



**AKADEMIA GÓRNICZO - HUTNICZA**  
**im. Stanisława Staszica w Krakowie**

**WYDZIAŁ ODLEWNICTWA**  
**Tworzyw formierskich,**  
**Technologii Formy**  
**i Odlewnictwa Metali Nieżelaznych**



## **Rozprawa doktorska**

**Technologia wytwarzania żeliwa wermikularnego  
i sferoidalnego w warunkach Odlewni Metalpol przy użyciu  
hybrydowego przewodu elastycznego**

**mgr inż. Marcin Dyrłaga**

*Promotor pracy*

**Prof. dr hab. inż. Jerzy S. Zych**

KRAKÓW 2021

*Pragnę złożyć serdeczne podziękowania  
Panu prof. dr hab. inż. Jerzemu Zychowi  
za naukową opiekę oraz nieocenioną pomoc  
udzieloną w trakcie realizacji niniejszej pracy.  
Szczególnie dziękuję zaś za motywację,  
cierpliwość i wyrozumiałość.*

*Podziękowania kieruję również do Zarządu Odlewni  
METALPOL Węgierska Górka za umożliwienie  
przeprowadzenia badań oraz wsparcie w ich realizacji*

*Chciałbym szczególnie podziękować mojej żonie Justynie,  
za nieustanne wsparcie, cierpliwość i motywację*

## Spis treści

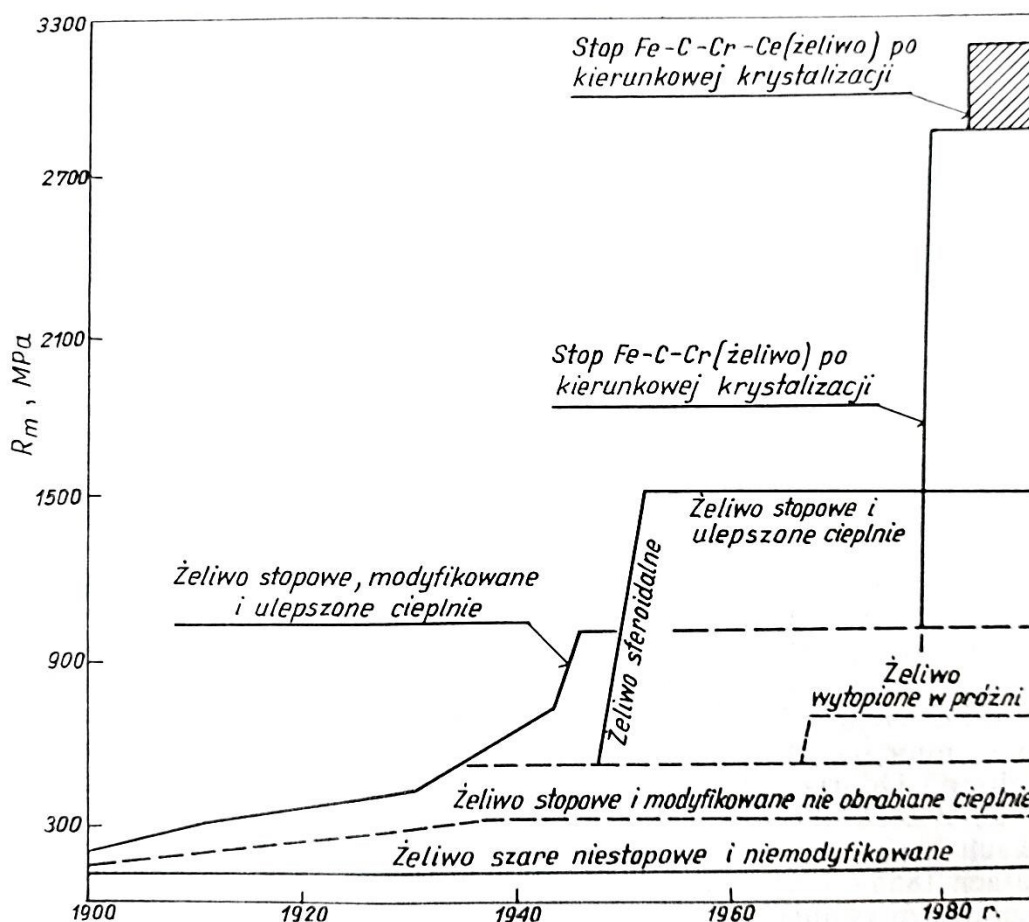
<b>Wstęp .....</b>	<b>5</b>
<b>I. Część Teoretyczna .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 Żeliwo sferoidalne i wermikularne - charakterystyka .....</b>	<b>8</b>
1.1.1 Krystalizacja eutektyki grafitowej .....	11
1.1.2 Właściwości mechaniczne oraz fizyczne żeliwa sferoidalnego i wermikularnego .....	15
1.1.3 Wpływ podstawowych pierwiastków na strukturę i właściwość żeliwa wyjściowego w procesie wytwarzania żeliwa wermikularnego i sferoidalnego .....	20
1.1.4 Metody otrzymywania żeliwa sferoidalnego oraz wermikularnego .....	25
1.1.5 Techniki wprowadzania zapraw (sferoidyzacji, wermikularyzacji) .....	30
1.1.6 Modyfikacja grafityzująca żeliwa sferoidalnego i wermikularnego .....	33
1.1.7 Metody kontroli jakości żeliwa oraz efektów obróbki pozapiecowej .....	35
1.1.8 Zastosowanie odlewów z żeliwa wermikularnego oraz sferoidalnego .....	39
<b>1.2 Sferoidyzacja / wermikularyzacja metodą przewodu elastycznego PE.....</b>	<b>41</b>
1.2.1 Skuteczność metody PE - wpływ parametrów technologicznych na proces .....	42
1.2.2 Rodzaje wypełnień prętów stosowanych w metodzie PE .....	46
1.2.3 Porównanie metody sferoidyzacji PE z innymi metodami .....	49
1.2.4 Zalety i wady stosowania metody PE .....	49
<b>1.3 Podsumowanie części teoretycznej.....</b>	<b>50</b>
<b>1.4 Cel i zakres pracy .....</b>	<b>51</b>
1.4.1 Cel pracy .....	51
1.4.2 Teza Pracy .....	51
1.4.3 Plan i zakres pracy .....	51
<b>II. Część Praktyczna .....</b>	<b>52</b>
<b>2.1 Koncepcja badań .....</b>	<b>53</b>
<b>2.2 Hybrydowy PE.....</b>	<b>54</b>
<b>2.3 Metodyka badań .....</b>	<b>56</b>
<b>2.4 Wytworzenie żeliwa sferoidalnego przy użyciu hybrydowego PE.....</b>	<b>57</b>
2.4.1 Przygotowanie i wytop żeliwa wyjściowego .....	57
2.4.2 Zabieg sferoidyzacji żeliwa przy użyciu hybrydowego PE .....	60
2.4.3 Próby na automatycznej linii formierskiej BMD .....	62
2.4.4 Ocena składu chemicznego żeliwa .....	64
2.4.5 Badania ultradźwiękowe .....	65
2.4.6 Badania właściwości mechanicznych .....	66

2.4.7	Badanie mikrostruktury żeliwa sferoidalnego otrzymanego metodą PE przy użyciu hybrydowego przewodu elastycznego .....	69
2.4.8	Badanie wpływu szybkości stygnięcia na mikrostrukturę .....	73
<b>2.5</b>	<b>Wpływ parametrów technologicznych na poziom przyswajalności magnezu ...</b>	<b>80</b>
2.5.1	Wpływ prędkości podawania pręta na stopień przyswajalności magnezu .....	81
2.5.2	Wpływ zawartości siarki w żeliwie wyjściowym na uzysk magnezu. ....	86
2.5.3	Wpływ temperatury na uzysk magnezu .....	87
2.5.4	Porównanie wyników uzysku hybrydowego PE z prętem tradycyjnym N01 - dotychczas stosowanym.....	89
<b>2.6</b>	<b>Wytworzenie żeliwa wermikularnego przy użyciu hybrydowego PE.....</b>	<b>92</b>
2.6.1	Wytop żeliwa wyjściowego .....	94
2.6.2	Zabieg wermikularyzacji przy użyciu hybrydowego PE .....	94
2.6.3	Próby wytwarzania żeliwa wermikularnego na linii formierskiej BMD .....	95
2.6.4	Ocena składu chemicznego żeliwa wermikularnego .....	96
2.6.5	Badania właściwości mechanicznych .....	98
2.6.6	Badanie wpływu szybkości stygnięcia na mikrostrukturę żeliwa wermikularnego .....	103
<b>2.7</b>	<b>Podsumowanie pracy badawczej i wnioski .....</b>	<b>111</b>
<b>Literatura.....</b>		<b>114</b>
<b>Spis Rysunków.....</b>		<b>121</b>
<b>Spis Tabel.....</b>		<b>125</b>

## Wstęp

Postęp technologii jest nieodłącznym elementem rozwoju społeczeństwa, tym samym gospodarki kraju, a także całej cywilizacji. Okres ostatnich 50 lat to prawdziwy przeskok technologiczny, wraz z rozwojem technologii nastąpił rozwój materiałów konstrukcyjnych. Jednym z takich materiałów jest żeliwo, którego właściwości oraz metody produkcji ewoluowały wraz z postępowaniem technologii.

Dzięki ciągłemu dążeniu do polepszenia własności oraz redukcji kosztów wytwarzania, żeliwo jest najczęściej stosowanym stopem odlewniczym. Znaczącymi krokami, które wpłynęły na postęp w produkcji żeliwa było wdrożenie metody otrzymywania żeliwa modyfikowanego opatentowanej przez A. F. Meehana 1922r. oraz metody otrzymywania żeliwa sferoidalnego w 1947r. Metody te pozwoliły na zwiększenie właściwości plastycznych i wytrzymałościowych materiału, jakim jest żeliwo (rys. 1).



Rys. 1. Ewolucja własności wytrzymałościowych żeliwa w wyniku wdrażania nowych metod wytwarzania [5]

Ostatnie lata to wzrost zapotrzebowania na wysokojakościowe żeliwa w szczególności w gałęziach przemysłu motoryzacyjnego i maszynowego. Do grupy tych gatunków żeliwa można zaliczyć żeliwo z kulkowymi wydzieleniami grafitu zwane sferoidalnym lub z grafitem o kształcie robaczkowym zwane wermikularnym. Dzięki posiadanym właściwościom wytrzymałościowym, technologicznymi oraz dobrej przewodności cieplnej żeliwa wermikularnego oba te żeliwa odpowiadają zapotrzebowaniu przemysłu. Często odlewy z żeliwa wermikularnego oraz sferoidalnego są elementami układów bezpieczeństwa (np. elementy układu hamowania), a zatem wskaźnik pewności, co, do jakości użytego materiału i wytworzonej części musi być bardzo wysoki. Odlewy muszą, w takich wypadkach, cechować się dużą stabilnością struktury, jej powtarzalnością w każdym wyrobie. Zatem proces wytwarzania musi charakteryzować wysoka stabilność i powtarzalność każdego etapu produkcji, począwszy od materiałów wsadowych poprzez sterowanie parametrami technologicznymi oraz stosowanie szeregu badań dających pewność otrzymania odlewów zgodnie z wymaganiami i specyfikacjami.

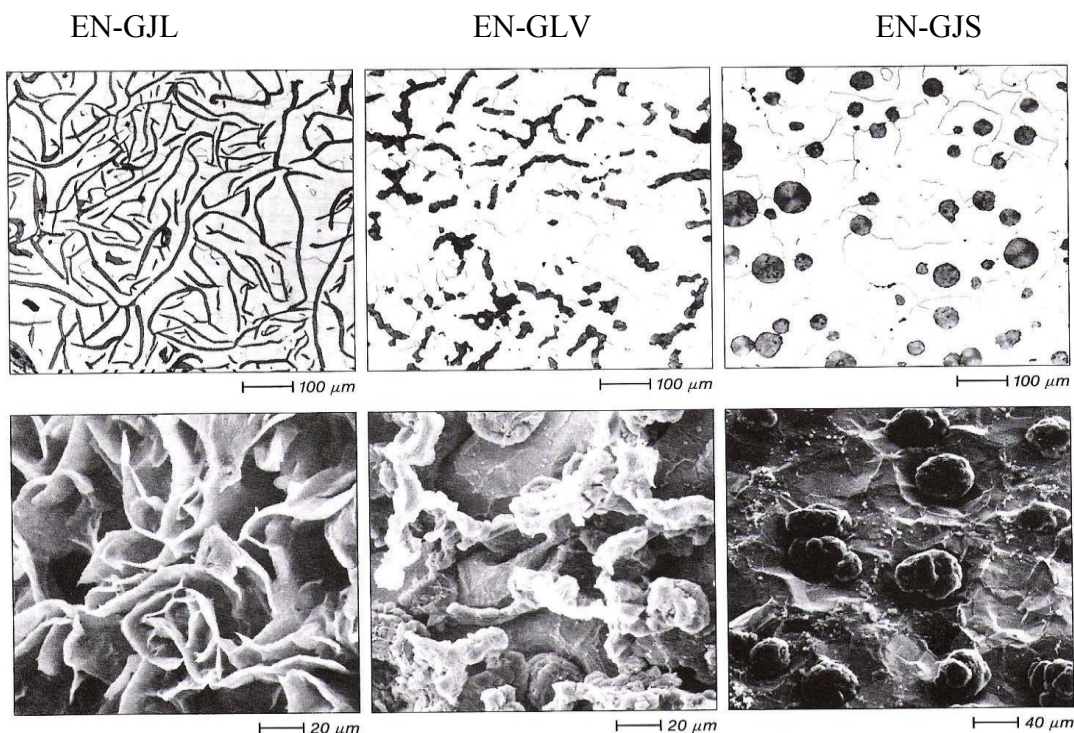
W przypadku żeliwa sferoidalnego jak i wermikularnego sposobem do podwyższenia właściwości wytrzymałościowych bądź uzyskania specjalnych jego właściwości użytkowych można szukać w opracowaniu nowych materiałów modyfikująco/sferoidyzujących i metod ich wprowadzania do ciekłego metalu.

# I. Część Teoretyczna

## 1.1 Żeliwo sferoidalne i wermikularne - charakterystyka

Żeliwo z grafitem sferoidalnym jak i grafitem wermikularnym charakteryzuje zbliżony skład chemiczny, a zawartość poszczególnych składników mieści się w następujących przedziałach: C = 3,2 - 3,8%, Si = 1,7 - 3,2%, Mn = 0,1 - 0,7%, P do 0,06%, S ~ 0,02%. Dodatkowo żeliwo zawiera również inne pierwiastki śladowe, których ilość oraz rodzaj zależą od techniki wytwarzania jak również metody sferoidyzacji/ wermikularyzacji. Różna postacie grafitu powstają przez wprowadzenie do ciekłego metalu stopów magnezu lub ceru. Ilość przyswojonego reagenta decyduje o postaci grafitu, wermikularnej bądź sferoidalnej [4, 5]. Oba gatunki żeliwa są znane od roku 1948, gdy po raz pierwszy otrzymano odlewy z żeliwa sferoidalnego oraz na skutek częściowego zaniku efektu sferoidyzacji, żeliwo wermikularne. Żeliwo z wydzieleniami grafitu sferoidalnego od samego początku zostało docenione ze względu na swoje właściwości wytrzymałościowe oraz fizyczne i nastąpił szybki proces rozwoju tego gatunku. Natomiast żeliwo z wermikularną postacią grafitu początkowo traktowano, jako niewłaściwe. Dopiero w latach późniejszych doceniono również właściwości żeliwa z grafitem wermikularnym, które są pośrednimi w porównaniu do żeliwa z grafitem w postaci płatkowej, a grafitem w postaci sferoidalnej [2, 4, 5, 11, 13]. Na rysunku 1.1 zobrazowano postacie grafitu, a właściwości poszczególnych gatunków żeliwa zostały omówione w punkcie 1.3.

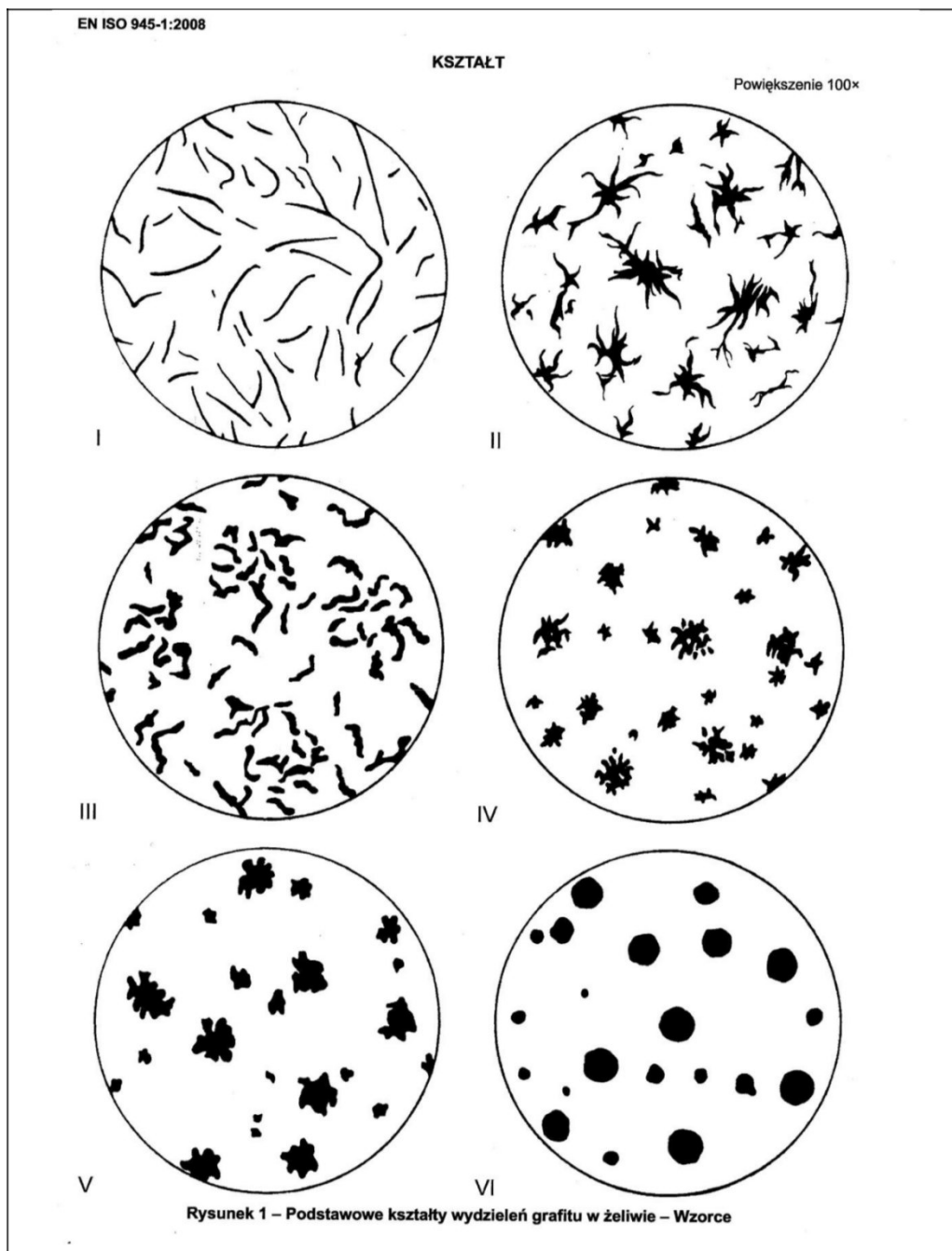
Postacie wydzieleni grafitu zostały ujęte w normie PN-EN ISO 945-1, gdzie sklasyfikowano 6 kształtów wydzieleni grafitu (rys.1.2). Kształt I to grafit płatkowy, występujący w żeliwie szarym, kształt II obrazuje grafit gwiazdkowy, który może pojawiać się w żeliwie szarym nadeutektycznym, które krystalizowało w warunkach szybkiego chłodzenia. Kształt III odpowiada wermikularnej postaci grafitu zwanej również robaczkowym, krętkowym bądź zwartym i jest charakterystyczny dla żeliwa wermikularnego. Grafit w kształcie IV odpowiada żeliwu ciągliwemu i nazywany jest węglem żarzenia. Nieregularny grafit kulkowy o kształcie V występuje w grubościennych odlewach z żeliwa sferoidalnego natomiast VI postać wydzieleni to grafit kulkowy, typowy dla żeliwa sferoidalnego.



Rys. 1.1. Struktura żeliwa szarego, wermikularnego i sferoidalnego. Mikroskop optyczny (u góry), pow. x 100 i mikroskop skaningowy (u dołu) pow. x 500 [50]

W opracowaniu zostaną szczegółowo omówione wysokojakościowe gatunki żeliwa, do których zaliczają się żeliwa z grafitem wermikularnym oraz sferoidalnym.

Ze względu na bardzo duży udział obu gatunków żeliwa w produkcji odlewów na świecie, gatunki te zostały ujęte w normach europejskich jak również krajowych, w których dla każdego gatunku określono wartości właściwości, jakie muszą spełniać. W Polsce żeliwo sferoidalne wraz z jego właściwościami zostało ujęte w normie PN EN 1563 Odlewnictwo – Żeliwo sferoidalne. Zawiera ona aż 9 gatunków żeliwa sferoidalnego EN-GJS o wytrzymałości od 350 do 900 MPa i odpowiednim wydłużeniu  $A_5$  od 2 do 22 %.



Rys. 1.2. Kształt grafitu wg normy PN EN ISO 945

Żeliwo wermikularne zostało ujęte w normie PN EN 16079: Odlewnictwo - Żeliwo z grafitem zwartym (wermikularnym). Norma ta określa 5 gatunków żeliwa EN-GJV o wytrzymałości od 300 do 500 MPa oraz wydłużeniu  $A_5$  od 0,5 do 2%. Wytrzymałość żeliwa sferoidalnego jak również żeliwa wermikularnego, osiągana jest głównie poprzez sterowanie strukturą osnowy metalowej. Wynika to z faktu, iż w obu przypadkach postać grafitu, która w ujęciu ogólnym ma bardzo duży (decydujący) wpływ na właściwości żeliwa, musi być ściśle określona i jednorodna: w żeliwie sferoidalnym postać kulkowa musi stanowić ponad 95% ogólnej ilości wydzieliń, a w żeliwie wermikularnym – postać zwarta stanowi ponad 80%.

Gatunki żeliwa o wyższej wytrzymałości zawierają większy udział perlitu w osnowie, przez co zmniejsza się ich wydłużenie [4, 12].

### 1.1.1 Krystalizacja eutektyki grafitowej

Krystalizacja eutektyki grafitowej, będącej mieszaniną austenitu (lub produktów jego przemiany) i grafitu, ustala zasadniczo strukturę, co za tym idzie również właściwości użytkowe żeliwa, jako tworzywa konstrukcyjnego [2, 4, 5].

Praktyka wytwarzania żeliwnych odlewów z wydzieleniami w strukturze grafitu płatkowego, a szczególnie grafitu kulkowego lub wermikularnego, podobnie jak w wielu innych licznych przypadkach, wyprzedziła w znacznym stopniu wyjaśnienie wszystkich teoretycznych aspektów tego zagadnienia [2, 4, 6, 7].

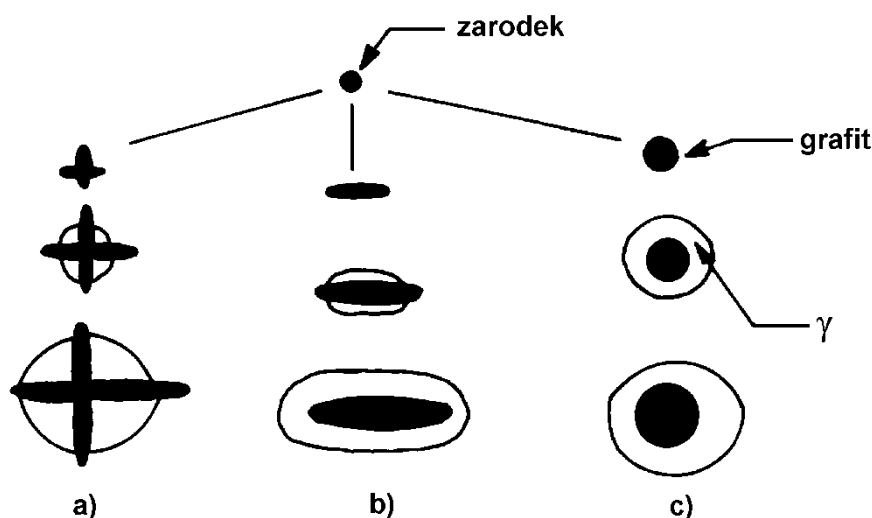
Zaliczyć do nich można głównie:

- mechanizm krystalizacji grafitu w trzech wspomnianych postaciach,
- mechanizm modyfikowania grafityzującego żeliwa poddanemu zabiegowi sferoidyzowania lub wermikularyzowania.

Zagadnienie krystalizacji grafitu w danej postaci wchodzi w zakres ogólnej teorii procesu grafityzacji rozumianego, jako proces zarodkowania i wzrostu kryształów grafitu w stopach żelaza z węglem; zagadnienie ograniczono do krzepnięcia pierwotnego (ze stanu ciekłego), gdyż w tym procesie kształtuje się morfologia grafitu [2, 4, 7].

Zjawisko powstawania w żeliwie grafitu w postaci płatkowej, jak również kulkowego (sferoidalnej) lub wermikularnego, nie zostało dotychczas przekonywująco i jednoznacznie wyjaśnione, mimo poświęceniu temu problemowi wielu prac badawczych [2, 4, 5, 6, 7]. Grafit kulkowy oraz grafit wermikularny zarodkuje podobnie, czyli każde wydzielenie powstaje z osobnych zarodków, a wzrost poszczególnych wydzieleni jest w pewnym stopniu hamowany w początkowym okresie tego procesu. Powstaniu obu rodzajom wydzieleni grafitu tj. wermikularnego oraz kulkowego towarzyszy silne przechłodzenie [2, 4, 6, 7]. Maksymalna temperatura krystalizacji eutektyk z grafitem wermikularnym jest bliska wartości maksymalnej eutektyki obserwowanej w żeliwie z grafitem płatkowym. Ma to związek ze wzrostem eutektycznego grafitu płatkowego, który odbywa się w sposób sprzężony ze wzrostem austenitu eutektycznego. Wynikiem jest duża wartość rekalescencji, pozwalająca z wysoką dokładnością przewidzieć występowanie grafitu wermikularnego w odlewie [2, 4, 5, 6, 7]. W żeliwie sferoidalnym maksymalna temperatura krystalizacji eutektyki jest niewysoka, a rekalescencja jest nieznacznie większa od eutektyki z grafitem płatkowym.

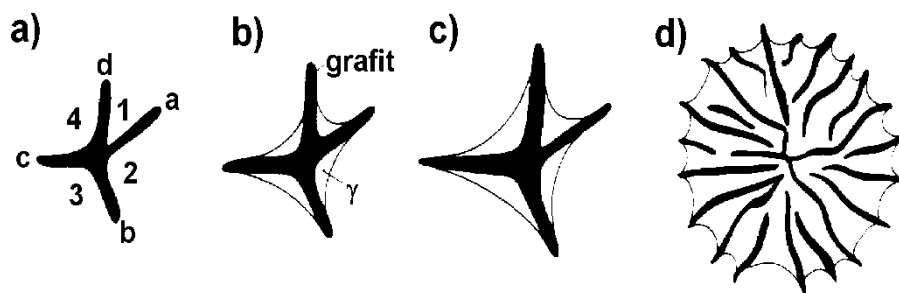
Grafit eutektyczny w żeliwie szarym (podobnie jak grafit przedeutektyczny) krystalizuje bezpośrednio z cieczy, a zarodek grafitu w początkowym etapie kontynuuje swój swobodny wzrost, jako faza przedeutektyczna, która w zależności od warunków, może przybierać różne kształty, co pokazano na rysunku 1.3. Wydzielenia grafitu można traktować, jako katalizator, ułatwiający heterogeniczne zarodkowanie austenitu, który następnie wzrasta doprowadzając do utworzenia, (wraz z grafitem), ziarna eutektycznego [4].



Rys. 1.3. Sekwencja wzrostu ziaren eutektycznych z grafitem płatkowym (a), wermikularnym (b) i kulkowym (c)  $\gamma$ - austenit [4]

W pierwszym przypadku (rys. 1.3a), zarodek grafitu kontynuuje swój swobodny wzrost, jako faza przedeutektyczna, przybierając postać rozetki. [4, 5, 6, 7]

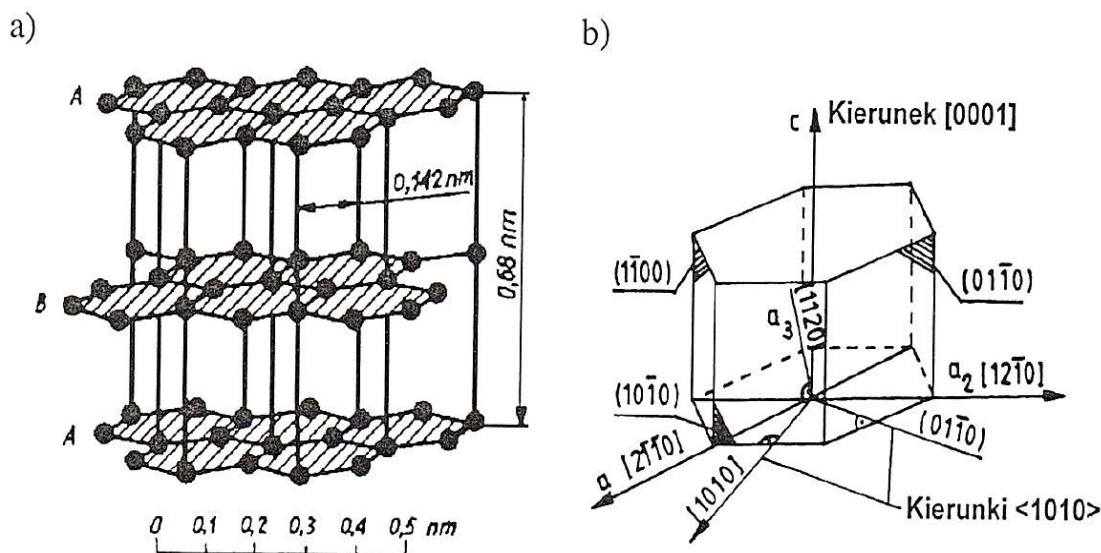
Analiza rozkładu stężenia żelaza na froncie krystalizacji takiej rozetki (rys. 1.4a) wykazuje, że najmniejsze stężenie żelaza w cieczy, stykającej się z rozetką grafitu, będzie wokół powierzchni wypukłych (punkty a, b, c, d), a największe wokół powierzchni wklęsłych (punkty 1, 2, 3, 4). Zarodek austenitu wzrasta w obszarze cieczy o dużym stężeniu żelaza, otacza centralną część rozetki grafitu (rys. 1.4b), a następnie wzrasta wzdłuż jej odgałęzienia (rys. 1.4c), nie odcinając przy tym czoła odgałęzienia grafitu od cieczy. W ten sposób z pojedynczego zarodka grafitu powstaje ziarno eutektyczne (rys. 1.4d), złożone z dwóch równocześnie krystalizujących, naprzemianległych faz, austenitu i grafitu [4, 5, 6, 7].



