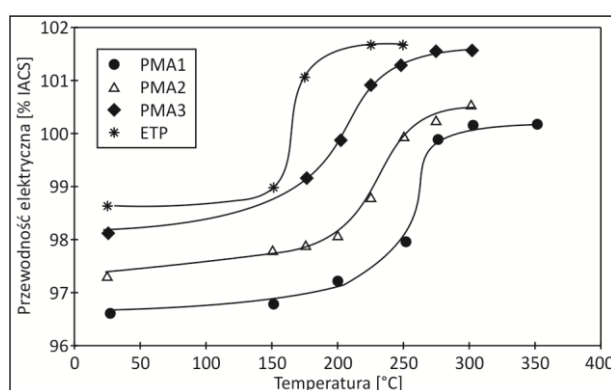
Rys. 9.4.7. Rozpuszczalność siarki, selenu i teluru w miedzi w gatunku Cu-OFE w zależności od temperatury wg Smarta [126]

Na podstawie analizy powyższych wykresów zaobserwowano, że miedź zawierająca analizowane pierwiastki atomów domieszek i poddana zabiegom obróbki cieplnej w zakresie niższych temperatur

(500 – 600 °C) cechuje się wyższą przewodnością elektryczną niż miedź wyżarzana w wyższych temperaturach. Fakt ten należy tłumaczyć uboższym roztworem stałym materiałów w pierwszym przypadku, co ściśle potwierdza poprzednie obserwacje, że im uboższy roztwór stały danego dodatku, tym większa konduktywność roztworu stałego. W odniesieniu do miedzi po procesie ciągłego odlewania lub przeróbki plastycznej obowiązuje zasada, że struktura nie ujednorodniona ma zawsze większą przewodność elektryczną niż struktura ujednorodniona (roztwór stały), którą z kolei osiąga się poprzez zabiegi obróbki cieplnej w podwyższonych temperaturach. Należy przy tym zaznaczyć, że możliwość zmiany wartości konduktywności miedzi poprzez poddanie materiału reżimowi temperaturowemu dotyczy tych pierwiastków, których rozpuszczalność zmienia się wraz z temperaturą.

Przykłady powyższych badań doświadczalnych dowodzą stwierdzonego przez naukowców korzystnego wpływu zawartości tlenu w miedzi na wartość przewodności elektrycznej, co wynika z reakcji z pierwiastkami zanieczyszczeń i tworzenia tlenków. Stwierdzono ponadto, że nawet w miedzi beztlenowej takie zanieczyszczenia jak żelazo i krzem muszą być częściowo obecne w materiale w postaci tlenków, w przeciwnym razie wartość konduktywności materiału kształtowałyby się na niższym poziomie. W wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych przyjęto, że każdorazowa zawartość 0,01 % wag. (100 ppm wag.) tlenu w miedzi wpływa średnio na obniżenie przewodności elektrycznej o 0,136 % IACS [125, 209]. Obserwacje te korespondują z wynikami badań Heuera [210], który stwierdził, że obecność 0,01 % wag. (100 ppm wag.) tlenu przy zawartości pozostałych domieszek na poziomie od 0 % wag. do 0,13 % wag. (1300 ppm wag.) wpływa na obniżenie przewodności miedzi średnio o 0,146 % IACS. Z kolei ingerencja tej samej zawartości tlenu przy występowaniu pierwiastków zanieczyszczeń od 0,13 % wag. (1300 ppm wag.) – 0,34 % wag. (3400 ppm wag.) wpływa na spadek konduktywności o 0,112 % IACS. Powyższa praca mimo, iż uwzględnia zawyżone zawartości tlenu w porównaniu do tych, które notuje się w tradycyjnie wykorzystywanej na cele elektryczne miedzi w gatunku Cu-ETP dostarcza kompleksowych informacji o zakresie własności elektrycznych miedzi o wyższym poziomie zanieczyszczeń.

Badania eksperymentalne, których celem była analiza wpływu zabiegów wyżarzania na kształtowanie własności elektrycznej drutów przeprowadziła w ramach swojej pracy Martinez [143]. W celu przypomnienia warto nadmienić, że część z wyników uzyskanych przez autorkę została poddana analizie w ramach podrozdziału 9.3 (por. tabela 9.3.10, rys. 9.3.41) pod kątem odporności cieplnej drutów. W publikacji przedstawione zostały także wyniki pomiarów przewodności elektrycznej czterech rodzajów drutów uzyskanych z materiałów o zróżnicowanym poziomie zanieczyszczeń, z których w szczególności próbki oznaczone jako PMA1 – PMA3 charakteryzują się zawartością domieszek na poziomie od około 1200 ppm wag. do około 2300 ppm wag., natomiast materiał oznaczony jako ETP wykazuje sumaryczną zawartość domieszek na poziomie około 200 ppm wag. Wyniki przeprowadzonych pomiarów przedstawiono na wykresach na rysunku 9.4.8.



Rys. 9.4.8. Wpływ temperatury na zmianę przewodności elektrycznej drutów poddanych zabiegom obróbki cieplnej w czasie 1 h wg Martinez [143]

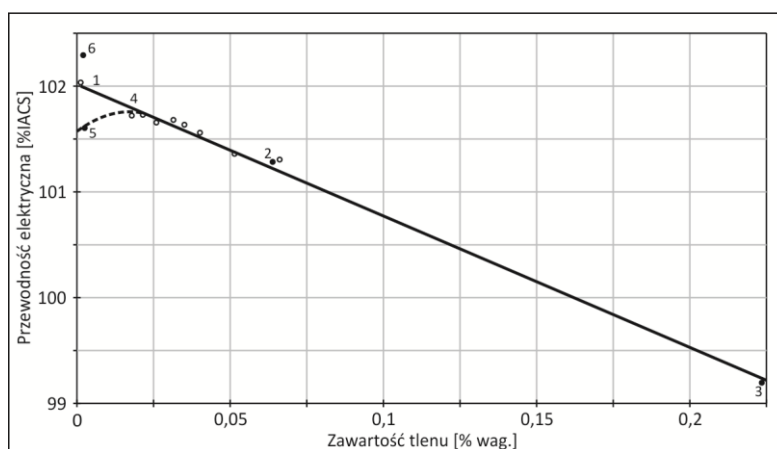
Analiza charakterystyk przewodności elektrycznej drutów o średnicach 1,8 mm wskazuje, że materiały z miedzi w gatunku Cu-ETP o zawartości tlenu na poziomie 170 ppm wag. i pierwiastków domieszek 22 ppm wag. poddane zabiegom obróbki cieplnej w zakresie temperatur 25 – 350 °C wykazały wyższe wartości konduktywności w stosunku do drutów uzyskanych z miedzi rafinowanej ogniowo w gatunku Cu-FRHC (próbki oznaczone jako PMA1 – PMA3), dla których zawartości tlenu i pozostałych domieszek kształtowały się na poziomie wynoszącym odpowiednio około 165 – 224 ppm

wag. oraz około 500 – 960 ppm wag. Ingerencja temperatury 160 °C w stosunku do drutu z miedzi w gatunku Cu-ETP spowodowała uzyskanie przez materiał przewodności elektrycznej na minimalnym wymaganym przez przemysł elektroniczny i elektrotechniczny poziomie 100 %IACS. Na podstawie przedstawionych wyników obserwuje się zatem, że zabiegi obróbki cieplnej są konieczne w celu uzyskania wyższej konduktywności materiałów. Na podstawie danych zilustrowanych na wykresach stwierdzić należy także, że w celu osiągnięcia przez druty z miedzi w gatunku Cu-FRHC o wyższym poziomie zanieczyszczeń wartości minimalnej przewodności 58,00 MS/m konieczna jest ingerencja temperatury od około 60 °C do 100 °C wyższej w stosunku do zakresu zastosowanego dla drutów z miedzi tlenowej.

Badania doświadczalne nad wpływem różnorodnych czynników na przewodność elektryczną stosowanej na cele elektryczne miedzi stanowiły także przedmiot obserwacji przeprowadzonych przez Armstronga [114]. W pierwszej części pracy autor przedstawił wyniki badań wpływu zawartości tlenu na kształtowanie się przewodności elektrycznej odniesionej do skali IACS dla kilku rodzajów drutów – oznaczonych jako materiały od 1 do 6, które uzyskane zostały ze zróżnicowanych pod względem składu chemicznego materiałów wsadowych, a w szczególności z: 1 – katody wysokiej czystości chemicznej z procesu topienia i odlewania w warunkach próżniowych; 2 i 3 – katod otrzymanych tak jak materiał o numerze 1, a następnie nasyconych różną zawartością tlenu; 4 – miedzi w gatunku Cu-ETP; 5 – miedzi beztlenowej oraz materiału o numerze 6 – miedzi o klasie czystości 5N (99,999 % Cu). Skład chemiczny analizowanych materiałów przedstawiono w tabeli 9.4.1, natomiast zanotowane rezultaty prób badawczych zilustrowano na rysunku 9.4.9. W celu rozszerzenia analizy autor przeprowadził także dodatkowe pomiary dla kilku próbek drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP charakteryzujących się zróżnicowaną zawartością tlenu, dla których uśrednione wyniki zamieszczono w ostatnim wierszu niniejszej tabeli (przyjęte oznaczenie pt. „białe znaczniki” wyniki ze sposobu ilustracji materiałów na rysunku 9.4.9).

Tabela 9.4.1. Skład chemiczny badanych materiałów wg Armstronga [114]

Oznaczenie materiału	Zawartość wagowa pierwiastków [ppm wag.]													Sumaryczna zawartość zanieczyszczeń z wyłączeniem O <sub>2</sub> [ppm wag.]
	O <sub>2</sub>	Ag	As	Bi	Co	Fe	Ni	Pb	Sb	Se	Si	S	Te	
1	< 3,0	5,0	< 0,5	< 0,05	0,2	1,0	< 1,0	0,1	0,1	< 0,1	1,0	2,0	< 0,05	11,1
2	650	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	2250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	170	6,0	< 0,1	0,2	0,4	1,0	< 1,0	0,2	0,1	0,2	0,5	2,0	< 0,1	11,8
5	13,0	15,0	1,0	0,3	0,5	5,0	5,0	5,0	1,0	0,6	1,2	6,0	0,6	41,2
6	3,0	< 0,5	0,02	0,02	0,08	1,6	0,01	0,02	0,01	0,2	0,4	< 0,2	0,01	3,1
Białe znaczniki	-	6,0	0,1	0,2	0,5	7 - 15	2,0	1,0	0,1	0,2 - 1,5	1,0	6,0	< 0,1	28,9



Rys. 9.4.9. Wpływ zawartości tlenu na kształtowanie przewodności elektrycznej miedzi wg Armstronga [114]

Na podstawie analizy wykresu ilustrującego wpływ zawartości tlenu na kształtowanie

przewodności elektrycznej miedzi zauważono, że zarówno wraz ze wzrostem sumarycznej ilości pierwiastków domieszek, jak i tlenu odnotowuje się spadek konduktywności materiałów. Pochylenie krzywej wskazuje na spadek wartości przewodności miedzi o 0,125 %IACS przy każdorazowym wzroście zawartości tlenu w materiałach o 0,01 % [114]. Wynik zanotowany przez Armstronga kształtuje się na nieco niższym poziomie w porównaniu do rezultatów zaprezentowanych w poprzednio omówionych pracach Smarta [125], Buttsa [209] i Heuera [210]. Ponadto autor zaznaczył w swojej pracy, że zanotowane dla próbek o numerach 1 i 6 wartości konduktywności kształtujące się na wysokim poziomie 102 – 102,5 %IACS wynikały z niskich zawartości tlenu i pozostałych zanieczyszczeń, które tym samym nie wpłynęły negatywnie na zaobserwowane własności elektryczne. Podkreślić należy, że druty uzyskane z materiałów o takich składach chemicznych nie znajdują powszechnego zastosowania w aplikacjach elektrycznych. Analizując w dalszym ciągu przebieg krzywej zauważono, że zawartością tlenu w miedzi wpływającą na obniżenie konduktywności jest poziom około 0,02 % wag. (200 ppm wag.). Autor przypisał to zjawisko zajściu niepełnego procesu utleniania domieszek. Ponadto podkreślił, że wyniki przewodności dla materiałów o niskiej zawartości tlenu tj. próbek 1 i 6 należy także utożsamiać z utlenieniem domieszek żelaza i krzemu. Obserwacja charakterystyki na wykresie przedstawionym na rysunku 9.4.9 wskazuje, że najwyższą wartość przewodności wynoszącą około 102,5 %IACS otrzymano dla drutu z miedzi o klasie czystości 5N (por. tabela 9.4.1). Z kolei uzyskana w warunkach próżniowych miedź beztlenuowa z katody o najwyższej czystości chemicznej (próbka oznaczona jako materiał 1) wykazuje już tę wartość na poziomie niższym o około 0,25 % wag. (2500 ppm wag.). Główną przyczynę spadku autor przypisał obecności siarki w materiale oraz skumulowanym wpływom pozostałych zanieczyszczeń, które dla obu próbek miedzi kształtują się na zbliżonym poziomie, a które zgodnie z obserwacjami Smarta [124 – 127] w sposób indywidualny odgrywają bardzo niewielki lub wręcz znikomy wpływ na analizowane wartości elektryczne materiałów.

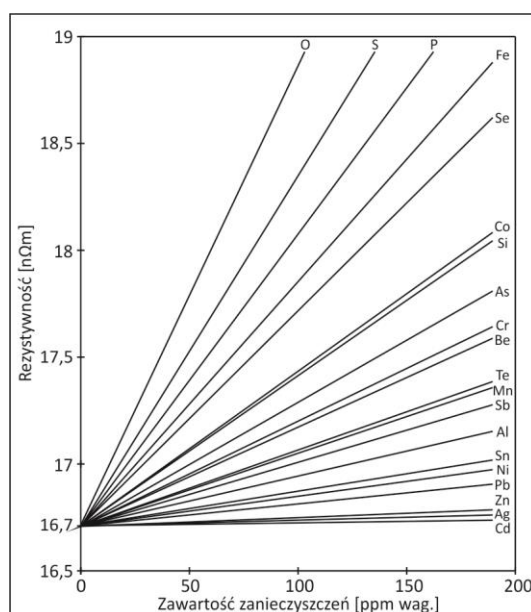
Na podstawie powyższych badań doświadczalnych należy stwierdzić, że obecność pojedynczych pierwiastków domieszek wpływa na zmniejszenie przewodności elektrycznej miedzi, przy czym wielkość tego spadku zależy od kilku czynników, które utożsamiane są z jakością materiału wsadowego i warunkami prowadzonego procesu technologicznego. Należy zaznaczyć, że niektóre domieszki w o wiele większym stopniu wpływają na wzrost oporności elektrycznej w stosunku do innych pierwiastków. Charakterystyka porównawcza wyników wzrostu rezystywności wywołanej wpływem poszczególnych domieszek otrzymanych w pracach Smarta [124 – 126], Pawleka [206] oraz Hessa [211] została zamieszczona w tabeli 9.4.2.

Tabela 9.4.2. Przyrost rezystywności miedzi spowodowany indywidualnym wpływem domieszek obecnych w roztworze stałym wg Smarta [124 – 126], Pawleka [206] i Hessa [211]

Pierwiastek	Wzrost rezystywności [nΩm] na 10 ppm wag. zanieczyszczeń			
	Smart	Pawlek	Hess	Wartość średnia
O <sub>2</sub>	-	-	0,2105	0,2105
Al.	-	0,0225	-	0,0225
Ag	0,0009	0,0040	-	0,0025
As	0,0568	0,0560	-	0,0564
Be	-	0,0451	-	0,0451
Cd	0,0014	0,0018	-	0,0016
Co	0,0684	0,0727	-	0,0706
Cr	-	0,0481	-	0,0481
S	0,1375	-	0,1824	0,1600
P	0,1185	0,1460	-	0,1323
Fe	0,1219	0,1023	-	0,1121
Mg	-	0,0329	-	0,0329
Ni	0,0152	0,0118	-	0,0135

Pb	-	0,0093	-	0,0093
Sb	0,0290	0,0285	-	0,0288
Se	0,1100	-	0,0845	0,0973
Si	-	0,0687	-	0,0687
Sn	0,0154	0,0155	-	0,0155
Te	0,0267	-	0,0418	0,0343
Zn	-	0,0034	-	0,0034

Pomijając trudno rozpuszczalne pierwiastki z grupy szóstej układu okresowego – siarkę, selen i tellur (por. także rys. 9.4.6 i 9.4.7) zauważa się zgodność uzyskanych wyników badań przez poszczególnych autorów. Wyjątek stanowią odnotowane zawartości żelaza i fosforu. Smart [124 – 126] wskazał, że wymienione dwa pierwiastki zwiększają oporność mniej więcej w takim samym stopniu, podczas gdy w swojej pracy Pawlek [206] zwrócił uwagę na większy wpływ fosforu i nieco łagodniejszą ingerencję żelaza. Obserwowane ponadto zróżnicowanie wyników wpływu siarki, selenu i telluru na rezystywność miedzi należy tłumaczyć ich ograniczoną rozpuszczalnością w stanie stałym. Ilustrację graficzną zanotowanych w tabeli 9.4.2 wyników średniej zawartości poszczególnych domieszek stanowią wykresy zbiorcze na rysunku 9.4.10. Przystępując do analizy należy zaznaczyć, że krzywe odnoszą się do rozpuszczalności pierwiastków w stanie stałym oraz, że dla niektórych domieszek graniczna rozpuszczalność kształtuje się w maksymalnym zakresie (200 ppm wag.) przedstawionym na ilustracji.



Rys. 9.4.10. Zależność rezystywności miedzi od średniej zawartości domieszek w stanie stałym wg Smarta [124 – 126], Pawleka [206] i Hessa [211]

Kiedy zanieczyszczenie jest obecne w postaci nierozpuszczalnej fazy to spadek przewodności zależy od postaci tej fazy i jej rozmieszczenia. Jeżeli przyjmuje charakter rozproszony to obniżenie konduktywności jest równe ułmkowi objętościowemu fazy i jest znacznie mniejsze niż gdy domieszka znajduje się w roztworze stałym [79]. Dlatego też tematyka wzrostu oporności spowodowanej dodatkiem konkretnego zanieczyszczenia musi zostać rozszerzona o sumaryczny wpływ poszczególnych pierwiastków, a nie tylko indywidualny. Przykładowo pomimo, iż siarka powoduje większy wzrost rezystywności miedzi w porównaniu do żelaza to zawartość tego drugiego pierwiastka może być o wiele bardziej negatywna z uwagi na większą rozpuszczalność w stanie stałym. Smart w swoich badaniach [212] poddał obserwacji wpływ tlenu jako drugiej domieszki w miedzi zawierającej także antymon, arsen, kadm, kobalt, żelazo, nikiel, fosfor, selen, srebro, siarkę, tellur i cynę. Autor na podstawie badań własnych stwierdził, że tlen nie ma wpływu na obecne w roztworze stałym domieszki takie jak antymon, arsen, kadm, selen, srebro, siarkę i tellur. Z drugiej zaś strony

w układzie czteroskładnikowym zawierającym kobalt, żelazo, fosfor i cynę tlen niweluje skutki domieszek poprzez ich konwersję do postaci tlenków. Pierwiastki charakteryzujące się mniejszą rozpuszczalnością w stanie stałym zostały wydzielone i miedź została oczyszczona. Autor stwierdza ponadto, że zawarte w miedzi żelazo może zostać utlenione, natomiast nikiel nie. W innej pracy Pawlek [213] poddający obserwacjom sumaryczny wpływ różnych pierwiastków domieszek na kształtowanie własności elektrycznych miedzi stwierdził, że arsen i antymon także mogą zostać związane przez tlen do postaci tlenków. Ponadto autor, który w swojej pracy przeprowadził badania doświadczalne w stosunku do układów dwuskładnikowych, czteroskładnikowych oraz pięcioskładnikowych zaobserwował, że działanie tlenu w miedzi w gatunku Cu-ETP jest zróżnicowane w zależności od ilości pierwiastków domieszek. Oceniał, że antymon utlenia się gdy zawarty jest jako jedyna domieszka w miedzi, natomiast gdy w materiale obecny jest także nikiel nie wykazuje takiej zdolności. Podobną obserwację postawił w stosunku do arsenu i ołowiu, które to domieszki występując razem posiadają znacznie bardziej ograniczoną zdolność do utleniania. W celu potwierdzenia wyników badań autor przeprowadził ponadto eksperymenty na drutach zawierających w swoim składzie chemicznym następujące atomy pierwiastków domieszek: ołów – 0,0033 % wag. (33 ppm wag.), cynk – 0,0037 % wag. (37 ppm wag.), żelazo – 0,0045 % wag. (45 ppm wag.), cyna – 0,0047 % wag. (47 ppm wag.) oraz antymon 0,0073 % wag. (73 ppm wag.), przy czym należy zaznaczyć całkowity brak tlenu w materiale. W wyniku przeprowadzonych badań własnych autor odnotował, iż wartość przewodności elektrycznej badanego materiału na poziomie 97,6 % IACS. Stwierdził, że to efekt jednoczesnej obecności zróżnicowanych pierwiastków domieszek w roztworze stałym. Z kolei badania, którym poddał miedź o takim samym składzie chemicznym ale zawierającą tlen wykazały, że materiał charakteryzuje się wartością konduktywności na poziomie wyższym – 100 % IACS. Wynik przypisywany jest obecności tlenu w miedzi. Tym samym Pawlek potwierdził, że niewielkie ilości tlenu w miedzi wpływają na wzrost przewodności elektrycznej.

Przeprowadzona w ramach niniejszego podrozdziału analiza pozwala na stwierdzenie, że wszystkie zanieczyszczenia obecne w miedzi, zarówno w gatunku Cu-FRHC, Cu-ETP, jak i Cu-OFE przyczyniają się do obniżenia przewodności elektrycznej materiału, przy czym najbardziej negatywny wpływ domieszki na zmniejszenie konduktywności obserwuje się w przypadku, gdy tworzy ona z miedzią roztwór stały, mniejszy natomiast gdy pierwiastek występuje w postaci osobnej fazy. Ponadto w miedzi zawierającej pojedyncze zanieczyszczenia obecne w roztworze stałym wzrost oporności jest wprost proporcjonalny do ich ilości.

W dalszej części niniejszego podrozdziału przeprowadzono analizę porównawczą wyników badań doświadczalnych nad określeniem wpływu sumarycznej zawartości zanieczyszczeń w katodach oraz walcówkach na kształtowanie się własności elektrycznych drutów. Pozwoliło to na ocenę przydatności katod do procesu ciągłego otrzymywania materiału (CCR) dedykowanego do procesu ciągnięcia. Analiza stanowiła kontynuację badań realizowanych w podrozdziale 9.3.2 dysertacji, w wyniku których określono wpływ domieszek w miedzi na temperaturę rekrytalizacji drutów z miedzi tlenowej i beztlenowej. Do badań wykorzystano druty o średnicach 2,0 mm otrzymane w procesie przeróbki plastycznej na zimno materiału wsadowego jakim były pręty miedziane uzyskane z trzech katod w gatunku Cu-CATH-1. Ponadto badania prowadzone były także na drutach uzyskanych z walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP wytworzonych w linii ciągłego topienia, odlewania i walcowania na gorąco Southwire w zakładach przetwórczych Aurubis i Transkat. Poddane badaniom pięć rodzajów drutów różniły się zawartością atomów pierwiastków domieszek oraz ilością tlenu. Skład chemiczny materiałów wytypowanych do badań zamieszczono w tabeli 9.31 w podrozdziale 9.3, jednak w celu przypomnienia zostanie nadmienione, że poszczególne materiały charakteryzowały się zawartością tlenu i zanieczyszczeń na następującym poziomie:

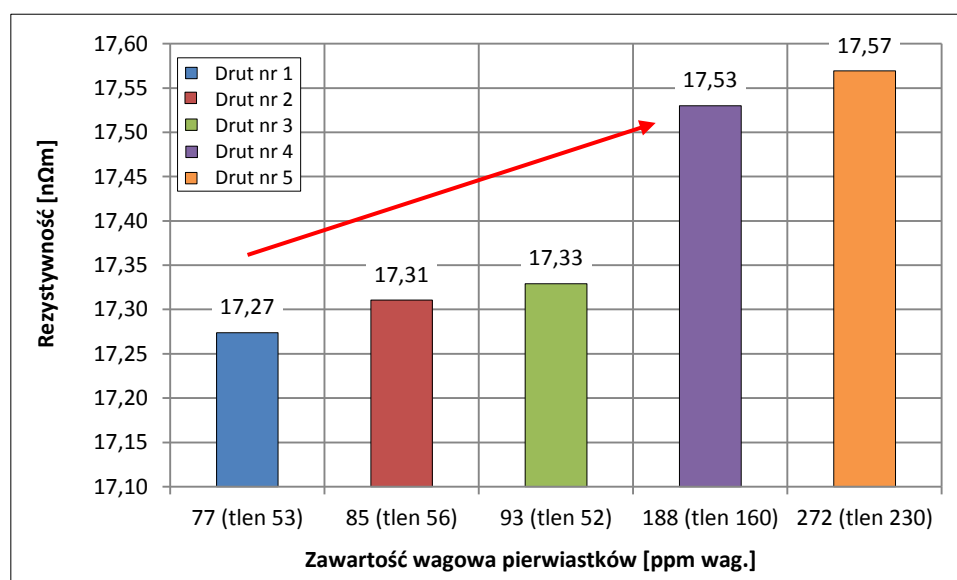
- drut nr 1 – wykonany z katody Cu-CATH-1: 53 ppm wag. tlenu oraz 24 ppm wag. zanieczyszczeń, zawartość sumaryczna: 77 ppm wag.,
- drut nr 2 – wykonany z katody Cu-CATH-1: 56 ppm wag. tlenu oraz 29 ppm wag. zanieczyszczeń, zawartość sumaryczna: 85 ppm wag.,
- drut nr 3 – wykonany z katody Cu-CATH-1: 52 ppm wag. tlenu oraz 41 ppm wag. zanieczyszczeń, zawartość sumaryczna: 93 ppm wag.,
- drut nr 4 – wykonany z walcówki Cu-ETP: 160 ppm wag. tlenu oraz 28 ppm wag. zanieczyszczeń, zawartość sumaryczna: 188 ppm wag.,
- drut nr 5 – wykonany z walcówki Cu-ETP: 230 ppm wag. tlenu oraz 42 ppm wag.

zanieczyszczeń, zawartość sumaryczna: 272 ppm wag.

Uzyskane wyniki badań własności elektrycznych drutów po procesie wyżarzania w temperaturze 500 °C w czasie 30 minut zgodnie z normą PN-EN 1976:1998 [3] przedstawiono zbiorczo w tabeli 9.4.3. Ilustrację graficzną wyników zależności rezystywności od zawartości pierwiastków domieszek ukazano na wykresie na rysunku 9.4.11.

Tabela 9.4.3. Wyniki badań rezystywności drutów o średnicy 2,0 mm uzyskanych z materiałów wsadowych w postaci katod i walcówek o różnym poziomie zanieczyszczeń

Oznaczenie materiału	Średnica drutu	Odształcenie względne	Odształcenie rzeczywiste	S	R <sub>20</sub>	ρ	γ	γ
	[mm]	[%]	[-]	[m <sup>2</sup> ]	[mΩ]	[nΩm]	[MS/m]	[%IACS]
1	1,98	93,87	2,79	3,08E-06	5,610	17,27	57,89	99,81
2					5,622	17,31	57,77	99,60
3					5,628	17,33	57,71	99,49
4					5,693	17,53	57,05	98,35
5					5,706	17,57	56,92	98,13



Rys. 9.4.11. Wykresy zależności rezystywności badanych drutów o średnicy 2,0 mm od zawartości wagowej pierwiastków domieszek

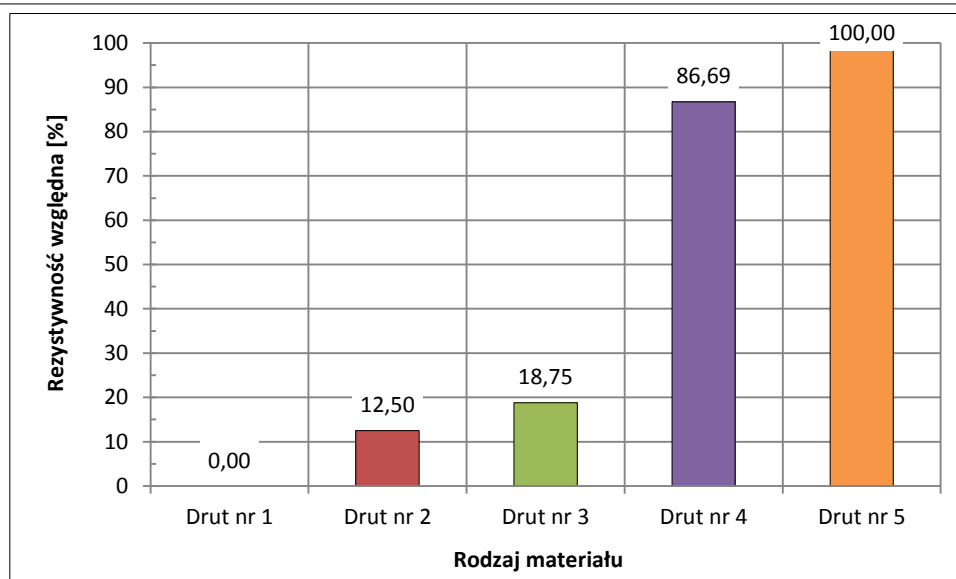
Analiza otrzymanych wyników własności elektrycznych drutów obrazuje wyraźny podział materiałów na dwie grupy. Pierwszą stanowią druty oznaczone jako próbki 1, 2 i 3, które otrzymane zostały z katod miedzianych w gatunku Cu-CATH-1 o wysokiej czystości chemicznej i charakteryzują się zawartością atomów pierwiastków domieszek i tlenu na zbliżonym poziomie wynoszącym odpowiednio – około 31 ppm wag. i 54 ppm wag. Drugą stanowią druty uzyskane z walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP charakteryzujące się zawartością zanieczyszczeń na zbliżonym do materiałów oznaczonych jako próbki 1, 2 i 3 poziomie tj. około 35 ppm wag. oraz o wiele wyższą obecnością tlenu kształtującą się na poziomie około 200 ppm wag.

Analizując uzyskane wyniki określono procentową zmianę rezystywności materiałów w odniesieniu do obszaru zmienności. Jeśli za obszar zmienności przyjęto zakres ( $\sigma_{min.}$ ,  $\sigma_{max.}$ ), dla którego minimalną wartość wynoszącą 0 % jest wynik zanotowany dla drutu oznaczonego jako próbka 1 ( $\rho = 17,27$  nΩm), natomiast maksymalną wartość rezultat zanotowany dla drutu nr 5 wynoszącą 17,57 nΩm to wynik w odniesieniu do omawianego przedziału obliczony został w oparciu o wzór:

$$|x|_{\%} = \left| \frac{\sigma_{min} - \sigma_i}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} \right| \cdot 100 \% \quad (9.4.1)$$

Otrzymane na tej podstawie wyniki zilustrowano w postaci graficznej na ilustracji 9.4.12.





Rys. 9.4.12. Wyniki obliczeń względnej rezystywności dla badanych drutów o średnicach 2,0 mm

Druty uzyskane z katod z miedzi w gatunku Cu-CATH-1 oznaczone jako próbki 2 i 3 charakteryzujące się wyższą zawartością pierwiastków zanieczyszczeń w porównaniu do materiału numer 1 wykazały średnio o około 15 % wyższą wartość rezystywności. Z kolei dla drugiej grupy materiałów utworzonej przez druty bazujące na walcówkach z miedzi w gatunku Cu-ETP zauważono, że zróżnicowanie zawartości tlenu i domieszek w materiałach wpływa bezpośrednio na wyniki pomiarów rezystywności tych materiałów. Drut numer pięć – uzyskany z walcówki z procesu Southwire o najwyższej sumarycznej zawartości domieszek spośród badanych materiałów stanowił punkt odniesienia (górne ograniczenie rozpatrywanego przedziału) w związku z zanotowaną najwyższą wartością rezystywności spośród wszystkich poddanych obserwacjom materiałów. Z kolei drut o numerze cztery otrzymany także z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP, ale o niższej zawartości tlenu i pozostałych zanieczyszczeń charakteryzował się rezystywnością niższą o około 15 % w stosunku do drutu oznaczonego jako materiał numer pięć uzyskanego z walcówki i średnio o około 70 % w stosunku do materiałów bazujących na katodach.

Dokonując podsumowania przeprowadzonych badań wpływu sumarycznej zawartości zanieczyszczeń w miedzi na kształtowanie własności elektrycznych drutów należy zaznaczyć, że skład chemiczny katody, jako materiału wsadowego do produkcji walcówki miedzianej determinuje zespół własności drutów dedykowanych do zastosowań w elektronice i elektrotechnice. Spośród badanych materiałów najniższą rezystywność wykazały druty uzyskane z katod z miedzi w gatunku Cu-CATH-1 o najniższej zawartości zanieczyszczeń i tlenu. To dodatkowy dowód na to, iż obniżona zawartość tlenu wpływa na zmniejszenie rezystywności o czystości chemicznej rzędu 3N.

Celem tego etapu badań była wstępna analiza wybranych problemów z obszaru metalurgii i przetwórstwa walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP na przykładzie linii Southwire oraz drutów otrzymanych z katod produkowanych w KGHM Polska Miedź S.A. o gatunku Cu-CATH-1. Scharakteryzowane różnice we własnościach fizycznych materiałów i wynikające stąd możliwości aplikacyjne przekładają się na zespół wymagań stawianych przez procesy przeróbki plastycznej wobec tych materiałów wsadowych. Omawiana problematyka wpływu składu chemicznego materiału na własności elektryczne posiada podstawowe znaczenie praktyczne dla klasyfikacji katod pod kątem ich przeznaczenia na walcówkę o podatności do wyżarzania, która przeznaczona jest do procesu ciągnięcia na maszynach wielobiegowych z dużymi prędkościami, w których jednocześnie odkształceniu poddaje się kilka do kilkadziesiąt drutów. Kontynuację tematyki dotyczącej własności elektrycznych drutów z miedzi stanowi kolejny z podrzdziałów, w ramach którego analiza przeprowadzona została pod kątem wpływu zadanego w procesie ciągnięcia drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE odkształcenia na otrzymane wartości rezystywności i konduktywności. Obserwacje dokonano na drutach o średnicach od 8,0 mm do 0,5 mm uzyskanych z materiałów wsadowych w postaci walcówek i prętów z linii technologicznych Contirod, Upcast i Rautomead.

#### 9.4.2. Analiza wpływu umocnienia odkształceniowego na własności elektryczne drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP

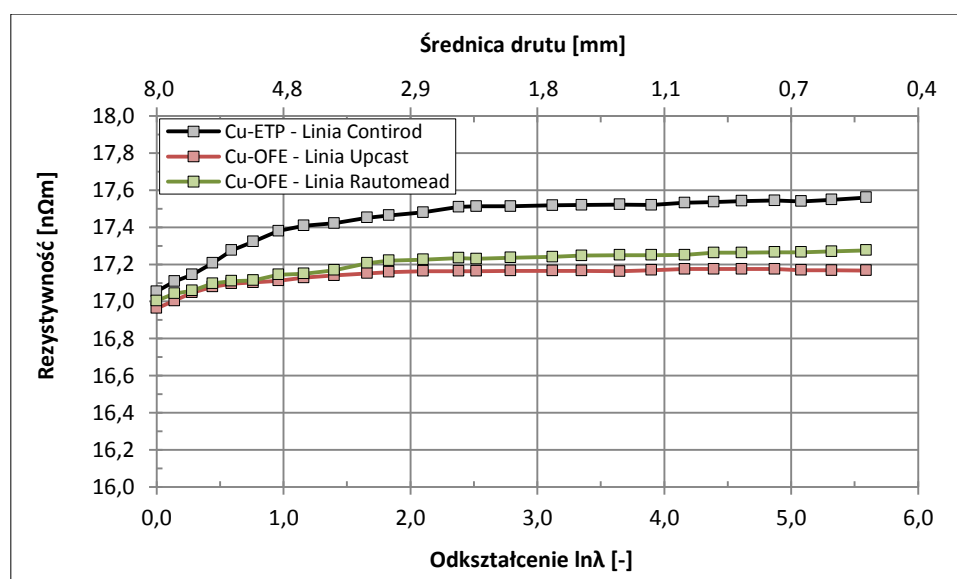
Celem tej części badań doświadczalnych było przeprowadzenie charakterystyki porównawczej drutów uzyskanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz z prętów z miedzi beztlenuj. Analiza wpływu wielkości odkształcenia na własności elektryczne drutów pozwoliła uzyskać odpowiedź na pytanie o rolę tlenu w kształtowaniu przewodności właściwej miedzi wysokiej czystości chemicznej przeznaczonej na cele elektryczne. Wiedząc, że w procesie Contirod otrzymuje się walcówkę elektrolityczną charakteryzującą się zawartością tlenu na poziomie średnio od około 200 ppm wag. do około 600 ppm wag., natomiast zarówno metodą Upcast jak i Rautomead wyrób końcowy, którym jest miedź beztlenuj o strukturze odlewu, założono zróżnicowanie własności elektrycznych badanych materiałów uzyskiwanych w wyniku procesu ciągnięcia.

Do badań wytypowano materiały o średnicach od 8,0 mm do 0,5 mm otrzymane z walcówki i prętów pochodzących z technologii Contirod, Upcast oraz Rautomead, dla których podobnie jak w przypadku analizy przeprowadzonej w ramach rozdziału 9.2 zastosowano taką samą ilość ciągów wraz z odpowiadającymi im schematami odkształcenia (por. np. tabele A9.2.1). Na wstępie analizy w tabeli 9.4.4 zamieszczono uzyskane wartości rezystywności elektrycznej dla materiałów wsadowych o średnicy 8,0 mm (por. także tabele 9.1.8 w podrozdziale 9.1) zestawione z wartościami określonymi w normie PN-EN 1977:2000 [8].

Tabela 9.4.4. Wartości rezystywności elektrycznej miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE o średnicy nominalnej 8,0 mm wg badań własnych i normy PN-EN 1977:2000 [8]

Gatunek miedzi - linia technologiczna	Badania własne	Norma PN-EN 1977:2000
	$\rho$	
	[n $\Omega$ m]	
Cu-OFE - linia Upcast	16,96	17,07
Cu-OFE - linia Rautomead	17,00	
Cu-ETP - linia Contirod	17,05	17,24

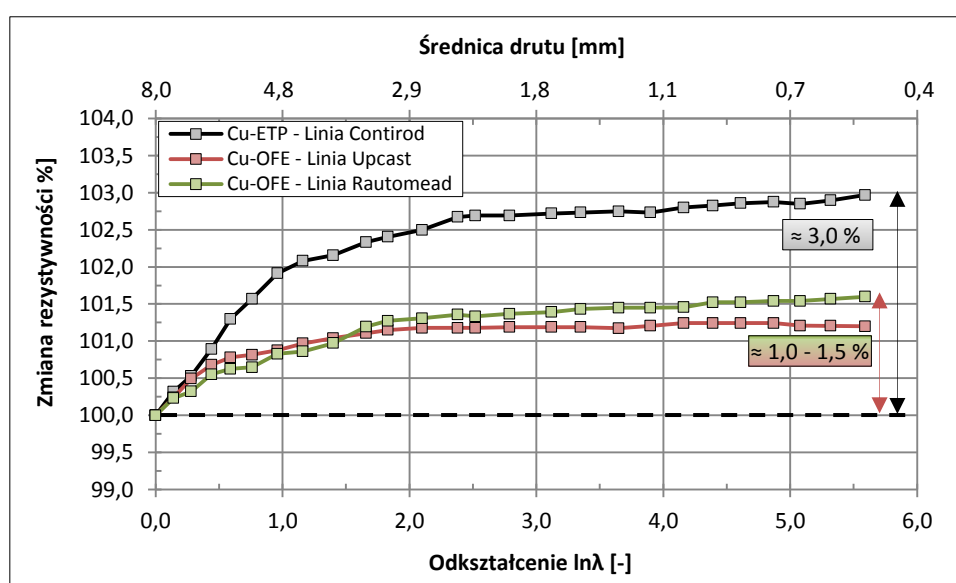
Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 9.4.4 zauważono zatem, że poddane badaniom materiały spełniają wymagania normy dotyczące wartości rezystywności elektrycznej. Na rysunkach 9.4.13 zilustrowano charakterystyki rezystywności elektrycznej w funkcji wielkości odkształcenia rzeczywistego dla drutów z dwóch gatunków miedzi. Dane liczbowe do konstrukcji krzywych zamieszczono w aneksie w tabeli A9.4.1.



Rys. 9.4.13. Wykresy zależności rezystywności elektrycznej od wielkości odkształcenia rzeczywistego dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Analiza powyższych charakterystyk dowodzi, że zanotowane wartości rezystywności

elektrycznej dla materiałów wsadowych o średnicach 8,0 mm z miedzi beztlenowej kształtują się na zbliżonym poziomie wynoszącym średnio około 16,98 nΩm. Wyższą wartością charakteryzuje się walcówka z miedzi tlenowej, dla której rezystywność elektryczna wyniosła 17,05 nΩm. O ile wraz ze zwiększeniem odkształcenia rzeczywistego obserwuje się wzrost oporności miedzi – co pozostaje w zgodzie z obowiązującą wiedzą na ten temat i wynika ze wzrostu defektów struktury w materiale w wyniku realizacji procesu ciągnięcia, o tyle dla miedzi w gatunku Cu-ETP zachodzi on w sposób bardziej gwałtowny i dla drutu o średnicy finalnej 0,5 mm ( $\ln\lambda = 5,6$ ) osiąga wartość  $\rho \approx 17,6$  nΩm. Z kolei dla materiałów beztlenowych otrzymanych z prętów z linii Upcast i Rautomead wzrost wartości rezystywności zachodzi w sposób łagodny, a przedstawione charakterystyki wykazują zbieżne przebiegi. Zaobserwowano ponadto niewielkie ich rozseparowanie dla drutów o średnicach poniżej 4,0 mm tj. dla wielkości odkształcenia rzeczywistego  $\ln\lambda = 1,4$ . Ostatecznie zanotowane dla drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE o średnicach 0,5 mm wartości oscylują w granicach 17,2 – 17,3 nΩm. Analizę charakterystyk ukazanych na rysunku 9.4.13 ułatwia obserwacja wykresów przedstawionych na kolejnej ilustracji 9.4.14 będąca bezpośrednią interpretacją rzeczywistych wyników. To krzywe zależności procentowej zmiany oporności w funkcji wielkości odkształcenia rzeczywistego dla badanych materiałów. Dane liczbowe do konstrukcji charakterystyk zwrócić w aneksie w tabeli A9.4.1.

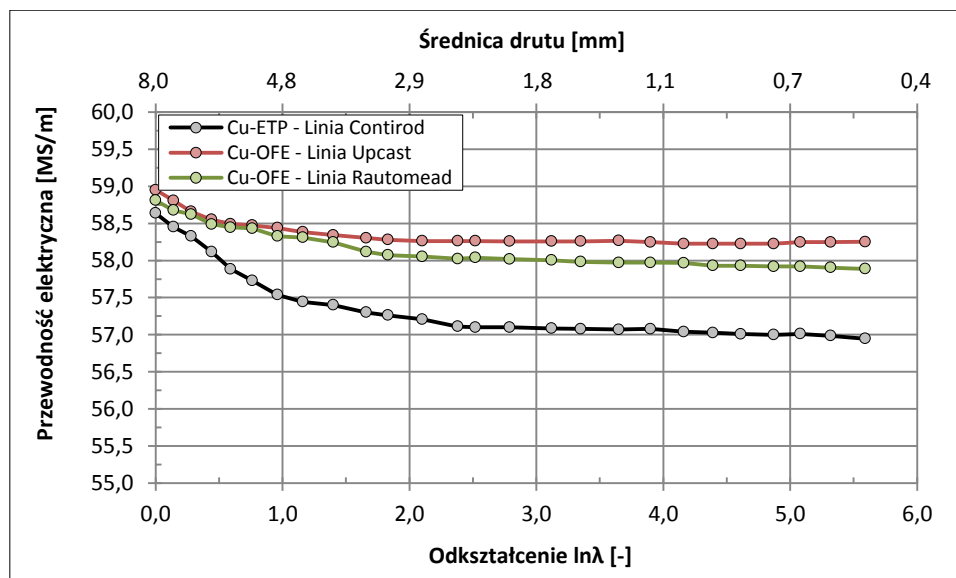


Rys. 9.4.14. Wykresy zależności procentowej zmiany rezystywności elektrycznej od wielkości odkształcenia rzeczywistego dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

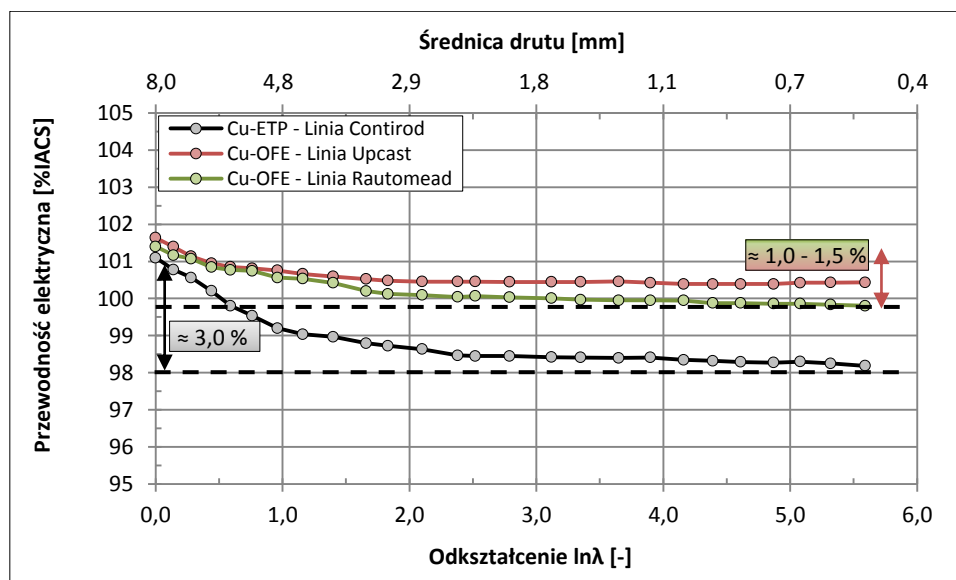
Przedstawione charakterystyki ukazują, iż przyrost rezystywności skutkiem umocnienia dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP wynosi aż 3 %, podczas gdy dla drutów z miedzi beztlenowej bazujących na prętach z linii Upcast jedynie około 1,0 %, a dla drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z technologii Rautomead około 1,5 %. Materiał tlenowy charakteryzuje się zatem dwukrotnie lub trzykrotnie wyższym przyrostem rezystywności elektrycznej w porównaniu do miedzi beztlenowej w stosunku do materiałów wyjściowych. Powyższa godna podkreślenia obserwacja dowodzi słuszności postawionej w dysertacji tezy, zgodnie z którą miedź beztlenowa gwarantuje ponadstandardowe – w porównaniu do tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne miedzi w gatunku Cu-ETP własności elektryczne. Kolejne przedstawione w pracy wyniki badań zamieszczone w postaci charakterystyk na rysunkach 9.4.15 i 9.4.16 ilustrują zależności odwrotne, czyli wpływ wielkości odkształcenia na kształtowanie się przewodności elektrycznej drutów miedzianych, przy czym krzywe ukazane na ilustracji 9.4.16 to odniesienie uzyskanych wartości konduktywności do obowiązującej na całym świecie zintegrowanej skali IACS. Dane liczbowe niezbędne do konstrukcji charakterystyk zamieszczono w aneksie w tabeli A9.4.2.

Ukazane na rysunkach 9.4.15 i 9.4.16 krzywe ilustrują dla miedzi w gatunku Cu-ETP gwałtowny spadek przewodności elektrycznej z wartości około 58,6 MS/m zanotowanej dla materiału wsadowego do około 57 MS/m – dla drutu o finalnej średnicy 0,5 mm ( $\ln\lambda = 5,6$ ). Wyznaczone względem wartości 58,00 MS/m stanowiącej standard przewodności elektrycznej dla celów elektrycznych wyniki odpowiadają około 101 %IACS oraz 98 %IACS. Ten trzyprocentowy spadek konduktywności

zaznaczono schematycznie na rysunku 9.4.16. Podobnie jak poprzednio druty z miedzi beztlenowej, zarówno uzyskane z prętów z technologii Upcast, jak i Rautomead wykazują spadek przewodności na skutek odkształcenia tylko o około 1,0 – 1,5 %. Przyczyną wyższej przewodności miedzi gatunku Cu-OFE otrzymywanej metodą odlewania „do góry” jest bardzo niska zawartości tlenu, kształtująca się poniżej 3 ppm wag. (por. tabela 9.6 – podrozdział 9.1), jak również istotnie niższa zawartość defektów struktury związanych z istnieniem małej ilości granic ziaren w materiale odlewany. Spadek konduktywności zanotowany dla miedzi w gatunku Cu-ETP spowodowany jest natomiast deformacją sieci krystalicznej przez tlen oraz dużą bardzo ilością granic ziaren w całej objętości materiału.



Rys. 9.4.15. Wykresy zależności przewodności elektrycznej od odkształcenia rzeczywistego dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



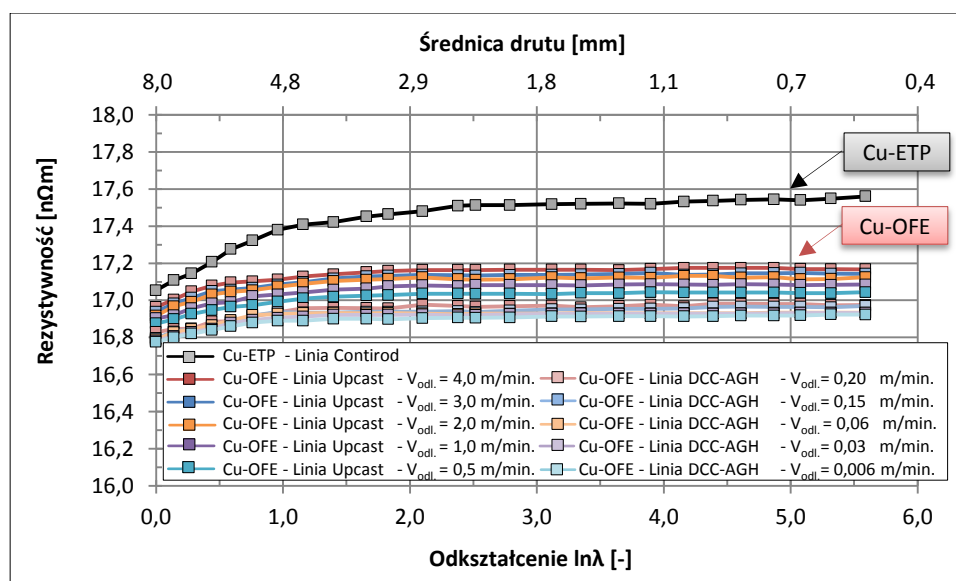
Rys. 9.4.16. Wykresy zależności przewodności elektrycznej odniesionej do skali %IACS od odkształcenia rzeczywistego dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Przedstawione w niniejszym podrozdziale wyniki badań doświadczalnych ukazały wynikające z odmienności w budowie strukturalnej i składzie chemicznym różnice rezystywności i przewodności elektrycznej badanych materiałów. Zanotowany dla miedzi beztlenowej korzystny efekt spadku własności elektrycznych na niskim poziomie wynoszącym około 1,0 – 1,5 % przekłada się na wysokie znaczenie aplikacyjne materiału. Wobec powyższego w kolejnym podrozdziale pracy analogicznej procedurze badawczej poddano większą ilość drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE bazujących na prętach o średnicach 8,0 mm uzyskanych w laboratoryjnej

i przemysłowej instalacji ciągłego odlewania DCC-AGH i Upcast przy zastosowaniu zmiennych parametrów procesu odlewania (szybkość odlewania, wydatek wody chłodzącej).

#### 9.4.3. Analiza wpływu parametrów procesu odlewania materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na własności elektryczne drutów

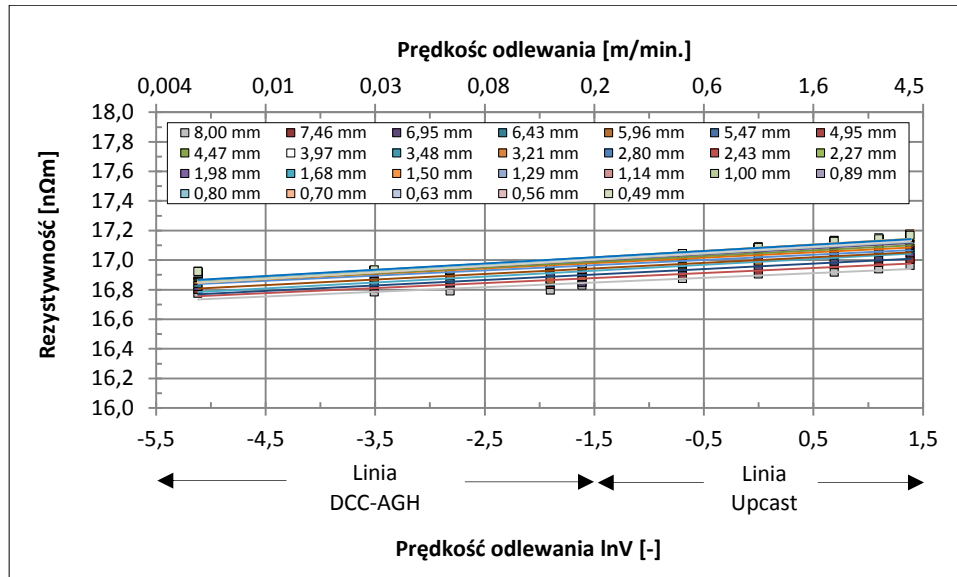
Istotą prowadzonych w ramach niniejszego podrozdziału analiz badań doświadczalnych nad kształtowaniem własności elektrycznych miedzi było zbadanie wpływu, jaki wywiera na strukturę, a co za tym idzie na własności elektryczne drutów o różnych średnicach, zmiana warunków krystalizacji metalu w procesie odlewania miedzi beztlenowej zarówno w przemysłowej technologii Upcast, jak i laboratoryjnej DCC-AGH. Zrealizowany do tej pory w ramach podrozdziału 9.1 program badań ujawnił różnice w strukturach oraz własnościach elektrycznych materiałów wsadowych o średnicach 8,0 mm otrzymywanych przy zastosowaniu różnych parametrów odlewania (prędkość odlewania, wydatek wody chłodzącej krystalizator, ukierunkowanie ziaren – por. rys. 9.1.27, 9.1.91 – 9.1.93, tabela 9.1.8). W niniejszym podrozdziale obserwacjom poddano druty o średnicach od 8,0 do 0,5 mm bazujące na prętach uzyskanych metodą Upcast przy prędkościach odlewania od 4,0 do 0,5 m/min. oraz standardowym wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min. oraz materiałach otrzymanych sposobem DCC-AGH z szybkościami od 0,2 m/min. do 0,006 m/min. i zróżnicowanym przepływie wody chłodzącej w układzie pierwotnym i wtórnym. Analiza rozpoczęta została od przedstawienia na rysunku 9.4.17 zależności rezystywności elektrycznej drutów uzyskanych z różnych materiałów wsadowych w funkcji wielkości odkształcenia rzeczywistego. Podobnie jak poprzednio jako punkt odniesienia zamieszczono wyniki zanotowane dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP. Dane liczbowe do konstrukcji charakterystyk przedstawionych w ramach niniejszego podrozdziału zamieszczono w aneksie w tabelach A9.4.3 – A9.4.7.



Rys. 9.4.17. Wykresy zależności rezystywności elektrycznej od wielkości odkształcenia rzeczywistego dla drutów otrzymanych z materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej w procesie ciągłego odlewania metodą Upcast przy prędkościach odlewania od 4,0 m/min. do 0,5 m/min. oraz sposobem DCC-AGH przy szybkości odlewania 0,2 – 0,006 m/min.

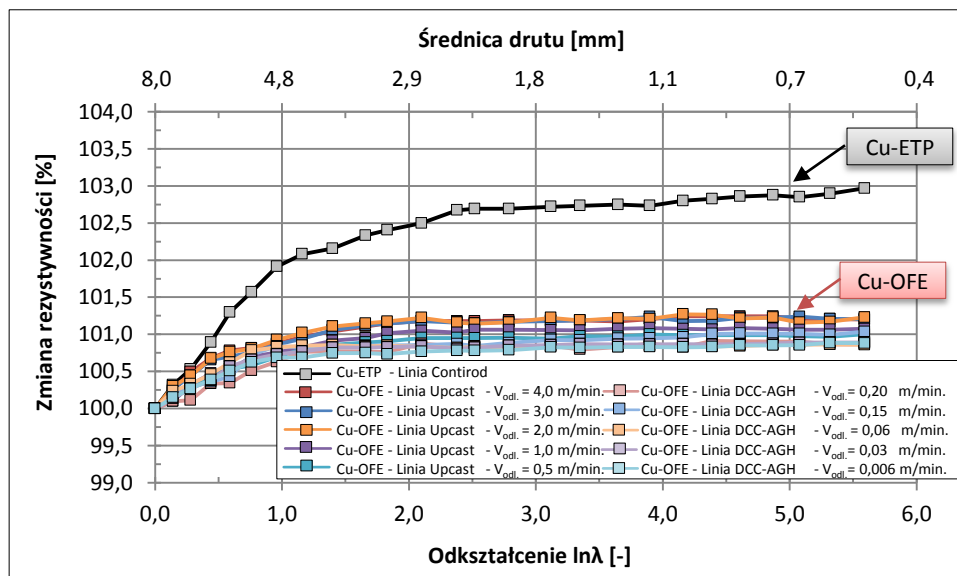
Na podstawie analizy przedstawionych wyżej charakterystyk zauważono, że prędkość odlewania materiałów wsadowych – prętów z miedzi beztlenowej wpływa na wartości rezystywności uzyskanych drutów. Obserwuje się, że dla materiałów bazujących na prętach z procesu Upcast odlanych z prędkościami od 4,0 m/min. do 0,5 m/min. wartości rezystywności kształtują się średnio od około 16,9 nΩm dla materiałów o średnicach 8,0 mm do około 17,1 nΩm dla drutów o średnicach 0,5 mm. Z kolei dla materiałów uzyskanych z prętów z procesu laboratoryjnego DCC-AGH, w którym przyjęto prędkości odlewania z zakresu od 0,2 m/min. do 0,006 m/min. wartości te kształtują się na niższym poziomie wynoszącym odpowiednio od około 16,8 nΩm do 16,9 nΩm. Interpretację wykresów przedstawionych na rysunku 9.4.17 stanowią krzywe ukazane na ilustracji 9.4.18 jako zależności

rezystywności drutów o różnorodnych średnicach od prędkości odlewania materiałów wsadowych – prętów z miedzi beztlenowej dedykowanych do procesu ciągnięcia. Dla ułatwienia analizy, podobnie jak w przypadku interpretacji wyników zmian własności mechanicznych prętów o średnicach 8,0 mm w ramach podrozdziału 9.1, przyjęto dwie osie odciętych: dolną liniową określającą logarytm z prędkości odlewania i górną (nie liniową) określającą prędkość procesu w metrach na minutę.



Rys. 9.4.18. Wykresy zależności rezystywności elektrycznej drutów o różnorodnych średnicach od prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej w procesie Upcast oraz DCC-AGH

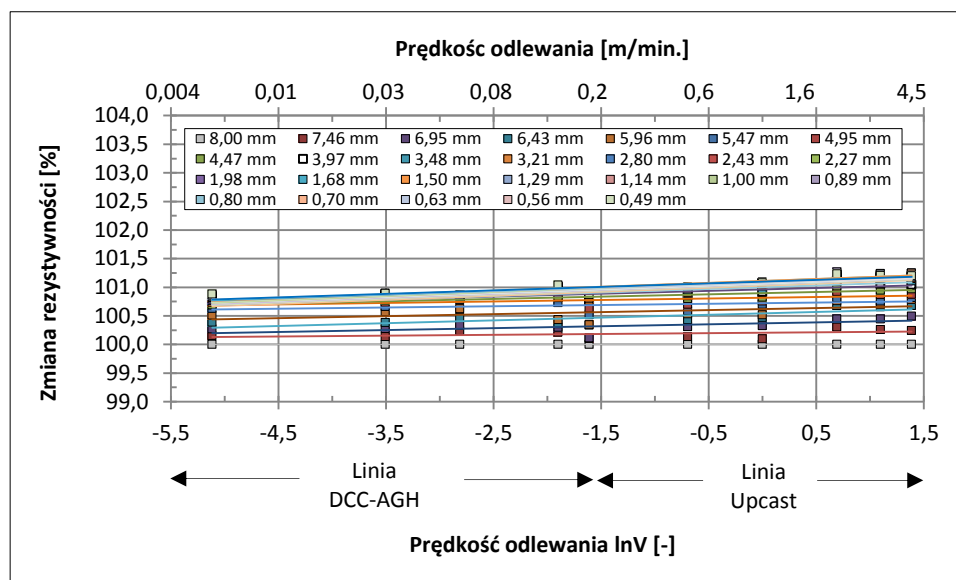
Ukazane zależności prezentują w sposób kompleksowy zaobserwowane zjawisko wzrostu rezystywności drutów o różnych średnicach wraz ze zwiększeniem prędkości odlewania materiałów wsadowych. Kontynuację analizy wyników pomiarów rezystywności elektrycznej materiałów stanowią wykresy zilustrowane na rysunku 9.4.19, tym razem prezentujące wpływ zadanego odkształcenia w procesie ciągnięcia prętów z procesów technologicznych Upcast i DCC-AGH na otrzymane procentowe zmiany oporności drutów.



Rys. 9.4.19. Wykresy zależności procentowej zmiany rezystywności elektrycznej od wielkości odkształcenia rzeczywistego dla drutów otrzymanych z materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej w procesie ciągłego odlewania metodą Upcast przy prędkościach odlewania od 4,0 m/min. do 0,5 m/min. oraz sposobem DCC-AGH przy szybkości odlewania 0,2 – 0,006 m/min.

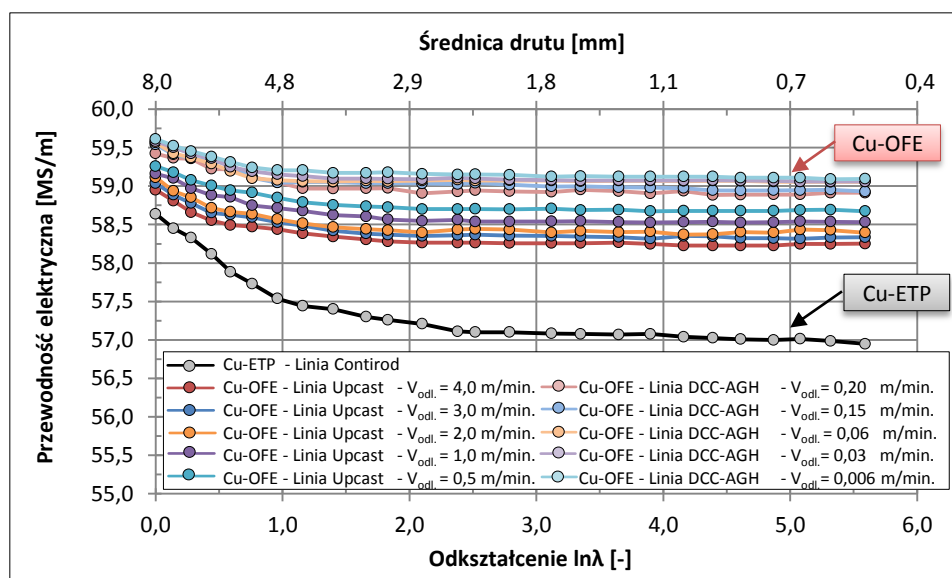
Podobnie jak poprzednio stwierdzono, że im mniejsza prędkość odlewania materiałów wsadowych tym otrzymane druty charakteryzują się procentowymi zmianami rezystywności na

mniejszym poziomie. Przykładowo dla materiałów o średnicy finalnej 0,5 mm bazujących na prętach z linii Upcast wartość ta kształtuje się średnio na poziomie około 101,1 %, natomiast dla drutów z miedzi beztlenowej po procesie ciągnięcia prętów z linii DCC-AGH oscyluje na nieco niższym poziomie wynoszącym średnio 100,9 %. Zaobserwowana relacja wpływu prędkości odlewania materiałów wsadowych na procentową zmianę rezystywności drutów została przedstawiona dodatkowo na rysunku 9.4.20. Linie trendu zaznaczone na wykresach ilustrują stwierdzoną powyżej relację.



Rys. 9.4.20. Wykresy zależności procentowej zmiany rezystywności elektrycznej drutów o różnorodnych średnicach od prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej w procesie Upcast oraz DCC-AGH

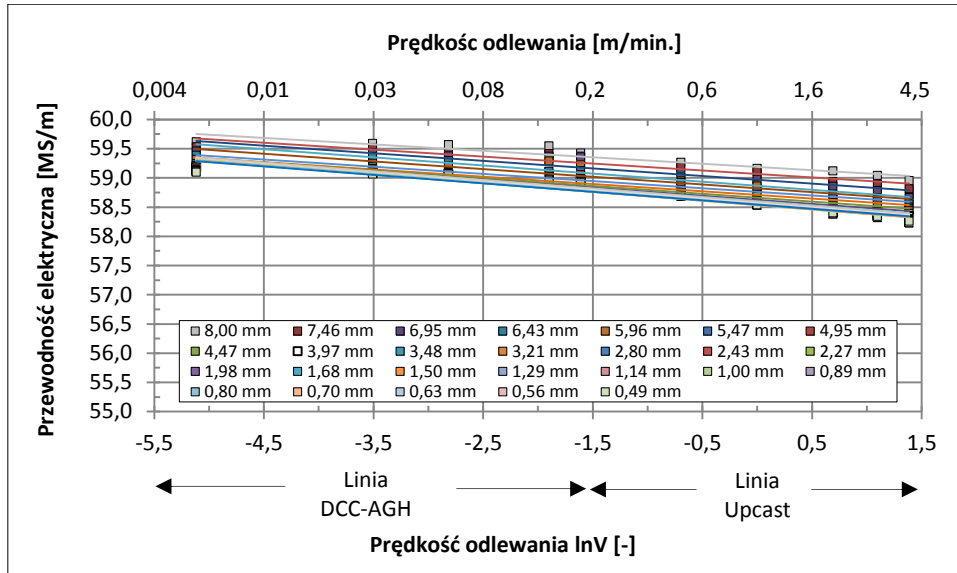
Z kolei na rysunku 9.4.21 zilustrowano wynikające z powyższych wykresów zależności przewodności elektrycznej badanych drutów o różnorodnych średnicach w funkcji zadanego odkształcenia rzeczywistego. Stanowią dodatkowe potwierdzenie zaobserwowanego wpływu warunków odlewania prętów na kształtowanie własności elektrycznych materiałów o średnicach od 8,0 mm do 0,5 mm.