Rys. 1.4. Schemat kształtowania ziaren eutektycznych z grafitem płatkowym [7]

Grafit eutektyczny w żeliwie sferoidalnym (rys. 1.3c) krystalizuje podobnie jak grafit płatkowy, czyli bezpośrednio z cieczy, a podczas swego wzrostu jest otaczany austenitem eutektycznym, tworzącym wokół niego charakterystyczną otoczkę, która odcina kulki grafitu od cieczy. Dalszy wzrost grafitu następuje bez kontaktu z cieczą, w wyniku dyfuzji węgla przez otoczkę austenitu. Jest to możliwe, gdyż szybkość dyfuzji węgla przez otoczkę jest wystarczająco duża; średnica otoczki powiększa się w wyniku krystalizacji austenitu. Ziarno eutektyczne składa się w tym przypadku z kulki grafitu i otoczki austenitu [4, 6].

W przypadku krystalizacji grafitu wermikularnego (rys.1.3b) w początkowym jej etapie wierzchołkami wydzielenia kontaktuje się on z kąpielą; prędkość wzrostu ścian pryzmatycznych (kierunek  $[1010]$ ) jest większa niż w kierunku podstawowym  $[0001]$  (rys. 1.5). W czasie dalszego jego wzrostu, jest on najpierw częściowo, a później całkowicie zamykany otoczką austenitu i w efekcie takiego mechanizmu wzrostu, otrzymuje się asymetryczny, robaczkowy (ang. vermicular) kształt wydzieleni grafitu. Zatem podobnie jak grafit kulkowy, każde tego rodzaju wydzielenie grafitu wermikularnego powstaje z jednego zarodka [4, 80].



Rys. 1.5. Sieć krystalograficzna grafitu (a), oznaczenie osi, kierunków płaszczyzn sieciowych (b) [4, 5]

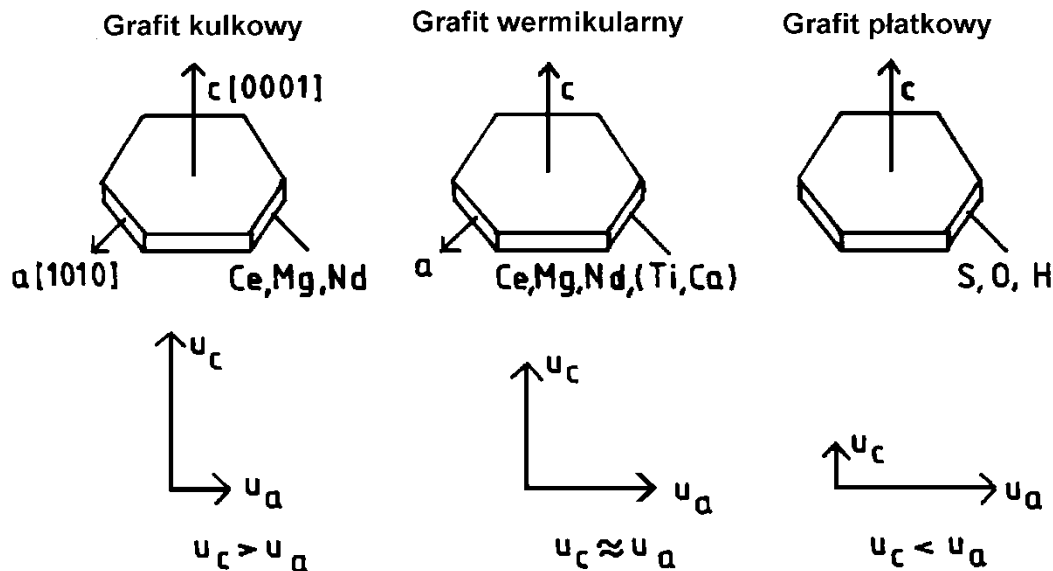
Niezależnie od cech zewnętrznych tzn. kształtu, wielkości oraz rozmieszczenia grafitu ma zawsze tą samą budowę warstwową sieci heksagonalnej (rys. 1.5a) [2, 4, 5].

Natomiast na kształt grafitu według licznych publikacji wpływ mają:

1. **Wtrącenia niemetaliczne** o sieci heksagonalnej ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{SiC}$ ) dla zarodków grafitu płatkowego oraz sprzyjające powstaniu grafitu sferoidalnego wtrącenia niemetaliczne o sieci krystalicznej regularnej (np.  $\text{MgS}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Mg}_2\text{N}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ) [4].

2. **Napięcie powierzchniowe**, które po wprowadzenia pierwiastków sferoidyzująco/wermikularyzujących w postaci magnezu lub ceru oraz innych, wzrasta o około 50 - 60% w stosunku do żeliwa wyjściowego. Związane jest to, ze zjawiskiem wiązania przez magnez i cer pierwiastków powierzchniowo czynnych siarkę, tlen oraz wodór, które to zmniejszają napięcie powierzchniowe [4, 5].

3. **Zróżnicowanie prędkości wzrostu kryształów** w poszczególnych kierunkach. Grafit płatkowy rośnie szybciej w kierunkach  $\langle 1010 \rangle$ , niż w kierunku  $[0001]$ . W przypadku grafitu kulkowego stosunek tych prędkości jest odwrotny (rys. 1.6). Prędkość wzrostu grafitu w płaszczyźnie  $[0001]$  (prędkość  $u_c$ ) jest większa od prędkości  $u_a$  dzięki zastosowaniu pierwiastków sprzyjających sferoidyzacji grafitu ( $\text{Mg}$ ,  $\text{Ce}$ ,  $\text{Nd}$ ). Pierwiastki sferoidyzujące bezpośrednio wpływają na stosunek prędkości  $u_a/u_c$  wpływając wcześniej na usunięcie z żeliwa tlenu i siarki [4].



Rys. 1.6. Schemat zmian prędkości wzrostu poszczególnych ścian grafitu; kulkowego, wermikularnego i płatkowego, w wyniku adsorpcji obcych atomów [4]

### 1.1.2 Właściwości mechaniczne oraz fizyczne żeliwa sferoidalnego i wermikularnego

Żeliwo jako materiał konstrukcyjny, dzięki posiadaniu dobrych właściwości mechanicznych oraz technologicznych, jest jednym z najbardziej rozpowszechnionym materiałem, z którego wytwarza się odlewy. W ostatnich latach widoczny jest wzrost produkcji odlewów z wysokojakościowego żeliwa z wydzieleniami grafitu kulkowego jak również żeliwa z wydzieleniami grafitu wermikularnego. Tendencję wzrostową tych dwóch gatunków żeliw spowodował rozwój przemysłu w szczególności maszynowego oraz motoryzacyjnego. Wymienione sektory przemysłu poszukują materiałów nie tylko spełniających podstawowe wymagania, jakimi jest wytrzymałość i twardość, ale cechujących się dużą odpornością na zmienne warunki pracy - zwłaszcza niskie i podwyższone temperatury. Żeliwa sferoidalne oraz wermikularne, dzięki odmiennym postacią grafitu cechują się nie tylko różnymi właściwościami mechaniczne, ale również właściwościami fizycznymi w tym głównie przewodnością cieplną, co czyni żeliwo z grafitem wermikularnym odpornym na szoki termiczne i zmęczenie cieplne [2, 4].

Właściwości mechaniczne są podstawą w klasyfikacji żeliwa wermikularnego oraz sferoidalnego, zostały one pokazane w tabeli 1.1 oraz 1.2.

Tabel 1.1. Właściwości żeliwa wermikularnego wg PN EN 16079

Oznaczenie materiału		Reprezentatywna grubość ścianki <i>t mm</i>	Umowna granica plastyczności 0,2% <i>Rp0,2 MPa min</i>	Wytrzymałość na rozciąganie <i>Rm MPa min</i>	Wydłużenie <i>A % min</i>
Symbol	Numer				
EN-GJV-300	5.2100	$t \leq 30$	210	300	2,0
		$30 < t \leq 60$	195	275	2,0
		$60 < t \leq 200$	175	250	2,0
EN-GJV-350	5.2200	$t \leq 30$	245	350	1,5
		$30 < t \leq 60$	230	325	1,5
		$60 < t \leq 200$	210	300	1,5
EN-GJV-400	5.2201	$t \leq 30$	280	400	1,0
		$30 < t \leq 60$	260	375	1,0
		$60 < t \leq 200$	230	325	1,0
EN-GJV-450	5.2300	$t \leq 30$	315	450	1,0
		$30 < t \leq 60$	280	400	1,0
		$60 < t \leq 200$	260	375	1,0
EN-GJV-500	5.2301	$t \leq 30$	350	500	0,5
		$30 < t \leq 60$	315	450	0,5
		$60 < t \leq 200$	280	400	0,5

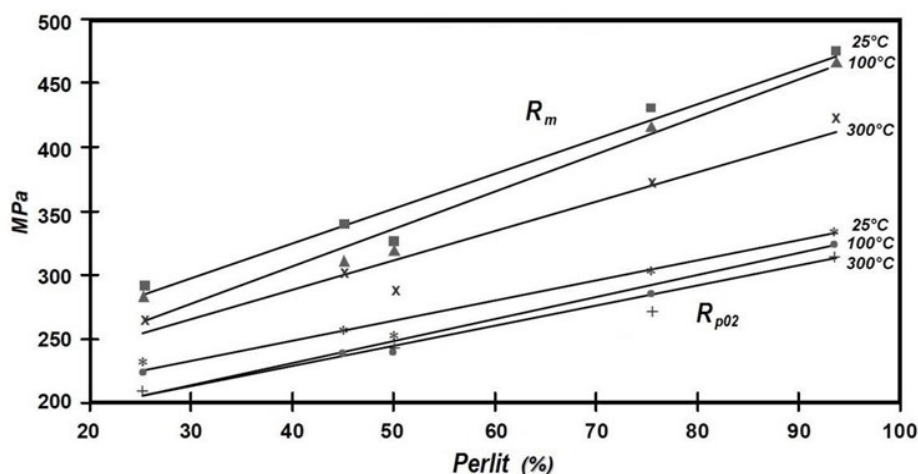
Tabel 1.2. Właściwości żeliwa sferoidalnego wg PN EN 1563

Oznaczenie materiału		Reprezentatywna grubość ścianki $t$ mm	Umowna granica plastyczności 0,2% $R_{p0,2}$ MPa min	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ MPa min	Wydłużenie $A$ % min			
Symbol	Numer							
EN-GJS-350-22-LT <sup>a</sup>	5.3100	$t \leq 30$	220	350	22			
		$30 < t \leq 60$	210	330	18			
		$60 < t \leq 200$	200	320	15			
EN-GJS-350-22-RT <sup>b</sup>	5.3101	$t \leq 30$	220	350	22			
		$30 < t \leq 60$	220	330	18			
		$60 < t \leq 200$	210	320	15			
EN-GJS-350-22	5.3102	$t \leq 30$	220	350	22			
		$30 < t \leq 60$	220	330	18			
		$60 < t \leq 200$	210	320	15			
EN-GJS-400-18-LT <sup>a</sup>	5.3103	$t \leq 30$	240	400	18			
		$30 < t \leq 60$	230	380	15			
		$60 < t \leq 200$	220	360	12			
EN-GJS-400-18-RT <sup>b</sup>	5.3104	$t \leq 30$	250	400	18			
		$30 < t \leq 60$	250	390	15			
		$60 < t \leq 200$	240	370	12			
EN-GJS-400-18	5.3105	$t \leq 30$	250	400	18			
		$30 < t \leq 60$	250	390	15			
		$60 < t \leq 200$	240	370	12			
EN-GJS-400-15	5.3106	$t \leq 30$	250	400	15			
		$30 < t \leq 60$	250	390	14			
		$60 < t \leq 200$	240	370	11			
EN-GJS-450-10	5.3107	$t \leq 30$	310	450	10			
		$30 < t \leq 60$				do uzgodnienia między wytwórcą a zamawiającym		
		$60 < t \leq 200$						
EN-GJS-500-7	5.3200	$t \leq 30$	320	500	7			
		$30 < t \leq 60$	300	450	7			
		$60 < t \leq 200$	290	420	5			
EN-GJS-600-3	5.3201	$t \leq 30$	370	600	3			
		$30 < t \leq 60$	360	600	2			
		$60 < t \leq 200$	340	550	1			
EN-GJS-700-2	5.3300	$t \leq 30$	420	700	2			
		$30 < t \leq 60$	400	700	2			
		$60 < t \leq 200$	380	650	1			
EN-GJS-800-2	5.3301	$t \leq 30$	480	800	2			
		$30 < t \leq 60$				do uzgodnienia między wytwórcą a zamawiającym		
		$60 < t \leq 200$						
EN-GJS-900-2	5.3302	$t \leq 30$	600	900	2			
		$30 < t \leq 60$				do uzgodnienia między wytwórcą a zamawiającym		
		$60 < t \leq 200$						

UWAGA: Właściwości mechaniczne próbek do badań obrabianych mechanicznie z wlewków próbnych mogą nie odzwierciedlać dokładnie właściwości samego odlewu. Wartości właściwości wytrzymałościowych odlewu podane są informacyjnie w Załączniku B.

<sup>a</sup> LT dla niskiej temperatury.  
<sup>b</sup> RT dla temperatury pokojowej.

Wymienione właściwości są osiągnane na drodze kształtowania struktury osnowy metalowej, w tym przez stosunek udziału ferryty i perlitu. Zwiększając udział perlitu wywołuje się zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie (rys. 1.7) [2, 4, 5, 12, 28].



Rys. 1.7. Wpływ udziału perlitu na wytrzymałość  $R_m$  oraz granicę sprężystości  $R_{p02}$  perlitu żeliwa wermikularnego [28]

Podstawowe właściwości żeliwa z grafitem wermikularnym oraz grafitem sferoidalnym zostały porównane w tabeli 1.3 w stosunku do żeliwa z grafitem płatkowym zgodnie z normami je opisującymi.

Tabela 1.3. Podstawowe właściwości mechaniczne żeliwa z grafitem płatkowym [PN EN 1561] wermikularnym [PN EN 16079] i kulkowym [PN EN 1563]

Właściwość	Jednostka	Żeliwo szare	Żeliwo wermikularne		Żeliwo sferoidalne
			EN-GJV300	EN-GJV400	
Wytrzymałość na rozciąganie, $R_m$	MPa	100-400	$\geq 300$	$\geq 400$	350-900
Umowna granica sprężystości, $R_{0,2}$	MPa	-	$\geq 240$	$\geq 280$	260-600
Wydłużenie, $A_5$	%	max. 1,5	2 - 8,0	1 - 2,5	3- 25
Wytrzymałość na zginanie, $R_g$	MPa	300 - 600	600	700	800-1200
Wytrzymałość na ściskanie, $R_c$	MPa	500 - 1400	500	600 - 1200	600 - 1200
Wytrzymałość na ścinanie, $R_t$	MPa	$R_t \sim R_m$	$R_t \sim R_m$		$R_t = (0,9-1) R_m$
Twardość	HB	140 - 300	130 - 190	190 - 280	120 - 350
Udarność (z karbem), KCV	J	-	3- 6	do 3	max. 21
Moduł sprężystości E	kN/mm <sup>2</sup>		130 - 160	150 - 160	165 - 185

Przedstawione w tabeli wartości pokazują, że żeliwo sferoidalne charakteryzuje się znacznie lepszymi własnościami wytrzymałościowymi niż żeliwo z grafitem wermikularnym. Natomiast żeliwo wermikularne posiada lepsze (wyższe) właściwości mechaniczne od żeliwa szarego.

### Właściwości fizyczne

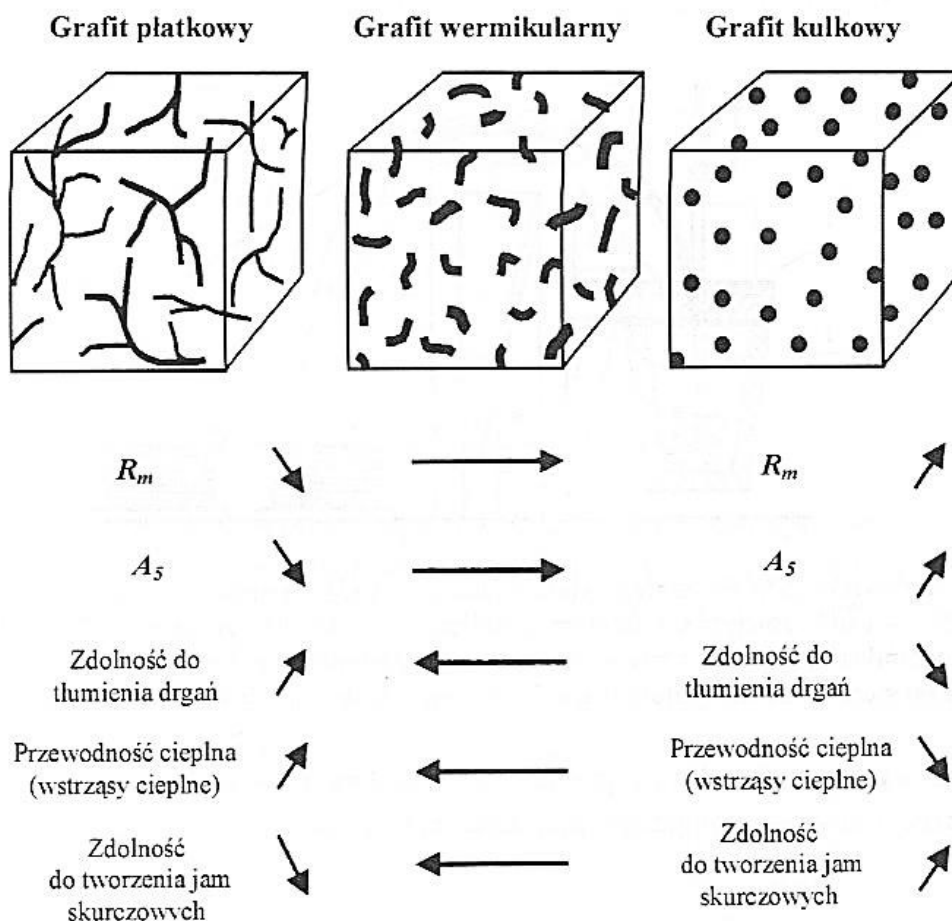
Porównując żeliwa z grafitem płatkowym, wermikularnym oraz sferoidalnym dostrzega się, że postać grafitu wpływa na wartości najważniejszych właściwości fizycznych. Żeliwo z grafitem wermikularnym charakteryzuje się właściwościami fizycznymi bardziej zbliżonymi do właściwości żeliwa z grafitem płatkowym niż z grafitem kulkowym [2]. W tabeli 1.4 zestawiono porównanie podstawowych właściwości niestopowego żeliwa w stanie surowym.

Tabela 1.4. Podstawowe właściwości fizyczne żeliwa z grafitem płatkowym [PN EN 1561] wermikularnym [PN EN 16079] i kulkowym [PN EN 1563]

Właściwość	Jednostka	Żeliwo szare	Żeliwo wermikularne	Żeliwo sferoidalne
Gęstość	G/cm <sup>3</sup>	7- 7,5	7-7,2	7,1-7,3
Przewodność cieplna $\lambda$ (20 - 200 °C)	W/(m x K)	46- 59	38-50	25-3,8
Współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej $\beta$ (20 - 200 °C)	K <sup>-1</sup> x 10 <sup>6</sup>	11- 12	12 ÷ 14	11,3 - 13
Oporność elektryczna (20 °C) $\mu$	$\Omega$ x m	0,5-1,0	0,7-0,8	0,5 - 0,7

W pracy [2] stwierdzono, że postać grafitu nie wpływa bezpośrednio na gęstość żeliwa oraz współczynnik rozszerzalności cieplnej  $\beta$ . Gęstość w dużej mierze zależy od składu chemicznego, ilości grafitu oraz od rodzaju osnowy i porowatości. Natomiast postać grafitu ma istotny wpływ na przewodność cieplną i elektryczną. Wraz ze zmniejszeniem przewodności cieplnej zwiększa się skłonność do tworzenia naprężeń własnych podczas stygnięcia odlewów po zakrzepnięciu, co prowadzi do pogorszenia odporności żeliwa na wstrząsy cieplne. W wyniku tych różnic żeliwo sferoidalne, z uwagi na wyższy stopień nagrzewania się w danych warunkach wymiany ciepła niż żeliwo wermikularne, w wielu wypadkach elementy (konstrukcje) z tego żeliwa charakteryzuje mniejsza odporność na wstrząsy cieplne od żeliwa takich samych elementów wykonanych z żeliwa wermikularnego oraz płatkowego.

Porównanie właściwości mechanicznych oraz fizycznych wysokojakościowych gatunków żeliwa obrazuje rysunek 1.8.



Rys.1.8. Schemat porównujący właściwości żeliwa szarego, wermikularnego oraz sferoidalnego [4]

Żeliwo sferoidalne posiada najlepsze właściwości wytrzymałościowe oraz plastyczne, natomiast gorsze pod względem zdolności do tłumienia drgań i w wielu wypadkach charakteryzuje się mniejszą odpornością na szoki termiczne niż żeliwo szare modyfikowane. Żeliwo wermikularne charakteryzuje się pośrednimi właściwościami w stosunku do żeliwa z grafitem płatkowym oraz sferoidalnym [2, 4].

### 1.1.3 Wpływ podstawowych pierwiastków na strukturę i właściwość żeliwa wyjściowego w procesie wytwarzania żeliwa wermikularnego i sferoidalnego

W trakcie produkcji żeliwa sferoidalnego oraz wermikularnego dobór składu chemicznego ma kluczowy wpływ na rodzaj osnowy metalicznej oraz zdolności żeliwa do grafityzacji. Wpływ poszczególnych pierwiastków na mikrostrukturę dla żeliwa niestopowego można przedstawić według klasyfikacji:

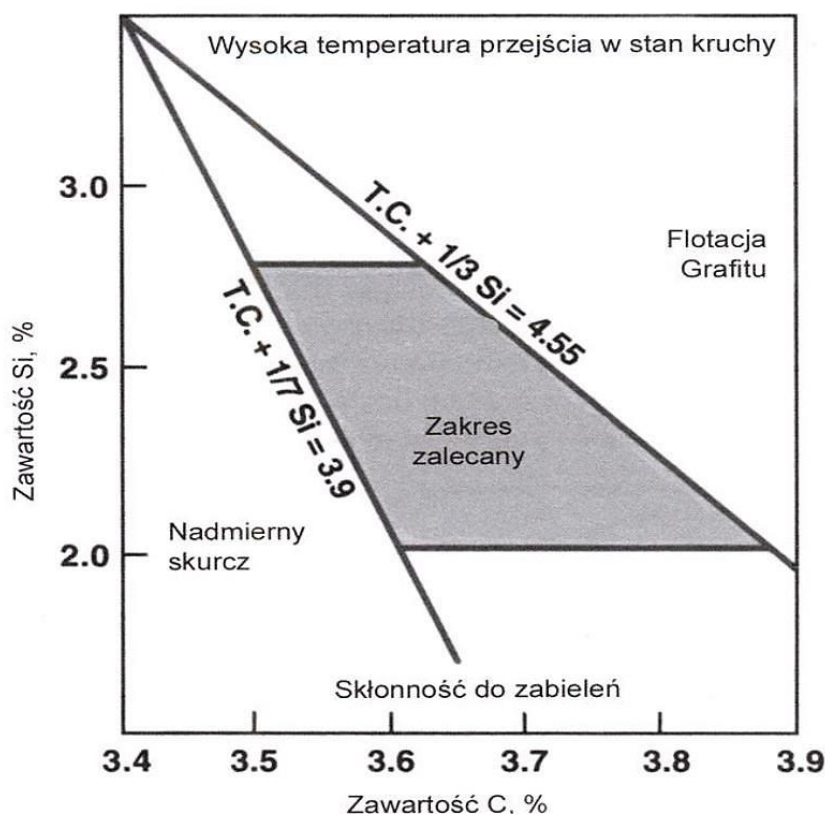
- pierwiastki podstawowe: węgiel, krzem, mangan, siarka, fosfor,
- pierwiastki oddziałujące na osnowę: miedź, cyna [ 2, 4, 5, 10, 19].

### Wpływ zawartości węgla i krzemu:

Liczne badania oraz publikacje potwierdzają, że dla uzyskania dobrych właściwości odlewniczych oraz mniejszej skłonności do zabielen powino dążyć się do uzyskania żeliwa wyjściowego o składzie około eutektycznym  $C_e \approx 4,3$ , który zależy w głównej mierze od zawartości pierwiastków takich jak C i Si [5, 34]. Zależność ta opisana jest wzorem (1.1) i (1.2), a optymalna zawartość węgla i krzemu przedstawiono na wykresie Hendersona (rys. 1.9) [5, 29].

$$C_e = C_c (\% C) + 0,31 \cdot (\% Si) + 0,33(\% P) = C_c + \frac{Si+P}{3} \quad (1.1)$$

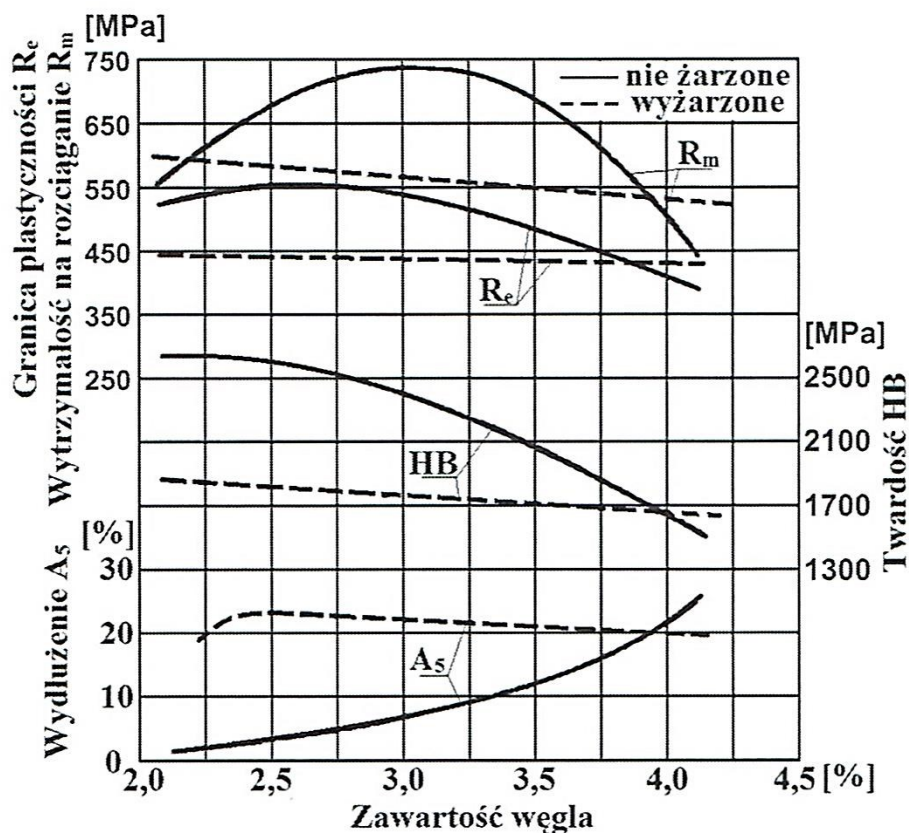
$$S_c = \frac{C_c}{C_{eut}} = \frac{C_c}{4,26 - (0,31 \cdot Si + 0,33 \cdot P)} \approx \frac{C_c}{4,26 - 0,33 \cdot (Si + P)} \quad (1.2)$$



Rys.1.9. Typowy zakres zawartość węgla i krzemu w żeliwie sferoidalnym i wermikularnym [29]

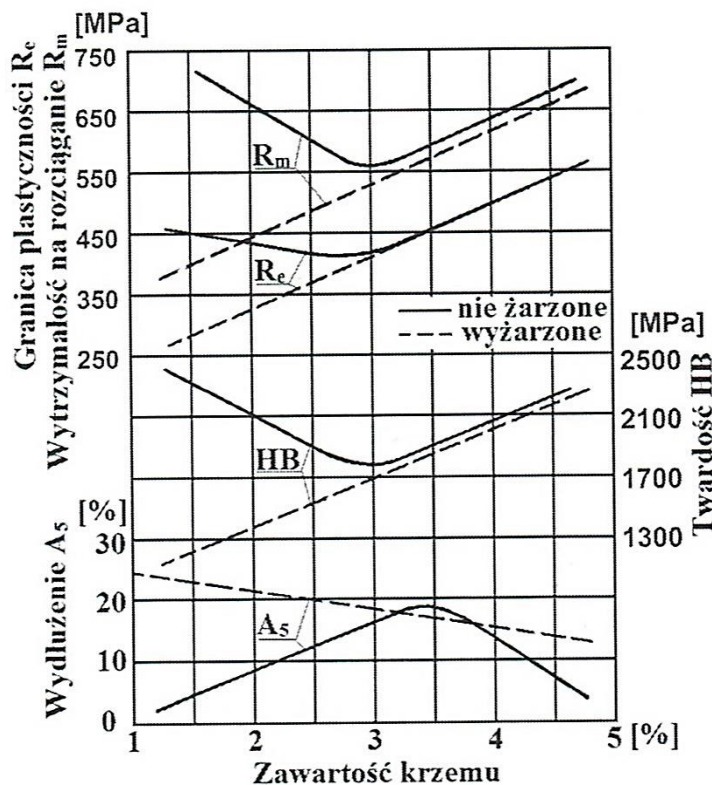
Zawartość węgla zazwyczaj zawiera się w przedziale od 3,4 - 3,8%, przy czym wyższe zawartość powinno odnosić się do odlewów cienkościennych a mniejszą do odlewów grubościennych. Wraz ze wzrostem zawartości węgla w żeliwie poprawia się jego lejność oraz wzrasta sumaryczna objętość wydzieleń grafitu (ilość grafitu). Węgiel występujący

w postaci wermikularnej bądź sferoidalnej (rys. 1.10) ma mniejszy wpływ na właściwości mechaniczne niż w przypadku grafitu płatkowego [4, 10, 19].



Rys. 1.10. Wpływ zawartości węgla na własności wytrzymałościowe żeliwa sferoidalnego (1- żeliwo perlityczno-ferrytyczne, 2 - żeliwo ferrytyczne) [19]

Krzem natomiast zmniejsza skłonność żeliwa wyjściowego do zabielenia, jednocześnie korzystnie wpływa na wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie ferrytycznego żeliwa sferoidalnego. Zmniejsza wymiary komórek eutektycznych i zwiększa liczbę wydzielen grafitu. Dobierając skład chemiczny należy pamiętać, że krzem w dużym stopniu wpływa na zmniejszenie wytrzymałości na obciążenia udarowe przy jednoczesnym zwiększeniu kruchości odlewu (rys. 1.11), szczególnie w gatunkach żeliwa o osnowie ferrytycznej. Zawartość krzemu powinna być na poziomie 2,0 - 2,8% w zależności od zawartości węgla.



Rys. 1.11. Wpływ krzemu na właściwości mechaniczne żeliwa sferoidalnego (1-żeliwo perlityczno-ferrytyczne, 2-żeliwo ferrytyczne) [19]

### Wpływ zawartości manganu

Zawartość manganu w żeliwie, z uwagi na jego niekorzystny wpływ na właściwości plastyczne, powinna mieścić się w przedziale 0,2 - 0,5% w przypadku osnowy perlitycznej natomiast w żeliwie ferrytycznym nie powinna przekraczać 0,2%, a niekiedy poniżej tej wartości. Mangan podnosi twardość żeliwa. Ze względu na sprzyjanie tworzeniu węglików, zawartość manganu w żeliwach ferrytycznych należy ograniczać do minimum w szczególności ma to odniesienie do odlewów pracujących w niskich temperaturach [2, 19].

Charakter osnowy metalowej przy założonej zawartości Mn zależy od rodzaju i ilości wprowadzonych pierwiastków perlityzujących takich jak: Cu, Sn czy Ni. Zwiększenie udziału perlitu w osnowie metalowej zwiększa wytrzymałość na rozciąganie, ale jednocześnie obniża się wydłużenie [2, 4, 5, 19, 29].

### **Wpływ zawartości fosforu**

Fosfor w żeliwie sferoidalnym jak również wermikularnym jest pierwiastkiem powodującym pogorszenie właściwości mechanicznych, obniżając wydłużenie, odporność na kruche pękanie oraz udarność. Podczas krzepnięcia segreguje na granicach ziaren, gdzie tworzy kruche eutektyki fosforowe. Segregacja jest tym większa im grubsze są ścianki odlewu. Aby uzyskać strukturę ferrytyczną w stanie lanym zaleca się utrzymanie fosforu do 0,05%. Powyżej tej wartości fosfor powoduje zmniejszenie wydłużenia prawie o połowę. Ze względu na bardzo niekorzystny wpływ zaleca się stosowanie materiałów wsadowych o niskiej zawartości fosforu [2, 4, 19].

### **Wpływ zawartości siarki**

Siarka jest przyczyną pęknięć na gorąco. Tworzy także niskotopliwą eutektykę i wyraźnie zmniejsza wytrzymałość w podwyższonej temperaturze [7]. Zaleca się, aby zawartość siarki w żeliwie przed sferoidyzacją była nie większa niż 0,02%. Siarka, poprzez łączenie się z magnezem, a także pierwiastkami ziem rzadkich, ogranicza skuteczność procesu wermikularyzacji i sferoidyzacji żeliwa. Wpływ tych niskich zawartości siarki na właściwości mechaniczne żeliwa jest trudny do określenia [2, 4, 19, 29].

### **Wpływ zawartości miedzi**

Miedź jest pierwiastkiem podnoszącym hartowność osnowy perlitycznej. Miedź sprzyja grafityzacji żeliwa zwiększając liczbę komórek eutektycznych i wydzieleń grafitu. Zmniejsza także udział ferrytu w żeliwie i bardzo silnie stabilizuje perlit zwiększając przez to wytrzymałość i twardość, nie wpływając na tworzenie węglików. Dodatek około 1% Cu do żeliwa powoduje pełną perlityzację osnowy i podnosi jego wytrzymałość na rozciąganie o około 40%. Dodatek miedzi obniża wydłużenie. W gatunkach perlitycznych żeliwa, miedź stosuje się przeważnie w zakresie 0,3 do 0,8%. W żeliwie ferrytycznym w stanie lanym zawartość miedzi nie może przekroczyć progu 0,03% [2, 4, 5, 10].

### **Wpływ zawartości cyny**

Cyna wprowadzona już w niewielkich ilościach do żeliwa, poprawia jego własności wytrzymałościowe i zwiększa twardość dzięki sprzyjaniu perlityzacji osnowy. W przypadku zawartości cyny powyżej 0,1%, zmniejsza się przyrost wytrzymałości, a nawet może nastąpić jej spadek, związany z równoczesnym spadkiem plastyczności żeliwa. Powiększanie się wartości  $R_m$  w miarę zwiększania zawartości Sn w żeliwie w przedziale do 0,1%, wiąże się z prawdopodobnym jej wpływem na powstawanie defektów sieci krystalicznej typu

dyslokacji. Początkowy dodatni wpływ cyny na  $R_m$  zaznacza się tylko w żeliwie o dużym stopniu nasycenia eutektycznego, charakteryzującym się przewagą ferrytu w osnowie. Mały dodatek cyny (rzędu 0,05%) dla żeliwa perlityczno-ferrytycznego zwiększa nieco jego udarność; większa natomiast zawartość cyny powoduje w każdym przypadku spadek udarności. W żeliwie perlitycznym następuje on już po przekroczeniu zawartości ok. 0,01% Sn [2, 29].

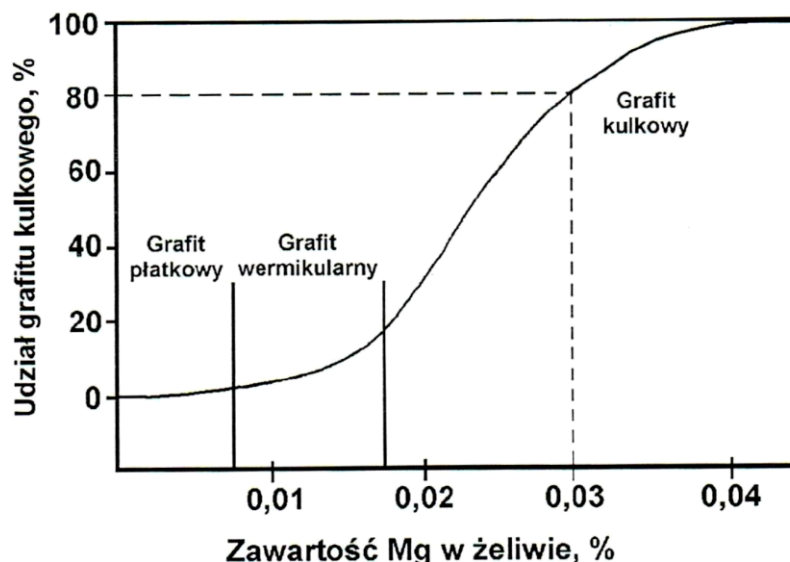
Przygotowanie żeliwa wyjściowego jest jednym z głównych etapów przy produkcji żeliwa sferoidalnego oraz wermikularnego. Jakość metalurgiczna metalu, głównie jego zdolność do grafityzacji przed poddaniem sferoidyzacji bądź wermikularyzacji w dużej mierze zależy od materiałów wsadowych. Materiały wsadowe wysokiej jakości ze względu na cenę rynkową, niejednokrotnie są zastępowane przez złomy stalowe, wprowadzane celem obniżenia kosztów produkcji. Złomy stalowe bardzo często są pokryte różnymi materiałami zawierającymi szkodliwe pierwiastki, które mogą utrudniać krystalizację grafitu jak również niekorzystnie wpływać na osnowę metaliczną, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia, jakości żeliwa [4, 5, 29].

#### 1.1.4 Metody otrzymywania żeliwa sferoidalnego oraz wermikularnego

Technologia otrzymywania żeliwa z grafitem sferoidalnym bądź z grafitem wermikularnym opiera się na wprowadzeniu do ciekłego metalu reagentów w postaci:

- a) technicznie czystego magnezu lub jego stopów,
- b) pierwiastki ziem rzadkich w postaci „mischmetal” [4, 5, 10].

W praktyce otrzymywania żeliwa sferoidalnego lub wermikularnego najczęściej stosuje się metodę polegającą na wprowadzeniu do ciekłego metalu magnezu lub jego stopów. Postać grafitu będzie zależała od zawartości końcowej Mg lub pierwiastków z grupy ziem rzadkich. W przypadku otrzymania żeliwa z grafitem kulkowym wartość Mg będzie w granicach od 0,03- do 0,045 % natomiast dla żeliwa z wermikularną postacią grafitu Mg waha się w przedziale, od 0,007 ÷ 0,025%, co zostało przedstawione na rysunku 1.12. W obu przypadkach po obróbce magnezem przeprowadza się zabieg modyfikacji [2, 4, 29].



Rys. 1.12. Zależność postaci wydzieleni grafitu w strukturze żeliwa od zawartości Mg [4]

Przy stosowaniu metod z użyciem magnezu do pozapiecowej obróbki, główną trudność w wypadku produkcji żeliwa wermikularnego sprawia utrzymanie zawartości magnezu w żeliwie w zakresie pomiędzy 0,007 – 0,025 Mg %, a najczęściej w granicach 0,012 – 0,018%. Magnez intensywnie paruje w stosunkowo niskiej temperaturze ( $T_{\text{wrzenia}} = 1090^{\circ}\text{C}$ ), a żeliwo w okresie obróbki pozapiecowej ma temperaturę w pobliżu wartości  $1450^{\circ}\text{C}$ . W wypadku niedotrzymania tego zakresu zawartości Mg i uzyskania zawartości poniżej dolnej granicy – żeliwo krzepnie z wyraźnym udziałem grafitu płatkowego, który radykalnie zmniejsza plastyczność i obniża wytrzymałość. Przy przekroczeniu górnej granicy zawartości Mg - powstają warunki krzepnięcia żeliwa z narastającym udziałem w strukturze grafitu kulkowego. Żeliwo wermikularne, zgodnie z obowiązującymi normami, nie powinno zawierać więcej niż 20% kulkowej formy grafitu i nie powinno zawierać postaci płatkowej [2, 4, 6, 29]. Wadą metody jest bardzo burzliwa reakcja, której towarzyszą efekty pirotechniczne i dymy, zaletą - mniejsza skłonność żeliwa do zabielen niż przy modyfikacji cerem i niższy koszt produkcji [2, 4, 24, 29].

Drugą z metod stosowaną w produkcji żeliwa sferoidalnego i wermikularnego jest użycie dodatku stopu "Miszmetal". Metoda ta charakteryzuje się przygotowaniem żeliwa wyjściowego o niskiej zawartości siarki ( $< 0,02\%\text{S}$ ). Zazwyczaj współczynnik nasycenia eutektycznego  $S_c$  tego żeliwa wynosi około 1,0% lub nieco powyżej 1,0%. Do tak przygotowanego ciekłego żeliwa dodaje się mieszaninę pierwiastków ziem rzadkich, np. stop "Miszmetal", zawierających około 50% ceru, a pozostałą część głównie stanowią lantan oraz neodym [2, 4].

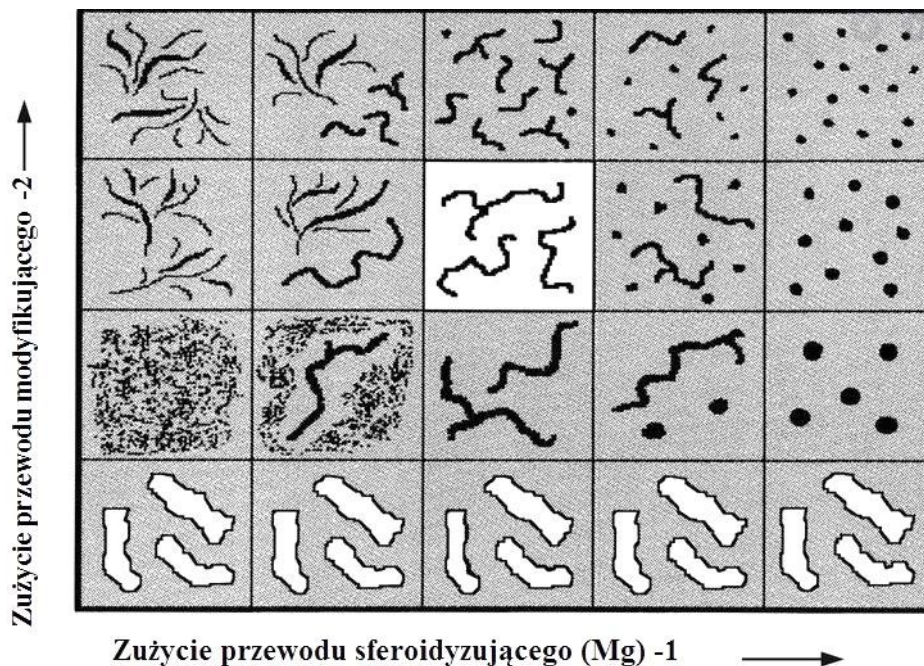
Stop "Miszmetal" w postaci prętów wprowadza się na strumień ciekłego metalu w czasie przelewania do kadzi zabiegowej. Dodatek stopu miszmetal ze względu na niską temperaturę topnienia (790 - 850°C) i wysoką temperaturę wrzenia składników (około 3000°C) rozpuszcza się w żeliwie bez efektów pirotechnicznych i wydzielania dymów. Stanowi to zaletą w odróżnieniu od metody wprowadzania zapraw magnezowych. Natomiast wadę stanowią występujące w strukturze żeliwa różnego rodzaju wtrącenia niemetaliczne (siarczków, tlenków), które są bardzo trudne do usunięcia z ciekłego metalu, jak również możliwość wystąpienia zdegenerowanej postaci grafitu (typu „*chunky*”) bądź rozbitego (ang. *exploded*). Znaczna skłonność żeliwa do zabielen i w związku z tym, specjalne wymagania odnośnie zawartości składników chemicznych - podstawowych i śladowych. W szczególności przy produkcji żeliwa wermikularnego konieczne jest bardzo dokładne dozowanie porcji miszmetal w zależności od masy żeliwa, jak i zawartości siarki. Źle dobrane proporcje stopu miszmetal powoduje powstanie nadmiernych ilości grafitu kulkowego, bądź też wydzielenia grafitu płatkowego [2, 4, 16]. Metoda otrzymywanie żeliwa wermikularnego przy użyciu dodatku miszmetal została opracowana i opatentowana w Austriackim Instytucie Odlewnictwa w 1969r. Stosowana jest głównie w Austrii, Niemczech oraz w Czechach [2]. Poza wyżej wymienionymi sposobami do otrzymywania żeliwa z grafitem w postaci wermikularnej stosuje się metody:

**a) Metoda równoległego wprowadzenie do żeliwa sferoidyzatora (Mg Ce), oraz desferoidyzatora (Ti, Ca, Al).** Dodatek wapnia zmniejsza uzależnienie zużycie magnezu od zawartości siarki. Do stosowania tej metody opatentowano specjalną zaprawę o składzie: 4-5% Mg; 0,4÷0,7% Ce; 4,0 ÷ 4,5% Ca; 8,5 ÷ 10,5% Ti; 1÷ 1,5% Al; 48÷52% Si [1, 6]. Zaprawa ta topi się w temperaturze 1100<sup>0</sup>C. Po wprowadzeniu zaprawy do ciekłego metalu konieczna jest modyfikacja żeliwa w kadzi przy użyciu dowolnego modyfikatora. Wymogi stawianej tej metodzie to skład żeliwa wyjściowego, który powinien być około eutektyczny, przy jednoczesnej zawartość siarki nie większej niż 0,035%. Wprowadzenie zaprawy do żeliwa powinno odbywać się w temperaturze 1450 – 1500°C. W przypadku, gdy temperatura zalewania zaprawy będzie poniżej 1400°C, następuje nadmierny wzrost ilość grafitu kulkowego w żeliwie. Wadą metody jest zanieczyszczenie złomu obiegowego tytanem, którego obecność w składzie żeliwa jest niedopuszczalna przy produkcji żeliwa sferoidalnego oraz szarego [2, 4, 29].

**b) Metoda jednoczesnego dodatku zaprawy magnezowo-cerowej, aluminium i wapnia (Mg-Ce-Al-Ca).** W metodzie tej do obróbki żeliwa używa się stopu magnezu z cerem, oraz pełniące rolę desferoidyzatora niewielkie ilości aluminium i wapnia. Zużycie zaprawy powiązane jest bezpośrednio z zawartością siarki oraz temperaturą żeliwa podczas zabiegu, która powinna wynosić 1470- 1500°C. Związane jest to z nadmiernym parowaniem magnezu, co w konsekwencji prowadzi do powstania żeliwa z grafitem płatkowym, zbyt niska temperatura prowadzi do występowania nadmiernej ilości grafitu kulkowego w strukturze. Dzięki tej zaprawie żeliwo wermikularne można produkować na bazie żeliwa otrzymanego z żeliwiaka, gdzie zawartości siarki mieści się w przedziale 0,07 - 0,1%. Dobrze przeprowadzony zabieg wermikularyzacji nie wymaga stosowania wtórnej modyfikacji żelazokrzemem. Według pracy [2] związane jest to z wstępowaniem licznych siarczków magnezu, wapnia i ceru powstałych na skutek wysokiej zawartości siarki w żelwie wyjściowym, stanowiących zarodki krystalizacji grafitu, co zmniejsza przechłodzenie stopu, a tym samym skłonność żeliwa do zabieleń. W tej metodzie zaprawa nie zawiera dodatku tytanu, co pozwala na stosowanie w odlewniach jednoczesnej produkcji żeliwa wermikularnego jak również żeliwa sferoidalne [2, 4, 15].

**c) Metoda z zastosowaniem technologii Sinter – Cast**

W metodzie wykorzystano wpływ wspólny efektu zabiegu wermikularyzacji (regulowaną ilością magnezu) oraz modyfikacji dzięki zastosowaniu dwóch przewodów elastycznych, z których jeden zawiera rdzeń magnezowy a drugi jest z rdzeniem modyfikującym. Efekt jednoczesnego wprowadzenia dwóch prętów przedstawiono na szachownica rysunek 1.13.



Rys. 1.13. Kompleksowe efekty wermikularyzacji dodatkiem Mg oraz modyfikatora [4]

Analizując szachownicę wynika, że metoda Sinter Cast, gwarantuje otrzymanie strukturę z grafitem wermikularnym o optymalnej liczbie jego wydzieliń.

Zmieniając parametry technologiczne obydwu zabiegów można uzyskiwać także żeliwo sferoidalne o różnej liczbie wydzieliń kulek grafitu, bądź żeliwo o różnym udziale grafitu wermikularnego i kulkowego w strukturze. Metoda ta stosowana jest z dużym powodzeniem i z powtarzalnymi efektami [4].

Cechą wspólną wszystkich metod otrzymywania żeliwa sferoidalnego oraz wermikularnego jest konieczność utrzymania wysokiej stabilizacji parametrów procesu, do których zalicza się: skład chemiczny żeliwa wyjściowego, temperatura i czas przetrzymywania metalu w piecu, ilość wprowadzanej w obróbce pozapiecowej zapraw - sferoidyzującej i modyfikującej, czasu rozlewania metalu, itp. Potrzebę stabilizacji parametrów procesu wykazano w pracach [2, 4, 5, 40, 41].

### 1.1.5 Techniki wprowadzania zapraw (sferoidyzacji, wermikularyzacji)

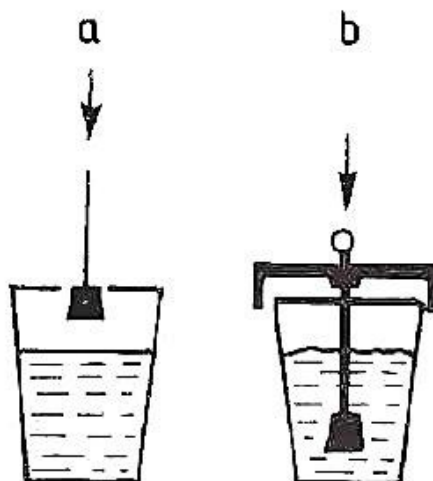
W technologii wytwarzania żeliwa sferoidalnego oraz wermikularnego wprowadzenie sferoidyzujących zapraw do ciekłego metalu jest operacją najtrudniejszą. W szczególności, gdy wprowadzamy do ciekłego metalu zaprawę magnezową, proces przebiega bardzo burzliwie powodując rozpryski ciekłego metalu przy jednoczesnym efekcie pirotechnicznym. Związane jest to jak było opisane w punkcie 1.1.4 z niską gęstością magnezu ( $1,74\text{g/cm}^3$ ) oraz stosunkowo niską temperaturą parowania ( $T_p = 1102^\circ\text{C}$ ) [2, 4, 5, 10, 29].

Najczęściej stosowane w Polsce techniki przeprowadzenia tego zabiegu to [2, 4]:

- wprowadzanie zapraw z użyciem dzwonów,
- zalewanie na dnie kadzi: metoda Sandwich i jej odmiana - Tundish,
- Inmold, przeprowadzenie zabiegu bezpośrednio w formie,
- metoda przewodu elastycznego PE.

We wszystkich wymienionych metodach dąży się do zapewnienia powtarzalności w uzyskaniu końcowej zawartości magnezu w żeliwie, zapewniającym uzyskanie odpowiedniej postaci grafitu. Każda metoda posiada swoje wady i zalety.

**Wprowadzanie magnezu z użyciem dzwonów** polega na zakładaniu porcji magnezu do dzwonu i zanurzenie go w ciekłym żeliwie [6]. Metodę tą można realizować w kadziach otwartych (rys. 1.14a), oraz w kadziach zamykanych pokrywą w trakcie zabiegu (rys. 1.14b).

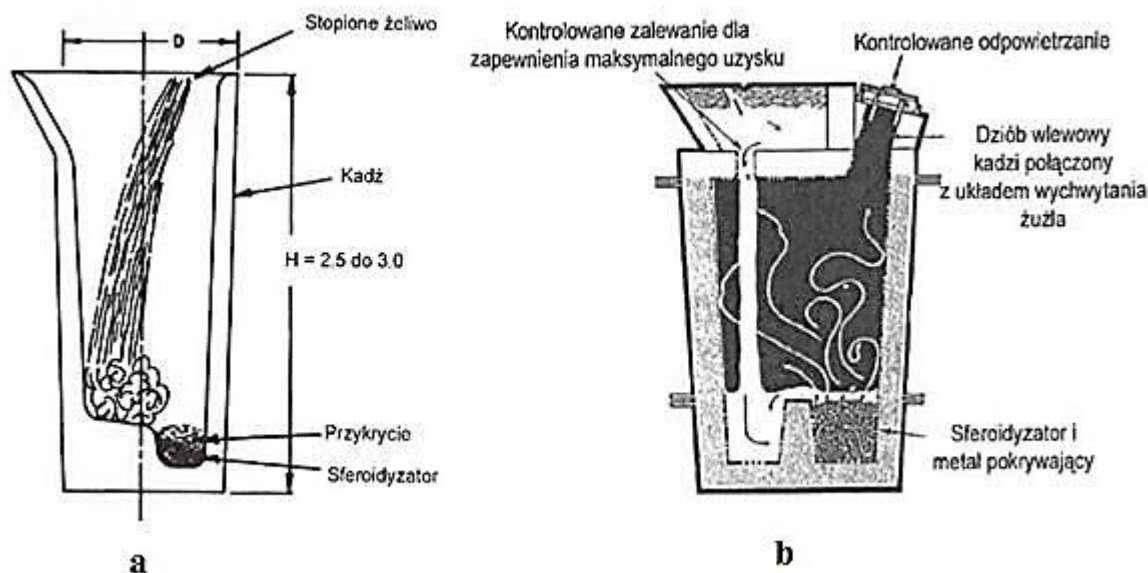


Rys. 1.14. Wprowadzanie zaprawy magnezowej do ciekłego żeliwa metodą dzwonową [4]

Metoda dzwonowa jest coraz rzadziej stosowana, ze względu na duży spadek temperatury w czasie wprowadzania dzwonu z zaprawą magnezową [5].

## Zalewanie na dnie kadzi - Metoda Sandwich i jej odmiana Tundish

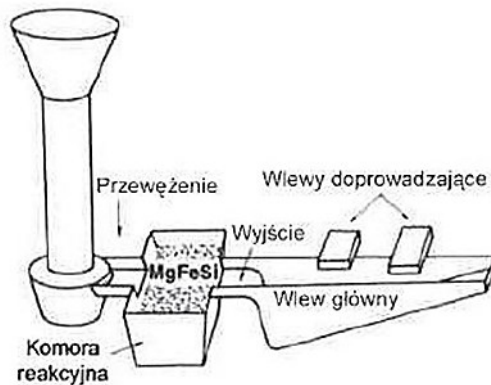
Metoda Sandwich (rys. 1.15a) oraz Tundish (rys. 1.15b) są najczęściej stosowanymi technikami sferoidyzacji z użyciem zaprawy magnezowej. W dnie kadzi wykonuje się specjalne wgłębienie lub kieszeń, w którym umieszcza się zaprawę. W celu opóźnienia początku reakcji Mg z obrabianym metalem, znajdującą się na dnie kadzi zaprawę zabezpiecza się przy pomocy drobnych kawałków (wiórów) stali lub żeliwa. W drugim przypadku (metoda „Tundish”) wykorzystuje się dodatkowo pokrywę (nadstawkę); ciekłe żeliwo wlewa się do kadzi poprzez tę pokrywę bezpośrednio z pieca bądź z drugiej kadzi, służącej jedynie do transportu. Zalety metody Tundish to poprawa uzysku magnezu przez ograniczenie pokrywą dostępu tlenu, przy jednoczesnym zmniejszeniu zadymienia w stosunku do Metody Sandwich.



Rys. 1.15. Wprowadzanie zaprawy magnezowej do ciekłego żeliwa metodą zalewania na dnie kadzi, w metodzie Sandwich (a), w metodzie Tundish (b) [29]

## Metoda Inmold

Metoda sferoidyzacji bezpośrednio w formie, gdzie określoną ilość zaprawy magnezowej umieszcza się w specjalnie zaprojektowanej komorze reakcyjnej, która stanowi część układu wlewowego. Forma zalewana jest żeliwem wyjściowym, ciekłe żeliwo przepływając przez komorę reakcyjną reaguje ze sferoidyzatorem i następuje przenikanie Mg do metalu. W ten sposób następuje zabieg sferoidyzacji bądź wermikularyzacji w zależności od ilości zaprawy umieszczonej w komorze [32].



Rys. 1.16. Schemat układu wlewowego stosowanego w metodzie Inmold: 1-wlew główny, 2 -szyjka doprowadzająca, 3- komora reakcyjna, 4 - zwężenie wylotowe, 5 - wlew rozprowadzający, 6- wlewy doprowadzające [29]

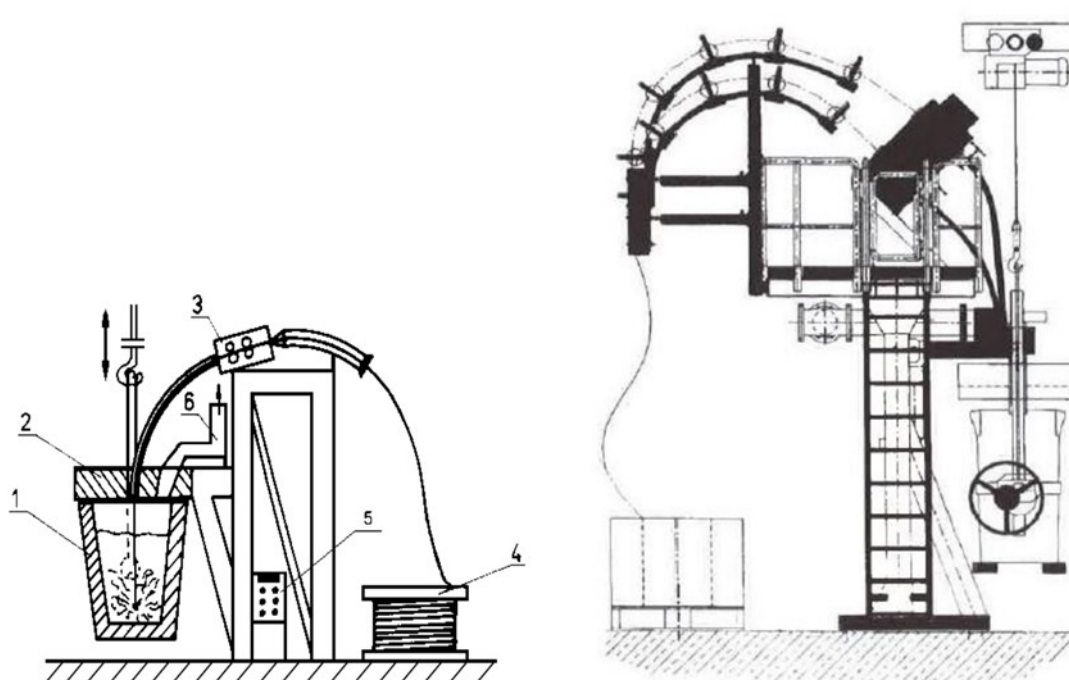
Metoda Inmold wymaga stabilnego procesu wytwarzania żeliwa wyjściowego ze szczególną kontrolą zawartości siarki oraz temperatury zalewania. Bardzo ważna jest powtarzalność składu chemicznego stosowanej zaprawy.

Zalety tej metody to:

- brak efektów świetlnych i dymów,
- zmniejszenie zużycia zaprawy z około 2,0% do 0,6%,
- prosty sposób dodawania Mg,
- wysoki (niekiedy 80%) stopień przyswojenia Mg,
- brak zaniku efektu sferoidyzacji [22, 42, 43].

### Metoda przewodu elastycznego PE

Polega na wprowadzeniu do ciekłego żeliwa zaprawy magnezowo – krzemowej i pierwiastków ziem rzadkich umieszczonych w przewodzie elastycznym w postaci cienkościennej rurki wykonanej z blachy stalowej. Tak zbudowany przewód elastyczny jest wprowadzany do metalu za pomocą podajnika rolkowego [4, 29]. Metodę PE szczegółowo omówiono w punkcie 1.2.