Rys. 9.4.21. Wykresy zależności przewodności elektrycznej od wielkości odkształcenia rzeczywistego dla drutów otrzymanych z materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej w procesie ciągłego odlewania metodą Upcast przy prędkościach odlewania od 4,0 m/min. do 0,5 m/min. oraz sposobem DCC-AGH przy szybkości odlewania 0,2 – 0,006 m/min.

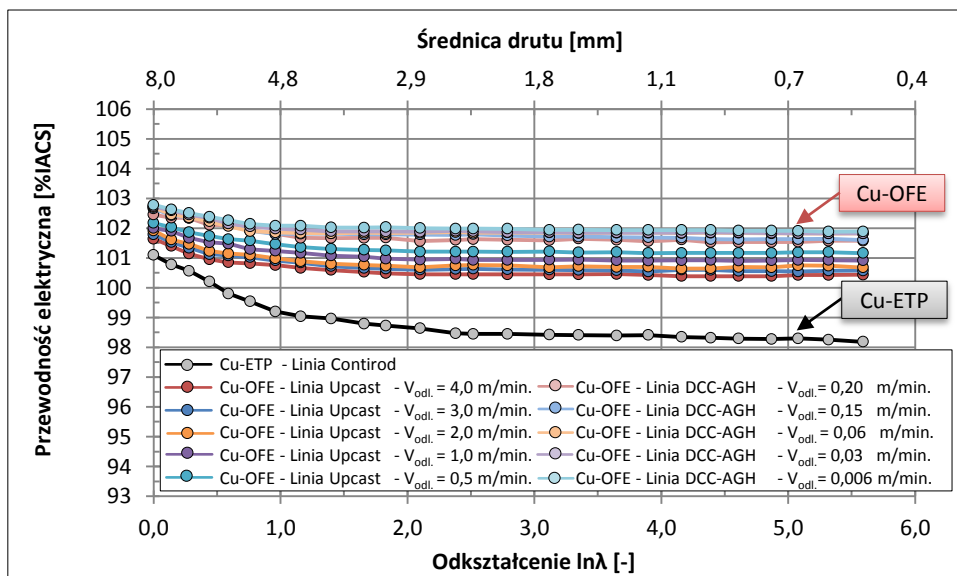
Analiza charakterystyk ukazała zanotowany w wyniku zadanego odkształcenia rzeczywistego spadek przewodności elektrycznej drutów uzyskanych z prętów z miedzi beztlenowej z instalacji

Upcast z wartości średnio około 59 MS/m – odnotowanej dla materiałów o średnicach 8,0 mm do około 58,4 MS/m w przypadku drutów o średnicach 0,5 mm. Z kolei materiały otrzymane w wyniku procesu ciągnięcia prętów z procesu laboratoryjnego DCC-AGH wykazują jeszcze mniejszy spadek przewodności elektrycznej z początkowego poziomu wynoszącego średnio około 59,5 MS/m do wartości około 59 MS/m. Jak nadmieniono wcześniej w ramach analizy w podrozdziale 9.4.2, a także w oparciu o obserwacje krzywych na rysunku 9.4.9 uzyskane rezultaty wyraźnie różnicują miedź beztlenową w stosunku do tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne miedzi w gatunku Cu-ETP. Zanotowany spadek obrazują także krzywe zilustrowane na rysunku 9.4.22 odniesione bezpośrednio do szybkości odlewania prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE o średnicach 8,0 mm.



Rys. 9.4.22. Wykresy zależności przewodności elektrycznej drutów o różnorodnych średnicach od prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej w procesie Upcast oraz DCC-AGH

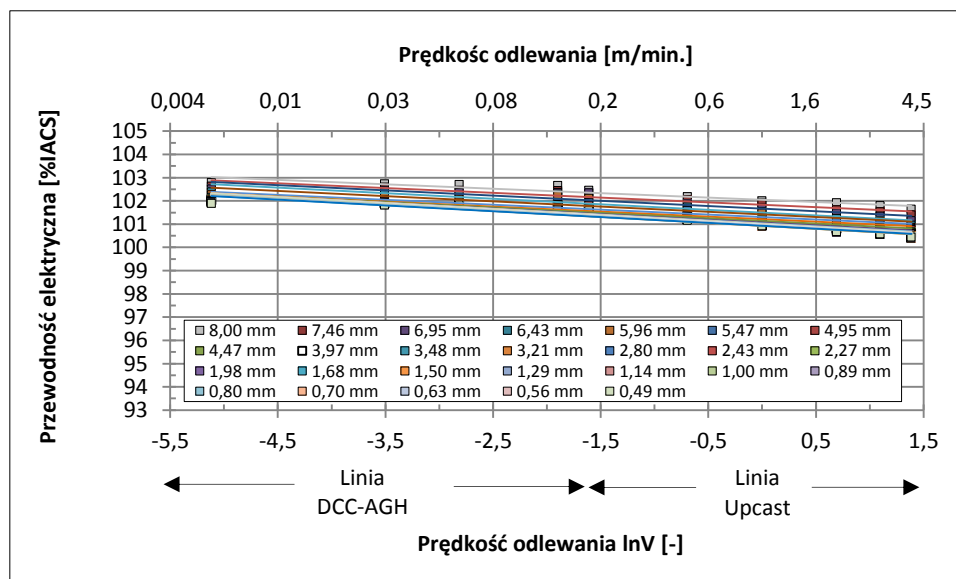
Dopełnienie przedstawionej charakterystyki porównawczej własności elektrycznych drutów z miedzi beztlenowej bazujących na prętach uzyskanych przy zróżnicowanych parametrach procesu odlewania stanowią wykresy konduktywności, której wartości odniesione zostały do międzynarodowego wzorca miedzi wyżarzanej – skali IACS zarówno w funkcji wielkości odkształcenia (por. rys. 9.4.23), jak i szybkości odlewania (por. rys. 9.4.24).



Rys. 9.4.23. Wykresy zależności przewodności elektrycznej odniesionej do skali IACS od wielkości odkształcenia rzeczywistego dla drutów otrzymanych z materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej w procesie ciągłego odlewania metodą Upcast przy prędkościach odlewania od 4,0 m/min. do 0,5 m/min. oraz sposobem DCC-AGH przy szybkości odlewania 0,2 – 0,006 m/min.



Zanotowany w wyniku zadanego odkształcenia spadek przewodności elektrycznej dla drutów z miedzi beztlenowej z linii Upcast i DCC-AGH kształtuje się na poziomie średnio około 1,0 %. Obserwacje ponadto dopełniają charakterystyki przedstawione na rysunku 9.4.24.



Rys. 9.4.24. Wykresy zależności przewodności elektrycznej odniesionej do skali IACS dla drutów o różnorodnych średnicach od prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej w procesie Upcast oraz DCC-AGH

Przeprowadzone w ramach niniejszego podrozdziału badania doświadczalne wykazały, że istniejące zróżnicowanie własności elektrycznych miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dotyczy zarówno prętów i walcówek, a także uzyskanych z tych materiałów w procesie ciągnięcia drutów. Stwierdzono, że materiały o różnorodnych średnicach z miedzi beztlenowej charakteryzują się monotonicznym wzrostem rezystancji wraz ze zwiększeniem prędkości odlewania materiałów wsadowych. Jak wykazano we wcześniejszym etapie pracy wynika to z odmienności strukturalnych polegających na mniejszej liczbie ukierunkowanych w stronę odprowadzania ciepła tj. wzdłuż osi materiału ziaren dla drutów bazujących na prętach otrzymanych w procesie ciągłego odlewania z niskimi szybkościami. Z kolei druty uzyskane w prętów pochodzących z procesów technologicznych, w których zastosowano większe prędkości odlewania prezentują większą ilość ziaren na swojej długości. Tym samym po raz kolejny potwierdzona została słuszność postawionej w dysertacji tezy o wpływie stanu strukturalnego miedzi w gatunku Cu-OFE na ponadstandardowe własności użytkowe materiału.

#### 9.4.4. Podsumowanie

Większość aplikacji, do których dedykowana jest miedź obejmuje różnego rodzaju nośniki prądu elektrycznego, co wynika z ponadprzeciętnej w stosunku do innych materiałów o zastosowaniu technicznym konduktywności. Z tego powodu własności elektryczne miedzi od zawsze stanowiły przedmiot wszechstronnych badań doświadczalnych i analiz, których celem jest dążenie do ciągłego wzrostu zarówno przewodności elektrycznej, jak i odkształcalności materiału w zastosowaniach na druty i mikrodruty. Czynniki wpływające na zdolność przewodzenia prądu przez materiał były i są poddawane obserwacjom przez naukowców w wielu światowych laboratoriach. W szczególności badania przeprowadzone przez Addicksa [205, 206], Smarta [124 – 126] oraz Pawleka [206, 211, 213] uznawane za prekursorskie do dziś stanowią cenne źródło informacji o wpływie poszczególnych atomów pierwiastków domieszek i tlenu na kształtowanie rezystywności miedzi. Są kompleksową bazą danych, ponieważ wiele z tych prac odnosi się do zawartości zanieczyszczeń na poziomie większym niż spotykane obecnie w miedzi w gatunku Cu-FRHC, Cu-ETP i Cu-OFE. Bardzo często badania doświadczalne nad materiałami otrzymywanymi na drodze syntezy miedzi wysokiej czystości chemicznej i domieszek prowadzone są w sposób indywidualny na drodze pojedynczych eksperymentów w laboratoriach naukowych, dzięki czemu prezentują nowatorski sposób podejścia do

zagadnienia i innowacyjne wyniki obserwacji.

Należy zaznaczyć, iż przewodność elektryczna materiału jest limitowana rodzajem osnowy i ilością dodatków oraz zanieczyszczeń, stanem struktury i jakością metalurgiczną oraz temperaturą. W aspekcie metalurgicznym konduktywność to wynik oddziaływania odpowiednich ilości pierwiastków oraz ich ulokowania w strukturze (roztwór stały, wydzielenia), jak również defektów budowy sieci krystalicznej. Z tego punktu widzenia unika się pierwiastków lokujących się w roztworze stałym. Na podstawie analizy literaturowej oraz badań własnych wykazano, że rozmaite dodatki stopowe w różnym stopniu i w różnych kierunkach zmieniają własności technologiczne miedzi oraz jej podatność do przeróbki plastycznej. W szczególności wzrost sumarycznej zawartości pierwiastków zanieczyszczeń w materiale prowadzi do obniżenia wartości konduktywności, a najmniej negatywny wpływ wywierają dodatki stopowe występujące w postaci osobnych faz.

Przeprowadzony program badań doświadczalnych i analiza uzyskanych wyników własności elektrycznych miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE ujawniły zróżnicowanie wartości rezystywności. Druty z miedzi tlenowej charakteryzują się największym przyrostem oporności elektrycznej wraz ze wzrostem zadanego odkształcenia rzeczywistego, który kształtuje się na poziomie około 3 razy większym w stosunku do miedzi beztlenowej. Z kolei dla drutów bazujących na prętach odlewanych według technologii Upcast i Rautomead zanotowano podobny trend przyrostu rezystywności elektrycznej wraz z odkształceniem. Otrzymane wyniki przekładają się bezpośrednio na zanotowane wyższe wartości przewodności elektrycznej miedzi beztlenowej w stosunku do tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne miedzi w gatunku Cu-ETP.

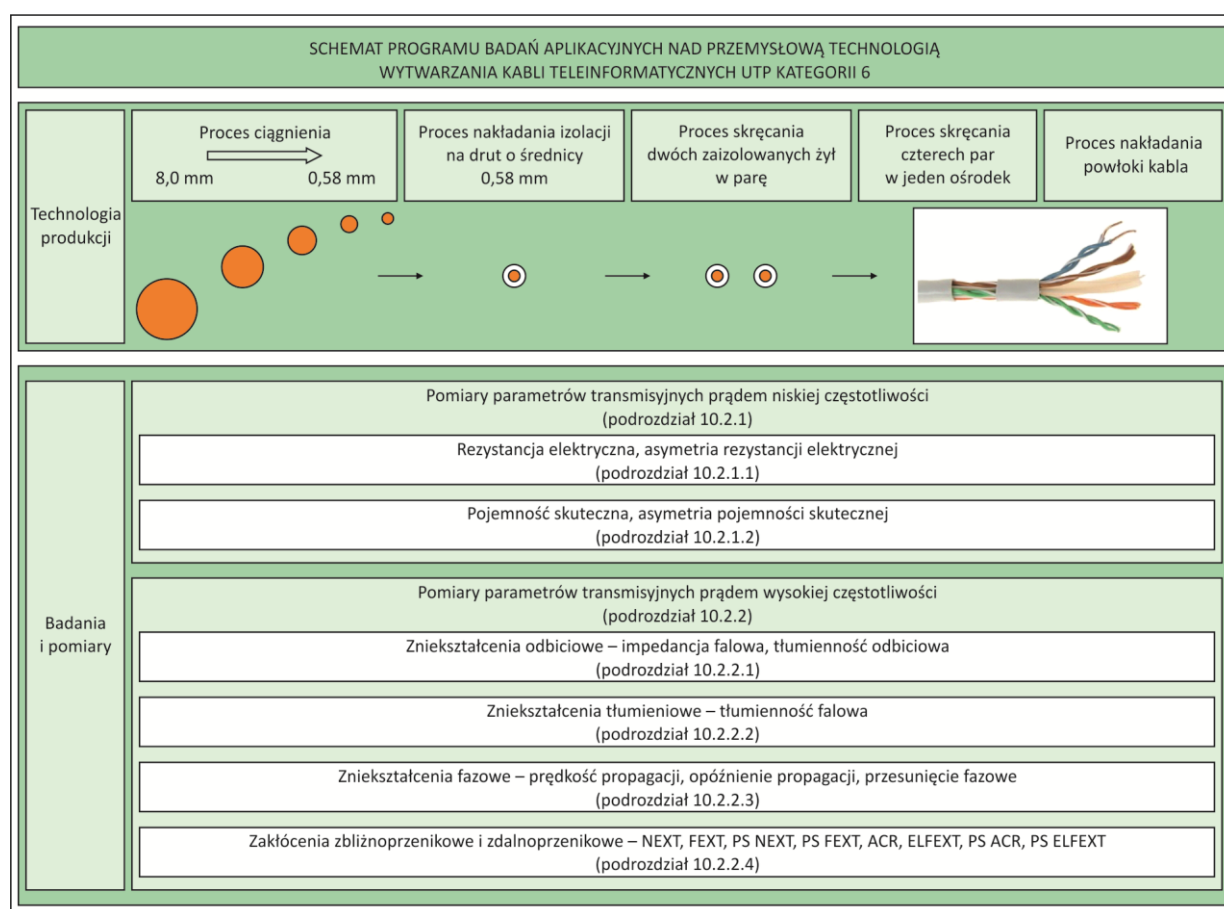
Kontynuację badań doświadczalnych stanowiła analiza zdolności przewodzenia prądu elektrycznego drutów z miedzi beztlenowej otrzymanych z prętów z procesu ciągłego odlewania Upcast przy szybkościach przemysłowych z zakresu 4,0 – 0,5 m/min. oraz DCC-AGH dla prędkości laboratoryjnych wynoszących od 0,2 m/min. do 0,006 m/min. Pomiar rezystancji zrekrystalizowanych drutów ujawniły, że spadek prędkości odlewania materiałów wsadowych z miedzi beztlenowej dedykowanej do procesu ciągnięcia wpływa na mniejszy opór elektryczny drutów. Ma to ścisły związek z pierwotnymi strukturami odlewów oraz mechanizmem przepływu prądu. Materiały uzyskane przy niskich prędkościach odlewania m.in. 0,006 m/min. posiadają na długości mniejszą liczbę granic ziaren niż uzyskane w procesie ciągłego odlewania z większymi szybkościami – np. 4,0 m/min. Granice ziaren są jednym z miejsc zakłócania i rozpraszania przepływu elektronów przewodzących, zwiększając rezystancję przewodnika. Zatem warto w tym miejscu podkreślić poprawność przyjętych w postaci tezy założeń pracy.

Powyzsza obserwacja przekłada się na aplikacyjny efekt i bezpośrednie zastosowanie miedzi beztlenowej o ukierunkowanej strukturze jako materiału wsadowego do produkcji kabli o specjalnych zastosowaniach – na przykład w dziedzinie inżynierii dźwięku i obrazu. W dalszej części dysertacji w ramach rozdziału 10 przedstawiona została zrealizowana w warunkach przemysłowych próba technologiczna produkcji kabli teleinformatycznych z żyłami przewodzących bazującymi na prętach z miedzi beztlenowej otrzymywanych w procesie ciągłego odlewania przy różnych prędkościach odlewania oraz wyniki uzyskanych dla drutów parametrów transmisyjnych mierzonych przy niskich i wysokich częstotliwościach. Podjęcie omawianej tematyki stało się zasadne z uwagi na fakt, że w ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój coraz to nowych obszarów zastosowań kabli i przewodów z grupy audio-video stawiających wysokie wymagania względem nowych materiałów, które muszą charakteryzować się coraz to wyższymi własnościami mechanicznymi, jednocześnie bez istotnej utraty przewodności elektrycznej.

## Rozdział 10

### Badania aplikacyjne nad przemysłową technologią wytwarzania kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6

Problematyka niniejszego rozdziału dotyczy w głównej mierze analizy wyników pomiarów własności transmisyjnych trzech konstrukcji przewodowych wykonanych na potrzeby pracy według tej samej ścieżki technologicznej, a różniących się jedynie materiałami żył przewodzących (Cu-ETP, Cu-OFE). Charakter opracowanego programu badań aplikacyjnych stworzył możliwości bezpośredniego porównania uzyskanych kabli teleinformatycznych pod kątem szybkości transmisji sygnału elektrycznego tj. możliwości minimalizacji stratności przesyłu. Na rysunku 10.1 zilustrowano schematycznie plan pracy realizowany w rozdziale 10.



Rys. 10.1. Schemat ogólny programu badań aplikacyjnych nad przemysłową technologią wytwarzania kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6

Tematyka pierwszego z podrozdziałów – 10.1 dotyczy technologii produkcji kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6. Opis poprzedzony został krótkim wprowadzeniem teoretycznym, w ramach którego na rysunku 10.1.1 zilustrowano przykładowe teleinformatyczne konstrukcje przewodowe (UTP, FTP, STP) o zróżnicowanej budowie. Kolejne z rysunków tj. 10.1.2 – 10.1.7 dotyczą technologii produkcji omawianych aplikacji. W szczególności ilustracje 10.1.2 i 10.1.3 przedstawiają schematy technologiczne linii produkcyjnych typu grubociąg M-85 i średniociąg M-200 firmy Niehoff. Na kolejnym rysunku 10.1.4 ukazano zjawisko indukowania napięć w żyłach kabla od zewnętrznego pola elektromagnetycznego. Ilustracje 10.1.5 i 10.1.6 są graficznymi opisami linii do skręcania żył w parę oraz pary w ośrodek firm Setic Gauder i Pourtier. Rysunek 10.1.7 przedstawia natomiast ścieżkę technologiczną procesu wytłaczania powłoki zewnętrznej kabla teleinformatycznego.

Całość podrozdziału kończy ilustracja 10.1.8 prezentująca budowę wytworzonej konstrukcji przewodowej UTP kategorii 6.

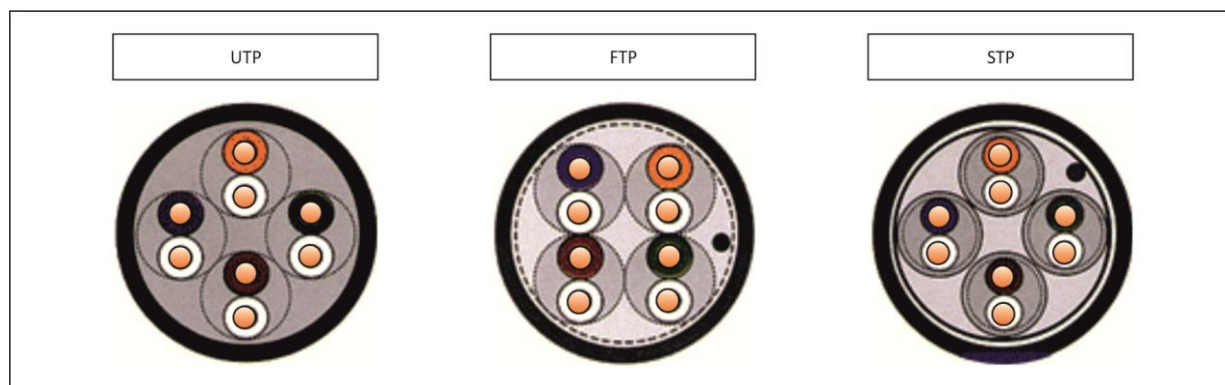
W podrozdziale 10.2 analizie poddano wyniki pomiarów parametrów transmisyjnych wytworzonych trzech rodzajów kabli. W szczególności dwie główne części 10.2.1 i 10.2.2 dotyczą odpowiednio badań prądem niskiej i wysokiej częstotliwości. W ramach pierwszej z nich przeprowadzono pomiary rezystancji elektrycznej (podrozdział 10.2.1.1) i na rysunkach 10.2.1 i 10.2.2 zilustrowano wyniki rezystywności i przewodności elektrycznej odnotowane dla każdej z czterech par żył o zróżnicowanych długościach skręcania. Z kolei na ilustracjach 10.2.3 i 10.2.4 (także podrozdział 10.2.1.2) ukazano wartości pojemności skutecznej i jej asymetrii dla ww. materiałów. Prowadzona w dalszej części podrozdziału analiza dotycząca tym razem pomiarów prądem o częstotliwości wysokiej – do 250 MHz obejmuje interpretację wyników ujętych w postaci czterech bloków tematycznych dotyczących następujących zagadnień: zniekształceń odbiciowych (podrozdział 10.2.2.1), zniekształceń tłumieniowych (podrozdział 10.2.2.2), zniekształceń fazowych (podrozdział 10.2.2.3) i zakłóceń przenikowych (podrozdział 10.2.2.4). Wyniki dotyczące pierwszego zagadnienia zilustrowano na rysunkach 10.2.5 – 10.2.8 w postaci wykresów zależności impedancji falowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE od częstotliwości oraz na ilustracjach 10.2.9 – 10.2.12 jako zmiany procentowe impedancji falowej drutów z miedzi beztlenowej w stosunku do wartości, którymi charakteryzuje się miedź konwencjonalna. Na kolejnym z rysunków – 10.2.13 przedstawiono zjawisko powstawania w kablu teleinformatycznym tłumienności odbiciowej, dla którego to parametru wyniki pomiarów doświadczalnych w funkcji częstotliwości prądu ukazano na rysunkach 10.2.14 – 10.2.17. Ich interpretację stanowią natomiast charakterystyki zobrazowane na ilustracjach 10.2.18 – 10.2.21 jako zależności procentowej zmiany tłumienności żył z miedzi w gatunku Cu-OFE względem materiału tlenowego od częstotliwości prądu. Druga grupa występujących w torach transmisyjnych zniekształceń tłumieniowych poddana została analizie w oparciu o rysunki 10.2.22 – 10.2.25 czyli wykresy tłumienności falowej żył w funkcji częstotliwości, a także ukazane na ilustracjach 10.2.26 – 10.2.29 rezultaty jej procentowej zmiany dla materiału w gatunku Cu-OFE względem miedzi tlenowej w badanym paśmie przenoszenia. Trzecie zagadnienie problematyczne, którego tematyka skupia się wokół zniekształceń fazowych obejmuje analizę rysunków 10.2.30 – 10.2.33, na których przedstawiono zależności prędkości propagacji sygnału w żyłach przewodzących z dwóch gatunków miedzi (Cu-ETP, Cu-OFE) od częstotliwości, a także ilustracji 10.2.34 – 10.2.37 obrazujących wyniki procentowych zmian. To także ważna grupa krzywych na rysunkach 10.2.38 – 10.2.45 pokazujących relację wartości opóźnień propagacji sygnału elektrycznego dla poszczególnych torów transmisyjnych wytworzonych konstrukcji kablowych. Całość analizy zniekształceń fazowych kabli kategorii 6 kończą wyznaczone wartości przesunięcia fazowego zilustrowane zbiorczo na rysunku 10.2.46. Ostatnią grupę zniekształceń sygnałów w sieciach teleinformatycznych stanowią zakłócenia przenikowe. Na rysunku 10.2.47 ukazano zjawisko powstawania przesłuchów zbliżnych NEXT i zdalnych FEXT w czteroparowym torze transmisyjnym kabla. Z kolei uzyskane wyniki badań aplikacyjnych w odniesieniu do tłumienności zbliżnoprzenikowej i tłumienności zdalnoprzenikowej zilustrowano na rysunkach 10.2.48 – 10.2.59. Kolejne z własności, tym razem tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zbliżnego i zdalnego – odpowiednio PS NEXT i PS FEXT przedstawiono w postaci schematu zjawiska na rysunku 10.2.60 oraz wykresów odniesionych do częstotliwości prądu na ilustracjach 10.2.61 – 10.2.68. W pracy analizie poddano także uzyskane dla badanych trzech rodzajów konstrukcji kablowych wartości odstepu zbliżnoprzenikowego ACR i zdalnoprzenikowego ELFEXT zobrazowane na rysunkach 10.2.69 – 10.2.80. Niniejszy podrozdział kończą ukazane na rysunkach 10.2.81 – 10.2.88 charakterystyki ww. własności od częstotliwości prądu.

Ostatnim podrozdziałem jest część 10.3 stanowiąca podsumowanie przeprowadzonych pomiarów parametrów transmisyjnych wytworzonych konstrukcji teleinformatycznych UTP kategorii 6.

## 10.1. Technologia produkcji kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6

Rozwój nowoczesnej telekomunikacji w sposób nieodłączny związany jest z wysokozaawansowanymi aplikacjami kablowymi. Są to przewody telekomunikacyjne – teleinformatyczne [214], których różnorodne konstrukcje pozwalają na zwiększanie zakresu częstotliwości ich pracy. Przemysł telekomunikacyjny rozwijający się w oparciu o międzynarodowe

standardy okablowania strukturalnego budynków, do których dedykowana jest omawiana grupa aplikacji do późnych lat 80 używał tanich i łatwych w instalacji (ale o niskiej częstotliwości pracy) konstrukcji o budowie nieekranowanej skrętki. Od połowy lat 90 wiodące stowarzyszenia zajmujące się standaryzacją konstrukcji przewodowych do przesyłania danych, dźwięku i obrazu rozpoczęły dynamiczne prace nad publikacją serii specyfikacji dotyczących okablowania. Rezultatem było stworzenie norm z serii EIA/TIA. Od tego czasu nastąpiła ewolucja własności kabli teleinformatycznych stosowanych w sieciach lokalnych. Stopniowo wycofywane zostały wieloparowe przewody miedziane na rzecz kilkuparowych kabli rozdzielczych o innym – wyższych poziomach własności transmisyjnych. Przykładami takich przewodów są kable o budowie składającej się z czterech par żył przewodzących przedstawione na rysunku 10.1.1.



Rys. 10.1.1. Przykłady kabli teleinformatycznych o różnej budowie [93]

Analiza rysunku ukazuje, że wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje przewodów. Pierwsze to kable typu UTP (termin angielski: Unshielded Twisted Pair), dla których zarówno poszczególne pary, jak i cały ośrodek nie są ekranowane. Z kolei konstrukcje typu FTP (termin angielski: Foiled Twisted Pair) są kablami z wiązkami parowymi nie ekranowanymi i z ekranem ośrodka, wspólnym dla wszystkich par, który wykonany jest z laminowanej folii metalowej. Należy także wymienić trzeci rodzaj przewodu prezentujący budowę typu STP (termin angielski: Shielded Twisted Pair), dla którego każda z par znajduje się w oddzielnym ekranie, a ponadto na skręcony z par ośrodek nałożony jest opłot z ocynowanych drutów miedzianych. Wprowadzenie do wymienionych konstrukcji kablowych o typie FTP i STP ekranów wpływa na wyższą zdolność tłumienia zakłóceń, co pozwala na uzyskanie jeszcze wyższej jakości sygnału [94].

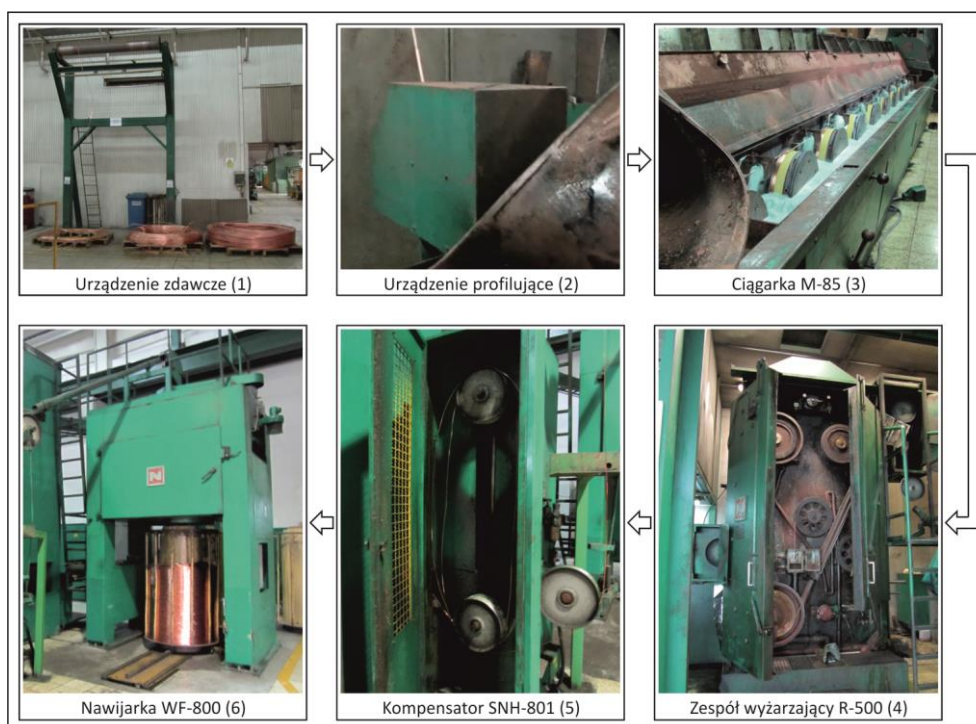
Należy zaznaczyć, iż światowe instytucje normalizacyjne przyjęły standardy kabli teleinformatycznych, gdzie grupy przewodów kwalifikuje się poprzez ich przydatność do pracy dla założonego pasma częstotliwości. Tym samym standardowe zakresy częstotliwości dla kabli teleinformatycznych, ustanowione przez normy europejskie serii PN-EN 50288 to: do 100 MHz – PN-EN 50288-3-1:2003 [215] – czyli kategoria kabli 5e, do 250 MHz – PN-EN 50288-6-1:2003 [216] – tj. kable kategorii 6 oraz do 600 MHz – PN-EN 50288-4-1:2003 [217] – konstrukcje kategorii 7.

Warto zaznaczyć, że przydatność torów do transmisji sygnałów analogowych bądź cyfrowych o określonym widmie częstotliwości jest całkowicie zdeterminowana przez ich parametry transmisyjne. Postęp techniczny i nowe wymagania spowodowały, że obecnie stosowane są wyłącznie kable kategorii 5e i wyższych. Z uwagi na powyższy fakt, a także uwzględniając przewagę na rynku teleinformatycznym aplikacji kablowych typu UTP kategorii 6 (przewody kategorii 7 mimo, iż gwarantują pracę w zakresie wyższych częstotliwości to są o około 50 % grubsze i bardziej twarde, co powoduje większe trudności w ich instalacji, a ponadto ze względu na konieczność zakończenia ekranu każdej pary to ich złącza są w tym przypadku o wiele bardziej skomplikowane, co wyraźnie utrudnia montaż) w ramach niniejszej pracy wytworzono i poddano pomiarom parametrów transmisyjnych trzy rodzaje ww. przewodów składających się z czterech torów (par) transmisyjnych, z których każdy utworzony został przez dwie pojedyncze i zaizolowane żyły miedziane o średnicy 0,58 mm skręcone ze sobą z określoną długością skoku skrętu. Wybór średnicy podyktowany był wymaganiami norm [216, 218]. Realizacja ścieżki technologicznej w warunkach przemysłowych w zakładzie Tele-Fonika Kable S.A. w Myślenicach umożliwiła uzyskanie trzech rodzajów kabli teleinformatycznych o takiej samej konstrukcji, natomiast różniących się materiałami żył przewodzących. W szczególności zostały one

wykonane z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz prętów z miedzi beztlenowej z linii Upcast odlanych przy dwóch skrajnych prędkościach – 4,0 m/min. i 0,5 m/min. oraz wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min.

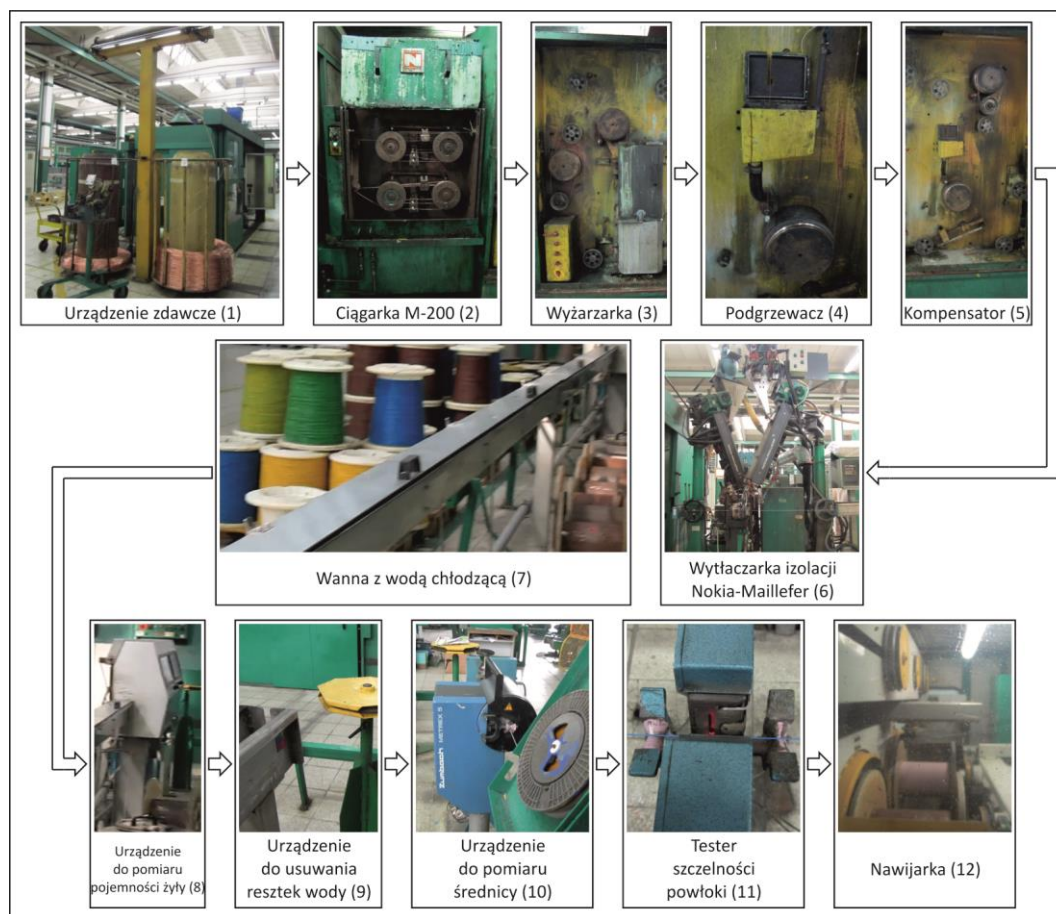
W procesie wytwarzania analizowanej grupy kabli wyróżnić można pięć głównych obszarów tj. technologię procesu ciągnięcia materiałów wsadowych o średnicach 8,0 mm na grubociąg na średnicę 2,6 mm, technologię procesu ciągnięcia drutów ze średnicy 2,6 mm na średnicę finalną 0,58 mm na średniociąg i wytłaczania izolacji, technologię procesu skręcania zaizolowanych żył w pary, technologię procesu skręcania czterech par żył w jeden ośrodek i technologię wytłaczania powłoki zewnętrznej kabla. W dalszej części niniejszego podrozdziału pracy dokonana zostanie krótka charakteryzacja poszczególnych etapów produkcji kabli.

Przetwarzanie walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz prętów z miedzi beztlenowej odbywa się na grubociągu M-85 firmy Niehoff dedykowanym do ciągnięcia miedzi i jej stopów. Proces realizowany jest na wielociągu posiadającym dziesięć kół ciągowych, przy czym na każdym znajdują się trzy zwoje materiału. Urządzenie umożliwia redukcję średnicy od 8,00 mm poprzez 6,35 mm – 5,21 mm – 4,33 mm – 3,64 mm – 3,10 mm – 2,66 mm do 2,60 mm. Jest to maszyna pracująca z poślizgiem 1,5 % posiadająca napęd zblokowany i charakteryzująca się założonym w górnej części układem prędkości poszczególnych kół ciągowych, co limituje w istocie rozkład gniotów i ogranicza zastosowanie tych maszyn do ciągnięcia typowych, łatwo odkształcalnych materiałów. Szybkość procesu ciągnięcia wynosi 35 m/s. W procesie stosuje się ciągadła typu compax z diamentów polikrystalicznych o wielkości ziarna 25  $\mu\text{m}$  i kącie stożka roboczego 18 °, które zanurzone są w emulsji ciągniczej spełniającej funkcję chłodząco-smarną. Stanowi ją roztwór 6 – 10 % oleju (np. Houghto – Draw WD4100) w wodzie demi o wartości pH około 8,7. Po przeciągnięciu materiału na średnicę finalną 2,6 mm drut kierowany jest do zespołu wyzarzającego typu R-500, gdzie przy pomocy odpowiedniego doboru prądu poddawany jest procesowi wygrzewania do uzyskania stanu miękkiego, który na bieżąco kontrolowany jest poprzez cykliczne poddawanie próbek materiału o finalnej średnicy statycznej próbie rozciągania. Kryterium stanowi tutaj wartość wydłużenia względnego, która powinna oscylować w granicach 45 – 50 % (baza pomiarowa 250 mm). Następnie materiał kierowany jest do kompensatora typu SNH-801, którego zadaniem jest tłumienie drgań i zapewnienie odpowiedniego naciągu przy wejściu drutu do nawijarki WF-800. Podsumowując – linia typu grubociąg, której schemat przedstawiono na rysunku 10.1.2, składa się z urządzenia zdawczego (1), urządzenia profilującego (2), ciągarci M-85 z dziesięcioma kołami ciągowymi (3), zespołu wyzarzającego R-500 (4), kompensatora SNH-801 (5) oraz nawijarki WF-800 (6).



Rys. 10.1.2. Schemat technologiczny linii produkcyjnej typu grubociąg M-85 firmy Niehoff

W kolejnym – drugim etapie realizacji ścieżki technologicznej druty o średnicach 2,6 mm poddane zostają dalszemu procesowi ciągnięcia na maszynie wielobiegowej typu średniociąg oraz zabiegowi wytłaczania izolacji. Schemat technologiczny omawianej linii ukazano na rysunku 10.1.3.

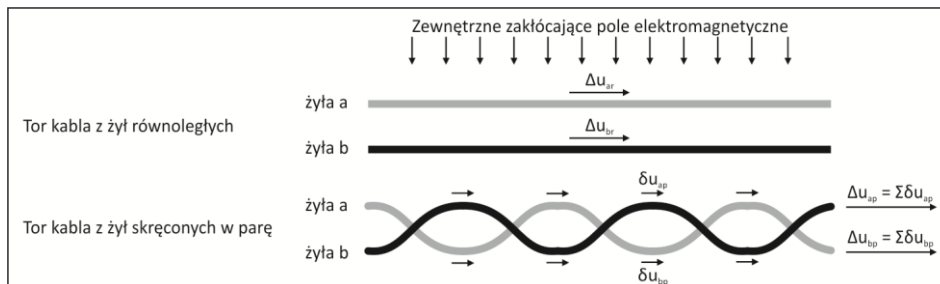


Rys. 10.1.3. Schemat technologiczny linii produkcyjnej typu średniociągu M-200 firmy Niehoff

Podobnie jak w przypadku poprzednio opisanej instalacji całość operacji rozpoczyna się z chwilą przejścia materiału z urządzenia zdawczego (1) do ciągarki (2) umożliwiającej redukcję średnicy drutu z 2,6 mm poprzez 2,570 mm – 2,344 mm – 2,089 mm – 1,862 mm – 1,659 mm – 1,479 mm – 1,318 mm – 1,159 mm – 1,068 mm – 0,917 mm – 0,854 mm – 0,7342 mm – 0,662 mm – 0,589 mm na średnicę finalną 0,580 mm. Średniociąg typu M-200 jest maszyną pracującą z poślizgiem 1,5 % o prostej konstrukcji, której sterowanie oparte jest na jednym silniku dużej mocy i układzie przednich kół zębatych napędzających poszczególne cztery koła ciąagowe. Ciągarka umożliwiająca prędkość ciągnięcia na poziomie 40 m/s wyposażona jest w ciągadła z diamentu polikrystalicznego – o parametrach takich jak w przypadku poprzednio omówionej linii Niehoff M-85 – znajdujące się pod natryskiem emulsji olejowej o stężeniu 10 – 15 %. W dalszym ciągu technologicznym materiał o średnicy finalnej poddawany jest ingerencji napięcia w oporowym układzie wyżarzającym (3) w celu ujednorodnienia struktury, poprawy jakości powierzchni drutu oraz uzyskania wymaganych wartości wydłużenia względnego. Kolejny etap w procesie technologicznym to przejście drutu przez komorę podgrzewacza (4) i realizacja zabiegu obróbki cieplnej w temperaturze około 120 °C. Zabieg prowadzony jest z uwagi na fakt, iż temperatura odgrywa wpływ na uzyskiwane wartości pojemności żył i jakości ich powierzchni. Po przejściu materiału przez komorę kompensatora (5) drut kierowany jest do izolarki (6), która służy do przetwórstwa niskostratnego polietylenu piankowego w gatunku ME-1244 metodą wytłaczania. Parametry procesu tj. temperaturę i ciśnienie określa się względem danej średnicy izolacji i pojemności skutecznej. Jedną z części składowych wytłaczarki jest automatyczny dozownik barwinków tzw. plastikolor. Zaizolowany w ten sposób drut miedziany poddawany jest procesowi chłodzenia w wodzie o temperaturze 20 °C. Zabieg odbywa się w wannie (7) posiadającej funkcję przesuwną. Należy zaznaczyć zasadność prowadzenia operacji z uwagi na jej bezpośredni

wpływ na odnotowane, pożądane – niskie wartości pojemności skutecznej materiałów. Dlatego też kolejnym przyrządem pełniącym funkcję kontrolną w omawianej linii technologicznej jest tester pomiaru pojemności żyły (8). W kolejnym etapie drut w izolacji kierowany jest to urządzenia odprowadzającego resztki wody z powierzchni (9), a następnie przyrządu mierzącego średnicę zewnętrzną żyły w dwóch płaszczyznach (10). Przed wejściem materiału na nawijarkę (12) za pomocą miernika napięciowego (11) odbywa się ostateczna kontrola szczelności powłoki mająca na celu wychwycenie ewentualnych nieciągłości. Warty podkreślenia jest, że mimo iż prędkość całej linii wynosi aż 420 m/min. i w trakcie procesu produkcyjnego zaizolowana żyła podlega pomiarom pojemności skutecznej, średnicy i szczelności powłoki to oprócz tego na bieżąco, a nie po ostatecznym zakończeniu procesu wytworzone próbki poddawane są dodatkowym pomiarom. Kontrola ma na celu sprawdzenie wartości wydłużenia względnego drutu, które musi być utrzymywane na poziomie około 22 % i średnicy żyły w izolacji – wartość  $1,04 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$  – a także asymetrii izolacji czyli tzw. centryczności pod mikroskopem optycznym. W przypadku stwierdzenia niezgodności którejs z wymienionych własności następuje zmiana parametrów prowadzonego procesu technologicznego, a wytworzony do tej pory materiał zostaje zełomowany. Obserwuje się zatem, że proces wytwarzania omawianej grupy kabli jest obostrzony licznymi pomiarami kontrolnymi w celu zapewnienia jak najwyższej jakości wyrobu finalnego.

Z uwagi, iż wytwarzany asortyment kabli teleinformatycznych charakteryzuje się budową czteroparową, z czego każda z par transmisyjnych składa się z dwóch skręconych ze sobą zaizolowanych żył kolejny – trzeci etap procesu produkcyjnego obejmuje zabiegi skręcania na wysokozaawansowanej skręcarce Setic Gauder wyposażonej w lirę. Zanim przedstawiona zostanie charakterystyka procesu warto ukazać istotę i zasadność zabiegów skręcania żył w wiązki parowe stosowanych w kablach kategorii 6 do przesyłania sygnałów analogowych. Otóż jest to skuteczny i powszechnie stosowany sposób zmniejszenia rozpraszania energii sygnałów, ponieważ zapobiega przenikaniu sygnałów do sąsiednich torów i do otoczenia. Tym samym, zmniejsza przenikanie sygnałów z torów sąsiednich do torów wiązki (przeniki) oraz od źródeł zewnętrznych (zakłócenia). Schematyczne wyjaśnienie tego zjawiska zilustrowano na rysunku 10.1.4.

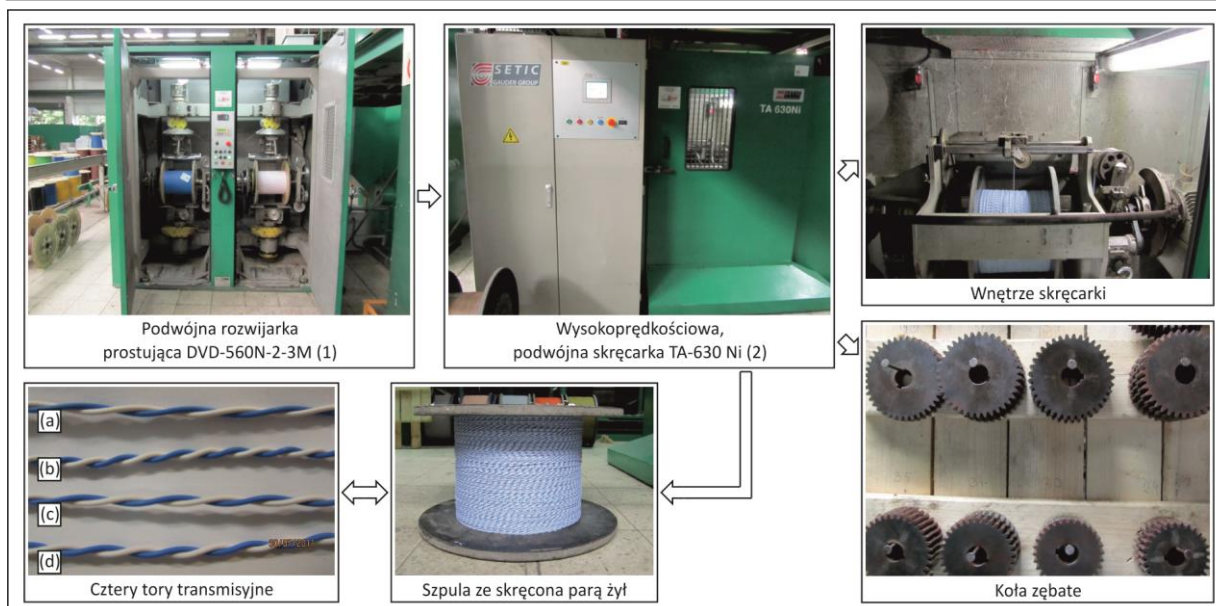


Rys. 10.1.4. Indukowanie napięć w żyłach kabla od zewnętrznego pola elektromagnetycznego

Na analizowanym rysunku tor (czyli obwód elektryczny, którym przesyłane są sygnały) tworzą dwie żyły kabla: a i b. Jeśli są one ułożone równolegle względem siebie, jedna z nich (a) znajduje się bliżej, a druga (b) dalej od zewnętrznego źródła zakłóceń, którego linie pola oznaczono pionowymi strzałkami w górnej części ilustracji. W żyłe bliższej źródła indukowane są większe napięcia zakłócające ( $\Delta U_{ar}$ ) niż w żyłe dalszej ( $\Delta U_{br}$ ). W zamkniętym obwodzie elektrycznym obydwie napięcia mają przeciwne znaki i częściowo się skompensują, ale w torze kabla pozostanie ich różnica ( $\Delta U_{ar} - \Delta U_{br}$ ). Jeśli natomiast żyły są skręcone w parę ze stałym skokiem skrętu, wówczas odległość każdej z żył od źródła zakłóceń zmienia się okresowo i w każdej połowie skoku skrętu indukuje się na przemian jedno z dwóch napięć:  $\delta U_{ap}$  lub  $\delta U_{bp}$ . Sumaryczne napięcie w każdej żyłe będzie takie samo i w zamkniętym obwodzie elektrycznym obydwie napięcia całkowicie się skompensują. Podobny mechanizm kompensacji sygnałów ma miejsce między dwoma ułożonymi blisko siebie parami. Korzystne jest jednak, gdy każda para jest skręcone z innym skokiem. Żyły sąsiednich par są w stosunku do siebie w zmieniającej się okresowo odległości, co powoduje indukowanie w żyłach takich samych sygnałów i ich kompensację w pętli każdego toru.

Powracając zatem do głównego nurtu rozważań dotyczących technologii produkcji kabli teleinformatycznych w etapie trzecim dotyczącym procesu skręcania analizie poddany zostanie schemat technologiczny instalacji przedstawiony na rysunku 10.1.5.

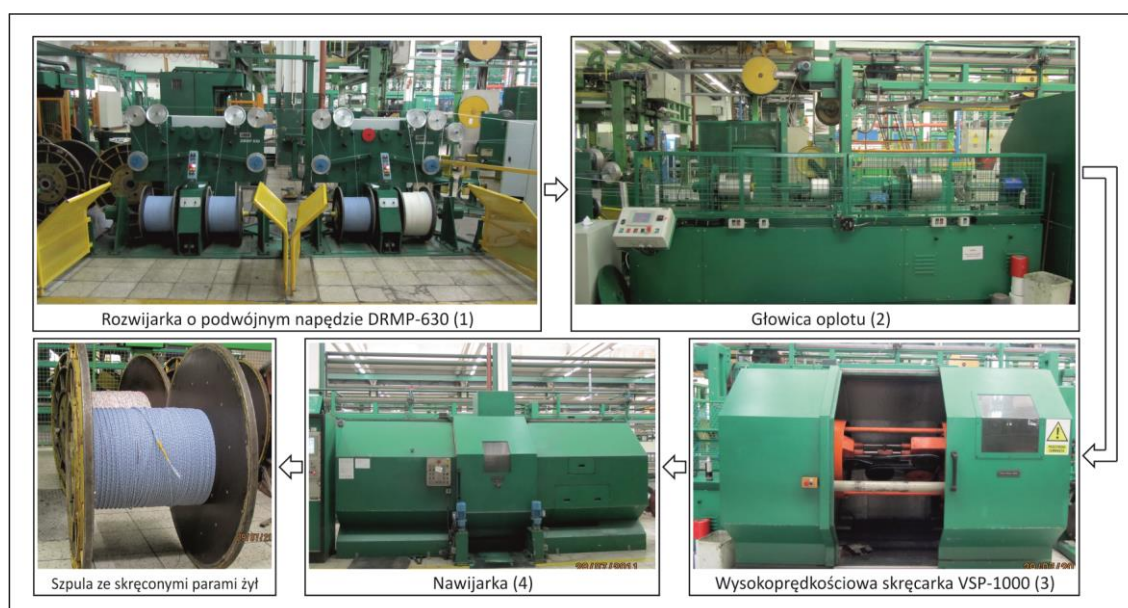




Rys. 10.1.5. Schemat technologiczny linii do skręcania zaizolowanych żył w pary firmy Setic Gauder

W początkowym etapie realizacji procesu dwie szpule z nawiniętymi zaizolowanymi żyłami umieszczane zostają w urządzeniu zdawczym (1), które prostuje materiały na zasadzie podwójnego skręcania. Zestaw tworzą dwie rozwijarki ustawione równolegle obok siebie na ramie, przy czym obie napędzane są jednym silnikiem na prąd zmienny za pomocą krążków linowych oraz paska napędu. Urządzenie wyposażone jest w silnik kontrolujący prędkość szpuli, umożliwiając właściwe naprężenie materiału przy rozwijaniu, które kontrolowane jest za pomocą pozycji kompensatora. Z kolei proces skręcania realizowany jest na skręcarce lirowej (2) ze stopniem odkręcania 25 %. Szybkość realizacji procesu technologicznego wynosi 30 m/min. Częścią obrotową skręcarci jest pasek rozrządu napędzany z obu końców za pomocą osi transmisyjnej. Jak nadmieniono wcześniej dla każdej z czterech par stosuje się różne długości skoków skrętu, które ustawia się w skręcarce za pomocą kół zębatych (por. rys. 10.1.5). Według analizowanej technologii w odniesieniu do poszczególnych torów zgodnie z oznaczeniami w dolnej części rysunku 10.1.5 długości skoków wynoszą: dla pierwszego (a) – 17,4 mm, drugiego (b) – 10,1 mm, trzeciego (c) – 15,4 mm oraz czwartego (d) – 12,8 mm.

Czwarty etap produkcji kabli teleinformatycznych kategorii 6 obejmuje proces skręcania czterech par w jeden ośrodek. Realizowany jest za pomocą skręcarci w wygiętym w łuk pasem blachy (lira), a ogólny schemat technologiczny linii zlustrowano na rysunku 10.1.6.



Rys. 10.1.6. Schemat technologiczny linii do skręcania par w ośrodek firm Setic Gauder i Pourtier

Cztery pary skręconych z różnymi długościami skrętów żył wraz z dodatkową piątą szpulą, na którą nawinięty jest – stosowany w konstrukcjach teleinformatycznych kategorii 6 i pełniący funkcję separującą poszczególne pary – plastikowy krzyżyk z urządzenia zdawczego (1) – rozwijarki o podwójnym napędzie kierowane są do głowicy oplotu. Tam skręcone żyły układane są względem siebie na wspomnianym krzyżyku, a po ich przejściu przez kaliber 5,5 mm kierowane są do skręćarki. Prędkość procesu skręcania wynosi 8 m/min., przy czym realizowany jest kierunek skręcania: w lewą stronę, a zadany skok skręt wynosi 100 mm (liczna skrętów 90 obrotów na minutę). Uzyskana w ten sposób konstrukcja poddawana jest procesowi nawijania (4) na szpule. Należy podkreślić, że wytworzony czteroparowy ośrodek o długości 100 m podlega kontrolnym pomiarom parametrów transmisyjnych prądem niskiej i wysokiej częstotliwości w celu sprawdzenie poprawności przeprowadzonej technologii i zgodności zadanych parametrów z własnościami wyrobu gotowego.

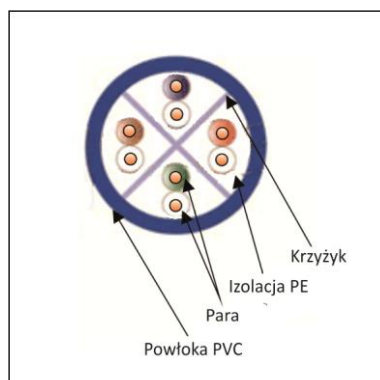
Finalny etap w procesie produkcji kabli teleinformatycznych kategorii 6 stanowi technologia wytłaczania powłoki zewnętrznej na uzyskaną w poprzednim etapie konstrukcję, której schemat ukazano na rysunku 10.1.7.



Rys. 10.1.7. Schemat technologiczny linii do wytłaczania powłoki zewnętrznej kabla teleinformatycznego

Początkowy etap procesu to, podobnie jak poprzednio, przejście materiału – skręconego, czteroparowego ośrodka z urządzenia zdawczego (1) za pośrednictwem kompensatora (2), który utrzymuje równomierny naciąg skrętki i tłumi wszelkie drgania materiału powstające w trakcie jego odwijania ze szpuli do wytłaczarki powłok (3). Urządzenie służące do przetwarzania termoplastycznego polwinitu za pomocą głowicy z dozownikiem umożliwia nakładanie ww. tworzywa na ośrodek kabla. Następnie wyrób podawany jest do wanny z wodą chłodzącą (4) w celu obniżenia jego temperatury przed procesem nawinięcia. Następnie materiał poprzez przejście przez komorę urządzenia odprowadzającego resztki wody z powierzchni (5) poddawany jest pomiarom średnicy (6), która kształtuje się na poziomie około 7,3 mm. Kolejny etap kontroli wytworzonej konstrukcji to

wychwycenie wszelkich nieciągłości powłoki polinitowii za pomocą miernika próby napięciowej – testera (7). Długość uzyskanego kabla poddawana jest pomiarom i znakowaniu długości (8), po czym gotowy kabel, którego ilustrację schematyczną przedstawiono na rysunku 10.1.8 nawijany jest za pomocą zwijarki (9) na szpulę.



Rys. 10.1.8. Kabel teleinformatyczny kategorii 6

## 10.2. Pomiary parametrów transmisyjnych kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6

Badaniom parametrów transmisyjnych poddano trzy rodzaje kabli teleinformatycznych kategorii 6 przeznaczonych do transmisji sygnałów analogowych wielkiej częstotliwości (do 250 MHz), z których każdy o takiej samej konstrukcji zbudowany został z żył jednodrutowych o średnicach 0,58 mm, czteroparowych. Każda z trzech konstrukcji kablowych różniła się materiałami żył przewodzących, które w celach porównawczych w ramach dysertacji zostały wykonane z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz z prętów z miedzi beztlenuowej odlanej przy dwóch skrajnych prędkościach w linii przemysłowej Upcast tj. 4,0 m/min. oraz 0,5 m/min. Celem tej części badań była obserwacja, czy odmienności składu chemicznego i stanu strukturalnego materiałów wsadowych, które ujawniły się w zróżnicowaniu własności uzyskanych w procesie ciągnięcia drutów będą także zauważalne w przypadku pomiarów transmisyjnych gotowych konstrukcji kablowych. Warto zaznaczyć, iż długość każdego z trzech wyprodukowanych kabli wynosiła 1 km, z czego każdy został pocięty na dziesięć równych części i poddany badaniom parametrów transmisyjnych zgodnie z normami przedmiotowymi [216, 218], które określają m.in. że pomiary prądem niskiej i wysokiej częstotliwości należy przeprowadzać na 100 metrowych odcinkach kabli. Zatem przedstawione w niniejszym podrozdziale wyniki są wartościami średnimi z dziesięciu pomiarów przeprowadzonych dla każdego z przewodów pomiarów, przy czym do celów kompleksowej analizy zostaną bezpośrednio odniesione do wymagań obowiązujących norm [216, 218].

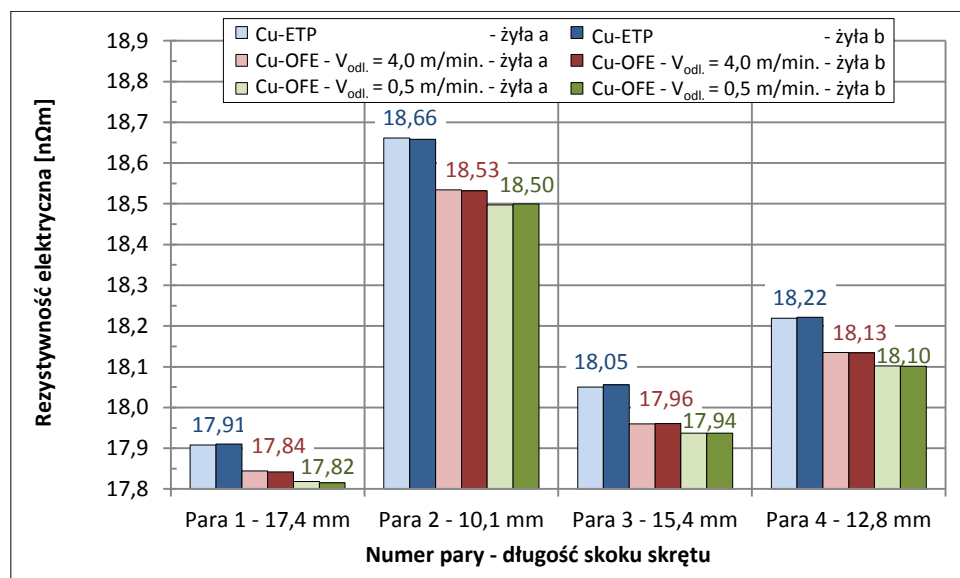
Należy także zaznaczyć, że badania przeprowadzono na urządzeniu AESA 9500 – bardzo profesjonalnym i stosowanym w zakładach kablowym do pomiarów własności transmisyjnych ośmiu par kabli teleinformatycznych nieekranowanych UTP lub ekranowanych STP kategorii 3 – 7 o impedancji 100, 120 i 150  $\Omega$ . System o zwartej konstrukcji łączy w sobie wszystkie przyrządy potrzebne do wykonywania pomiarów charakterystyk nisko-częstotliwościowych i wysoko-częstotliwościowych [219].

### 10.2.1. Pomiary prądem niskiej częstotliwości

Pomiary prowadzone przy prądzie stałym o niskiej częstotliwości wynoszącej 800 Hz dotyczyły badań rezystancji elektrycznej – zarówno dla każdej z dwóch żył przewodzących tworzących poszczególne pary torów transmisyjnych indywidualnie, jak i sumarycznie w stosunku do dwóch żył (rezystancja pętli) oraz pomiarów asymetrii rezystancji, a także pojemności skutecznej pomiędzy poszczególnymi parami i podobnie jak w przypadku rezystancji – asymetrii pojemności poszczególnych torów transmisyjnych względem ziemi.

## 10.2.1.1. Rezystancja elektryczna, asymetria rezystancji elektrycznej

Druty o średnicach 0,58 mm po usunięciu z ich powierzchni izolacji oraz zewnętrznej powłoki kabla zostały poddane pomiarom oporności elektrycznej zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 50289-1-2 [220]. Na rysunku 10.2.1 zilustrowano uzyskane dla wszystkich żył przewodzących – oznaczonych jako  $R_a$ ,  $R_b$  tworzących poszczególne pary kabla – wartości oporności elektrycznej. Dane liczbowe do konstrukcji wykresów zamieszczono w aneksie w tabeli A10.2.1.



Rys. 10.2.1. Rezystywność elektryczna żył przewodzących o średnicach 0,58 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących badane czteroparowe konstrukcje przewodowe kabli teleinformatycznych kategorii 6

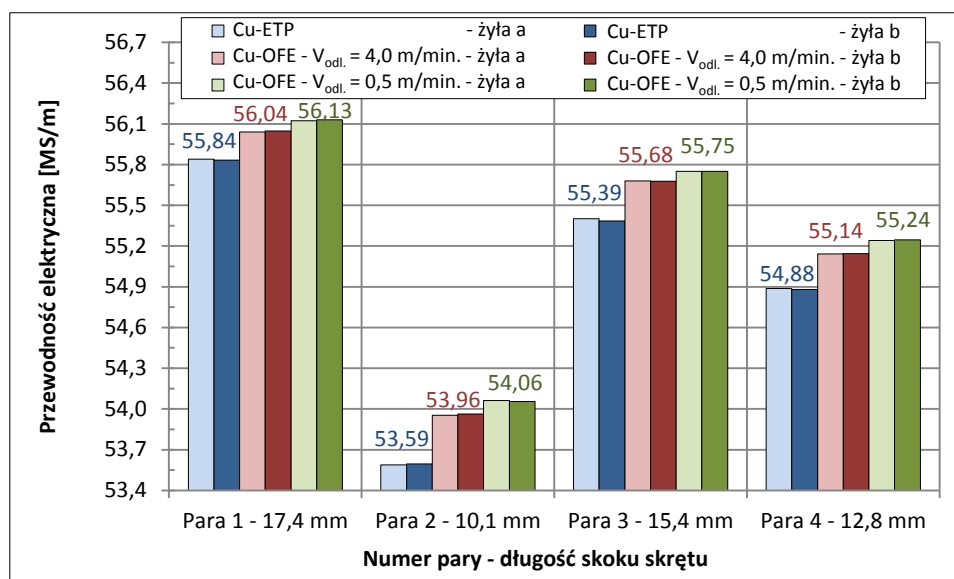
Przystępując do analizy pomiarów rezystancji elektrycznej każdej ze skręconych żył (oznaczenie: żyła a, żyła b) tworzących daną parę należy zaznaczyć, iż odnotowane wartości zależą nie tylko od rodzaju zastosowanego materiału przewodzącego, ale także – co obserwuje się na podstawie analizy rysunku – długości skoku skrętu. Oczywistym jest, że im krótszy skok tym rezystancja kształtuje się na wyższym poziomie, co ma bezpośredni związek z rzeczywistą długością żyły przewodzącej. W związku z powyższym poddając analizie wartości oporności odniesione do zastosowanych dla poszczególnych par skoków skrętu, a mianowicie: pierwszej – 17,4 mm, drugiej – 10,1 mm, trzeciej – 15,4 mm oraz czwartej – 12,8 mm należy zaznaczyć prawidłowość odnotowanych rezultatów. Najwyższe wartości rezystywności wykazują materiały tworzące drugą parę kabla, natomiast najniższe – pierwszą. Z kolei dokonując analizy wyników w odniesieniu do drutów uzyskanych z różnych materiałów zauważa się, iż najwyższymi wartościami oporności charakteryzują się żyły z miedzi w gatunku Cu-ETP. Powyższa obserwacja dotyczy materiałów tworzących każdą z czterech par konstrukcji kablowej. Z kolei żyły przewodzące z miedzi beztlenowej wykazują niższe wartości, przy czym im mniejsza prędkość odlewania materiału wsadowego tym wartości kształtują się na niższym poziomie. Ponadto wartości oporności zanotowane dla poszczególnych żył każdej z czterech par, bazujących na tych samych materiałach wsadowych kształtują się na bardzo zbliżonym poziomie, co z jednej strony dowodzi prawidłowo przeprowadzonych pomiarów, z drugiej zaś poprawnie zrealizowanych prób technologicznych wykonania konstrukcji przewodowej, czego wyznacznikiem jest także określana podczas pomiarów asymetria rezystancji pomiędzy żyłami tej samej pary. Jest nią różnica rezystancji dwóch żył tej samej wiązki kabla, która wyrażana jest wzorem:

$$R_{ub} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max} + R_{min}} \cdot 100 \% \quad (10.2.1)$$

gdzie:

- $R_{ub}$  – asymetria rezystancji w torach transmisyjnych [%],
- $R_{max}$  – rezystancja żyły o wyższej wartości rezystancji [ $\Omega$ ],
- $R_{min}$  – rezystancja żyły o niższej wartości rezystancji [ $\Omega$ ].