Rys. 1.17. Ogólny schemat stanowiska do zabiegu sferoidyzowania żeliwa metodą przewodu elastycznego; z pojedynczym przewodem (a) 1 – kadź zabiegowa z ciekłym metalem, 2 – pokrywa ogniotrwała, 3 – podajnik rolkowy, 4 – szpula z nawiniętym na nią przewodem sferoidyzującym, 5 – pulpit sterowania komputerowego, 6 – odciąg gazów z nad lustra metalu, [4, 29]

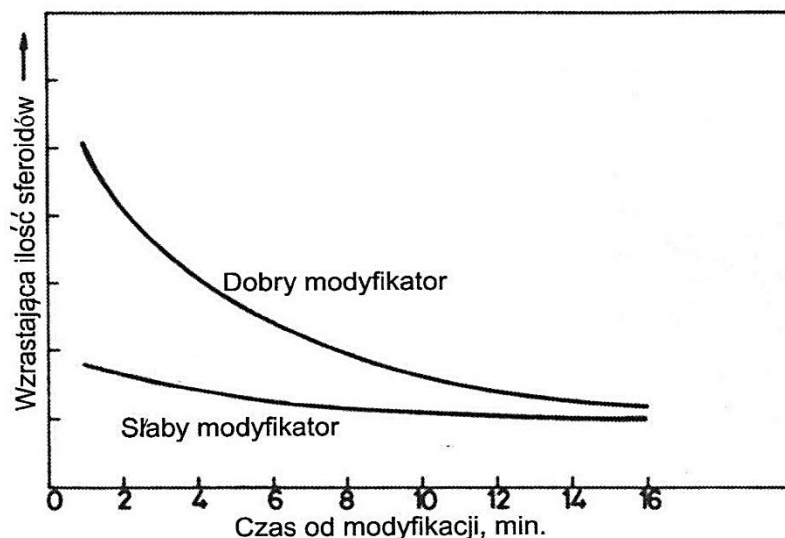
### 1.1.6 Modyfikacja grafityzująca żeliwa sferoidalnego i wermikularnego

W technologii wytwarzania wysokojakościowych gatunków żeliwa bardzo istotnym etapem jest przeprowadzenie zabiegu modyfikowania grafityzującego żeliwa poddanego sferoidyzacji lub wermikularyzacji. Modyfikacja ma na celu zwiększenie zdolności żeliwa do grafityzacji, po zabiegu sferoidyzacji, który ogranicza tę zdolność. Zabieg modyfikacji realizowany jest poprzez dodanie do ciekłego żeliwa niewielkich ilości dodatków, zwanych modyfikatorami opartych głównie na bazie żelazokrzemu FeSi. Modyfikacja, w wyniku zwiększenia liczby aktywnych zarodków krystalizacji i obniżenia wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia, pozwala na uzyskanie podobnej wielkości grafitu w całej objętości odlewu. Zwiększa także liczbę aktywnych zarodków grafitu i zmniejsza niejednorodność struktury odlewu spowodowaną segregacjami składników odlewanego stopu. Modyfikatory wpływają na zwiększenie ilości i zmniejszenie wymiarów krystalizujących faz w żeliwie, co przyczynia się do ogólnego polepszenia właściwości stopu [2, 4, 8, 14].

**Metody modyfikacji:**

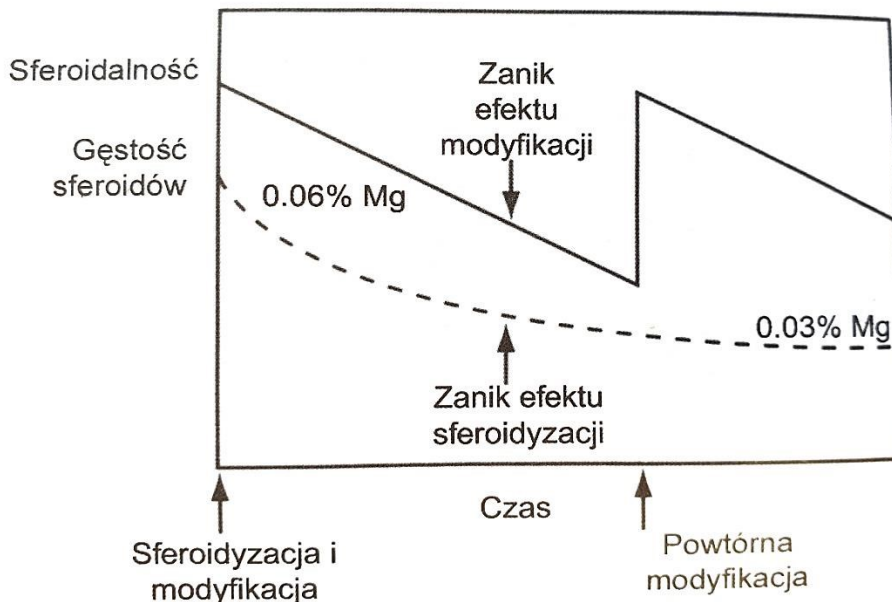
- modyfikacja w kadzi - przeprowadza się ją przez wprowadzenie modyfikatora na strugę ciekłego metalu podczas przelewania metalu z kadzi do sferoidyzacji do kadzi zalewowej. Modyfikator musi być dodawany równomiernie by zapewnić maksymalne wymieszanie i rozpuszczenie jego cząstek,
- modyfikacja za pomocą elastycznego pręta PE – zawierającego rdzeń modyfikujący,
- modyfikacja na strugę metalu - odbywa się przez dodanie modyfikatora podczas wlewania ciekłego metalu do zbiornika wlewowego formy,
- modyfikacja w formie: w zbiorniku wlewowym lub w układzie wlewowym.

Efekt modyfikacji zależy od czasu, z którego upływem zanika. Wraz z zanikiem efektu modyfikacji zmniejsza się ilość wydzieleni grafitu oraz pojawiają się w strukturze osnowy cementyt. Odlewy takie cechuje nieprawidłowa postać grafitu oraz zabielenia powierzchni zewnętrznej. Według publikacji [29] zanikanie efektu modyfikacji zachodzi najszybciej w ciągu pierwszych minut po jego dodaniu, tracąc aż 50% skuteczności po upływie zaledwie 5 minut. Efekt zaniku modyfikacji dla żeliwa sferoidalnego w funkcji czasu przedstawiono na rysunku 1.18. W odniesieniu do żeliwa wermikularnego zanik modyfikacji przebiega podobnie jak w wypadku żeliwa sferoidalnego.



Rys. 1.18. Wpływ czasu od momentu modyfikacji na liczbę sferoidów w żeliwie [29]

Jeśli czas przetrzymywania ciekłego żeliwa jest dłuższy należy stosować dodatkową modyfikację. Zaprawa modyfikująca wprowadzana jest na strugę metalu podczas zalewania. Efekt modyfikacji przed wlaniem metalu do formy został pokazany na rysunku. 1.19 [29].



Rys. 1.19. Schemat pokazujący efekt końcowy modyfikacji żeliwa sferoidalnego [29]

### 1.1.7 Metody kontroli jakości żeliwa oraz efektów obróbki pozapiecowej

Przy wytwarzaniu odlewów z żeliwa wermikularnego bądź sferoidalnego bardzo ważną rolę stanowią badania w poszczególnych etapach procesu. Etapy te można podzielić na badania:

- a) żeliwa wyjściowego,
- b) efektu wermikularyzacji / sferoidyzacji oraz modyfikacji,
- c) końcowe odlewów [2, 5].

Do badań mających na celu analizę składu chemicznego żeliwa wyjściowego używa się spektrometru emisyjnego. Jest to metoda porównawcza, w której następuje porównanie sygnału badanej próbki z sygnałem wzorca tzn. materiałem, w którym znana jest wartość badanego pierwiastka. Dzięki tej metodzie uzyskuje się informacje o zawartości procentowej pierwiastków podstawowych oraz śladowych w badanej próbce. Badanie to prowadzi się celem określenia zgodności składu chemicznego z założonym. Skład chemiczny jest jednym z decydujących parametrów wpływającym na końcowe własności odlewów [29].

Zaletą badań spektrometrycznych jest bardzo krótki czas przygotowania materiału badawczego jak i samego badania. Badanie spektrometryczne wykorzystuje się również do oceny efektu sferoidyzacji/wermikularyzacji poprzez określenie ilości przyswojonego

magnezu w żeliwie po obróbce pozapiecowej. Wadą badania spektrometrycznego jest odczyt zawartości węgla oraz siarki, który należy traktować, jako przybliżony [29].

Kontrole metalu w stanie ciekłym przeprowadza się również na podstawie analizy termicznej, która polega na analizie krzywej stygnięcia. Badanie to pozwala w bardzo krótkim czasie na uzyskanie informacji dotyczącej składu chemicznego zwłaszcza wartość nasycenia eutektycznego Sc, równoważnika węglowego CE jak również zawartość niektórych pierwiastków tzn. węgla oraz krzemu. Dzięki temu badaniu otrzymuje się rzeczywistą zawartość węgla w badanym żeliwie. Analiza termiczna pozwala również na ocenę przydatności żeliwa wyjściowego do modyfikacji i ocenę efektywności tego procesu [34].

Analiza termiczna oraz badanie spektrometryczne należą do badań pośpiesznych stanu fizyko - chemicznego ciekłego metalu. Dostarcza wielu informacji pozwalających na kontrolę procesu przygotowania ciekłego metalu oraz obróbki pozapiecowej (sferoidyzacji, modyfikacje).

W celem szybkiego określenia skuteczności sferoidyzacji - efektu obróbki pozapiecowej często stosuje się metodę kontroli ultradźwiękowej [31, 32, 33].

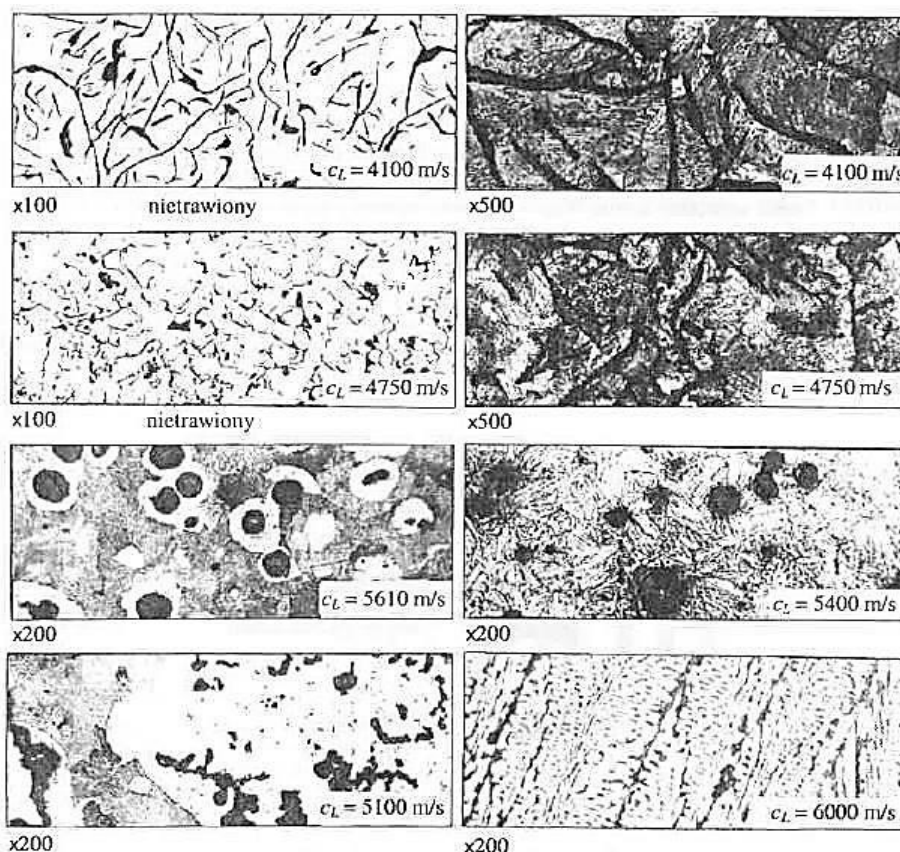


Rys. 1.20. Widok odlanej próbki do badań ultradźwiękowych

Metoda ultradźwiękowa pozwala na kontrolę postaci grafitu [31, 33, 35, 36, 37] i jest to metoda pośpieszna. Zatem może być kontrolowany również proces utraty zdolności żeliwa do krzepnięcia z kulkową postacią grafitu, czyli proces desferoidyzacji wynikający z ubytku Mg w żeliwie wywoływanego jego parowaniem i utlenieniem. Kontrolę prowadzi się na odlanej próbce w postaci wlewka pokazanej na rysunku 1.20 [33, 35, 36, 37]. Po wystygnięciu próbek wyznaczana jest, przy pomocy próbnika ultradźwiękowego, prędkość propagacji podłużnej fali. Na prędkość fali ultradźwiękowej w żeliwie ma wpływ postać, kształt, rozłożenie

i wielkość wydzieleni grafitu oraz rodzaj osnowy metalograficznej [31, 32]. Przy przejściu fali pomiędzy jedną powierzchnią grafit – osnowa a drugą może dochodzić do znacznego jej rozproszenia, co wpływa na wydłużenie drogi, przez co czas przejścia jest dłuższy i pozornie zmniejsza się prędkość [33]. W związku z tym żeliwo różniące się strukturą osnowy i kształtem grafitu będzie się różnić prędkością fali ultradźwiękowej (rys. 1.21).

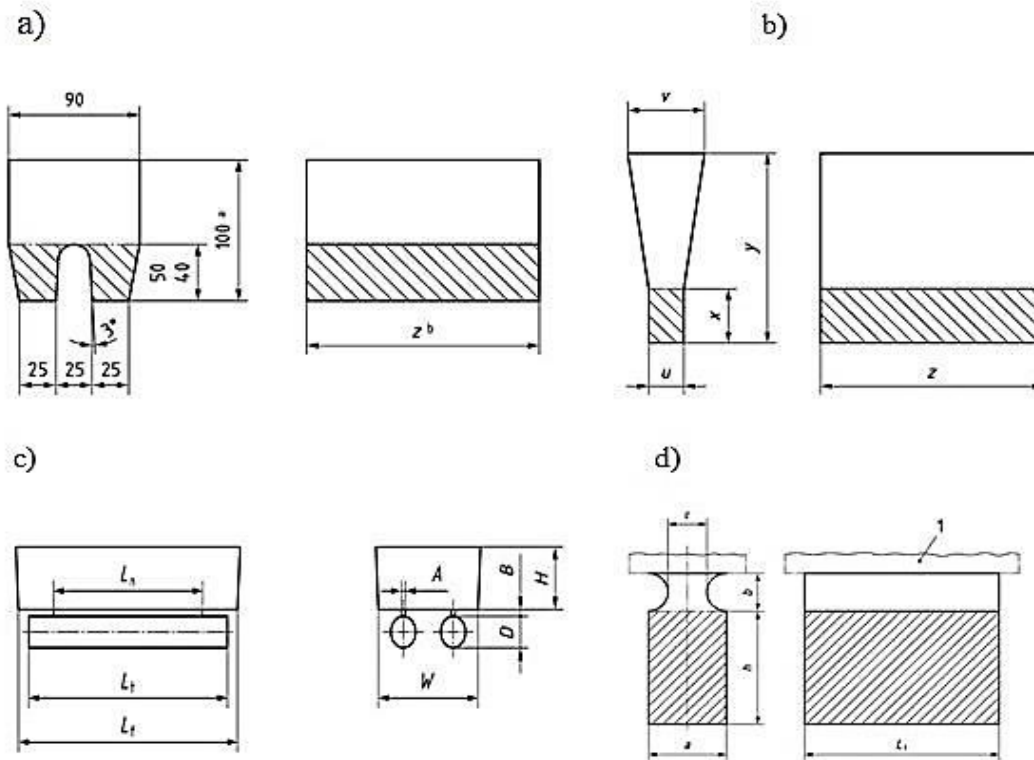
Na podstawie analizy prędkości fali ultradźwiękowej można w bardzo dokładny sposób określić rodzaj uzyskanego żeliwa w odlewie. Metoda ta należy do grupy badań nieniszczących [31, 32].



Rys. 1.21. Wpływ kształtu wydzieleni grafitu i struktury osnowy na prędkość fali ultradźwiękowej [33]

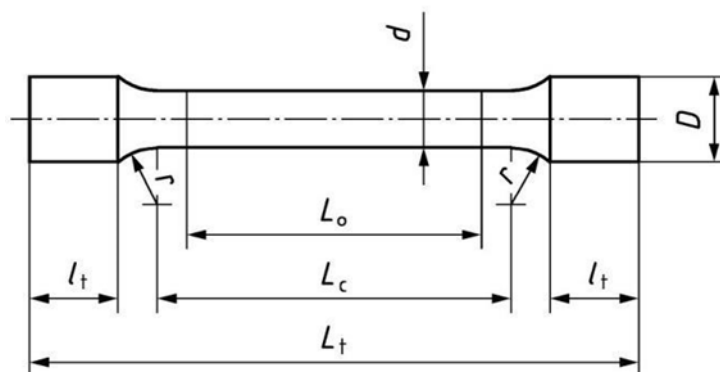
Podstawowym badaniem klasyfikującym strukturę odlewu do danego gatunku żeliwa są badania właściwości mechanicznych określające minimalną wartość wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  i wydłużenie  $A_5$ . Właściwości mechaniczne, jak opisano w punkcie 1.1.2, zgodnie z normą dla żeliwa sferoidalnego PN EN 1563 oraz żeliwa wermikularnego PN EN 16079 oceniane są na próbkach wykonanych z:

- wlewków próbnych oddzielnie odlanych,
- wlewków próbnych odlanych obok odlewu,
- wlewków próbnych przylanych,
- wlewków wyciętych z odlewu (rys. 1.22).



Rys.1.22. Wlewki do badań wytrzymałości na rozciąganie: a) w kształcie litery U; b) w kształcie litery Y; c) w kształcie wałka; d) przyłany do ścianki odlewu [21]

W praktyce najczęściej badania właściwości mechanicznych żeliwa sferoidalnego i wermikularnego wykonuje się na próbkach wykonanych z wlewka w kształcie litery Y oraz z próbki wyciętej bezpośrednio z odlewu. Wycięta próbka jest obrabiana mechanicznie celem uzyskania określonego kształtu (rys.1.23), na przygotowanej próbce przeprowadza się badanie wytrzymałości na rozciąganie. Wynik badania określa wartości  $R_m$ ,  $R_{02}$  i  $A_5$ .



Rys. 1.23. Próbką do badania wytrzymałości w próbie statycznego rozciągania

### 1.1.8 Zastosowanie odlewów z żeliwa wermikularnego oraz sferoidalnego

Żeliwo wysokojakościowe, jego poszczególne gatunki, ze względu na posiadane właściwości mechaniczne jest bardzo często stosowane jako materiał konstrukcyjny. Poszczególne rodzaje żeliwa wysokojakościowego tj. sferoidalnego oraz wermikularnego wykorzystywane są w wielu gałęziach przemysłu a ich zastosowanie wiąże się bezpośrednio z posiadanymi właściwościami fizycznymi oraz wytrzymałościowymi [2, 4, 39, 40, 98].

Odlewy z żeliwa sferoidalnego wykorzystywane w przemyśle:

-**motoryzacyjnym** - wały korbowe oraz rozrządu, kolektory wydechowe, elementy zawieszania, elementy skrzyni biegów oraz przekładni kierowniczych, obudowy turbosprężarek,

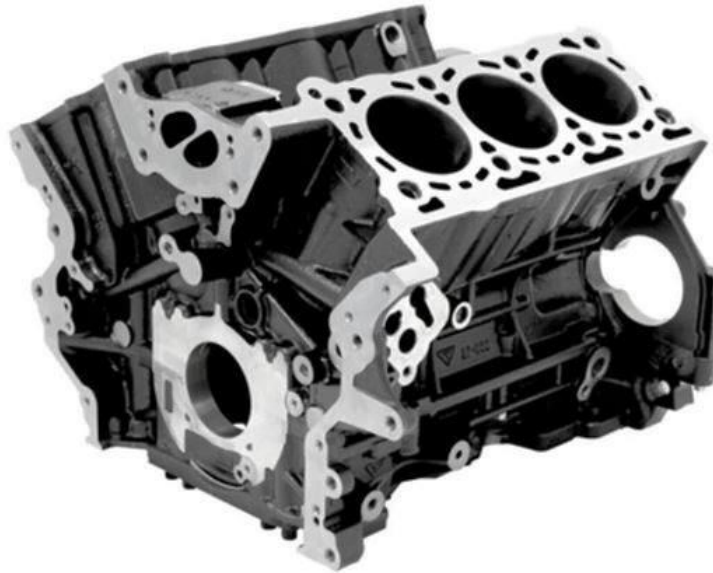
- **kolejowym**- kotwy do podkładów strunobetonowych, obudowy, zaciski i łączniki hamulców, podkładki podszynowe, wsporniki rozjazdowe,

- **maszynowym** – bębny do wózków samojezdnych, elementy napędu hydraulicznego, pierścienie dociskowe, tarcze tłoka, koła zębate oraz pasowe,

- **armatury wodno - kanalizacyjnej** – kształtki, hydranty, zasuwy, kratki ściekowe, skrzynki do instalacji wodnych

Żeliwo wermikularne, ze względu na lepsze od żeliwa szarego właściwości mechaniczne oraz lepsze właściwości termofizyczne (pojemność i przewodność cieplną) niż żeliwo sferoidalne znajduje szerokie zastosowanie w produkcji odlewów w sektorach:

**motoryzacyjnym** - bloki i głowice silników, tarcze i bębny hamulcowe, kolektory wydechowe, tuleje cylindrowe, turbosprężarki, korpusy silników samochodów ciężarowych, obudowy wału korbowego i mechanizmu różnicowego,



Rys. 1.24. Blok silnika Diesel dla Forda [79]



Rys. 1.25 Głowica silnika samochodu ciężarowego [55]

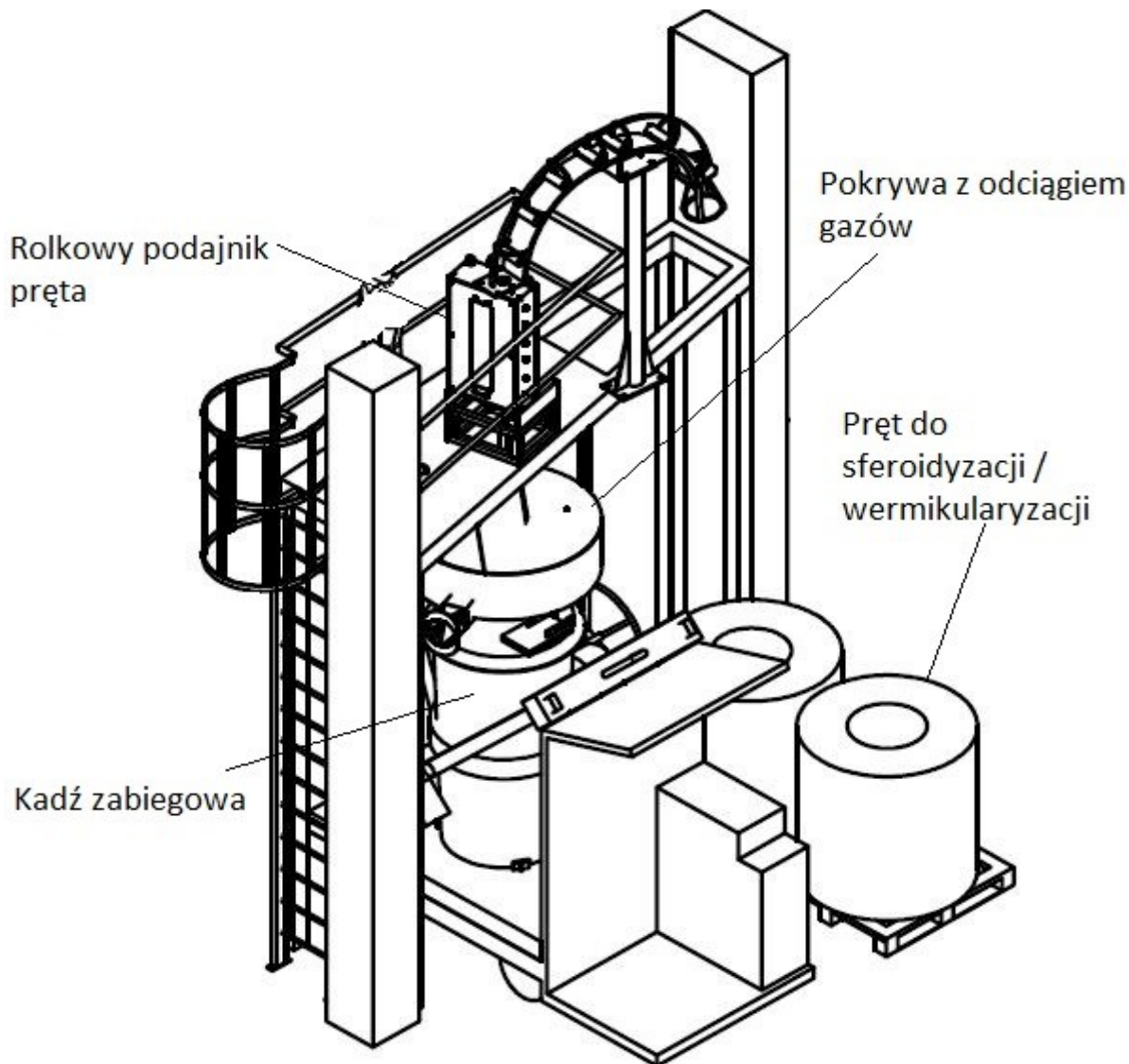
- **okrętowym:** głowice, pokrywy i cylindry silników Diesla,
- **armatury ciśnieniowej:** zawory, korpusy zaworów, przewody hydrauliki siłowej, a także urządzenia rozdzielcze o różnej masie dla hydrauliki wysokociśnieniowej,
- **odlewów dla przemysłu maszynowego:** obudowy łożysk, koła zamachowe, obudowy przekładni, koła łańcuchowe,
- **odlewów dla przemysłu hutniczego:** płyty podwlewnicowe, wlewnice.

## 1.2 Sferoidyzacja / wermikularyzacja metodą przewodu elastycznego PE

Pozapiecowa obróbka metalu metodą przewodu elastycznego PE należy do jednej z najnowocześniejszych metod sferoidyzowania jak również wermikularyzowania żeliwa. Metoda PE używana jest w wielu krajowych jak i światowych odlewniach, cechuje ją duża powtarzalność, pomimo zmiennych parametrów procesu takich jak: zawartość siarki w żelwie wyjściowym, temperatura i masa ciekłego metalu. Polega ona na wprowadzeniu do ciekłego żeliwa zaprawy magnezowo – krzemowej i pierwiastków ziem rzadkich umieszczonych w przewodzie elastycznym w postaci cienkościennej rurki wykonanej z blachy stalowej (rys. 1.26) [4, 29, 32].

Przewód jest wprowadzany do metalu za pomocą podajnika rolkowego. Powinien on być podawany prostopadle do lustra metalu w osi kadzi lub pieca. Stanowisko jest zautomatyzowane i pozwala na dozowanie dobranej ilości przewodu z reagentem [4, 25, 29].

Konstrukcja stanowiska w dużej mierze ogranicza możliwość wydostawanie się na zewnątrz ciekłego metalu w postaci rozprysków w czasie sferoidyzacji/wermikularyzacji wpływając na poprawę warunków BHP. Dzięki zastosowaniu w pokrywie kadzi zabiegowej odciągu gazów, zmniejsza się poziom zapylenia oraz zadymienia w odlewni [4].



Rys. 1.26. Schemat stanowiska sferoidyzacji / wermikularyzacji metoda pręta elastycznego

### 1.2.1 Skuteczność metody PE - wpływ parametrów technologicznych na proces

**Skuteczność metody PE zależy od:**

**Zawartości siarki w żeliwie wyjściowym**

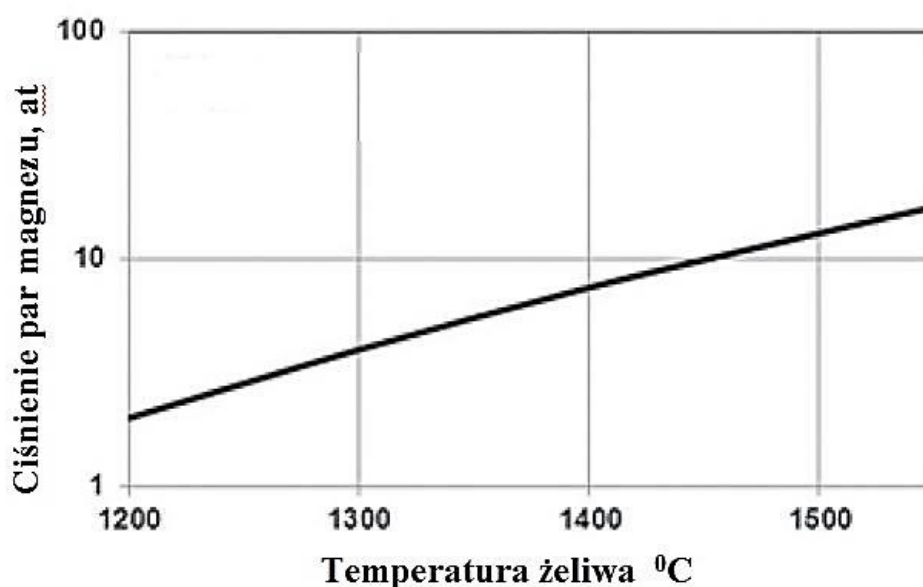
Podczas wprowadzenia do kąpieli magnezu, pierwiastek ten ma duże powinowactwo do siarki tworząc z nią siarczek magnezu (MgS). Duża ilość siarki w żeliwie wyjściowym (powyżej 0,02%) wymaga użycia większej ilości pręta celem uzyskania oczekiwanej postaci grafitu: kulkowej czy wermikularnej.

Z ekonomicznego punktu widzenia ważne jest stosowanie materiałów wsadowych oraz technik topienia metalu, zapewniających utrzymanie małej zawartości siarki w żeliwie wyjściowym. Jednakże, zbyt mała zawartość siarki (poniżej 0,005%) jest

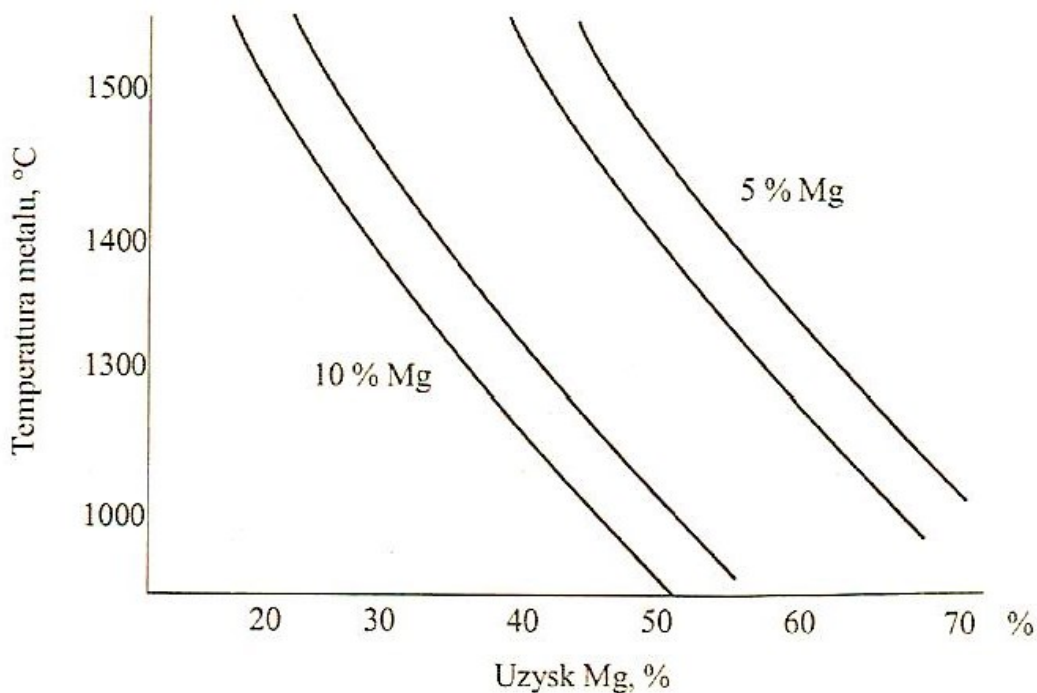
również niepożądana ze względu na małą zdolność takiego żeliwa do sferoidyzacji/wermikularyzacji i jego modyfikacji [2, 4, 25, 29].

### Temperatura żeliwa wyjściowego

Temperatura żeliwa poddawanego obróbce pozapiecowej ma zasadniczy wpływ na uzysk magnezu jak również na jakość odlewów. Wraz ze wzrostem temperatury zwiększa się prężność par magnezu (rys. 1.27) przez co proces sferoidyzacji/wermikularyzacji jest bardziej gwałtowny, co prowadzi do zwiększenia zużycia magnezu (rys. 1.28). Z drugiej strony należy mieć na uwadze fakt, iż w wieloetapowym procesie sferoidyzacji/wermikularyzacji obniża się temperatura żeliwa, która po zakończonej obróbce pozapiecowej powinna być wystarczająca do uzyskania odlewów bez wad.



Rys. 1.27. Zależność par magnezu od temperatury ciekłego żeliwa [93]



Rys. 1.28. Przybliżony uzysk magnezu w żeliwie sferoidalnym w funkcji temperatury [59]

### Masa obrabianego metalu

Automatyczny system dozowania przewodu PE wymaga określenia rzeczywistej masy ciekłego metalu w kadzi celem wyliczenia ilości potrzebnego pręta elastycznego koniecznej do otrzymania żądanej ilości magnezu w żeliwie.

### Grubość blachy stalowej otaczającej magnez

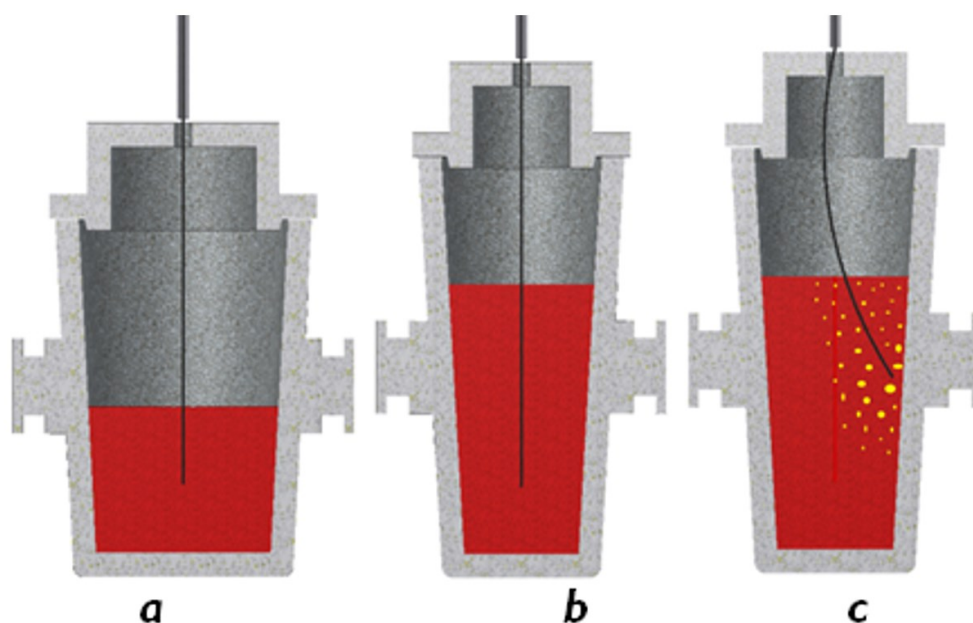
Przewody PE wykonywane są z cienkościennych rurek stalowych o różnej grubości ich ścianek (blachy). Grubość stalowej blachy dobiera się w zależności od temperatury żeliwa przed obróbką pozapiecową: im wyższa jest temperatura, tym stosuje się blachy o większej grubości ścianek. Grubość powinna być tak dobierana, aby zapewnić rozpuszczanie magnezu przy dnie kadzi. Z ekonomicznego punktu widzenia zwiększenie grubości blachy powoduje wzrost kosztów produkcji żeliwa (konieczna jest wyższa temperatura żeliwa).

### Zawartość %Mg w jednym metrze bieżącym pręta

W technologii przewodu elastycznego (PE) jednym z elementów niestabilności może być nierównomierne wypełnienie rurek stalowych sproszkowaną zaprawą, co sprawia, iż w kolejnych odcinakach PE w przeliczeniu na jednostkę długości (np.: metr) może być zawarta inna ilość zaprawy, a zatem i inna ilość Mg. Ta nierównomierność jest szczególnie niekorzystana przy obróbce małych i średnich porcji metalu, przy dużych - ulega uśrednieniu [41].

### Prędkość wprowadzania (podawania) pręta do kąpieli metalowej

Prędkość podawania pręta jest jednym z parametrów, który należy dobrać doświadczalnie. Prędkość powinna być tak dobrana, aby zapewnić rozpuszczanie się końcówki pręta magnezowego przy dnie kadzi (rys. 1.29b). Zbyt mała prędkość podawania powoduje rozpuszczanie się pręta tuż pod lustrem metalu, co negatywnie wpływa na powtarzalność wartość uzyskanego magnezu w całej objętości metalu (rys. 1.29a). Natomiast zbyt duża prędkość podawania pręta wpływa na większe jego zużycie, a więc i zwiększa koszty produkcji [4, 42, 43].



Rys.1.29. Przykłady prędkości podawania pręta podczas zabiegu sferoidyzacji/wermikularyzacji: a) zbyt niska prędkość, b) optymalna prędkość, c) za duża prędkość [42].

Na bazie danych wejściowych komputerowy system dozowania wykorzystuje algorytm [2, 4] wyznaczający ilość dodawanego przewodu magnezowego opierający się na wzorach 1.3 i 1.4.

$$Mg_d = \frac{0,75\Delta S + Mg_{Fe}}{Mg_{uzysk}} \quad (1.3)$$

$$L = \frac{[0,76\Delta S + Mg_{Fe}]m_z}{\eta_{Mg}Mg_p} \quad (1.4)$$

gdzie:

$L$  – niezbędna długość PE, m

$\Delta S = S_1 - S_2$  - różnica zawartości siarki w żeliwie przed i po wprowadzeniu Mg, %

$Mg_d$  – wprowadzona ilość magnezu,

$Mg_{Fe}$  – udział Mg w żeliwie finalnym,

$\eta_{Mg}$  – uzysk Mg ze sferoidyzatora, %,

$Mg_p$  – ilość Mg na metr przewodu elastycznego, kg/m,

$Mg_{uzysk}$  – uzysk magnezu podczas zabiegu sferoidyzacji/ wermikularyzacji,

$Mz$  – ilość obrabianego metalu w kadzi, kg,

0,75 i 0,76 – współczynniki, wynikający z mas atomowych siarki i magnezu.

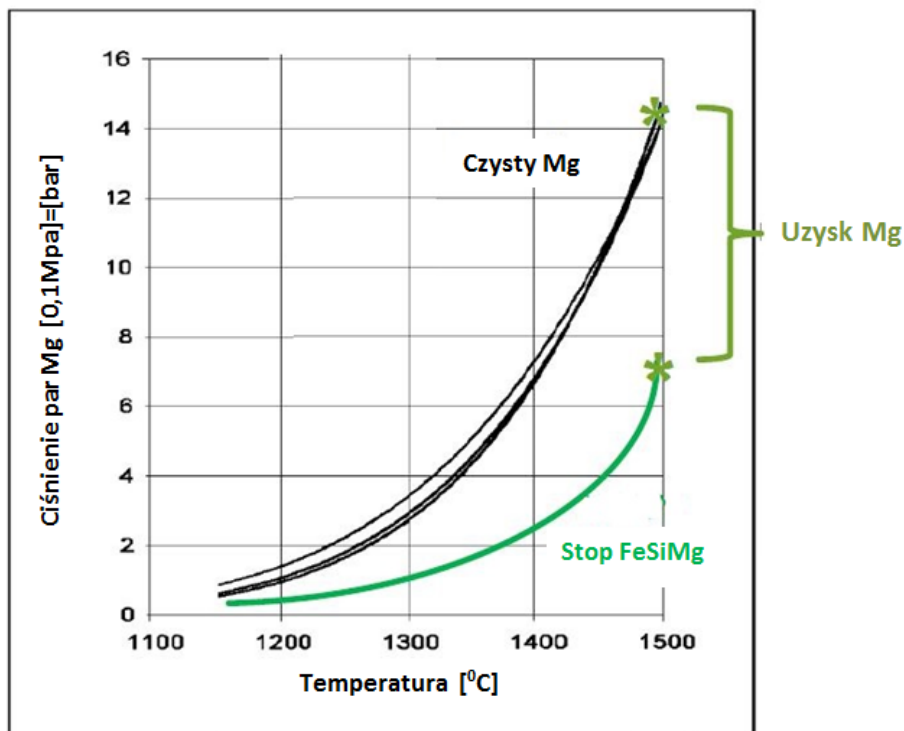
Miarą skuteczności metody PE oraz efektywności zabiegu sferoidyzowania/ wermikularyzowania, jest wskaźnik zwany stopniem przyswojenia Mg oraz zapewnienie jego powtarzalności. Wskaźnik ten opisuje stosunek ilości Mg która została „zatrzymana” w ciekłym żeliwie, do ilości Mg wprowadzonego do metalu, [2, 4, 5, 29, 41].

### 1.2.2 Rodzaje wypełnień prętów stosowanych w metodzie PE

Pręty stosowane do zabiegu sferoidyzacji/wermikularyzacji w metodzie PE najczęściej wypełnione są zaprawami magnezowo - krzemowymi oraz pierwiastkami ziem rzadkich. Przy czym magnez jako reagent występuje w postaci czystego magnezu (pure Mg), stopów magnezu (Alloy FeSiMg), bądź też w postaci mieszanki (blend).

Czysty magnez oraz mieszanki są bardziej reaktywne niż stopy magnezu. Powoduje to, że reakcja podczas etapu sferoidyzacji/wermikularyzacji przy użyciu czystego Mg lub mieszanki jest bardziej burzliwa. Natomiast dzięki użyciu stopu Mg przebieg reakcji jest łagodniejszy. Czysty Mg podczas obróbki pozapiecowej w tej samej temperaturze powoduje prawie dwukrotny wzrost ciśnienia par Mg. Dlatego ruch metalu (efekt mieszania) jest wyjątkowo gwałtowny, zwiększając stopień utlenienia, co w efekcie prowadzi do tworzenia się większej ilości żużla.

W przypadku prętów ze stopami FeSiMg reakcja jest spokojniejsza, przez co zmniejsza się stopień utlenienia, czego efektem jest mniejsza ilość żużla. Równocześnie zwiększa się stopień przyswojenia Mg.



Rys. 1.30. Zależność prężności par Mg od temperatury dla żeliwa sferoidalnego [42]

Koszt wytworzenia stopów jest znacznie większy niż w przypadku czystego magnezu lub mieszanek. Związane jest to z procesem produkcyjnym stopów FeSiMg. Proces ten polega na przetopie materiałów wsadowych, odlewaniu a następnie kruszenia otrzymanego stopu do postaci proszków. Podczas kruszenia stopów FeSiMg istnieje ryzyko eksplozji oraz pożaru, gdyż pył magnezowy jest piroforyczny.

Biorąc pod uwagę powyższe czynniki przy doborze rodzaju zaprawy magnezowej należy kierować się nie tylko uzyskiem magnezu, ale również kosztem pręta. Odlewnie posiadające duże doświadczenie w produkcji żeliwa wermikularnego oraz sferoidalnego metodą PE z użyciem zapraw w postaci czystego magnezu lub mieszanki są w stanie zwiększyć stopień przyswojenia magnezu. Możliwe jest to dzięki dobremu procesowi zarządzania prędkością wprowadzania do metalu pręta PE tak, aby ten rozpuszczał się przy dnie kadzi. W takim wypadku całkowity koszt obróbki pozapiecowej może być niższy niż w przypadku stosowania zapraw ze stopami FeSiMg.

Najczęściej zaprawy magnezowe stanowią od 5 do 30% wypełnienia pręta, pozostałą część to krzem oraz metale ziem rzadkich jak również pierwiastki modyfikujące jak cyrkon oraz bar. Typowe średnice prętów to 9 lub 13mm. W tabeli 1.5 i 1.6 podano przykładowe składy chemiczne prętów używanych w metodzie PE do sferoidyzacji oraz modyfikacji.

Tabel 1.5. Przykładowe składy chemiczne prętów stosowanych do zabiegu sferoidyzacji w metodzie PE

Rodzaj wypełnienia	Skład chemiczny %							
	Mg	Si	RE	La	Zr	Ca	Ba	Al.
Stopy FeSiMg	25	50	1,0-3,0					
	16	50	1,0-3,0					
	15-16	45-50	0,5-3,5			2,5-3,5		max 1
	25-27	45-50				4,0-6,0		max 1
	18-22	43-50	1,0-2,0			18-22		max 1
	24-26	46-50	0,9-1,1					0,5-1,0
	16-18	52-55						
	14-16	46	0,9-1,1					0,5-1,0
Mieszanki/ czysty magnez	23-25	48-50	1,2					
	16-18	50-54	1,3		1,3			
	16-18	50-55						
	40-42	35-38						
	18-20	53-57	1,2-1,5		1,2-1,5			
	16-18	47-51		0,4-0,5		1,5-2,0	1,3-1,7	
	25-26	48-50	1		2			
	24-26	47-50	0,4-0,6			1,5-2,0	1,3-1,7	
	24-26	48-51					1,3-1,7	
	15-18	53-56	0,4-0,6			1,5-2,0	1,3-1,7	
23-25	48	1,2		2				

Tabel 1.6. Przykładowe składy chemiczne prętów stosowanych do zabiegu modyfikacji w metodzie PE

Skład chemiczny %							
Si	RE	Sr	Zr	Ca	Bi	Al.	Ba
65	2,4		3				
75		0,6-1,0			0,9-1,3	max 0,5	
75	0,6-1,0					max 1	
75						3,5-4,5	
73-78			1,3-1,8	2,0-2,5		0,75-1,25	
40-75		1,0-30					
73-78				1,0-2,0		1,0-1,5	
73-78				1,0-1,2		0,8-1,5	2,0-3,0

W tabelach 1.5 oraz 1.6 przedstawiono dostępne na rynku pręty wykorzystywane do zabiegu modyfikacji oraz sferoidyzacji w metodzie PE. Dobór składu chemicznego w głównej mierze zależy od specyfiki danej odlewni oraz technologii. Producenci są w stanie dostosować skład chemiczny oraz zawartość danych pierwiastków dla danego klienta indywidualnie.

### 1.2.3 Porównanie metody sferoidyzacji PE z innymi metodami

Metody wprowadzania sferoidyzatora do ciekłego żeliwa opisane w punkcie 1.1.5 Posiadają różne charakterystyki dotyczące przebiegu procesu. W tabeli 1.7 Zestawiono porównanie metod w odniesieniu do ilości wprowadzanego magnezu oraz jego uzysku jak również przebiegu procesu.

Tabela 1.7. Charakterystyka metod sferoidyzacji żeliwa

	Metoda dzwonowa	Metoda Sadwich	Metoda Tundish	Metoda Inmold	Metoda PE
Zawartość Mg w zaprawie %	10,0-30,0	5,0-10	5,0-10	5,0-10	10-45
Uzysk magnezu %	30-50	40-50	40-75	70-80	25-50
Gwałtowność reakcji	średnia	duża	średnia	mała	średnia

### 1.2.4 Zalety i wady stosowania metody PE

Stosowanie metody PE, jako technologii sferoidyzacji lub wermikularyzacji posiada następujące zalety:

- pełna automatyzacja procesu,
- w pełni kontrolowalny proces sferoidyzacji lub wermikularyzacji, dzięki dozowaniu dokładnej ilości magnezu Mg, w zależności od ilości metalu w kadzi zabiegowej, temperatury oraz zawartości siarki – wszystkie te parametry wprowadzane są do systemu komputerowego, który steruje pracą podajników przewodu PE,
- stabilizacja procesu – możliwość osiągnięcia powtarzalnej końcowej zawartości magnezu w żeliwie, tolerancją  $\pm 0,002$ , co w przypadku klasycznych metod produkcji żeliwa sferoidalnego jest nieosiągalne,
- zapewnia elastyczność procesu przy nieco zmiennych parametrach wyjściowych jak; zawartość siarki w żeliwie wyjściowym, temperatura i masa ciekłego metalu,
- zapewnia dobre warunki BHP – brak zadymienia, zapylenia oraz efektów pirotechnicznych, ponieważ proces jest szczelnie zamknięty, a wszystkie produkty uboczne procesu (gazy, pyły, itp.) są bezpośrednio odciągane przez system odpylający,
- możliwość zastosowania dodatkowego podajnika drutu z prętem do modyfikacji,
- wysoki uzysk magnezu nawet do 50%,
- archiwizowanie parametrów i wyników wszystkich przeprowadzonych procesów,

- zmniejszenie kosztów produkcji żeliwa wermikularnego lub sferoidalnego ze względu na dozowanie optymalnej ilości magnezu do żeliwa wyjściowego.

**Do słabych stron technologii PE należy zaliczyć:**

- konieczność inwestycji w urządzenie (stacja) dozujące – kontrolujące ilości pręta,
- wysoki koszt pręta,
- niestabilność w zakresie procentowej zawartości magnezu w każdym metrze bieżącym pręta [4, 14, 29, 41, 42].

### 1.3 Podsumowanie części teoretycznej

Żeliwo jest jednym z materiałów konstrukcyjnych, który dzięki prowadzeniu licznych prac i badaniom oraz postępowi technologicznemu ciągle się rozwija. Wysoka jakość odlewów oraz rodzaj wytwarzanych gatunków żeliwa jest tego efektem. Obecnie dąży się do zmniejszenia masy odlewów poprzez zmianę grubości ścianek przy jednoczesnym zapewnieniu trwałości, możliwe jest to do osiągnięcia dzięki otrzymaniu żeliwa o wysokich i powtarzalnych właściwościach oraz odlewów bez wad wewnętrznych.

Wysokojakościowe gatunki żeliwa sferoidalnego jak i wermikularnego, pomimo dużej ilości opracowań literaturowych oraz wiedzy w zakresie metod wytwarzania, wciąż należą do grupy gatunków żeliwa o najtrudniejszym procesie produkcji. Największym problemem stanowi proces obróbki pozapiecowej czyli wprowadzenia sferoidyzatora/wermikularyzatora najczęściej w postaci magnezu do ciekłego żeliwa.

Na podstawie licznych badań oraz doświadczeń wydaje się, że zastosowanie metody przewodu elastycznego PE do wytworzenia wysokojakościowych gatunków żeliwa jest właściwym kierunkiem. Metoda PE, która jest całkowicie zmechanizowana oraz sterowana komputerowo pozwala na dozowanie odpowiedniej ilości pręta z reagentem, co w dużej mierze prowadzi do otrzymania właściwego gatunku żeliwa. Możliwość zastosowania jednoczesnej modyfikacji poprzez zastosowanie metody 2PE pozwala otrzymać żeliwo cechujące się dużym rozdrobnieniem struktury, wynikającym z dużej ilości zarodków krystalizacji grafitu. Taka struktura bezpośrednio wpływa na lepsze własności mechaniczne. Sprawia to, że żeliwa wysokojakościowe są odpowiedzią na zapotrzebowania dzisiejszego rynku.

## 1.4 Cel i zakres pracy

### 1.4.1 Cel pracy

Głównym celem naukowym pracy jest przeprowadzenie badań oraz opracowanie technologii wytwarzania żeliwa sferoidalnego oraz wermikularnego metodą PE przy użyciu hybrydowego przewodu PE. Należy określić jak zastosowanie hybrydowego PE wpływa na: rozpuszczalność Mg w ciekłym żeliwie, stopień przyswojenia magnezu, właściwości mechaniczne oraz mikrostrukturę żeliwa.

### 1.4.2 Teza Pracy

Rozprawa doktorska zmierza do weryfikacji tezy:

*Zastosowanie w metodzie PE hybrydowego przewodu elastycznego pozwoli na wytworzenie, w sposób stabilny i powtarzalny odlewów z żeliwa wermikularnego oraz sferoidalnego.*

Badania mają na celu określenie możliwości otrzymywania żeliwa sferoidalnego oraz wermikularnego w warunkach Odlewni Metalpol Węgierska Górka.

### 1.4.3 Plan i zakres pracy

Celem dowiedzenia założonej tezy został opracowany plan badań, według następujących etapów:

- opracowanie założeń technologicznych z uwzględnieniem warunków techniczno – technologicznych panujących w odlewni Metalpol Węgierska Górka,
- badania nad wytworzeniem żeliwa sferoidalnego z wykorzystaniem hybrydowego PE,
- wykonanie serii prób mających na celu określenie stopnia przyswojenia Mg, po obróbce pozapiecowej przy użyciu hybrydowego przewodu elastycznego,
- badania nad wytworzeniem żeliwa wermikularnego z wykorzystaniem hybrydowego PE.

## II. Część Praktyczna

## 2.1 Koncepcja badań

Cześć badawcza pracy została przeprowadzona w Odlewni Metalpol Węgierska Górka. Inspiracją do prowadzenia badań nad technologią wytwarzania wysokojakościowego żeliwa wermikularnego oraz sferoidalnego w Odlewni Metalpol „Węgierska Górka” było pojawienie się w ofercie handlowej firmy Affival (Francja) przewodu elastycznego (PE) o innowacyjnej konstrukcji. Z uwagi na swoją budowę PE pokazaną na rysunku 2.1, przewód elastyczny nowej generacji został nazwany *Hybrydowym Przewodem („Drutem”) Elastycznym*

Celem badań było zweryfikowanie przydatności hybrydowego PE do wytworzenia żeliwa sferoidalnego oraz wermikularnego. Prace badawcze opisane w tej części rozprawy doktorskiej, miały w zamyśle znalezienie optymalnych parametrów technologicznych pozwalających otrzymać w sposób stabilny oraz powtarzalny wysokojakościowych gatunków żeliwa. Realizacja badań odbywała się według następującej kolejności.

Pierwszy etap pracy obejmował ocenę stabilności i powtarzalności zabiegu sferoidyzacji przy użyciu hybrydowego PE do otrzymywania żeliwa sferoidalnego. Na tym etapie pracy oceniono strukturę i właściwości mechaniczne wytworzonego żeliwa sferoidalnego oraz wpływ szybkości stygnięcia na strukturę, w tym morfologię wydzieleń grafitu sferoidalnego.

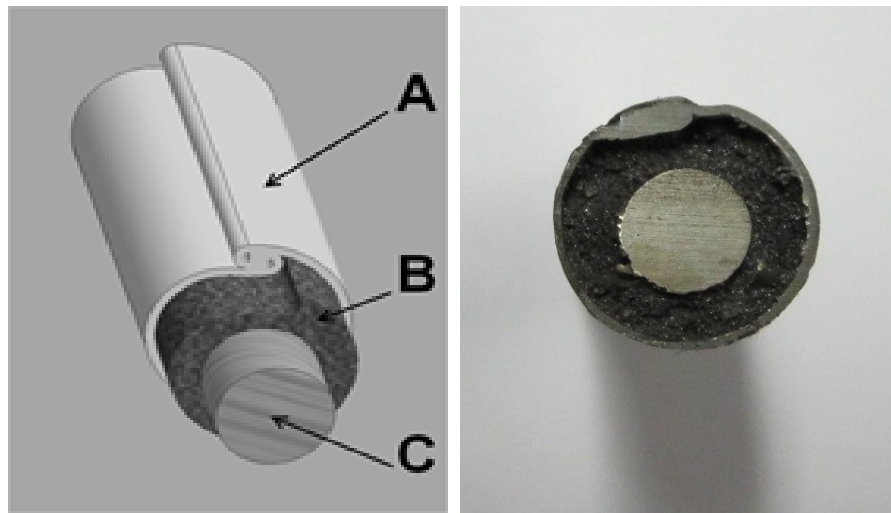
Drugi etap dotyczył przeprowadzenia serii badań, mających na celu określenie stopnia przyswojenia Mg oraz powtarzalności uzyskanych wyników po obróbce pozapiecowej, przy użyciu nowoczesnego hybrydowego przewodu elastycznego. Weryfikację uzyskanych wyników, stopnia przyswojenia Mg odbyła się przez porównanie z wynikami uzyskanymi przy dotychczas stosowanym pręcie elastycznym.

Etap trzeci ocenę stabilności i powtarzalności zabiegu wermikularyzacji przy użyciu hybrydowego PE do otrzymania żeliwa wermikularnego. Badania ponownie skierowane zostały na ocenę struktury i własności mechanicznych wytworzonego żeliwa wermikularnego oraz wpływu szybkości stygnięcia na strukturę, w tym morfologię wydzieleń grafitu wermikularnego.

Badania podsumowano w osobnym rozdziale oraz zestawiono wnioski z ich analizy.

## 2.2 Hybrydowy PE

Budowa Hybrydowego PE opiera się na konstrukcji, w której wykorzystano pręt (druć) wykonany z magnezu zamiast sproszkowanej zaprawy FeSiMg stosowanej w powszechnie używanych PE. Druć magnezowy umieszczany jest w osi symetrii PE. Przestrzeń pomiędzy drutem magnezowym a stalową rurką wypełnia proszek, którym jest zaprawa modyfikująca (modyfikator). Sproszkowana zaprawa nadaje konstrukcji PE dobrą elastyczność konieczną do jego zwijania na bęben i rozwijania podczas wprowadzania do żeliwa. Rozwiązanie zostało opatentowane przez firmę Affival (Patent Nr W02014072456A1). Hybrydowy PE charakteryzuje stała zawartość Mg w przeliczeniu na 1mb pręta, oraz podwyższona zawartość Mg w przeliczeniu do całkowitego ciężaru PE. Zawartość Mg w prętach, w dużej mierze zależy od pojemności i kształtu kadzi zabiegowej. W klasycznych rozwiązaniach PE stosującym sproszkowane zaprawy magnezowe, zawartość Mg waha się w przedziale od 5-30%, w hybrydowym zawartość jest utrzymana w granicach od 20 - 40% Mg [5]. Zużycie hybrydowego PE liczone w długości pręta jest zatem odpowiednio mniejsze w stosunku do tradycyjnej konstrukcji. Ponadto, z uwagi na powtarzalną zawartość Mg w każdym odcinku hybrydowego PE, można bardzo dokładnie dozować sferoidyzator do żeliwa, co jest szczególnie ważne przy produkcji żeliwa wermikularnego.



Rys. 2.1. Budowa Hybrydowego PE („Hybrid Cored Wire”): A- zewnętrzna stalowa powłoka; B- warstwa pośrednia – sproszkowany modyfikator; C- warstwa wewnętrzna - magnez w postaci pręta [42]

Konstrukcja hybrydowego PE, przy określonej średnicy rurki stalowej i średnicy pręta magnezowego wymusza zachowanie stałej proporcji pomiędzy ilością magnezu i modyfikatora, które wprowadzane są równolegle i równocześnie do ciekłego metalu.

Parametry pręta Hybrydowego użytego w Metalpol do zabiegu wermikularyzacji/sferoidyzacji:

- stalowa blacha :
  - grubość : 0,40 mm,
  - średnica zewnętrzna 13 mm,
  - masa odcinka jednego metra blachy stalowej w PE - 168,2 g/m,
- pręt magnezowy wytwarzany techniką wytłaczania,
- masa jednego odcinka metra czystego magnezu w PE – 59,1 g/m,
- modyfikator o składzie przedstawionym w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Skład chemiczny modyfikatora zawartego w hybrydowym PE

<b>Skład chemiczny</b>	<b>Si%</b>	<b>RE%</b>	<b>Al%</b>	<b>Ca%</b>	<b>Ba%</b>	<b>Mn%</b>	<b>Zr%</b>
<b>Pręt <math>\phi</math> 13</b>	64,30%	2,33%	1,20%	4,70%	0,40%	2,60%	3,00%
<b>Zawartość [g/mb]</b>	115,3	4,4	2,3	9	0,8	5	5,7

Masa całkowita 1 metra bieżącego pręta wynosi 440g, przy czym zawartość Mg stanowi 25%

Specyfikacja pręta użytego w Metalpol została dobrana na bazie wieloletnich doświadczeń związanych z obróbką pozapiecową z użyciem prętów magnezowych. Dobierając ilość modyfikatora uwzględniono zasadę, że zbyt duża ilość modyfikatora może być źródłem wtrąceń niemetalicznych, natomiast zbyt mała spowoduje słaby efekt modyfikacji. Z uwagi na to, iż sproszkowany Mg zastąpiono czystym Mg, przewód hybrydowy rozpuszcza się z inną szybkością niż pręt tradycyjny. Należało zatem wyznaczyć prędkość wprowadzania PE do ciekłego żeliwa w powiązaniu z szybkością jego rozpuszczania się oraz poziom przyswajalności magnezu przez ciekły metal.

Badania obejmowały wpływ szybkości podawania hybrydowego PE na stopień przyswojenia Mg oraz wstępną ocenę przydatności hybrydowego PE do obróbki pozapiecowej żeliwa na przykładzie żeliwa sferoidalnego.

### 2.3 Metodyka badań

1. Badania nad wytworzeniem żeliwa sferoidalnego w warunkach Odlewni Żeliwa Metalpol z wykorzystaniem hybrydowego PE.

Badania oceny stabilności i powtarzalności zabiegu sferoidyzacji zostały opracowane zgodnie z poniższymi założeniami:

- wytop w piecu indukcyjnym żeliwa wyjściowego dla uzyskania żeliwa sferoidalnego odpowiadającego gatunkowi EN-GJS 500 -7,
- sferoidyzacja na stanowisku zabiegowym z użyciem Hybrydowego PE,
- odlewanie, w krótkich odstępach czasowych, próbek do kontroli stopnia sferoidyzacji żeliwa metodą ultradźwiękową (pierwsza próbka – tuż po zabiegu sferoidyzacji, kolejne - zalewane, co 2 minuty),
- odlewanie próbek do badań spektralnych w okresie zalewania form na linii BMD (próbki z początku kadzi oraz końca) celem sprawdzenia trwałości zabiegu sferoidyzacji, którego miarą jest zawartość Mg w żeliwie,
- odlanie znormalizowanych wlewków typu Y dla wykonania badań wytrzymałościowych żeliwa,
- odlanie próbki schodkowej celem wyznaczenia wpływu szybkości chłodzenia na mikrostrukturę,
- wykonanie badań wytrzymałościowych oraz badań mikrostruktury na próbkach wyciętych z wlewków typu Y,
- wykonanie badań mikrostruktury z próbek wyciętych z próbki schodkowej,
- analiza wyników.