Powołując się na analizę wykresów na rysunku 10.2.1, a także w oparciu o dane zamieszczone w aneksie w tabeli A10.2.1 zauważa się, że wartości asymetrii rezystancji żył dowolnej pary dla wszystkich trzech rodzajów kabli kształtują się na poziomie średnio 0,01 %, co w odniesieniu do norm określających wartość tego współczynnika na poziomie maksymalnie 2 % [216] lub 3 % [218] jest wynikiem na wysokim, zadawalającym poziomie. W celu lepszego zobrazowania zanotowanych dla badanych materiałów różnic własności elektrycznych na kolejnym rysunku 10.2.2 przedstawiono wykresy ilustrujące wyniki będące odwrotnością rezystywności czyli przewodności elektrycznej dla poszczególnych torów transmisyjnych.

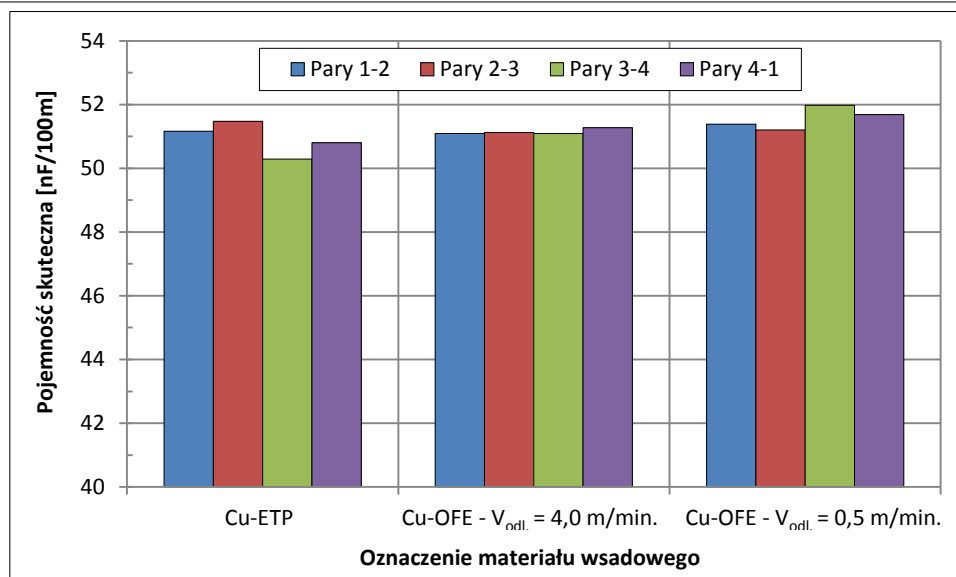


Rys. 10.2.2. Konduktywność elektryczna żył przewodzących o średnicach 0,58 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących badane czteroparowe konstrukcje przewodowe kabli teleinformatycznych kategorii 6

Analiza charakterystyk umożliwia stwierdzenie, że najwyższymi wartościami konduktywności charakteryzują się kable, których żyły przewodzące wykonano z miedzi beztlenowej z procesu ciągłego odlewania metodą Upcast przy prędkości odlewania 0,5 m/min. Na zbliżonym poziomie kształtują się także wyniki zanotowane dla drutów otrzymanych z miedzi beztlenowej, ale przy nieco wyższej prędkości 4,0 m/min. Powyższe charakterystyki po raz kolejny dowodzą niskich wartości przewodności elektrycznej tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne miedzi w gatunku Cu-ETP. Przeprowadzone w warunkach przemysłowych pierwsze z pomiarów parametrów transmisyjnych gotowych konstrukcji kablowych bazujących na żyłach przewodzących wykonanych z różnych miedzianych materiałów wsadowych dowodzą odnotowanego w poprzednim etapie pracy (por. podrozdział 9.4) zróżnicowania własności elektrycznych drutów. Badania te są szczególnie istotne z uwagi na fakt, iż rezystancja ma istotny wpływ na tłumienie (straty) energii sygnałów o częstotliwościach radiowych. Pomiarom prądem niskiej częstotliwości w odniesieniu do symetrycznych torów transmisyjnych, oprócz badań rezystancji obejmują także pomiary pojemności skutecznej omówione w kolejnym podrozdziale dysertacji.

#### 10.2.1.2. Pojemność skuteczna, asymetria pojemności skutecznej

Pomiary pojemności skutecznej pomiędzy żyłami tego samego toru symetrycznego dokonywane w warunkach zrównoważenia (tzn. nie stosuje się poziomu napięcia 0 V, co pozwala na eliminację niektórych zakłóceń) dla badanych trzech konstrukcji kablowych przeprowadzono zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 50289-1-5 [221]. Wyniki badań zilustrowano na rysunku 10.2.3. Dane liczbowe do konstrukcji charakterystyk zamieszczono w aneksie w tabeli A10.2.2.



Rys. 10.2.3. Pojemność skuteczna pomiędzy żyłami przewodzącymi z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tego samego toru symetrycznego tworzącego czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6

Przystępując do analizy wyników pojemności skutecznej omawianych kabli należy zaznaczyć, iż wartość ta wynika z istnienia elementów przewodzących, na których może zgromadzić się ładunek, oddzielonych izolatorem, pomiędzy którymi występuje różnica potencjałów, czyli napięcie. Zatem na wielkość pojemności skutecznej wpływa zarówno rodzaj wprowadzonego pomiędzy elementy przewodzące izolatora – a w szczególności jego własności dielektryczne, jak i geometria całego układu. W przypadku układów płaskich pojemność wyraża się wzorem:

$$C = \frac{\varepsilon_w \varepsilon_0 S}{d} \quad (10.2.2)$$

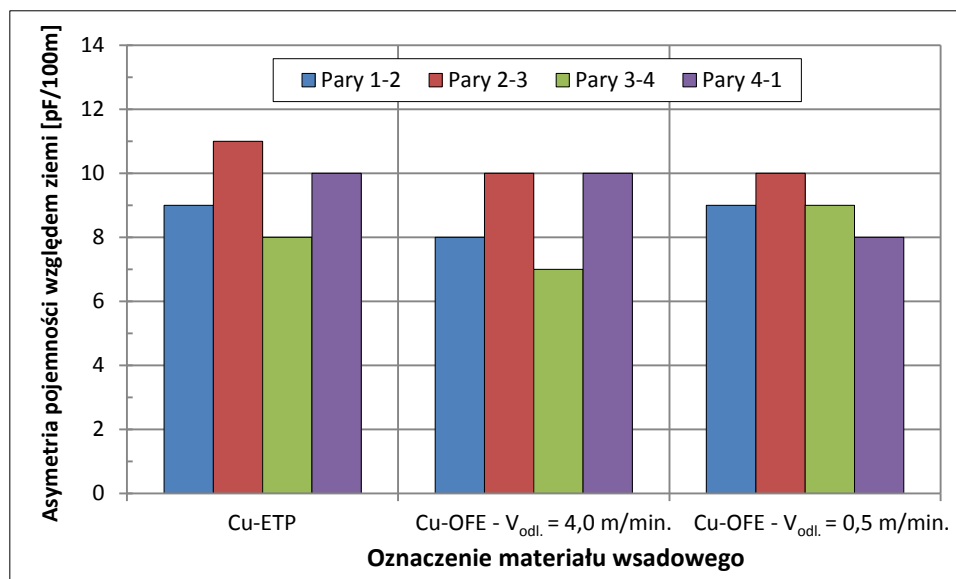
gdzie:

- $\varepsilon_w$  – przenikalność dielektryczna względna [F/m],
- $\varepsilon_0$  – przenikalność dielektryczna próżni ( $8,86 \cdot 10^{-12}$ ) [F/m],
- $S$  – pole powierzchni przewodnika [ $m^2$ ],
- $d$  – odległość pomiędzy przewodnikami [m].

Zauważa się zatem, że pojemność zależy od geometrii układu i własności dielektrycznych materiału izolacyjnego. Zmiana tych dwóch parametrów wpływa na zmianę pojemności kabla i daje możliwość jej obniżenia. Własnością materiału izolacyjnego która wpływa na pojemność konstrukcji jest przenikalność dielektryczna względna  $\varepsilon_w$ . Wielkość ta wskazuje ile razy wzrasta pojemność kabla po wstawieniu pomiędzy przewodniki dielektryka w stosunku do przewodu próżniowego o takiej samej geometrii. Należy zaznaczyć, iż wartość  $\varepsilon_w$  zmienia się dla różnych materiałów w dość szerokich granicach, w zależności od natury dielektryka, ale zawsze  $\varepsilon_w > 1$  [222]. Zastosowany w ramach przeprowadzonych prób technologicznych materiał izolacyjny żył przewodzących w postaci polietylenu charakteryzuje się niską przenikalnością dielektryczną – wynoszącą około 2,3 w stosunku do stosowanego powszechnie do produkcji tradycyjnych kabli polichlorku winylu (PVC) i pozostaje taka sama bez względu na to czy jest to polietylen otrzymywany metodą wysokociśnieniową, czy niskociśnieniową [223, 224]. W związku z powyższym przy analizowanym w ramach dysertacji rodzaju kabla teleinformatycznego kategorii 6 uzyskane wartości pojemności skutecznej należy traktować jako wyznaczniki dokładności wykonania poszczególnych par żył, czyli zachowania ich geometrii.

Powracając do analizy otrzymanych w pracy wyników należy podkreślić, iż odnotowane wartości dla poszczególnych par trzech rodzajów konstrukcji kablów zachowane są na stałym poziomie wynoszącym średnio około 51 nF/100 m, przy czym stwierdzone wahania wartości wynoszą maksymalnie 3 nF/100 m. Ważnym parametrem związanym z pojemnością skuteczną wytwarzanej konstrukcji teleinformatycznej jest asymetria pojemności względem ziemi jako różnica pojemności cząstkowych poszczególnych żył tego samego kabla. Uzyskane dla badanych trzech konstrukcji

kablowych wyniki zilustrowano na kolejnym rysunku 10.2.4. Podobnie jak w przypadku omówionej w poprzednim podrozdziale asymetrii rezystancji i w tym przypadku małe wartości niesymetrii pojemności świadczą o poprawnym wykonaniu kabla.



Rys. 10.2.4. Asymetria pojemności względem ziemi poszczególnych żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tego samego toru symetrycznego tworzącego czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6

Uzyskane wyniki obejmujące zakres 7 –10 pF/100 m pozwalają na stwierdzenie wysokiego poziomu jakości wytworzonych konstrukcji. O ile normy przedmiotowe dotyczące kabli teleinformatycznych nie określają wartości pojemności skutecznych, o tyle standard PN-EN 50288-6-1 [216] warunkuje, iż poprawną pracą zagwarantuje przewód charakteryzujący się wartością asymetrii na poziomie  $\leq 160$  pF/100 m. Omawiając w dalszym ciągu pojemnościowy parametr asymetrii należy podkreślić – o czym wspomniano już wcześniej – dużą rolę geometrii izolacji nałożonej na żyłę przewodzącą, ale także jakości zastosowanego materiału i prawidłowego prowadzenia procesu technologicznego. Z pierwszym z wymienionych czynników związana jest tzw. centryczność izolacji, która zawsze zmienia się w pewnym, niewielkim zakresie z uwagi na dynamikę linii produkcyjnej, a konkretnie konieczność zachowania określonej prędkości w całej technologii. Funkcję taką pełnią obecne w liniach kablowych kompensatory równoważące np. szybkość obrotową w linii wytłaczającej izolację. Z kolei jakość materiału stosowanego na powłokę kabla to bardzo trudny do interpretacji w warunkach przemysłowych, w których współdziała obok siebie wiele zróżnicowanych czynników parametr związany także z procesem produkcyjnym i możliwością wystąpienia wszelkiego rodzaju otarć powierzchni kabla, czy jego lokalnych przytarć. Należy pamiętać, iż przemieszczająca się po rolkach prowadzących żyła ulega miejscowemu zaginaniu, co nie pozostaje bez wpływu na uzyskane wartości asymetrii rezystancji, które mają bardzo duże znaczenie w przypadku zakłóceń przenikowych kabli. Zatem uzyskane w wyniku prób technologicznych prowadzonych w ramach niniejszej dysertacji wartości asymetrii rezystancji wynoszące średnio kilka pF/100 m należy uważać jako w pełni zadowalające.

Przedstawione w ramach podrozdziału 10.2.1 pomiary parametrów transmisyjnych kabli – rezystancji i pojemności skutecznej – prowadzone przy prądzie niskiej częstotliwości stanowią pierwszy etap weryfikacji poprawności wykonanej konstrukcji przewodowej z punktu widzenia przydatności kabla do transmisji sygnałów elektrycznych torami symetrycznymi. Tym samym dostarczają informacji, czy wytworzony przewód może zostać poddany kompleksowym badaniom prądem wysokiej częstotliwości, które umożliwiają pełną charakteryzację kabli teleinformatycznych o żyłach przewodzących wykonanych z różnych rodzajów materiałów wsadowych pod kątem zniekształceń i zakłóceń. Ponadto przedstawione w niniejszym podrozdziale informacje dotyczące przemysłowych warunków wytwarzania kabli i związanych z nimi problemów techniczno-technologicznych dostarczają czytelnikowi wiedzy, której znajomość ułatwia interpretację odnotowanych wyników.

## 10.2.2. Pomiary prądem wysokiej częstotliwości

Symetryczne tory przewodowe nie są idealnymi mediami transmisyjnymi. Przesyłane w ten sposób sygnały są zniekształcane i zakłócone. Należy podkreślić, iż w torach przewodowych występują trzy podstawowe rodzaje zniekształceń: zniekształcenia odbiciowe, zniekształcenia tłumieniowe oraz zniekształcenia fazowe. Ponadto, rzeczywiste tory przewodowe nie są idealnie chronione przed zakłóceniami przenikającymi z ich zewnętrznego otoczenia. W przypadku analizowanych w pracy kabli czteroparowych, są to zakłócenia przenikowe, indukowane w torze przez pole elektromagnetyczne towarzyszące transmisji sygnałów w sąsiednich torach tego samego kabla, albo typowe zakłócenia zewnętrzne, indukowane przez źródła zakłóceń, ulokowane w sąsiedztwie kabla. Wymienione zjawiska na podstawie analizy przeprowadzonych pomiarów prądem wysokiej częstotliwości – do 250 MHz – zostaną omówione w ramach niniejszego podrozdziału.

### 10.2.2.1. Zniekształcenia odbiciowe

Energię sygnału przenosi w torze przewodowym fala elektromagnetyczna, nazywana falą docelową, podążająca od źródła sygnału, dołączonego do początku toru, w kierunku przyłączonego do końca toru odbiornika sygnału. W stanie niedopasowania falowego oprócz fali docelowej pojawiają się w torze niepożądane fale odbite. Fala jednokrotnie odbita ma kierunek ruchu przeciwny do fali docelowej i nazywana jest echem pierwotnym. Z kolei fala dwukrotnie odbita porusza się w kierunku zgodnym z falą docelową, lecz z opóźnieniem w stosunku do niej, nazywana jest echem wtórnym.

#### 10.2.2.1.1. Impedancja falowa

Każdy tor przewodowy charakteryzuje pewna specyficzna wartość impedancji, nazywana impedancją falową. Jeżeli impedancja dołączona do końca toru ma tę samą wartość, czyli gdy impedancja wejściowa odbiornika sygnału jest równa impedancji falowej toru, to występuje wówczas stan dopasowania falowego, w którym nie ma fal odbitych od końca toru, a ponadto, impedancja wejściowa toru jest wówczas równa impedancji falowej. W praktyce, stan dopasowania falowego daje się zrealizować tylko w przybliżeniu. Zatem, pojawia się zawsze słaba fala odbita od końca toru. Z tego samego powodu impedancja wewnętrzna źródła sygnału również powinna być w przybliżeniu równa impedancji falowej toru, bowiem impedancja wewnętrzna źródła jest „odbiornikiem” fali odbitej od końca toru i niedopasowanie falowe na początku toru spowoduje pojawienie się fali dwukrotnie odbitej (echa wtórnego). Echo wtórne dociera do odbiornika z opóźnieniem i zakłóca sygnały użyteczne wysłane przez źródło po upływie czasu tego opóźnienia, powodując ich zniekształcenia odbiciowe.

W niniejszym podrozdziale analizie poddane zostaną wyniki pomiarów impedancji falowej omawianych trzech konstrukcji kablowych różniących się materiałami żył przewodzących. W ramach krótkiego przypomnienia warto jedynie nadmienić, iż impedancja falowa jako całkowity opór stawiany przez kabel przepływowi prądu przemiennego o określonej częstotliwości wyznaczana jest przez pomiar pośredni mierząc impedancję wejściową (w stanie jałowym) i impedancję wyjściową (w stanie zwarcia) obwodu zgodnie ze wzorem:

$$Z = \sqrt{Z_j \cdot Z_z} = \sqrt{\frac{Z_z}{Y_j}} = \frac{1}{\sqrt{Y_j Y_z}} = \sqrt{\frac{Z_j}{Y_z}} \quad (10.2.3)$$

gdzie:

- $Z_j$  – impedancja wejściowa w stanie jałowym [ $\Omega$ ],
- $Z_z$  – impedancja wejściowa w stanie zwarcia [ $\Omega$ ],
- $Y_j$  – przewodność wejściowa w stanie jałowym [S],
- $Y_z$  – przewodność wejściowa w stanie zwarcia [S].

Powyższa zależność w odniesieniu do linii stratnej uwzględniająca także rezystancję i reaktancję przyjmuje postać:

$$Z = \sqrt{\frac{Z_j}{Y_z}} = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad (10.2.4)$$

gdzie:

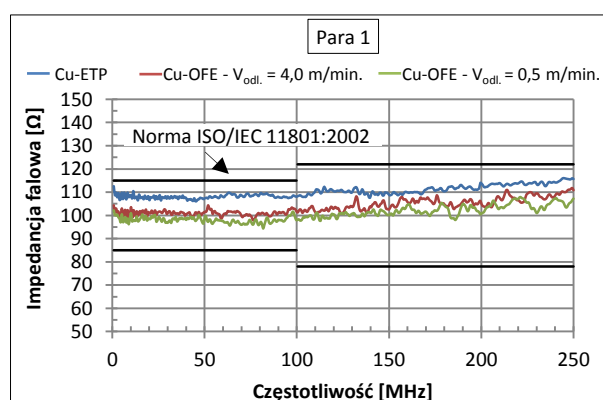
- $R$  – rezystancja na jednostkę długości linii reprezentująca wszelkie straty cieplne w obu



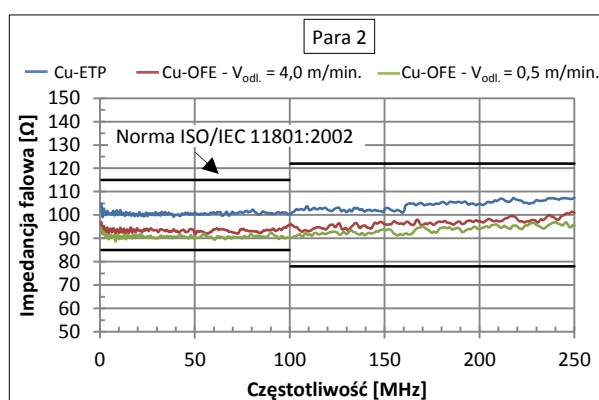
- przewodach linii [ $\Omega/m$ ],
- $L$  – indukcyjność na jednostkę długości linii reprezentująca pole magnetyczne obu przewodów linii [ $H/m$ ],
- $G$  – konduktancja na jednostkę długości linii reprezentująca ewentualne straty ciepłe w dielektryku linii [ $S/m$ ],
- $C$  – pojemność na jednostkę długości linii reprezentująca pole elektryczne w dielektryku między przewodami linii [ $F/m$ ],
- $j$  – jednostka urojona [-],
- $\omega$  – pulsacja [ $rad/s$ ].

Na podstawie powyższych wzorów obserwuje się zatem, że impedancja nie zależy od długości danej linii, lecz od budowy danej konstrukcji, tzn. wymiarów oraz materiałów, przez które przenika pole elektromagnetyczne sygnału.

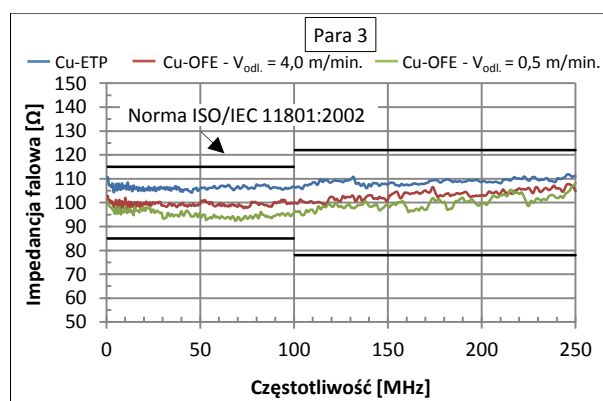
Przeprowadzone w tej części pracy zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 50289-1-11 [225] badania impedancji falowej torów przewodzących, z których każdy utworzony został przez dwie skręcone ze sobą żyły miedziane z dwóch gatunków miedzi i otrzymane wartości zilustrowano zbiorczo na rysunkach 10.2.5 – 10.2.8. Dane liczbowe niezbędne do konstrukcji charakterystyk zamieszczono w aneksie w tabeli A10.2.3. Z uwagi na dużą ilość – 400 – przeprowadzonych pomiarów przy częstotliwościach od 0,772 MHz do 250 MHz w wymienionej tabeli zamieszczono wybrane wartości.



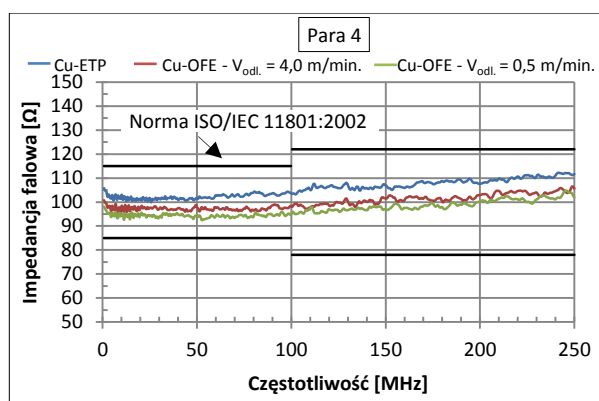
Rys. 10.2.5. Charakterystyki impedancji falowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących pierwszą parę (skok skrętu 17,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.6. Charakterystyki impedancji falowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących drugą parę (skok skrętu 10,1 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.7. Charakterystyki impedancji falowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących trzecią parę (skok skrętu 15,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

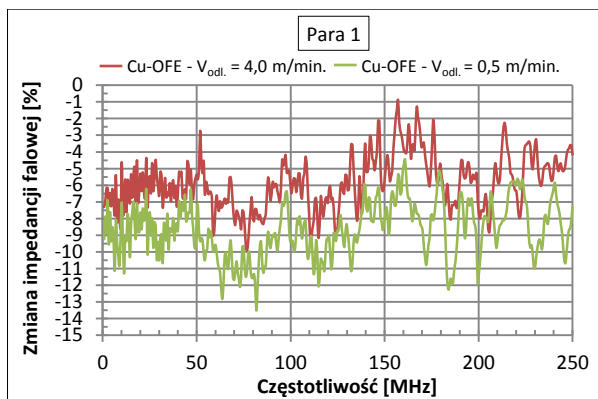


Rys. 10.2.8. Charakterystyki impedancji falowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czwartą parę (skok skrętu 12,8 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

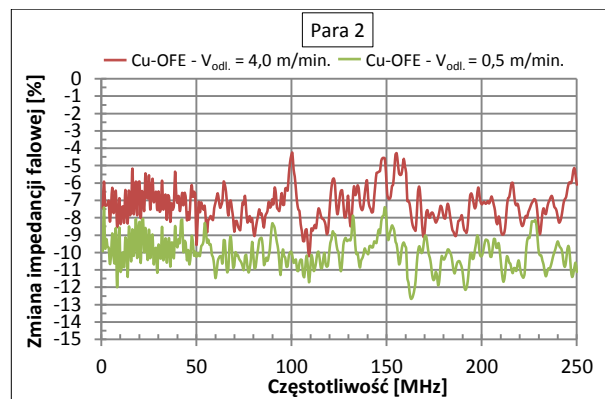
Analiza wykresów zależności impedancji falowej torów transmisyjnych kabla teleinformatycznego, którego żyły przewodzące otrzymane zostały w procesie ciągnięcia walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i prętów z miedzi beztlenowej wskazuje na powtarzalną tendencję w kształtowaniu własności dla poszczególnych materiałów. Najwyższe wartości impedancji wykazują

żyły z miedzi tlenowej, które w całym zakresie pomiarów prądem wysokiej częstotliwości kształtują na poziomie średnio około 102 – 110  $\Omega$ . Obserwacja dotyczy drutów tworzących każdą z czterech par kabla, przy czym zgodnie z wcześniejszymi informacjami nie zauważa się wpływu długości skoku skrętu na przedstawione własności. Na niższym poziomie kształtują się wartości zanotowane dla drutów z miedzi beztlenowej. Odnotowane wyniki dla żył bazujących na prętach uzyskanych metodą Upcast przy prędkości odlewania 4,0 m/min. wynoszą średnio od około 95  $\Omega$  do maksymalnie 103  $\Omega$ , natomiast dla drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE z procesu ciągłego odlewania z szybkością 0,5 m/min. obejmują jeszcze niższy poziom sięgający średnio od wartości 92  $\Omega$  do wartości około 100  $\Omega$ . Obserwacja potwierdza wpływ stanu strukturalnego miedzi na odnotowane własności elektryczne kabli, co dowodzi słuszności postawionej w pracy tezy. Analiza charakterystyk ujawnia także dla wszystkich z badanych materiałów wzrost impedancji kabla wraz ze zwiększaniem częstotliwości prądu. Wynika to z faktu, że im wyższa częstotliwość, tym bliżej powierzchni przewodnika płynie prąd elektryczny. Nie jest to zjawisko korzystne, ponieważ wraz ze wzrostem częstotliwości maleje wykorzystywana powierzchnia żył przewodzących, co skutkuje wzrostem impedancji kabla. Sygnał zaczyna płynąć nierównomiernie i następuje utrata bardzo cichych składowych, co w wrażeniach słuchowych określane jest jako brak powietrza czy informacji subtelnych. Dlatego też tak istotne jest stosowanie materiałów przewodzących gwarantujących jak najniższe wartości impedancji falowych.

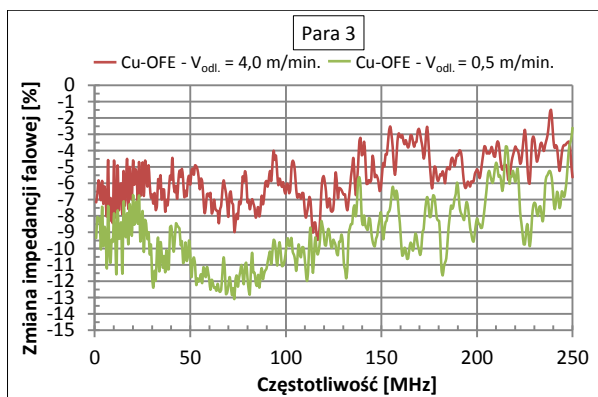
Kontynuację analizy przedstawionych na rysunkach 10.2.5 – 10.2.8 wykresów ilustrujących wartości impedancji falowej żył z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE stanowią ukazane na kolejnych ilustracjach 10.2.9 – 10.2.12 procentowe zmiany impedancji falowej miedzi beztlenowej w stosunku do wartości zanotowanych dla materiału tlenowego.



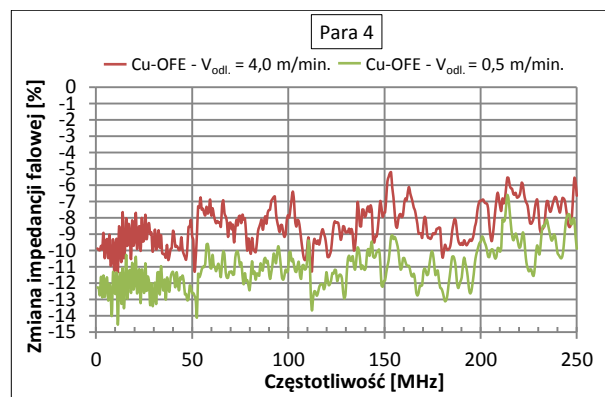
Rys. 10.2.9. Procentowa zmiana impedancji falowej żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących pierwszą parę (skok skrętu 17,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.10. Procentowa zmiana impedancji falowej żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących drugą parę (skok skrętu 10,1 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.11. Procentowa zmiana impedancji falowej żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących trzecią parę (skok skrętu 15,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.12. Procentowa zmiana impedancji falowej żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących czwartą parę (skok skrętu 12,8 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

Na podstawie analizy przedstawionych wykresów zauważa się, że zanotowane podczas pomiarów wartości impedancji miedzi beztlenowej kształtują się na dużo niższym poziomie w stosunku do miedzi tlenowej. W szczególności dla żył przewodzących z materiału w gatunku Cu-OFE uzyskanego przy prędkości odlewania 4,0 m/min. wartości impedancji są niższe o około 9,5 – 10,5 % w stosunku do materiałów bazujących na walcówkach. Z kolei dla drugiego z beztlenowych materiałów otrzymanego sposobem Upcast przy niższej szybkości odlewania – 0,5 m/min. wartości impedancji w stosunku do drutów z miedzi tlenowej kształtują się na jeszcze niższym poziomie obejmującym zakres średnio 12,5 – 14,5 %. Biorąc pod uwagę poprawność przeprowadzonej próby technologicznej, w ramach której wytworzone zostały trzy rodzaje konstrukcji kablowych o zróżnicowanych materiałach żył przewodzących zróżnicowanie odmienności wartości impedancji falowych utożsamiane jest z ich odmiennymi stanami strukturalnymi.

Szkodliwość zniekształceń odbiciowych sprawia, że odbicia pochodzące od wewnętrznych nieregularności torów muszą być kontrolowane przez producenta kabli i utrzymywane na możliwie najniższym poziomie. Ze względu na współzależność sygnałów echa wtórnego i echa pierwotnego wystarczająca jest kontrola jednego z nich. Najczęściej, badany jest sygnał echa pierwotnego, ponieważ jego poziom jest zdecydowanie wyższy niż poziom echa wtórnego. Wypadkowy poziom odbić jednokrotnych, pochodzących od nieregularności toru przewodowego, charakteryzuje ilościowo tłumienność odbiciowa toru (termin angielski: return loss, skrót: RL), której pomiary w odniesieniu do badanych konstrukcji przewodowych z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE stanowią temat kolejnego z podrozdziałów.

#### 10.2.2.1.2. Tłumienność odbiciowa

Pomiary tłumienności odbiciowej zwanej także współczynnikiem odbicia sygnału, czyli echem jako badania parametrów transmisyjnych przeprowadzono zgodnie z obowiązującą normą PN-EN 50289-1-11 [225], która określa, że tłumienność pochodząca od nieregularności toru przewodowego związana jest bezpośrednio z impedancją tj.:

$$RL = -20 \log \left( \frac{|Z_x - Z_{nom}|}{|Z_x + Z_{nom}|} \right) \quad (10.2.5)$$

gdzie:

$$Z_x = Z_{in} \cdot \frac{Z_{in} + Z_{nom} \cdot \tanh(\gamma \cdot l)}{Z_{nom} + Z_{in} \cdot \tanh(\gamma \cdot l)} \quad (10.2.6)$$

$RL$  – tłumienność odbiciowa [dB],

$\gamma$  – tłumienność falowa toru [ $\Omega$ ] wyrażająca się wzorem:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (10.2.7)$$

gdzie:

$\alpha$  – tłumienność falowa (PN-EN 50289-1-8 [226]) [dB/m]

$\beta$  – stała fazowa (PN-EN 50289-1-7 [227]) [rad./m]

$l$  – długość badanego kabla [m],

$Z_{nom}$  – impedancja nominalna kabla [ $\Omega$ ]

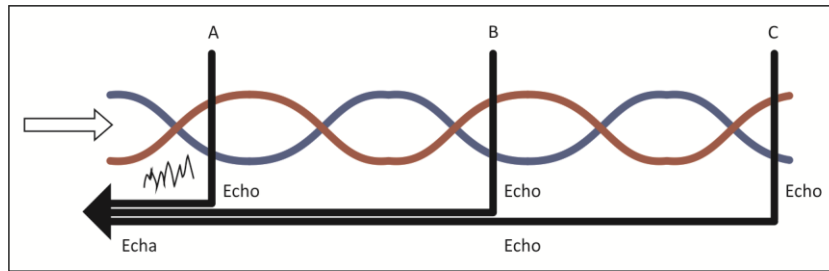
$Z_{in}$  – impedancja wejściowa określona wzorem:

$$Z_{in} = \sqrt{Z_j \cdot Z_z} \quad (10.2.8)$$

Należy przy tym zaznaczyć, iż omawiana tłumienność odbiciowa określona jest przez różnicę poziomów (w decybelach) sygnału użytecznego oraz niepożądanego echa pierwotnego (wypadkowego sygnału odbić jednokrotnych od nieregularności wewnętrznych kabla) w punkcie dołączenia źródła, co można zobrazować zależnością:

$$RL[dB] = -20 \log \frac{\text{amplituda fali jednokrotnie odbitej}}{\text{amplituda fali docelowej}} \quad (10.2.9)$$

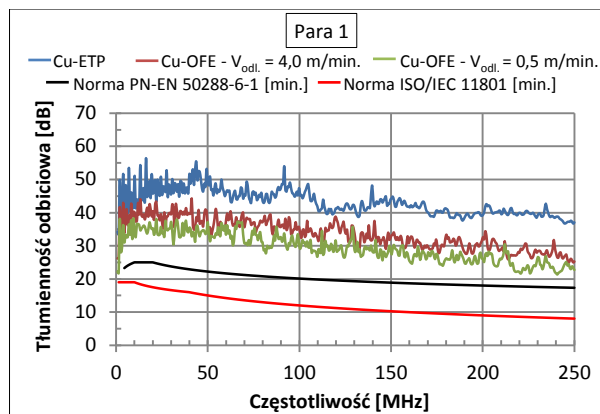
Każda nieregularność w łączy – wada wtyk, gniazdo, powoduje odbicie transmitowanego impulsu, czyli wygenerowanie w miejsce niedopasowania szkodliwej fali zwrotnej, zniekształcającej przez pewien czas impulsy. Obrazową interpretację przedstawionych powyżej zależności ilustruje schemat na rysunku 10.2.13 ukazujący powstawanie zjawiska tłumienności odbiciowej, którego źródłem jest każda niejednorodność impedancji falowej skrętki (oznaczenie A, B i C na rysunku) powodująca odbicia.



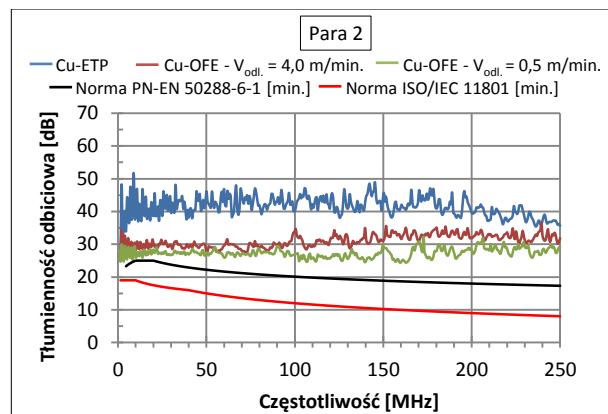
Rys. 10.2.13. Zjawisko powstawania w kablu teleinformatycznym tłumienności odbiciowej (źródłem echa jest każda niejednorodność impedancji falowej skrętki, tu w miejscach oznaczonych jako: A, B i C powoduje odbicia)

Analiza rysunku umożliwia stwierdzenie, że tłumienność odbiciowa określa stosunek mocy sygnału wprowadzonego do toru transmisyjnego do mocy sygnału odbitego, który powstaje na skutek niedopasowania impedancji toru transmisyjnego. Sygnał ten może być źródłem zakłóceń dla sygnału użytecznego, co jest bardzo istotne w przypadku transmisji w dwóch kierunkach w tym samym torze transmisyjnym.

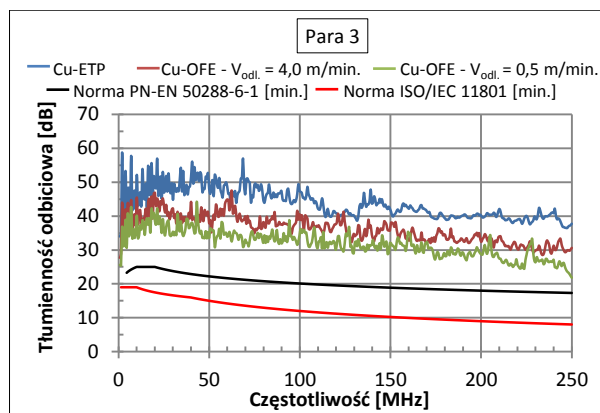
Powracając do głównego nurtu pracy dotyczącego badań aplikacyjnych trzech opracowanych konstrukcji kablowych z żyłami przewodzącymi z miedzi tlenowej i beztlenowej analizie poddano zarejestrowane podczas pomiarów charakterystyki tłumienności odbiciowej torów przewodowych w zakresie częstotliwości od 0,722 MHz do 250 MHz. Przedstawiono je na rysunkach 10.2.14 – 10.2.17. Podobnie jak poprzednio wybrane wartości niezbędne do skonstruowania przedstawionych charakterystyki zamieszczono w aneksie w tabeli A10.2.4.



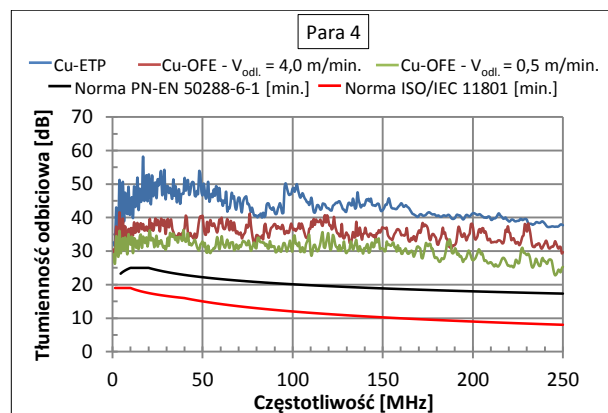
Rys. 10.2.14. Charakterystyki tłumienności odbiciowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących pierwszą parę (skok skrętu 17,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.15. Charakterystyki tłumienności odbiciowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących drugą parę (skok skrętu 10,1 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

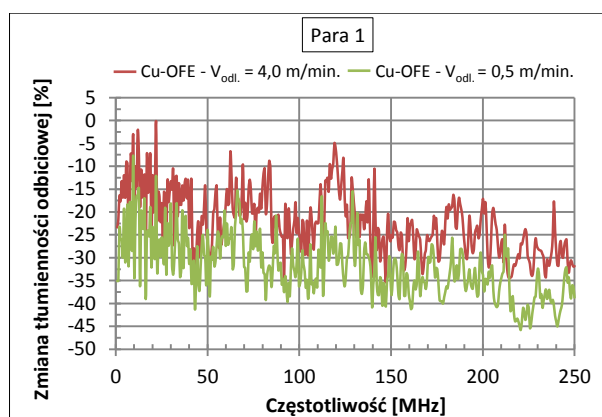


Rys. 10.2.16. Charakterystyki tłumienności odbiciowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących trzecią parę (skok skrętu 15,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

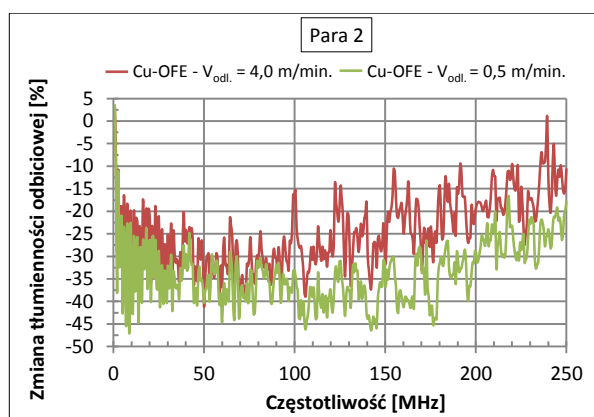


Rys. 10.2.17. Charakterystyki tłumienności odbiciowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czwartą parę (skok skrętu 12,8 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

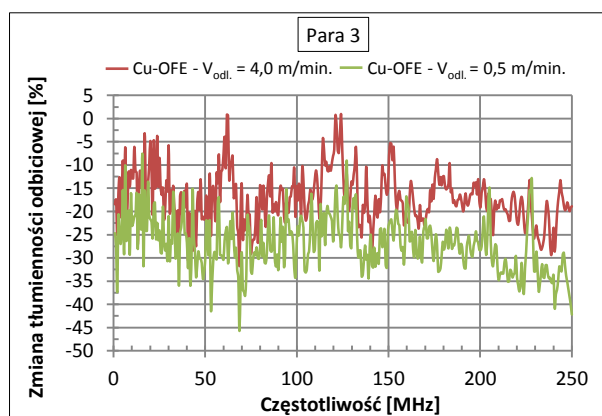
Na podstawie analizy zilustrowanych charakterystyk zmian tłumienności odbiciowej torów transmisyjnych utworzonych przez żyły przewodzące z miedzi beztlenowej i tlenowej obserwuje się dwie grupy krzywych. Pierwsza zanotowana dla drutów z miedzi w gatunku Cu-ETP charakteryzuje się przebiegami charakterystyk na najwyższym poziomie, z kolei druga utworzona jest przez tory transmisyjne z żyłami przewodzącymi otrzymanymi z miedzi beztlenowej w procesie Upcast przy szybkościach 4,0 m/min. i 0,5 m/min. Należy zaznaczyć, iż zaobserwowane krzywe charakteryzują się przebiegami na zbliżonych poziomach dla każdej z czterech par. Wartości tłumienności odbiciowej zanotowane dla miedzi w gatunku Cu-ETP w całym zakresie częstotliwości pomiarowych obejmujących zakres 0,772 – 250 MHz kształtują się na poziomie średnio 43 dB, z kolei dla żył z miedzi beztlenowej otrzymanej w procesie ciągłego odlewania z prędkościami 4,0 m/min. i 0,5 m/min. wynoszą odpowiednio około 34 dB i 30 dB. Obserwuje się zatem, że zanotowane podczas pomiarów parametrów transmisyjnych wartości zniekształceń odbiciowych takich jak tłumienność odbiciowa dla miedzi w gatunku Cu-OFE kształtują się na poziomie średnio o około 10 dB niższym w stosunku do tradycyjnej miedzi tlenowej. Zanotowane podczas prób badawczych zmiany wartości tłumienności odbiciowej torów transmisyjnych z miedzi beztlenowej względem par żył bazujących na miedzi w gatunku Cu-ETP przedstawiono na kolejnych ilustracjach 10.2.18 – 10.2.21 umożliwiających bezpośrednią interpretację przedstawionych powyższej charakterystyk.



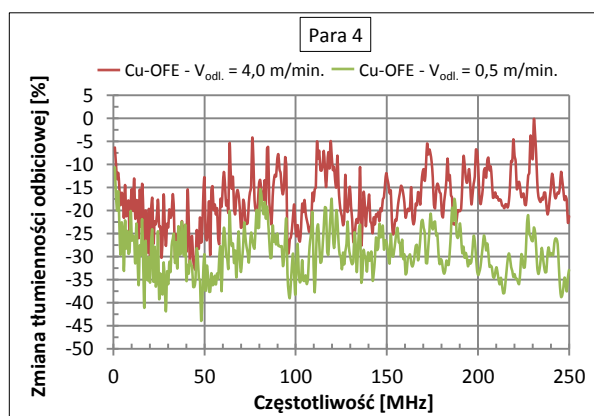
Rys. 10.2.18. Procentowa zmiana tłumienności odbiciowej żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących pierwszą parę (skok skrętu 17,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.19. Procentowa zmiana tłumienności odbiciowej żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących drugą parę (skok skrętu 10,1 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.20. Procentowa zmiana tłumienności odbiciowej żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących trzecią parę (skok skrętu 15,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.21. Procentowa zmiana tłumienności odbiciowej żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących czwartą parę (skok skrętu 12,8 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

Zilustrowane na rysunkach 10.2.18 – 10.2.21 charakterystyki ukazują, że zanotowane dla torów transmisyjnych z żyłami z miedzi beztlenowej wartości strat odbiciowych są nawet do kilkudziesięciu procent niższe aniżeli te, którymi charakteryzują się kable z przewodnikami z miedzi w gatunku Cu-ETP. Szczegółowa analiza przebiegów krzywych w odniesieniu do poszczególnych par tworzących konstrukcję przewodową dostarcza informacji, że zmiana tłumienności odbiciowej tworzących dla żył otrzymanych z miedzi beztlenowej z procesu ciągłego odlewania przy prędkościach 4,0 m/min. i 0,5 m/min. wynosi odpowiednio dla pierwszej pary około 22 % i 32 %, dla drugiej – 24 % i 34 %, dla trzeciej – 17 % i 27 % oraz dla czwartej – 18 % i 29 %. Te kształtujące się na wysokim poziomie wartości zanotowane dla miedzi beztlenowej świadczą po raz kolejny o wpływie struktury odlewniczej na uzyskiwane w próbach technologicznych wartości parametrów transmisyjnych kabli teleinformatycznych, a w związku z tym są jednym z ważniejszych wyników dowodzenia tezy niniejszej pracy.

Przedstawione w niniejszym podrozdziale wyniki badań tłumienności odbiciowej nazywanej także stratnością przesyłu sygnału elektrycznego ilustrują duże zróżnicowanie wartości zanotowanych dla żył przewodzących z dwóch gatunków miedzi. Należy zaznaczyć, że co oczywiste pożądane są jak najniższe wartości tłumienności dla analizowanych przewodów, co podyktowane jest faktem, że jeżeli tłumienie będzie zbyt duże, a tym samym sygnał będzie stawał się zbyt słaby to odbiornik nie będzie w stanie odróżnić sygnału od szumu i wystąpią błędy transmisji. Dlatego tak dużego znaczenie w dzisiejszych czasach nabiera stosowanie wysokozaawansowanych materiałów umożliwiających minimalizację stratności przesyłu sygnału elektrycznego. Oprócz zniekształceń odbiciowych w torach transmisyjnych występują także niekorzystne zniekształcenia tłumieniowe, których analizę przeprowadzano w ramach kolejnego z podrozdziałów.

#### 10.2.2.2. Zniekształcenia tłumieniowe

Transmisji sygnału torem przewodowym towarzyszą straty energii elektromagnetycznej sygnału. Część tej energii ulega zamianie na ciepło, zarówno w materiale przewodzącym żył, jak też w izolacji toru (straty dielektryczne). W rezultacie, amplituda sygnału zmniejsza się systematycznie ze wzrostem odległości od źródła sygnału dołączonego do toru, co oznacza tłumienie sygnału. Miarą tego zjawiska jest tłumienność falowa toru (termin angielski: attenuation loss), określona przez stosunek amplitud sygnału na początku i na końcu toru w stanie dopasowania falowego (impedancja wejściowa odbiornika dołączonego do końca toru musi być równa impedancji falowej toru). Analiza tłumienności falowej w oparciu o przeprowadzone pomiary stanowi tematykę niniejszego podrozdziału.

##### 10.2.2.2.1. Tłumienność falowa

Tłumienność falowa badanych w ramach dysertacji konstrukcji kablowych wyznaczana była z pomiarów z obwodem otwartym i zwarcie zgodnymi z wymaganiami normy PN-EN 50289-1-8 [226] w oparciu o wzór:

$$\alpha L = \frac{8,682}{2} \cdot \operatorname{arctanh} \left[ \frac{2A}{(1+A^2) \cdot \cos(B)} \right] \quad (10.2.10)$$

$$A = \sqrt{\frac{|Z_s|}{|Z_o|}} \quad (10.2.11)$$

$$B = \frac{1}{2}(\varphi_s - \varphi_o) \quad (10.2.12)$$

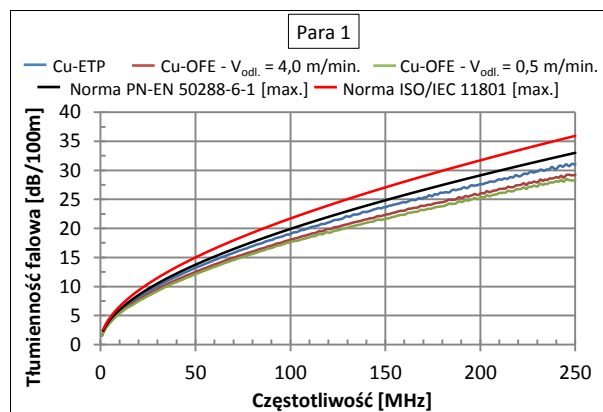
gdzie:

- $\alpha$  – tłumienność falowa kabla [dB],
- $L$  – długość kabla [m],
- $|Z_o|$  – moduł impedancji wejściowej kabla z obwodem rozwartym na końcu kabla [ $\Omega$ ],
- $|Z_s|$  – moduł impedancji wejściowej kabla ze zwarcie na końcu kabla [ $\Omega$ ],
- $\varphi_o$  – kąt fazowy impedancji wejściowej kabla z obwodem rozwartym na końcu kabla,
- $\varphi_s$  – kąt fazowy impedancji wejściowej kabla ze zwarcie na końcu kabla.

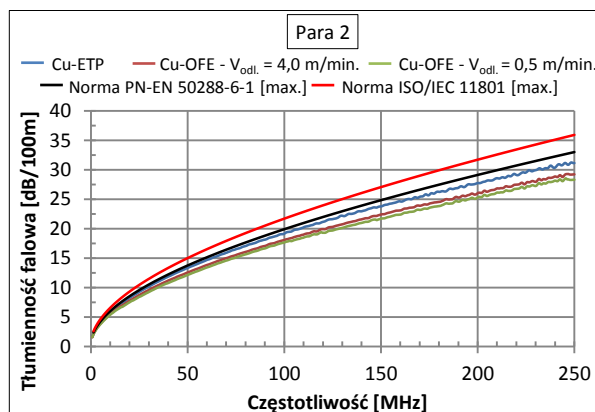
Pomiary tłumienności falowej uwzględniają także tzw. tłumienność wtrąceniową [226], czyli straty wprowadzone przez podłączenie kabla do systemu. Jest to logarytm stosunku mocy  $P_1$  dostarczonej do odbiornika połączony wprost z generatorem i mocy  $P_2$  dostarczonej do tego samego

odbiornika, kiedy pomiędzy generator i odbiornik włączono kabel. Pomiar wykonuje się metodą transmisyjną [226]. Po wprowadzeniu korekcji uwzględniającej długość kabla i w warunkach dopasowania tłumienność wtrąceniowa jest równoważna tłumienności kabla.

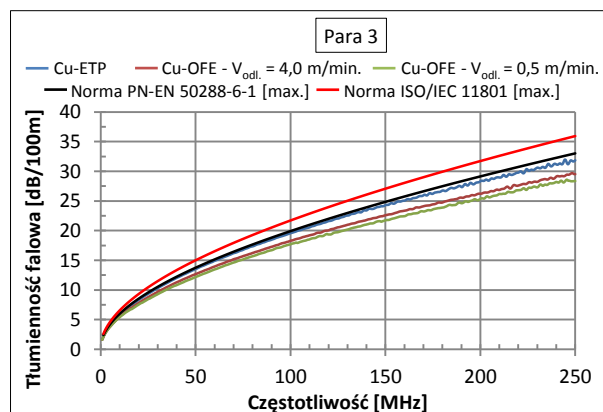
Na rysunkach 10.2.22 – 10.2.25 przedstawiono zanotowaną dla trzech konstrukcji kablowych sumę wyników strat wtrąceniowych. Podobnie jak w przypadku poprzednio omawianych parametrów wartości zanotowane zostały dla torów transmisyjnych o długości 100 m dla każdego typu okablowania bazującego na żyłach przewodzących z dwóch gatunków miedzi. Wybrane spośród 400 pomiarów dane liczbowe zamieszczono w aneksie w tabeli A10.2.5.



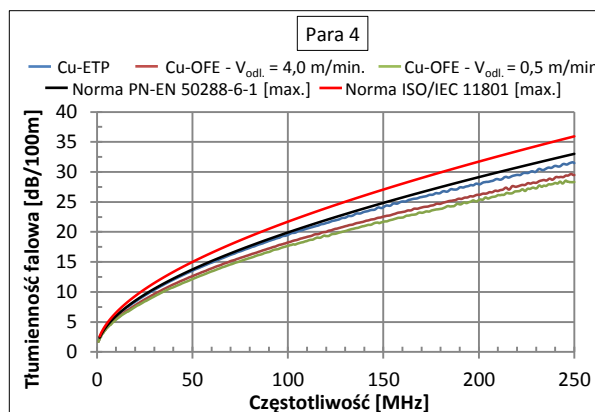
Rys. 10.2.22. Charakterystyki tłumienności falowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących pierwszą parę (skok skrętu 17,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.23. Charakterystyki tłumienności falowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących drugą parę (skok skrętu 10,1 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

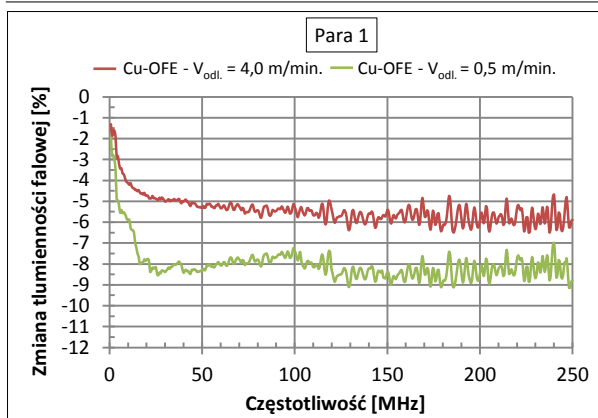


Rys. 10.2.24. Charakterystyki tłumienności falowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących trzecią parę (skok skrętu 15,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

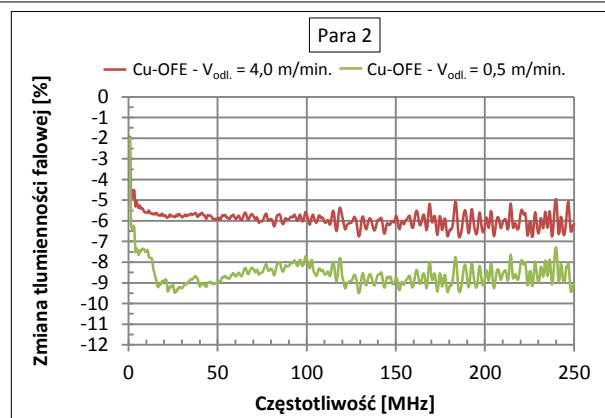


Rys. 10.2.25. Charakterystyki tłumienności falowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czwartą parę (skok skrętu 12,8 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

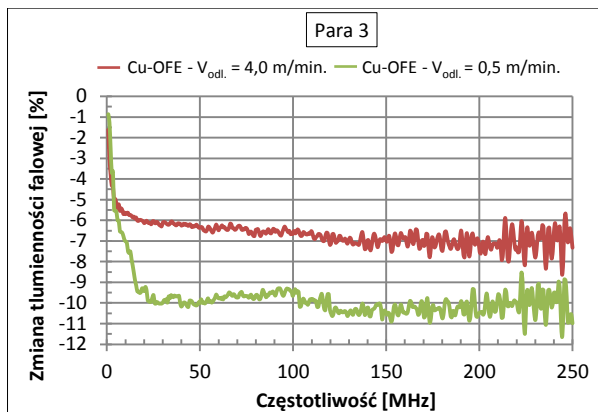
Analiza danych zniekształceń tłumieniowych w całym zakresie badanych częstotliwości do 250 MHz pokazuje, że tory przewodzące z żyłami z miedzi beztlenowej wykazują znaczącą poprawę mocy sygnału w porównaniu do przewodników z miedzi w gatunku Cu-ETP. Dla każdej z badanych par żył przewodzących z miedzi tlenowej, które różniły się długością skoków skrętu zanotowano wartości na najwyższym poziomie w porównaniu do miedzi beztlenowej. Podobnie jak w przypadku odnotowanych wyników zniekształceń odbiciowych (por. podrozdział 10.2.2.1) i w tym przypadku zauważa się, że tłumienność falowa jest funkcją prędkości materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE. Uzyskane dla drutów z miedzi beztlenowej z technologii Upcast przy prędkości odlewania 0,5 m/min. wartości tłumienności kształtują się na najniższym spośród pozostałych materiałów poziomie. Kontynuację analizy zmiany tłumienności falowej kabli z żyłami z dwóch gatunków miedzi – zróżnicowanych pod kątem stanu strukturalnego i składu chemicznego – stanowią zilustrowane na kolejnych rysunkach 10.2.26 – 10.2.29 relacje procentowej zmiany omawianych własności dla torów symetrycznych z żyłami z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP.



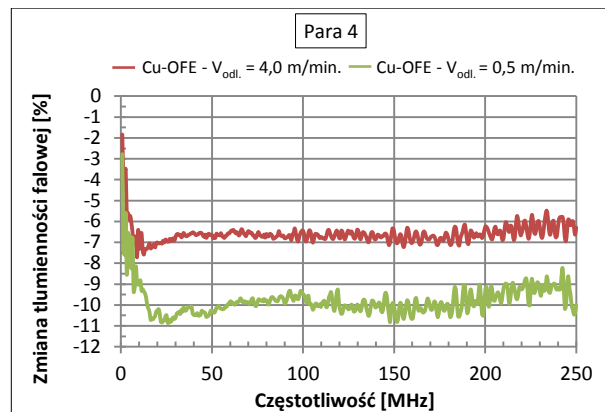
Rys. 10.2.26. Procentowa zmiana tłumienności falowej żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących pierwszą parę (skok skrętu 17,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.27. Procentowa zmiana tłumienności falowej żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących drugą parę (skok skrętu 10,1 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.28. Procentowa zmiana tłumienności falowej żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących trzecią parę (skok skrętu 15,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.29. Procentowa zmiana tłumienności falowej żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących czwartą parę (skok skrętu 12,8 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

Przedstawione na rysunkach 10.2.26 – 10.2.29 charakterystyki ilustrują kształtowanie się tłumienności falowej konstrukcji kablowych bazujących na żyłach z miedzi beztlenowej na poziomie niższym o nawet kilkanaście procent w stosunku do miedzi w gatunku Cu-ETP. W szczególności dla żył uzyskany w procesie ciągnięcia prętów z procesu ciągłego odlewania przy prędkości 4,0 m/min. zmiana omawianego parametru transmisyjnego kształtuje się w całym zakresie badanych częstotliwości na średnim poziomie niższym o około 6 %, podczas gdy dla drutów uzyskanych z materiałów wsadowych odlanych z szybkością 0,5 m/min. jest jeszcze niższa o około 9 %.

Podsumowując przeprowadzone pomiary zniekształceń tłumieniowych należy także zaznaczyć, że sygnał analogowy jest paczką fal sinusoidalnych o różnych częstotliwościach, nazywanych składowymi harmonicznymi. Bezbłędna transmisja sygnału analogowego polega na przesłaniu na odległość wszystkich jego składowych, bez zmiany proporcji ich amplitud i z jednakowym opóźnieniem. Nie jest to jednak możliwe, ponieważ zarówno tłumienie jak i opóźnienia sygnału w fizycznie realizowalnych torach transmisyjnych zależą od częstotliwości – straty energii sygnału w materiale przewodzącym są, w przybliżeniu, proporcjonalne do pierwiastka kwadratowego z częstotliwości sygnału, a straty dielektryczne w izolacji rosną proporcjonalnie do częstotliwości. Wyższe harmoniczne sygnału docierają do końca toru z tym mniejszą amplitudą, im wyższa jest ich częstotliwość. Zmienia to kształt sygnału, w porównaniu z jego kształtem pierwotnym na początku toru. Przesyłany torem przewodowym sygnał ulega zatem zniekształceniom tłumieniowym, które mogą być wyeliminowane za pomocą dość kosztownych układów korekcji lub w znacznym stopniu ograniczone poprzez stosowanie kabli z żyłami z miedzi beztlenowej.



Również opóźnienie sygnału sinusoidalnego zależy od częstotliwości i zmniejsza się z jej wzrostem. Składowe sygnału o większych częstotliwościach docierają do końca toru szybciej, a więc z inną fazą, niż składowe o mniejszych częstotliwościach. W konsekwencji następuje zmiana kształtu sygnału, czyli powstaje zniekształcenia fazowe – zwane także opóźnieniomym. Tej tematyce poświęcony jest kolejny podrozdział niniejszej dystryktacji.

### 10.2.2.3. Zniekształcenia fazowe

Kolejną grupę zniekształceń torów transmisyjnych stanowią zniekształcenia fazowe, które związane są z szybkością transmisji sygnału elektrycznego oraz jego opóźnieniami. Analiza te grupy parametrów jest dość istotna zwłaszcza w przypadku kabli teleinformatycznych kiedy przesył sygnału odbywa się wszystkimi czterema parami w taki sposób, aby mógł on zostać odtworzony w jeden strumień danych.

#### 10.2.2.3.1. Prędkość propagacji

Jednym z bardzo istotnych parametrów transmisyjnych kabli teleinformatycznych jest szybkość propagacji sygnału (termin angielski: nominal velocity of propagation, skrót: NVP lub  $v_p$ ) definiowana jako prędkość z jaką sygnał elektryczny jest przesyłany przez kabel, w stosunku do prędkości światła (299 792 458 m/s). Zazwyczaj kształtuje się na poziomie około 0,42 – 0,72 (tj. 42 – 72 % prędkości światła). Przykładowo wartość 0,70 odpowiada prędkości na poziomie około 210 000 000 m/s lub 4,7 ns/m. Tym samym jeden impuls elektryczny w kablu przesunie się o jeden metr w czasie 4,7 ns, czyli miliardowych części sekundy. Na podstawie powyższych informacji widać zatem wyraźną zależność prędkości propagacji od długości skoku skrętu danego toru transmisyjnego – im krótszy skok skrętu tym prędkość sygnału przemieszczającego się przez miedziany kabel mniejsza. Prędkość propagacji sygnału zgodnie z normą PN-EN 50289-1-7 [227] wyznacza się z pomiaru stałej fazowej  $\beta$  dla znanych częstotliwości:

$$v_p = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f}{\beta} \quad (10.2.13)$$

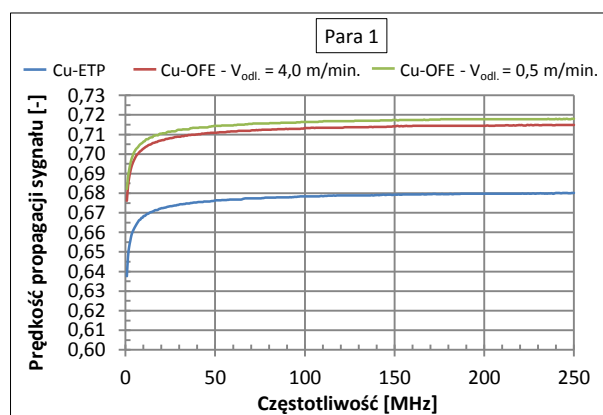
gdzie:

$v_p$  – prędkość propagacji sygnału [m/s],

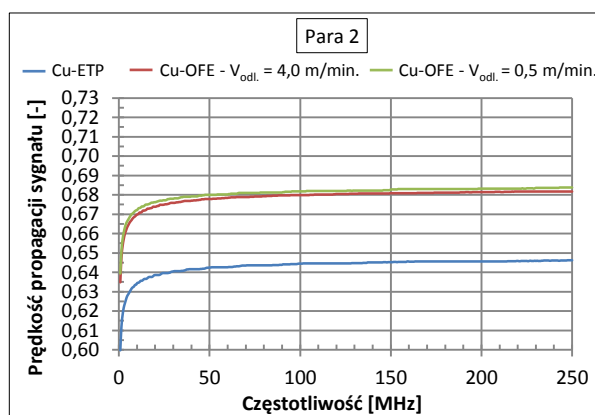
$f$  – częstotliwość [MHz],

$\beta$  – stała fazowa (wyznaczana z pomiaru transmisyjnego za pomocą wzorów 10.2.10 – 10.2.12 [227] lub z obwodem otwartym i zwarcim opisanym w PN-EN50289-1-11 [225]) [rad/m]

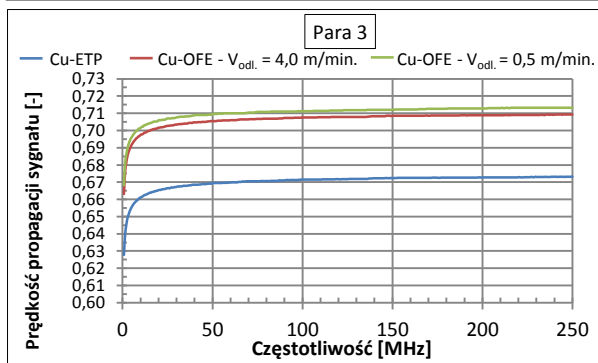
W ramach pracy trzy rodzaje konstrukcji przewodowych poddano badaniom szybkości propagacji sygnału dla każdej z czterech par tworzących dany kabel. Wyniki w postaci zależności szybkości propagacji od częstotliwości prądu zilustrowano na rysunkach 10.2.30 – 10.2.33. Podobnie jak poprzednio z uwagi na dużą ilość zanotowanych w próbach pomiarowych wyników wybrane dane do konstrukcji charakterystyk zamieszczono w aneksie w tabeli A10.2.6.