2. W drugim etapie przeprowadzono badania wpływu wahań parametrów technologicznych podczas zabiegu sferoidyzacji przy użyciu hybrydowego PE na przyswojenie magnezu w żeliwie podczas produkcji żeliwa EN-GJS 500 -7.

Badania zmiany parametrów technologicznych obejmowały:

- zmianę prędkości podawania pręta i jej wpływ na końcową zawartość magnezu w wytworzonym żeliwie oraz uzysk magnezu,
- wpływ zawartości siarki w żeliwie wyjściowym na uzysk magnezu,

- wpływ temperatury zabiegu sferoidyzacji na uzysk magnezu,
- porównanie otrzymanych wyników z prętem stosowanym w Metalpolu.

3. Trzeci etap badań dotyczył prób nad otrzymywaniem żeliwa wermikularnego w warunkach Odlewni Żeliwa Metalpol z wykorzystaniem hybrydowego PE.

Program badań odpowiadał wytycznym, które obowiązują przy produkcji żeliwa sferoidalnego.

## **2.4 Wytworzenie żeliwa sferoidalnego przy użyciu hybrydowego PE**

Jako materiał do badań przyjęto żeliwo sferoidalne EN-GJS 500 -7. Wytypowany gatunek żeliwa sferoidalnego jest gatunkiem najczęściej produkowanym w odlewni Metalpol. Charakteryzuje się osnową ferrytyczno - perlityczną oraz dobrymi właściwościami mechanicznymi zarówno wytrzymałościowymi, jak i plastycznymi.

### **2.4.1 Przygotowanie i wytop żeliwa wyjściowego**

Proces technologiczny związany z topieniem materiałów wsadowych i przygotowaniem żeliwa wyjściowego stanowi jeden z najważniejszych elementów procesu wytwarzania wysokojakościowych gatunków żeliwa. W praktyce, na jakość i właściwości żeliwa wpływa bardzo wiele elementów i czynników technologicznych, w samym procesie topienia metalu wpływ mają:

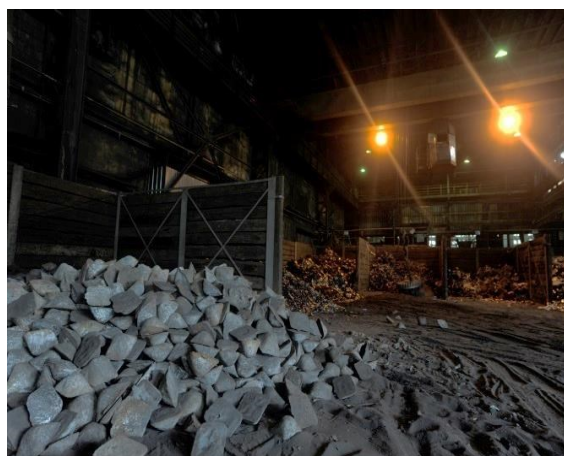
- rodzaj materiałów wsadowych oraz ich jakość, której wskaźnikami są: brak zanieczyszczeń, brak lub niski stopień skorodowania składników metalowych, brak obecności pierwiastków śladowych utrudniających uzyskanie wymaganej struktury żeliwa,
- skład chemiczny ciekłego metalu. Skład chemiczny żeliwa jest podstawowym czynnikiem determinującym uzyskanie określonych właściwości żeliwa,
- temperatura metalu przed spustem, stopień jego przegrzania i czas przetrzymywania po roztopieniu oraz temperatura spustu.

Zgodnie z założeniami, żeliwo stanowiące przedmiot badań odpowiadało gatunkowi żeliwa EN-GJS 500 -7. Zakładany, końcowy skład chemiczny tego żeliwa podano w tabeli 2.2. Dla osiągnięcia dobrej zdolności żeliwa do grafityzacji przyjęto, że żeliwo będzie miało końcowy skład okołoeutektyczny ( $CE \approx 4,3$ ,  $S_c \approx 1,02$ ).

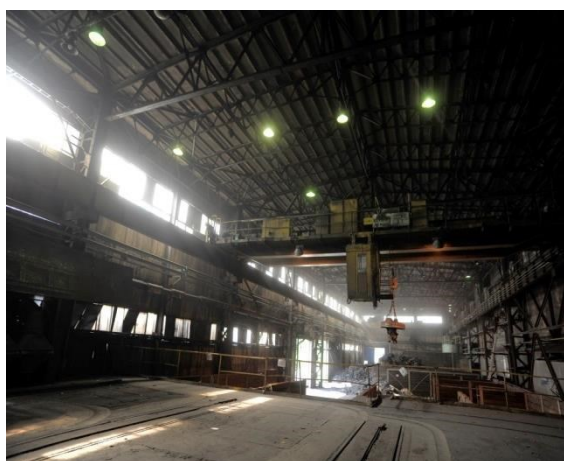
Tabela 2.2. Zakładany skład żeliwa końcowego EN-GJS 500 -7

Skład chemiczny [%]							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Ti
3,5-3,7	2,4-2,6	0,4-0,5	Max 0,05	max 0,009	max 0,25	0,035- 0,043	max 0,05

Do wytopów używano materiałów wsadowych zgodnie z przygotowaną normą wsadową przedstawioną w tabeli 2.3. Materiały wsadowe były suche, wolne od rdzy oraz zanieczyszczeń. Do pieca dozowano je przy pomocy suwnicy wyposażonej w elektromagnes z podwieszoną wagą, pozwalającą na wstępne ważenie oraz transport dowozów załadowniczych.



Rys. 2.2. Pole wsadowe w Odlewni Metalpol

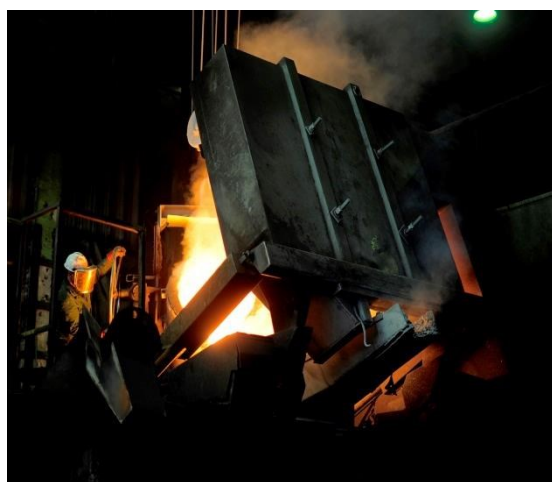


Rys. 2.3. Pole wsadowe – załadunek materiałów metalowych

Tabela 2.3. Zakładowa norma wsadowa dla przygotowania wsadu do 6,0 tonowego pieca przy wytopie żeliwa GJS 500-7

Składniki wsadu	Skład chemiczny składników wsadu w % (średni)							Udział składników we wsadzie w %	Namiary wsadowe w kg
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mg		
Surówka specjalna	4,2	0,16	0,005	0,016	0,01			25	1500
Złom stal Nr 2	0,026	0,358	0,72	0,057	0,09	0,08			0
Złom obiegowy GGG-50	3,5	2,6	0,35	0,035	0	0,04		54,5	3270
Złom stal Nr 3	0,026	1,358	0,32	0,057	0,09	0,02			0
Złom stal Nr 1	0,05	0,035	0,488	0,013	0,01	0,03		20	1200
Węglik krzemu SiC	31	63			0,07			0,5	30
								<b>100</b>	<b>6000</b>
Żelazokrzem FeSi 75	0,1	75,1		0,021	0			FeSi	38
Żelazomangan Mn	6,91	0,54	75,23	0,15	0,02			FeMn	0
Nawęglacz	99,75				0,03			Nawęglacz	44

Wytop żeliwa wyjściowego przeprowadzono w piecach indukcyjnych tyglowych średniej częstotliwości o pojemności 6 ton.



Rys. 2.4. Wytop żeliwa wyjściowego w piecu indukcyjnym

Podczas wytopu kontroli podlegają takie parametry procesu jak: masa materiałów wsadowych, temperatura ciekłego żeliwa oraz jego skład chemiczny. Po uzyskaniu zakładanego składu chemicznego (tab. 2.4), ciekłe żeliwo przegrzano do temperatury 1520°C i wytrzymania w tej temperaturze nastąpił spust żeliwa do kadzi zabiegowej o pojemności tony.

Tabela 2.4. Uzyskany skład żeliwa wyjściowego

Skład chemiczny [%]							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Ti
3,58	2,01	0,41	0,04	0,005	0,13	0,0019	0,013

Otrzymano żeliwo o zakładanym około eutektycznym składzie ( $CE=4,34$   $S_c=1,01$ ).

Żeliwo wyjściowe w kadzi zabiegowej zostało poddane dalszemu procesowi technologicznemu, jakim była obróbka pozapieczowa – zabieg sferoidyzacji i w dalszej fazie modyfikacji, która składała się z modyfikacji pierwotnej i wtórnej.

#### 2.4.2 Zabieg sferoidyzacji żeliwa przy użyciu hybrydowego PE

Obróbka pozapieczowa prowadzona była na specjalistycznym stanowisku przeznaczonym do sferoidyzacji lub wermikularyzacji przy użyciu pręta elastycznego. Głównym urządzeniem tego stanowiska jest agregat dozowania (podawania) elastycznego przewodu sferoidyzującego i wprowadzania go do metalu w kadzi zabiegowej. W trakcie badań zabieg sferoidyzacji przeprowadzony był przy użyciu hybrydowego PE. Budowa tego przewodu do sferoidyzacji, jego struktura oraz skład chemiczny tworzących go elementów zostały omówiony w punkcie 2.2. Zabieg prowadzono w kadzi 1 tonowej, pełniącej zarówno funkcję kadzi zabiegowej jak i kadzi do zalewania form na linię formierską BMD.

Przed procesem sferoidyzacji do komputera nadzorującego oraz obliczającego długość pręta potrzebnego do uzyskania zadanej wartości magnezu w ciekłym żelwie, wprowadzano dane dotyczące parametrów technologicznych pręta PE (rys. 2.5a), parametrów ciekłego metalu (rys. 2.5b) jak również deklarowano prędkości wprowadzania pręta do kąpieli metalowej (rys. 2.6).



Rys. 2. 5. Parametry: a) pręta hybrydowego, b) uzyskane z wytopu żeliwa wyjściowego – wprowadzane do komputera podczas procesu sferoidyzacji

Prędkość wprowadzania pręta początkowo została wyznaczona doświadczalnie – bazując na doświadczeniu i wiedzy wynikającej z długoletniej pracy z technologią sferoidyzacji żeliwa metodą PE. Po wprowadzeniu do komputera wartości wszystkich parametrów procesu, przeprowadzono sam proces sferoidyzacji. W opisywanych próbach prędkość wprowadzania pręta ustalono na wartość 27 m/min.



a/

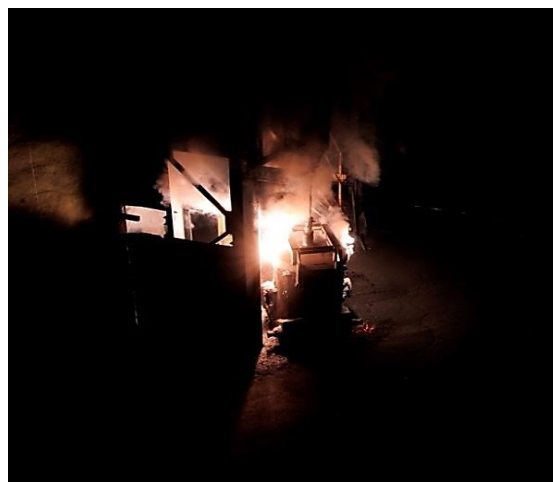


b/

Rys. 2.6. Dobór prędkości wprowadzania do metalu pręta w metodzie PE



a/



b/

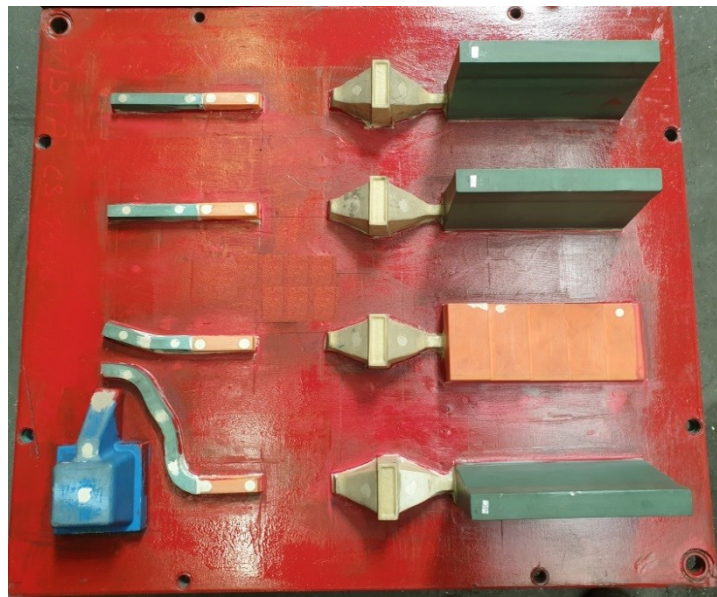
Rys. 2.7. Obróbka pozapiecowa żeliwa a) spust z pieca, b) sferoidyzacja metodą PE

Po zakończeniu procesu sferoidyzacji każdą z ciekłym żelwem była każdorazowo transportowana na linię formierską BMD.

### 2.4.3 Próby na automatycznej linii formierskiej BMD

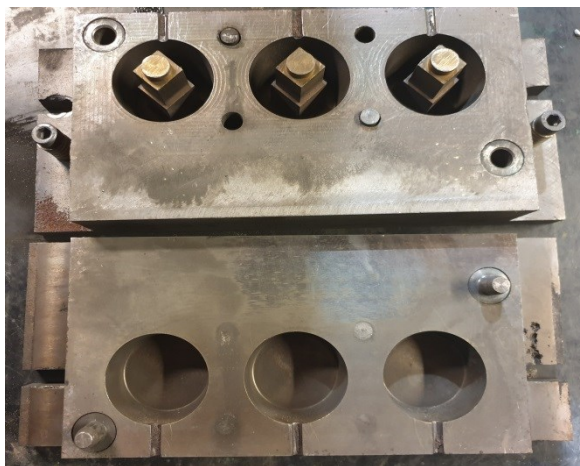
Przed przeprowadzeniem prób zostały przygotowane:

1. Płyta modelowa, na której zamontowano następujące elementy:
  - model wlewka próbnego typu Y (o grubości części roboczej 25mm) wg PN EN 1563, pozwalającą na wykonywanie badań właściwości mechanicznych (rys. 2.8),
  - model próby schodkowej (rys. 2.8) do badań wpływu szybkości krzepnięcia i stygnięcia na mikrostrukturę żeliwa.



Rys. 2.8. Płyta modelowa z wlewkami typu Y oraz próbką schodkową

2. Rdzennica oraz rdzenie do zalewania próbek do badań ultradźwiękowych



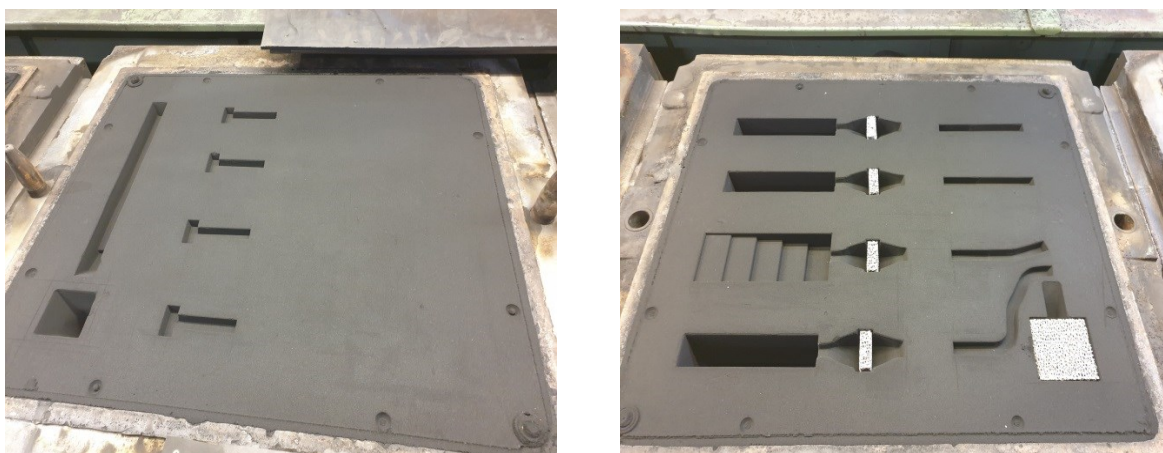
a/



b/

Rys. 2.9. a) rdzennica, b) wyprodukowane foremki do badań ultradźwiękowych

Żeliwo o masie 1 tony rozlewano do uprzednio przygotowanych form (rys. 2.10). Forma badawcza posiadała, poza wlewkiem typu Y oraz próbką schodkową, dwa dodatkowe wlewki Y, celem zwiększenia metalochłonności formy aby zapewnić rozlanie metalu z kadzi w okresie poniżej 15 minut unikając zaniku sferoidyzacji. W czasie rozlewania metalu z kadzi pobierano próbki, z początku i końca rozlewania metalu z kadzi bez modyfikacji do badań spektrometrycznych składu chemicznego oraz zalewano próbki do badań ultradźwiękowych w odstępach 2 minutowych. Próbkę do badań spektrometrycznych pobierano z końcowych porcji metalu w kadzi celem sprawdzenia zawartości Mg i weryfikacji czy nastąpił tak duży zanik efektu sferoidyzacji wynikający z parowania magnezu, że niemożliwe stało się uzyskanie żeliwa sferoidalnego.



Rys. 2.10. Forma doświadczalna przygotowana do procesu zalewania



Rys. 2.11. Zalewanie form z żeliwa sferoidalnego na linii BMD

Dodatkowo, dla zwiększenia efektu modyfikacji na linii BMD, w czasie zalewania każdej formy była prowadzona (wtórna) modyfikacja techniką na „strugę metalu”. Modyfikator użyty do prób to Zircinoc dodawany w ilości 0,1% do masy ciekłego metalu w formie. Wielkość ziaren modyfikatora zawierała się w przedziale od 0,2 do 0,5 mm.

#### 2.4.4 Ocena składu chemicznego żeliwa

Skład chemiczny uzyskanego żeliwa badano na spektrometrze BRUKER. Próbkę do badań pobierano z porcji metalu wlewanej do form bez wtórnej modyfikacji. Pierwszą próbkę pobierano po wykonaniu pozapiecowej obróbki żeliwa – po sferoidyzacji, natomiast ostatnią w chwili kończenia rozlewania metalu do form, po czasie około 15 minut. Wyniki badań zestawiono w tabeli 2.4. Skład chemiczny obejmuje najważniejsze pierwiastki. Uzyskane wyniki odpowiadają założeniom (tab. 2.3). Analizując przebieg procesu ubytku Mg w ciekłym żelwie (tab. 2.5) można wnioskować, iż ilość wprowadzanego Mg była w badanym okresie stabilna i wynosiła pomiędzy 0,042% a 0,043%. W sześciu kadziach, do których rozlano metal z pieca do topienia zmiany składu chemicznego (ubytki Mg) przebiegały bardzo podobnie. Zatem użycie hybrydowego PE pozwala w sposób powtarzalny osiągać założony poziom Mg w żelwie. Podczas rozlewania przez 15 minut żeliwa do form obserwuje się ubytek Mg w ilości około 10% w stosunku do początkowej jego zawartości, czyli tracone jest około 0,004% Mg.

Tabela 2.5. Skład chemiczny wytworzonego żeliwa EN-GJS 500-7

Nr. kadzi	Skład chemiczny uzyskanego żeliwa [%]								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg	Ti
1P	3,612	2,619	0,413	0,043	0,005	0,065	0,136	0,043	0,014
1K	3,580	2,610	0,412	0,040	0,005	0,063	0,132	0,040	0,014
2P	3,611	2,585	0,409	0,040	0,006	0,063	0,131	0,042	0,013
2K	3,576	2,563	0,407	0,040	0,006	0,062	0,133	0,038	0,013
3P	3,621	2,609	0,409	0,039	0,005	0,062	0,128	0,042	0,013
3K	3,592	2,590	0,407	0,040	0,005	0,064	0,134	0,039	0,014
4P	3,598	2,555	0,412	0,041	0,006	0,063	0,143	0,043	0,013
4K	3,538	2,553	0,413	0,041	0,006	0,064	0,141	0,039	0,013
5P	3,616	2,536	0,410	0,039	0,006	0,063	0,134	0,042	0,013
5K	3,543	2,522	0,410	0,039	0,005	0,063	0,134	0,038	0,013
6P	3,587	2,529	0,422	0,038	0,005	0,044	0,129	0,043	0,013
6K	3,563	2,532	0,424	0,038	0,005	0,044	0,129	0,039	0,012

P - próbka pobrana z początkowej porcji metalu w kadzi  
 K - próbka pobrana z końcowej porcji metalu w kadzi

### 2.4.5 Badania ultradźwiękowe

Badania ultradźwiękowe mogą służyć do oceny stopnia sferoidyzacji żeliwa, określaną poprzez wyznaczenia prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej. Prędkość jest wskaźnikiem kształtu wydzieleni grafitu w badanym żeliwie. Im większy jest udział grafitu kulistej postaci tym zwiększa się prędkość fali ultradźwiękowej. Prędkość fali podłużnej charakteryzująca żeliwo sferoidalne powinno spełniać warunek:  $C_L > 5500$  m/s.

Próbki do badań ultradźwiękowych odlewano do przygotowanych foremek wykonanych w Odlewni z piasku otaczanego. Foremki zalewano w odstępach czasowych około 2 minut, aż do czasu wylania całej masy metalu z kadzi (rys. 2.12).



Rys. 2.12. Zalewanie próbek do badań ultradźwiękowych

Badania ultradźwiękowe prowadzono przy użyciu defektoskopu Krautkramer USM 25 bezpośrednio w czasie produkcji, kontrolując proces utraty zdolności żeliwa do krzepnięcia z kulkową postacią grafitu, czyli proces desferoidyzacji wynikający z ubytku Mg w żeliwie, wywołowanego jego parowaniem i utlenieniem. Dla każdej serii badań wykonanych dla danej kadzi obserwuje się w ciągu 15 minutowego rozlewania metalu do form niewielki spadek prędkości fali w badanych próbkach. Jest to naturalne, a jego przyczyną jest zmniejszanie się zawartości Mg w żeliwie, co potwierdzono w badaniach spektrometrycznych (tab. 2.5). Żeliwo z kulkową postacią grafitu charakteryzuje się prędkością fali  $C_L > 5550$  m/s. Wyniki uzyskiwane w czasie badań kolejnych kadzi poddanych obróbce pozapiecowej przy zastosowaniu hybrydowego PE spełniało to kryterium, prędkość fali jest najczęściej wyższa od tej wartości, co pokazano w tabeli 2.6.



a/



b/

Rys. 2.13. Widok a) defektoskop USM 25, b) odlana próbka do badań ultradźwiękowych

Tabela 2.6. Prędkości fali w próbkach odlanych wykonanych z żeliwa sferoidalnego

Czas zalania próbek po zabiegu sferoidyzacji [min]	Prędkość rozchodzenia fali $C_L$ [m/s]					
	Kadź 1	Kadź 2	Kadź 3	Kadź 4	Kadź 5	Kadź 6
3	5720	5685	5648	5743	5721	5742
5	5705	5680	5665	5720	5707	5728
7	5705	5650	5665	5692	5692	5735
9	5615	5750	5681	5630	5674	5704
11	5630	5620	5614	5580	5645	5662
13	5640	5582	5580	5591	5643	5635
15	5660	5535	5540	5573	5598	5601

#### 2.4.6 Badania właściwości mechanicznych

Badania wytrzymałościowe prowadzono przy użyciu maszyny ZD40 na próbkach przygotowanych z wlewków typu Y odlewanych podczas rozlewania metalu. Próbki wykonano jako pięciokrotne (długość pomiarowa równa pięciu średnicom,  $L_0 = 70$  [mm],  $\phi = 14$  [mm]). Badania mechaniczne miały na celu określenie wytrzymałości na rozciąganie ( $R_m$ ), umownej granicy plastyczności ( $R_{p0,2}$ ), wydłużenia ( $A_5$ ) oraz twardości (HB). Wyniki uzyskane z próby wytrzymałościowej zestawiono w tabeli 2.7.

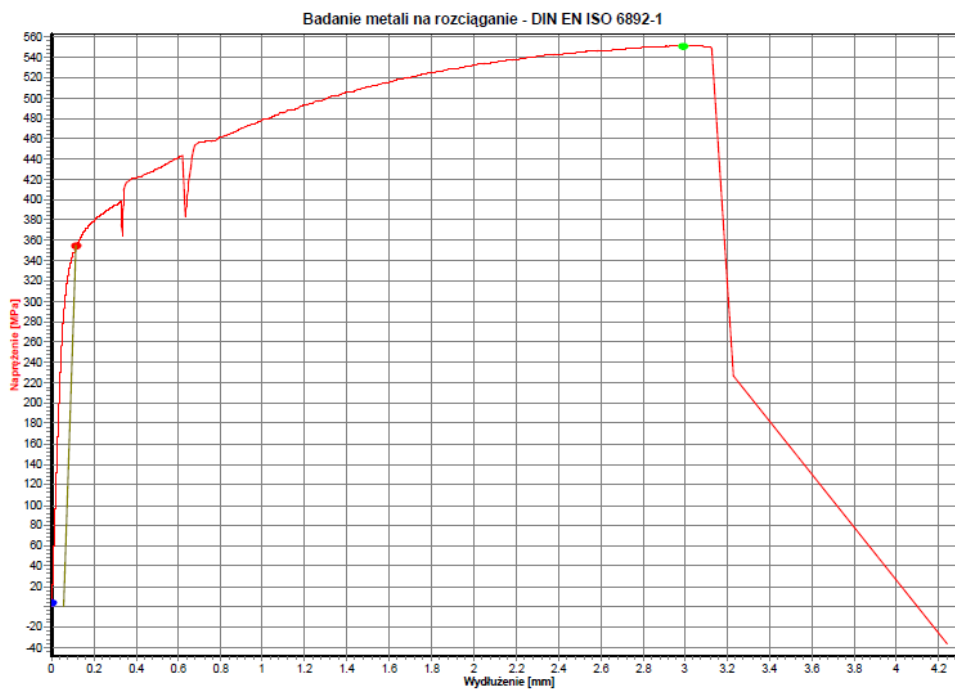
Tabela 2.7. Wyniki badań wytrzymałościowych dla żeliwa sferoidalnego

Nr kadzi	Wytrzymałość $R_m$ [MPa]	Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$ [MPa]	Wydłużenie $A_5$ [%]	Twardość HB
1P	551,0	354,8	10,11	179
1K	531,0	351,0	9,73	176
2P	548,9	353,8	9,91	176
2K	538,7	345,0	9,83	174
3P	545,4	350,8	10,49	177
3K	534,0	352,2	10,32	173
4P	546,2	352,9	10,12	175
4K	527,2	353,7	9,79	178
5P	549,7	356,4	10,52	179
5K	535,0	354,3	9,78	179
6P	542,8	352,5	10,01	176
6K	533,4	350,2	9,62	178

Wyniki uzyskane podczas próby wytrzymałościowej są typowymi wynikami dla żeliwa EN-GJS 500-7. Wartości poszczególnych pomiarów są bardzo zbliżone co świadczy o powtarzalności oraz stabilności procesu. Niewielki spadek zawartości magnezu podczas prowadzonych prób, nie miał wpływu zarówno pod względem wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  oraz wydłużeniu  $A_{05}$  na własności żeliwa. Zawartość Mg w żeliwie utrzymywana była powyżej minimalnej, koniecznej dla uzyskania kulkowej postaci. Podczas prób wytrzymałościowych dla każdej próby został wygenerowany wykres przebiegu rozciągania (rys. 2.14 - 2.15).