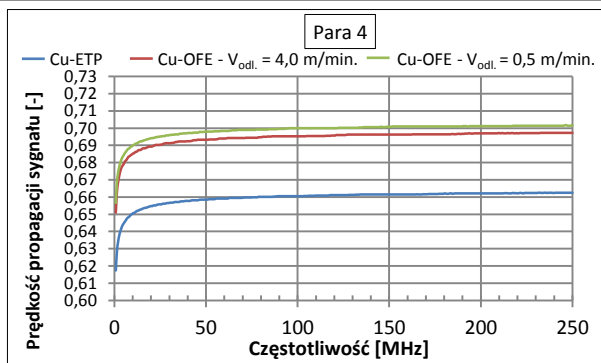
Rys. 10.2.30. Charakterystyki prędkości propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących pierwszą parę (skok skrętu 17,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.31. Charakterystyki prędkości propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących drugą parę (skok skrętu 10,1 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.32. Charakterystyki prędkości propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących trzecią parę (skok skrętu 15,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

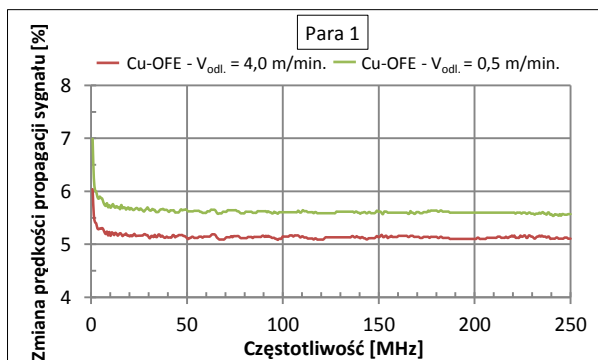


Rys. 10.2.33. Charakterystyki prędkości propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czwartą parę (skok skrętu 12,8 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

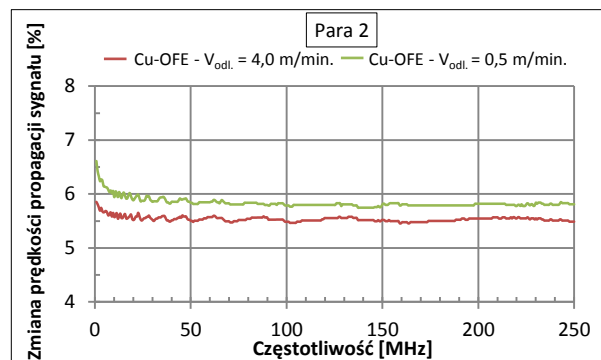
Analiza krzywych zilustrowanych na powyższych rysunkach dostarcza informacji, że najwyższymi wartościami prędkości propagacji sygnału elektrycznego charakteryzują się kable teleinformatyczne z żyłami przewodzącymi z miedzi beztlenowej. Poddane badaniom wszystkie cztery pary przewodu o zróżnicowanych skokach skrętu wykazują zdecydowaną różnicę wartości w porównaniu do torów transmisyjnych kabli z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP, przy czym wykazuje ona także zależność od prędkości odlewania prętów z miedzi beztlenowej (por. rys. 10.2.30 – 10.2.33). Na podstawie obserwacji charakterystyk zauważa się, że dla pary numer jeden utworzonej przez skręcone żyły przewodzące z miedzi w gatunku Cu-OFE w zakresie częstotliwości 50 – 250 MHz prędkość propagacji sygnału elektrycznego kształtuje się na poziomie około 0,72 i dla kolejnych par oznaczonych numerami od 2 do 4 obejmuje ona zakres 0,68 – 0,71. Jak nadmieniono wcześniej zanotowane zróżnicowanie wartości dla poszczególnych torów transmisyjnych zależne jest bezpośrednio od długości skoku skrętu. Z kolei odnotowane dla miedzi w gatunku Cu-ETP wartości prędkości propagacji sygnału elektrycznego dla poszczególnych par przewodowych w zakresie częstotliwości od 50 MHz do 250 MHz, dla którego następuje stabilizacja wartości kształtują się na poziomie około 0,64 – 0,68.

Przykładowo żyły przewodzące uzyskane z prętów z miedzi beztlenowej odlanych przy prędkości 0,5 m/min. i 4,0 m/min. oraz skręcone z największym skokiem skrętu wynoszącym 17,4 mm (por. rys. 10.2.30) tworzą tor transmisyjny, w którym przy częstotliwości prądu 250 MHz sygnał elektryczny przesyłany jest z szybkością wynoszącą odpowiednio 215 250 985 m/s oraz 214 321 628 m/s. Z kolei dla żył z miedzi tlenowej skręconych z takim samym skokiem skrętu i przy takiej samej wartości częstotliwości prędkość transmisji wynosi około 203 888 851 m/s.

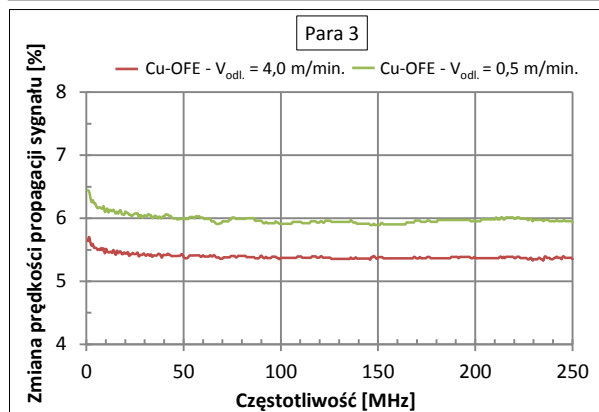
Podobnie do analizy prowadzonej w ramach poprzednich podrozdziałów pracy dotyczących pomiarów parametrów transmisyjnych kabli na rysunkach 10.2.34 – 10.2.37 zilustrowano procentową zmianę szybkości propagacji torów transmisyjnych z żyłami z miedzi beztlenowej względem wartości uzyskanych dla miedzi w gatunku Cu-ETP.



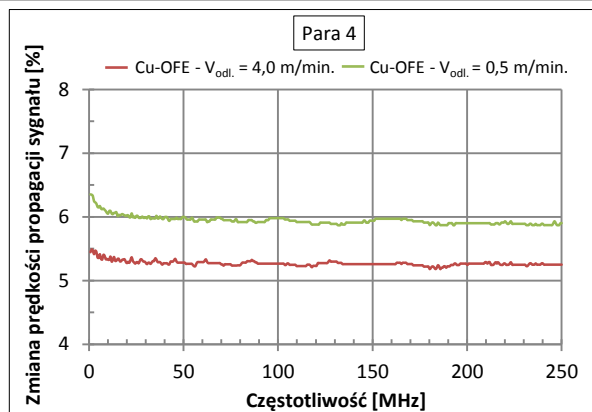
Rys. 10.2.34. Procentowa zmiana prędkości propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących pierwszą parę (skok skrętu 17,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.35. Procentowa zmiana prędkości propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących drugą parę (skok skrętu 10,1 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.36. Procentowa zmiana prędkości propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących trzecią parę (skok skrętu 15,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.37. Procentowa zmiana prędkości propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących czwartą parę (skok skrętu 12,8 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

Analiza przedstawionych na rysunkach 10.2.34 – 10.2.37 zależności potwierdza zróżnicowanie szybkości propagacji sygnału torów z przewodnikami z miedzi beztlenowej w porównaniu do kabli, których druty wykonane zostały z miedzi tlenowej. Miedź w gatunku Cu-OFE charakteryzuje się wyższymi szybkościami przesyłu sygnału o około 5 – 6 %. Jest to także istotna informacja z punktu widzenia przyjętej w dysertacji tezy o wpływie stanu strukturalnego miedzi beztlenowej na ponadstandardowe w stosunku do konwencjonalnej miedzi w gatunku Cu-ETP właściwości wpływające na jakość transmisji sygnału elektrycznego w wysokozaawansowanych konstrukcjach kablowych.

Z prędkością propagacji sygnału związane są także inne parametry transmisyjne takie jak opóźnienie propagacji sygnału i przesunięcie fazowe, których wyznaczone w wyniku prób badawczych wartości dla omawianych trzech konstrukcji kablowych zostaną poddane analizie w ramach kolejnych dwóch podrozdziałów dysertacji.

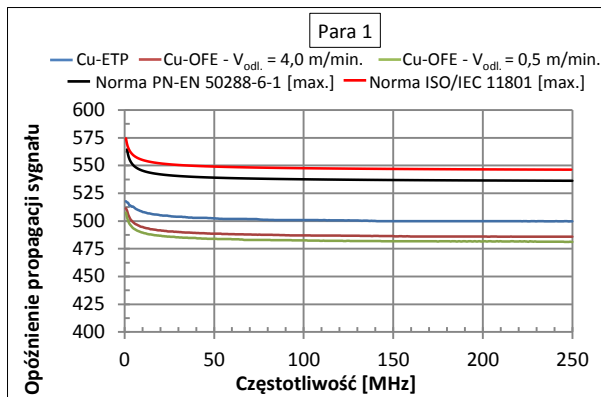
#### 10.2.2.3.2. Opóźnienie propagacji

Opóźnienie propagacji (angielski termin: propagation delay) jako kolejny z istotnych parametrów transmisyjnych w przypadku kabli teleinformatycznych, dla których przesyłanie sygnału odbywa się po czterech parach jednocześnie to czas pokonania przez sygnał odcinka od jednego jego końca do drugiego. Podobnie jak w przypadku omawianej poprzednio prędkości propagacji sygnału jego opóźnienie w każdej parze przewodów także będzie kształtowało się na różnym poziomie z uwagi na zależność parametru od długości skoku skrętu. Opóźnienie propagacji definiowane jest jako stosunek długości fizycznej kabla do szybkości propagacji sygnału w medium transmisyjnym. Prowadzone w praktyce przemysłowej obliczenia długości kabli opierają się na pomiarach opóźnienia propagacji. Normy przedmiotowe stanowią, że fizyczną długość linii oblicza się według pary przewodów o najkrótszym opóźnieniu sygnału elektrycznego. Testery mierzą wówczas długość przewodu na podstawie opóźnienia sygnału elektrycznego, nie zaś opierając się na fizycznej długości kabla. Ponieważ przewody w kablu są skręcone, sygnały przebywają większy dystans, niż wynikałoby to z ich fizycznej długości. Zatem pomiar polega na wysłaniu impulsu przez parę przewodów i zmierzeniu czasu, jaki upłynie do momentu powrotu tego impulsu przez tę samą parę.

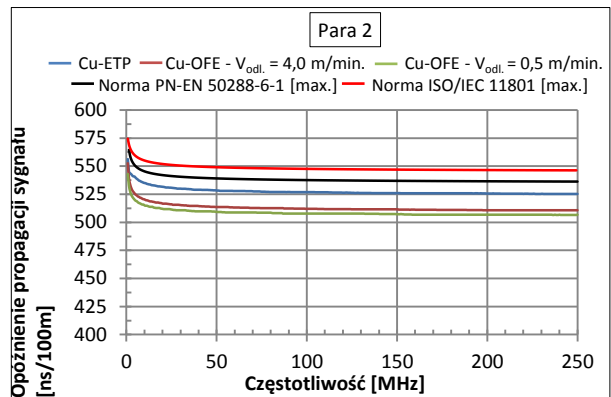
Analizowane w pracy konstrukcje kablów z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE poddane takiej właśnie procedurze badawczej. Wyniki pomiarów – podobnie jak poprzednio osobno dla każdej z par – zilustrowano w postaci graficznej na rysunkach 10.2.38 – 10.2.41. Dane liczbowe do konstrukcji krzywych zamieszczono w aneksie w tabeli A10.2.7.

Zanotowane podczas pomiarów wartości opóźnienia propagacji sygnału dla torów transmisyjnych z żyłami przewodzącymi z miedzi w gatunku Cu-ETP kształtują się na najwyższym poziomie. Obserwacja dotyczy charakterystyk dla wszystkich czterech par kabla. Z uwagi na proporcjonalność opóźnienia propagacji sygnału do szybkości jego przesyłu krzywe wykazują zależność od długości skoku skrętu. Z kolei wartości odnotowane dla skręconych żył przewodzących

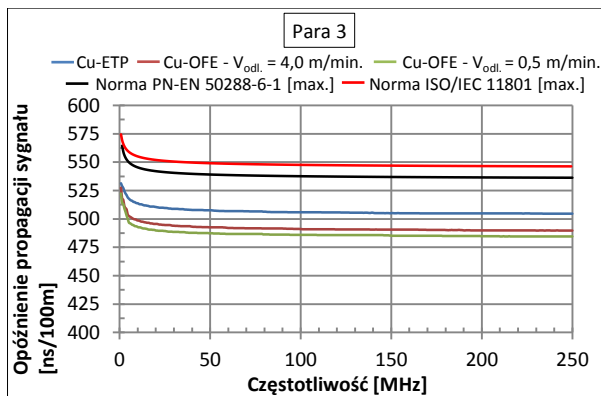
z miedzi beztlenowej charakteryzują się niższymi wartościami. Wnikliwą analizę procentowej zmiany wartości opóźnienia propagacji sygnału torów przewodowych z miedzi beztlenowej względem wartości, którymi charakteryzują się poszczególne pary przewodników z miedzi w gatunku Cu-ETP umożliwia interpretacja rysunków 10.2.42 – 10.2.45.



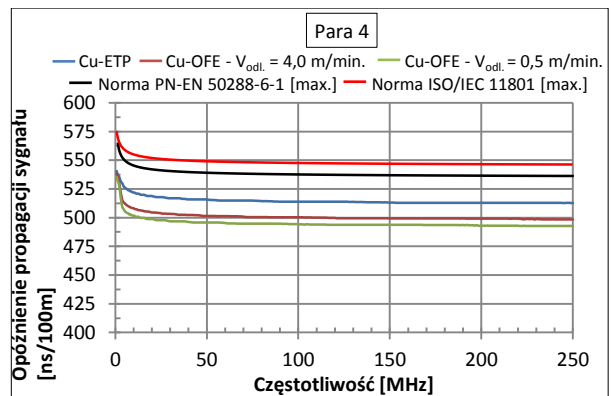
Rys. 10.2.38. Charakterystyki opóźnienia propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących pierwszą parę (skok skrętu 17,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



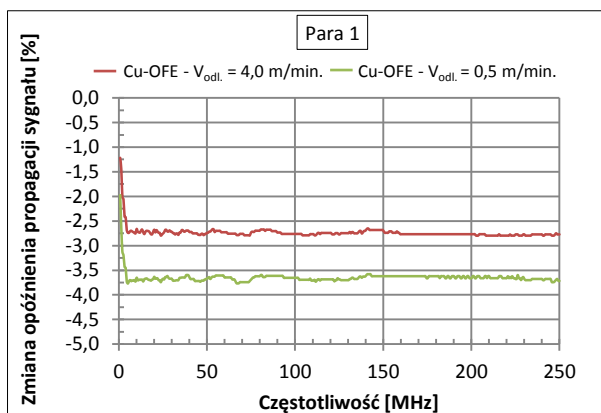
Rys. 10.2.39. Charakterystyki opóźnienia propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących drugą parę (skok skrętu 10,1 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



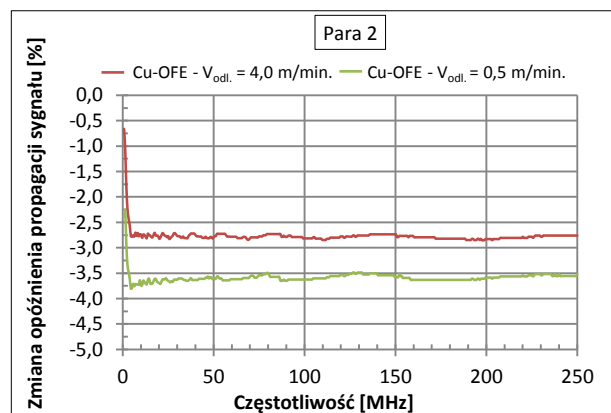
Rys. 10.2.40. Charakterystyki opóźnienia propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących trzecią parę (skok skrętu 15,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



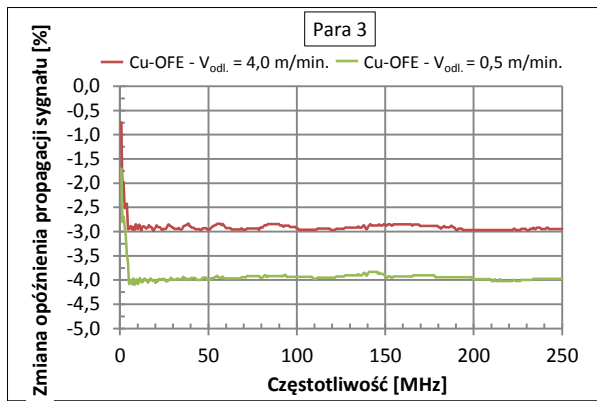
Rys. 10.2.41. Charakterystyki opóźnienia propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czwartą parę (skok skrętu 12,8 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



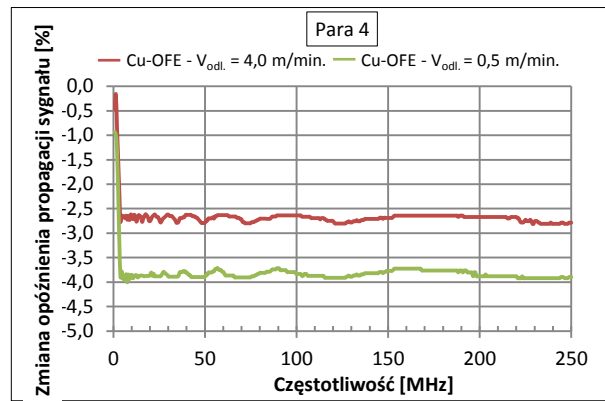
Rys. 10.2.42. Procentowa zmiana opóźnienia propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących pierwszą parę (skok skrętu 17,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.43. Procentowa zmiana opóźnienia propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi beztlenowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących drugą parę (skok skrętu 10,1 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



Rys. 10.2.44. Procentowa zmiana opóźnienia propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi beztlenuowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących trzecią parę (skok skreću 15,4 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6



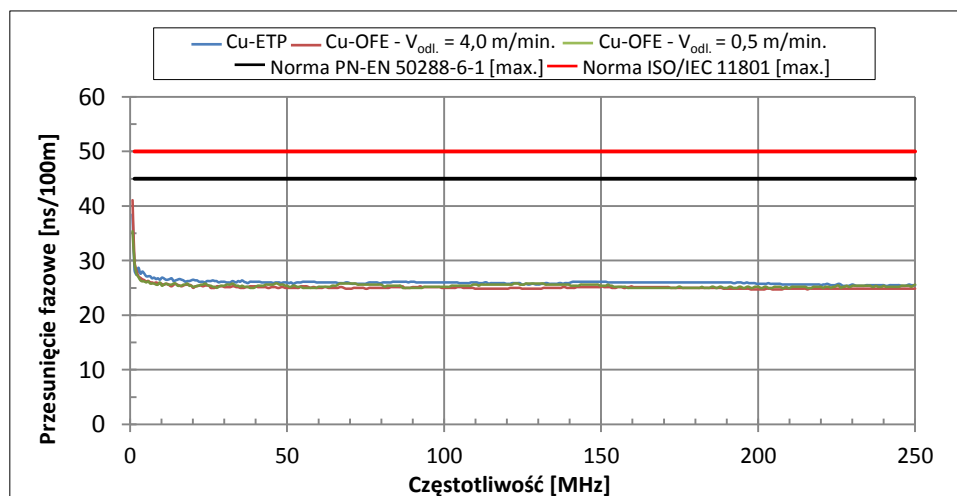
Rys. 10.2.45. Procentowa zmiana opóźnienia propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi beztlenuowej względem miedzi w gatunku Cu-ETP tworzących czwartą parę (skok skreću 12,8 mm) w konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6

Przedstawione na rysunkach charakterystyki dowodzą, że wartości procentowej zmiany opóźnienia propagacji sygnału żył drutów uzyskanych z prętów z miedzi beztlenuowej odlanych z prędkościami 4,0 m/min. i 0,5 m/min. są odpowiednio o około 3 % i 4 % niższe aniżeli dane zanotowane dla miedzi w gatunku Cu-ETP. To kolejny dowód na wpływ stanu strukturalnego materiałów wsadowych dedykowanych do procesu ciągnięcia drutów znajdujących zastosowanie w aplikacjach kabli teleinformatycznych na obniżenie występujących w torach przewodowych zniekształceń fazowych. Oprócz szybkości transmisji sygnału i jego opóźnienia wpływ na poprawność dekodowania transmisji ma także kolejny z parametrów – przesunięcie fazowe, która to własność poddana zostanie analizie w ramach kolejnego podrozdziału.

#### 10.2.2.3.3. Przesunięcie fazowe

Gdy dane są transmitowane przez cztery pary równocześnie, to cztery sygnały muszą zostać odtworzone w jeden strumień danych. Wymaga to synchronizacji pomiędzy nimi. To oznacza, że sygnały transmitowane przez różne pary muszą docierać do odbiornika w określonym czasie. Krytyczna jest tutaj różnica pomiędzy parą o największym i najmniejszym opóźnieniu propagacji. Ta różnica nazywana jest przesunięciem fazowym (angielski termin: delay skew) i dla poszczególnych częstotliwości określa się jako jedną wartość dla całego kabla.

Wyznaczone dla badanych konstrukcji kablowych wartości przesunięcia fazowego zilustrowano zbiorczo na rysunku 10.2.46. Dane liczbowe do konstrukcji krzywych zawarto w aneksie w tabeli A10.2.8.



Rys. 10.2.46. Charakterystyki przesunięcia fazowego par o największym i najmniejszym opóźnieniu propagacji dla konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Zanotowane podczas pomiarów wartości przesunięcia fazowego dla konstrukcji przewodowej z żyłami z dwóch gatunków miedzi kształtują się na zbliżonym poziomie. Obserwacja świadczy o poprawności wykonania badanych konstrukcji kablowych.

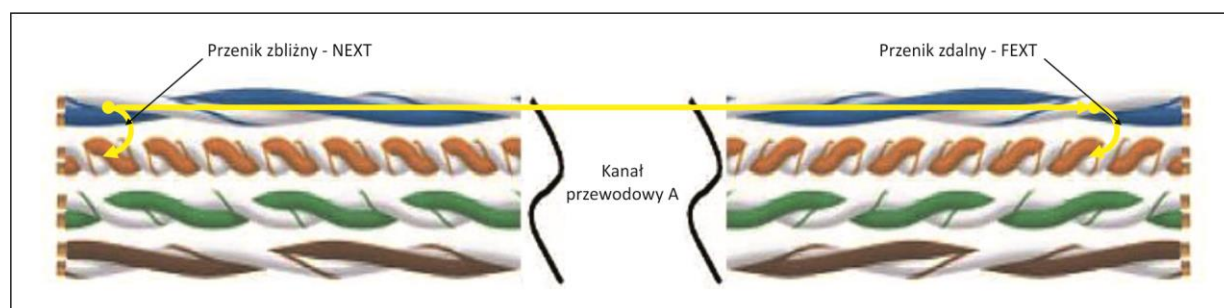
Omawiając transmisję sygnałów elektrycznych czteroparowymi torami przewodowymi należy zaznaczyć, iż oprócz zniekształceń odbiciowych, tłumieniowych i fazowych kable narażone są na zakłócenia przenikowe indukowane w torze przez pole elektromagnetyczne towarzyszące transmisji sygnałów w torach sąsiednich. Tej tematyce poświęcono kolejny podrozdział dysertacji.

#### 10.2.2.4. Zakłócenia zbliznoprenikowe i zdalnoprenikowe

Przesyłaniu sygnału wzdłuż jednego z torów kabla wielożyłowego towarzyszy przenikanie – za pośrednictwem indukcji elektromagnetycznej – części energii tego sygnału do torów sąsiednich. W ramach niniejszego podrozdziału omówione zostaną przeprowadzone w stosunku do badanych konstrukcji kabli z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE pomiary zakłóceń powstałe przy przesyłaniu danych z jednej pary żył do drugiej zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 50289-1-10 [228]. W szczególności analizie poddane zostały przesłuchy indukowane w torach transmisyjnych i mierzone na różnych końcach kabla w stosunku do sygnałów wywołujących zakłócenia.

##### 10.2.2.4.1. Tłumienność zbliznoprenikowa NEXT, tłumienność zdalnoprenikowa FEXT

Pierwszą grupę zakłóceń przenikowych stanowią przesłuch zbliżny (angielski termin: near end cross-talk, skrót: NEXT) i przesłuch zdalny (angielski termin: far end cross-talk, skrót: FEXT). Oba parametry mierzone są zawsze pomiędzy dwoma parami kabla tj.: 1 – 2, 1 – 3, 1 – 4, 2 – 3, 2 – 4, 3 – 4, przy czym przykładowo dla pierwszego z wymienionych przypadków transmisja sygnału odbywa się torem pierwszym, a pomiar dokonywany jest w parze drugiej. W szczególności należy zaznaczyć, iż tłumienność zbliznoprenikowa NEXT związana jest z przenikaniem sygnału z jednej pary do drugiej, przy czym pomiar prowadzony jest po tej samej stronie po której odbywa się transmisja tj. napięcie przeniku pojawia się na tym samym końcu kabla, do którego dołączone jest źródło sygnału. Z kolei tłumienność zdalnoprenikowa FEXT uwzględnia transmisję sygnału z jednej skrętki do drugiej, przy czym pomiar przeprowadza się po przeciwnej stronie – napięcie przeniku pojawia się na przeciwnym końcu kabla, niż do którego dołączone jest źródło sygnału [229]. Na rysunku 10.2.47 przedstawiono w postaci graficznej omawiane parametry.



Rys. 10.2.47. Zjawisko powstawania przesłuchów zbliznoprenikowych NEXT i zdalnoprenikowych FEXT w czteroparowym torze transmisyjnym kabla teleinformatycznego UTP kategorii 6

Na analizowanym rysunku przesłuchy NEXT pojawiają się wtedy, gdy sygnał generowany w niebieskiej parze sprzężony jest z parą pomarańczową na tym samym końcu (tj. bliższy koniec). Natomiast przesłuchy FEXT pojawiają się wtedy, kiedy sygnał generowany w parze niebieskiej pojawi się w parze pomarańczowej na przeciwnym końcu kanału (tj. dalszy koniec). W związku z powyższym zgodnie z normą PN-EN 50289-1-10 [228] omawiane parametry określone są wzorami:

$$NEXT = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{1N}}{P_{2N}} \right) \quad (10.2.14)$$

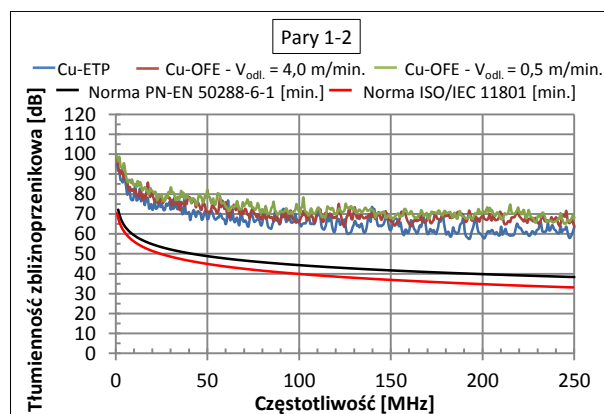
$$FEXT = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{1N}}{P_{2F}} \right) \quad (10.2.15)$$

gdzie:

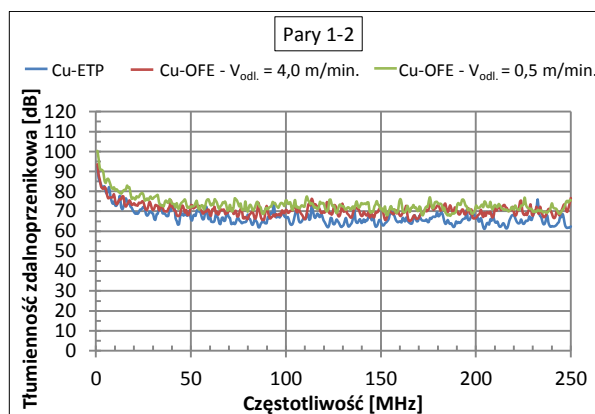
- $P_{1N}$  – moc mierzone na wejściu do zakłócającej pary (zakłócająca para – ta, do której dołączone jest źródło sygnału) [W],
- $P_{2N}$  – moc mierzona na wyjściu z zakłócającej pary (zakłócająca para – ta, w której pojawiają się zakłócenia) na tym samym końcu, do którego dołączone jest źródło sygnału [W],
- $P_{2F}$  – moc mierzona na wyjściu z zakłócającej pary na przeciwnym (niż dołączone źródło sygnału) końcu niż ten, do którego dołączone jest źródło sygnału [W].

Przed przystąpieniem do analizy wyników należy podkreślić, że parametry NEXT i FEXT (a także pozostałe zniekształcenia przenikowe – omówione w dalszej części pracy w ramach podrozdziału 10.2.2.4) wyrażane są w dB przy pomocy wartości ujemnych. Im większa wartość zanotowanego pomiaru (czyli mniejsza wartość bezwzględna) tym większy szum w torze transmisyjnym. Testery okablowania nie wyświetlają znaku minus oznaczającego ujemne wartości przeników. Przykładowo odczyt NEXT o wartości 90 dB (rzeczywista wartość  $-90$  dB) oznacza mniejszy przesłuch zbliżony i bardziej czysty sygnał niż przykładowo wartość NEXT wynosząca 60 dB.

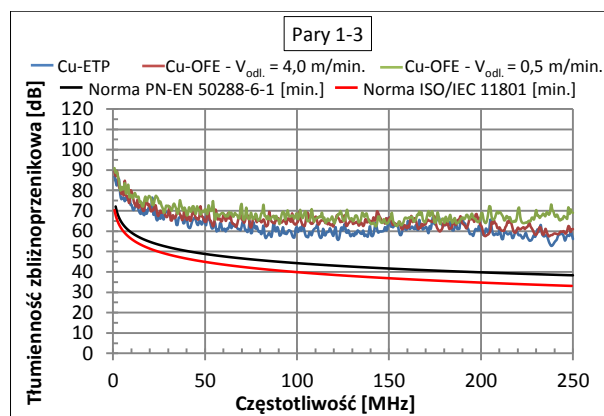
Na rysunkach 10.2.48 – 10.2.59 zilustrowano charakterystyki tłumienności zbliżoprzenikowej (kolumna po lewej stronie) i zdaloprzenikowej (kolumna po prawej stronie) dla torów transmisyjnych o długości 100 m odpowiednio dla każdego rodzaju okablowania z żyłami przewodzącymi z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE (prędkość odlewania prętów dedykowanych do procesu ciągnięcia wynosiła 4,0 m/min. i 0,5 m/min.). Dane liczbowe do konstrukcji wykresów zamieszczono w aneksie w tabelach A10.2.9 i A10.2.10.



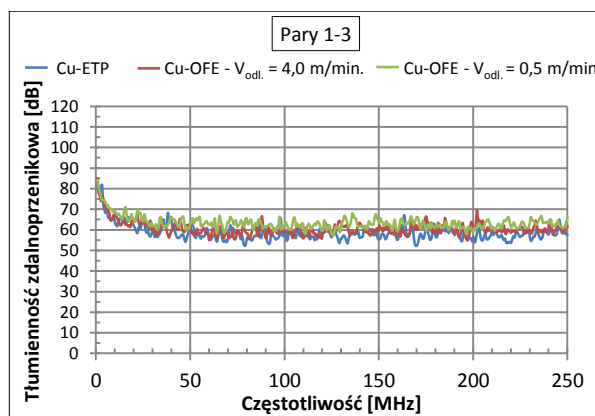
Rys. 10.2.48. Charakterystyki tłumienności zbliżoprzenikowej NEXT dla par 1-2 kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



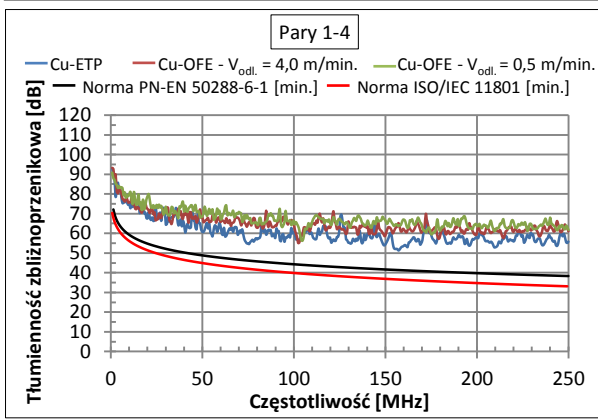
Rys. 10.2.49. Charakterystyki tłumienności zdaloprzenikowej FEXT dla par 1-2 kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



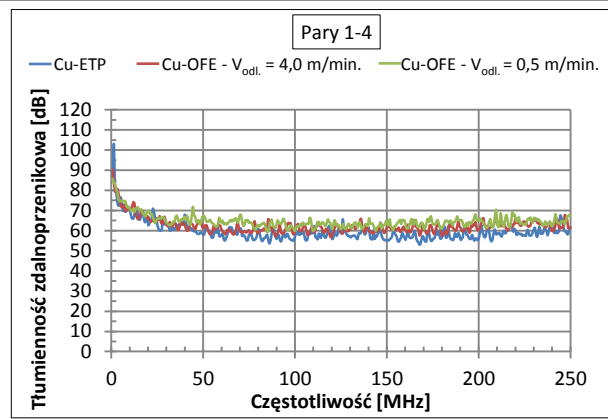
Rys. 10.2.50. Charakterystyki tłumienności zbliżoprzenikowej NEXT dla par 1-3 kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



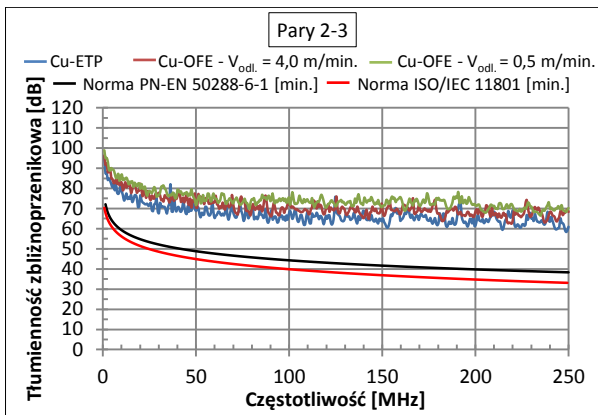
Rys. 10.2.51. Charakterystyki tłumienności zdaloprzenikowej FEXT dla par 1-3 kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



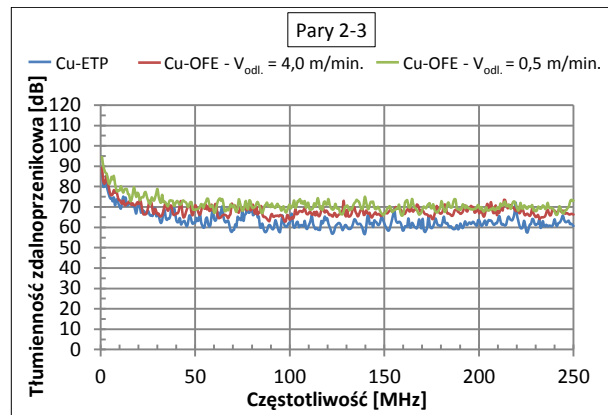
Rys. 10.2.52. Charakterystyki tłumienności zbliżnoprzenikowej NEXT dla par 1-4 kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



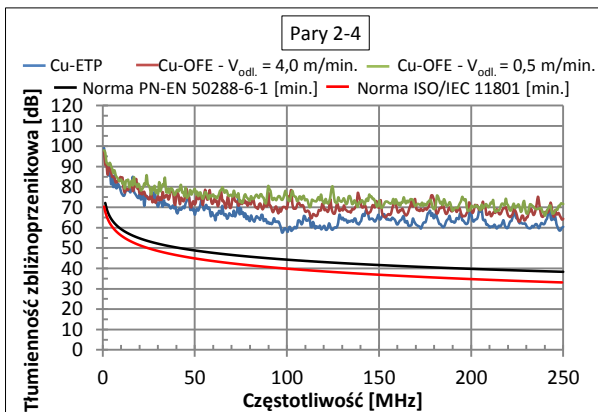
Rys. 10.2.53. Charakterystyki tłumienności zdaloprzenikowej FEXT dla par 1-4 kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



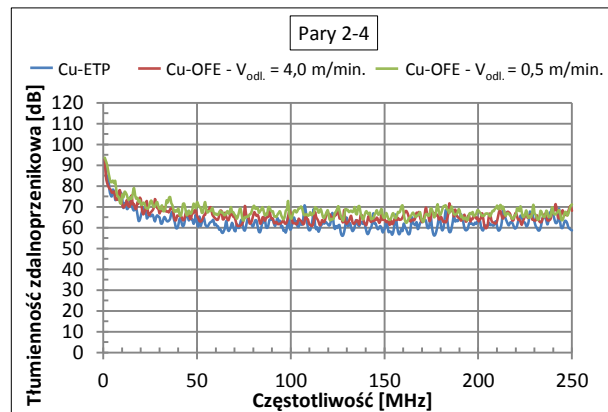
Rys. 10.2.54. Charakterystyki tłumienności zbliżnoprzenikowej NEXT dla par 2-3 kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



Rys. 10.2.55. Charakterystyki tłumienności zdaloprzenikowej FEXT dla par 2-3 kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

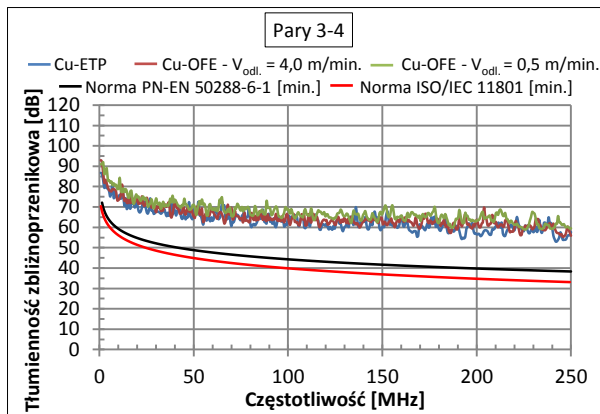


Rys. 10.2.56. Charakterystyki tłumienności zbliżnoprzenikowej NEXT dla par 2-4 kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

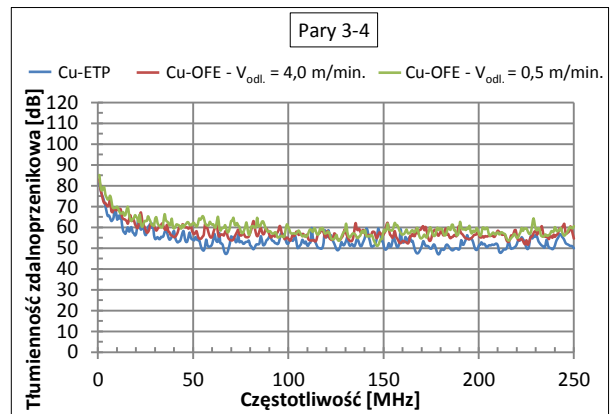


Rys. 10.2.57. Charakterystyki tłumienności zdaloprzenikowej FEXT dla par 2-4 kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE





Rys. 10.2.58. Charakterystyki tłumienności zbliżoprzenikowej NEXT dla par 3-4 kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



Rys. 10.2.59. Charakterystyki tłumienności zdaloprzenikowej FEXT dla par 3-4 kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Porównując charakterystyki tłumienności zbliżoprzenikowej i zdaloprzenikowej dla poszczególnych par zaobserwowano, iż kształtują się one na zbliżonym poziomie. Jest to informacja wskazująca na poprawność wykonania danych konstrukcji w procesie technologicznym. Dla wszystkich konstrukcji kablowych z żyłami przewodzącymi z miedzi tlenowej i beztlenowej wartości przeników NEXT i FEXT w całym zakresie pomiarów obejmują przedział średnio od około 100 dB do 60 dB. Szczegółowa analiza wykresów pozwala na stwierdzenie, że zauważalne jest niewielkie zróżnicowanie pomiędzy badanymi materiałami. Dostrzeżono, że najwyższe wartości tłumienności zbliżoprzenikowej i zdaloprzenikowej – czyli najniższy stosunek sygnał/szum wykazują tory transmisyjne, których przewodnikami są druty uzyskane z prętów z miedzi beztlenowej odlewanej z prędkością 0,5 m/min. Na nieco niższym poziomie kształtują się wartości zanotowane dla par utworzonych przez skręcone z drutów z drugiego rodzaju miedzi beztlenowej (szybkość odlewania materiału wsadowego 4,0 m/min.) druty. Natomiast najniższymi wartościami parametrów NEXT i FEXT charakteryzują się tory przewodowe z miedzi w gatunku Cu-ETP. Ponadto analiza danych zamieszczonych w tabeli A10.2.9 i A10.2.10 wykazuje, że miedź beztlenowa wykazuje średnio o około 8 % redukcję szumów w stosunku do wartości zanotowanych dla torów kablowych z miedzi tlenowej. Należy nadmienić także, że normy przedmiotowe [216, 218] określają minimalny poziom tłumienności zbliżoprzenikowej jaką muszą charakteryzować się kable teleinformatyczne. W przypadku przeników zdalnych standardy nie zawierają takich informacji.

Omawiane parametry transmisyjne NEXT i FEXT określają przenoszenie sygnału z jednej pary do drugiej. Z kolei w przypadku, gdy sygnał transmitowany jest wszystkimi czterema parami, na każdą pojedynczą mają wpływ pozostałe trzy. Problematyka ta przedstawiona została w kolejnym podrozdziale dystrybucji.

#### 10.2.2.4.2. Tłumienność równoważna sumie mocy przeniku zbliżonego PS NEXT, tłumienność równoważna sumie mocy przeniku zdalnego PS FEXT

Tak jak nadmieniono we wcześniejszym etapie pracy jeżeli podczas transmisji dwukierunkowej (np. Gigabit Ethernet), w której każdy tor używany jest do przesyłania sygnałów w obydwu kierunkach to w torze zakłócanym sumują się zakłócenia przenikające z więcej niż jednego toru zakłócającego. Zgodnie z prawami statystyki, w torze zakłócanym pojawia się wówczas suma mocy zakłóceń przenikowych, której można przyporządkować pewien sygnał równoważny o określonej amplitudzie, przy której moc tego sygnału jest równa sumie mocy zakłóceń. Definiuje się w związku z tym zjawiskiem wielkość nazywaną tłumiennością równoważną sumie mocy przeniku (oddzielnie zbliżonego i oddzielnie zdalnego – terminy angielskie: power sum NEXT/FEXT loss) określoną przez zależności:

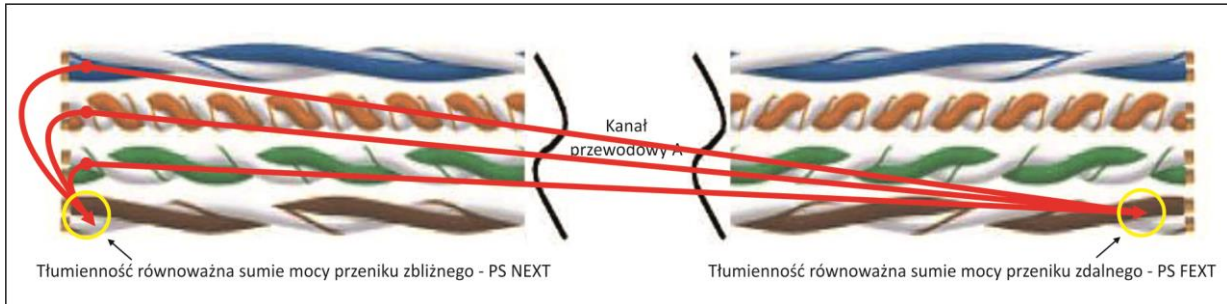
$$PS\ NEXT_k = -10\log_{10} \sum_{i=1, i \neq k}^n 10^{\frac{-NEXT_{ik}}{10}} \quad (10.2.16)$$

$$PS\ FEXT_k = -10\log_{10} \sum_{i=1, i \neq k}^n 10^{\frac{-FEXT_{ik}}{10}} \quad (10.2.17)$$

gdzie:

$NEXT_{ik}$ ,  $FEXT_{ik}$  – przesłuchy zbliżne i zdalne od pary zakłócającej „i” do pary zakłócanej „k” [dB],  
 i – numer pary zakłócającej (tj. toru, do którego dołączone jest źródło sygnału),  
 k – numer pary zakłócanej (tj. toru, w którym pojawiają się przesłuchy),  
 n – całkowita liczba par (torów transmisyjnych) kabla.

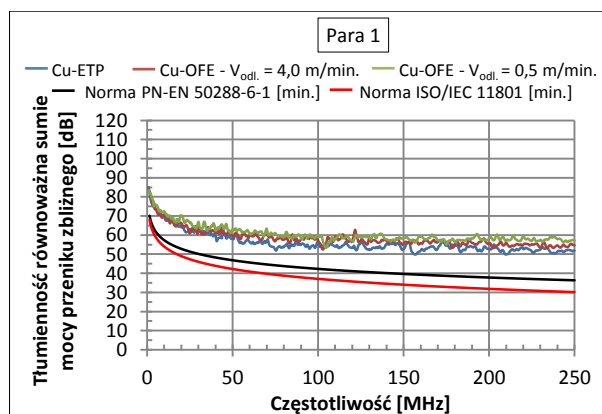
Na rysunku 10.2.60 przedstawiono w postaci graficznej omawiane obydwie parametry transmisyjne.



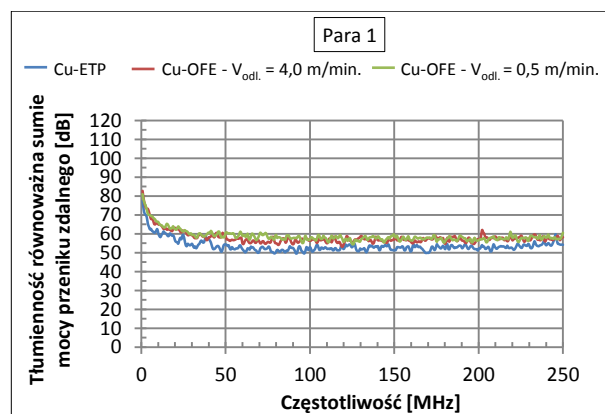
Rys. 10.2.60. Zjawisko powstawania tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zbliżnego PS NEXT i zdalnego PS FEXT w czteroparowym torze transmisyjnym kabla teleinformatycznego UTP kategorii 6

Na podkreślenie zasługuje fakt, że konieczność pomiarów będących sumą mocy zakłóceń przenikowych pojawiła się wraz z wprowadzeniem nowych standardów internetowych – tzw. Fast Ethernet – czyli szybkiej sieci lokalnej o prędkości przesyłu danych do 1000 Mb/s wykorzystującej do transmisji wszystkie 4 pary przewodów miedzianych skrętki [230]. Przed dokonaniem analizy wyników uzyskanych w wyniku przeprowadzonych procedur badawczych należy ponadto zaznaczyć, że przesłuch zbliżny i zdalny mierzony jako suma mocy zakłóceń ma znacznie większą wartość niż przesłuch zbliżny i zdalny mierzony metodą tradycyjną (NEXT, FEXT) i lepiej oddaje charakter rzeczywistych przesłuchów występujących w torze transmisyjnym. Typowe wartości są o kilka dB niższe niż najsłabsze wyniki pomiaru samego parametru NEXT i FEXT.

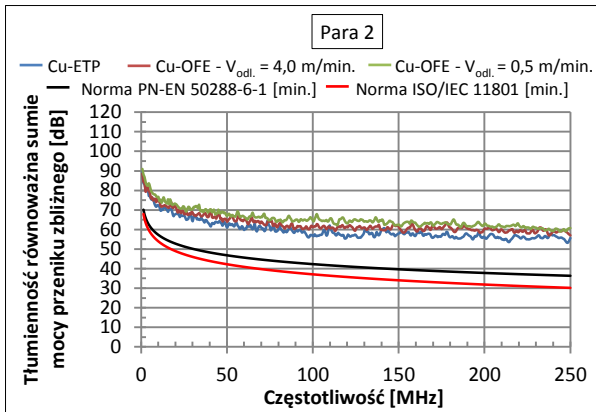
Na rysunkach 10.2.61 – 10.2.68 zilustrowano charakterystyki tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zbliżnego PS NEXT (lewa kolumna) i zdalnego PS FEXT (prawa kolumna). Dane liczbowe do konstrukcji krzywych zamieszczono w aneksie w tabeli A10.2.10 i A10.2.12.



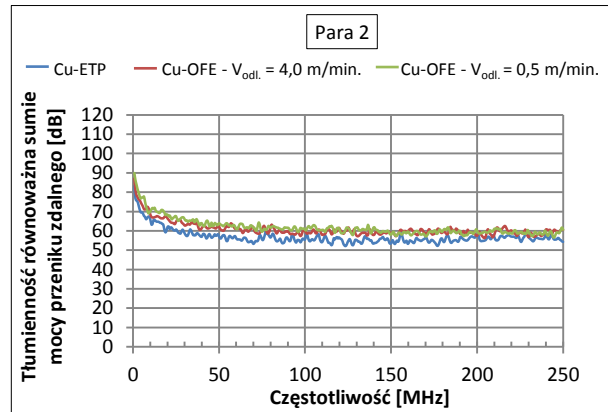
Rys. 10.2.61. Charakterystyki tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zbliżnego PS NEXT dla pary 1 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



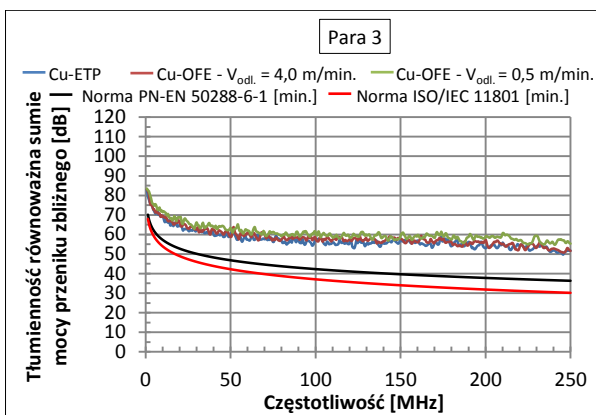
Rys. 10.2.62. Charakterystyki tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zdalnego PS FEXT dla pary 1 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



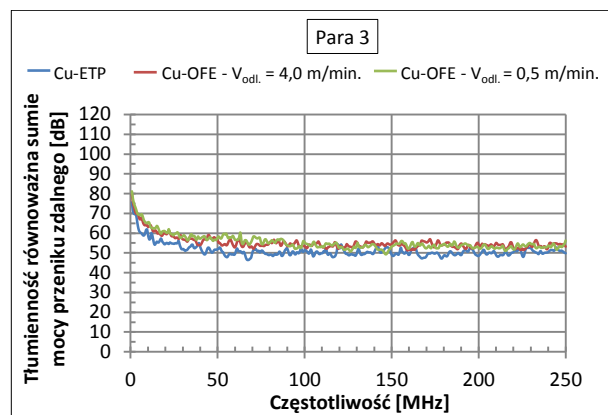
Rys. 10.2.63. Charakterystyki tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zbliżonego PS NEXT dla pary 2 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



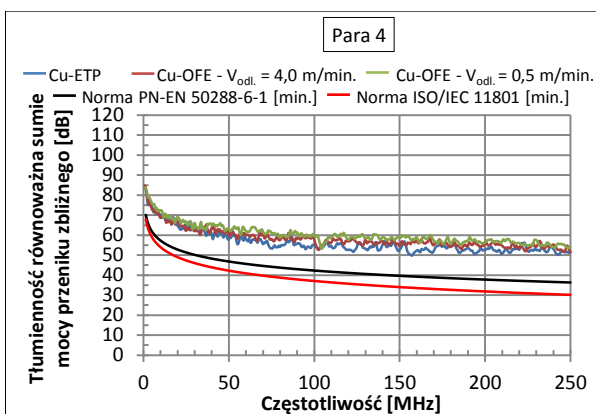
Rys. 10.2.64. Charakterystyki tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zdalnego PS FEXT dla pary 2 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



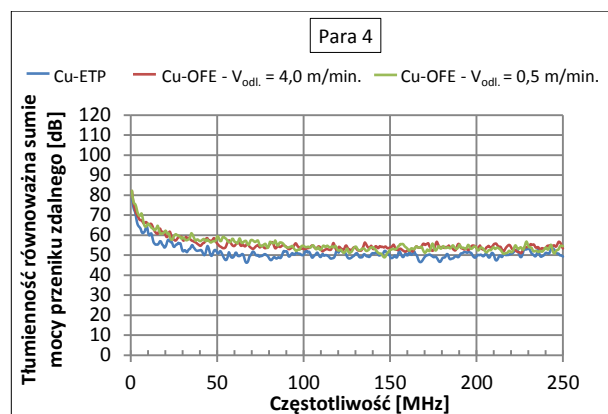
Rys. 10.2.65. Charakterystyki tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zbliżonego PS NEXT dla pary 3 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



Rys. 10.2.66. Charakterystyki tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zdalnego PS FEXT dla pary 3 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



Rys. 10.2.67. Charakterystyki tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zbliżonego PS NEXT dla pary 4 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE



Rys. 10.2.68. Charakterystyki tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zdalnego PS FEXT dla pary 4 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Podobnie jak w przypadku przeprowadzonej analizy wartości tłumienności zbliżoprzenikowej oraz zdaloprzenikowej (por. rys. 10.2.48 – 10.2.59) i w przypadku wyników dotyczących sumy mocy PS NEXT i PS FEXT pochodzących od zakłóceń docierających ze wszystkich torów transmisyjnych zauważa się zbliżony przebieg charakterystyk. Powtarzalność zanotowanych wyników wskazuje na prawidłowość przeprowadzonego procesu technologicznego wytwarzania kabli. Wnikliwa analiza charakterystyk ukazuje, że najwyższymi wartościami najbardziej pożądanymi z punktu widzenia

eliminacji negatywnych szumów charakteryzują się tory transmisyjne z żyłami z miedzi beztlenowej, które uzyskane zostały w procesie ciągnięcia prętów odlanych metodą Upcast przy prędkościach 0,5 m/min. i 4,0 m/min.

Oprócz omówionych do tej pory w ramach niniejszego podrozdziału przesłuchów zbliżnych i zdalnych (NEXT, FEXT) mierzonych w wyniku transmisji sygnału z jednej pary kabla do drugiej oraz tłumienności równoważnych sumie mocy poszczególnych przeników uwzględniających wszystkie zakłócenia powstałe we wszystkich parach przewodu kolejnymi parametrami świadczącymi o jakości kabla na określonej częstotliwości są odstęp zbliżnoprzenikowy i odstęp zdalnoprzenikowy poddane analizie w kolejnym podrozdziale.

#### 10.2.2.4.3. Odstęp zbliżnoprzenikowy ACR, odstęp zdalnoprzenikowy ELFEXT

Omawiane w ramach tej części problematycznej parametry związane są ze stosunkiem tłumienia do przesłuchu i stanowią proste wskaźniki informujące o poprawności wykonanej konstrukcji kablowej i zachowaniu przez nią wymaganych własności. W tym celu wykorzystuje się odstęp zbliżnoprzenikowy (angielski termin: attenuation to crosstalk ratio, skrót: ACR) jako różnicę przeniku zbliżnego pomiędzy dwoma parami kabla (NEXT) oraz tłumienności falowej toru zakłócanego (por. podrozdział 10.2.2.2.1). Jeżeli ACR jest większe od zera to oznacza, że sygnał jest mocniejszy od szumu i dane, które zawiera mogą zostać dekodowane. Jeśli szum będzie większy od sygnału to odbiornik nie będzie w stanie poprawnie rozszyfrować sygnału. Zatem wyznacza odstęp w dB pomiędzy sygnałem użytecznym, a zakłóceniem przenikowym na początku kabla zgodnie ze wzorem:

$$ACR_{ik} = NEXT_{ik} - \alpha L_k \quad (10.2.18)$$

gdzie:

- $i$  – numer pary zakłócającej (tj. toru, do którego dołączone jest źródło sygnału),
- $k$  – numer pary zakłócanej (tj. toru, w którym pojawiają się przesłuchy),
- $NEXT_{ik}$  – przesłuchy zbliżne od pary zakłócającej „ $i$ ” do pary zakłócanej „ $k$ ” [dB],
- $\alpha L_k$  – tłumienność falowa pary zakłócanej „ $k$ ” [dB/100m].

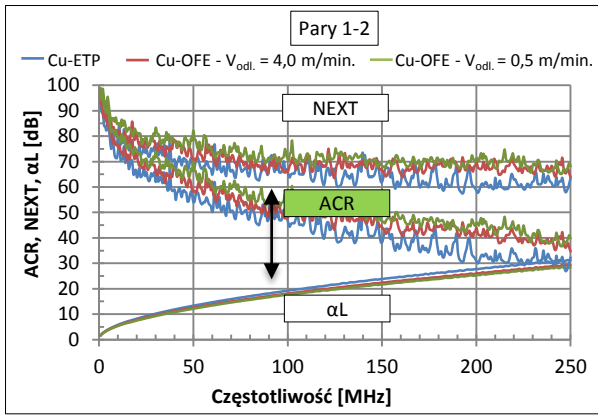
Drugim z omawianych parametrów jest odstęp zdalnoprzenikowy określane mianem ELFEXT. Skrót EL w nazwie oznacza „equal level” (tj. równy poziom) co świadczy o tym, że wielkość ta jest mierzony względem poziomu sygnału odbieranego a nie nadawanego. Należy podkreślić, że ELFEXT, w odróżnieniu od FEXT jest niezależny od długości badanego toru, gdyż uwzględnia tłumienie wnoszone przez tor transmisyjny. W związku z tym łatwo można go wyspecyfikować w odpowiednich normach. Matematycznie jest to wynik otrzymany z różnicy pomiędzy wartością parametru FEXT i tłumienia dla danego toru transmisyjnego zgodnie ze wzorem według PN-EN 50289-1-10:2001 [228]:

$$ELFEXT_{jk} = FEXT_{jk} - \alpha L_k \quad (10.2.19)$$

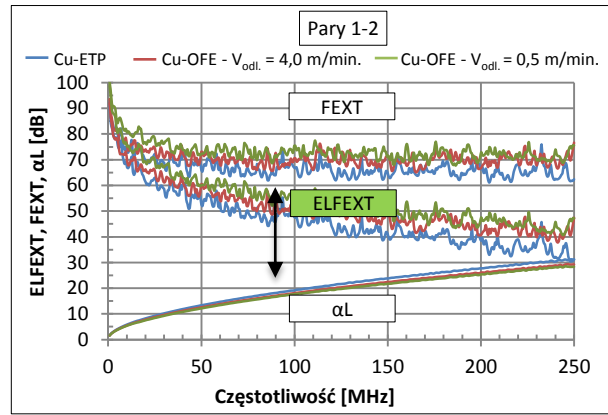
gdzie:

- $j$  – numer pary zakłócanej (tj. toru, w którym pojawiają się przesłuchy),
- $k$  – numer pary zakłócającej (tj. toru, do którego dołączone jest źródło sygnału),
- $FEXT_{jk}$  – przesłuchy zdalne od pary zakłócanej „ $j$ ” do pary zakłócającej „ $k$ ” [dB],
- $\alpha L_k$  – tłumienność falowa pary zakłócającej „ $k$ ” [dB/100m].

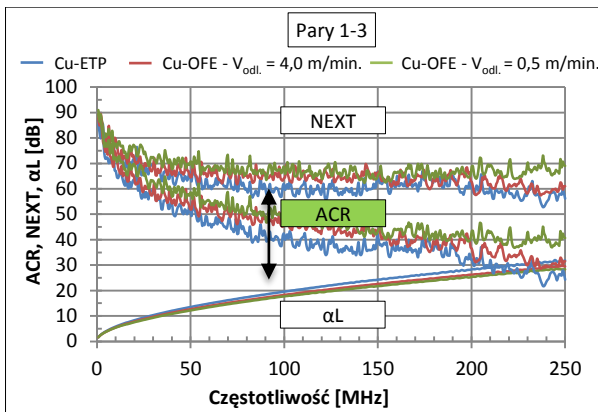
Badane w pracy trzy rodzaje konstrukcji kablowych z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE poddano pomiarom parametrów ACR i ELFEXT. Zanotowane wyniki w postaci ilustracji graficznych na rysunkach 10.2.69 – 10.2.80 (lewa kolumna) dotyczą wyznaczonego odstępu zbliżnoprzenikowego, który zgodnie ze wzorem (10.2.18) został odniesiony do przedstawionych już w poprzednim etapie pracy wartości tłumienności falowej (por. rys. 10.2.22 – 10.2.25) oraz tłumienności zbliżnoprzenikowej (por. rys. 10.2.48, 10.2.50, 10.2.52, 10.2.54, 10.2.56, 10.2.58). Z kolei wyniki pomiarów odstępu zdalnoprzenikowego ELFEXT ukazane na rysunkach 10.2.69 – 10.2.80 w prawej kolumnie odniesione zostały – podobnie jak w przypadku ACR – także do wartości tłumienności falowej (por. rys. 10.2.22 – 10.2.25) oraz tłumienności zdalnoprzenikowej (por. rys. 10.2.49, 10.2.51, 10.2.53, 10.2.55, 10.2.57, 10.2.59). Dane liczbowe do konstrukcji wykresów zamieszczono w aneksie w tabelach A10.2.13 i A10.2.14.



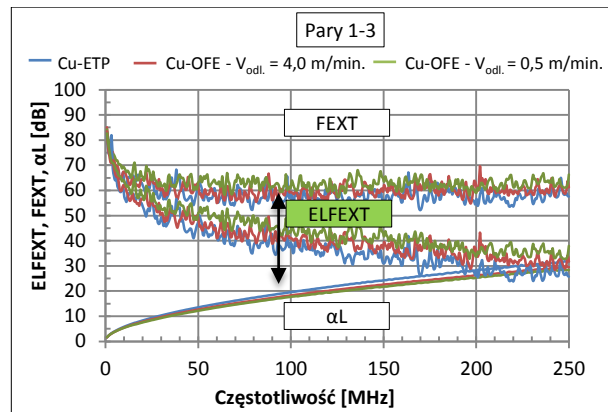
Rys. 10.2.69. Charakterystyki odstępu zbliżnoprzemkowego ACR dla par 1-2 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności zbliżnoprzemkowej i tłumienności falowej



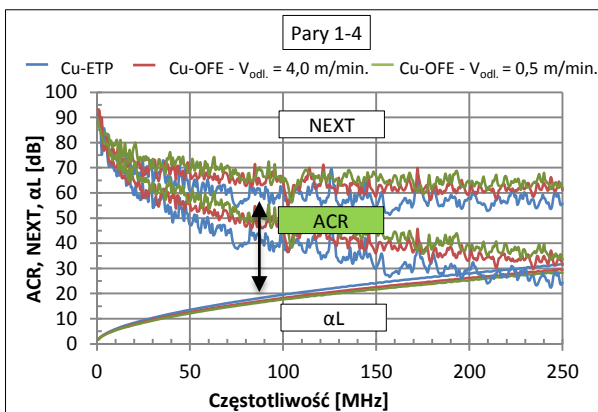
Rys. 10.2.70. Charakterystyki odstępu zdalnoprzemkowego ELFEXT dla par 1-2 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności zdalnoprzemkowej i tłumienności falowej



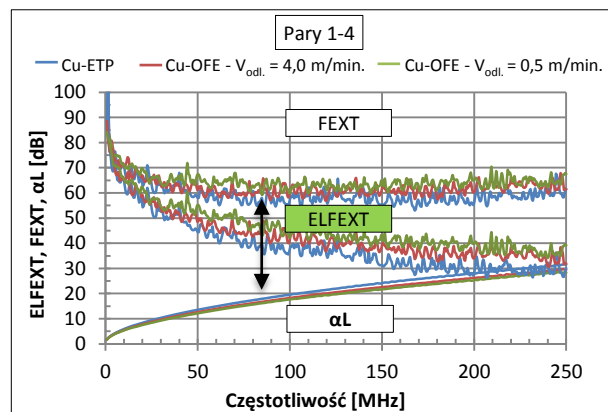
Rys. 10.2.71. Charakterystyki odstępu zbliżnoprzemkowego ACR dla par 1-3 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności zbliżnoprzemkowej i tłumienności falowej



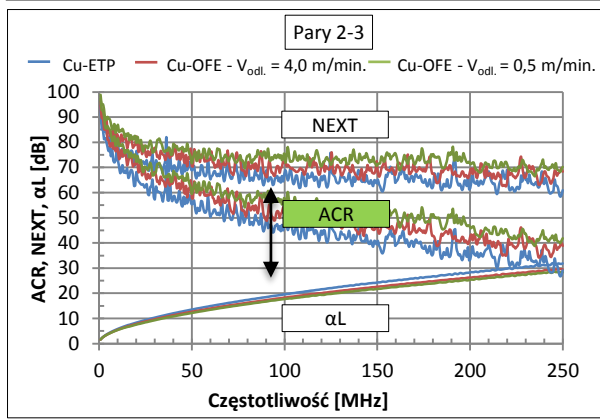
Rys. 10.2.72. Charakterystyki odstępu zdalnoprzemkowego ELFEXT dla par 1-3 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności zdalnoprzemkowej i tłumienności falowej



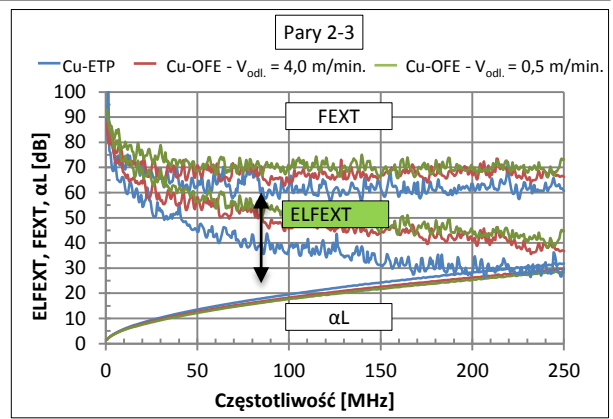
Rys. 10.2.73. Charakterystyki odstępu zbliżnoprzemkowego ACR dla par 1-4 teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności zbliżnoprzemkowej i tłumienności falowej



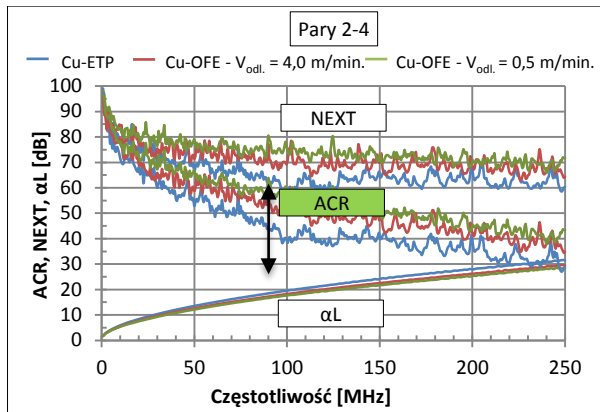
Rys. 10.2.74. Charakterystyki odstępu zdalnoprzemkowego ELFEXT dla par 1-4 teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności zdalnoprzemkowej i tłumienności falowej



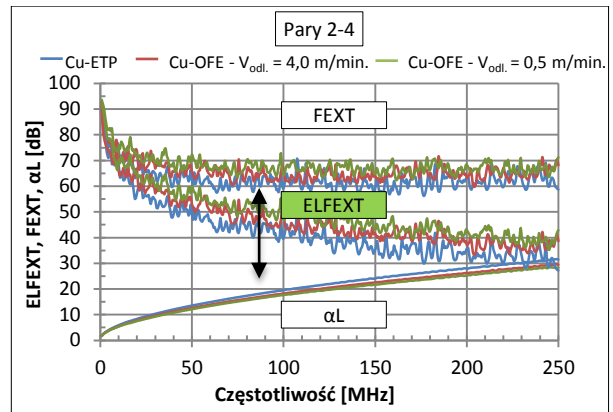
Rys. 10.2.75. Charakterystyki odstępu zbliżnoprzenikowego ACR dla par 2-3 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności zbliżnoprzenikowej i tłumienności falowej



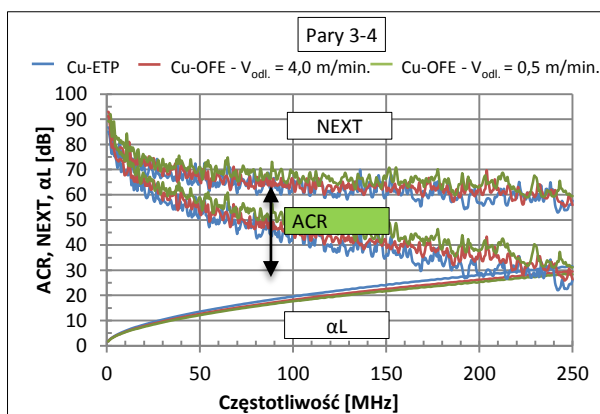
Rys. 10.2.76. Charakterystyki odstępu zdaloprzenikowego ELFEXT dla par 2-3 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności zdaloprzenikowej i tłumienności falowej



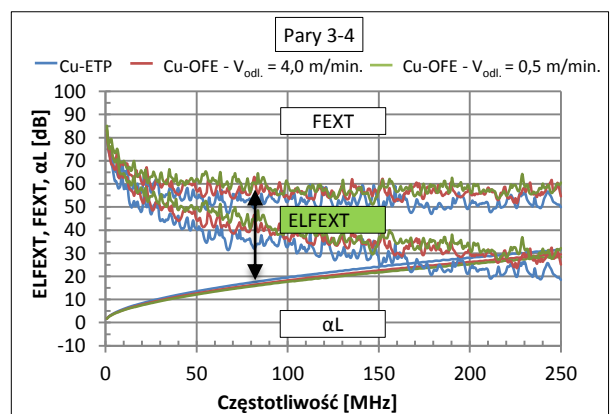
Rys. 10.2.77. Charakterystyki odstępu zbliżnoprzenikowego ACR dla par 2-4 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności zbliżnoprzenikowej i tłumienności falowej



Rys. 10.2.78. Charakterystyki odstępu zdaloprzenikowego ELFEXT dla par 2-4 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności zdaloprzenikowej i tłumienności falowej



Rys. 10.2.79. Charakterystyki odstępu zbliżnoprzenikowego ACR dla par 3-4 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności zbliżnoprzenikowej i tłumienności falowej



Rys. 10.2.80. Charakterystyki odstępu zdaloprzenikowego ELFEXT dla par 3-4 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności zdaloprzenikowej i tłumienności falowej

Zilustrowane na powyższych wykresach charakterystyki odstępu zbliżnoprzenikowego i zdaloprzenikowego dla poszczególnych torów transmisyjnych dobrze ilustrują relację pomiędzy

przenikami NEXT i FEXT oraz tłumiennością falową. Wiadomym jest, że im lepszy pod względem minimalizacji stratności przesyłu sygnału przewód tym wartość bezwzględna tłumienności powinna być mniejsza, a przesłuchów większa. Pod tym kątem najlepszymi parametrami charakteryzują się kable, w których żyły przewodzące zostały wykonane z miedzi w gatunku Cu-OFE.

Kontynuację analizy prowadzonej w niniejszym podrozdziale stanowią pomiary odstępów zbliżonych i zdalnych pochodzących od wszystkich par.

#### 10.2.2.4.4. Odstęp równoważny sumie mocy przeniku zbliżonego PS ACR, odstęp równoważny sumie mocy przeniku zdalnego PS ELFEXT

Kolejnym istotnym parametrem wyznaczanym w stosunku do kabli teleinformatycznych jest odstęp równoważny sumie mocy przeniku zbliżonego (angielski termin: power sum attenuation to crosstalk ratio, skrót: PS ACR) oraz odstęp równoważny sumie mocy przeniku zdalnego (angielski termin: power sum equal level crosstalk, skrót: PS ELFEXT). To jedne z obowiązkowych testów wprowadzonych przez normy PN-EN 50288-6-1 [216], ISO/IEC10801 [218], których przeprowadzenie pokazuje sumę poziomu zakłóceń elektromagnetycznych pochodzących z trzech pozostałych źródeł mierzonych na tym samym lub przeciwnym niż dołączone źródło sygnału końcu przewodu. Wymienione normy określają sposób wyznaczania omawianych parametrów poprzez zależności:

$$PS ACR_k = PS NEXT_k - \alpha L_k \quad (10.2.20)$$

gdzie:

- k – numer pary zakłócanej (tj. toru, w którym pojawiają się przesłuchy),
- PS NEXT<sub>k</sub> – suma mocy przeniku zbliżonego pary zakłócanej „k” [dB],
- αL<sub>k</sub> – tłumienność falowa pary zakłócanej „k” [dB/100m].

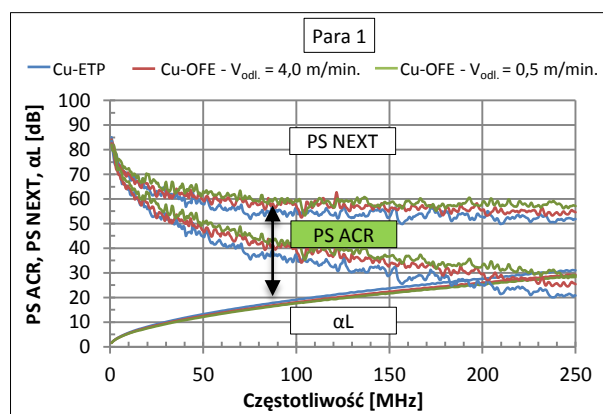
Z kolei odstęp równoważny sumie mocy przeniku zdalnego definiowany jest jako różnica tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zdalnego i tłumienności falowej zgodnie ze wzorem:

$$PS ELFEXT_k = PS FEXT_k - \alpha L_k \quad (10.2.21)$$

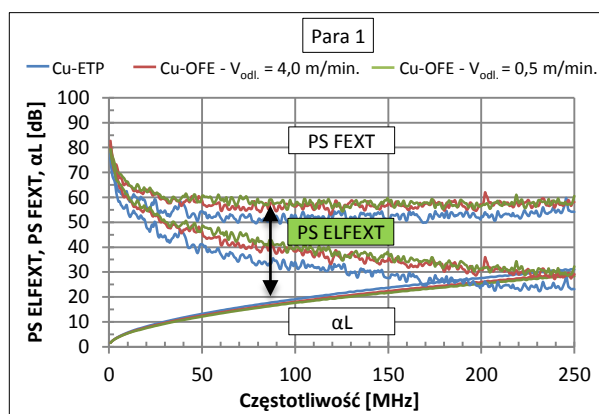
gdzie:

- k – numer pary zakłócającej (tj. toru, do którego dołączone jest źródło sygnału),
- PS FEXT<sub>jk</sub> – suma mocy przeniku zdalnego pary zakłócającej „k” [dB],
- αL<sub>k</sub> – tłumienność falowa pary zakłócającej „k” [dB/100m].

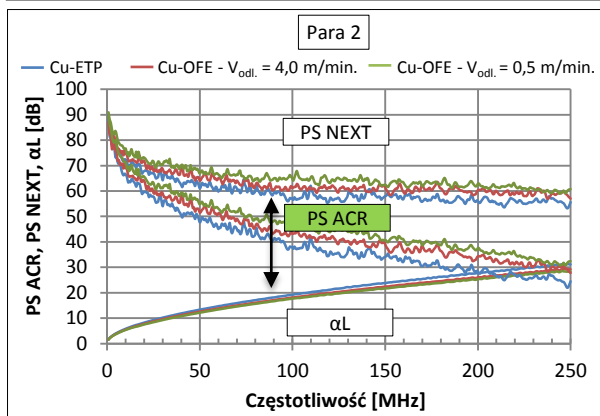
Na rysunkach 10.2.81 – 10.2.88 zilustrowano otrzymane dla trzech rodzajów badanych konstrukcji kablowych charakterystyki zmian odstepu równoważnego sumie mocy przeniku zbliżonego PS ACR (lewa kolumna) i przeniku zdalnego PS ELFEXT (prawa kolumna) w funkcji częstotliwości. Dane liczbowe do konstrukcji krzywych zamieszczono w aneksie w tabelach A10.2.15 i A10.2.16.



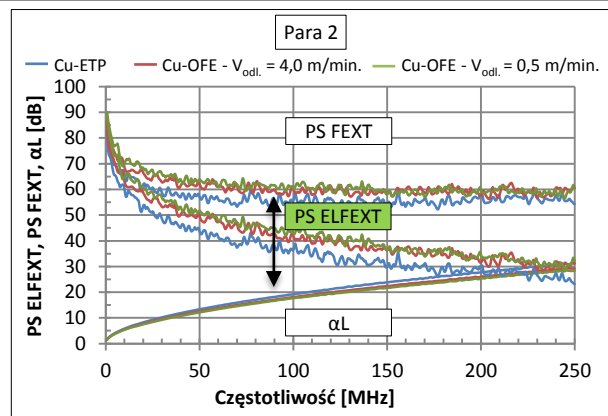
Rys. 10.2.81. Charakterystyki odstepu równoważnego sumie mocy przeniku zbliżonego PS ACR dla pary 1 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zbliżonego i tłumienności falowej



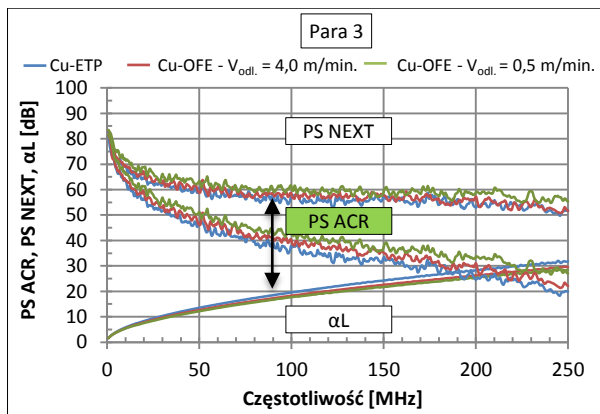
Rys. 10.2.82. Charakterystyki odstepu równoważnego sumie mocy przeniku zdalnego PS ELFEXT dla pary 1 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zdalnego i tłumienności falowej



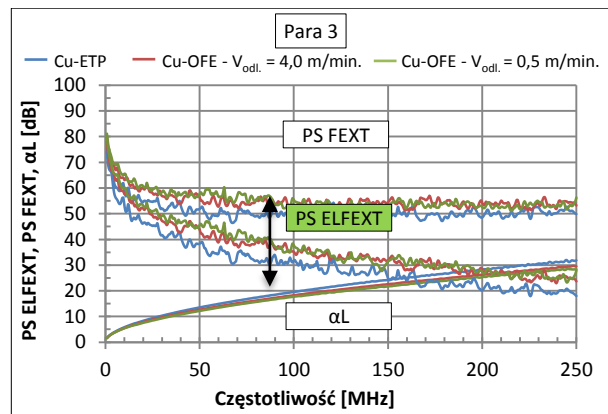
Rys. 10.2.83. Charakterystyki odstępu równoważnego sumie mocy przeniku zbliżonego PS ACR dla pary 2 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zbliżonego i tłumienności falowej



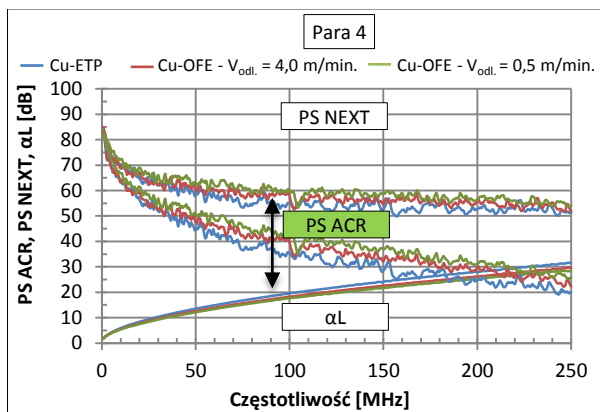
Rys. 10.2.84. Charakterystyki odstępu równoważnego sumie mocy przeniku zdalnego PS ELFEXT dla pary 2 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zdalnego i tłumienności falowej



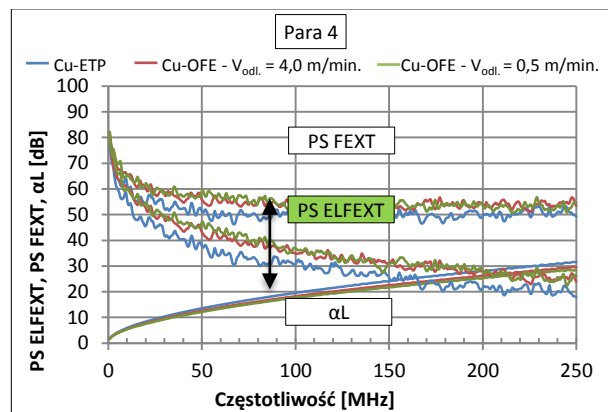
Rys. 10.2.85. Charakterystyki odstępu równoważnego sumie mocy przeniku zbliżonego PS ACR dla pary 3 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zbliżonego i tłumienności falowej



Rys. 10.2.86. Charakterystyki odstępu równoważnego sumie mocy przeniku zdalnego PS ELFEXT dla pary 3 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zdalnego i tłumienności falowej



Rys. 10.2.87. Charakterystyki odstępu równoważnego sumie mocy przeniku zbliżonego PS ACR dla pary 4 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zbliżonego i tłumienności falowej



Rys. 10.2.88. Charakterystyki odstępu równoważnego sumie mocy przeniku zdalnego PS ELFEXT dla pary 4 kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w odniesieniu do krzywych tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zdalnego i tłumienności falowej



Na podstawie zilustrowanych na rysunkach 10.2.81 – 10.2.88 charakterystyk zmian parametrów PS ACR i PS ELFEXT w funkcji częstotliwości podobnie jak w poprzednich etapach pracy zauważono, iż tory transmisyjne z żyłami z miedzi tlenowej wykazują najwyższe spośród badanych materiałów wartości tłumienności falowej i najniższe wartości przesłuchów. Z punktu widzenia przydatności takiego przewodu do przesyłu sygnału elektrycznego teleinformatycznymi torami transmisyjnymi wpływa to na stratność przesyłu sygnału w porównaniu do kabla o takiej samej konstrukcji, ale którego żyły przewodzące zostały wykonane z miedzi w gatunku Cu-OFE.

### 10.2.3. Podsumowanie pomiarów parametrów transmisyjnych kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6

Rozwój sektora teleinformatycznego ostatnich lat determinowany jest największymi osiągnięciami naukowymi z zakresu elektroniki, elektrotechniki i informatyki oraz inżynierii materiałowej. Wzrastające wymagania rynku determinują pojawianie się różnorodnych technologii sieciowych o coraz to większych możliwościach przesyłu danych, przy jednoczesnej minimalizacji stratności sygnału elektrycznego. Stałe zwiększanie ilości przesyłanych wiadomości użytkowych wymusza ciągle poszukiwania coraz to nowych i bardziej efektywnych metod transmisyjnych. Odpowiedzią na takie potrzeby stają się nowe grupy kabli i przewodów, których konstrukcje bazujące na materiałach przewodzących o wysokiej czystości chemicznej umożliwiają poprawę własności transmisyjnych.

W pracy podjęto próbę zastąpienia tradycyjnie stosowanej w Polsce do budowy żył przewodzących w torach transmisyjnych kabli teleinformatycznych miedzi w gatunku Cu-ETP materiałem beztlenowym o czystości chemicznej 4N. Celem działań była obserwacja, czy wynikające ze zróżnicowania zawartości atomów domieszek i stanu strukturalnego podwyższone własności elektryczne materiału, w porównaniu do miedzi tlenowej przełożą się na wyniki pomiarów transmisyjnych. W przypadku pozytywnych rezultatów zastosowanie materiału w gatunku Cu-OFE stwarza możliwość zmniejszenia średnicy przewodnika i oszczędności materiałowych.

Wiarygodność uzyskanych w wyniku przeprowadzonych badań wyników potwierdza fakt, że każdy z wyznaczonych parametrów transmisyjnych stanowił wartość średnią z dziesięciu pomiarów, którym poddano odcinki przewodów o długościach 100 metrów każdy. Pierwsze badania przy użyciu prądu niskiej częstotliwości wykazały, że konstrukcje przewodowe, których żyły przewodzące bazowały na miedzi beztlenowej i skręcone były z różnymi długościami skoków charakteryzowały się zmniejszoną rezystancją odgrywającą istotny wpływ na wzrost tłumienności przesyłanych sygnałów. Podobnie jak w poprzednich etapach pracy zaobserwowano także, że własności elektryczne drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE są funkcją prędkości odlewania materiałów wsadowych. Poprawność wykonania badanych konstrukcji kablowych w cyklu technologicznym potwierdzają zanotowane w próbie wartości asymetrii rezystancji kształtujące się na pozytywnym i bardzo niskim średnim poziomie 0,01 %. Kolejny z parametrów – pojemność skuteczną należy w przypadku rozpatrywanego asortymentu kabli traktować jako parametr pomocniczy. O wiele większą rolę spełnia on m.in. w przypadku kabli niskiej częstotliwości, które z zależności od środowiska pracy wytwarza się pod konkretną wartość pojemności. Nie mniej jednak w przypadku omawianych kabli teleinformatycznych istotnym parametrem jest niesymetria pojemności, której zachowanie na jak najniższym poziomie jest gwarantem wytworzenia konstrukcji bez negatywnych zagięć czy przetarć materiałów izolacyjnych i przewodowych, których ewentualne wystąpienie odgrywa negatywną rolę na wartości najistotniejszych dla kabli przesyłu danych własności transmisyjnych wyznaczanych podczas pomiarów prądem wysokiej częstotliwości. Podkreślając jednak zasadność przeprowadzonych pomiarów przy niskiej częstotliwości – tj. rezystancji, która co oczywiste zależy przede wszystkim od materiału przewodnika oraz średnicy żył skręconych z określonym skokiem oraz badań pojemności, na którą wpływa długość kabla (tj. podobnie jak w przypadku rezystancji – skok skrętu), odległości między żyłami oraz materiał izolacji należy wyraźnie zaznaczyć, że uzyskane na tym etapie wyniki oprócz informacji o własnościach elektrycznych przewodników i jakości dielektryka stanowią wstępną weryfikację poprawności wykonania przewodu oraz jego przydatności do szybkiej transmisji sygnału.

Dokonane w drugim etapie pracy pomiary prądem wysokiej częstotliwości to najistotniejsze badania pod względem oceny zdolności kabla do transmisji sygnału o określonej prędkości i minimalizacji zawsze występujących w torach transmisyjnych opóźnień, a także poprawności

wykonania całego przewodu zgodnie z przyjętą ścieżką technologiczną. Kable zostały poddane analizie pod kątem zniekształceń odbiciowych, tłumieniowych i fazowych, a także zakłóceń przenikowych. Podobnie jak w przypadku badań rezystancji zanotowane wartości impedancji falowej przewodów z żyłami z miedzi beztlenowej kształtują się na poziomie niższym w porównaniu do torów bazujących na przewodnikach z miedzi tlenowej, co utożsamiane jest z odmiennością stanu strukturalnego materiału i jego wyższą czystością chemiczną. Pomiary współczynników odbicia sygnału dowiodły ponadto, że tłumienność pochodząca od nieregularności toru przewodowego, związana bezpośrednio z impedancją dla kabli, których druty uzyskane zostały w procesie ciągnięcia prętów odlanych w procesie Upcast przy prędkościach 4,0 m/min. i 0,5 m/min. wykazują średnio o około 10 dB niższe wartości w stosunku do przewodów, których pary tworzą druty z miedzi tlenowej. Ponadto zauważa się, że im mniejsza szybkość odlewania materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE tym niższe wartości omawianej tłumienności odbiciowej. Drugą grupę zniekształceń sieci przewodowych tworzą zniekształcenia tłumieniowe, które analizowano na drodze wyznaczenia wartości tłumienności falowej. Także i w tym przypadku tory tworzące czteroparowy przewód z miedzi beztlenowej ujawniły niższe wartości o około 6 – 9 % w stosunku do miedzi tlenowej. Kolejna bardzo ważna grupa analizowanych zniekształceń torów transmisyjnych obejmowała wyznaczenie prędkości propagacji sygnału, jego opóźnienia oraz przesunięcia fazowego. Na podkreślenie zasługują wyniki szybkości transmisji sygnału w kablach odniesione do prędkości światła. Udowodniono, że najszybciej impulsy elektryczne przesuną się w kablach wykonanych z żył z miedzi beztlenowej, które bazują na odlanych według technologii Upcast z szybkościami 4,0 m/min. i 0,5 m/min. prętach. W związku z powyższym zanotowane opóźnienie propagacji sygnału przesyłanego po czterech parach jednocześnie jest średnio o około 4 % niższe aniżeli wartości, które wykazują przewody z miedzi tlenowej. Powyższe obserwacje dowiodły poprawności postawionej w pracy tezy, iż miedź beztlenowa o zminimalizowanej ilości defektów struktury – głównie granic ziaren gwarantuje ponadstandardowe – w porównaniu do tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne miedzi w gatunku Cu-ETP – własności, które pozwalają na minimalizację stratności przesyłu sygnału elektrycznego w wysokozaawansowanych aplikacjach kablowych. Wykazano także, że ograniczenie problemu stratności w teleinformatycznych konstrukcjach przewodowych tego typu zależy m.in. od rodzaju materiału zastosowanego do budowy centralnego przewodnika tj. żyły przewodzącej.

W wyniku przeprowadzonych kolejnych pomiarów własności transmisyjnych koncentrujących się na zakłóceniach zbliżoprzenikowych i zdaloprzenikowych wykazano korzystniejsze własności z punktu widzenia ograniczenia występujących w torach transmisyjnych szumów poprzez zastosowanie kabli z żyłami z miedzi w gatunku Cu-OFE. Warto podkreślić, że badania dotyczące zniekształceń zbliżonych i zdalnych dostarczają także informacji o jakości wykonanej konstrukcji przewodowej.

Na zakończenie podsumowania analizy badań własności transmisyjnych kabli należy koniecznie nadmienić o zjawisku jakim jest efekt „naskórkowy”. Polega on na tym, że prąd przy wyższych częstotliwościach płynie po zewnętrznej powierzchni przewodu – na skutek coraz większego zbliżenia przepływającego strumienia elektronów w tym kierunku – a nie przez cały przekrój. Można powiedzieć, że prąd zmienny sam się wypiera z wnętrza przewodu, na skutek oddziaływań magnetycznych z samym sobą. Zatem im częstotliwość niższa, tym prąd płynie głębiej. Konsekwencją efektu naskórkowości jest zmiana rezystancji przewodnika zależna od częstotliwości. Poddając analizie uzyskane własności należy także rozważyć wymienione zjawisko.

Kończąc, warto w tym miejscu także podkreślić, że przeprowadzenie prób przemysłowych z wykorzystaniem prętów z technologii Upcast wynikało z potrzeby zaangażowania dużej ilości materiału wsadowego o stabilnej strukturze i własnościach. To wyjaśnia, dlaczego nie wykonano prób wytwarzania kabla teleinformatycznego UTP z materiału uzyskanego z laboratoryjnej linii DCC-AGH. Jednakże wnioski jakie płyną z badań własności elektrycznych drutów wytworzonych z tych materiałów, jak również wnioski płynące z badań i analiz Yana (por. podrozdział 2.3 – m.in. rys. 2.3.8, 2.3.9) upoważniają do przypuszczenia, że uzyskane wyniki badań aplikacyjnych wykazałyby jeszcze bardziej korzystne różnice względem kabli wykonanych z miedzi w gatunku Cu-ETP.

## Rozdział 11

### Podsumowanie końcowe pracy

Niniejszy rozdział stanowi syntetyczne podsumowanie całości przeprowadzonych w pracy badań doświadczalnych i aplikacyjnych. Jak nadmieniono we wprowadzeniu do dysertacji, szczegółowe analizy oraz ich podsumowania końcowe zostały przedstawione w ramach poszczególnych podrozdziałów, a w szczególności: 9.1 – dotyczącego identyfikacji własności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP; 9.2, w którym zamieszczono wyniki badań nad procesem ciągnięcia prętów i walcówek na druty i mikrodruty; 9.3 poświęconego analizie odporności cieplnej drutów z dwóch gatunków miedzi, 9.4 stanowiącego omówienie właściwości elektrycznych drutów oraz 10.2, którego tematyka skupia się na opisie rezultatów pomiarów parametrów transmisyjnych opracowanych konstrukcji kablowych. Całość opracowania dotyczącego zrealizowanych badań i zawartego w wymienionych podrozdziałach pracy obejmuje nie tylko szereg wyników obserwacji eksperymentalnych i ich interpretację, ale także wprowadzającą analizę literaturową. Przykładowo uzupełnienie tematyki dotyczącej parametryzacji cech materiałowych kabli teleinformatycznych z żyłami przewodzącymi z różnych gatunków miedzi stanowi opis linii produkcyjnej wraz z przedstawieniem obserwacji o charakterze technicznym wynikających z przyjętej ścieżki technologicznej. Z tego powodu wnioski z przeprowadzonych w ramach rozdziałów dziewiątego i dziesiątego badań doświadczalnych oraz aplikacyjnych – podzielone zostały na dwie grupy problematyczne i zamieszczone w kolejnym, dwunastym rozdziale dysertacji.

\*\*\*

Praca dotyczy parametryzacji cech materiałowych miedzi beztlenowej o zróżnicowanym stanie strukturalnym kształtowanym w procesie ciągłego odlewania. Podjęta w dysertacji tematyka badań doświadczalnych nad materiałem o tak wysokiej czystości chemicznej wynika z dynamicznie rozwijającego się rynku kabli i przewodów. Wzrastające wymagania materiałowe i technologiczne stawiane tej grupie wyrobów dotyczą wszystkich elementów składowych ich budowy, począwszy od żył przewodzących z miedzi, a skończywszy na izolowaniu gotowej konstrukcji ośrodka.

Zapotrzebowanie na różne gatunki miedzi beztlenowej wynika także z dokonującej się w ostatnich latach niemalże rewolucyjnej ekspansji przemysłu elektrotechnicznego i metod doświadczalnych fizyki ciała stałego (lampy elektronowe, kriogenika, aparatura próżniowa). W branży drutów, prętów i linek miedzianych obserwuje się ponadto wejście na rynek miedzi funkcjonalnie doskonalszej o coraz to wyższej czystości chemicznej. Problematyka badań eksperymentalnych na ten temat stanowiąca przedmiot dysertacji stała się zatem jak najbardziej zasadna i niezbędna do tego, aby przy wykorzystaniu istniejącej aparatury przemysłowej i badawczej dążyć do wdrażania nowych rodzajów miedzi o wysokiej klasie czystości chemicznej w zaawansowanych technologiach.

Dążenia do uzyskiwania coraz to wyższej przewodności elektrycznej miedzi przełożyły się na potrzebę doskonalenia czystości metalurgicznej materiału, a miniaturyzacja urządzeń i dbałość o najwyższą jakość przesyłu sygnału elektrycznego wymusiła nowe rozwiązania techniczne umożliwiające głęboki przerób miedzianych materiałów w szczególności, gdy są one przeznaczona na cienkie druty. W związku z powyższym tematyka pracy podyktowana była także ograniczonymi zdolnościami ciągarskimi tradycyjnie stosowanej na cele elektryczne miedzi tlenowej w gatunku Cu-ETP, które wynikają z obecności twardych tlenków oddalających możliwość zastosowania materiału do produkcji drutów o średnicach poniżej 0,1 mm. Dodatkowo w sposób negatywny wpływają one na obniżenie odporności miedzi na korozję oraz uniemożliwiają obróbkę cieplną materiału w atmosferze redukcyjnej wodoru (kruchość wodorowa), co z kolei wyklucza stosowanie miedzi elektrolitycznej jako przewodnika w kablach ognioodpornych. Walcówka charakteryzuje się także drobnoziarnistą strukturą, a w związku z tym dużą ilością granic ziaren stanowiących przeszkodę w ukierunkowanym ruchu elektronów przewodnictwa. I chociaż jest to materiał uzyskany w warunkach bardzo dużego odkształcenia całkowitego na gorąco z udziałem wielokrotnej rekryształizacji

dynamicznej, to z uwagi na stan strukturalny i skład chemiczny nie może być przedmiotem zainteresowania niszowych aplikacji kablowych.

W związku z powyższym nadrzędnym celem niniejszej pracy było przeprowadzenie kompleksowej charakteryzacji własności materiałowych i technologicznych miedzi beztlenowej uzyskiwanej w procesie ciągłego odlewania w warunkach przemysłowych metodą Upcast i Rautomead. Ponadto główny nurt badań naukowych ukierunkowano także na możliwość uzyskania w warunkach laboratoryjnych materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE o specjalnie ukształtowanej strukturze dającej gwarancję zastosowań m.in. w obszarze elektroniki przemysłowej. Dlatego też zaistniały realne podstawy do opracowania nowej technologii DCC-AGH wytwarzania materiału wsadowego o stanie strukturalnym charakteryzującym się ograniczoną ilością kryształów, która poprzez zmniejszoną ilość granic ziaren istotnie wpływa na podwyższenie konduktywności drutów. W trakcie procesu projektowania i wykonania omawianej laboratoryjnej instalacji zastosowano i wdrożono najnowszą wiedzę z zakresu technik hutniczych i inżynierii materiałowej. Pozwoliło to na uruchomienie technologii ciągłego odlewania prętów z miedzi beztlenowej, których własności zostały bezpośrednio odniesione do materiałów o tym samym gatunku, ale otrzymywanych w przemysłowych liniach technologicznych.

Należy podkreślić, że w kształtowaniu jakości wyrobów finalnych tj. drutów uzyskiwanych metodami przeróbki plastycznej zarówno na zimno, jak i na gorąco istotną rolę odgrywa jakości materiałów wsadowych, którymi w odniesieniu do segmentu wyrobów dedykowanych do zastosowań elektrotechnicznych są tradycyjna walcówka z miedzi w gatunku Cu-ETP oraz pręty z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymywane z katod z miedzi w gatunku Cu-CATH-1 charakteryzujących się wysoką czystością chemiczną (suma pierwiastków zanieczyszczeń według technologii objętych pracą na poziomie maksymalnie 25 ppm wag.). Ponadto wpływ na własności drutów odgrywają także parametry technologii ciągłego odlewania prętów z miedzi beztlenowej. W szczególności w niniejszej pracy analizowano wpływ zmiany prędkości odlewania oraz wydatku wody chłodzącej na własności materiałów wsadowych dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty. Stwierdzono, że wpływ zastosowanych zmian jest widoczny w strukturze materiałów – wyraża się różną ilością i ukierunkowaniem krystalitów na przekroju miedzi. Przeprowadzone w kolejnym etapie badania doświadczalne nad identyfikacją materiałową odlewów dowiodły zróżnicowania własności mechanicznych i fizycznych materiałów o średnicach 8,0 mm. W związku z powyższym zaobserwowane w trakcie realizacji badań eksperymentalnych odmienne własności materiałowe miedzi beztlenowej z linii technologicznej Upcast, Rautomead i DCC-AGH analizowano pod kątem bezpośredniego zastosowania materiałów do aplikacji dedykowanych na cele elektryczne. W szczególności rozważano ich wpływ na kształtowanie się zdolności do zachowania ewentualnych różnic w procesach przeróbki plastycznej na zimno (przekroczenie progu odkształcalności) oraz wyżarzania.

Z uwagi na fakt, iż czynnikiem decydującym o własnościach technologicznych miedzi wysokiej czystości chemicznej jest jej stan strukturalny, badania eksperymentalne dowiodły zróżnicowania charakteru umacniania się oraz odporności cieplnej drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE otrzymanych z prętów z procesu ciągłego odlewania przy szybkościach z zakresu 0,006 – 4,0 m/min. Informacja ta posiada istotne znaczenie aplikacyjne wpływające na sposób pracy i warunki wyżarzania drutów i mikrodrutów w zakładach kablowych. Zmiana parametrów procesu wygrzewania w liniach ciągarniczych to istotny aspekt praktyczny zwłaszcza przy przeciąganiu materiału na mikrodruty, stosowane w konstrukcjach kablowych do przesyłu danych, dźwięku i obrazu, w których wykorzystuje się żyły przewodzące z miedzi beztlenowej. Na podkreślenie zasługują ponadto wyniki pomiarów własności elektrycznych, które można określić mianem wielkiego kamienia milowego niniejszej pracy. Zanotowany trzykrotnie niższy przyrost oporności elektrycznej miedzi w gatunku Cu-OFE w stosunku do miedzi tlenowej skutkiem zadanego odkształcenia także przekłada się na wysokie znaczenie aplikacyjne tego materiału.

Przeprowadzone badania doświadczalne dowiodły, że miedź beztlenowa uzyskiwana w wysokozaawansowanych technologiach ciągłego odlewania jest niezbędnym i bardzo poszukiwanym materiałem wsadowym do produkcji kabli o specjalnych zastosowaniach. Należy w tym miejscu zaznaczyć innowacyjny charakter pracy, w ramach której dzięki zaprojektowaniu nowatorskiego, laboratoryjnego stanowiska DCC-AGH do ciągłego i ukierunkowanego odlewania miedzi w gatunku Cu-OFE uzyskano innowacyjny materiał o zweryfikowanych – ponadstandardowych własnościach.

Dopełnienie przeprowadzonych eksperymentów nad wpływem parametrów odlewania na kształtowanie cech materiałowych miedzi beztlenowej dedykowanej do aplikacji elektrotechnicznych stanowiła przeprowadzona w warunkach przemysłowych próba technologiczna, w wyniku której wytworzono konstrukcje kabli teleinformatycznych z żyłami przewodzącymi z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE. Zasadność podjęcia badań o charakterze aplikacyjnym podyktowana była poszukiwaniem odpowiedzi na pytanie o wpływ zaobserwowanych różnic składu chemicznego i stanu strukturalnego materiałów wsadowych – które przełożyły się na odmienne własności elektryczne drutów – na kształtowanie parametrów transmisyjnych kabli czteroparowych z torami przewidzianymi do pracy przy częstotliwościach do 250 MHz. W związku z powyższym badania dostarczyły informacji nie tylko o relacji względem siebie właściwości dwóch gatunków miedzi, ale także pozwoliły na ocenę ich zachowania w przemysłowych procesach wieloetapowego ciągnięcia połączonych z zabiegami wyżarzania międzyoperacyjnego, a ponadto ich zachowania się w układzie pól generowanych przepływem prądu elektrycznego przez kablową konstrukcję wielodrutową.

Warto podkreślić, że z punktu widzenia charakteru umocnienia, tradycyjna miedź elektrolityczna i materiał w gatunku Cu-OFE wykazują zbliżone własności i mogą być przetwarzane na identycznych maszynach ciągniczych według podobnych technologii zwłaszcza na grubociągach i średniciągach. Pewne istotne zróżnicowanie pojawia się natomiast przy prowadzeniu wyżarzania rekrystalizującego drutów na wyżarzarkach w systemach ciągłych. Z jednej strony miedź beztlenowa posiada wyższą czystość chemiczną i wobec mniejszej ilości zanieczyszczeń powinna wykazywać niższą temperaturę rekrystalizacji, z drugiej zaś – co udowodniono we wcześniejszych etapach pracy – stan strukturalny materiału wsadowego z technologii Upcast, a także Rautomead lub DCC-AGH do procesu ciągnięcia jest zupełnie odmienny niż typowej walcówki z linii COiW i po procesie odkształcenia na zimno wymaga większej energii do zajścia procesu rekrystalizacji. Porównując siłę wpływu obu rozpatrywanych parametrów okazuje się, że parametr struktury jest w tym przypadku dominujący. Przekłada się to „a priori” na konieczność stosowania wyższych prądów żarzenia miedzi w gatunku Cu-OFE na wyjściu z maszyn ciągniczych.

Analizując zakres aplikacji kabli z miedzi beztlenowej największe znaczenie technologiczne posiada proces skręcania na skręcarkach lirowych. Tego typu urządzenia pozwalają na produkcję w jednej operacji żyły z Nielimitowanej ilości drutów o skręcie typu „unilay”. Należy mieć przy tym świadomość, że maszyny tego typu wymagają ponadstandardowej powtarzalności własności drutów, bowiem żyła podczas produkcji poddawana jest znacznym obciążeniom mechanicznym pochodzącym od sił odśrodkowych. Należy przy tym podkreślić, że technologia skręcania żył z miedzi beztlenowej jest zbliżona do technologii skręcania żył z miedzi tradycyjnej w gatunku Cu-ETP, bowiem własności mechaniczne drutów z obu rodzajów materiału są podobne. Zastosowanie miedzi w gatunku Cu-OFE pozwala natomiast poprawić niezawodność procesu skręcania i wykonywać żyły z cieńszych drutów. To z kolei przekłada się na podwyższenie wymagań wobec sterowania kinematyką skręcerek.

\*\*\*

Poznanie cech materiałowych miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE w wyniku przeprowadzonych badań doświadczalnych umożliwiło dokonanie ich charakteryzacji, która z kolei stanowiła wytyczne do prawidłowej realizacji procesu przetwórstwa w przemysłowych liniach ciągniczych w zakładzie kablowym. Tylko takie kompleksowe uzyskanie wiedzy o materiałach umożliwiło poprawność realizacji przyjętej ścieżki technologicznej, w wyniku której uzyskano kable stanowiące wzorcowe konstrukcje do pomiarów ich właściwości transmisyjnych. Z uwagi, iż wzrost przepustowości pasma w sieciach teleinformatycznych generuje potrzebę rozwoju innowacyjnych aplikacji z grupy kabli i przewodów, których zadaniem jest usprawnienie działania sieci na drodze minimalizacji stratności transmitowanych sygnałów elektrycznych zaobserwowana wyraźna poprawa własności w przypadku konstrukcji z miedzi w gatunku Cu-OFE pozwala na stwierdzenie ponadstandardowych własnościach tego materiału. Na podkreślenie zasługują kształtujące się na wyraźnie niższym poziomie w stosunku do drutów z miedzi tlenowej wyniki pomiarów rezystancji czterech par, z których każda została skręcona z różnymi długościami skoków. Także na podstawie analizy wyników badań, których celem było określenie stopnia wielkości zniekształceń odbiciowych i tłumieniowych torów stwierdzono wyraźne zmniejszenie tłumienności kabli z żyłami z miedzi w gatunku Cu-OFE, które wykazały ponadto zależność od prędkości odlewania materiałów wsadowych. Również określona dla przewodów prędkość propagacji sygnału odniesiona bezpośrednio do szybkości światła pozwoliła na uzyskanie

rezultatów o wynikach kształtujących się na wyższym poziomie dla konstrukcji z miedzi beztlenowej w stosunku do miedzi w gatunku Cu-ETP. Wpłynęło to bezpośrednio na odnotowane wartości opóźnień sygnałów. Tym samym badania dowiodły słuszności postawionej w pracy tezy o wpływie zmniejszonej ilości granic ziaren w materiale wsadowym na minimalizację stratności przesyłu sygnału elektrycznego w teleinformatycznych konstrukcjach kablowych.

Przyjęta w pracy taka sama ścieżka technologiczna wytwarzania konstrukcji z żyłami z różnych gatunków miedzi oraz procedura pomiarów stworzyły możliwość porównania materiałów i na tej podstawie stwierdzenia bezpośredniej korelacji pomiędzy problemami parametrów transmisyjnych w kablach teleinformatycznych, a materiałami miedzianymi stosowanymi na żyły przewodzące.

Podsumowując przeprowadzone w ramach niniejszej dysertacji rozważania należy podkreślić, iż dowiedzione zostało, że uzyskanie miedzi beztlenowej o wysokozaawansowanych własnościach wymaga realizacji procesu wytwarzania metodą ciągłego odlewania oraz przetwarzania zgodnie ze ściśle określonymi zaleceniami techniczno-technologicznymi, które związane są zarówno z podstawowymi parametrami kontrolnymi procesu dotyczącymi właściwości przetwarzanego materiału, jak i krytycznymi parametrami procesowymi. Z kolei wdrożenie wytycznych wymaga, co oczywiste, dostosowania poszczególnych parametrów procesu do wymagań limitowanych parkiem maszynowym. Zakończenie niniejszego podsumowania dotyczącego przeprowadzonych badań eksperymentalnych i aplikacyjnych stanowi zatem całość wymagań zestawionych w postaci sześciu głównych zakresów obejmujących własności materiału wsadowego, parametry procesu ciągłego topienia i odlewania, własności materiału w stanie po odlewaniu, wymagania stawiane procesowi ciągnięcia oraz związane z nimi własności drutów i parametry pielęgnacji chłodziw smarnych do procesu ciągnięcia. Tym samym opracowanie oprócz walorów naukowych związanych z dowodzeniem tezy pracy pełni również funkcję przewodnika umożliwiającego szybkie zaznajomienie się z omawianymi zagadnieniami techniczno-technologicznymi dotyczącymi miedzi specjalistom z dziedziny przeróbki plastycznej i materiałoznawstwa, ale także inżynierom odpowiedzialnym za projektowania kabli i przewodów. W tabeli 11.1 zamieszczono wymagania techniczno-technologiczne względem procesu wytwarzania i przetwarzania miedzi beztlenowej dla wysokozaawansowanych aplikacji w elektronice i elektrotechnice.

Tabela 11.1. Wymagania techniczno-technologiczne procesu wytwarzania i przetwarzania miedzi beztlenowej dla wysokozaawansowanych aplikacji w elektronice i elektrotechnice

I. Wymagania dotyczące materiału wsadowego																			
Typ	Katoda miedziana																		
Gatunek	Cu-CATH-1 (z ograniczoną dopuszczalną ilością pierwiastków domieszek)																		
	Wymagania	Maksymalna zawartość wagowa pierwiastków [ppm wag.]																	
		Ag	As	Bi	Cd	Co	Cr	Fe	Mn	Ni	P	Pb	S	Sb	Se	Sn	Te	Zn	Σ domieszek
	Norma PN-EN 1978:2000	25	5 <sup>1)</sup>	2 <sup>2)</sup>	- <sup>1)</sup>	- <sup>3)</sup>	- <sup>1)</sup>	10 <sup>5)</sup>	- <sup>1)</sup>	- <sup>3)</sup>	- <sup>1)</sup>	5	15 <sup>4)</sup>	4 <sup>1)</sup>	2 <sup>2)</sup>	- <sup>3)</sup>	2 <sup>2)</sup>	- <sup>3)</sup>	65
Technologia objęta dysertacją	10	0,7	0,6	1,0	0,5	0,5	0,5	0,8	1,0	1,0	1,0	7,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	29	
Uwagi	<sup>1)</sup> (As + Cd + Cr + Mn + P + Sb) maks. 15 ppm wag. <sup>2)</sup> (Bi + Se + Te) maks. 0,0003 %, w tym (Se + Te) maks. 3 ppm wag. <sup>3)</sup> (Co + Fe + Ni + Si + Sn + Zn) maks. 20 ppm wag. <sup>4)</sup> Zawartość siarki należy oznaczyć w próbce odlanej <sup>5)</sup> łącznie ze srebrem, nie więcej 15 ppm wag. Ag																		
Przewodność elektryczna	101 %IACS (58,58 MS/m)																		
Jakość powierzchni	Bez nieciągłości, bez wtrąceń obcych, czysta, gładka, bez dendrytów, bez plam siarczków, o równomiernej grubości																		
II. Wymagania dotyczące procesu ciągłego topienia i odlewania																			
Rodzaj grzania pieca topliwego i odlewniczego	Elektryczne indukcyjne lub elektryczne oporowe																		
Warunki topienia	Ciągłe, w próżni, w osłonie gazu ochronnego lub pod pokryciem grafitowym																		
Zużycie energii	Nominalnie 380 – 450 kWh/tonę Cu w zależności od konstrukcji pieca																		
Czas odtleniania	25 – 50 min. w zależności od zawartości tlenu w katodzie i temperatury ciekłego metalu																		

Sposób odtleniania	Przy pomocy grafitu, niedopuszczalne jest stosowanie odtleniaczy w postaci zapraw fosforowych, borowych, litowych, magnezowych i innych
Temperatura ciekłego metalu przed odlewaniem	1140 – 1200 °C
Prędkość odlewania	0,006 – 4,0 m/min.
Cykl odlewania	Wyciąganie: czas – 1 min., posuw – 1,5 m (czas – 1 s, posuw 2,5 mm) Postój: czas – 1 s, Cofanie: czas – 0 s, posuw – 0 m
Warunki chłodzenia	Przepływ wody przy chłodzeniu pierwotnym: 0,1 – 0,5 l/min. w zależności od prędkości odlewania Temperatura wody wejściowej przy chłodzeniu pierwotnym: 6 – 8 °C Temperatura wody wyjściowej przy chłodzeniu pierwotnym: 20 – 45 °C w zależności od prędkości odlewania Przepływ wody przy chłodzeniu wtórnym: 0,2 – 1,0 l/min. w zależności od prędkości odlewania Temperatura wody wejściowej przy chłodzeniu wtórnym: 6 – 8 °C
Temperatura wlewka	20 – 40 °C w zależności od prędkości odlewania
Budowa krystalizatora	Grafitowy z pasowanym płaszczem stalowym lub miedzianym Grafit w gatunku R 4550 (gęstość 1,83 g/cm <sup>3</sup> , przewodność cieplna 100 W/mK, wielkość ziarna 10 μm, twardość Rockwell'a 95 HR 5/10)
<b>III. Wymagania dotyczące pręta w stanie odlewanym</b>	
Dopuszczalna zawartość tlenu	Max. 3,0 ppm wag.
Średnica	8,0 mm ± 0,4 mm
Gęstość	8,92 – 8,94 g/cm <sup>3</sup>
Własności mechaniczne	Wytrzymałość na rozciąganie: 150 – 190 MPa Wydłużenie całkowite przy zerwaniu na bazie 250 mm: min. 35 %
Przewodność elektryczna	Min. 101,5 % IACS (58,87 MS/m)
Odporność na kruchość wodorową	Min. 10 przegięć po wygrzewaniu w temperaturze 830 °C, w czasie 45 min., w atmosferze 10 %H <sub>2</sub>
Struktura	Rodzaj: odlewnicza – dendrytyczna Średnia grubość dendrytu: 0,5 – 2,0 mm Kąt osi dendrytu względem osi pręta: 0 – 35 °
Jakość powierzchni	Czysta, gładka, bez rys, pęknięć, łusek, tlenków i wtrąceń
<b>IV. Wymagania dotyczące procesu ciągnięcia</b>	
Grubociąg poślizgowy	Preferowany schemat ciągów: 8,00 mm – 6,50 mm – 5,34 mm – 4,45 mm – 3,74 mm – 3,18 mm – 2,73 mm – 2,37 mm – 2,08 mm – 1,84 mm – 1,63 mm – 1,45 mm – 1,29 mm – 1,15 mm Poślizg: 1,5 % Prędkość ciągnięcia: 15 – 25 m/s Ilość zwojów na kole ciągowym: 3 Ciągadła: compax, wielkość ziarna 25 μm, kąt stożka roboczego 18 ° Medium smarne: emulsja 6 – 10 %, olej (np. Houghto – Draw WD4100) w wodzie demi, pH ok. 8,7 Wyżarzarka: dobór prądu pod własności na stan miękki
Średniociąg poślizgowy	Preferowany schemat ciągów: 1,15 mm – 1,06 mm – 0,985 mm – 0,912 mm – 0,844 mm – 0,781 mm – 0,723 mm – 0,669 mm – 0,620 mm – 0,573 mm – 0,531 mm – 0,491 mm – 0,455 mm – 0,421 mm – 0,390 mm – 0,361 mm – 0,334 mm – 0,309 mm Poślizg: 1,5% Prędkość ciągnięcia: 15 – 25 m/s Ilość zwojów na kole ciągowym: 2,5 – 3,5 Ciągadła: compax, wielkość ziarna: 5 – 25 μm, kąt stożka 18 ° Medium smarne: emulsja 3 – 7 %, olej (np. Houghto – Draw WD4100) w wodzie demi, pH ok. 8,7 Wyżarzarka: dobór prądu pod własności na stan miękki
Cienkiociąg poślizgowy	Preferowany schemat ciągów: 0,309 mm – 0,290 mm – 0,272 mm – 0,255 mm – 0,239 mm – 0,224 mm – 0,210 mm – 0,197 mm – 0,185 mm – 0,174 mm – 0,163 mm – 0,153 mm – 0,143 mm – 0,134 mm – 0,126 mm – 0,118 mm – 0,110 mm – 0,100 mm Poślizg: 1,5 %

	<p>Prędkość ciągnięcia: 15 – 35 m/s          Ilość zwojów na kole ciągowym: 2,5 – 3,5          Ciągadła: compax, wielkość ziarna 3 – 5 <math>\mu\text{m}</math>, lub diament monokrystaliczny, kąt stożka 18°          Medium smarne: emulsja 2 – 8 %, olej (np. Houghto – Draw WD4100) w wodzie demi, pH ok. 8,7          Wyżarzarka: dobór prądu pod własności na stan miękki</p>
<b>V. Wymagania dotyczące drutów</b>	
Średnica i tolerancja wymiarów	Wg specyfikacji kabla
Przewodność elektryczna	Min. 101 %IACS (58,58 MS/m)
Własności mechaniczne	Wytrzymałość na rozciąganie: 200 – 250 MPa w zależności od średnicy i warunków wyżarzania Wydłużenie całkowite przy zerwaniu na bazie 250 mm: 25 – 40 % w zależności od średnicy i warunków wyżarzania
<b>VI. Wymagania dotyczące parametrów i warunków pielęgnacji chłodziw smarno chłodzących do procesu ciągnięcia</b>	
Parametry techniczne wody do przygotowania emulsji	<p>Wartość pH: 6 – 7          Przewodność elektryczna: maks. 10 <math>\mu\text{S/cm}</math>          Mikroorganizmy: maks. 10 szt./ml          Twardość: 100 – 200 mg <math>\text{CaCO}_3/\text{l}</math>          Zawartość chlorku: maks. 5 mg/l          Zawartość siarczanu: maks. 5 mg/l</p>
Podstawowe testy kontrolne emulsji	<p>Stężenie, przewodność elektryczna, stopień biologicznego skażenia, pH: raz w tygodniu          Ilości zanieczyszczeń mechanicznych, efektu żarzenia beznalotowego, zawartości i smarów obcych, stabilności emulsji: według potrzeb</p>
Rekomendowane rodzaje olejów emulgujących	<p>Firma Bechem – grupa olejów emulgujących w gatunku Unopol i Kubitrac          Firma Exxon – Mobil – grupa olejów emulgujących w gatunku Prosol          Firma Pfinder – grupa olejów i past emulgujących w gatunku Pfinder          Firma Houghton – grupa olejów i past emulgujących w gatunku Master Draw          Firma Metallube – grupa olejów nieemulgujących w gatunku Tubol          Firma Batoyle – grupa olejów nieemulgujących w gatunku Master Draw          Firma Petrofer – oleje emulgujące w gatunku Isolube</p>



## Rozdział 12

### Wnioski

Zaprezentowane wnioski posiadają charakter kompleksowego ujęcia relacji jakie zachodzą w układzie procesy – materiał w odniesieniu do badań zrealizowanych w dysertacji. Choć część z nich bazuje na ogólnie znanych stwierdzeniach, to ich uwzględnienie pozwoli na całościowe spojrzenie na zespół własności materiałowych i technologicznych miedzi – najistotniejszych z punktu widzenia tematu pracy doktorskiej.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej tematu, rozważań teoretycznych oraz zrealizowanych badań eksperymentalnych podstawowych i aplikacyjnych sformułowano następujące wnioski końcowe dysertacji:

#### Wnioski z badań podstawowych

##### 1. w zakresie przeprowadzonych analiz literaturowych:

- 1.1. Wysokozaawansowany przemysł elektrotechniczny stawia coraz to nowe wymagania względem własności fizykochemicznych i technologicznych miedzi przeznaczonej na cele elektryczne.  
*Postuluje się idealną czystość chemiczną materiału, ukierunkowaną strukturę, wysoką przewodność elektryczną, bardzo dobrą odkształcalność na druty i mikrodruty, a także ponadstandardową podatność do procesu wyżarzania. Materiał o takim zespole własności nazywany jest miedzią funkcjonalnie doskonałą.*
- 1.2. Obserwuje się dynamiczny rozwój nowoczesnych metod ciągłego odlewania miedzi beztlenowej (np. OCC), które mimo niższej wydajności w porównaniu do technologii ciągłego odlewania i walcowania pozwalają na uzyskanie wyrobów specjalistycznych o ściśle zaprojektowanych i dedykowanych własnościach. Stanowią zatem konkurencję jakościową dla linii COiW.
- 1.3. Technologia wytwarzania miedzi obejmująca zagadnienia związane z etapem przetwarzania katody na walcówkę lub pręt w instalacjach COiW i CO musi być poddana analizie zarówno pod kątem składu chemicznego materiału (ilość zanieczyszczeń bądź dodatków stopowych, w tym problem zawartości tlenu), jak i warunków krystalizacji (problemy kształtowania struktury oraz zagadnienia wad odlewniczych).
- 1.4. Defekty struktury rozpraszają elektrony przewodnictwa elektrycznego.  
*Stwierdza się, że w przypadku miedzi wysokiej czystości chemicznej najbardziej negatywnym egzogenicznym źródłem są granice ziaren, przy czym w przeciwieństwie do innych zaburzeń (wakanse, dyslokacje) wpływ ten nie jest liniowy. Współcześnie zjawisko to nabiera dużego znaczenia w związku z zastosowaniem cienkich drutów miedzianych w niszowych aplikacjach kablowych.*
- 1.5. Z jednej strony rozwój nowatorskich technologii ciągłego topienia katod najwyższej czystości chemicznej w gatunku Cu-CATH-1 (LME Grade-A), z drugiej zaś ekspansja na rynku innowacyjnych sposobów ciągłego odlewania miedzi beztlenowej o strukturze kilkuziarnowej pozwala na minimalizację występujących zniekształceń i zakłóceń w przesyłce elektronów.

## 2. w zakresie przeprowadzonej identyfikacji własności materiałów wsadowych:

- 2.1. Parametry procesu odlewania oraz warunki i sposób odbioru ciepła (ilość i temperatura wody na wejściu/wyjściu z krystalizatora) wpływają na kształtowanie się struktury materiału pod kątem ilości i morfologii ziaren.  
*W szczególności obserwuje się zmianę kierunku ich ułożenia z prostopadłych względem osi pręta dla materiałów odlewanych z dużymi prędkościami, do równoległych dla materiałów odlewanych z mniejszymi prędkościami. Powyższy wniosek dotyczy zarówno procesu odlewania w warunkach przemysłowych (instalacja Upcast, Rautomead), jak i laboratoryjnych (instalacja DCC-AGH).*
- 2.2. Zmiana gradientu temperatury na froncie krystalizacji umożliwia sterowanie strukturą materiału w procesie odlewania.  
*Zmniejszenie prędkości odlewania prowadzi do zmiany kierunku odprowadzania ciepła, co w konsekwencji skutkuje utworzeniem się płaskiego frontu krystalizacji, który umożliwia uzyskanie struktury o równoległych do osi odlewane go materiału ziarnach.*
- 2.3. Struktura miedzi beztlenowej uzyskiwana w procesie ciągłego odlewania determinuje niższe w stosunku do miedzi otrzymywanej w linii ciągłego odlewania i walcowania własności wytrzymałościowe.  
*Wraz ze spadkiem prędkości odlewania obserwuje się monotoniczny wzrost wytrzymałości na rozciąganie materiału w gatunku Cu-OFE uzyskanego metodą Upcast i DCC-AGH.*
- 2.4. Zmiana wielkości przepływu wody chłodzącej krystalizator w rozpatrywanym zakresie (40 – 60 l/min.) nie wywiera znaczącego wpływu na własności materiałów wsadowych z miedzi z linii Upcast.
- 2.5. Walcówka poddana zabiegom obróbki cieplnej charakteryzuje się niższymi własnościami wytrzymałościowymi w stosunku do materiału po linii Contirod. Z kolei pręty po procesie wyżarzania wykazują zmienne własności wytrzymałościowe, przy czym w zakresie wyższych temperatur następuje ich wzrost.
- 2.6. Kierunek ułożenia granic ziaren w miedzi beztlenowej wpływa na wyniki statycznej próby skręcania materiałów.  
*Z uwagi na obciążanie prętów równoważącymi się momentami skręcającymi działającymi w płaszczyźnie poprzecznej najlepszą plastycznością charakteryzuje się miedź w gatunku Cu-OFE uzyskana przy dużych prędkościach odlewania, co podyktowane jest prostopadłym do osi ułożeniem kryształów w materiale.*
- 2.7. Mniejsza ilość granic ziaren jako miejsc niedopasowania struktury oraz skład chemiczny miedzi beztlenowej – brak obecności tlenków  $\text{Cu}_2\text{O}$  – przekładają się na wyższe wartości gęstości w porównaniu do walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP.  
*W szczególności obserwuje się wzrost gęstości materiału wraz ze zmniejszeniem prędkości odlewania.*
- 2.8. Miedź w gatunku Cu-OFE wykazuje wyższe wartości twardości w stosunku do materiału tlenowego. *Zauważalny jest przebieg zmian w funkcji szybkości odlewania, a dokładniej wzrost twardości wraz z obniżeniem prędkości prowadzenia procesu technologicznego.*
- 2.9. Pierwotna budowa strukturalna i skład chemiczny ujawnia mniejszy opór elektryczny prętów z miedzi beztlenowej w porównaniu do tradycyjnej walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP.  
*Wykazano, iż spadek prędkości odlewania wpływa na zmniejszenie rezystywności materiałów.*

### 3. w zakresie przeprowadzonych badań nad procesem ciągnięcia materiałów wsadowych:

- 3.1. Czystość chemiczna materiału wsadowego warunkuje podatność miedzi do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty.
- 3.2. Ograniczone zdolności ciągnicze walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP na druty o średnicach poniżej 0,1 mm wynikają z obecności twardych i kruchych tlenków miedzi, które przy bardzo małych średnicach drutów istotnie obniżają ciągliwość materiału. Miedź wysokiej czystości chemicznej w gatunku Cu-OFE z uwagi na brak zawartości tlenu charakteryzuje się natomiast bardzo dobrą odkształcalnością w procesie przeróbki plastycznej na zimno, co umożliwia jej przeznaczenie do produkcji mikrodrutów o średnicach 0,03 mm i mniejszych.
- 3.3. Druty z miedzi beztlenowej wykazują większe umocnienie w procesie ciągnięcia niż materiały z miedzi w gatunku Cu-ETP.  
*Zróżnicowanie wynika z faktu, iż własności wytrzymałościowe prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE są niższe o około 20 % w stosunku do walcówki z miedzi tlenowej, co wynika ze zróżnicowania stanu strukturalnego materiałów wsadowych. Ponadto z uwagi na duże ziarna umocnienie zachodzi w dużym stopniu przez poślizg.*
- 3.4. Na podstawie analizy parametrów siłowych procesu ciągnięcia stwierdza się, iż największe zróżnicowanie współczynnika zapasu wytrzymałości występuje dla drutów o dużych średnicach (mały stopień umocnienia odkształceniowego), przy czym wyższymi wartościami charakteryzuje się miedź beztlenowa. Z kolei w przypadku drutów o mniejszych średnicach, a więc o większej wartości umocnienia odkształceniowego różnice są niewielkie.

### 4. w zakresie przeprowadzonych badań odporności cieplnej drutów:

- 4.1. Skład chemiczny katody, jako materiału wsadowego do produkcji walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta z miedzi beztlenowej determinuje zespół własności drutów miedzianych do zastosowań w elektronice i elektrotechnice.
- 4.2. Walcówka z miedzi w gatunku Cu-ETP uzyskuje w teście TWS wydłużenie sprężyny na poziomie około 460 mm, co pozytywnie kwalifikuje materiał pod kątem podatności do wyżarzania. Odmienne własności wykazuje pręt z miedzi beztlenowej charakteryzujący się wynikiem dużo niższym (średnio na poziomie 20 mm), co wpływa na konieczność zmian w technologii przetwarzania tego materiału.
- 4.3. Wpływ zawartości tlenu na kształtowanie temperatury rekrytalizacji miedzi zależy od poziomu zanieczyszczeń. W przypadku materiału o klasie czystości 3N jest korzystny, ponieważ dodatek tlenu wiąże zanieczyszczenia znajdujące się najczęściej w roztworze i w postaci wydzieleni lokuje się na granicach ziaren. Natomiast w przypadku miedzi wysokiej czystości chemicznej tlen pełni funkcję zanieczyszczenia wpływającego niekorzystnie na procesy rekrytalizacji.
- 4.4. Wzrost poziomu zanieczyszczeń w miedzi prowadzi do zmniejszenia się kinetyki procesu rekrytalizacji. Im większa jest ilość pierwiastków domieszek w materiale tym uzyskanie stanu miękkiego w tej samej jednostce czasu charakteryzuje się większym zakresem temperaturowym.
- 4.5. Stan strukturalny materiału wsadowego wpływa na podatności do wyżarzania drutów miedzianych.  
*Druty uzyskane z drobnoziarnistej miedzi w gatunku Cu-ETP, w odróżnieniu od materiału beztlenowego charakteryzują się niższymi wartościami temperatur rekrytalizacji i szybką kinetyką procesu zarodkowania.*

*Druty otrzymane z materiału w gatunku Cu-OFE odlewanego z niskimi prędkościami (ze względu na mniejszą ilość granic ziaren) wykazują wyższe wartości temperatur rekrytalizacji i dużo wolniejszy przebieg procesu odbudowy struktury, aniżeli druty w tym samym gatunku, lecz uzyskiwane z materiału odlewanego z wyższymi prędkościami.*

- 4.6. Powyższe wnioski stwarzają podstawę do rewizji dotychczas stosowanych parametrów technologicznych produkcji drutów Cu w warunkach przemysłowych. W szczególności kontroli powinien być poddany proces wyżarzania drutów w liniach ciągniczych. W przypadku przetwórstwa drutów z miedzi beztlenowej, z uwagi na wyższą temperaturę rekrytalizacji w porównaniu do tradycyjnie stosowanej miedzi w gatunku Cu-ETP należy stosować wyższy prąd w liniach obróbki cieplnej.