### Parametry testu

Badanie: Badanie metali na rozciąganie - DIN EN ISO 6892-1  
 Typ maszyny: ZD20  
 Głowica siły: 200kN  
 Ekstensometr: MFA2  
 Uchwyty: bez  
 Obszar roboczy: Dolny obszar roboczy



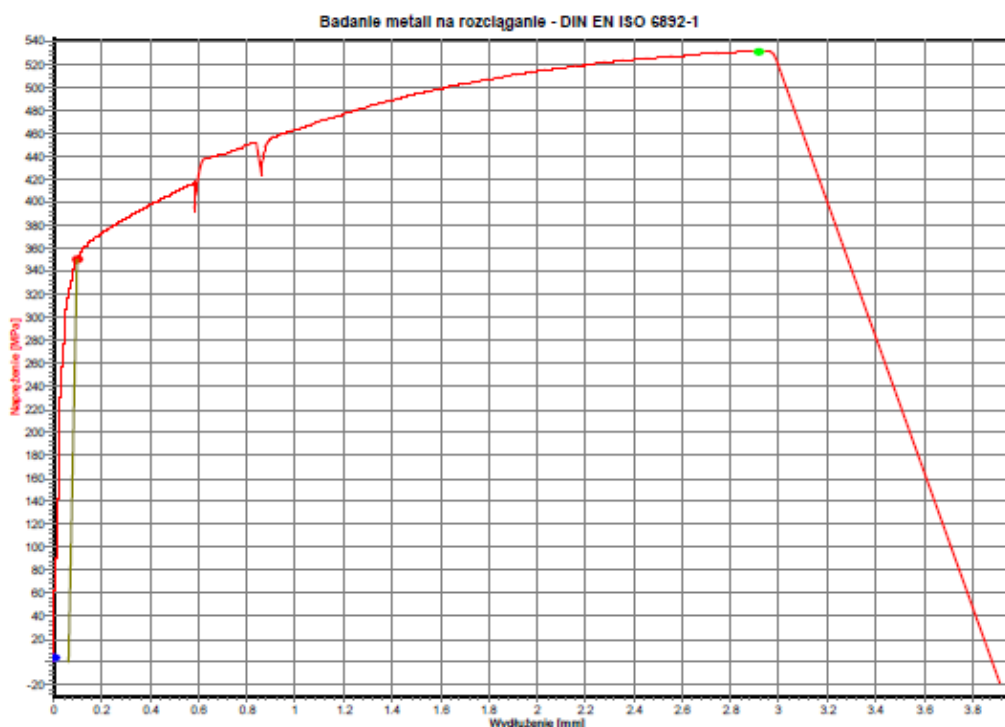
### Tabela wyników

	OK	Data	Czas	Twardość	Rp0,2 N/mm	Rm MPa	A5 %
1	x	09.07.19	11:39	179HB	354	551	10,11

Rys. 2.14. Przebieg rozciągania znormalizowanych próbek wykonanych z wlewków typu Y z żeliwa sferoidalnego dla próbki 1P

## Parametry testu

Badanie: Badanie metali na rozciąganie - DIN EN ISO 6892-1  
 Typ maszyny: ZD20  
 Głowica siły: 200kN  
 Ekstensometr: MFA2  
 Uchwyt: bez  
 Obszar roboczy: Dolny obszar roboczy



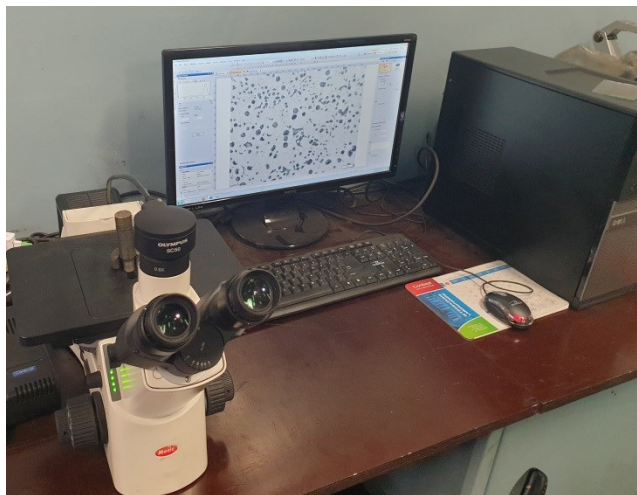
## Tabela wyników

	OK	Data	Czas	Twardość	Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>	Rm MPa	A5 %
1	x	26.07.19	08:46	176HB	351	531	9.73

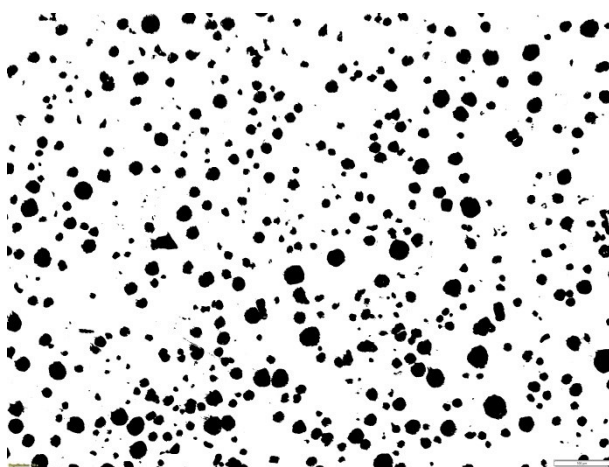
Rys. 2.15. Przebieg rozciągania znormalizowanych próbek wykonanych z wlewków typu Y z żeliwa sferoidalnego dla próbki 1K

#### 2.4.7 Badanie mikrostruktury żeliwa sferoidalnego otrzymanego metodą PE przy użyciu hybrydowego przewodu elastycznego

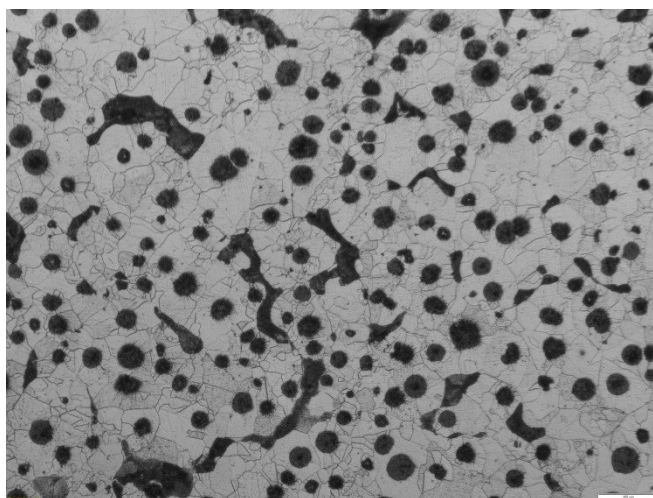
Badania mikrostruktury prowadzono na próbkach przygotowanych z walcowych części (główki) próbek wytrzymałościowych. Ocena mikrostruktury miała na celu określenie postaci grafitu i jego rozłożenia – próbki nietrawione oraz ocenę struktury osnowy metalowej na próbkach trawionych Nitaliem. Badania mikrostruktury prowadzone były na mikroskopie optycznym AE 2000 Met, który jest wyposażony w kamerę Olympus SC 500 (rys. 2.16). Postać i liczbę wydzieliń grafitu na 1 mm<sup>2</sup> jak również cechy osnowy metalowej zostały porównane do wzorców ujętych w normie PN-EN ISO 945:1999.



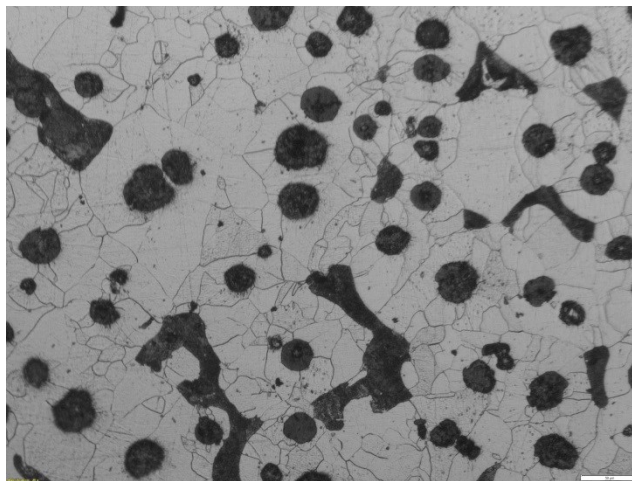
Rys. 2. 16. Stanowisko do badań metalograficznych



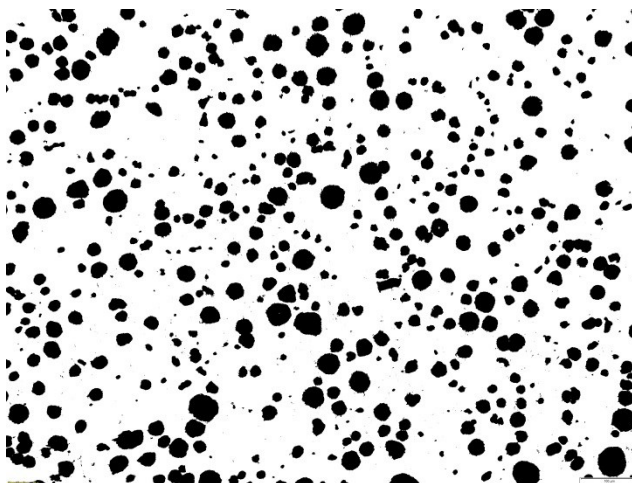
Rys. 2.17. Wydzielenia grafitu w próbce z kadzi 1- początek zalewania  
zgląd nietrawiony, pow. 100x



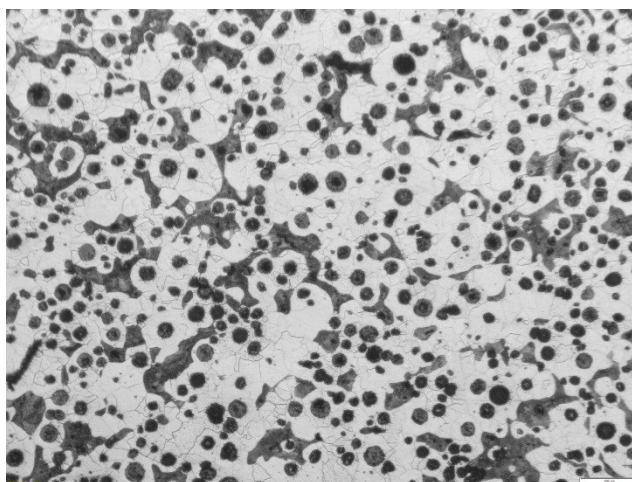
Rys. 2.18. Mikrostruktura żeliwa w próbce 1 – początek zalewania,  
zgląd trawiony, pow. 100x



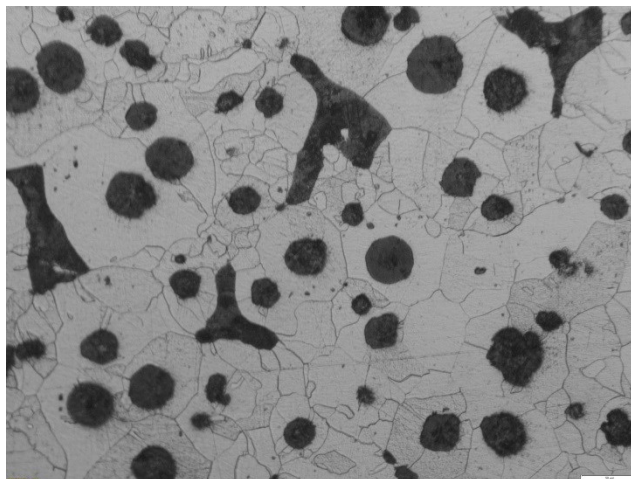
Rys. 2.19. Mikrostruktura żeliwa w próbce z kadzi 1 – początek zalewania  
zgląd trawiony, pow. 200x



Rys. 2.20. Wydzielenia grafitu w próbce z kadzi 1 – koniec zalewania  
zgląd nietrawiony, pow. 100x



Rys. 2.21. Mikrostruktura żeliwa w próbce z kadzi 1 – koniec zalewania  
zgląd trawiony, pow. 100x



Rys. 2.22. Mikrostruktura żeliwa w próbce z kadzi 1 – koniec zalewania  
zgląd trawiony, pow. 200x

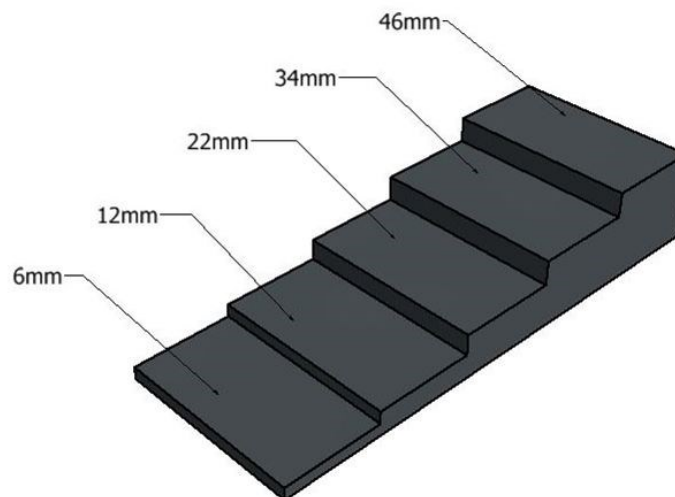
Otrzymana postać wydzieleni grafitu w ponad 97 % posiada regularny kulkowy kształt odpowiadający kształtowi VI zgodnie z normą PN-EN ISO 945: 1999 odpowiadający żeliwu sferoidalnemu, pozostałą część stanowi grafit o nieregularnym kształcie. Pomimo 15 minutowego rozlewania metalu nie wystąpił tak duży zanik efektu sferoidyzacji, aby wywołał uzyskanie grafitu o innej postaci niż kulkowa. Badane żeliwo posiada osnowę ferrytyczno - perlityczną, z dominującą osnową ferrytyczną, która odpowiada żeliwu sferoidalnemu EN-GJS 500-7. Opis wydzieleni grafitu wraz z ich liczbą oraz osnowy otrzymanego żeliwa z poszczególnych kadzi zestawiono w tabeli 2.8.

Tabela 2.8. Klasyfikacja według cech grafitu oraz osnowy żeliwa

Nr kadzi	Klasyfikacja według cech grafitu			Klasyfikacja według cech osnowy			
	Kształt	Wielkość wydzieleni grafitu kulkowego	Liczba wydzieleni grafitu /mm <sup>2</sup>	Symbol Perlitu	Powierzchnia zajmowana przez perlit %	Symbol Ferrytu	Powierzchnia zajmowana przez ferryt %
<b>1P</b>	IV	7	321	P20	20	F80	80
<b>1K</b>	IV	6-7	313	P20	20	F80	80
<b>2P</b>	IV	6	330	P20	20	F80	80
<b>2K</b>	IV	6	297	P20	20	F80	80
<b>3P</b>	IV	6-7	326	P20	25	F80	75
<b>3K</b>	IV	6	280	P20	25	F80	75
<b>4P</b>	IV	7	333	P20	25	F80	75
<b>4K</b>	IV	6	301	P20	25	F80	75
<b>5P</b>	IV	6-7	328	P20	20	F80	80
<b>5K</b>	IV	6-7	285	P20	20	F80	80
<b>6P</b>	IV	6	313	P20	25	F80	75
<b>6K</b>	IV	6	285	P20	25	F80	75

### 2.4.8 Badanie wpływu szybkości stygnięcia na mikrostrukturę

Proces stygnięcia odlewu, poza fizykochemicznym stanem ciekłego żeliwa, jest jednym z najważniejszych czynników mających wpływ na mikrostrukturę żeliwa. Szybkość stygnięcia odlewów w formach piaskowych w głównej mierze zależy od geometrii odlewu, grubości ścianek. Celem określenia wpływu szybkości stygnięcia na mikrostrukturę wytwarzanego żeliwa na płycie modelowej został umieszczony model próbki schodkowej, charakteryzujący się zmienną grubością ścianek rys. 2.23.



Rys. 2. 23. Model próbki schodkowej

Odlane wraz w wlewkami typu Y próbki schodkowe zostały poddane badaniom dwuetapowo:

- metodą ultradźwiękową, celem wyznaczenia wpływu grubości ścianki odlewu, a ściślej szybkości stygnięcia na postać wydzieleni grafitu poprzez badanie szybkości rozchodzenia fali ultradźwiękowej
- wykonanie zglądów do badań mikrostruktury z każdej grubości ścianki.

Metodą ultradźwiękowo przebadano próbki schodkowe (rys. 2.24) z początku oraz końca zalewania form z jednej kadzi. Formy były odpowiednio oznaczone dla właściwego przyporządkowania kolejności. Wyniki tych badań zastawiono w tabeli 2.9.

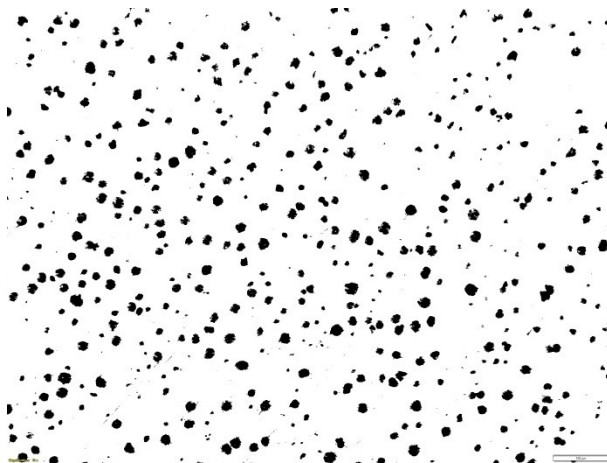


Rys. 2.24. Pomiar próbki schodkowej metodą ultradźwiękową

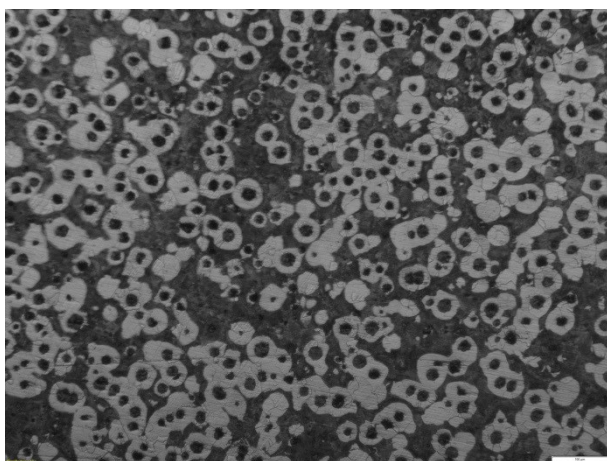
Tabela 2.9. Prędkość rozchodzenia fali ultradźwiękowej w zależności od grubości ścianki w próbkach schodowych wykonanych w kolejnych wytopach.

Nr. kadzi	Prędkość rozchodzenia fali $C_L$ [m/s] w zależności od grubości ścianki				
	6mm	12mm	22mm	34mm	46mm
1P	5512	5549	5635	5665	5695
1K	5529	5561	5612	5679	5673
2P	5554	5604	5728	5691	5725
2K	5654	5654	5721	5747	5708
3P	5507	5788	5701	5717	5682
3K	5583	5605	5728	5690	5725
4P	5549	5695	5693	5696	5677
4K	5528	5732	5670	5679	5542
5P	5580	5653	5684	5686	5712
5K	5490	5732	5670	5679	5642
6P	5590	5622	5622	5655	5661
6K	5612	5776	5605	5685	5669

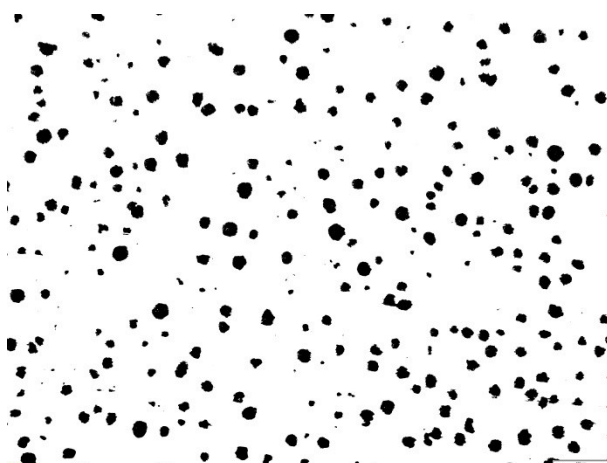
Wyniki badań ultradźwiękowych wskazują, że we wszystkich testowanych grubościach ścianki powinien występować grafit w postaci sferoidalnej, niezależnie od momentu zalewania formy, który ogólnie mieścił się w przedziale do 15 minut. Celem weryfikacji otrzymanych wyników z każdej grubości ścianki wykonany zgląd do badań mikrostruktury. Wyniki dla każdej grubości ścianki pokazano na rysunkach 2.25 - 2.34.



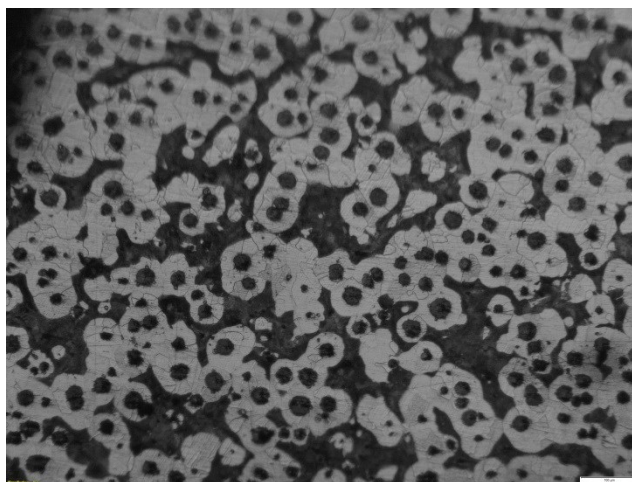
Rys. 2.25. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 6mm, zgląd nietrawiony, pow. 100x



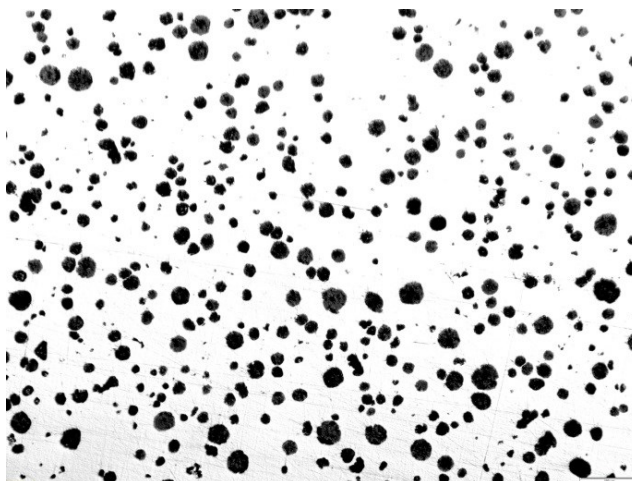
Rys. 2.26. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 6 mm, zgląd trawiony, pow. 100x



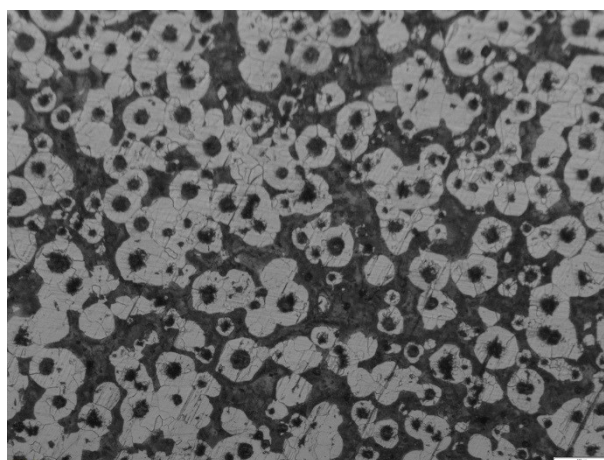
Rys. 2.27. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 12 mm, zgląd nietrawiony, pow. 100x



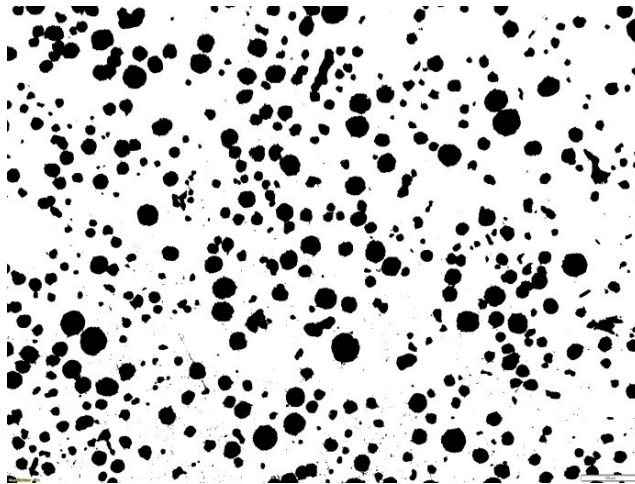
Rys. 2.28. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 12 mm, zgląd trawiony, pow. 100x



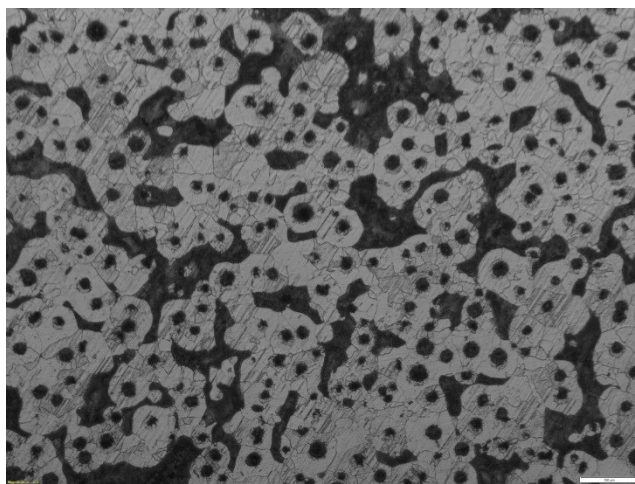
Rys. 2.29. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 22 mm, zgląd nietrawiony, pow. 100x



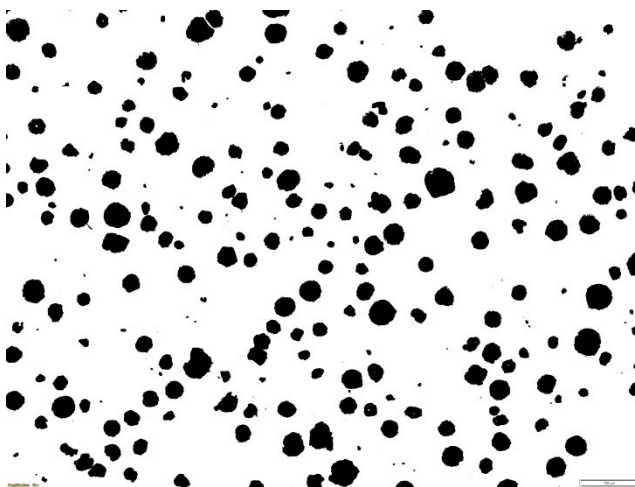
Rys. 2.30. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 22 mm, zgląd trawiony, pow. 100x



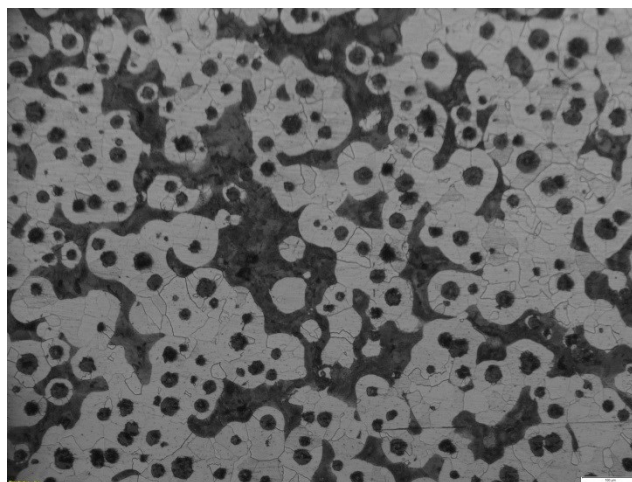
Rys. 2.31. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 34 mm, zgląd nietrawiony, pow. 100x



Rys. 2.32. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 34 mm, zgląd trawiony, pow. 100x



Rys. 2.33. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 46 mm, zgląd nietrawiony, pow. 100x



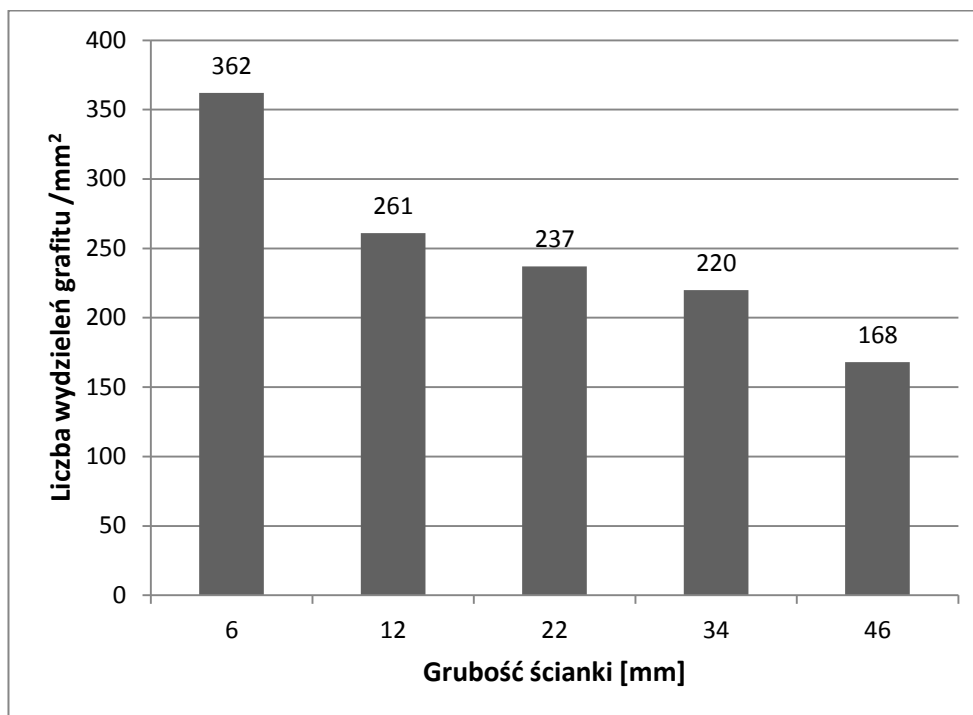
Rys. 2.34. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 46 mm, zgląd trawiony, pow. 100x

Użycie próbki schodkowej pozwoliło zbadać wpływ grubości ścianki odlewu (ściślej szybkości stygnięcia) na mikrostrukturę. Porównując otrzymane mikrostruktury ze względu na cechy grafitu wraz ze wzrostem grubości ścianek następuje zmniejszenie liczby wydzieliń grafitu na  $1\text{mm}^2$  (rys 2.35). Zestawiając wyniki w oparciu o cechy osnowy z poszczególnych grubości ścianek można zaważyć, w szczególności dla grubości ścianki 6mm, zwiększony udział perlitu. Związane jest to z szybkością chłodzenia, przy której dyfuzja węgla w kierunku kulek grafitu nie jest wystarczająca i austenit przemienia się w perlit. Dla pozostałych grubości ścianek zwiększa się udział ferrytu w stosunku do perlitu (rys. 2.36).

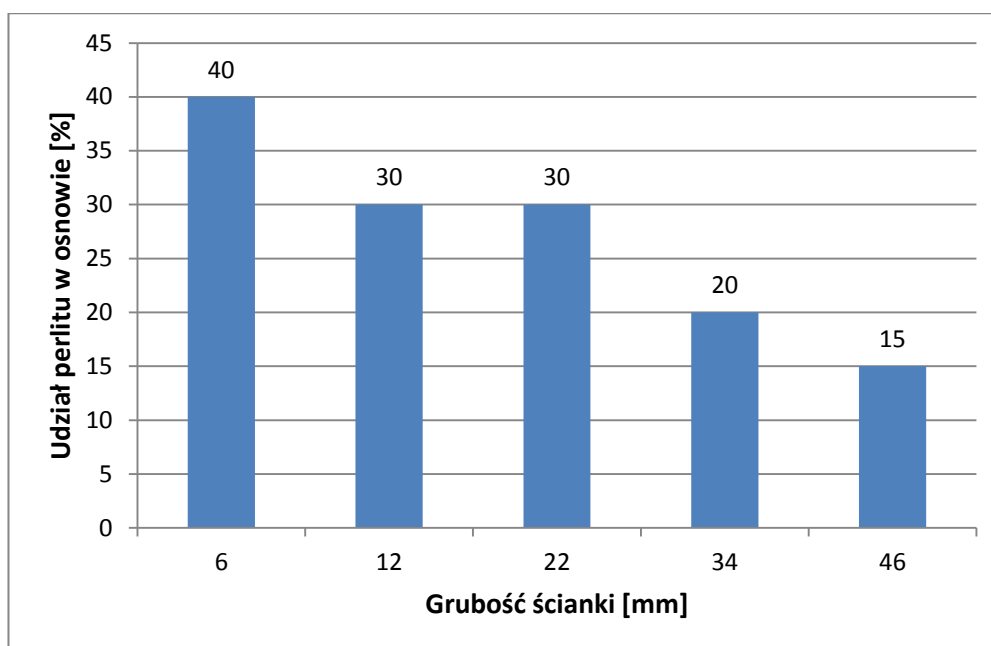
Uzyskane wyniki dla wszystkich badanych grubości ścianek, pomimo zwiększonego udziału zawartości perlitu w osnowie dla ścianki 6mm, w pełni odpowiadają mikrostrukturze żeliwa sferoidalnego.