## **5. w zakresie przeprowadzonych badań własności elektrycznych drutów:**

- 5.1. Przewodność elektryczna miedzi jest limitowana rodzajem, stanem i jakością metalurgiczną struktury osnowy oraz rodzajem i ilością zanieczyszczeń, a ponadto warunkami obróbki cieplnej materiału.
- 5.2. Konduktywność miedzi najbardziej zmniejszają dodatki stopowe tworzące z materiałem roztwory stałe, najmniej zaś pierwiastki, które występują w postaci osobnej fazy.
- 5.3. Zmniejszenie ilości granic ziaren w materiale prowadzi do wzrostu przewodności elektrycznej.  
*W przypadku procesu ciągnięcia materiału wsadowego o strukturze odlewu obserwuje się mniejszy przyrost oporności właściwej w wyniku odkształcenia w przeciwieństwie do materiału wsadowego o drobnoziarnistej strukturze.*
- 5.4. Rezystywność drutów z miedzi beztlenowej jest funkcją prędkości odlewania. W szczególności oporność maleje wraz ze zmniejszeniem prędkości odlewania materiałów wsadowych.
- 5.5. Wykazane walory miedzi beztlenowej o strukturze odlewu polegające na jednocześnie wysokiej przewodności elektrycznej i wysokiej odporności cieplnej bez interwencji metalurgicznej pozwalają na wykorzystanie materiału w szeregu nowoczesnych aplikacji przemysłu elektronicznego i elektrotechnicznego.

## Wnioski z badań aplikacyjnych

### **1. w zakresie przeprowadzonych pomiarów parametrów transmisyjnych kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6:**

- 1.1. Wzrost szerokości pasma w sieciach teleinformatycznych prowadzi do potrzeby rozwoju nowego asortymentu kabli i przewodów o coraz większych możliwościach transmisji danych, przy jednoczesnej minimalizacji stratności przesyłu sygnału elektrycznego.
- 1.2. Rezystancja wytworzonych kabli teleinformatycznych z żyłami przewodzącymi z miedzi beztlenowej zmniejsza się w stosunku do przewodów, których tory transmisyjne bazują na drutach z miedzi w gatunku Cu-ETP, przy czym wniosek dotyczy wszystkich czterech par przewodu, z których każda charakteryzuje się inną długością skoku skrętu.
- 1.3. Dla każdego z torów transmisyjnych kabli z przewodnikami z miedzi w gatunku Cu-OFE odnotowano niższy poziom zniekształceń tłumieniowych i odbiciowych w stosunku do konstrukcji z miedzi konwencjonalnej, przy czym wartości impedancji falowej, tłumienności

odbiciowej i tłumienności falowej są funkcją prędkości odlewania materiałów wsadowych – prętów z linii Upcast.

- 1.4. Szybkość propagacji sygnału dla kabli z żyłami przewodzącymi z miedzi beztlenowej kształtuje się na wyższym poziomie w stosunku do skrętki z miedzi tlenowej, przy czym wielkość ta zależy od zastosowanego dla danego toru transmisyjnego skoku skrętu.
- 1.5. Kanały UTP z żyłami z miedzi w gatunku Cu-OFE wykazują lepsze ogólne działanie transmisyjne. Niższy względem żył z miedzi elektrolitycznej poziom strat sygnału i tłumienie przesłuchów obcych pozwala na uzyskanie wyższego stosunku sygnał / szum.
- 1.6. Choć asortyment wyrobów teleinformatycznych obejmuje szereg różnorodnych kabli, to wymagania stawiane przewodom w zakresie ich własności elektrycznych wykluczają stosowanie większości dodatków stopowych i wymagają znakomitej podatności do wyżarzania materiału

## Rozdział 13

### Literatura

- [1] ASTM B249/B249 M – 11, *Standard specification for general requirements for wrought copper and copper alloy rod, bar, shapes and forgings*, 2011
- [2] PN-EN 13601, *Miedź i stopy miedzi -- Pręty i druty miedziane do ogólnych celów elektrycznych*, 2004
- [3] PN-EN 1976, *Miedź i stopy miedzi -- Wyroby odlewane z miedzi nie przerobione plastycznie*, 2001
- [4] Davis J. R., *Copper and copper alloys*, ASM Specialty Handbook, 2001
- [5] BS EN 1978, *Copper and copper alloys. Copper cathodes*, 1998
- [6] PN-EN 1978, *Miedź i stopy miedzi -- Katody miedziane*, 2000
- [7] Knych T., Smyrak B., Walkowicz M., *Charakterystyka własności drutów miedzianych w gatunku ETP otrzymywanych z katod o różnym poziomie zanieczyszczeń*, Rudy i Metale Nieżelazne, R. 55, nr 1, s. 9 – 15, 2011
- [8] PN-EN 1977, *Miedź i stopy miedzi -- Produkt do ciągnięcia z miedzi (walcówka)*, 2000
- [9] ASTM B49-98, *Standard specification for copper rod drawing stock for electrical purposes*, 2004
- [10] PN-ISO 1811-2, *Miedź i stopy miedzi -- Pobieranie i przygotowanie próbek do analizy chemicznej – Część 2: Pobieranie próbek wyrobów przerobionych plastycznie i odlewów*, 2001
- [11] PN-EN ISO 6892-1, *Metale -- Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej*, 2010
- [12] PN-EN ISO 6506-1, *Metale -- Pomiar twardości sposobem Brinella – Część 1: Metoda badań*, 2008
- [13] PN-EN ISO 6507-1, *Metale -- Pomiar twardości sposobem Vickersa – Część 1: Metoda badań*, 2007
- [14] PN-EN ISO 2626, *Miedź -- Badanie odporności na kruchość wodorową*, 1997
- [15] PN-ISO 4746, *Miedź i stopy miedzi -- Miedź beztlenowa -- Próba przylegania zgorzeliny*, 1998
- [16] PN-EN 13604, *Miedź i stopy miedzi -- Wyroby z miedzi o wysokiej przewodności do lamp elektronowych, urządzeń półprzewodnikowych i zastosowań próżniowych*, 2005
- [17] Knych T., Mamala A., Smyrak B., *Charakteryzacja miedzi beztlenowej z linii Upcast*, Rudy i Metale Nieżelazne, R 52, nr 11, s. 798 – 806, 2007
- [18] Knych T., Smyrak B., Walkowicz M., *Selected aspects of evolution properties of oxygen free copper for high-advanced electrotechnical applications*, Przegląd elektrotechniczny, R. 87, nr 9a, s. 285 – 290, 2011
- [19] JIS H 2123, *Copper billets and cakes*, 1999
- [20] JIS H 3510, *Oxygen free copper sheets, plates, strips, seamless pipes and tubes, rods, bars and wires for electron devices*, 2006
- [21] JIS H 3140, *Copper bus bars*, 2006
- [22] JIS H 3250, *Copper and copper alloy rods and bars*, 2010
- [23] JIS H 3300, *Copper and copper alloy seamless pipes and tubes*, 2009
- [24] ASTM B170, *Standard specification for oxygen-free electrolytic copper – refinery shapes*, 1999
- [25] ASTM F68, *Standard specification for oxygen-free copper in wrought forms for electron devices*, 2010
- [26] ASTM B75, *Standard specification for seamless copper tube*, 2010
- [27] ASTM B152, *Standard specification for copper sheet, strip, plate, and rolled bar*, 2009
- [28] ASTM B248, *Standard specification for general requirements for wrought copper and copper-alloy plate, sheet, strip, and rolled bar*, 2007
- [29] BS 6017, *Specification for copper refinery shapes*, 1981
- [30] BS 2870, *Specification for rolled copper and copper alloys: sheet, strip and foil*, 1980
- [31] BS 2871, *Specification for copper and copper alloys. Tubes. Tubes for heat exchangers*, 1972
- [32] BS 2872, *Specification for copper and copper alloy forging stock and forgings*, 1989

- [33] BS 2873, *Specification for copper and copper alloys. Wire*, 1969
- [34] BS 2874, *Specification for copper and copper alloy rods and sections (other than forging stock)*, 1986
- [35] BS 2875, *Specification for copper and copper alloys. Plate*, 1969
- [36] DIN 1787, *Copper bars (rods)*, 2000
- [37] DIN 40500-5, *Copper for electrical purposes, tinned wire, technical delivery conditions*, 1983
- [38] Knych T., Mamala A., Smyrak B., Walkowicz M., *Wybrane aspekty badań miedzi beztlenowej z technologii Upcast*, Materiały konferencyjne VI Seminarium Naukowego Plastmet: Zintegrowane studia podstaw deformacji plastycznej metali, Łańcut, 25 – 28.11.2008
- [39] Knych T., Mamala A., Smyrak B., Walkowicz M., *Research of oxygen free of Upcast technology for electric and electronic uses*, Copper, vol. 1: downstream fabrication, application and new products sustainable development, health, safety and environmental control, Hamburg, s. 119 – 136, 6 – 10.06.2010
- [40] Knych T., Smyrak B., Walkowicz M.: *Badania nad miedzią beztlenową w gatunku OFE dla wysokozaawansowanej elektroniki i elektrotechniki*, Materiały konferencyjne V Kopernikańskiego Seminarium Doktoranckiego, Toruń, s. 109, 16 – 18.06.2011
- [41] Knych T., Smyrak B., Walkowicz M., *Charakterystyka cech materiałowych i technologicznych miedzi beztlenowej dedykowanej do aplikacji kablowych*, Rudy i Metale Nieżelazne, R. 57, nr 4, s. 250 – 257, 2012
- [42] Knych T., Smyrak B., Walkowicz M., *Miedź beztlenowa dla wysokozaawansowanych aplikacji w elektronice i elektrotechnice*, Materiały konferencyjne I Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Nowoczesne technologie w służbie społeczeństwu XXI w., Kraków, s. 27, 4 – 5.02.2011
- [43] Knych T., Smyrak B., Walkowicz M., *Badania wpływu zawartości tlenu w miedzi na kruchość wodorową kabli ognioodpornych*, Monografia XXXVII Szkoły Inżynierii Materiałowej, Kraków – Krynica, s. 110 – 115, 29.09 – 02.10.2009
- [44] Knych T., Smyrak B., Mamala A., Walkowicz M.: *Wpływ zawartości fosforu na kształtowanie się przewodności elektrycznej i odporności na kruchość wodorową miedzi w gat. PHC*, Materiały konferencyjne VII Seminarium Naukowego Plastmet: Zintegrowane studia podstaw deformacji plastycznej metali, Łańcut 30.11 – 3.12.2010
- [45] Knych T., Smyrak B., Walkowicz M.: *Problematyka kruchości wodorowej miedzi stosowanej na żyły przewodzące w kablach ognioodpornych*, Przegląd elektrotechniczny, R. 87, nr 6, s. 218 – 222, 2011
- [46] Knych T., Smyrak B., Walkowicz M.: *Wybrane zagadnienia z obszaru projektowania i eksploatacji kabli teleinformatycznych. Charakterystyka rodzajów i kategoryzacja typów konstrukcji kabli symetrycznych – część 1 z 2*, Elektro-Info, nr 5, s. 42 – 44, 2012
- [47] Knych T., Smyrak B., Walkowicz M.: *Wybrane zagadnienia z obszaru projektowania i eksploatacji kabli teleinformatycznych. Parametryzacja własności transmisyjnych konstrukcji kablowych – część 2 z 2*, Elektro-Info – przyjęte do druku, nr 6, 2012
- [48] Armstrong W., *The ISA PROCESS and its contribution to electrolytic copper*, Rautomead Conference, Scotland, UK, August 1999
- [49] Okane J., *ISA PROCESS – Benchmarking copper refining electrolysis*, GDMB 33rd Metallurgical Seminar, Lunen, Germany, 1997
- [50] Cuypers P. F., *Continuous casting in the copper industry*, Report EUT/BDK/29, Eindhoven, 1987
- [51] Patent nr US4155396, Dampas J. M. A., *Method and apparatus for continuously casting copper bar product*, 22.05.1979
- [52] Patent nr US2904860, Hazelett C. W., *Metal casting method and apparatus*, 22.08.1959
- [53] Patent nr US4733717, Chia E.H., Olgetree R. H., Powers F. M., *Method and apparatus for casting and hot forming copper metal and the copper product formed thereby*, 29.03.1988
- [54] Patent nr US3008201, Carreker R. P., *Apparatus for the continuous formation of intermediates*, 24.08.1955
- [55] Patent nr US405943722, Nesslage D. J., Sheng Yu L., Shaw M. F., *Oxygen-free copper product and process*, 22.11.1977
- [56] Patent nr US4802436, Wilson R., LaPlante J. C., *Continuous casting furnace and die system of modular design*, 7.02.1989
- [57] Patent nr US4515204, Ohno A., *Continuous metal casting*, 7.05.1985

- [58] Patent nr US4605056, Ohno A., *Process and apparatus for the horizontal continuous casting of a metal molding*, 12.08.1986
- [59] Patent nr US4665970, Ohno A., *Method of producing a metallic member having a unidirectionally solidified structure*, 19.05.1987
- [60] Patent nr US 4789022, Ohno A., *Process for continuous casting of metal ribbon*, 6.12.1988
- [61] Patent nr US 5074353, Ohno A., *Method for horizontal continuous casting of metal strip and apparatus therefor*, 24.12.1991
- [62] Kim Y. J., Kou S., *An experimental study on process variables in crystal growth by Ohno continuous casting*, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 19, nr 7, s. 1849 – 1852, 1988
- [63] Soda H., McLean A., Wang Z., *Pilot-scale casting of single-crystal copper wires by the Ohno continuous casting process*, Journal of Materials Science, vol. 30, s. 5438 – 5448, 1995
- [64] Ohno A.: *Development of advanced materials by the Ohno continuous casting process*, Journal of Japan Institute of Light Metals, vol. 39, nr 10, s. 735 – 740, 1989
- [65] Double Helix Cables, *Why OCC? And what's OCC?*, 2011
- [66] Pops H., *Nonferrous wire handbook*, vol. 3, The Wire Association International, 1995
- [67] Shoemaker T., Mack J., *The lineman's and cableman's handbook*, McGraw Hill, 2006
- [68] Blicharski M., *Wstęp do inżynierii materiałowej*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001
- [69] Ekin J. W., *Experimental techniques low-temperature measurements. Cryostat design, material properties and superconductor critical-current testing*, Oxford University Press, 2007
- [70] Cartwright G. E., Winthrope M. M., *Copper metabolism in normal subjects*, The American Journal of Clinical Nutrition, vol. 14, s. 224 – 231, 1994
- [71] Katoh M., *High purity oxygen free copper and its properties*, Nippon Mining Research & Technology Co., Ltd. IWCC Technical Seminar, Denizli, Turkey, październik 2003
- [72] Dugdie J. S., *Electrical properties of metals and alloys*, Beijing: Higher Education Press, s. 114 – 118, 1988
- [73] Tingsui G. E., *The principle of internal friction theory of solid state: the relaxation and structure of grain boundaries*, Beijing: Science Press, 2000
- [74] Fan X., Yan W., *Development and prospects of single crystal metal wire with high fidelity*, Ordnance Material Science and Engineering, vol. 23, nr 1, s. 62 – 65, 2000
- [75] Blewitt T. H., Coltman R. R., Redman J. K., *Structural defects in copper and the electrical resistivity minimum*, Physical Review, vol. 93, nr 4, s. 891, 1954
- [76] Lane C. T., Fairbank H. A., Reynolds Ch. A., *Heat flush method of He<sup>3</sup> separation*, Physical Review, vol. 76, nr 1, s. 64 – 66, 1949
- [77] Maissner W., *The value obtained depends mainly on the residual resistance*, Zeitschrift für Physik, vol. 38, nr 647, s. 647, 1926
- [78] Pawlek F., Rogalla D., *The electrical resistivity of silver, copper, aluminium and zinc as a function of purity in the range 4 – 298 K*, Cryogenics, vol. 6, nr 1, s. 14 – 20, 1966
- [79] Gregory P., Bangay A. J., Hargreaves J. E., *The electrical conductivity of copper*, Metallurgia, vol. 74, nr 71, s. 207 – 215, 1966
- [80] Andrews P., *Resistivity due to grain boundaries in pure copper*, Physics Letters, vol. 19, nr 7, s. 558 – 560, 1965
- [81] Andrews P., West M., Robeson C., *The effect of grain boundaries on the electrical resistivity of polycrystalline copper and aluminium*, The Philosophical Magazine, vo. 19, nr 161, s. 887 – 898, 1969
- [82] Wu W., Brongersma M., Maex K., *Influence of surface and grain-boundary scattering on the resistivity of copper in reduced dimensions*, Applied Physics Letters, vo. 84, s. 2838, 2004
- [83] Kimt T., Zhangt X. G., Nichilson D., Evans B., Kulkarni N., Radhakrishnant B., Kenint E., Li A., *Large discrete resistance jump at grain boundary in copper nanowire*, Nano Letters, vol. 10, nr 8, s. 3096 – 3100, 2010
- [84] Kamku A., *Study influence of OFC on transmission signal*, Radio Tech, vol. 37, nr 10, s. 182 – 187, 1983
- [85] Ohno A., *Continuous casting of single crystal ingots by the OCC process*, Journal of Japan Institute of Metals, vol. 23, nr 9, s. 733 – 776, 1984



- [86] Ohno A., *Solidification*, Berlin Heidelberg, Springer – Verlag, s. 113 – 118, 1987
- [87] Fan X., Cai Y., Wei P., *Continuous casting technology of single casting metals*, Chinese Journal of Materials Research, vol. 10, nr 3, s. 264 – 266, 1996
- [88] Miyake Y., *Manufacture and application of high purity copper in industry*, Journal of Japan Institute of Metals, vol. 31, nr 4, s. 267 – 269, 1992
- [89] Segal A., *Copper in communication*, Metals and Materials, vol. 6, nr 7, s. 428 – 432, 1990
- [90] Yan W., Chen J., Fan X., *Effects of grain boundaries on electrical property of copper wires*, The Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 13, nr 5, s. 1075 – 1079, 2003
- [91] Fan X., Li J., Fu H., *Electrical property of CCSC aluminium wire*, The China Journal of Nonferrous Metals, vol. 9, nr 3, s. 87 – 90, 1999
- [92] Szablewski J., Kuźnicka B., *Electrical properties of rapidly solidified Cu-Cr alloys*, Materials Science and Technology, vol. 25, nr 7, s. 407 – 410, 1991
- [93] Zgłoszenie patentowe nr PL 393457 A1, Kwaśniewski P., Knych T., Mamala A., Kiesiewicz G., Walkowicz M., Smyrak B., Kawecki A., Uliasz P., Piwowarska M., *Sposób ciągłego odlewania materiałów krystalicznych i urządzenie do poziomego, ciągłego odlewania materiałów*, 2011
- [94] Zgłoszenie patentowe nr PL 393656 A1, Knych T., Smyrak B., Walkowicz M., *Sposób i układ do wytwarzania drutów z miedzi beztlenowej*, 2011
- [95] Fujiwara S., Nishino I., Kuramochi S., Oaky M., Nagata C., *Properties and applications of high-purity copper*, First International Conference on Processing Materials for Properties, The Minerals, Metals & Materials Society, November 7-10, s. 909 – 912, 1993
- [96] Guixa Arderiu O., Properzi G., *Continuous copper rod production from 100 percent scrap*, Wire Journal International, vol. 29, nr 3, s. 60 – 67, 1996
- [97] Norasethasopon S., Yoshida K., *Prediction of chevron crack initiation in inclusion copper shaped – wire drawing*, Engineering Failure Analysis, vol. 15, issue 4, 378 – 393, 2008
- [98] Yoshida K., Norasethasopon S., Shinohara T., Ido R., *Influence of flaws of wire rod surface, inclusions and voids on wire breaks in superfine wire drawing*, JSME International Journal – Series A: Solid Mechanics and Material Engineering, vol. 46, nr 3, s. 365 – 370, 2003
- [99] Oyane M., Sato T., Okimoto K., Shima S., *Criteria for ductile fracture and their application*, Journal of Mechanical Working Technology, vol. 4, issue 1, s. 65 – 81, 1980
- [100] Ko D., Kim B., *The prediction of central burst defects in extrusion and wire drawing*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 102, issues 1 – 3, s. 19 – 24, 2000
- [101] Yoshida K., Shinohara T., Yamashita T., Tanaka A., *Analysis of surface flaws on drawn wire and wire breaks*, Wire Journal International, vol. 43, nr 3, s. 152 – 159, 2010
- [102] Chia E. H., Patel G. R., *Characterization of rod and wire defects produced during the manufacturing of copper*, Wire Journal International, vol. 29, nr 3, s. 50 – 59, 1996
- [103] Tanabe N., Kurosaka A., Suzuki K., Kohno O., *Fatigue of high purity copper wire*, Journal de Physique IV, Colloque C7, supplément Journal de Physique III, vol. 5, nr C7, s. 389 – 396, 1995
- [104] Fujiwara S., Abiko K., *Ductility of ultra high purity copper*, Journal de Physique IV, Colloque C7, supplément Journal de Physique III, vol. 5, s. 295 – 300, 1995
- [105] Pinsker Z. G., Imamov R. M., *Production and investigation of thin films of Cu<sub>2</sub>O*, Soviet Physics - Crystallography, vol. 9, s. 334 – 335, 1964
- [106] Kalliomäki M., Meisalo V., Laisaar A., *High pressure transformations in cuprous oxide*, Physica Status Solidi A, vol. 56, issue 2, s. K127 – K131, 1979
- [107] Domnina M. I., Filatov S. K., Zyuzukina I. I., Vergasowa L. P., *Thermal deformation of copper oxide, CuO*, Inorganic Materials, vol. 22, s. 1992 – 1996, 1986
- [108] Nieh T. G., Nix W. D., *Embrittlement of copper due to segregation of oxygen to grain boundaries*, Metallurgical Transactions A, vol. 12A, s. 893 – 901, 1981
- [109] ASTM, *The Annealability Testing of Copper*, Journal of Testing and Evaluation, vol.1, issue 1, 1973
- [110] *Metoda sprawdzania podatności Cu na wyżarzanie*, VII Konferencja Użytkowników Linii Contirod, Paryż, 1991
- [111] Metallurgie Hoboken Overpelt – Olen, Belgia, *Considerations about the use of the spiral elongation test method*, Osaka, Japonia, materiały konferencyjne, s. 13 – 15, 1985
- [112] Armstrong Smith G., *The spiral – elongation test for copper annealability: an examination of same controlling factors*, Journal of the Institute of Metals, vol. 99, s. 325 – 334, 1971

- [113] Svenska Metallverken, SM – Standard, *Spring elongation test*, 223401 E
- [114] Armstrong Smith G., *Some observations on the electrical conductivity of commercial electro-refined copper*, Journal of the Institute of Metals, vol. 100, s. 125, 1978
- [115] Schmidt J., Jacobsen J., *Recrystallization of copper wire rod*, Proceedings of the Sixth International Copper-Cobre Conference, Toronto, 25 – 30 sierpnia, s. 203 – 213, 2007
- [116] Materiały informacyjne firmy JX Nippon Mining & Metals Tokio, Japonia
- [117] Materiały informacyjne firmy Aurubis AG Hamburg, Niemcy
- [118] Lucci A., Tamanini M., Battezzati L., Venturello G., *Etude calorimetrique et cinetique de la recristallisation du cuivre par analyse calorimetrique differentielle (DSC)*, Journal of Thermal Analysis, vol. 14, s. 93 – 97, 1978
- [119] Benchbane G., Boumerzoug Z., Gloriant T., Thibon I., *Microstructural characterization and recrystallization kinetics of cold rolled copper*, Physica B: Condensed Matter, vol. 406, issue 10, s. 1973 – 1976, 2011
- [120] Schamp J., Verlinden B., Van Humbeeck J., *Primary recrystallization and grain growth of tough pitch copper wire*, Journal de Physique IV, Colloque C3, supplément Journal de Physique III, vol. 5, nr C3, s. 273 – 278, 1995
- [121] PN-EN 12893, *Miedź i stopy miedzi -- Wyznaczanie wskaźnika wydłużenia sprężyny*, 2002
- [122] PrEN 1977 (E), *Copper and copper alloys. Copper drawing stock (wire rod)*, 2011
- [123] BS-EN 1977, *Copper and copper alloys. Copper drawing stock (wire rod)*, 1998
- [124] Smart J. S., Smith A. A., Phillips A. J., *Preparation and some properties of high-purity copper*, Transactions of The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 143, s. 272 – 286, 1941
- [125] Smart J. S., Smith A. A., *Effect of iron, cobalt and nickel on some properties of high-purity copper*, Transactions of The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 147, s. 48 – 56, 1942
- [126] Smart J. S., Smith A. A., *Effect of certain fifth-period elements on some properties of high-purity copper*, Transactions of The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 152, s. 103 – 117, 1943
- [127] Smart J. S., *Copper: the metal, its alloys and compounds*, Reinhold, New York, s. 360, 410, 1954
- [128] Coutsouradis D., Diderrich E., Smets J., Crocq G., Pauwels L., *Effects of trace amounts of impurities on the recrystallization behavior of high-purity tough-pitch copper*, Centre National de Recherches Metallurgiques, vol. 39, s. 73, 1974
- [129] Bigelow L. K., Chen J. H., *Effects of impurities on the annealability and resistivity of oxygen-bearing copper*, Metallurgical Transactions B, vol. 78, s. 661 – 669, 1976
- [130] Hsu Y. T., O'Reilly B., *Impurity effects in high-conductivity copper*, Journal of Metals, Materials & Minerals, vol. 29, nr 12, s. 4 – 21, 1977
- [131] Pitt C. H., Tayler P. L., Van Wagoner L., *The effect of small amounts of Ag, Se and Sn on the recrystallization of copper*, Metallurgical Transactions A, vol. 10A, s. 809 – 817, 1979
- [132] Hori S., Tai H., Katayama H., *Recrystallization temperatures of dilute copper alloys*, Journal of the Japan Institute of Metals, vol. 45, nr 12, s. 1223 – 1228, 1981
- [133] Aoyama S., Onuki M., Miyake Y., *Effects of lead on annealing properties of cold-drawn copper wire*, Journal of Materials Science, vol. 26, s. 3775 – 3779, 1991
- [134] Aoyama S., Kanno M., *Effects of small additions of lead, sulphur and oxygen on annealing characteristics of cold-drawn pure copper*, Journal of Materials Science, vol. 31, s. 2393 – 2399, 1996
- [135] Knych T., Kwapisiński P., *Wpływ zanieczyszczeń składu chemicznego na temperaturę rekrytalizacji miedzi (analiza literaturowa)*, Rudy i Metale Nieżelazne, R. 43, nr 1, s. 16 – 21, 1998
- [136] Pops H., *The metallurgy of copper wire*, Essex Group Inc., The Copper Development Association, grudzień 1997
- [137] Feyaerts K., Huybrechts P., Schamp J., Van Humbeeck J., Verlinden B., *The effects of impurities on the recrystallization behavior of tough pitch hot roller copper rod*, Wire Journal International, vol. 29, nr 11, s. 68 – 76, 1996

- [138] Kanno M., *Effect of trace impurities and small amount of additional elements on some properties of copper and copper alloys*, International Wrought Copper Council Technical Seminar, Tokio, 13 – 18.11.2005
- [139] Berin I. S., Chernyshova Y. P., Presnyakov A. A., *Effect of oxygen on the mechanical properties of deformed copper*, Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov, nr 6, s. 37 – 39, 1978
- [140] Prasad Y. V. R. K., Rao K. P., *Influence of oxygen on the processing maps for hot working of electrolytic tough pitch copper*, Materials Letters, vol. 60, s. 2786 – 2790, 2006
- [141] Kok S., Beaudoin A. J., Tortorelli D. A., *On the development of stage IV hardening using a model based on the mechanical threshold*, Acta Materialia, vol. 50, s. 1653 – 1667, 2002
- [142] Jakani S., *Effet des impuretés sur les mécanismes de recristallisation du cuivre tréfilé*, Praca doktorska, Université de Paris XI, Orsay, Francja, 2004
- [143] Martinez M., Fernandez A. I., Segarra M., Xuriguera H., Espiell F., Ferrer N., *Comparative study of electrical and mechanical properties of fire-refined and electrolytically refined cold-drawn copper wires*, Journal of Materials Science, vol. 42, s. 7745 – 7749, 2007
- [144] Owen E. A., Rogers J., *X-ray study of copper-silver alloys*, Journal Institute of Metals, vol. 57, nr 2, s. 257 – 266, 1935
- [145] Köster W., Zwicker U., Moeller K., *Mikroskopische und röntgenographische Untersuchungen zur Kenntnis des Systems Kupfer-Nickel-Aluminium*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 39, s. 225 – 231, 1948
- [146] Raynor G. V., Greenfield P., *Constitution of the copper-rich, copper-aluminium-germanium alloys*, Journal Institute of Metals, vol. 82, s. 59 – 64, 1953/1954
- [147] Owen E. A., Rowlands V. W., *Solubility of certain elements in copper and silver*, Journal Institute of Metals, vol. 66, s. 361 – 378, 1940
- [148] Owen E. A., Morris D. P., *The applications of X-ray methods to the determination of phase boundaries in metallurgical equilibrium diagrams*, Journal Institute of Metals, vol. 76, s. 145 – 168, 1949/50
- [149] Johansson C. H., Linde J. O., *Gitterstruktur und elektrisches Leitvermögen der Mischkristallreihen Au-Cu, Pd-Cu und Pt-Cu*, Annalen der Physik, vol. 387, issue 4, s. 449 – 478, 1927
- [150] Lih F., Fleischl O., *The B-Cu system*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 8, s. 11 – 19, 1954
- [151] Gruhl W., Wassermann G., *On precipitation process in Cu-Be alloys*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 5, s. 93 – 98, 1951
- [152] Raub E., Engel A., *Über rückläufige Sättigungskurven bei der Ausscheidung von Mischkristallen aus der Schmelze*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 37, s. 76 – 81, 1946
- [153] Voce E., Hallows A. P. C., *The mechanism of the embrittlement of deoxidized copper by bismuth*, Journal Institute of Metals, vol. 73, s. 323 – 376, 1947
- [154] Bever M. B., Floe C. F., *Solubility of carbon in molten copper*, Transactions of The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 156, s. 149, 1944
- [155] Bulletin Alloy Phase Diagrams, *Melting points of elements*, vol. 2, nr 1, s. 145 – 146, 1981
- [156] Raub E., *The solubility of cadmium in solid copper*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 2, s. 119 – 120, 1947
- [157] Sahmen R., *On copper-cadmium alloys*, Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie, vol. 49, s. 301 – 310, 1906
- [158] Hashimoto U., *The equilibrium diagram of the Co-Cu system*, Nippon Kinzoku Gakkaishi, vol. 1, nr 1, s. 19 – 26, 1937
- [159] Raub E., Engel M., *Alloys of zirconium with copper, silver and gold*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 39, s. 172 – 177, 1948
- [160] Hibbard W. R., Rosi F. D., Clark H. T., O'Herron R. I., *The constitution and properties of Cu-Rich, Cu-Cr and Cu-Ni-Cr alloys*, Transactions of The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 175, s. 283 – 294, 1948
- [161] Bunge G., Honak E. R., Nielsch W., *Properties of technically useful Cu-Cr alloys*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 44, s. 71 – 76, 1953
- [162] Doi T., *Studies on Cu alloys containing Cr. On the Cu side phase diagram*, The Japan Institute of Metals, vol. 21, nr 5, s. 337 – 340, 1957

- [163] Reekie J., Hutchison T. S., Hetherington F. E., *Precipitation processes in copper-iron alloys*, Proceedings of the Physical Society. Section B, vol. 66, nr 12, s. 1101, 1953
- [164] Knappwost A., *Solution dilute iron-copper*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 45, s. 137 – 142, 1954
- [165] Nielsen, F. H., *Sulfur amino acid nutriture affects the signs of copper deficiency in the rat*, Journal of Trace Elements in Experimental Medicine, vol. 1, s. 157 – 166, 1988
- [166] Hume-Rothery W., Raynor G.V., Packer H. K., *The constitution and structure of alloys of intermediate composition and structure of alloys of intermediate composition in the systems copper-indium, copper-aluminium, copper-germanium, silver-aluminium and silver-germanium*, Journal Institute of Metals, vol. 66, s. 209 – 239, 1940
- [167] Hume-Rothery W., Reynolds P. W., Raynor G.V., *Factors affecting the formation of 3/2 electron compounds in alloys of copper silver and gold*, Journal Institute of Metals, vol. 66, s. 191 – 207, 1940
- [168] Schubert K., Brandauer G., *Zum Aufbau des Systems Kupfer-Germanium*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 43, nr 7, s. 262 – 268, 1952
- [169] Chang E. A., Neumann J. P., Mikula D., Goldberg D., *The copper-germanium system*, Bulletin of Alloy Phase Diagrams, vol. 1, issue 1, s. 64, 1980
- [170] Röntgen P., Möller F., *Copper-hydrogen*, Metallwirtschaft, vol. 13, s. 81 – 97, 1934
- [171] Welbke F., Eggers H., *The phase diagram of the system copper-indium*, Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie, vol. 220, s. 278 – 282, 1934
- [172] Welbke F., *On the alloys of gallium and indium*, Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie, vol. 31, s. 228 – 230, 1939
- [173] Jones R. O., Owen E. A., *X-ray determination of the alpha-phase boundary of the copper-indium alloy system*, Journal Institute of Metals, vol. 82, s. 445 – 448, 1953/54
- [174] Jones W.R.D., *The copper-magnesium alloys. Part IV – the equilibrium diagram*, Journal Institute of Metals, vol. 46, s. 395 – 419, 1931
- [175] Kawasaki M., Yamaji K., Izumi O., *Cu-Mn system*, Science Reports of the Research Institutes, Tohoku University, vol. 7, s. 443, 1955
- [176] Sargent C. I., *The production of alloys of tungsten and of molybdenum in the electric furnace*, Journal of the American Chemical Society, vol. 22, nr 12, s. 783 – 791, 1900
- [177] Lehmer C., *Electrical melting of sulfidized ores and smelting products directly into metals*, Metallurgie, vol. 3, s. 596 – 602, 1906
- [178] Siedschlag E., *Chromium-molybdenum and chromium-molybdenum-copper alloys*, Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie, vol. 131, s. 191 – 202, 1923
- [179] Dreiholz L., *Investigations of binary and ternary molybdenum alloys*, Zeitschrift für Physikalische Chemie, vol. 108, s. 1 – 50, 1924
- [180] Phillips A., Skinner E. N., *The solubility of oxygen in high purity copper*, Transactions of The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 143, s. 301 – 308, 1941
- [181] Linde J. O., *Electrical properties of dilute alloys*, Annals of Physics, vol. 15, nr 226, s. 219 – 248, 1932
- [182] Veroe J., *About the phase diagram of the Cu-Sn-P-alloys*, Zeitschrift für anorganische und allgemeine chemie, vol. 213, s. 257 – 272, 1933
- [183] Chakrabarti D. J., Laughlin D. E., *The Cu-Pb (copper-lead) system*, Bulletin of Alloy Phase Diagrams, vol. 5, nr 5, s. 503 – 510, 1984
- [184] Gebhardt E., Obrowski W., *Reaktionen von festem Eisen mit Schmelzen aus Aluminium und Aluminiumlegierungen*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 44, nr 4, s. 154 – 160, 1953
- [185] Jones F.W., Sykes C., *The transformations in the copper-palladium alloys*, Journal Institute of Metals, vol. 65, s. 419 – 433, 1939
- [186] Schneider A., Esch U., *Das System Kupfer-Platin*, Zeitschrift für elektrochemie und angewandte physikalische chemie, vol. 50, s. 290 – 301, 1944
- [187] Mertz J. C., Mathewson C. H., *The solid. Solubilities of the elements of the periodic sub-group Vb in copper*, Transactions of The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 124, s. 59 – 77, 1937
- [188] Schubert K., Ilschner M., *Untersuchungen im System Kupfer-Antimon*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 45, nr 6, s. 366 – 370, 1954

- [189] Andersen A. G. H., Kingsbury A. W., *Phase diagram of the copper-iron-silicon system from 90 to 100 per cent Copper*, Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, vol. 152, s. 38 – 47, 1943
- [190] Hofmann W., Ziegler J., Hanemann H., *Transformations in the system copper-silicon*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 42, s. 55 – 57, 1951
- [191] Kattner U., *Cu-Sn system*, Metallurgy Division of the Materials Science and Engineering Laboratory at the National Institute of Standards and Technology, 2003
- [192] Anderko K., Schubert K., *Untersuchungen im System Kupfer-Tellur*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 45, s. 371 – 378, 1954
- [193] Raub E., Engel M., *Alloys of thorium, thalium, silver and zinc*, Zeitschrift für elektrochemie und angewandte physikalische chemie, vol. 49, s. 487 – 493, 1943
- [194] Joukainen A., Grant N. J., Floe C. F., *Titanium – copper binary phase diagram*, Transactions of The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 194, s. 766 – 770, 1952
- [195] Raub E., Walter P., Engel M., *Alloys of titanium with copper, silver and gold*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 43, s. 112 – 118, 1952
- [196] Tsai A. P., Inoue A., Masumoto T., *Ductile Al-Cu-V amorphous alloys without metalloid*, Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 19, nr 2, s. 391 – 393, 1988
- [197] Guillet L., *Study of metallurgical alloys in industry*, Metallurgical Review, vol. 3, nr 1, s. 149 – 179, 1906
- [198] Rumschottel O., *The solubility of tungsten in copper*, Metal una Erz, vol. 12, s. 45 – 50, 1915
- [199] Schroter K., *Frontiers of metallurgy*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 23, s. 197 – 201, 1931
- [200] Haase C., Pawlek F., *Cu – Zn systems*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 28, s. 73 – 80, 1936
- [201] Pogodin S. A., Shumova I. S., Kugucheva F. A., *Constitution and properties of copper-zirconium alloys*, The USSR Academy of Sciences, vol. 27, s. 670 – 672, 1940
- [202] Arias D., Abriata J. P., *Cu-Zr (copper – zirconium)*, Bulletin of Alloy Phase Diagrams, vol. 11, nr 5, s. 452, 1990
- [203] Lundin C. E., McPherson D. J., Hansen M., *System zirconium – copper*, Transactions of The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 197, s. 273 – 278, 1953
- [204] Humphreys F. J., Hatherly M., *Recrystallization and related annealing phenomena*, wydanie drugie, Elsevier, 2004
- [205] Addicks L., Amboy P., *The effect of impurities on the electrical conductivity of copper*, Transactions of The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 36, s. 18 – 27, 1906
- [206] Pawlek F., Reichel K., *Der Einfluss von Beimengungen auf die elektrisches Leitfähigkeit von Kupfer*, Zeitschrift für Metallkunde, część 1 z 2, vol. 47, s. 347 – 356, 1956
- [207] Antiselle F. L., Amboy P., *Relationship of physical and chemical properties of copper*, Transactions of The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 64, s. 432 – 438, 1921
- [208] Hanson D., Marryat C. B., *Investigation of the effects of impurities on copper. Part III – the effect of arsenic on copper. Part IV – the effect of arsenic plus oxygen in copper*, Journal Institute of Metals, vol. 37, s. 121 – 168, 1927
- [209] Butts A., *Copper*, Reinhold, New York, s. 411, 1954
- [210] Heuer R. P., *The effect of iron and oxygen on the electrical conductivity of copper*, Journal of the American Chemical Society, vol. 49, s. 2711 – 2720, 1927
- [211] Hess E. G., Pawlek F., *Contribution to the electric conductivity of pure copper and the influence of admixtures*, Zeitschrift für Metallkunde, vol. 50, nr 2, s. 57 – 70, 1959
- [212] Smart J. S., Smith A. A., *Effect of phosphorus, arsenic, sulphur and selenium on some properties of high-purity copper*, Transactions of The American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, vol. 166, s. 144, 1945
- [213] Pawlek F., Viessmann K., Wendt H., *Der Einfluss von Beimengungen auf die elektrisches Leitfähigkeit von Kupfer*, Zeitschrift für Metallkunde, część 2 z 2, vol. 47, nr 6, s. 357 – 363, 1956
- [214] PN-E-01002, *Słownik terminologiczny elektryki. Kable i przewody*, 1997
- [215] PN-EN 50288-3-1, *Przewody wielożyłowe stosowane w cyfrowej i analogowej technice przesyłu danych – Część 3-1: Wymagania grupowe dotyczące przewodów nieekranowanych do*

- częstotliwości 100 MHz – Przewody przeznaczone do pionowego i poziomego układania w budynkach, 2003
- [216] PN-EN 50288-6-1, *Przewody wielożyłowe stosowane w cyfrowej i analogowej technice przesyłu danych – Część 6-1: Wymagania grupowe dotyczące przewodów nieekranowanych do częstotliwości 250 MHz – Przewody przeznaczone do pionowego i poziomego układania w budynkach*, 2003
- [217] PN-EN 50288-4-1, *Przewody wielożyłowe stosowane w cyfrowej i analogowej technice przesyłu danych – Część 4-1: Wymagania grupowe dotyczące przewodów nieekranowanych do częstotliwości 600 MHz – Przewody przeznaczone do pionowego i poziomego układania w budynkach*, 2003
- [218] ISO/IEC 10801, *Information technology – generic cabling for customer premises*, 2002
- [219] Aesa Cortaillod, *Instrukcja obsługi zestawu pomiarowego AESA-9500/9600*, Colombier, Szwajcaria, 2010
- [220] PN-EN 50289-1-2, *Kable telekomunikacyjne -- Metody badań -- Część 1-2: Metody badań właściwości elektrycznych -- Rezystancja przy prądzie stałym*, 2007
- [221] PN-EN 50289-1-5, *Kable telekomunikacyjne -- Metody badań -- Część 1-5: Metody badań właściwości elektrycznych – Pojemność*, 2008
- [222] Gajewski A., *Elektryczność statyczna – poznanie, pomiar, zapobieganie, eliminowanie*, Instytut Wydawniczy Związków Zawodowych, Warszawa, 1987
- [223] Mościska-Grzesiak H., *Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce*, Tom 1, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1996
- [224] Rakowska A., *Właściwości eksploatacyjne usieciowanego polietylenu izolacyjnego stosowanego w wysokonapięciowych kablach elektroenergetycznych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, seria rozprawy, nr 341, 1998
- [225] PN-EN 50289-1-11, *Kable telekomunikacyjne -- Metody badania -- Część 1-11: Metody badania właściwości elektrycznych -- Impedancja falowa, impedancja wejściowa, tłumienność odbiciowa*, 2002
- [226] PN-EN 50289-1-8, *Kable telekomunikacyjne -- Metody badań -- Część 1-8: Metody badania właściwości elektrycznych -- Tłumienność*, 2010
- [227] PN-EN 50289-1-7, *Kable telekomunikacyjne -- Metody badań -- Część 1-7: Metody badań właściwości elektrycznych -- Prędkość propagacji*, 2009
- [228] PN-EN 50289-1-10, *Kable telekomunikacyjne -- Metody badania -- Część 1-10: Metody badania właściwości elektrycznych -- Przenik*, 2002
- [229] Breyer R., Riley S., *Switched, Fast i Gigabit Ethernet. Zrozumieć, tworzyć i zarządzać sieciami Ethernet o dużej wydajności*, Wydawnictwo Helion, Gliwice, 2000
- [230] Materiały informacyjne firmy Technokabel S.A. Warszawa

## Aneks

### Tabele wyników badań i obliczeń

Tabela A.I. Zestawienie tabel z rozdziału 9

Rozdział 9. Wyniki badań doświadczalnych i ich analiza		
Numer tabeli	Nazwa tabeli	Numer strony
9.1. Identyfikacja własności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych		
Tabela A9.1.1.	Wyniki badań wpływu parametrów obróbki cieplnej na własności mechaniczne walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE	346
9.2. Badania nad procesem ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na druty i mikrodruty wykorzystywane aplikacjach elektrycznych		
Tabela A9.2.1.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) i z linii Rautomead (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.)	346
Tabela A9.2.2.	Wyniki badań procentowej zmiany wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod i Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) i Rautomead (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.)	347
Tabela A9.2.3.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH po procesie ciągłego odlewania z prędkościami od 0,006 m/min. do 0,06 m/min. przy wydatku wody w układzie chłodzenia pierwotnego 0,1 – 0,3 l/min. i wtórnego 0,2 – 0,6 l/min.	347
Tabela A9.2.4.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 0,15 m/min. i 0,2 /min. przy wydatku wody w układzie chłodzenia pierwotnego 0,4 – 0,5 l/min. i wtórnego 0,8 – 1,0 l/min.	348
Tabela A9.2.5.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 0,5 m/min. i 1,0 m/min. przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.	349
Tabela A9.2.6.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 2,0 m/min. i 3,0 m/min. przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.	349
Tabela A9.2.7.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 1,0 m/min. i 2,0 m/min. przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 40 l/min.	350
Tabela A9.2.8.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 3,0 m/min. i 4,0 m/min. przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 40 l/min.	350
Tabela A9.2.9.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 1,0 m/min. i 2,0 m/min. przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 50 l/min	351
Tabela A9.2.10.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 3,0 m/min. i 4,0 m/min. przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 50 l/min.	351
Tabela A9.2.11.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod poddanego zabiegowi obróbki cieplnej w temperaturach 100 °C, 400 °C i 900 °C w czasie 1 h	352
Tabela A9.2.12.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast poddanego zabiegowi obróbki cieplnej	353

	w temperaturach 100 °C, 400 °C i 900 °C w czasie 1 h	
Tabela A9.2.13.	Schemat odkształcenia w procesie ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE na druty stosowane do wytwarzania żył klasy 5 w Zakładzie Produkcji Przewodów Elektrycznych Eltrim	353
Tabela A9.2.14.	Schemat odkształcenia w procesie ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na druty stosowane do wytwarzania kabli ognioodpornych w zakładzie kablowym Tele-Fonika Kable	354
Tabela A9.2.15.	Schemat odkształcenia w procesie ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE na druty i mikrodruty w zakładzie przetwórczym Mennica Metale Szlachetne	354
<b>9.3. Badania odporności cieplnej drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP</b>		
Tabela A9.3.1.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicy 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod i pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h	355
Tabela A9.3.2	Wyniki badań wygrzewania w czasie 1 h drutów o średnicy 2,5 mm otrzymanych z materiałów wsadowych oznaczonych od 1 do 5 tj. katod i walcówek o sumarycznej zawartości pierwiastków zanieczyszczeń na poziomie 77 – 272 ppm wag.	355
Tabela A9.3.3	Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 7,0 – 0,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h	356
Tabela A9.3.4.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 7,0 – 0,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h	356
Tabela A9.3.5.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 7,0 – 0,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Rautomead (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h	357
Tabela A9.3.6.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH (prędkość odlewania 0,006 – 0,2 m/min., wydatek wody w układzie chłodzenia pierwotnego 0,1 – 0,5 l/min. i wtórnego 0,2 – 1,0 l/min.) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h	357
Tabela A9.3.7.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 0,5 – 3,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h	358
Tabela A9.3.8.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 – 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 40 l/min.) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h	358
Tabela A9.3.9.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 – 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 50 l/min.) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h	358
Tabela A9.3.10.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP i prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (obróbka cieplna w temperaturach 100 °C, 400 °C i 900 °C w czasie 1 h) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h	359
Tabela A9.3.11.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE po zabiegach międzyoperacyjnego wygrzewania rekrytalizującego (1w, 2w, 3w) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h	359
Tabela A9.3.12.	Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 0,5 mm otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE po zabiegach międzyoperacyjnego wygrzewania rekrytalizującego (1w, 2w, 3w) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h	360
<b>9.4. Badania własności elektrycznych drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP</b>		
Tabela A9.4.1.	Wyniki badań własności elektrycznych (rezystancja) drutów o średnicach 8,0 – 0,5 mm otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead	360
Tabela A9.4.2.	Wyniki badań własności elektrycznych (konduktancja) drutów o średnicach 8,0 – 0,5 mm otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead	361
Tabela A9.4.3.	Wyniki badań własności elektrycznych drutów o średnicach 8,0 – 0,5 mm	361



	otrzymanych z prętów z miedzi beztlenuowej z procesu ciągłego odlewania metodą DCC-AGH przy prędkościach odlewania 0,006 m/min. i 0,03 m/min. oraz różnym wydatku wody w układzie chłodzenia pierwotnego i wtórnego	
Tabela A9.4.4.	Wyniki badań własności elektrycznych drutów o średnicach 8,0 – 0,5 mm otrzymanych z prętów z miedzi beztlenuowej z procesu ciągłego odlewania metodą DCC-AGH przy prędkościach odlewania 0,06 m/min. i 0,15 m/min. oraz różnym wydatku wody w układzie chłodzenia pierwotnego i wtórnego	362
Tabela A9.4.5.	Wyniki badań własności elektrycznych drutów o średnicach 8,0 – 0,5 mm otrzymanych z prętów z miedzi beztlenuowej z procesu ciągłego odlewania metodą DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,2 m/min. oraz wydatku wody w układzie chłodzenia pierwotnego na poziomie 0,5 l/min. i wtórnego na poziomie 1,0 l/min.	363
Tabela A9.4.6.	Wyniki badań własności elektrycznych drutów o średnicach 8,0 – 0,5 mm otrzymanych z prętów z miedzi beztlenuowej z procesu ciągłego odlewania metodą Upcast przy prędkościach odlewania 0,5 m/min. i 1,0 m/min. oraz wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min.	363
Tabela A9.4.7.	Wyniki badań własności elektrycznych drutów o średnicach 8,0 – 0,5 mm otrzymanych z prętów z miedzi beztlenuowej z procesu ciągłego odlewania metodą Upcast przy prędkościach odlewania 2,0 m/min. i 3,0 m/min. oraz wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min.	364

Tabela A.II. Zestawienie tabel z rozdziału 10

Rozdział 10: Badania aplikacyjne nad przemysłową technologią wytwarzania kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6		
Numer tabeli	Nazwa tabeli	Numer strony
10.2. Pomiary parametrów transmisyjnych kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6		
Tabela A10.2.1.	Wyniki badań rezystancji elektrycznej żył przewodzących o średnicach 0,58 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6	364
Tabela A10.2.2.	Wyniki badań pojemności skutecznej pomiędzy żyłami przewodzącymi z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tego samego toru symetrycznego tworzącego czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6	365
Tabela A10.2.3.	Wyniki badań impedancji falowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6	365
Tabela A10.2.4.	Wyniki badań tłumienności odbiciowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6	366
Tabela A10.2.5.	Wyniki badań tłumienności falowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6	366
Tabela A10.2.6.	Wyniki badań prędkości propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6	366
Tabela A10.2.7.	Wyniki badań opóźnienia propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6	367
Tabela A10.2.8.	Wyniki badań przesunięcia fazowego par o największym i najmniejszym opóźnieniu propagacji dla konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE	367
Tabela A10.2.9.	Wyniki badań tłumienności zbliżnoprzenikowej NEXT dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE	367
Tabela A10.2.10.	Wyniki badań tłumienności zdaloprzenikowej FEXT dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE	368
Tabela A10.2.11.	Wyniki badań tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zbliżnego PS NEXT dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE	368
Tabela A10.2.12.	Wyniki badań tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zdalnego PS FEXT dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE	368
Tabela A10.2.13.	Wyniki badań odstępu zbliżnoprzenikowego ACR dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE	369
Tabela A10.2.14.	Wyniki badań odstępu zdaloprzenikowego ELFEXT dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE	369

Tabela A10.2.15.	Wyniki badań odstępów równoważnego sumie mocy przeniku zbliżonego PS ACR dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE	369
Tabela A10.2.16.	Wyniki badań odstępów równoważnego sumie mocy przeniku zdalnego PS ELFEX dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE	370

## A.I. Rozdział 9 – Wyniki badań doświadczalnych i ich analiza

### 9.1. Identyfikacja własności materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP dedykowanych do procesu ciągnięcia na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych

Tabela A9.1.1. Wyniki badań wpływu parametrów obróbki cieplnej na własności mechaniczne walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP i pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE

Czas	Temperatura	Cu-ETP				Cu-OFE			
		R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>
[h]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
1	20	140,0	220,7	31,7	42,3	138,3	183,9	26,8	35,3
	100	97,3	226,0	36,5	50,2	116,2	181,0	31,4	42,3
	200	93,3	226,1	36,8	50,4	113,3	178,7	31,6	42,8
	300	87,9	226,3	36,9	50,5	108,5	176,0	32,2	43,1
	400	85,4	225,1	37,0	51,3	101,0	174,4	35,8	45,3
	500	94,1	220,5	37,0	51,3	89,0	172,7	38,7	47,2
	600	93,0	215,2	37,3	46,4	90,0	179,2	39,4	47,3
	700	93,7	211,8	36,7	46,2	91,0	184,2	39,3	48,3
	800	94,9	209,8	36,9	45,9	90,7	191,1	39,7	48,6
10	900	93,8	209,0	37,1	47,5	91,0	193,4	39,8	52,6
	20	140,0	220,7	31,7	42,3	138,3	183,9	26,8	35,3
	100	96,7	222,8	36,3	49,2	116,4	177,1	32,2	44,2
	200	91,2	223,5	36,1	49,8	113,2	175,6	32,9	45,8
	300	88,3	223,8	36,2	50,0	108,1	174,0	33,7	47,5
	400	87,3	222,6	36,8	50,9	95,6	173,0	35,1	48,8
	500	94,0	220,5	36,7	49,5	91,0	172,1	35,9	49,9
	600	92,9	207,6	36,6	45,5	90,1	178,2	36,0	48,6
	700	93,7	207,3	36,2	45,4	89,8	183,0	37,6	46,3
800	93,4	207,5	36,4	44,9	90,6	193,3	38,8	45,8	
900	93,6	206,9	36,5	45,1	90,1	192,9	40,8	46,5	

### 9.2. Badania nad procesem ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP na druty i mikrodruty wykorzystywane w aplikacjach elektrycznych

Tabela A9.2.1. Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) i z linii Rautomead (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.)

Średnica drutu	Odkształcenie względne	Odkształcenie rzeczywiste	Cu-ETP linia Contirod				Cu-OFE linia Upcast				Cu-OFE linia Rautomead			
			R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>
[mm]	[%]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
8,00	0,00	0,00	140,0	220,7	31,7	42,3	138,3	183,9	26,8	35,3	91,1	181,3	32,7	41,0
7,46	13,04	0,14	264,8	274,7	1,8	10,9	224,3	236,0	1,6	6,2	211,5	223,6	1,4	6,0
6,95	24,53	0,28	309,9	312,6	1,1	6,5	260,9	264,5	1,2	4,2	242,1	247,0	1,3	3,7
6,43	35,40	0,44	331,7	344,0	0,9	4,8	285,4	300,4	1,2	3,9	259,3	282,9	1,3	3,1
5,96	44,50	0,59	346,3	364,5	0,9	4,2	308,5	318,0	1,1	2,5	287,4	311,0	1,2	2,6
5,47	53,25	0,76	359,6	379,9	1,0	3,2	323,2	337,4	1,0	2,2	304,0	327,0	1,2	2,4
4,95	61,71	0,96	369,7	393,4	1,0	2,8	336,7	359,0	0,9	2,1	319,3	336,6	1,2	1,7
4,47	68,78	1,16	388,0	400,6	0,9	2,6	359,0	368,0	0,8	1,8	342,8	355,0	1,1	1,6
3,97	75,37	1,40	408,2	419,1	0,7	2,3	381,7	385,9	0,7	1,8	358,6	367,5	0,9	1,5
3,48	81,08	1,66	420,7	435,4	0,8	2,1	397,1	407,0	0,7	1,4	382,0	393,1	0,9	1,4

3,21	83,90	1,83	428,0	440,8	1,0	2,0	408,1	412,6	0,8	1,2	400,8	401,1	1,0	0,9
2,80	87,75	2,10	435,8	450,3	0,9	1,8	419,2	429,0	0,7	1,1	413,9	417,5	0,8	0,8
2,43	90,77	2,38	439,9	458,6	0,8	1,7	424,5	431,1	0,7	0,8	417,4	421,7	0,9	1,0
2,27	91,95	2,52	441,9	459,8	0,8	1,5	426,5	432,3	0,6	0,8	418,4	427,4	0,7	0,9
1,98	93,87	2,79	447,9	461,0	0,8	1,7	428,9	433,2	0,7	0,7	419,3	434,0	0,8	0,9
1,68	95,59	3,12	448,1	462,5	0,9	1,4	430,0	433,2	0,6	0,8	420,6	436,8	0,8	1,0
1,50	96,48	3,35	450,2	463,4	0,7	1,8	430,7	434,8	0,6	0,6	422,4	435,2	0,6	0,9
1,29	97,40	3,65	451,6	464,8	0,6	1,7	431,7	436,8	0,5	0,6	423,7	434,5	0,5	0,6
1,14	97,97	3,90	452,3	466,9	0,8	2,1	433,2	439,0	0,5	0,5	428,0	436,5	0,5	0,6
1,00	98,44	4,16	456,7	469,0	0,8	2,0	435,0	439,9	0,5	0,6	437,6	446,7	0,7	0,7
0,89	98,76	4,39	457,2	473,0	0,7	2,1	438,7	445,0	0,6	0,8	437,7	449,3	0,6	0,7
0,80	99,00	4,61	458,3	474,7	0,6	1,9	439,6	446,3	0,6	0,9	438,6	449,8	0,6	0,6
0,70	99,23	4,87	459,9	472,0	0,8	1,6	446,9	455,4	0,5	1,2	439,1	458,8	0,5	0,9
0,63	99,38	5,08	460,1	475,6	0,8	1,5	448,2	456,9	0,4	1,4	439,9	465,9	0,4	0,8
0,56	99,51	5,32	461,7	475,6	0,6	1,9	450,1	459,9	0,4	1,3	440,9	467,1	0,4	0,9
0,49	99,62	5,59	462,6	474,0	0,7	1,8	454,5	472,8	0,4	1,5	442,2	471,9	0,3	1,1

Tabela A9.2.2. Wyniki badań procentowej zmiany wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod i Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) i Rautomead (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.)

Średnica drutu	Odkształcenie względne	Odkształcenie rzeczywiste	Cu-ETP linia Contirod	Cu-OFE linia Upcast	Cu-OFE linia Rautomead	Cu-ETP linia Contirod	Cu-OFE linia Upcast	Cu-OFE linia Rautomead
			$\Delta R_{0,2}$			$\Delta R_m$		
[mm]	[%]	[-]	[%]			[%]		
8,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7,46	13,04	0,14	89,1	62,2	132,1	24,5	28,4	23,3
6,95	24,53	0,28	121,3	88,6	165,8	41,7	43,9	36,3
6,43	35,40	0,44	136,9	106,4	184,6	55,9	63,3	56,1
5,96	44,50	0,59	147,3	123,1	215,5	65,1	72,9	71,6
5,47	53,25	0,76	156,9	133,7	233,7	72,1	83,5	80,3
4,95	61,71	0,96	164,1	143,5	250,5	78,3	95,2	85,6
4,47	68,78	1,16	177,1	159,6	276,2	81,5	100,1	95,8
3,97	75,37	1,40	191,6	176,0	293,6	89,9	109,8	102,7
3,48	81,08	1,66	200,5	187,2	319,3	97,3	121,3	116,8
3,21	83,90	1,83	205,7	195,1	340,0	99,7	124,3	121,2
2,80	87,75	2,10	211,3	203,1	354,4	104,0	133,3	130,3
2,43	90,77	2,38	214,2	206,9	358,2	107,8	134,4	132,6
2,27	91,95	2,52	215,6	208,4	359,3	108,3	135,1	135,7
1,98	93,87	2,79	219,9	210,1	360,3	108,9	135,6	139,4
1,68	95,59	3,12	220,1	210,9	361,7	109,6	135,6	140,9
1,50	96,48	3,35	221,6	211,4	363,7	110,0	136,4	140,1
1,29	97,40	3,65	222,6	212,1	365,1	110,6	137,5	139,7
1,14	97,97	3,90	223,1	213,2	369,8	111,6	138,7	140,8
1,00	98,44	4,16	226,2	214,5	380,4	112,5	139,2	146,4
0,89	98,76	4,39	226,6	217,2	380,5	114,3	142,0	147,8
0,80	99,00	4,61	227,4	217,9	381,4	115,1	142,7	148,1
0,70	99,23	4,87	228,5	223,1	382,0	113,9	147,7	153,1
0,63	99,38	5,08	228,6	224,1	382,9	115,5	148,5	157,0
0,56	99,51	5,32	229,8	225,5	384,0	115,5	150,1	157,6
0,49	99,62	5,59	230,4	228,6	385,4	114,8	157,1	160,3

Tabela A9.2.3. Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii DCC-AGH po procesie ciągłego odlewania z prędkościami od 0,006 m/min. do 0,06 m/min. przy wydatku wody w układzie chłodzenia pierwotnego 0,1 - 0,3 l/min. i wtórnego 0,2 - 0,6 l/min.

Średnica drutu	Odkształcenie względne	Odkształcenie rzeczywiste	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej w układzie pierwotnym i wtórnym [l/min.]											
			0,006 / 0,1; 0,2				0,03 / 0,2; 0,4				0,06 / 0,3; 0,6			
			R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>
[mm]	[%]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]

Aneks. Tabele wyników badań i obliczeń

8,00	0,00	0,00	36,1	168,2	24,2	25,5	39,7	161,4	33,5	39,2	40,1	145,3	30,3	35,8
7,46	13,04	0,14	213,2	238,8	1,2	7,1	220,1	246,4	1,3	7,5	218,3	245,4	1,3	6,9
6,95	24,53	0,28	250,2	286,7	1,1	4,8	251,5	268,6	1,3	5,5	256,6	271,2	1,3	6,0
6,43	35,40	0,44	276,8	301,1	1,0	3,0	270,9	290,9	1,2	3,6	280,1	297,0	1,2	5,1
5,96	44,50	0,59	293,7	313,4	1,0	2,1	299,4	319,1	1,2	3,1	304,5	325,3	1,3	3,9
5,47	53,25	0,76	313,4	331,1	1,0	1,9	317,3	335,0	1,1	3,0	328,2	345,9	1,2	3,6
4,95	61,71	0,96	333,4	348,5	0,9	1,8	335,3	351,0	1,0	2,8	351,8	366,5	1,2	3,3
4,47	68,78	1,16	353,2	363,9	0,9	1,6	357,6	367,1	1,2	2,8	371,5	384,1	1,1	3,0
3,97	75,37	1,40	373,7	381,2	0,8	1,5	380,0	383,2	1,5	2,7	391,2	401,8	0,9	2,7
3,48	81,08	1,66	386,3	397,4	0,8	1,4	389,8	400,2	1,2	2,2	399,2	417,1	1,0	2,6
3,21	83,90	1,83	399,4	414,6	0,7	1,3	399,7	417,3	0,9	1,7	403,5	432,3	1,0	2,5
2,80	87,75	2,10	414,9	422,7	0,7	1,2	416,0	424,7	0,8	1,6	411,9	439,6	1,0	2,3
2,43	90,77	2,38	429,5	431,7	0,6	1,1	432,4	436,9	0,8	1,5	423,1	446,8	0,9	2,2
2,27	91,95	2,52	432,2	432,7	0,8	1,1	433,6	438,5	0,8	1,5	425,2	447,2	0,9	1,6
1,98	93,87	2,79	433,7	434,3	0,8	1,1	434,8	440,1	0,8	1,5	427,3	447,6	0,9	1,5
1,68	95,59	3,12	435,2	435,9	0,8	1,1	436,0	441,7	0,8	1,4	429,4	448,0	0,9	1,5
1,50	96,48	3,35	436,7	437,5	0,8	1,1	437,2	443,3	0,8	1,4	431,5	448,4	0,9	1,4
1,29	97,40	3,65	438,2	439,1	0,8	1,1	438,4	444,9	0,8	1,3	433,6	448,8	0,9	1,2
1,14	97,97	3,90	439,7	440,7	0,8	1,0	439,6	446,5	0,8	1,3	435,7	449,2	0,9	1,1
1,00	98,44	4,16	441,2	442,3	0,7	1,0	440,8	448,1	0,8	1,3	437,8	449,6	0,9	1,0
0,89	98,76	4,39	442,7	443,9	0,7	1,0	442,0	449,7	0,8	1,2	439,9	450,0	0,9	1,0
0,80	99,00	4,61	444,2	445,5	0,7	1,0	443,2	450,2	0,7	1,2	442,0	450,4	0,8	1,0
0,70	99,23	4,87	445,7	447,1	0,7	1,0	444,4	450,6	0,7	1,2	444,1	450,8	0,8	1,0
0,63	99,38	5,08	447,2	448,7	0,6	1,0	445,6	450,8	0,7	1,2	446,2	451,2	0,8	1,0
0,56	99,51	5,32	448,7	450,3	0,6	1,0	446,8	451,0	0,7	1,2	448,3	451,6	0,8	1,0
0,49	99,62	5,59	449,8	453,2	0,6	1,0	448,5	451,3	0,7	1,1	450,4	451,7	0,8	1,0

Tabela A9.2.4. Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFe z linii DCC-AGH po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 0,15 m/min. i 0,2 /min. przy wydatku wody w układzie chłodzenia pierwotnego 0,4 – 0,5 l/min. i wtórnego 0,8 – 1,0 l/min.

Średnica drutu	Odształcenie względne	Odształcenie rzeczywiste	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej w układzie pierwotnym i wtórnym [l/min.]							
			0,15 / 0,4; 0,8				0,2 / 0,5; 1,0			
			R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>
[mm]	[%]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
8,00	0,00	0,00	41,2	143,4	27,8	36,2	46,4	141,5	27,0	28,2
7,46	13,04	0,14	229,1	244,7	1,1	7,4	224,1	239,0	1,3	5,9
6,95	24,53	0,28	256,2	272,9	1,2	5,2	244,5	285,0	1,3	4,6
6,43	35,40	0,44	281,4	300,1	0,9	3,3	280,3	300,0	1,2	3,6
5,96	44,50	0,59	313,4	332,0	0,9	2,5	291,4	312,0	1,2	3,4
5,47	53,25	0,76	326,7	344,7	0,8	2,0	309,8	329,0	1,1	2,1
4,95	61,71	0,96	340,1	358,2	0,7	2,1	331,1	344,0	1,0	1,9
4,47	68,78	1,16	361,5	374,3	0,6	1,8	350,9	359,0	1,0	1,4
3,97	75,37	1,40	382,9	389,8	0,6	1,7	367,9	378,0	0,9	1,7
3,48	81,08	1,66	390,9	403,4	0,7	1,5	380,0	395,0	0,8	1,6
3,21	83,90	1,83	401,4	415,9	0,6	1,3	397,2	413,0	0,7	1,5
2,80	87,75	2,10	417,3	426,0	0,6	1,2	415,1	418,0	0,7	1,3
2,43	90,77	2,38	432,6	435,3	0,6	1,1	428,0	434,4	0,7	1,2
2,27	91,95	2,52	433,8	436,5	0,6	1,1	429,6	436,6	0,7	1,1
1,98	93,87	2,79	435,0	437,7	0,6	1,1	431,2	439,6	0,7	1,1
1,68	95,59	3,12	436,2	438,9	0,6	1,1	432,8	442,1	0,7	1,1
1,50	96,48	3,35	437,4	440,1	0,6	1,1	434,4	444,6	0,7	1,1
1,29	97,40	3,65	438,6	441,3	0,6	1,1	436,0	447,1	0,7	1,1
1,14	97,97	3,90	439,8	442,5	0,6	1,1	437,6	449,6	0,7	1,0
1,00	98,44	4,16	441,0	443,7	0,6	1,1	439,2	449,8	0,6	1,0
0,89	98,76	4,39	442,2	444,9	0,6	1,1	440,8	450,0	0,6	1,0
0,80	99,00	4,61	443,4	446,1	0,6	1,1	442,4	450,2	0,6	1,0
0,70	99,23	4,87	444,6	447,3	0,6	1,1	444,0	450,4	0,6	1,0
0,63	99,38	5,08	445,8	448,5	0,5	1,0	445,6	450,6	0,6	1,0

0,56	99,51	5,32	447,0	449,7	0,5	1,0	447,2	450,8	0,6	1,0
0,49	99,62	5,59	448,2	450,9	0,5	1,0	448,8	451,0	0,6	1,0

Tabela A9.2.5. Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 0,5 m/min. i 1,0 m/min. przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.

Średnica drutu	Odkształcenie względne	Odkształcenie rzeczywiste	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej krystalizator [l/min.]							
			0,5 / 60				1,0 / 60			
			R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>
[mm]	[%]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
8,00	0,00	0,00	112,2	182,5	33,0	39,5	134,6	194,1	29,8	35,2
7,46	13,04	0,14	232,9	245,3	1,1	7,2	231,4	245,8	1,2	7,0
6,95	24,53	0,28	257,7	271,6	1,1	5,2	254,9	271,1	1,1	5,1
6,43	35,40	0,44	282,6	297,9	1,0	3,2	278,5	296,3	1,1	3,2
5,96	44,50	0,59	311,6	329,4	1,0	2,4	306,9	326,9	1,1	2,6
5,47	53,25	0,76	327,0	343,5	0,9	2,2	321,5	339,5	0,9	2,3
4,95	61,71	0,96	342,4	357,6	0,8	2,0	336,2	352,1	0,8	2,0
4,47	68,78	1,16	362,3	374,3	0,7	1,8	357,5	368,8	0,8	1,8
3,97	75,37	1,40	382,3	391,0	0,7	1,5	378,7	385,5	0,7	1,6
3,48	81,08	1,66	394,3	405,5	0,7	1,4	391,4	401,1	0,7	1,4
3,21	83,90	1,83	406,3	420,0	0,7	1,3	404,0	416,8	0,7	1,3
2,80	87,75	2,10	417,0	426,1	0,7	1,2	418,2	426,7	0,7	1,3
2,43	90,77	2,38	427,6	432,0	0,7	1,2	432,4	436,6	0,7	1,3
2,27	91,95	2,52	433,3	435,9	0,7	1,1	432,9	436,7	0,7	1,2
1,98	93,87	2,79	437,3	437,1	0,7	1,1	436,9	437,9	0,7	1,2
1,68	95,59	3,12	439,3	439,8	0,7	1,0	438,9	440,6	0,7	1,1
1,50	96,48	3,35	442,0	443,3	0,6	1,0	441,6	444,1	0,6	1,1
1,29	97,40	3,65	445,0	451,1	0,6	1,0	444,6	451,9	0,6	1,1
1,14	97,97	3,90	445,9	453,0	0,6	0,9	445,1	453,8	0,6	1,0
1,00	98,44	4,16	446,3	454,2	0,6	0,9	445,9	455,0	0,6	1,0
0,89	98,76	4,39	447,1	456,0	0,5	0,8	446,6	456,8	0,6	0,9
0,80	99,00	4,61	448,9	459,0	0,5	0,8	448,5	459,8	0,5	0,9
0,70	99,23	4,87	449,0	464,4	0,5	0,8	448,8	465,2	0,5	0,9
0,63	99,38	5,08	449,9	468,8	0,4	0,8	449,1	469,6	0,4	0,9
0,56	99,51	5,32	451,4	469,5	0,4	0,8	451,0	470,3	0,4	0,9
0,49	99,62	5,59	452,8	471,3	0,4	0,7	452,4	472,1	0,4	0,8

Tabela A9.2.6. Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 2,0 m/min. i 3,0 m/min. przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.

Średnica drutu	Odkształcenie względne	Odkształcenie rzeczywiste	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej krystalizator [l/min.]							
			2,0 / 60				3,0 / 60			
			R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>
[mm]	[%]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
8,00	0,00	0,00	132,3	186,8	29,1	36,6	140,1	185,8	27,0	36,5
7,46	13,04	0,14	234,5	243,2	1,1	5,8	224,3	242,0	1,3	5,5
6,95	24,53	0,28	258,1	269,0	1,1	4,9	245,8	265,6	1,3	4,5
6,43	35,40	0,44	281,6	294,8	1,0	4,0	267,3	289,3	1,3	3,5
5,96	44,50	0,59	306,0	323,1	1,1	2,8	294,2	314,7	1,2	3,1
5,47	53,25	0,76	329,7	343,7	1,0	2,5	312,1	332,1	1,1	2,4
4,95	61,71	0,96	353,3	364,3	1,0	2,2	330,1	349,5	1,1	1,7
4,47	68,78	1,16	373,0	381,9	0,9	1,9	354,6	368,6	1,0	1,8
3,97	75,37	1,40	392,7	399,6	0,7	1,6	379,2	387,7	0,9	1,8
3,48	81,08	1,66	403,6	414,9	0,8	1,5	389,5	401,9	0,8	1,6
3,21	83,90	1,83	414,4	430,1	0,8	1,4	399,8	416,2	0,8	1,4
2,80	87,75	2,10	423,2	437,4	0,8	1,2	417,9	427,0	0,8	1,3
2,43	90,77	2,38	430,2	444,6	0,8	1,2	435,9	437,7	0,8	1,3
2,27	91,95	2,52	438,9	445,5	0,8	1,2	437,0	438,8	0,8	1,3
1,98	93,87	2,79	439,8	446,4	0,8	1,1	438,1	439,9	0,8	1,2
1,68	95,59	3,12	440,7	447,3	0,7	1,1	439,2	441,0	0,8	1,2

1,50	96,48	3,35	441,6	448,2	0,7	1,1	440,3	442,1	0,7	1,2
1,29	97,40	3,65	442,5	449,1	0,7	1,0	441,4	443,2	0,7	1,1
1,14	97,97	3,90	443,4	450,0	0,7	1,0	442,5	444,3	0,7	1,1
1,00	98,44	4,16	444,3	450,9	0,6	1,0	443,6	445,4	0,7	1,1
0,89	98,76	4,39	445,2	451,8	0,6	1,0	444,7	446,5	0,7	1,1
0,80	99,00	4,61	446,1	452,7	0,6	1,0	445,8	447,6	0,7	1,1
0,70	99,23	4,87	447,0	453,6	0,6	1,0	446,9	448,7	0,7	1,1
0,63	99,38	5,08	447,9	454,5	0,6	1,0	448,0	449,8	0,7	1,1
0,56	99,51	5,32	448,8	455,4	0,6	0,9	449,1	450,9	0,7	1,0
0,49	99,62	5,59	449,7	456,3	0,6	0,9	449,3	452,9	0,7	1,0

Tabela A9.2.7. Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 1,0 m/min. i 2,0 m/min. przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 40 l/min.

Średnica drutu	Odkształcenie względne	Odkształcenie rzeczywiste	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej krystalizator [l/min.]							
			1,0 / 40				2,0 / 40			
			R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>
[mm]	[%]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
8,00	0,00	0,00	140,0	195,6	29,4	36,1	137,0	188,7	28,0	36,7
7,46	13,04	0,14	237,7	245,9	0,9	6,9	225,7	240,2	1,2	4,9
6,95	24,53	0,28	262,5	271,5	0,9	4,9	250,9	266,4	1,2	4,4
6,43	35,40	0,44	287,3	297,1	0,9	2,9	276,1	292,6	1,1	3,8
5,96	44,50	0,59	314,6	329,6	0,9	2,3	298,7	318,0	1,2	3,0
5,47	53,25	0,76	332,1	345,8	0,8	2,0	318,9	335,0	1,0	2,5
4,95	61,71	0,96	349,5	361,9	0,7	1,8	339,1	352,1	0,9	2,0
4,47	68,78	1,16	367,6	380,1	0,7	1,7	362,8	370,9	0,8	1,8
3,97	75,37	1,40	385,7	398,3	0,7	1,5	386,4	389,7	0,7	1,6
3,48	81,08	1,66	399,2	413,0	0,8	1,4	400,8	404,5	0,7	1,4
3,21	83,90	1,83	412,7	427,8	0,8	1,3	415,2	419,2	0,7	1,2
2,80	87,75	2,10	420,8	429,3	0,8	1,2	422,0	425,9	0,7	1,2
2,43	90,77	2,38	428,9	430,0	0,8	1,1	428,8	432,5	0,6	1,2
2,27	91,95	2,52	432,2	431,4	0,8	1,1	430,0	433,7	0,6	1,2
1,98	93,87	2,79	436,8	438,0	0,8	1,1	431,2	434,9	0,6	1,1
1,68	95,59	3,12	436,6	440,8	0,8	1,1	432,4	436,1	0,6	1,1
1,50	96,48	3,35	439,0	439,2	0,8	1,1	433,6	437,3	0,6	1,1
1,29	97,40	3,65	440,8	438,5	0,7	1,0	434,8	438,5	0,6	1,1
1,14	97,97	3,90	441,2	440,5	0,7	1,0	436,0	439,7	0,6	1,1
1,00	98,44	4,16	441,6	450,7	0,7	1,0	437,2	440,9	0,5	1,0
0,89	98,76	4,39	441,7	453,3	0,7	1,0	438,4	442,1	0,5	1,0
0,80	99,00	4,61	442,6	453,8	0,6	1,0	439,6	443,3	0,5	0,9
0,70	99,23	4,87	443,1	462,8	0,6	1,0	440,8	444,5	0,5	0,9
0,63	99,38	5,08	443,9	469,9	0,5	0,9	442,0	445,7	0,5	0,9
0,56	99,51	5,32	444,9	471,1	0,5	0,9	443,2	446,9	0,4	0,9
0,49	99,62	5,59	446,2	475,9	0,5	0,9	444,4	448,1	0,4	0,9

Tabela A9.2.8. Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 3,0 m/min. i 4,0 m/min. przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 40 l/min.

Średnica drutu	Odkształcenie względne	Odkształcenie rzeczywiste	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej krystalizator [l/min.]							
			3,0 / 40				4,0 / 40			
			R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>
[mm]	[%]	[-]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
8,00	0,00	0,00	140,0	183,5	25,7	36,2	136,0	183,1	25,8	37,0
7,46	13,04	0,14	229,8	242,2	1,2	4,9	226,1	238,9	1,2	4,4
6,95	24,53	0,28	251,0	265,9	1,2	4,1	247,5	262,8	1,2	3,9
6,43	35,40	0,44	272,2	289,6	1,2	3,3	269,0	286,6	1,2	3,5
5,96	44,50	0,59	300,5	317,8	1,1	2,7	296,8	315,1	1,2	2,9
5,47	53,25	0,76	317,2	333,9	1,1	2,4	316,2	333,6	1,1	2,5
4,95	61,71	0,96	333,9	349,9	1,0	2,2	335,6	352,1	1,0	2,0
4,47	68,78	1,16	358,6	372,2	0,9	2,0	359,6	372,2	1,0	1,9

3,97	75,37	1,40	383,3	394,4	0,8	1,8	383,6	392,3	1,0	1,7
3,48	81,08	1,66	389,6	405,6	0,8	1,6	394,7	409,2	1,0	1,5
3,21	83,90	1,83	395,9	416,7	0,8	1,4	405,8	426,1	1,0	1,3
2,80	87,75	2,10	418,1	429,4	0,7	1,3	418,5	437,5	1,0	1,2
2,43	90,77	2,38	440,2	442,1	0,7	1,2	431,3	448,9	0,9	1,2
2,27	91,95	2,52	441,0	442,9	0,7	1,1	432,7	449,3	0,9	1,2
1,98	93,87	2,79	441,8	443,7	0,7	1,1	434,1	449,7	0,9	1,2
1,68	95,59	3,12	442,6	444,5	0,6	1,1	435,5	450,1	0,9	1,1
1,50	96,48	3,35	443,4	445,3	0,6	1,0	436,9	450,5	0,9	1,1
1,29	97,40	3,65	444,2	446,1	0,6	1,0	438,3	450,9	0,9	1,1
1,14	97,97	3,90	445,0	446,9	0,6	0,9	439,7	451,3	0,9	1,1
1,00	98,44	4,16	445,8	447,7	0,6	0,9	441,1	451,7	0,9	1,1
0,89	98,76	4,39	446,6	448,5	0,6	0,9	442,5	452,1	0,9	1,0
0,80	99,00	4,61	447,4	449,3	0,6	0,9	443,9	452,5	0,8	1,0
0,70	99,23	4,87	448,2	450,1	0,5	0,9	445,3	452,9	0,8	1,0
0,63	99,38	5,08	449,0	450,9	0,5	0,9	446,7	453,3	0,8	1,0
0,56	99,51	5,32	449,8	451,7	0,4	0,9	448,1	453,7	0,8	1,0
0,49	99,62	5,59	450,3	452,1	0,4	0,8	449,3	454,2	0,8	1,0

Tabela A9.2.9. Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 1,0 m/min. i 2,0 m/min. przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 50 l/min.

Średnica drutu [mm]	Odształcenie względne [%]	Odształcenie rzeczywiste [-]	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej krystalizator [l/min.]							
			1,0 / 50				2,0 / 50			
			R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]
8,00	0,00	0,00	137,0	196,0	30,4	35,0	133,0	187,6	29,7	35,5
7,46	13,04	0,14	229,6	244,3	1,2	7,9	231,0	245,5	1,2	7,0
6,95	24,53	0,28	255,8	272,3	1,1	5,7	250,4	267,7	1,2	5,0
6,43	35,40	0,44	281,9	300,3	1,1	3,6	269,8	290,0	1,1	3,1
5,96	44,50	0,59	313,4	331,7	0,9	2,3	298,3	318,2	1,1	2,6
5,47	53,25	0,76	327,4	345,2	0,9	2,3	316,2	334,1	1,0	2,5
4,95	61,71	0,96	341,4	358,6	0,8	2,2	334,2	350,1	0,9	2,3
4,47	68,78	1,16	361,9	374,0	0,8	1,9	356,5	366,2	1,1	2,3
3,97	75,37	1,40	382,5	389,4	0,7	1,5	378,9	382,3	1,4	2,2
3,48	81,08	1,66	392,3	402,3	0,7	1,4	388,7	399,3	1,1	1,7
3,21	83,90	1,83	402,2	415,3	0,7	1,2	398,6	416,4	0,8	1,2
2,80	87,75	2,10	411,8	422,3	0,7	1,2	414,9	423,8	0,8	1,2
2,43	90,77	2,38	421,5	429,3	0,7	1,2	431,3	431,3	0,8	1,2
2,27	91,95	2,52	427,6	430,1	0,7	1,2	432,9	440,9	0,8	1,2
1,98	93,87	2,79	428,4	430,6	0,7	1,2	434,5	442,5	0,8	1,1
1,68	95,59	3,12	430,2	432,6	0,7	1,1	436,1	444,1	0,7	1,1
1,50	96,48	3,35	431,7	434,2	0,7	1,1	437,7	445,7	0,7	1,1
1,29	97,40	3,65	431,9	436,2	0,6	1,1	439,3	447,3	0,7	1,1
1,14	97,97	3,90	437,9	438,4	0,6	1,1	440,9	448,9	0,7	1,1
1,00	98,44	4,16	438,4	439,9	0,6	1,1	442,5	450,5	0,7	1,0
0,89	98,76	4,39	438,9	444,4	0,6	1,0	442,9	450,9	0,6	1,0
0,80	99,00	4,61	440,4	445,7	0,5	0,9	443,2	451,2	0,6	1,0
0,70	99,23	4,87	449,8	454,8	0,5	0,9	443,6	451,6	0,6	1,0
0,63	99,38	5,08	450,1	456,3	0,5	0,9	443,9	451,9	0,6	0,9
0,56	99,51	5,32	452,0	459,3	0,5	0,8	444,9	452,9	0,6	0,9
0,49	99,62	5,59	453,4	472,2	0,4	0,9	445,2	453,2	0,6	0,9

Tabela A9.2.10. Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast po procesie ciągłego odlewania z prędkościami 3,0 m/min. i 4,0 m/min. przy wydatku wody chłodzącej krystalizator 50 l/min.

Średnica drutu [mm]	Odształcenie względne [%]	Odształcenie rzeczywiste [-]	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej krystalizator [l/min.]								
			3,0 / 50				4,0 / 50				
			R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]	

8,00	0,00	0,00	125,0	182,3	28,5	35,9	132,0	181,2	28,9	36,0
7,46	13,04	0,14	224,3	238,5	1,3	6,5	226,4	237,7	1,2	5,4
6,95	24,53	0,28	245,6	263,4	1,3	4,4	249,1	263,2	1,2	4,3
6,43	35,40	0,44	267,0	288,3	1,2	2,2	271,8	288,7	1,1	3,2
5,96	44,50	0,59	295,2	316,9	1,2	2,7	298,6	314,3	1,1	2,8
5,47	53,25	0,76	314,3	333,3	1,1	2,5	315,7	329,7	1,0	2,5
4,95	61,71	0,96	333,5	349,8	1,0	2,4	332,8	345,0	0,9	2,1
4,47	68,78	1,16	353,1	366,2	1,0	2,1	355,3	363,5	0,8	1,7
3,97	75,37	1,40	372,8	382,7	1,0	1,8	377,7	381,9	0,7	1,4
3,48	81,08	1,66	388,7	400,0	1,0	1,7	390,7	399,6	0,7	1,3
3,21	83,90	1,83	404,6	417,4	1,0	1,5	403,7	417,3	0,7	1,2
2,80	87,75	2,10	422,7	429,6	1,0	1,4	424,4	432,0	0,7	1,1
2,43	90,77	2,38	440,8	441,9	1,0	1,4	445,1	446,8	0,6	1,1
2,27	91,95	2,52	441,5	442,5	1,0	1,4	445,4	447,1	0,6	1,1
1,98	93,87	2,79	442,2	443,1	1,0	1,4	445,7	447,4	0,6	1,0
1,68	95,59	3,12	442,9	443,7	1,0	1,4	446,0	447,7	0,6	1,0
1,50	96,48	3,35	443,6	444,3	1,0	1,4	446,3	448,0	0,6	1,0
1,29	97,40	3,65	444,3	444,9	1,0	1,3	446,6	448,3	0,6	1,0
1,14	97,97	3,90	445,0	445,5	0,9	1,3	446,9	448,6	0,5	0,9
1,00	98,44	4,16	445,7	446,1	0,9	1,3	447,2	448,9	0,5	0,9
0,89	98,76	4,39	446,4	446,7	0,9	1,3	447,5	449,2	0,5	0,9
0,80	99,00	4,61	447,1	447,3	0,9	1,2	447,8	449,5	0,5	0,9
0,70	99,23	4,87	447,8	447,9	0,9	1,2	448,1	449,8	0,5	0,9
0,63	99,38	5,08	448,5	448,5	0,8	1,2	448,4	450,1	0,5	0,9
0,56	99,51	5,32	449,2	449,1	0,8	1,0	448,7	450,4	0,5	0,9
0,49	99,62	5,59	449,9	451,8	0,8	0,9	448,9	450,9	0,5	0,9

Tabela A9.2.11. Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contifrod poddanego zabiegowi obróbki cieplnej w temperaturach 100 °C, 400 °C i 900 °C w czasie 1 h

Średnica drutu [mm]	Odkształcenie względne [%]	Odkształcenie rzeczywiste [-]	Temperatura [°C] / Czas [h]											
			100 / 1				400 / 1				900 / 1			
			R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]
8,00	0,00	0,00	97,3	226,2	36,5	50,2	85,4	225,1	37,0	51,3	93,8	209,0	37,1	47,5
7,46	13,04	0,14	249,5	301,2	2,1	23,1	242,7	293,5	2,2	25,2	227,3	269,5	2,4	22,9
6,95	24,53	0,28	284,8	323,9	1,3	13,2	277,5	321,2	1,2	14,7	262,0	293,5	1,2	14,4
6,43	35,40	0,44	320,1	346,6	1,2	3,2	312,3	348,9	1,2	4,2	296,7	317,4	1,1	5,8
5,96	44,50	0,59	352,6	370,6	1,2	2,6	348,1	373,5	1,2	2,4	328,9	344,5	1,1	4,0
5,47	53,25	0,76	364,9	382,7	1,1	2,7	363,3	385,6	1,1	2,2	345,5	361,5	1,0	3,6
4,95	61,71	0,96	377,1	394,8	1,1	2,8	378,4	397,7	1,1	1,9	362,1	378,4	1,1	3,2
4,47	68,78	1,16	391,7	405,7	1,0	2,5	393,0	409,7	1,1	1,8	378,5	391,2	1,1	2,8
3,97	75,37	1,40	406,2	416,5	0,9	2,2	407,5	421,6	1,0	1,7	394,9	403,9	1,0	2,3
3,48	81,08	1,66	418,1	427,1	0,8	2,1	417,8	430,9	1,0	1,5	408,3	415,3	1,0	1,9
3,21	83,90	1,83	429,9	437,6	0,9	2,0	428,1	440,1	0,9	1,3	421,6	426,7	0,9	1,5
2,80	87,75	2,10	440,6	445,9	0,9	1,4	440,5	446,9	0,9	1,2	431,1	435,4	0,9	1,1
2,43	90,77	2,38	451,3	454,1	0,8	0,8	452,8	453,6	0,9	1,0	440,5	444,1	0,6	0,7
2,27	91,95	2,52	452,5	456,3	0,8	1,1	453,6	454,8	0,9	1,0	441,3	445,8	0,7	0,9
1,98	93,87	2,79	453,7	458,1	0,8	1,2	454,4	456,7	0,7	0,9	442,1	447,1	0,7	0,8
1,68	95,59	3,12	454,8	460,5	0,9	1,1	455,6	459,1	0,7	0,9	442,9	448,9	0,7	0,9
1,50	96,48	3,35	456,3	462,9	0,7	1,0	456,4	462,0	0,7	0,9	444,3	450,7	0,8	1,0
1,29	97,40	3,65	457,5	463,3	0,6	1,1	457,9	463,8	0,6	0,9	445,6	452,3	0,6	0,9
1,14	97,97	3,90	458,2	466,0	0,8	1,0	458,7	465,7	0,6	0,9	447,7	454,9	0,6	0,9
1,00	98,44	4,16	459,4	469,1	0,7	1,1	459,9	468,9	0,6	0,9	449,8	456,5	0,6	0,9
0,89	98,76	4,39	460,6	470,8	0,6	0,9	461,8	469,5	0,6	0,8	452,9	459,2	0,6	0,8
0,80	99,00	4,61	462,4	472,0	0,6	0,9	463,5	473,1	0,6	0,8	453,4	462,0	0,6	0,8
0,70	99,23	4,87	463,6	475,2	0,7	0,9	464,4	475,5	0,6	0,9	454,2	464,8	0,5	0,9
0,63	99,38	5,08	464,8	476,9	0,7	0,9	465,6	476,8	0,6	0,8	455,4	468,3	0,5	0,9
0,56	99,51	5,32	466,8	477,6	0,6	0,9	465,9	477,3	0,6	0,8	457,5	469,7	0,5	0,9
0,49	99,62	5,59	467,9	478,5	0,7	0,9	466,4	478,2	0,6	0,8	458,3	477,9	0,5	0,9



Tabela A9.2.12. Wyniki badań własności mechanicznych drutów uzyskanych z materiału wsadowego z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast poddanego zabiegowi obróbki cieplnej w temperaturach 100 °C, 400 °C i 900 °C w czasie 1 h

Średnica drutu [mm]	Odształcenie względne [%]	Odształcenie rzeczywiste [-]	Temperatura [°C] / Czas [h]											
			100 / 1				400 / 1				900 / 1			
			R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]
8,00	0,00	0,00	116,2	181,0	31,4	42,3	101,0	174,4	35,8	45,3	91,0	193,4	39,8	52,6
7,46	13,04	0,14	199,6	247,5	1,7	9,1	187,9	229,5	1,8	11,6	208,6	241,7	1,7	20,9
6,95	24,53	0,28	230,7	273,1	1,3	6,5	217,3	255,8	1,2	7,6	243,6	268,1	1,2	13,8
6,43	35,40	0,44	261,7	298,7	1,2	3,8	246,6	282,1	1,3	3,6	278,5	294,5	1,3	6,7
5,96	44,50	0,59	295,4	331,9	1,1	2,5	285,8	316,1	1,1	2,4	314,4	332,0	1,1	2,6
5,47	53,25	0,76	316,2	347,9	1,1	2,4	307,8	335,2	0,9	2,2	334,1	349,9	1,1	2,3
4,95	61,71	0,96	337,0	363,8	1,0	2,2	329,8	354,3	0,8	2,0	353,8	367,8	1,0	2,0
4,47	68,78	1,16	354,8	378,1	0,9	2,0	350,2	372,0	1,0	1,8	370,3	382,7	1,1	1,8
3,97	75,37	1,40	372,6	392,3	0,8	1,7	370,5	389,6	1,1	1,5	386,7	397,5	1,1	1,5
3,48	81,08	1,66	387,4	403,0	0,7	1,5	388,5	404,9	1,0	1,3	399,5	410,2	0,8	1,2
3,21	83,90	1,83	402,2	413,6	0,7	1,3	406,5	420,1	0,9	1,1	412,3	422,9	0,6	0,8
2,80	87,75	2,10	417,9	424,3	0,7	1,2	426,4	435,6	0,7	0,9	424,8	435,6	0,4	0,7
2,43	90,77	2,38	433,6	434,9	0,7	1,0	446,3	451,0	0,5	0,7	437,3	448,3	0,4	0,5
2,27	91,95	2,52	435,6	436,5	0,7	1,0	447,2	453,2	0,6	0,8	446,4	449,1	0,4	0,6
1,98	93,87	2,79	436,9	438,2	0,7	1,0	448,9	454,9	0,6	0,8	450,3	450,9	0,5	0,7
1,68	95,59	3,12	437,9	439,8	0,7	1,0	450,1	457,2	0,5	0,7	452,1	452,3	0,5	0,7
1,50	96,48	3,35	439,0	442,3	0,7	1,0	452,4	457,7	0,6	0,8	453,9	454,7	0,4	0,6
1,29	97,40	3,65	441,2	444,7	0,6	1,0	452,8	458,1	0,7	0,9	455,6	455,7	0,6	0,8
1,14	97,97	3,90	442,3	445,3	0,5	0,9	453,2	458,6	0,7	0,9	456,7	456,0	0,6	0,8
1,00	98,44	4,16	444,8	447,8	0,5	0,9	453,9	459,3	0,8	1,0	458,0	458,1	0,6	0,8
0,89	98,76	4,39	446,1	449,1	0,6	0,8	454,4	460,5	0,8	1,0	459,7	459,2	0,5	0,7
0,80	99,00	4,61	447,9	451,5	0,6	0,8	455,7	461,7	0,7	0,9	460,8	461,9	0,5	0,7
0,70	99,23	4,87	449,2	453,6	0,5	0,9	456,2	462,4	0,7	0,9	461,7	463,1	0,4	0,8
0,63	99,38	5,08	451,5	454,9	0,4	0,9	456,9	463,2	0,7	0,9	462,4	465,6	0,4	0,8
0,56	99,51	5,32	453,4	455,7	0,5	0,9	457,1	464,1	0,7	0,9	463,8	467,5	0,5	0,7
0,49	99,62	5,59	455,1	457,2	0,5	0,8	457,3	464,8	0,7	0,9	464,4	468,7	0,5	0,7

Tabela A9.2.13. Schemat odkształcenia w procesie ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE na druty stosowane do wytwarzania żył klasy 5 w Zakładzie Produkcji Przewodów Elektrycznych Eltrim

Średnica drutu [mm]	Przekrój drutu [mm <sup>2</sup> ]	Odształcenie względne [%]	Odształcenie rzeczywiste [-]	Typ linii ciągniczej	
8,00	50,27	0,00	0,00	Grubociąg	
6,35	31,67	37,00	0,46		
5,21	21,32	57,59	0,86		
4,33	14,73	70,70	1,23		
3,64	10,41	79,30	1,57		
3,10	7,55	84,98	1,90		
2,66	5,56	88,94	2,20		
2,57	5,19	89,68	2,27		
2,34	4,32	91,42	2,46		
2,09	3,43	93,18	2,69		
1,86	2,72	94,58	2,92		
1,65	2,14	95,75	3,16		
1,48	1,72	96,58	3,38		Średniociąg
1,32	1,36	97,29	3,61		
1,16	1,06	97,90	3,86		
1,07	0,90	98,22	4,03		
0,92	0,66	98,69	4,33		
0,85	0,57	98,86	4,47		
0,73	0,42	99,16	4,78		
0,66	0,34	99,32	4,98		
0,59	0,27	99,46	5,22		

0,52	0,21	99,58	5,47
0,45	0,16	99,68	5,76
0,40	0,13	99,75	5,99

Tabela A9.2.14. Schemat odkształcenia w procesie ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-OFE na druty stosowane do wytwarzania kabli ognioodpornych w zakładzie kablowym Tele-Fonika Kable

Średnica drutu [mm]	Przekrój drutu [mm <sup>2</sup> ]	Odształcenie względne [%]	Odształcenie rzeczywiste [-]	Typ linii ciągniczej
8,00	50,27	0,00	0,00	Grubociąg
6,55	33,70	32,96	0,40	
5,41	22,99	54,27	0,78	
4,53	16,12	67,94	1,14	
3,84	11,58	76,96	1,47	
3,30	8,55	82,98	1,77	
2,86	6,42	87,22	2,06	
2,77	6,03	88,01	2,12	
2,54	5,08	89,89	2,29	
2,29	4,12	91,81	2,50	
2,06	3,34	93,36	2,71	
1,85	2,69	94,65	2,93	
1,68	2,21	95,60	3,12	
1,52	1,81	96,40	3,32	
1,38	1,50	97,02	3,51	

Tabela A9.2.15. Schemat odkształcenia w procesie ciągnięcia materiałów wsadowych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE na druty i mikrodruty w zakładzie przetwórczym Mennica Metale Szlachetne

Średnica drutu [mm]	Przekrój drutu [mm <sup>2</sup> ]	Odształcenie względne [%]	Odształcenie rzeczywiste [-]	Rodzaj ciągnarki
3,20	8,04	0,00	0,00	Jednostopniowa
3,00	7,07	12,11	0,13	
2,80	6,16	23,44	0,27	
2,60	5,31	33,98	0,42	
2,40	4,52	43,75	0,58	
2,20	3,80	52,73	0,75	
2,00	3,14	60,94	0,94	
1,80	2,54	68,36	1,15	
1,60	2,01	75,00	1,39	
1,45	1,65	79,47	1,58	
1,30	1,33	83,50	1,80	
1,20	1,13	85,94	1,96	
1,10	0,95	88,18	2,14	
1,00	0,79	90,23	2,33	
0,90	0,64	92,09	2,54	
0,80	0,50	93,75	2,77	
0,75	0,44	94,51	2,90	
0,70	0,39	95,20	3,04	
0,64	0,32	96,00	3,22	
0,59	0,27	96,65	3,40	
0,54	0,23	97,15	3,56	
0,50	0,19	97,59	3,72	
0,46	0,16	97,95	3,89	
0,42	0,14	98,27	4,06	
0,39	0,12	98,53	4,22	
0,36	0,10	98,76	4,39	
0,33	0,09	98,94	4,55	
0,30	0,07	99,10	4,71	
0,28	0,06	99,25	4,89	
0,26	0,05	99,36	5,05	
0,24	0,04	99,46	5,21	
0,22	0,04	99,54	5,38	

0,20	0,03	99,61	5,55
0,18	0,03	99,68	5,76
0,16	0,02	99,75	5,99
0,14	0,02	99,81	6,26
0,12	0,01	99,86	6,57
0,10	0,01	99,90	6,93
0,08	0,01	99,94	7,38
0,06	0,00	99,96	7,95
0,05	0,00	99,98	8,32
0,04	0,00	99,98	8,76
0,03	0,00	99,99	9,34

### 9.3. Badania odporności cieplnej drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP

Tabela A9.3.1. Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicy 2,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod i pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h

Temperatura [°C]	Gatunek miedzi							
	Cu-ETP				Cu-OFE			
	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]
20	434,0	445,9	0,8	1,0	431,5	432,2	0,7	1,0
100	433,2	445,2	1,0	2,1	432,4	434,9	0,7	1,0
120	432,4	444,5	1,6	2,9	432,1	436,2	0,7	1,0
140	431,7	443,7	2,5	4,1	436,8	438,1	0,7	1,0
160	377,5	387,1	3,1	8,8	421,9	428,2	0,7	1,0
170	278,6	325,0	9,9	16,7	423,1	428,6	0,7	1,0
180	176,3	290,5	20,5	27,3	424,3	429,9	0,6	1,0
190	102,8	261,4	32,9	41,8	405,6	415,9	0,8	1,1
200	98,0	260,2	34,4	42,9	379,7	384,0	1,1	1,2
210	93,0	254,5	35,1	43,8	291,5	349,7	5,2	5,3
220	96,3	260,2	35,7	44,6	203,2	297,0	15,4	16,1
230	94,1	259,8	36,0	44,5	151,4	275,4	26,9	25,4
240	93,7	253,7	35,7	44,6	99,5	249,7	33,4	38,4
250	93,3	251,3	35,8	44,4	98,7	248,4	34,3	39,4
260	92,6	251,8	36,0	44,6	97,2	246,5	34,7	40,1
280	92,8	250,1	35,9	44,7	98,2	246,1	34,5	39,8
300	93,4	249,2	36,1	44,8	97,3	247,0	34,8	39,7
350	94,9	248,5	35,9	44,5	95,2	245,8	34,7	39,9
500	95,2	249,5	36,2	44,7	95,4	246,6	35,1	40,3

Tabela A9.3.2. Wyniki badań wygrzewania w czasie 1 h drutów o średnicy 2,5 mm otrzymanych z materiałów wsadowych oznaczonych od 1 do 5 tj. katod i walcówek o sumarycznej zawartości pierwiastków zanieczyszczeń na poziomie 77 – 272 ppm wag.

T [°C]	Oznaczenie materiału																			
	1 - Cu-CATH-1, 77 ppm wag. zanieczyszczeń				2 - Cu-CATH-1, 85 ppm wag. zanieczyszczeń				3 - Cu-CATH-1, 93 ppm wag. zanieczyszczeń				4 - Cu-ETP, 188 ppm wag. zanieczyszczeń				5 - Cu-ETP, 272 ppm wag. zanieczyszczeń			
	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]	R <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>r</sub> [%]	A <sub>250</sub> [%]
20	420,8	442,6	0,7	2,0	420,6	436,5	0,7	1,9	418,9	444,7	0,7	1,5	424,6	438,4	1,1	2,0	427,3	435,4	1,0	1,5
100	420,2	442,2	0,8	2,1	420,2	435,3	0,8	2,1	418,3	446,2	0,8	1,6	417,5	436,2	1,2	2,1	419,2	431,9	1,1	1,8
120	419,7	441,7	0,9	2,2	419,8	433,2	0,9	2,3	419,6	443,1	0,9	1,8	413,2	433,0	1,2	2,2	411,0	430,2	1,2	1,9
140	419,3	440,6	1,0	2,2	419,0	432,7	1,0	2,4	420,5	442,6	1,1	2,2	409,1	432,7	1,8	2,3	408,5	429,7	1,4	2,0
160	408,5	401,3	1,3	2,4	387,6	385,9	1,1	4,0	376,1	434,9	1,2	3,2	325,4	356,0	2,7	6,2	389,4	401,6	2,5	2,6
170	388,5	394,1	1,7	3,0	352,4	381,2	1,2	5,2	367,3	418,9	1,3	3,8	198,0	296,4	5,7	13,6	274,2	356,8	4,6	9,0
180	370,1	388,7	2,6	4,7	346,0	375,8	1,3	6,8	350,4	407,2	1,5	4,3	146,9	272,8	18,6	22,7	188,9	284,2	16,3	19,7
190	344,3	373,6	3,5	5,8	329,5	359,4	1,7	8,3	332,6	394,2	1,9	6,0	118,5	258,7	27,6	31,2	147,3	274,5	23,5	26,7
200	327,6	350,9	5,8	10,1	312,6	340,1	3,6	11,6	292,1	377,3	3,2	6,8	102,7	251,4	31,2	35,2	128,6	269,1	30,2	33,1

210	312,4	331,3	9,2	13,2	290,2	321,9	6,9	12,8	280,8	356,8	4,4	9,3	99,8	249,7	33,9	36,9	114,2	261,4	32,8	36,5
220	298,0	308,2	11,2	15,2	254,5	304,3	9,7	14,2	267,0	342,6	8,4	12,5	96,2	247,1	35,6	38,1	102,8	255,9	34,6	38,5
230	273,6	301,7	14,1	18,3	231,7	299,7	13,3	16,2	245,7	329,8	12,4	14,7	96,0	246,2	35,9	38,4	102,4	255,7	35,4	38,9
240	255,7	287,3	16,8	22,5	211,3	289,6	15,5	17,9	224,9	314,1	14,7	17,3	95,6	244,8	36,2	38,7	101,7	255,2	35,8	39,1
250	243,8	277,1	20,7	25,1	199,2	286,0	18,6	20,1	212,6	308,4	17,4	20,1	95,4	242,3	36,6	39,2	101,2	254,8	36,3	39,3
260	230,2	269,3	22,9	28,3	177,2	278,4	21,2	23,3	191,9	300,8	19,4	23,5	95,1	240,6	36,9	39,6	100,1	254,2	37,2	39,4
280	168,4	248,6	26,7	32,2	128,4	247,0	26,7	30,7	112,2	242,4	25,5	30,2	94,7	238,0	37,2	40,3	98,0	253,3	37,5	39,6
300	120,7	247,1	28,0	33,7	98,3	242,6	27,9	33,4	102,5	243,1	26,9	33,2	95,2	238,0	37,3	40,6	98,0	240,7	37,8	40,1
350	100,6	246,3	29,4	34,0	93,2	240,5	29,3	33,9	99,9	242,6	29,6	33,5	93,6	245,8	37,2	40,7	95,2	239,7	38,2	40,8
500	98,3	245,0	30,3	34,2	90,6	239,0	30,1	34,5	95,3	240,8	31,5	34,7	91,2	237,0	37,4	40,6	92,0	238,4	38,1	41,2

Tabela A9.3.3. Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 7,0 – 0,5 mm otrzymanych z walcówki z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h

Średnica drutu 7,0 mm					Średnica drutu 5,5 mm					Średnica drutu 4,5 mm					Średnica drutu 0,5 mm				
T	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	T	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	T	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	T	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>
[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
20	309,9	312,6	1,1	6,5	20	359,6	379,9	1,0	3,2	20	388,7	400,6	0,9	2,6	20	468,2	474,9	0,7	1,8
100	300,5	306,3	3,1	6,6	100	350,7	376,7	1,7	3,3	100	382,1	397,8	1,3	2,9	70	467,2	474,4	0,8	1,9
150	298,7	305,7	4,5	6,9	150	350,2	374,5	2,3	3,6	150	374,9	390,3	1,6	3,3	80	466,1	473,7	0,9	2,0
180	298,3	304,9	4,7	7,4	180	349,7	373,3	3,8	4,8	180	373,3	389,9	3,2	4,3	90	458,6	468,3	1,0	2,0
200	298,1	303,2	5,8	8,7	200	339,2	367,1	4,5	7,4	200	353,5	368,8	3,7	6,7	100	439,2	451,7	2,4	3,5
220	297,3	302,7	7,7	10,1	210	166,4	292,7	20,3	27,6	220	102,6	233,2	37,3	45,6	110	411,8	423,4	2,7	3,9
240	295,8	299,7	11,1	14,3	220	119,8	251,2	31,5	37,6	240	99,8	228,5	38,2	46,7	120	359,2	379,9	4,3	6,7
250	282,6	293,4	13,8	16,6	230	99,8	235,8	39,7	46,2	250	99,2	227,9	39,1	46,9	130	298,5	337,2	8,2	13,2
260	262,0	291,1	15,6	19,2	240	98,6	231,7	40,7	46,8	260	98,5	226,4	40,3	47,3	140	211,5	294,1	13,5	19,6
270	170,5	240,3	44,1	48,7	250	98,0	233,3	41,1	47,0	270	98,3	226,1	41,4	47,8	150	116,5	262,3	19,6	26,0
280	100,9	230,5	44,7	52,3	260	97,4	234,2	41,9	47,2	280	97,8	226,3	41,9	47,9	160	108,5	250,9	23,6	28,4
300	96,4	229,6	44,9	52,8	280	98,2	231,8	42,2	47,7	300	93,2	226,6	43,0	48,2	170	106,7	249,7	27,7	32,7
320	96,0	229,2	45,2	53,2	300	98,6	228,1	42,3	48,6	320	92,4	225,9	43,2	48,4	180	104,3	248,2	30,1	34,7
330	95,9	228,6	45,1	53,4	320	97,7	229,0	42,2	49,1	330	92,6	226,4	43,4	48,5	190	103,2	247,6	31,3	37,7
340	94,1	227,5	45,3	53,3	340	98,5	228,6	42,4	49,4	340	92,3	226,1	43,5	48,4	200	102,8	243,5	32,1	39,4
350	93,8	228,7	45,6	53,2	350	98,3	227,9	42,5	49,5	350	92,4	226,0	43,7	48,5	220	101,6	241,0	33,4	41,4
400	92,4	228,0	45,7	53,1	400	96,3	228,2	42,7	49,5	400	92,1	226,6	43,9	48,6	250	100,5	236,1	34,1	43,8
500	92,5	226,2	45,6	52,9	500	93,6	228,3	42,9	49,7	500	94,3	226,3	43,7	48,5	500	99,3	235,5	35,7	44,2

Tabela A9.3.4. Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 7,0 – 0,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (prędkość odlewania 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h

Średnica drutu 7,0 mm					Średnica drutu 5,5 mm					Średnica drutu 4,5 mm					Średnica drutu 0,5 mm				
T	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	T	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	T	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	T	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>
[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
20	260,9	264,5	1,2	4,2	20	323,2	337,4	1,0	2,2	20	359,0	368,0	0,8	1,8	20	459,7	472,8	0,4	1,5
100	258,3	262,3	2,2	4,4	100	322,5	334,6	1,2	2,3	100	356,7	366,1	1,0	2,1	70	458,7	469,5	0,5	1,6
150	253,3	258,9	2,6	4,9	150	320,7	332,9	1,4	2,6	150	353,1	362,9	1,3	2,6	80	454,6	467,6	0,6	1,8
180	249,6	255,3	2,9	5,3	180	315,4	331,1	1,8	3,5	180	348,9	359,5	1,5	3,2	90	453,2	465,1	0,7	1,4
200	247,3	252,5	3,4	5,6	200	311,2	329,2	2,5	4,1	200	340,3	357,1	1,8	3,8	100	450,8	463,9	0,8	1,2
220	246,8	249,1	3,7	6,8	210	310,9	328,4	2,9	4,4	220	337,7	352,5	2,4	4,1	110	449,2	462,5	0,8	1,3
240	245,7	245,7	4,1	7,0	220	305,9	327,6	3,1	4,5	240	323,1	341,3	2,8	4,5	120	447,1	455,3	0,9	1,6
250	242,4	244,9	4,3	8,1	230	304,2	324,8	3,4	4,6	250	310,5	331,9	3,9	5,2	130	439,8	447,6	0,9	1,4
260	238,9	240,4	4,7	8,9	240	302,5	320,2	3,6	4,7	260	299,9	318,5	5,0	7,1	140	413,8	427,1	1,2	1,6
270	235,1	239,7	5,3	9,4	250	293,6	311,6	3,8	4,8	270	213,9	289,5	12,4	26,7	150	389,3	411,0	1,2	2,2
280	232,9	239,3	5,8	9,9	260	290,1	302,5	4,1	5,4	280	107,4	221,3	35,2	43,4	160	367,3	385,7	1,6	2,5
300	221,4	236,4	6,5	10,5	280	246,9	278,9	4,9	8,6	300	95,4	216,2	36,9	44,7	170	347,8	370,2	4,3	6,6
320	201,1	228,2	7,7	12,6	300	144,3	240,6	19,3	22,7	320	94,8	209,9	38,2	44,9	180	313,1	330,9	10,1	16,1
330	168,7	225,7	19,2	21,5	320	94,5	217,1	41,1	47,0	330	94,1	207,2	38,4	45,3	190	214,8	292,4	15,3	24,4
340	140,2	217,2	29,8	32,7	340	93,1	213,7	41,9	47,5	340	93,5	205,2	38,3	45,1	200	113,3	258,9	19,8	29,4
350	111,6	212,9	41,3	47,9	350	93,9	207,3	42,0	48,0	350	92,7	204,6	38,4	45,5	220	105,8	256,6	30,2	36,2
400	90,5	202,6	42,9	49,5	400	93,6	202,4	42,4	48,5	400	93,0	203,5	38,6	45,3	250	103,3	255,9	31,2	37,4
500	91,2	202,5	43,2	50,2	500	93,3	201,9	43,5	49,5	500	91,5	203,6	38,5	45,2	500	96,7	255,8	31,7	37,9



Tabela A9.3.7. Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFe z linii Upcast (prędkość odlewania 0,5 – 3,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 60 l/min.) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h

T	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej krystalizator [l/min.]															
	0,5 / 60				1,0 / 60				2,0 / 60				3,0 / 60			
	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>
[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
20	405,7	427,8	0,6	0,7	432,4	436,6	0,7	1,0	442,7	444,6	0,7	1,1	435,9	439,7	0,7	1,1
100	405,2	426,5	0,6	0,7	432,0	435,2	0,7	1,1	441,7	444,4	0,7	1,2	435,7	438,8	0,7	1,2
120	404,6	424,8	0,7	0,8	431,7	434,1	0,7	1,1	441,1	443,8	0,7	1,3	435,6	438,6	0,6	1,1
140	403,7	423,2	0,7	0,8	431,5	433,6	0,7	1,0	440,3	443,2	0,8	1,2	435,5	438,4	0,6	1,3
160	402,2	421,8	0,7	0,9	428,7	430,6	0,6	0,9	440,4	441,7	0,7	1,2	428,9	429,3	0,7	1,3
170	397,3	412,4	0,8	1,2	423,5	428,5	0,7	1,0	437,9	439,7	0,8	1,3	427,2	428,9	0,7	1,4
180	392,5	399,8	0,9	1,3	418,4	421,3	0,7	1,1	433,4	437,2	0,7	1,2	425,9	428,0	0,7	1,4
190	374,7	377,6	1,3	2,2	399,7	405,4	0,8	1,6	422,5	431,2	0,8	1,6	404,2	418,5	0,8	1,4
200	324,6	333,4	4,5	4,7	355,5	367,0	1,4	1,9	392,7	398,8	1,4	1,9	395,7	403,1	1,0	1,4
210	258,9	298,4	8,0	9,3	302,3	329,5	4,2	7,3	297,6	324,7	3,0	5,9	292,5	352,6	3,3	6,1
220	185,4	266,6	17,3	18,0	184,8	287,9	15,1	15,9	206,8	302,4	16,5	17,7	206,9	308,9	13,7	14,2
230	132,9	259,7	25,8	28,2	143,3	263,2	25,7	29,4	152,4	269,6	26,3	30,3	148,7	276,4	26,7	28,6
240	92,6	250,2	32,0	36,7	95,5	245,3	32,7	36,6	95,8	258,1	32,7	37,6	94,0	247,0	32,6	37,8
260	89,7	247,1	32,9	37,9	97,4	241,8	34,3	38,0	103,4	247,7	34,6	38,7	103,3	243,5	33,5	38,6
280	92,8	246,3	33,5	37,9	98,5	240,3	34,7	38,3	102,6	247,1	34,5	38,9	99,2	244,8	34,1	38,8
300	88,8	245,9	34,1	38,0	100,9	240,2	35,4	38,7	99,8	246,6	34,7	38,8	99,0	244,6	34,5	38,9
400	89,2	245,1	34,4	38,1	99,7	239,5	35,6	39,0	99,6	245,8	34,8	39,5	98,3	243,9	34,6	39,0
500	88,9	244,8	34,7	38,3	99,4	239,8	35,7	39,2	99,5	245,2	34,9	39,4	98,6	243,7	34,7	39,3

Tabela A9.3.8. Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFe z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 – 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 40 l/min.) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h

T	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej krystalizator [l/min.]															
	1,0 / 40				2,0 / 40				3,0 / 40				4,0 / 40			
	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>
[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
20	433,8	433,9	0,8	1,1	428,8	432,5	0,6	1,0	440,2	442,1	0,7	0,7	445,1	448,9	0,7	1,0
100	435,8	438,3	0,7	1,0	432,7	436,7	0,7	1,0	439,7	441,4	0,7	0,7	439,6	443,5	0,7	1,0
120	437,2	439,8	0,8	1,1	436,4	439,1	0,7	1,0	438,4	440,6	0,7	0,8	435,7	439,2	0,7	1,0
140	439,5	441,3	0,6	1,0	438,7	441,4	0,7	1,0	437,2	439,5	0,7	0,9	433,2	435,9	0,7	1,0
160	427,8	428,2	0,7	1,1	436,1	438,2	0,6	0,9	436,1	438,8	0,7	1,0	439,2	441,8	0,7	1,1
170	419,4	425,1	0,8	1,2	432,5	434,5	0,6	1,0	434,5	437,8	0,8	1,1	436,7	440,7	0,7	1,2
180	408,1	412,8	0,8	1,3	429,1	431,1	0,6	0,7	432,6	436,5	0,8	1,2	434,6	437,5	0,7	0,9
190	387,4	396,6	1,6	2,2	420,3	422,6	0,7	0,8	425,6	431,6	0,9	1,3	430,8	434,1	0,9	1,3
200	355,7	366,6	2,0	2,5	380,8	386,3	0,7	0,8	375,1	383,1	1,3	1,4	393,5	402,0	1,2	1,6
210	294,5	309,4	4,0	7,6	300,7	304,7	3,1	6,3	299,6	304,3	3,2	6,5	302,3	308,5	3,3	4,5
220	175,9	277,2	13,1	13,6	163,4	284,8	18,5	19,3	157,6	279,5	17,5	18,4	185,5	290,1	12,5	17,1
230	121,6	260,1	21,9	26,3	132,9	267,4	22,2	23,4	121,3	262,7	24,6	26,2	137,3	267,9	24,3	25,4
240	94,5	243,6	33,1	36,4	93,1	246,9	32,7	37,6	97,1	245,8	33,0	38,5	96,0	246,4	33,9	39,1
260	100,3	241,0	34,1	38,3	95,6	246,4	34,3	38,9	97,4	248,5	34,6	39,6	98,2	244,4	34,7	39,2
280	100,8	240,6	35,6	38,9	98,7	245,8	34,7	39,0	98,2	246,3	35,9	39,9	97,6	243,5	34,8	39,4
300	104,6	240,2	35,3	39,4	102,2	245,2	35,5	39,3	100,7	246,3	35,4	40,6	103,2	242,7	34,9	39,5
400	103,1	240,1	35,6	39,9	101,5	245,1	35,3	39,1	99,8	245,8	36,1	40,5	101,2	242,5	35,0	39,8
500	102,9	239,8	35,8	40,3	100,8	244,8	35,2	39,4	99,7	245,2	36,0	40,7	100,4	242,3	35,2	40,1

Tabela A9.3.9. Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z pręta z miedzi w gatunku Cu-OFe z linii Upcast (prędkość odlewania 1,0 – 4,0 m/min., wydatek wody chłodzącej krystalizator 50 l/min.) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h

T	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej krystalizator [l/min.]															
	1,0 / 50				2,0 / 50				3,0 / 50				4,0 / 50			
	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>
[°C]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]
20	433,4	435,3	0,7	1,0	431,3	434,3	0,7	1,0	440,8	441,9	0,7	1,0	445,1	446,8	0,6	0,9

100	431,2	434,2	0,7	1,0	434,6	437,2	0,7	1,0	438,4	440,2	0,7	1,0	438,5	442,6	0,6	0,8
120	429,6	431,7	0,7	1,1	437,9	439,6	0,7	1,0	433,7	436,7	0,8	1,0	435,8	439,7	0,6	0,8
140	428,4	429,9	0,7	1,2	439,7	442,5	0,6	1,0	432,5	435,8	0,6	1,0	432,0	434,7	0,6	0,7
160	425,1	427,7	0,8	1,2	430,7	433,5	0,7	1,0	431,9	433,8	0,7	1,0	431,9	433,3	0,6	0,8
170	421,5	425,7	0,8	1,1	429,2	433,0	0,8	1,1	431,6	433,3	0,7	1,1	431,1	432,5	0,6	0,8
180	415,0	419,6	0,6	1,1	428,4	432,2	0,7	1,2	431,0	433,2	0,7	1,1	430,3	432,7	0,6	1,0
190	398,5	403,9	1,1	1,5	423,5	428,4	1,2	1,7	422,4	429,5	0,9	1,4	408,8	414,5	1,0	1,9
200	370,2	379,3	1,3	1,9	381,7	390,8	1,5	1,9	388,4	395,2	1,1	1,6	383,0	395,3	1,9	2,9
210	307,1	332,1	4,9	4,4	312,1	325,8	4,3	7,1	325,7	329,9	5,1	6,0	305,1	329,4	4,9	5,5
220	182,0	284,7	13,3	15,9	187,9	288,9	15,3	15,9	161,2	282,2	17,2	18,0	151,6	276,6	18,2	19,3
230	118,5	269,6	24,8	27,8	122,3	271,2	24,2	25,8	118,3	267,8	25,2	26,7	127,9	258,8	26,1	27,9
240	93,2	250,2	33,4	37,1	96,6	246,9	32,5	35,4	99,9	248,2	33,2	37,8	95,5	246,2	33,4	37,9
260	102,1	240,5	34,5	39,5	102,4	244,4	34,1	38,2	102,6	242,8	33,6	38,0	98,0	250,4	34,4	38,5
280	102,3	241,5	34,7	38,9	102,7	242,3	34,8	38,4	101,7	243,4	34,8	38,6	101,1	247,3	34,9	39,4
300	102,8	242,7	35,0	38,6	103,3	244,0	35,2	38,7	102,0	244,7	35,2	39,2	103,2	244,1	35,5	40,0
400	101,7	242,5	35,2	39,4	103,0	244,2	35,7	38,9	101,5	242,2	35,6	39,3	102,2	245,2	35,4	40,2
500	101,2	242,4	35,4	39,9	102,5	244,3	35,9	39,3	101,3	242,4	35,2	39,7	101,3	245,6	35,7	40,4

Tabela A9.3.10. Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z walcówek z miedzi w gatunku Cu-ETP i prętów z miedzi w gatunku Cu-OFE z linii Upcast (obróbka cieplna w temperaturach 100 °C, 400 °C i 900 °C w czasie 1 h) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h

Gatunek materiału wsadowego i warunki obróbki cieplnej [°C / h]												
T	Cu-ETP, 100 / 1		Cu-ETP, 400 / 1		Cu-ETP, 900 / 1		Cu-OFE, 100 / 1		Cu-OFE, 400 / 1		Cu-OFE, 900 / 1	
	R <sub>m</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>250</sub>
[°C]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
20	454,1	0,8	453,6	1,0	444,1	0,7	434,9	1,0	451,0	0,7	448,3	0,5
100	443,5	1,0	451,2	1,1	438,2	1,0	431,3	1,1	445,9	1,4	446,9	0,9
120	437,7	1,1	448,6	1,2	434,6	1,1	430,0	1,1	444,6	1,9	443,8	1,5
140	414,9	1,3	433,3	1,3	421,6	1,3	428,0	1,2	443,1	3,1	439,0	2,2
160	342,6	1,4	341,8	6,2	381,4	5,2	426,3	2,1	439,7	5,2	432,2	3,8
170	303,6	20,6	291,6	36,1	342,3	12,3	421,4	2,3	399,3	5,6	415,7	4,3
180	267,1	31,1	260,6	43,0	295,9	21,6	401,2	3,4	359,0	5,8	383,9	5,6
190	254,1	43,5	253,6	45,4	267,3	32,7	364,7	4,7	320,5	6,7	341,5	11,3
200	253,8	44,7	253,4	45,6	254,1	43,0	308,7	17,4	291,8	10,3	269,9	16,3
210	252,6	45,3	253,2	45,8	252,3	43,6	265,5	15,1	268,9	13,8	253,3	34,6
220	253,1	46,4	253,1	45,3	251,0	44,8	254,0	42,6	256,6	42,9	252,5	41,7
230	253,0	45,6	252,8	45,7	251,2	44,9	253,6	42,9	254,7	43,6	251,6	43,9
240	252,9	45,5	252,9	46,1	251,3	45,1	252,0	43,2	252,4	46,2	251,4	45,3
260	252,8	45,7	252,7	46,3	252,4	45,2	252,4	43,7	252,2	46,1	251,2	45,8
280	252,9	45,5	252,9	46,5	251,2	45,5	252,2	43,8	251,8	47,0	251,3	45,9
300	252,7	45,6	252,7	46,4	251,1	45,7	252,3	43,7	251,7	46,8	251,1	45,7
400	252,4	45,4	252,8	46,6	250,9	45,6	252,7	43,9	251,5	46,4	251,0	45,6
500	252,5	45,6	252,6	46,5	251,0	45,8	252,9	44,2	251,9	46,9	251,2	45,2

Tabela A9.3.11. Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 2,5 mm otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE po zabiegach międzyoperacyjnego wygrzewania rekrytalizującego (1w, 2w, 3w) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h

Gatunek materiału wsadowego - symboliczne oznaczenia międzyoperacyjnego wyżarzania rekrytalizującego temperatura / czas [°C / h]																									
T	Cu-ETP - 1w 230 / 1				Cu-ETP - 2w 230 / 1				Cu-ETP - 3w 230 / 1				Cu-OFE - 1w 300 / 1				Cu-OFE - 2w 300 / 1				Cu-OFE - 3w 300 / 1				
	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>0,2</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>r</sub>	A <sub>250</sub>	
[°C]	[MPa]	[%]		[MPa]	[%]			[MPa]	[%]			[MPa]	[%]			[MPa]	[%]			[MPa]	[%]			[MPa]	[%]
20	416,8	428,4	1,3	1,9	407,8	412,8	0,9	1,2	377,7	382,3	1,0	1,7	419,7	423,5	0,7	1,5	402,8	411,6	0,8	0,7	369,9	375,1	1,0	1,2	
100	416,5	425,1	1,3	2,0	407,4	411,8	0,9	1,2	377,4	382,0	1,1	1,7	419,5	422,3	0,7	1,6	402,6	410,2	0,8	0,8	369,6	374,6	1,0	1,3	
120	416,3	423,6	1,3	2,1	407,3	411,4	0,9	1,3	377,2	381,7	1,1	1,8	419,2	422,0	0,7	1,8	402,4	409,7	0,8	0,9	369,3	374,1	1,0	1,5	
140	416,0	421,2	1,3	2,3	407,1	410,5	0,9	1,3	377,0	381,6	1,1	1,8	419,0	421,7	0,7	1,9	402,0	409,2	0,8	1,1	369,2	373,0	1,0	1,4	
160	176,8	285,7	13,5	14,6	210,4	288,3	17,6	19,3	370,1	374,2	1,1	2,0	394,0	406,8	1,0	2,0	395,4	398,7	0,8	1,0	364,5	368,4	1,0	1,5	

170	100,5	251,4	30,9	37,4	103,1	250,6	29,7	36,3	345,8	357,6	1,5	2,2	358,3	356,8	1,0	2,3	378,3	371,4	1,0	2,9	361,2	365,3	1,0	1,7
180	95,8	250,9	31,6	38,6	99,9	249,1	32,5	37,9	308,4	339,1	4,1	6,0	276,2	312,2	1,1	2,6	330,2	349,2	2,8	4,0	360,6	362,0	1,0	1,8
190	93,2	250,6	33,5	40,3	91,3	244,7	33,4	39,2	123,3	252,7	21,1	22,8	191,3	286,4	6,3	9,7	264,5	303,5	8,4	10,3	347,9	355,7	1,2	2,0
200	91,6	250,0	34,1	41,3	87,6	244,4	35,7	41,7	92,7	237,3	34,6	39,2	149,4	275,5	22,0	24,5	158,6	274,8	14,6	16,1	341,3	349,0	2,1	4,1
210	89,5	247,5	34,9	41,5	87,4	244,1	35,5	42,1	92,4	236,3	34,3	39,9	121,2	260,9	29,5	32,6	122,4	260,4	22,5	25,5	258,9	294,5	3,9	7,7
220	88,9	245,8	35,1	41,4	87,1	244,0	35,6	42,3	92,0	235,6	35,2	40,2	94,8	247,2	30,9	36,4	90,8	245,2	32,5	38,4	143,2	256,2	10,2	10,3
230	88,6	245,6	35,2	41,6	87,0	243,7	35,7	42,4	91,6	235,4	35,1	40,1	93,2	244,6	32,9	38,4	81,2	243,7	33,1	40,2	112,6	244,8	22,4	23,6
240	88,8	245,2	35,1	41,3	87,3	243,9	35,4	42,1	91,8	235,5	35,4	40,3	92,3	242,8	33,3	40,1	73,2	238,9	34,2	42,5	94,7	234,6	32,9	37,8
250	88,5	245,3	35,3	41,4	86,7	244,1	35,6	42,6	91,4	235,2	35,7	40,2	92,5	242,5	33,7	40,3	73,2	238,6	34,7	42,2	94,3	234,4	33,2	38,9
260	88,6	245,7	35,1	41,6	86,4	244,0	35,3	42,5	91,6	235,6	35,8	40,5	91,9	242,3	33,2	40,1	73,9	238,7	34,5	42,6	94,6	234,1	33,1	38,7
280	88,3	245,6	35,2	41,7	86,5	244,4	35,8	42,7	91,9	235,1	35,6	40,6	91,6	242,5	33,5	40,6	73,2	238,9	34,6	42,1	94,7	234,9	33,2	38,8
300	88,5	245,9	35,3	41,8	86,7	244,6	35,4	42,5	92,0	235,0	35,8	40,4	92,0	242,8	33,8	40,3	73,8	238,5	34,2	42,7	94,2	234,6	33,4	38,6
350	88,9	245,4	35,1	41,7	86,9	244,3	35,5	42,6	91,6	234,7	35,7	40,2	92,2	242,1	34,0	40,4	73,5	238,2	34,3	42,5	94,4	234,5	33,2	38,7
500	88,7	245,7	35,4	41,8	86,6	244,1	35,7	42,4	91,9	234,9	35,6	40,5	91,8	242,4	33,8	40,5	73,9	238,4	34,4	42,1	94,9	234,7	33,4	38,9

Tabela A9.3.12. Wyniki badań własności mechanicznych drutów o średnicach 0,5 mm otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE po zabiegach międzyoperacyjnego wygrzewania rekrytalizującego (1w, 2w, 3w) poddanych zabiegom wygrzewania w czasie 1 h

Gatunek materiału wsadowego - symboliczne oznaczenie międzyoperacyjnego wygrzewania rekrytalizującego temperatura / czas [°C / h]												
T	Cu-ETP - 1w 230 / 1		Cu-ETP - 2w 230 / 1		Cu-ETP - 3w 230 / 1		Cu-OFE - 1w 300 / 1		Cu-OFE - 2w 300 / 1		Cu-OFE - 3w 300 / 1	
	R <sub>m</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>250</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>250</sub>
[°C]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]
20	461,4	1,5	464,5	1,5	453,6	1,7	450,3	1,5	437,8	1,5	432,2	1,5
70	459,2	1,8	455,7	1,6	452,1	1,8	441,5	1,5	431,2	1,5	428,7	1,6
80	454,5	1,9	444,2	1,7	440,4	1,9	431,3	1,5	423,7	1,5	426,9	1,6
90	438,7	2,0	427,4	2,0	437,5	2,2	419,7	1,6	421,3	1,5	423,1	1,6
100	415,5	2,1	416,0	2,4	423,8	2,7	410,2	1,7	414,5	1,5	417,6	1,6
110	368,0	6,7	379,6	2,9	379,7	4,6	397,5	2,6	399,1	1,6	402,1	2,0
120	314,0	19,2	339,1	7,2	344,0	5,8	365,7	8,5	380,8	7,7	390,5	4,3
130	277,3	29,4	291,2	14,6	298,4	11,4	309,7	11,4	304,5	10,1	342,9	8,6
140	255,9	38,9	266,5	37,8	262,3	26,0	285,5	21,8	284,5	18,2	279,3	20,5
150	251,2	39,8	251,7	39,8	251,9	38,5	262,4	26,3	277,4	22,4	265,9	29,8
160	248,6	39,9	249,6	40,7	245,9	40,5	255,8	34,8	252,9	35,1	251,6	37,2
170	247,1	39,6	248,5	41,8	243,2	41,7	251,5	35,2	250,7	36,6	248,2	37,6
180	245,4	40,2	247,3	42,7	241,2	42,3	245,9	35,9	248,6	38,5	244,9	38,7
190	242,5	40,6	246,2	42,6	241,0	42,5	244,3	37,8	246,3	40,1	243,1	40,3
200	238,7	41,0	242,6	42,9	240,6	42,7	242,1	39,3	243,2	42,3	242,8	41,4
220	239,3	41,4	242,1	43,5	240,5	42,9	241,8	41,4	246,7	43,6	242,5	43,0
250	239,2	42,6	241,5	44,8	240,2	42,6	241,0	41,8	245,4	45,5	239,5	43,1
500	239,5	42,5	241,2	44,6	240,6	42,8	241,3	42,2	245,6	45,4	239,3	43,3

#### 9.4. Badania własności elektrycznych drutów z miedzi w gatunku Cu-OFE i Cu-ETP

Tabela A9.4.1. Wyniki badań własności elektrycznych (rezystancja) drutów o średnicach 8,0 - 0,5 mm otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead

Średnica drutu	Odkształcenie względne	Odkształcenie rzeczywiste	S	Cu-ETP linia Contirod			Cu-OFE linia Upcast			Cu-OFE linia Rautomead		
				R <sub>20</sub>	ρ	ρ	R <sub>20</sub>	ρ	ρ	R <sub>20</sub>	ρ	ρ
[mm]	[%]	[-]	[m <sup>2</sup> ]	[mΩ]	[nΩm]	[%]	[mΩ]	[nΩm]	[%]	[mΩ]	[nΩm]	[%]
8,00	0,00	0,00	5,0E-05	0,339	17,05	100,00	0,337	16,96	100,00	0,338	17,00	100,00
7,46	13,04	0,14	4,4E-05	0,391	17,11	100,32	0,389	17,00	100,24	0,390	17,04	100,23
6,95	24,53	0,28	3,8E-05	0,452	17,14	100,53	0,449	17,05	100,49	0,450	17,06	100,32
6,43	35,40	0,44	3,2E-05	0,530	17,21	100,89	0,526	17,08	100,68	0,527	17,10	100,55
5,96	44,50	0,59	2,8E-05	0,619	17,28	101,30	0,613	17,10	100,78	0,613	17,11	100,63
5,47	53,25	0,76	2,3E-05	0,737	17,32	101,57	0,728	17,10	100,82	0,728	17,11	100,65
4,95	61,71	0,96	1,9E-05	0,903	17,38	101,91	0,889	17,11	100,87	0,891	17,14	100,83
4,47	68,78	1,16	1,6E-05	1,109	17,41	102,08	1,091	17,13	100,97	1,093	17,15	100,86



3,97	75,37	1,40	1,2E-05	1,407	17,42	102,16	1,385	17,14	101,04	1,387	17,17	100,97
3,48	81,08	1,66	9,5E-06	1,835	17,45	102,33	1,803	17,15	101,11	1,809	17,21	101,19
3,21	83,90	1,83	8,1E-06	2,158	17,46	102,40	2,120	17,16	101,15	2,128	17,22	101,27
2,80	87,75	2,10	6,2E-06	2,839	17,48	102,50	2,787	17,16	101,18	2,798	17,23	101,31
2,43	90,77	2,38	4,6E-06	3,776	17,51	102,67	3,701	17,16	101,18	3,716	17,23	101,36
2,27	91,95	2,52	4,0E-06	4,327	17,51	102,69	4,241	17,16	101,18	4,257	17,23	101,33
1,98	93,87	2,79	3,1E-06	5,688	17,51	102,69	5,575	17,17	101,19	5,598	17,24	101,37
1,68	95,59	3,12	2,2E-06	7,903	17,52	102,72	7,743	17,17	101,19	7,777	17,24	101,39
1,50	96,48	3,35	1,8E-06	9,914	17,52	102,73	9,713	17,17	101,19	9,760	17,25	101,43
1,29	97,40	3,65	1,3E-06	13,407	17,52	102,75	13,132	17,16	101,17	13,198	17,25	101,45
1,14	97,97	3,90	1,0E-06	17,165	17,52	102,73	16,820	17,17	101,21	16,900	17,25	101,45
1,00	98,44	4,16	7,9E-07	22,322	17,53	102,80	21,867	17,17	101,24	21,965	17,25	101,46
0,89	98,76	4,39	6,2E-07	28,188	17,54	102,83	27,607	17,17	101,24	27,748	17,26	101,52
0,80	99,00	4,61	5,0E-07	34,897	17,54	102,86	34,168	17,17	101,24	34,342	17,26	101,52
0,70	99,23	4,87	3,8E-07	45,588	17,54	102,87	44,627	17,17	101,24	44,863	17,27	101,54
0,63	99,38	5,08	3,1E-07	56,268	17,54	102,85	55,076	17,17	101,21	55,386	17,27	101,54
0,56	99,51	5,32	2,5E-07	71,247	17,55	102,90	69,704	17,17	101,21	70,117	17,27	101,57
0,49	99,62	5,59	1,9E-07	93,120	17,56	102,97	91,036	17,17	101,20	91,610	17,28	101,60

Tabela A9.4.2. Wyniki badań własności elektrycznych (konduktancja) drutów o średnicach 8,0 - 0,5 mm otrzymanych z miedzi w gatunku Cu-ETP z linii Contirod oraz Cu-OFE z linii Upcast i Rautomead

Średnica drutu	Odkształcenie względne	Odkształcenie rzeczywiste	S	Cu-ETP linia Contirod	Cu-OFE linia Upcast	Cu-OFE linia Rautomead	Cu-ETP linia Contirod	Cu-OFE linia Upcast	Cu-OFE linia Rautomead
				γ			γ		
				[MS/m]			[%IACS]		
[mm]	[%]	[-]	[m <sup>2</sup> ]	[MS/m]			[%IACS]		
8,00	0,00	0,00	5,03E-05	58,64	58,95	58,81	101,10	101,64	101,40
7,46	13,04	0,14	4,37E-05	58,45	58,81	58,68	100,78	101,40	101,17
6,95	24,53	0,28	3,79E-05	58,33	58,66	58,62	100,56	101,14	101,07
6,43	35,40	0,44	3,25E-05	58,12	58,55	58,49	100,20	100,95	100,84
5,96	44,50	0,59	2,79E-05	57,89	58,49	58,45	99,80	100,85	100,77
5,47	53,25	0,76	2,35E-05	57,73	58,47	58,43	99,54	100,81	100,75
4,95	61,71	0,96	1,92E-05	57,54	58,44	58,33	99,20	100,76	100,56
4,47	68,78	1,16	1,57E-05	57,44	58,38	58,31	99,04	100,66	100,53
3,97	75,37	1,40	1,24E-05	57,40	58,34	58,24	98,97	100,59	100,42
3,48	81,08	1,66	9,51E-06	57,30	58,30	58,12	98,79	100,52	100,20
3,21	83,90	1,83	8,09E-06	57,26	58,28	58,07	98,73	100,48	100,12
2,80	87,75	2,10	6,16E-06	57,21	58,26	58,05	98,63	100,45	100,09
2,43	90,77	2,38	4,64E-06	57,11	58,26	58,02	98,47	100,45	100,04
2,27	91,95	2,52	4,05E-06	57,10	58,26	58,04	98,45	100,45	100,07
1,98	93,87	2,79	3,08E-06	57,10	58,26	58,02	98,45	100,44	100,03
1,68	95,59	3,12	2,22E-06	57,08	58,26	58,00	98,42	100,44	100,01
1,50	96,48	3,35	1,77E-06	57,08	58,26	57,98	98,41	100,44	99,97
1,29	97,40	3,65	1,31E-06	57,07	58,27	57,97	98,40	100,46	99,95
1,14	97,97	3,90	1,02E-06	57,08	58,25	57,97	98,41	100,43	99,95
1,00	98,44	4,16	7,85E-07	57,04	58,23	57,97	98,35	100,39	99,94
0,89	98,76	4,39	6,22E-07	57,03	58,23	57,93	98,32	100,39	99,88
0,80	99,00	4,61	5,03E-07	57,01	58,23	57,93	98,29	100,39	99,88
0,70	99,23	4,87	3,85E-07	57,00	58,23	57,92	98,27	100,39	99,86
0,63	99,38	5,08	3,12E-07	57,01	58,25	57,92	98,30	100,42	99,86
0,56	99,51	5,32	2,46E-07	56,99	58,25	57,90	98,25	100,43	99,83
0,49	99,62	5,59	1,89E-07	56,95	58,25	57,89	98,19	100,43	99,80

Tabela A9.4.3. Wyniki badań własności elektrycznych drutów o średnicach 8,0 - 0,5 mm otrzymanych z prętów z miedzi beztlenowej z procesu ciągłego odlewania metodą DCC-AGH przy prędkościach odlewania 0,006 m/min. i 0,03 m/min. oraz różnym wydatku wody w układzie chłodzenia pierwotnego i wtórnego

Średnica drutu	Odkształcenie rzeczywiste	S	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej w układzie pierwotnym i wtórnym [l/min.]									
			0,006 / 0,1; 0,2					0,03 / 0,2; 0,4				
			R <sub>20</sub>	ρ	ρ	γ	γ	R <sub>20</sub>	ρ	ρ	γ	γ
[mm]	[-]	[m <sup>2</sup> ]	[mΩ]	[nΩm]	[%]	[MS/m]	[%IACS]	[mΩ]	[nΩm]	[%]	[MS/m]	[%IACS]

8,00	0,00	5,0E-05	0,334	16,77	100,00	59,61	102,78	0,334	16,78	100,00	59,58	102,73
7,46	0,14	4,4E-05	0,384	16,80	100,15	59,52	102,63	0,385	16,81	100,14	59,50	102,59
6,95	0,28	3,8E-05	0,443	16,82	100,27	59,45	102,51	0,444	16,83	100,27	59,42	102,45
6,43	0,44	3,2E-05	0,519	16,84	100,39	59,38	102,38	0,519	16,85	100,38	59,36	102,34
5,96	0,59	2,8E-05	0,604	16,86	100,51	59,31	102,26	0,605	16,88	100,57	59,25	102,15
5,47	0,76	2,3E-05	0,718	16,88	100,63	59,24	102,14	0,719	16,89	100,66	59,19	102,06
4,95	0,96	1,9E-05	0,878	16,89	100,69	59,21	102,08	0,878	16,91	100,73	59,15	101,98
4,47	1,16	1,6E-05	1,076	16,89	100,69	59,21	102,08	1,078	16,91	100,77	59,13	101,95
3,97	1,40	1,2E-05	1,365	16,90	100,75	59,17	102,02	1,367	16,92	100,82	59,10	101,89
3,48	1,66	9,5E-06	1,777	16,90	100,75	59,17	102,02	1,779	16,92	100,82	59,10	101,89
3,21	1,83	8,1E-06	2,088	16,90	100,73	59,18	102,03	2,091	16,92	100,83	59,09	101,89
2,80	2,10	6,2E-06	2,745	16,90	100,77	59,16	102,00	2,749	16,92	100,84	59,09	101,88
2,43	2,38	4,6E-06	3,645	16,91	100,78	59,15	101,98	3,648	16,92	100,81	59,11	101,91
2,27	2,52	4,0E-06	4,177	16,91	100,78	59,15	101,99	4,181	16,92	100,82	59,10	101,89
1,98	2,79	3,1E-06	5,491	16,91	100,79	59,15	101,98	5,497	16,93	100,85	59,08	101,87
1,68	3,12	2,2E-06	7,630	16,91	100,83	59,12	101,94	7,636	16,93	100,86	59,08	101,86
1,50	3,35	1,8E-06	9,570	16,91	100,82	59,13	101,95	9,580	16,93	100,87	59,07	101,84
1,29	3,65	1,3E-06	12,941	16,91	100,83	59,12	101,94	12,952	16,93	100,86	59,07	101,85
1,14	3,90	1,0E-06	16,571	16,91	100,83	59,12	101,93	16,585	16,93	100,87	59,07	101,85
1,00	4,16	7,9E-07	21,535	16,91	100,83	59,12	101,94	21,555	16,93	100,87	59,07	101,85
0,89	4,39	6,2E-07	27,188	16,91	100,83	59,12	101,93	27,210	16,93	100,86	59,07	101,85
0,80	4,61	5,0E-07	33,657	16,92	100,85	59,11	101,91	33,679	16,93	100,87	59,07	101,85
0,70	4,87	3,8E-07	43,960	16,92	100,85	59,11	101,91	43,992	16,93	100,88	59,07	101,84
0,63	5,08	3,1E-07	54,273	16,92	100,85	59,11	101,91	54,318	16,93	100,89	59,06	101,83
0,56	5,32	2,5E-07	68,710	16,92	100,88	59,09	101,88	68,747	16,93	100,89	59,06	101,82
0,49	5,59	1,9E-07	89,739	16,92	100,88	59,09	101,88	89,793	16,93	100,89	59,06	101,82

Tabela A9.4.4. Wyniki badań własności elektrycznych drutów o średnicach 8,0 – 0,5 mm otrzymanych z prętów z miedzi beztlenowej z procesu ciągłego odlewania metodą DCC-AGH przy prędkościach odlewania 0,06 m/min. i 0,15 m/min. oraz różnym wydatku wody w układzie chłodzenia pierwotnego i wtórnego

Średnica drutu	Odkształcenie rzeczywiste	S	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej w układzie pierwotnym i wtórnym [l/min.]									
			0,06 / 0,3; 0,6					0,15 / 0,4; 0,8				
			R <sub>20</sub>	ρ	ρ	γ	γ	R <sub>20</sub>	ρ	ρ	γ	γ
[mm]	[-]	[m <sup>2</sup> ]	[mΩ]	[nΩm]	[%]	[MS/m]	[%IACS]	[mΩ]	[nΩm]	[%]	[MS/m]	[%IACS]
8,00	0,00	5,0E-05	0,334	16,79	100,00	59,56	102,70	0,334	16,80	100,00	59,54	102,65
7,46	0,14	4,4E-05	0,385	16,83	100,24	59,42	102,46	0,385	16,83	100,21	59,41	102,43
6,95	0,28	3,8E-05	0,444	16,84	100,33	59,37	102,36	0,444	16,85	100,30	59,36	102,35
6,43	0,44	3,2E-05	0,519	16,87	100,46	59,29	102,23	0,519	16,86	100,36	59,33	102,29
5,96	0,59	2,8E-05	0,606	16,89	100,62	59,20	102,06	0,605	16,87	100,43	59,28	102,21
5,47	0,76	2,3E-05	0,720	16,92	100,78	59,10	101,90	0,720	16,92	100,73	59,11	101,91
4,95	0,96	1,9E-05	0,880	16,93	100,83	59,08	101,86	0,880	16,94	100,84	59,04	101,80
4,47	1,16	1,6E-05	1,079	16,93	100,85	59,06	101,83	1,079	16,93	100,83	59,05	101,81
3,97	1,40	1,2E-05	1,368	16,93	100,86	59,06	101,82	1,368	16,93	100,82	59,05	101,82
3,48	1,66	9,5E-06	1,780	16,93	100,84	59,07	101,84	1,781	16,94	100,85	59,04	101,79
3,21	1,83	8,1E-06	2,092	16,93	100,85	59,06	101,83	2,093	16,94	100,85	59,04	101,79
2,80	2,10	6,2E-06	2,749	16,93	100,84	59,07	101,85	2,751	16,94	100,86	59,03	101,78
2,43	2,38	4,6E-06	3,650	16,93	100,82	59,08	101,86	3,653	16,94	100,87	59,02	101,77
2,27	2,52	4,0E-06	4,183	16,93	100,84	59,07	101,85	4,185	16,94	100,84	59,04	101,80
1,98	2,79	3,1E-06	5,498	16,93	100,83	59,07	101,85	5,503	16,94	100,88	59,02	101,75
1,68	3,12	2,2E-06	7,637	16,93	100,83	59,07	101,85	7,647	16,95	100,93	58,99	101,71
1,50	3,35	1,8E-06	9,581	16,93	100,85	59,06	101,83	9,592	16,95	100,92	59,00	101,72
1,29	3,65	1,3E-06	12,953	16,93	100,84	59,07	101,84	12,972	16,95	100,94	58,98	101,69
1,14	3,90	1,0E-06	16,586	16,93	100,84	59,07	101,84	16,611	16,95	100,95	58,98	101,69
1,00	4,16	7,9E-07	21,557	16,93	100,85	59,06	101,83	21,590	16,96	100,96	58,97	101,68
0,89	4,39	6,2E-07	27,213	16,93	100,84	59,07	101,84	27,270	16,97	101,01	58,94	101,63
0,80	4,61	5,0E-07	33,681	16,93	100,84	59,07	101,84	33,752	16,97	101,01	58,94	101,63
0,70	4,87	3,8E-07	43,999	16,93	100,86	59,06	101,82	44,083	16,97	101,01	58,94	101,63
0,63	5,08	3,1E-07	54,321	16,93	100,86	59,06	101,82	54,422	16,96	101,01	58,95	101,63

0,56	5,32	2,5E-07	68,751	16,93	100,86	59,05	101,82	68,870	16,96	100,99	58,95	101,64
0,49	5,59	1,9E-07	89,794	16,93	100,86	59,06	101,82	89,989	16,97	101,03	58,93	101,60

Tabela A9.4.5. Wyniki badań własności elektrycznych drutów o średnicach 8,0 – 0,5 mm otrzymanych z prętów z miedzi beztlenujowej z procesu ciągłego odlewania metodą DCC-AGH przy prędkości odlewania 0,2 m/min. oraz wydatku wody w układzie chłodzenia pierwotnego na poziomie 0,5 l/min. i wtórnego na poziomie 1,0 l/min.

Średnica drutu	Odształcenie względne	Odształcenie rzeczywiste	S	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej w układzie pierwotnym i wtórnym [l/min.]				
				0,2 / 0,5; 1,0				
				R <sub>20</sub>	ρ	ρ	γ	γ
[mm]	[%]	[-]	[m <sup>2</sup> ]	[mΩ]	[nΩm]	[%]	[MS/m]	[%IACS]
8,00	0,00	0,00	5,0E-05	0,335	16,83	100,00	59,42	102,45
7,46	13,04	0,14	4,4E-05	0,385	16,85	100,10	59,36	102,35
6,95	24,53	0,28	3,8E-05	0,444	16,85	100,11	59,36	102,34
6,43	35,40	0,44	3,2E-05	0,520	16,89	100,34	59,22	102,11
5,96	44,50	0,59	2,8E-05	0,605	16,89	100,34	59,22	102,10
5,47	53,25	0,76	2,3E-05	0,720	16,92	100,51	59,12	101,93
4,95	61,71	0,96	1,9E-05	0,880	16,93	100,63	59,05	101,81
4,47	68,78	1,16	1,6E-05	1,081	16,96	100,77	58,97	101,67
3,97	75,37	1,40	1,2E-05	1,370	16,96	100,77	58,97	101,67
3,48	81,08	1,66	9,5E-06	1,783	16,96	100,77	58,97	101,67
3,21	83,90	1,83	8,1E-06	2,095	16,96	100,76	58,97	101,68
2,80	87,75	2,10	6,2E-06	2,757	16,98	100,88	58,91	101,56
2,43	90,77	2,38	4,6E-06	3,659	16,97	100,83	58,93	101,60
2,27	91,95	2,52	4,0E-06	4,192	16,97	100,81	58,94	101,63
1,98	93,87	2,79	3,1E-06	5,511	16,97	100,83	58,93	101,61
1,68	95,59	3,12	2,2E-06	7,656	16,97	100,85	58,92	101,59
1,50	96,48	3,35	1,8E-06	9,599	16,96	100,80	58,95	101,64
1,29	97,40	3,65	1,3E-06	12,983	16,97	100,83	58,93	101,61
1,14	97,97	3,90	1,0E-06	16,632	16,98	100,88	58,91	101,56
1,00	98,44	4,16	7,9E-07	21,604	16,97	100,83	58,94	101,61
0,89	98,76	4,39	6,2E-07	27,298	16,98	100,91	58,88	101,52
0,80	99,00	4,61	5,0E-07	33,783	16,98	100,91	58,89	101,53
0,70	99,23	4,87	3,8E-07	44,124	16,98	100,90	58,89	101,53
0,63	99,38	5,08	3,1E-07	54,473	16,98	100,90	58,89	101,54
0,56	99,51	5,32	2,5E-07	68,916	16,97	100,86	58,91	101,57
0,49	99,62	5,59	1,9E-07	90,014	16,97	100,86	58,91	101,57

Tabela A9.4.6. Wyniki badań własności elektrycznych drutów o średnicach 8,0 – 0,5 mm otrzymanych z prętów z miedzi beztlenujowej z procesu ciągłego odlewania metodą Upcast przy prędkościach odlewania 0,5 m/min. i 1,0 m/min. oraz wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min.

Średnica drutu	Odształcenie rzeczywiste	S	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej krystalizator [l/min.]									
			0,5 / 60				1,0 / 60					
			R <sub>20</sub>	ρ	ρ	γ	γ	R <sub>20</sub>	ρ	ρ	γ	γ
[mm]	[-]	[m <sup>2</sup> ]	[mΩ]	[nΩm]	[%]	[MS/m]	[%IACS]	[mΩ]	[nΩm]	[%]	[MS/m]	[%IACS]
8,00	0,00	5,0E-05	0,336	16,88	100,00	59,26	102,17	0,336	16,90	100,00	59,16	102,00
7,46	0,14	4,4E-05	0,387	16,90	100,14	59,18	102,03	0,387	16,92	100,10	59,10	101,90
6,95	0,28	3,8E-05	0,446	16,93	100,31	59,08	101,86	0,447	16,96	100,32	58,97	101,67
6,43	0,44	3,2E-05	0,522	16,95	100,43	59,01	101,74	0,523	16,98	100,47	58,88	101,52
5,96	0,59	2,8E-05	0,608	16,97	100,53	58,94	101,63	0,609	16,99	100,51	58,86	101,48
5,47	0,76	2,3E-05	0,722	16,97	100,58	58,92	101,58	0,724	17,02	100,70	58,75	101,29
4,95	0,96	1,9E-05	0,883	16,99	100,70	58,85	101,46	0,885	17,03	100,76	58,72	101,23
4,47	1,16	1,6E-05	1,084	17,01	100,80	58,79	101,36	1,086	17,04	100,82	58,68	101,17
3,97	1,40	1,2E-05	1,375	17,02	100,86	58,76	101,30	1,378	17,06	100,91	58,62	101,08
3,48	1,66	9,5E-06	1,790	17,03	100,89	58,74	101,27	1,794	17,06	100,95	58,60	101,04
3,21	1,83	8,1E-06	2,104	17,03	100,91	58,73	101,25	2,110	17,08	101,02	58,56	100,97
2,80	2,10	6,2E-06	2,767	17,04	100,95	58,70	101,21	2,774	17,08	101,05	58,55	100,94
2,43	2,38	4,6E-06	3,673	17,04	100,95	58,70	101,21	3,682	17,08	101,02	58,56	100,97
2,27	2,52	4,0E-06	4,209	17,04	100,95	58,70	101,21	4,221	17,08	101,06	58,54	100,93

1,98	2,79	3,1E-06	5,533	17,04	100,96	58,70	101,20	5,548	17,08	101,06	58,54	100,93
1,68	3,12	2,2E-06	7,684	17,03	100,94	58,71	101,22	7,706	17,08	101,06	58,54	100,93
1,50	3,35	1,8E-06	9,642	17,04	100,97	58,69	101,19	9,666	17,08	101,05	58,54	100,94
1,29	3,65	1,3E-06	13,036	17,04	100,97	58,69	101,19	13,072	17,08	101,07	58,53	100,92
1,14	3,90	1,0E-06	16,698	17,04	101,00	58,67	101,16	16,740	17,09	101,08	58,53	100,91
1,00	4,16	7,9E-07	21,699	17,04	100,99	58,68	101,17	21,753	17,08	101,07	58,53	100,92
0,89	4,39	6,2E-07	27,394	17,04	100,99	58,68	101,17	27,460	17,08	101,06	58,54	100,93
0,80	4,61	5,0E-07	33,904	17,04	100,99	58,68	101,17	33,993	17,09	101,09	58,52	100,90
0,70	4,87	3,8E-07	44,283	17,04	100,99	58,68	101,17	44,395	17,09	101,08	58,53	100,91
0,63	5,08	3,1E-07	54,662	17,04	100,97	58,69	101,19	54,800	17,08	101,06	58,54	100,93
0,56	5,32	2,5E-07	69,177	17,04	100,97	58,69	101,19	69,359	17,08	101,06	58,54	100,93
0,49	5,59	1,9E-07	90,382	17,04	101,00	58,67	101,16	90,600	17,08	101,07	58,53	100,92

Tabela A9.4.7. Wyniki badań własności elektrycznych drutów o średnicach 8,0 – 0,5 mm otrzymanych z prętów z miedzi beztlenuowej z procesu ciągłego odlewania metodą Upcast przy prędkościach odlewania 2,0 m/min. i 3,0 m/min. oraz wydatku wody chłodzącej krystalizator na poziomie 60 l/min.

Średnica drutu [mm]	Odkształcenie rzeczywiste [-]	S [m <sup>2</sup> ]	Prędkość odlewania [m/min.] / Wydatek wody chłodzącej krystalizator [l/min.]									
			2,0 / 60					3,0 / 60				
			R <sub>20</sub> [mΩ]	ρ [nΩm]	ρ [%]	γ [MS/m]	γ [%IACS]	R <sub>20</sub> [mΩ]	ρ [nΩm]	ρ [%]	γ [MS/m]	γ [%IACS]
8,00	0,00	5,0E-05	0,337	16,92	100,00	59,11	101,92	0,337	16,94	100,00	59,04	101,79
7,46	0,14	4,4E-05	0,388	16,97	100,30	58,94	101,61	0,389	16,98	100,26	58,88	101,53
6,95	0,28	3,8E-05	0,448	16,99	100,44	58,85	101,47	0,448	17,01	100,44	58,78	101,34
6,43	0,44	3,2E-05	0,524	17,03	100,68	58,72	101,23	0,525	17,05	100,66	58,65	101,12
5,96	0,59	2,8E-05	0,611	17,05	100,76	58,66	101,15	0,611	17,06	100,70	58,63	101,08
5,47	0,76	2,3E-05	0,726	17,05	100,81	58,64	101,10	0,726	17,07	100,76	58,59	101,02
4,95	0,96	1,9E-05	0,887	17,07	100,92	58,57	100,98	0,888	17,09	100,87	58,53	100,91
4,47	1,16	1,6E-05	1,089	17,09	101,02	58,51	100,89	1,090	17,10	100,94	58,49	100,84
3,97	1,40	1,2E-05	1,382	17,10	101,11	58,46	100,80	1,383	17,12	101,06	58,42	100,72
3,48	1,66	9,5E-06	1,799	17,11	101,15	58,44	100,76	1,801	17,13	101,12	58,38	100,66
3,21	1,83	8,1E-06	2,115	17,12	101,17	58,43	100,74	2,118	17,14	101,17	58,35	100,61
2,80	2,10	6,2E-06	2,781	17,12	101,22	58,40	100,69	2,783	17,14	101,18	58,35	100,60
2,43	2,38	4,6E-06	3,690	17,11	101,16	58,43	100,75	3,696	17,14	101,19	58,34	100,59
2,27	2,52	4,0E-06	4,228	17,11	101,15	58,44	100,76	4,233	17,13	101,15	58,37	100,63
1,98	2,79	3,1E-06	5,558	17,11	101,16	58,43	100,75	5,565	17,14	101,17	58,36	100,61
1,68	3,12	2,2E-06	7,725	17,12	101,22	58,40	100,69	7,731	17,14	101,18	58,35	100,60
1,50	3,35	1,8E-06	9,687	17,12	101,19	58,42	100,72	9,699	17,14	101,19	58,34	100,59
1,29	3,65	1,3E-06	13,101	17,12	101,22	58,40	100,69	13,110	17,13	101,16	58,36	100,62
1,14	3,90	1,0E-06	16,774	17,12	101,21	58,41	100,70	16,788	17,14	101,16	58,36	100,62
1,00	4,16	7,9E-07	21,813	17,13	101,27	58,37	100,64	21,826	17,14	101,20	58,34	100,58
0,89	4,39	6,2E-07	27,537	17,13	101,27	58,37	100,64	27,546	17,14	101,17	58,35	100,61
0,80	4,61	5,0E-07	34,064	17,12	101,21	58,40	100,70	34,106	17,14	101,21	58,33	100,57
0,70	4,87	3,8E-07	44,498	17,12	101,23	58,39	100,68	44,553	17,15	101,23	58,32	100,56
0,63	5,08	3,1E-07	54,898	17,11	101,16	58,43	100,75	55,011	17,15	101,24	58,32	100,54
0,56	5,32	2,5E-07	69,488	17,11	101,17	58,43	100,74	69,603	17,14	101,21	58,33	100,57
0,49	5,59	1,9E-07	90,813	17,12	101,23	58,39	100,68	90,906	17,14	101,20	58,33	100,58

## A.II. Rozdział 10 – Badania aplikacyjne nad przemysłową technologią wytwarzania kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6

### 10.2. Pomiary parametrów transmisyjnych kabli teleinformatycznych UTP kategorii 6

Tabela A10.2.1. Wyniki badań rezystancji elektrycznej żył przewodzących o średnicach 0,58 mm z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6

Gatunek materiału wsadowego	V <sub>odl.</sub>	Średnica drutu [mm]	S [m <sup>2</sup> ]	R <sub>a20°C</sub>	R <sub>b20°C</sub>	R <sub>20°C</sub>	R <sub>ub</sub>	ρ <sub>a20°C</sub>	ρ <sub>b20°C</sub>	γ <sub>a20°C</sub>	γ <sub>b20°C</sub>
	[m/min.]			[Ω/100m]	[Ω/100m]	[Ω/100m]	[%]	[nΩm]	[nΩm]	[MS/m]	[MS/m]

Para 1 - długość skoku skrętu 17,4 mm											
Cu-ETP	-	0,58	2,64E-07	6,778	6,779	13,56	0,01	17,91	17,91	55,84	55,83
Cu-OFE	4,0			6,754	6,753	13,51	0,01	17,84	17,84	56,04	56,05
Cu-OFE	0,5			6,744	6,743	13,49	0,01	17,82	17,82	56,12	56,13
Para 2 - długość skoku skrętu 10,1 mm											
Cu-ETP	-	0,58	2,64E-07	7,063	7,062	14,13	0,01	18,66	18,66	53,59	53,60
Cu-OFE	4,0			7,015	7,014	14,03	0,01	18,53	18,53	53,95	53,96
Cu-OFE	0,5			7,001	7,002	14,00	0,01	18,50	18,50	54,06	54,05
Para 3 - długość skoku skrętu 15,4 mm											
Cu-ETP	-	0,58	2,64E-07	6,832	6,834	13,67	0,01	18,05	18,06	55,40	55,39
Cu-OFE	4,0			6,798	6,798	13,60	0,00	17,96	17,96	55,68	55,68
Cu-OFE	0,5			6,789	6,789	13,58	0,00	17,94	17,94	55,75	55,75
Para 4 - długość skoku skrętu 12,8 mm											
Cu-ETP	-	0,58	2,64E-07	6,896	6,897	13,79	0,01	18,22	18,22	54,89	54,88
Cu-OFE	4,0			6,864	6,864	13,73	0,00	18,13	18,13	55,14	55,14
Cu-OFE	0,5			6,852	6,851	13,70	0,00	18,10	18,10	55,24	55,25
ISO/IEC 11801:2002 [max]											
							25,00	3,00			
PN EN 50288-6-1											
							≤ 19,00	≤ 2,00			

Tabela A10.2.2. Wyniki badań pojemności skutecznej pomiędzy żyłami przewodzącymi z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tego samego toru symetrycznego tworzącego czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6

Gatunek materiału wsadowego	V <sub>odl.</sub> [m/min.]	Tory przewodowe [n]	Pojemność skuteczna C	Asymetria pojemności względem ziemi E
			[nF/100m]	[pF/100m]
Cu-ETP	-	1 - 2	51,16	9
Cu-OFE	4,0	1 - 2	51,10	8
Cu-OFE	0,5	1 - 2	51,39	9
Cu-ETP	-	2 - 3	51,48	11
Cu-OFE	4,0	2 - 3	51,12	10
Cu-OFE	0,5	2 - 3	51,21	10
Cu-ETP	-	3 - 4	50,29	8
Cu-OFE	4,0	3 - 4	51,09	7
Cu-OFE	0,5	3 - 4	51,98	9
Cu-ETP	-	4 - 1	50,80	10
Cu-OFE	4,0	4 - 1	51,28	10
Cu-OFE	0,5	4 - 1	51,69	8
PN EN 50288-6-1				
				≤ 160

Tabela A10.2.3. Wyniki badań impedancji falowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6

Częstotliwość [MHz]	Materiał wsadowy											
	Cu-ETP				Cu-OFE - V <sub>odl.</sub> = 4,0 m/min.				Cu-OFE - V <sub>odl.</sub> = 0,5 m/min.			
	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4
0,77	112,57	104,77	110,73	111,79	104,34	96,98	102,80	100,75	102,17	94,37	100,37	98,09
20,71	107,80	101,23	105,60	106,64	100,95	93,11	99,17	98,44	98,48	90,50	96,59	95,57
40,65	106,32	99,98	104,56	107,21	100,79	93,23	99,93	97,51	98,95	90,76	94,91	94,70
60,59	107,81	100,67	106,88	105,63	100,69	93,77	99,82	97,80	97,02	89,45	93,50	94,79
80,53	109,67	102,33	107,36	107,40	100,72	93,07	99,83	96,45	97,24	91,17	93,95	95,01
100,46	108,27	100,50	106,47	106,47	101,25	96,21	100,06	97,98	98,18	90,26	96,23	95,65
120,40	110,34	102,02	108,82	109,66	103,39	94,93	102,36	98,27	100,34	92,38	98,20	96,79
140,34	109,16	102,01	107,61	108,60	103,48	94,99	103,10	100,09	101,08	91,72	98,40	96,64
160,28	109,81	101,67	107,58	108,91	105,51	96,16	104,15	101,16	104,62	91,74	97,34	97,51
180,22	110,40	105,53	109,43	111,62	104,49	97,08	103,20	99,97	104,10	94,55	100,32	97,65
200,15	113,69	104,88	108,76	110,66	104,88	97,30	103,17	102,96	100,83	94,21	99,90	100,20
220,09	113,81	106,51	110,13	112,14	106,59	98,07	106,01	104,69	107,15	94,96	103,61	101,12
240,03	114,20	106,99	109,59	112,63	108,47	98,45	105,89	104,57	107,19	96,98	101,98	101,17
250,00	115,63	107,38	111,10	113,16	110,83	100,83	104,85	105,64	107,22	95,44	108,20	101,96

Tabela A10.2.4. Wyniki badań tłumienności odbiciowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6

Częstotliwość [MHz]	Materiał wsadowy											
	Cu-ETP				Cu-OFE - $V_{odl.} = 4,0$ m/min.				Cu-OFE - $V_{odl.} = 0,5$ m/min.			
	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4
0,77	34,19	27,16	33,99	32,60	26,20	27,96	27,72	30,54	22,19	28,12	25,60	29,14
20,71	47,31	45,61	48,29	49,43	37,80	29,24	42,91	39,66	33,29	27,29	37,56	36,22
40,65	48,74	40,74	56,08	48,03	39,74	29,78	38,95	40,55	35,02	27,22	38,01	32,76
60,59	46,73	41,90	46,54	45,23	39,73	29,90	44,72	39,97	36,20	25,97	34,32	34,46
80,53	42,91	40,61	43,92	40,06	37,92	29,21	37,32	34,70	28,63	27,80	34,34	33,86
100,46	45,11	41,03	47,14	48,84	33,49	34,75	38,82	36,32	29,06	27,02	36,22	33,77
120,40	41,25	44,25	40,77	42,48	37,78	31,96	38,04	37,73	28,25	26,10	31,51	31,99
140,34	43,61	44,66	43,94	44,37	33,38	31,31	33,36	36,99	27,98	25,07	32,93	30,66
160,28	41,60	42,07	42,19	44,29	31,97	31,57	32,76	34,77	25,20	24,72	34,50	29,31
180,22	41,13	40,90	39,24	40,49	33,36	35,03	34,37	32,09	26,21	28,06	28,18	27,94
200,15	39,35	39,45	40,05	41,29	32,61	31,88	32,39	36,94	26,03	27,96	28,69	27,24
220,09	39,95	37,12	38,94	38,83	27,93	33,59	30,26	35,69	21,99	28,46	25,61	25,70
240,03	38,76	37,22	40,90	38,17	27,71	32,62	31,29	32,44	21,74	28,29	27,08	27,01
250,00	37,05	35,64	37,75	37,70	25,25	31,83	30,62	29,70	22,71	29,29	21,82	25,30

Tabela A10.2.5. Wyniki badań tłumienności falowej żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6

Częstotliwość [MHz]	Materiał wsadowy											
	Cu-ETP				Cu-OFE - $V_{odl.} = 4,0$ m/min.				Cu-OFE - $V_{odl.} = 0,5$ m/min.			
	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4
0,77	1,58	1,61	1,62	1,75	1,56	1,58	1,60	1,72	1,55	1,58	1,61	1,70
20,71	8,26	8,39	8,46	8,52	7,87	7,91	7,95	7,92	7,62	7,65	7,68	7,65
40,65	11,83	11,96	12,13	12,15	11,24	11,28	11,37	11,34	10,84	10,87	10,91	10,87
60,59	14,63	14,76	14,98	14,95	13,85	13,89	14,02	13,99	13,45	13,48	13,51	13,48
80,53	17,00	17,13	17,40	17,41	16,07	16,11	16,28	16,25	15,67	15,70	15,73	15,69
100,46	19,13	19,26	19,61	19,59	18,09	18,13	18,34	18,31	17,69	17,72	17,76	17,72
120,40	21,06	21,19	21,62	21,52	19,89	19,93	20,09	20,06	19,29	19,32	19,35	19,32
140,34	22,87	23,00	23,45	23,38	21,59	21,63	21,82	21,79	20,99	21,02	21,05	21,02
160,28	24,48	24,61	25,08	25,08	23,09	23,13	23,37	23,34	22,39	22,42	22,45	22,41
180,22	26,13	26,26	26,77	26,58	24,53	24,57	24,76	24,73	23,83	23,86	23,89	23,86
200,15	27,64	27,77	28,35	27,93	26,02	26,06	26,22	26,19	25,32	25,35	25,38	25,35
220,09	28,99	29,12	29,78	29,51	27,45	27,49	27,60	27,57	26,75	26,78	26,81	26,78
240,03	30,25	30,38	31,16	31,01	28,84	28,88	29,11	29,08	28,14	28,17	28,20	28,17
250,00	31,02	31,15	31,85	31,47	29,19	29,23	29,52	29,49	28,29	28,32	28,35	28,32

Tabela A10.2.6. Wyniki badań prędkości propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czteroparową konstrukcję przewodową kabla teleinformatycznego kategorii 6

Częstotliwość [MHz]	Materiał wsadowy											
	Cu-ETP				Cu-OFE - $V_{odl.} = 4,0$ m/min.				Cu-OFE - $V_{odl.} = 0,5$ m/min.			
	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4
0,77	0,6376	0,5998	0,6278	0,6174	0,6761	0,6349	0,6631	0,6510	0,6822	0,6394	0,6682	0,6566
20,71	0,6724	0,6386	0,6655	0,6548	0,7071	0,6740	0,7017	0,6894	0,7106	0,6764	0,7060	0,6942
40,65	0,6755	0,6416	0,6685	0,6578	0,7101	0,6770	0,7047	0,6924	0,7134	0,6792	0,7090	0,6972
60,59	0,6768	0,6428	0,6699	0,6591	0,7116	0,6786	0,7060	0,6940	0,7148	0,6804	0,7100	0,6984
80,53	0,6778	0,6436	0,6706	0,6601	0,7124	0,6793	0,7069	0,6949	0,7158	0,6812	0,7108	0,6992
100,46	0,6784	0,6445	0,6715	0,6605	0,7133	0,6799	0,7076	0,6953	0,7164	0,6818	0,7112	0,7000
120,40	0,6789	0,6446	0,6716	0,6611	0,7134	0,6804	0,7079	0,6957	0,7168	0,6820	0,7116	0,7000
140,34	0,6791	0,6451	0,6723	0,6615	0,7139	0,6807	0,7083	0,6963	0,7170	0,6822	0,7120	0,7006
160,28	0,6794	0,6455	0,6725	0,6615	0,7144	0,6809	0,7086	0,6963	0,7174	0,6830	0,7122	0,7010
180,22	0,6795	0,6456	0,6726	0,6621	0,7144	0,6811	0,7087	0,6964	0,7178	0,6830	0,7126	0,7010
200,15	0,6798	0,6456	0,6728	0,6621	0,7144	0,6814	0,7089	0,6969	0,7178	0,6832	0,7128	0,7012
220,09	0,6798	0,6459	0,6729	0,6621	0,7147	0,6817	0,7090	0,6970	0,7178	0,6832	0,7132	0,7014
240,03	0,6801	0,6461	0,6731	0,6624	0,7149	0,6817	0,7091	0,6973	0,7180	0,6836	0,7132	0,7014
250,00	0,6801	0,6463	0,6733	0,6625	0,7149	0,6817	0,7093	0,6973	0,7180	0,6838	0,7132	0,7016

Tabela A10.2.7. Wyniki badań opóźnienia propagacji sygnału żył przewodzących z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE tworzących czteroparową konstrukcję kabla teleinformatycznego kategorii 6

Częstotliwość [MHz]	Materiał wsadowy											
	Cu-ETP				Cu-OFE - $V_{odl.} = 4,0$ m/min.				Cu-OFE - $V_{odl.} = 0,5$ m/min.			
	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4
0,77	517,800	556,250	531,375	540,500	511,500	552,571	527,429	538,000	507,575	542,975	522,350	535,450
20,71	505,125	531,500	510,250	518,500	491,325	516,610	495,610	504,468	486,575	511,775	489,775	498,775
40,65	502,875	529,000	507,875	515,875	489,182	514,325	493,039	502,325	484,375	509,775	487,775	496,175
60,59	501,875	527,875	506,875	514,875	488,182	513,182	492,039	501,325	483,575	508,775	486,775	495,175
80,53	501,000	527,000	506,375	514,375	487,610	512,610	491,610	500,468	482,975	508,375	486,375	494,775
100,46	500,875	526,875	505,875	513,875	487,039	512,039	491,039	500,325	482,575	507,775	485,975	494,175
120,40	500,625	526,375	505,750	513,875	486,896	511,753	490,753	499,610	482,175	507,775	485,775	493,775
140,34	500,000	526,000	505,250	513,375	486,610	511,610	490,610	499,468	481,975	507,375	485,775	493,775
160,28	499,875	525,875	505,000	512,875	486,039	511,182	490,610	499,325	481,775	506,775	485,175	493,775
180,22	499,875	525,875	504,875	512,875	486,039	511,039	490,182	499,325	481,775	506,775	484,975	493,575
200,15	499,875	525,625	504,875	512,875	486,039	510,753	489,896	499,182	481,575	506,775	484,775	492,975
220,09	499,875	525,375	504,875	512,875	485,896	510,753	489,896	499,182	481,575	506,775	484,575	492,975
240,03	499,750	525,250	504,625	512,875	485,896	510,753	489,753	498,468	481,375	506,775	484,575	492,775
250,00	499,750	525,250	504,625	512,750	485,896	510,753	489,753	498,468	481,175	506,775	484,575	492,775

Tabela A10.2.8. Wyniki badań przesunięcia fazowego par o największym i najmniejszym opóźnieniu propagacji dla konstrukcji przewodowej kabla teleinformatycznego kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Częstotliwość [MHz]	Materiał wsadowy		
	Cu-ETP	Cu-OFE - $V_{odl.} = 4,0$ m/min.	Cu-OFE - $V_{odl.} = 0,5$ m/min.
	Para 1		
0,77	38,45	41,07	35,40
20,71	26,38	25,29	25,20
40,65	26,13	25,14	25,40
60,59	26,00	25,00	25,20
80,53	26,00	25,00	25,40
100,46	26,00	25,00	25,20
120,40	25,75	24,86	25,60
140,34	26,00	25,00	25,40
160,28	26,00	25,14	25,00
180,22	26,00	25,00	25,00
200,15	25,75	24,71	25,20
220,09	25,50	24,86	25,20
240,03	25,50	24,86	25,40
250,00	25,50	24,86	25,60

Tabela A10.2.9. Wyniki badań tłumienności zbliznoprzemnikowej NEXT dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

f [MHz]	Materiał wsadowy																	
	Cu-ETP						Cu-OFE - $V_{odl.} = 4,0$ m/min.						Cu-OFE - $V_{odl.} = 0,5$ m/min.					
	Para 1-2	Para 1-3	Para 1-4	Para 2-3	Para 2-4	Para 3-4	Para 1-2	Para 1-3	Para 1-4	Para 2-3	Para 2-4	Para 3-4	Para 1-2	Para 1-3	Para 1-4	Para 2-3	Para 2-4	Para 3-4
0,77	95,03	86,86	92,83	96,24	99,07	86,75	98,53	89,32	93,24	96,29	97,70	92,98	98,93	90,98	90,80	98,89	98,00	90,98
20,71	73,64	70,69	70,89	74,17	73,83	68,22	77,73	69,68	71,51	79,42	78,26	71,50	80,79	75,98	79,91	82,19	78,28	75,18
40,65	66,89	62,77	60,44	70,75	67,02	65,80	78,12	66,29	69,43	78,93	77,03	70,50	77,36	68,18	74,04	78,86	78,65	72,72
60,59	66,75	61,20	59,97	66,42	65,83	64,19	70,80	67,52	66,74	76,37	74,05	67,03	73,43	68,00	67,39	74,87	75,04	69,34
80,53	68,48	58,54	57,52	70,17	65,98	60,13	71,65	64,34	63,14	72,20	71,54	66,96	71,08	68,69	64,29	74,51	75,47	66,00
100,46	64,69	59,60	60,08	68,96	57,98	65,73	66,78	64,61	62,19	72,22	71,35	62,62	70,39	65,93	64,56	71,87	74,25	68,15
120,40	65,91	60,19	55,31	64,90	60,83	61,85	68,35	65,26	64,47	70,19	68,64	63,54	69,91	63,81	64,20	71,15	71,92	66,32
140,34	70,95	57,94	59,86	68,45	63,38	62,75	70,66	64,73	63,50	65,53	70,85	63,12	71,70	63,42	66,50	75,35	73,34	66,92
160,28	62,76	65,06	53,86	64,50	61,74	64,72	64,62	62,68	61,72	68,55	67,55	65,44	70,11	66,33	66,89	74,62	71,34	65,74
180,22	59,73	60,24	61,67	62,89	65,07	58,74	68,89	63,84	60,00	67,57	72,67	62,16	70,38	64,06	61,82	75,30	69,30	62,47
200,15	58,55	64,71	57,82	61,89	66,66	56,46	70,08	62,67	60,64	68,83	68,48	63,68	71,36	68,73	63,63	71,40	70,76	63,51
220,09	62,91	58,53	55,85	69,02	60,19	58,63	68,89	61,75	60,81	64,25	66,04	60,53	70,73	70,42	65,63	71,12	70,99	61,26
240,03	61,57	54,63	57,98	63,47	62,19	59,77	68,35	58,90	64,05	68,30	67,63	60,40	66,36	67,68	67,98	69,92	65,92	59,22
250,00	63,47	56,14	55,81	60,94	60,42	57,65	63,90	61,01	61,06	68,33	64,37	55,90	68,06	69,04	61,74	70,21	71,62	59,51

Tabela A10.2.10. Wyniki badań tłumienności zdalno-przenikowej FEXT dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

f	Materiał wsadowy																	
	Cu-ETP						Cu-OFE - $V_{odl.} = 4,0$ m/min.						Cu-OFE - $V_{odl.} = 0,5$ m/min.					
[MHz]	Pary 1-2	Pary 1-3	Pary 1-4	Pary 2-3	Pary 2-4	Pary 3-4	Pary 1-2	Pary 1-3	Pary 1-4	Pary 2-3	Pary 2-4	Pary 3-4	Pary 1-2	Pary 1-3	Pary 1-4	Pary 2-3	Pary 2-4	Pary 3-4
0,77	92,45	83,18	86,88	86,69	91,80	81,22	93,60	85,07	90,26	89,38	92,84	83,09	100,3	84,27	85,80	94,52	93,65	85,13
20,71	68,75	60,83	63,37	70,48	67,97	60,98	73,06	64,60	65,41	73,40	68,14	59,50	75,92	63,85	68,79	73,29	70,99	64,23
40,65	71,99	59,92	64,22	62,47	64,09	54,82	71,60	59,99	60,96	66,84	65,72	55,53	73,70	65,00	64,98	72,93	66,34	60,37
60,59	64,89	55,19	58,55	63,23	60,83	54,27	67,80	55,37	59,75	71,47	63,74	57,46	72,90	62,58	65,01	67,33	66,23	61,45
80,53	66,36	56,52	60,26	66,04	62,19	50,91	67,80	57,95	59,35	71,17	67,44	58,79	72,07	62,82	62,08	69,37	70,51	60,28
100,46	66,71	58,08	58,37	64,41	60,49	53,15	70,51	59,22	61,79	64,16	65,02	54,04	75,40	63,90	60,99	69,34	64,42	59,12
120,40	64,55	58,83	55,77	61,96	61,01	55,44	69,32	58,95	58,42	66,86	65,52	58,26	72,25	60,05	61,10	73,94	65,01	57,48
140,34	64,57	56,23	60,74	59,52	58,36	55,65	67,76	62,88	59,97	68,27	61,27	56,75	73,53	61,83	66,19	72,64	67,95	58,66
160,28	64,82	55,53	55,54	58,61	61,94	52,67	67,61	57,97	60,43	66,63	66,24	53,46	76,13	59,94	62,76	67,85	66,67	56,61
180,22	67,59	56,39	57,32	60,85	60,42	49,23	72,90	59,36	57,49	66,91	65,19	58,09	73,62	61,43	61,57	72,92	66,85	59,24
200,15	66,28	56,64	56,52	63,52	63,72	51,42	66,82	61,36	60,40	66,91	63,06	56,08	72,91	59,12	65,20	69,98	68,20	56,90
220,09	68,04	53,61	59,64	66,30	59,82	52,06	69,19	58,55	66,18	68,06	67,15	55,52	70,91	61,24	66,29	69,74	65,99	54,90
240,03	62,55	57,72	63,28	63,97	66,51	51,25	68,85	61,50	59,86	68,20	68,37	55,39	73,99	63,99	62,28	67,77	67,56	60,13
250,00	62,38	57,60	61,57	60,64	58,69	49,93	76,65	61,21	61,40	66,28	68,11	54,61	75,51	66,30	67,48	73,18	71,20	60,57

Tabela A10.2.11. Wyniki badań tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zbliźnego PS NEXT dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Częstotliwość	Materiał wsadowy											
	Cu-ETP				Cu-OFE - $V_{odl.} = 4,0$ m/min.				Cu-OFE - $V_{odl.} = 0,5$ m/min.			
[MHz]	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4
0,77	85,07	89,86	82,87	84,22	84,17	88,60	83,08	84,88	83,61	90,95	83,48	83,93
20,71	65,12	68,13	64,96	64,01	64,75	70,31	64,43	65,74	70,01	72,67	68,93	68,58
40,65	56,87	61,56	59,24	58,00	61,23	70,04	62,15	63,42	62,94	70,24	63,62	65,73
60,59	55,86	60,42	57,25	57,48	60,80	65,27	61,48	60,18	60,37	66,14	61,97	61,67
80,53	54,42	62,62	55,72	54,99	57,74	63,08	57,99	58,24	59,28	64,57	59,52	58,96
100,46	54,91	56,54	56,95	54,73	56,33	61,36	56,91	56,19	59,05	64,09	59,82	59,16
120,40	53,46	57,33	56,63	52,61	58,18	61,11	57,57	57,01	56,44	63,20	58,23	57,81
140,34	55,24	59,87	55,24	55,76	56,81	59,90	56,56	56,36	57,69	65,13	59,13	58,90
160,28	52,27	57,49	56,80	52,45	55,78	59,16	55,98	56,69	59,35	62,78	59,81	58,77
180,22	55,19	56,02	54,12	54,96	55,88	60,97	55,66	54,58	56,17	62,58	57,53	55,84
200,15	52,76	55,93	52,96	52,69	55,64	60,40	57,19	56,34	58,64	63,02	59,16	56,51
220,09	52,64	56,17	54,13	52,76	54,93	58,87	53,59	53,70	59,16	62,11	57,02	56,07
240,03	51,38	57,13	51,84	53,05	54,60	59,17	52,86	55,31	57,84	59,23	55,40	53,98
250,00	51,79	55,64	51,77	51,45	54,57	57,00	51,62	51,70	57,11	60,71	55,34	54,25

Tabela A10.2.12. Wyniki badań tłumienności równoważnej sumie mocy przeniku zdalnego PS FEXT dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Częstotliwość	Materiał wsadowy											
	Cu-ETP				Cu-OFE - $V_{odl.} = 4,0$ m/min.				Cu-OFE - $V_{odl.} = 0,5$ m/min.			
[MHz]	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4
0,77	77,42	83,14	75,58	78,32	82,70	87,05	79,63	82,11	80,93	89,90	81,15	82,22
20,71	55,68	62,28	55,07	55,32	62,84	65,71	59,42	59,13	62,12	67,51	60,22	61,73
40,65	56,41	58,29	51,63	52,57	58,12	62,28	54,56	54,76	60,32	62,79	57,59	57,15
60,59	51,18	55,54	50,98	51,11	54,52	61,29	53,86	55,09	58,94	60,90	56,49	56,58
80,53	51,44	57,28	49,20	47,86	54,69	63,20	55,65	55,54	57,82	61,94	55,68	56,57
100,46	52,33	56,80	51,61	50,82	56,28	59,31	53,05	53,05	57,80	60,20	54,87	54,38
120,40	52,32	56,06	52,45	51,33	55,39	60,65	53,59	54,16	56,02	59,78	52,76	52,27
140,34	53,40	53,72	51,04	50,96	56,54	58,12	54,32	53,00	58,63	61,82	53,77	53,92
160,28	51,06	53,71	49,16	49,97	55,25	60,31	51,85	52,32	56,47	59,31	52,71	53,03
180,22	51,83	54,78	48,82	48,37	54,64	59,43	54,08	54,19	56,19	60,08	54,58	53,93
200,15	52,32	57,86	48,61	49,58	56,99	57,56	53,96	53,56	56,62	59,66	52,44	53,24
220,09	52,17	57,02	50,47	50,65	56,45	60,15	52,49	53,81	57,85	58,61	51,72	51,45
240,03	53,88	57,81	50,42	51,11	56,76	60,71	53,09	53,56	57,87	59,42	53,71	53,85
250,00	54,14	54,32	49,83	49,31	58,09	60,47	53,20	53,35	60,54	60,60	56,25	54,45



Tabela A10.2.13. Wyniki badań odstępu zbliznoprzemnikowego ACR dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

f	Materiał wsadowy																	
	Cu-ETP						Cu-OFE - V <sub>odl.</sub> = 4,0 m/min.						Cu-OFE - V <sub>odl.</sub> = 0,5 m/min.					
	Pary 1-2	Pary 1-3	Pary 1-4	Pary 2-3	Pary 2-4	Pary 3-4	Pary 1-2	Pary 1-3	Pary 1-4	Pary 2-3	Pary 2-4	Pary 3-4	Pary 1-2	Pary 1-3	Pary 1-4	Pary 2-3	Pary 2-4	Pary 3-4
0,77	93,42	85,24	91,08	94,62	97,32	85,00	96,96	87,73	91,52	94,70	95,98	91,26	97,35	89,37	89,10	97,28	96,30	89,28
20,71	65,24	62,23	62,37	65,71	65,31	59,70	69,82	61,73	63,60	71,47	70,34	63,58	73,14	68,29	72,26	74,51	70,62	67,53
40,65	54,94	50,64	48,30	58,62	54,87	53,65	66,84	54,91	58,09	67,56	65,69	59,15	66,49	57,28	63,17	67,95	67,77	61,85
60,59	51,98	46,23	45,01	51,45	50,88	49,23	56,90	53,50	52,75	62,35	60,06	53,04	59,95	54,49	53,91	61,35	61,56	55,86
80,53	51,35	41,14	40,11	52,77	48,56	42,72	55,55	48,07	46,89	55,93	55,30	50,71	55,39	52,97	48,59	58,78	59,77	50,31
100,46	45,44	39,99	40,49	49,35	38,39	46,14	48,65	46,27	43,88	53,88	53,04	44,31	52,66	48,17	46,84	54,11	56,53	50,43
120,40	44,72	38,57	33,79	43,28	39,30	40,33	48,42	45,18	44,42	50,10	48,58	43,48	50,59	44,46	44,88	51,80	52,60	47,00
140,34	47,96	34,49	36,49	44,99	40,00	39,37	49,03	42,91	41,71	43,70	49,06	41,33	50,68	42,37	45,49	54,30	52,32	45,90
160,28	38,14	39,98	28,77	39,42	36,66	39,64	41,50	39,31	38,38	45,18	44,21	42,10	47,69	43,88	44,47	52,17	48,93	43,32
180,22	33,48	37,48	35,08	36,12	38,48	32,16	44,32	39,08	35,26	42,81	47,94	37,43	46,53	40,17	37,96	51,41	45,45	38,61
200,15	30,78	32,35	29,89	33,53	38,73	28,52	44,01	36,45	34,45	42,60	42,29	37,49	46,01	43,34	38,28	46,02	45,41	38,16
220,09	33,79	28,75	26,35	39,24	30,68	29,12	41,40	34,14	33,24	36,64	38,47	32,96	43,95	43,61	38,86	44,31	44,21	34,48
240,03	31,19	23,46	26,96	32,31	31,18	28,76	39,48	29,79	34,97	39,19	38,54	31,32	38,19	39,48	39,82	41,72	37,75	31,05
250,00	32,32	24,29	24,34	29,09	28,95	26,18	34,67	31,49	31,57	38,81	34,88	26,41	39,74	40,68	33,42	41,85	43,30	31,19

Tabela A10.2.14. Wyniki badań odstępu zdalnoprzenikowego ELFEXT dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

f	Materiał wsadowy																	
	Cu-ETP						Cu-OFE - V <sub>odl.</sub> = 4,0 m/min.						Cu-OFE - V <sub>odl.</sub> = 0,5 m/min.					
	Pary 1-2	Pary 1-3	Pary 1-4	Pary 2-3	Pary 2-4	Pary 3-4	Pary 1-2	Pary 1-3	Pary 1-4	Pary 2-3	Pary 2-4	Pary 3-4	Pary 1-2	Pary 1-3	Pary 1-4	Pary 2-3	Pary 2-4	Pary 3-4
0,77	90,84	81,56	85,13	85,07	90,05	79,47	92,02	83,48	88,54	87,78	91,12	81,37	98,73	82,66	84,10	92,91	91,95	83,43
20,71	60,35	52,37	54,85	62,02	59,45	52,46	65,14	56,65	57,49	65,45	60,22	51,58	68,26	56,17	61,14	65,61	63,34	56,58
40,65	60,04	47,79	52,07	50,34	51,94	42,67	60,31	48,62	49,62	55,47	54,38	44,19	62,83	54,09	54,10	62,02	55,46	49,50
60,59	50,13	40,21	43,59	48,25	45,88	39,32	53,91	41,35	45,76	57,45	49,75	43,47	59,42	49,07	51,52	53,82	52,75	47,97
80,53	49,23	39,12	42,85	48,64	44,78	33,50	51,69	41,67	43,10	54,90	51,19	42,54	56,38	47,09	46,39	53,65	54,81	44,58
100,46	47,46	38,47	38,78	44,79	40,90	33,56	52,38	40,88	43,49	45,82	46,72	35,74	57,68	46,14	43,27	51,59	46,70	41,40
120,40	43,35	37,21	34,25	40,33	39,49	33,92	49,39	38,86	38,37	46,77	45,46	38,20	52,94	40,70	41,79	54,58	45,69	38,16
140,34	41,57	32,78	37,37	36,07	34,98	32,28	46,13	41,06	38,18	46,44	39,48	34,96	52,52	40,78	45,18	51,59	46,94	37,64
160,28	40,21	30,45	30,45	33,53	36,85	27,59	44,48	34,60	37,09	43,26	42,90	30,12	53,72	37,49	40,34	45,40	44,26	34,19
180,22	41,34	29,62	30,73	34,08	33,83	22,65	48,33	34,60	32,75	42,15	40,45	33,35	49,76	37,54	37,72	49,04	42,99	35,38
200,15	38,51	28,29	28,59	35,17	35,79	23,49	40,76	35,14	34,21	40,69	36,87	29,89	47,56	33,74	39,85	44,60	42,85	31,55
220,09	38,92	23,83	30,14	36,52	30,31	22,55	41,70	30,95	38,61	40,46	39,58	27,94	44,13	34,43	39,52	42,93	39,21	28,12
240,03	32,17	26,56	32,27	32,81	35,50	20,23	39,98	32,38	30,78	39,09	39,29	26,31	45,83	35,79	34,12	39,57	39,40	31,96
250,00	31,23	25,75	30,10	28,79	27,23	18,46	47,42	31,69	31,91	36,76	38,62	25,12	47,18	37,95	39,16	44,82	42,88	32,25

Tabela A10.2.15. Wyniki badań odstępu równoważnego sumie mocy przeniku zbliznego PS ACR dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Częstotliwość	Materiał wsadowy											
	Cu-ETP				Cu-OFE - V <sub>odl.</sub> = 4,0 m/min.				Cu-OFE - V <sub>odl.</sub> = 0,5 m/min.			
	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4
0,77	83,49	88,25	81,25	82,47	82,61	87,02	81,48	83,17	82,06	89,38	81,88	82,22
20,71	56,86	59,73	56,49	55,49	56,87	62,40	56,48	57,83	62,39	65,01	61,24	60,93
40,65	45,04	49,60	47,12	45,86	49,99	58,76	50,77	52,08	52,09	59,37	52,71	54,86
60,59	41,23	45,66	42,27	42,53	46,95	51,37	47,46	46,19	46,92	52,66	48,46	48,19
80,53	37,42	45,49	38,32	37,58	41,68	46,97	41,71	42,00	43,62	48,88	43,79	43,27
100,46	35,79	37,29	37,34	35,14	38,24	43,23	38,57	37,89	41,35	46,36	42,07	41,44
120,40	32,40	36,13	35,00	31,09	38,29	41,18	37,48	36,95	37,15	43,89	38,87	38,49
140,34	32,37	36,88	31,79	32,38	35,22	38,28	34,74	34,58	36,70	44,11	38,08	37,89
160,28	27,79	32,87	31,72	27,37	32,70	36,04	32,61	33,35	36,96	40,36	37,36	36,35
180,22	29,07	29,76	27,36	28,38	31,35	36,41	30,90	29,85	32,35	38,73	33,64	31,99
200,15	25,12	28,17	24,60	24,76	29,61	34,34	30,97	30,15	33,32	37,66	33,78	31,16
220,09	23,65	27,05	24,35	23,25	27,48	31,38	25,99	26,12	32,41	35,33	30,20	29,29
240,03	21,13	26,75	20,68	22,04	25,77	30,30	23,74	26,23	29,70	31,06	27,20	25,82
250,00	20,78	24,49	19,91	19,98	25,38	27,76	22,10	22,22	28,82	32,39	26,98	25,93

Tabela A10.2.16. Wyniki badań odstępu równoważnego sumie mocy przeniku zdalnego PS ELFEX dla kabli teleinformatycznych kategorii 6 z żyłami z miedzi w gatunku Cu-ETP i Cu-OFE

Częstotliwość [MHz]	Materiał wsadowy											
	Cu-ETP				Cu-OFE - $V_{odl.} = 4,0$ m/min.				Cu-OFE - $V_{odl.} = 0,5$ m/min.			
	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4	Para 1	Para 2	Para 3	Para 4
0,77	75,85	81,53	73,96	76,57	81,14	85,47	78,03	80,39	79,38	88,32	79,54	80,52
20,71	47,41	53,89	46,61	46,80	54,97	57,80	51,47	51,21	54,50	59,86	52,54	54,08
40,65	44,58	46,33	39,50	40,42	46,87	50,99	43,19	43,42	49,48	51,91	46,68	46,27
60,59	36,54	40,78	36,01	36,16	40,67	47,40	39,84	41,11	45,49	47,42	42,98	43,09
80,53	34,45	40,15	31,80	30,45	38,63	47,10	39,38	39,30	42,16	46,25	39,96	40,87
100,46	33,21	37,54	32,00	31,24	38,19	41,18	34,71	34,75	40,10	42,47	37,11	36,65
120,40	31,26	34,86	30,82	29,81	35,50	40,72	33,50	34,10	36,73	40,46	33,41	32,95
140,34	30,53	30,72	27,59	27,58	34,96	36,49	32,50	31,21	37,64	40,80	32,72	32,90
160,28	26,57	29,09	24,08	24,89	32,16	37,18	28,48	28,98	34,08	36,89	30,27	30,62
180,22	25,71	28,52	22,06	21,78	30,11	34,87	29,32	29,45	32,37	36,22	30,70	30,08
200,15	24,68	30,09	20,25	21,64	30,97	31,50	27,73	27,37	31,30	34,31	27,06	27,89
220,09	23,19	27,90	20,69	21,14	29,00	32,66	24,89	26,24	31,10	31,83	24,91	24,67
240,03	23,62	27,43	19,26	20,10	27,93	31,83	23,97	24,48	29,74	31,25	25,51	25,68
250,00	23,12	23,17	17,98	17,84	28,89	31,23	23,68	23,86	32,25	32,28	27,90	26,13