Tabela 2.10. Klasyfikacja według cech grafitu oraz osnowy żeliwa próbki schodkowe

Grubość ścianki	Klasyfikacja według cech grafitu			Klasyfikacja według cech osnowy			
	Kształt	Wielkość wydzieliń grafitu kulkowego	Liczba wydzieliń grafitu / $\text{mm}^2$	Symbol perlitu	Powierzchnia zajmowana przez perlit %	Symbol Ferrytu	Powierzchnia zajmowana przez ferryt %
6	IV	7	362	P45	40	F55	60
12	IV	7	261	P20	30	F80	70
22	IV	7	237	P20	30	F80	70
34	IV	6- 7	220	P20	20	F80	80
46	IV	6- 7	168	P20	15	F80	85



Rys. 2.35. Wpływ grubości ścianki na liczbę wydzieliń grafitu



Rys. 2.36. Wpływ grubości ścianki na udział perlitu w osnowie

Analizując pierwsze próby wytwarzania żeliwa sferoidalnego z zastosowaniem hybrydowego PE można zauważyć, że występuje duża powtarzalność w uzyskiwaniu właściwej postaci grafitu, a samo żeliwo charakteryzuje się dobrą stabilnością struktury i właściwościami mechanicznymi. Jest to częściowo zasługą właściwego modyfikatora, który wypełnia stalową rurkę i wraz z prętem magnezowym tworzy hybrydowy PE. Dodatkowa

modyfikacja na strugę przy odlewaniu na linii BMD nie wpłynęła na dalszą poprawę właściwości żeliwa, co pośrednio dowodzi o dobrze przeprowadzonej wcześniej modyfikacji, w tym modyfikacji zaprawą umieszczoną w hybrydowym PE.

Ogólnie z pierwszych badań można wnioskować, iż zastosowanie hybrydowych PE, w których magnez występuje w postaci pełnego pręta (druetu) z magnezu lub jego stopu stwarza możliwości wytwarzania żeliwa w sposób stabilny i powtarzalny. Otrzymane wyniki z prób wytrzymałościowych jak również analiza mikrostruktury pokazują, że uzyskane żeliwo posiada właściwości odpowiadające założonemu do osiągnięcia gatunkowi EN GJS-500 -7.

Wciąż nierozwiązaną kwestią pozostaje wpływ prędkości wprowadzania hybrydowego PE do ciekłego żeliwa, która powinna być dobrze zsynchronizowana z szybkością jego rozpuszczania. Ma to duży wpływ na poziom przyswajalności magnezu. Ze względu na zawartość czystego magnezu w hybrydowym PE jego rozpuszczalność będzie prawdopodobnie większa niż prętów stosowanych dotychczas.

## **2.5 Wpływ parametrów technologicznych na poziom przyswajalności magnezu**

Odlewnia Metalpol Węgierska Górka, w której prowadzono prace badawcze ma ponad 15 letnie doświadczenie w sferoidyzacji metoda PE. Posiadając zbiór zarchiwizowanych danych, dotyczące parametrów technologicznych wpływających na proces takich jak:

- temperatura ciekłego żeliwa,
- masa ciekłego żeliwa w kadzi,
- prędkość wprowadzania pręta do kadzi,
- zawartość siarki [%] w żeliwie wyjściowym,
- specyfikacja pręta użytego do sferoidyzacji tj. procentowa zawartość Mg.

Wszystkie powyższe dane zapisywane są na serwerze, wraz z datą oraz numerem kadzi (tab. 2.11), użytej do procesu sferoidyzacji, zapewniając pełną identyfikację.

Tabela 2.11. Przykładowe zestawienie parametrów technologicznych wpływających na proces sferoidyzacji dla pręta magnezowego stosowanego w bieżącej produkcji Metalpol.

DATA	Godzina	N° kadzi	Temperatura żeliwa	Waga żeliwa w kadzi	Siarka w żelwie wyściowym	Wprowadzony Si	% Zawartość Mg w pręcie	Długość wprowadzonego pręta [m]	Masa Mg w 1 metrze pręta	Predkość lini	Mg uzyskany w żelwie [%]	uzysk Mg [%]
2019-10-03	10:42:00	B 13	1490	1200	0,005	0,353	17	33,00	245	27	0,0390	34,05
2019-10-03	11:16:00	B 15	1485	1100	0,005	0,346	17	28,77	245	27	0,0400	36,72
2019-10-03	12:17:00	B 18	1482	1200	0,005	0,342	17	30,85	245	27	0,0370	34,56
2019-10-03	12:57:00	B 20	1482	1350	0,005	0,342	17	31,85	245	27	0,0380	38,68
2019-10-03	13:14:00	B 21	1489	1200	0,005	0,352	17	29,89	245	27	0,0400	38,56
2019-10-03	13:48:00	B 23	1489	1000	0,004	0,338	17	25,58	245	27	0,0390	36,61
2019-10-03	14:07:00	B 1	1489	1000	0,004	0,338	17	25,58	245	27	0,0400	37,55
2019-10-03	14:37:00	B 3	1489	850	0,004	0,338	17	21,73	245	27	0,0410	38,50
2019-10-03	14:58:00	B 4	1489	1170	0,004	0,338	17	27,92	245	27	0,0380	38,23
2019-10-03	15:37:00	B 6	1489	1000	0,004	0,354	17	25,39	245	27	0,0360	34,05
2019-10-03	16:48:00	B 10	1500	800	0,004	0,354	17	21,39	245	27	0,0380	34,13
2019-10-03	20:56:00	B 21	1490	850	0,006	0,351	17	25,58	245	27	0,0400	31,92

Dzięki pozytywnym wynikom uzyskanym w pierwszym etapie badań, w czasie produkcji żeliwa EN-GJS 500-7 z użyciem hybrydowego PE, zrealizowano kolejne badania. Analizowano wpływ poszczególnych parametrów technologicznych na poziom przyswajalności magnezu podczas obróbki pozapiecowej z zastosowaniem hybrydowego PE.

### 2.5.1 Wpływ prędkości podawania pręta na stopień przyswajalności magnezu

Celem określenia szybkości rozpuszczania hybrydowego PE, przeprowadzono serie badań ze zmienną prędkością wprowadzania pręta oraz jej wpływ na przyswojenie magnezu podczas produkcji żeliwa sferoidalnego przy użyciu hybrydowego PE. Założenia badawcze:

- temperatura przegrzania 1530<sup>0</sup>C,
- temperatura spustu żeliwa do kadzi 1500 +/- 10<sup>0</sup>C,
- zawartość siarki przed wprowadzeniem sferoidyzator 0,005+/- 0,002 %,
- masa żeliwa w kadzi 1000kg +/- 50 kg,
- prędkość wprowadzania hybrydowego PE od 25 - 29 m/min.

Serię wytopów doświadczalnych prowadzono podczas bieżącej produkcji odlewów, zmieniając prędkość wprowadzania pręta do kąpeli metalowej. Badania dotyczą kadzi zabiegowej o wysokości słupa ciekłego żeliwa w przedziale od 100 cm do 120 cm. Każdorazowo prowadzono badanie spektrometryczne, sprawdzające końcową zawartość magnezu, która decyduje o kształcie wydzieleń grafitu. Znając końcową zawartość magnezu można było obliczyć uzysk magnezu.

Z pośród wszystkich uzyskanych rezultatów, dla każdej prędkości wprowadzania pręta w tabeli od 2.12 do 2.16 zestawiono po 10 reprezentatywnych wyników odpowiadających założonym parametrom.

Tabela 2.12. Wartość uzysku Mg przy prędkości wprowadzania pręta 25 m/min

Temperatura żeliwa	Waga żeliwa w kadzi	Siarka w żeliwie wyjściowym	Zawartość Mg w przecie [%]	Długość wprowadzonego pręta [mb]	Masa Mg w jednym metrze pręta [g]	Prędkość podawania pręta [m/min]	Zakładany % Mg	Zawartość Mg w żeliwie [%]	Uzysk Mg [%]
1490	960	0,005	25	19,54	228	25	0,04	0,0360	31,03
1496	1000	0,006	25	20,634	228	25	0,04	0,037	31,46
1497	1000	0,005	25	20,011	228	25	0,04	0,036	31,56
1494	1050	0,005	25	20,452	228	25	0,04	0,038	34,23
1490	1000	0,007	25	21,023	228	25	0,04	0,036	30,04
1490	1000	0,006	25	20,576	228	25	0,04	0,038	32,40
1490	985	0,005	25	19,867	228	25	0,04	0,037	32,18
1497	950	0,005	25	19,145	228	25	0,04	0,036	31,34
1490	970	0,007	25	20,578	228	25	0,04	0,035	28,94
1498	1040	0,005	25	20,947	228	25	0,04	0,036	31,36
<b>Średnia</b>								<b>0,0365</b>	<b>31,45</b>

Tabela 2.13. Wartość uzysku Mg przy prędkości wprowadzania pręta 26 m/min

Temperatura żeliwa	Waga żeliwa w kadzi	Siarka w żeliwie wyjściowym	Zawartość Mg w przecie [%]	Długość wprowadzonego pręta [mb]	Masa Mg w jednym metrze pręta [g]	Prędkość podawania pręta [m/min]	Zakładany % Mg	Zawartość Mg w żeliwie [%]	Uzysk Mg [%]
1490	1000	0,005	25	19,82	228	26	0,04	0,0370	32,75
1490	1000	0,005	25	19,84	228	26	0,04	0,037	32,72
1490	1045	0,006	25	20,978	228	26	0,04	0,038	33,21
1495	1050	0,005	25	20,645	228	26	0,04	0,038	33,91
1490	1000	0,005	25	19,81	228	26	0,04	0,038	33,65
1490	950	0,007	25	21,483	228	26	0,04	0,038	29,48
1490	1050	0,005	25	20,434	228	26	0,04	0,038	34,26
1490	1000	0,005	25	19,82	228	26	0,04	0,036	31,87
1490	1020	0,006	25	20,758	228	26	0,04	0,037	31,90
1500	1050	0,005	25	20,543	228	26	0,04	0,037	33,18
<b>Średnia</b>								<b>0,0374</b>	<b>32,69</b>

Tabela 2.14. Wartość uzysku Mg przy prędkości wprowadzania pręta 27 m/min

Temperatura żeliwa	Waga żeliwa w kadzi	Siarka w żeliwie wyjściowym	Zawartość Mg w przecie [%]	Długość wprowadzonego pręta [mb]	Masa Mg w jednym metrze pręta [g]	Prędkość podawania pręta [m/min]	Zakładany % Mg	Zawartość Mg w żeliwie [%]	Uzysk Mg [%]
1505	1035	0,006	25	21,324	228	27	0,04	0,0380	32,36
1485	1000	0,007	25	20,942	228	27	0,04	0,0390	32,67
1490	1000	0,006	25	20,885	228	27	0,04	0,0380	31,92
1488	1000	0,005	25	19,138	228	27	0,04	0,0390	35,75
1500	1000	0,005	25	19,848	228	27	0,04	0,0390	34,47
1495	1000	0,005	25	19,534	228	27	0,04	0,0400	35,92
1485	950	0,006	25	19,462	228	27	0,04	0,0400	34,25
1492	1050	0,006	25	20,885	228	27	0,04	0,0380	33,52
1487	1000	0,007	25	21,011	228	27	0,04	0,0370	30,89
1502	1000	0,006	25	21,029	228	27	0,04	0,0370	30,87
<b>Średnia</b>								<b>0,0385</b>	<b>33,26</b>

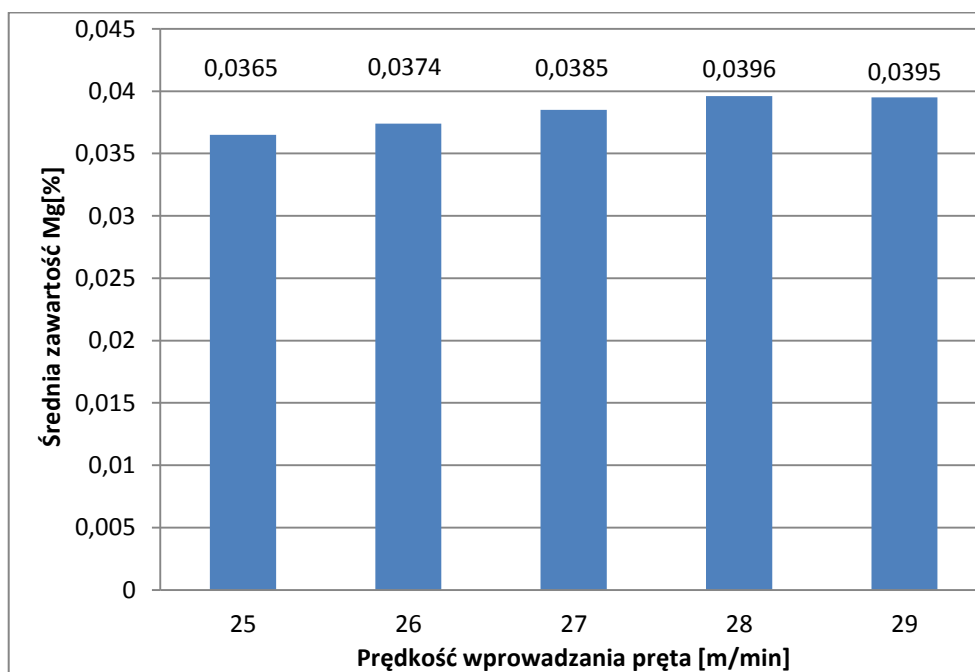
Tabela 2.15. Wartość uzysku Mg przy prędkości wprowadzania pręta 28 m/min

Temperatura żeliwa	Waga żeliwa w kadzi	Siarka w żeliwie wyjściowym	Zawartość Mg w przecie [%]	Długość wprowadzonego pręta [mb]	Masa Mg w jednym metrze pręta [g]	Prędkość podawania pręta [m/min]	Zakładany % Mg	Zawartość Mg w żeliwie [%]	Uzysk Mg [%]
1490	1000	0,005	25	19,32	228	28	0,04	0,0380	34,51
1495	1000	0,005	25	19,62	228	28	0,04	0,0390	34,87
1500	985	0,005	25	19,88	228	28	0,04	0,0400	34,77
1510	950	0,005	25	20,21	228	28	0,04	0,0410	33,81
1508	1040	0,006	25	21,256	228	28	0,04	0,0400	34,33
1496	1000	0,005	25	19,65	228	28	0,04	0,0390	34,82
1497	990	0,006	25	20,148	228	28	0,04	0,0380	32,76
1500	1000	0,005	25	19,748	228	28	0,04	0,0410	36,42
1500	1010	0,006	25	20,675	228	28	0,04	0,0400	34,28
1503	1020	0,005	25	20,852	228	28	0,04	0,0400	34,33
<b>Średnia</b>								<b>0,0396</b>	<b>34,49</b>

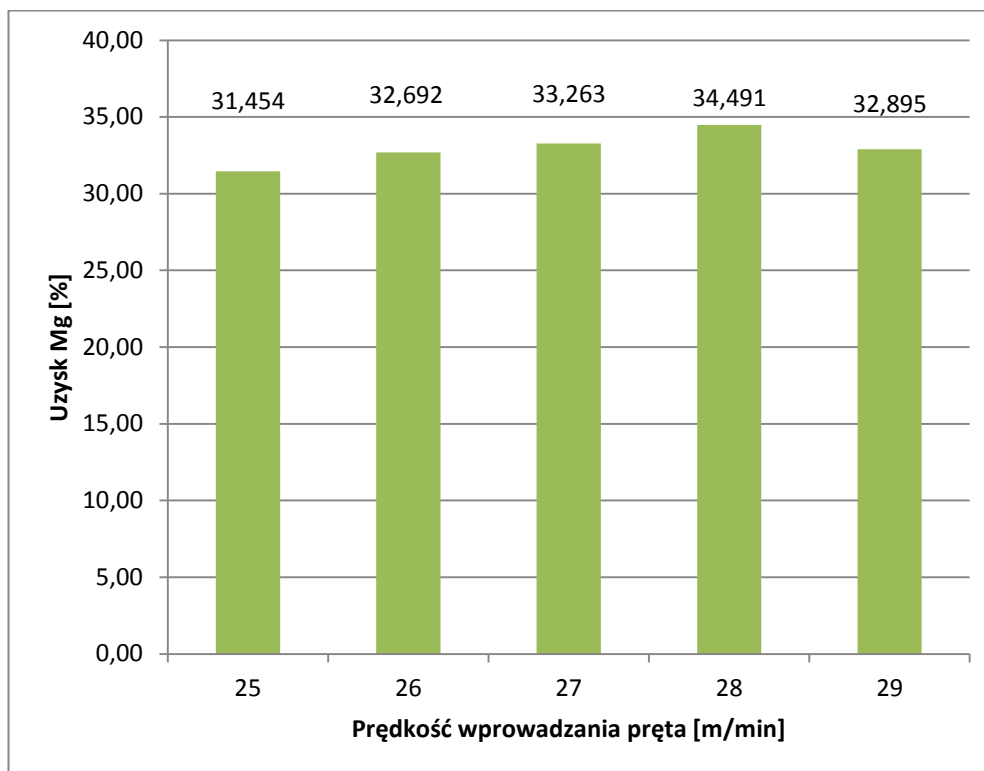
Tabela 2.16. Wartość uzysku Mg przy prędkości wprowadzania pręta 29 m/min

Temperatura żeliwa	Waga żeliwa w kadzi	Siarka w żeliwie wyjściowym	Zawartość Mg w przecie [%]	Długość wprowadzonego pręta [mb]	Masa Mg w jednym metrze pręta [g]	Prędkość podawania pręta [m/min]	Zakładany % Mg	Zawartość Mg w żeliwie [%]	Uzysk Mg [%]
1510	1000	0,005	25	20,856	228	29	0,04	0,0410	34,49
1492	1000	0,006	25	21,295	228	29	0,04	0,0390	32,13
1497	1000	0,006	25	21,356	228	29	0,04	0,0400	32,86
1494	1020	0,005	25	20,868	228	29	0,04	0,0380	32,59
1505	1000	0,005	25	20,908	228	29	0,04	0,0400	33,56
1500	1000	0,006	25	21,932	228	29	0,04	0,0400	32,00
1495	990	0,005	25	20,815	228	29	0,04	0,0390	32,54
1495	1050	0,005	25	21,285	228	29	0,04	0,0410	35,48
1490	1010	0,006	25	21,101	228	29	0,04	0,0380	31,91
1505	1000	0,006	25	21,795	228	29	0,04	0,0390	31,39
<b>Średnia</b>								<b>0,0395</b>	<b>32,90</b>

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że dla każdej wartości prędkości wprowadzanie pręta do ciekłego żeliwa uzyskuje się bardzo powtarzalne wyniki końcowej zawartości Mg, różnice dla każdej prędkości wynosi maksymalnie  $\pm 0,003$  %. Niewielka różnica świadczy o bardzo powtarzalnej ilości sferoidyzatora w 1 metrze bieżącym pręta. Celem lepszego zobrazowania uzyskanych wartości sporządzono dodatkowe wykresy pokazujące wpływ zmiany prędkości na końcowa wartość Mg w żeliwie rys. 2.37 oraz uzysk magnezu rys. 2.38.



Rys. 2.37. Średnia zawartość magnezu uzyskana dla danych prędkości wprowadzania pręta hybrydowego do ciekłego metalu



Rys. 2.38. Wpływ zmiany prędkości wprowadzania hybrydowego PE na uzysk magnezu

Zmiana prędkości wprowadzania hybrydowego PE do ciekłego żeliwa, podczas zabiegu sferoidyzacji, wpływa na końcową zawartość Mg w tym żeliwie. Najniższe wartości końcowej zawartości Mg uzyskuje się dla prędkości 25m/min, co może świadczyć, że pręt nie rozpuścił się przy dnie kadzi, a uzyskana wartość odbiega 0,004% od zakładanej wartości Mg. Wzrost prędkości z 25 do 26, 27, 28, 29 m/min potwierdzają zależność, że pręt nie rozpuścił się przy dnie kadzi, wzrost prędkości powoduje wzrost końcowej zawartości Mg w żeliwie. Dla prędkości 28 oraz 29 m/min, uzyskano wartość końcowej zawartości Mg równą 0,0396 % oraz 0,0395% są one najbardziej zbliżone do zakładanej wartości 0,040 % Mg. Analizując wykres uzysku magnezu najlepsze „przyswojenie” Mg osiągnięto dla prędkości 28m/min i wynosi ona 34,5%, natomiast dla prędkości 29 m/min uzysk zaczyna maleć i wynosi 32,9%. Spadek uzysku dla prędkości 29 m/min świadczy, że dobrana prędkość jest za duża i pręt nie zdążył się rozpuścić przed uderzeniem w dno kadzi. Wydaje się, że prędkość 28 m/min jest prędkością optymalną przy tej prędkości otrzymano najlepszy wyniki, co do końcowej zawartości Mg w żeliwie jak i największy uzysk. Dzięki umiejętnemu sterowaniu prędkością wprowadzania pręta udało się zwiększyć uzysk pomiędzy najmniejszą a największą wartością o około 9% oraz uzyskać końcowe zawartości magnezu bardzo zbliżone do wartości zakładanych. Uzyskane zależności dotyczą stabilnej temperatury żeliwa podczas sferoidyzacji, która wynosiła 1530°C (w piecu przed przelaniem do kadzi zabiegowej).

Dla prędkości 28m/min wprowadzania hybrydowego PE do ciekłego żeliwa, zbadano wpływ zawartości siarki w żeliwie wyjściowym oraz temperaturę sferoidyzacji na uzysk magnezu.

### 2.5.2 Wpływ zawartości siarki w żeliwie wyjściowym na uzysk magnezu.

Uzysk magnezu w dużej mierze zależy od zawartości siarki w żeliwie wyjściowym, gdyż w pierwszej kolejności w czasie procesu sferoidyzacji, sferoidyzator zużywany jest na odsiarczenie żeliwa. Serię badań przeprowadzono przy prędkości wprowadzania hybrydowego PE równej 28m/min, przy której osiągnięto najlepszy uzysk magnezu.

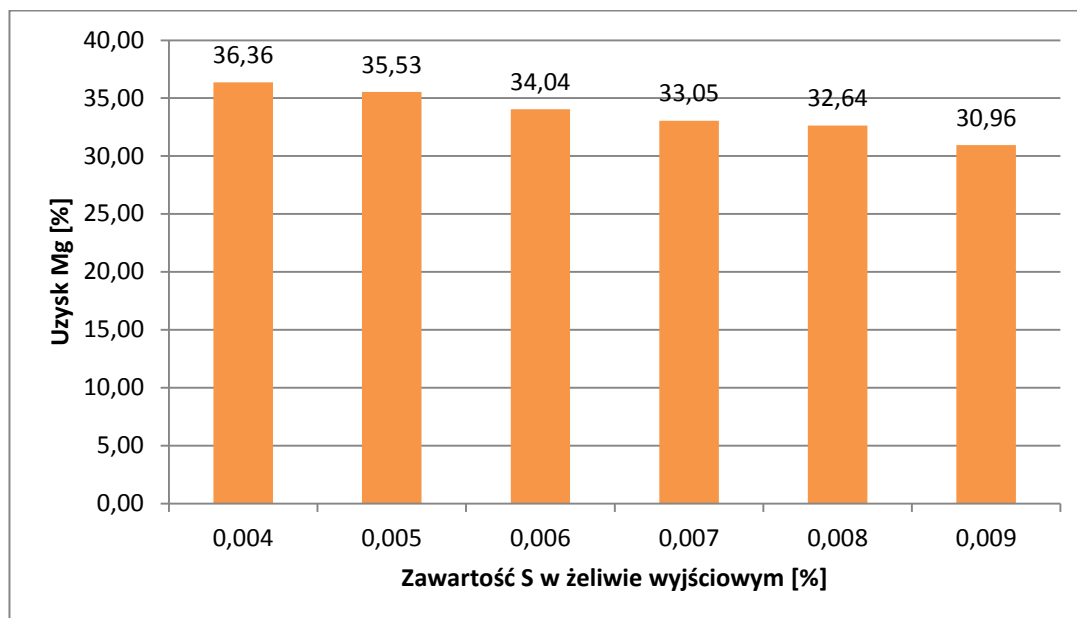
Założenia badawcze:

- temperatura przegrzania 1530<sup>0</sup>C,
- temperatura spustu żeliwa do kadzi 1500<sup>0</sup>C,
- masa żeliwa w kadzi 1000kg,
- prędkość podawania hybrydowego PE 28 m/min,
- % Mg uzyskany w żeliwie końcowym 0,040 ± 0,001.

Badano uzysk magnezu w zależności od zawartości siarki w przedziale od 0,004 do 0,009%.

Tabela 2.17. Uzysk Mg w zależności o zawartości S w żeliwie wyjściowym

Lp.	Temperatura żeliwa	Masa żeliwa w kadzi kg	Siarka w żeliwie wyjściowym	Zawartość Mg w przecie [%]	Średnia długość wprowadzonego pręta [mb]	Masa magnezu w jednym metrze pręta [g]	Prędkość podawania pręta [m/min]	Zakładany % Mg	Zawartość Mg w żeliwie [%]	Uzysk Mg [%]
1	1500	1000	0,004	25	19,3	228	28	0,04	0,0400	36,36
2	1500	1000	0,005	25	19,75	228	28	0,04	0,0400	35,53
3	1500	1000	0,006	25	20,1	228	28	0,04	0,0390	34,04
4	1500	1000	0,007	25	20,7	228	28	0,04	0,0390	33,05
5	1500	1000	0,008	25	21,5	228	28	0,04	0,0400	32,64
6	1500	1000	0,009	25	22,1	228	28	0,04	0,0390	30,96



Rys. 2.39. Zależność uzysku Mg w procesie sferoidyzacji od zawartości siarki w żeliwie wyjściowym

Zgodnie z tabelą 2.17 wraz ze wzrostem zawartości siarki w żeliwie wyjściowym, przy identycznych parametrach wytopu, następuje proporcjonalny do zawartości S spadek uzysku magnezu. Zwiększenie ilości siarki prowadzi do zwiększenia ilości dozowanego pręta, gdyż magnez silnie reaguje z siarką, zgodnie z zależnością 1.4, podaną w części teoretycznej pracy. Efektem reakcji jest powstanie siarczków magnezu MgS, które przechodzą do żużla lub pozostają w ciekłym żeliwie. Wzrost siarki z poziomu 0,004 do 0,009% zwiększa, aż o 17 % zużycie magnezu. Z ekonomicznego punktu widzenia wzrost zawartości siarki jest niepożądany, gdyż bardzo wpływa na zwiększenie kosztów produkcji żeliwa sferoidalnego. W czasie prowadzenia prób zawartość siarki powyżej poziomu 0,006 stanowiła zaledwie 8%, w dużej mierze jest to zasługa topienia metalu w piecu indukcyjnym oraz zastosowaniu materiałów wsadowych dobrej jakości.

### 2.5.3 Wpływ temperatury na uzysk magnezu

Podczas badań nad zastosowaniem hybrydowego PE oceniono również wpływ temperatury na zużycie pręta, a ściślej na uzysk magnezu w procesie. Badania prowadzono w temperaturze 1520°C, 1500°C oraz 1480°C.

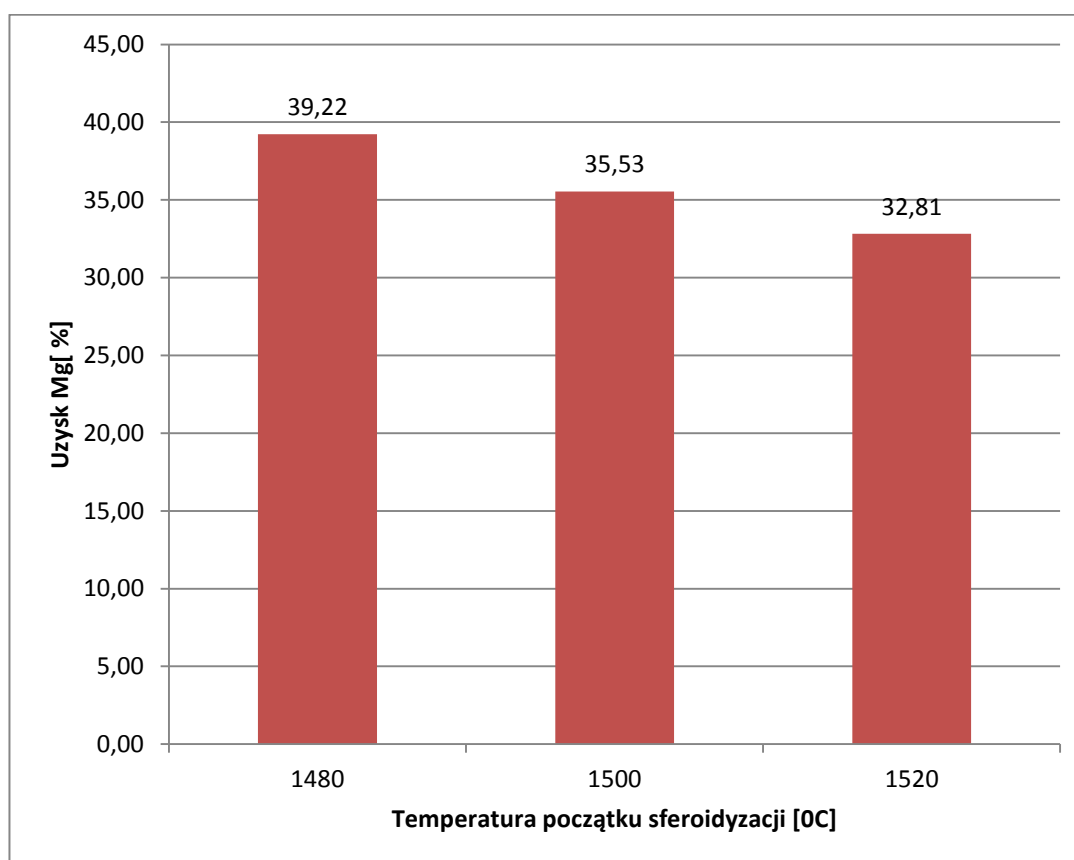
Założenia badawcze:

- masa żeliwa w kadzi 1000kg,
- prędkość podawania hybrydowego PE 28 m/min,

- % Mg uzyskany w żeliwie końcowym  $0,040 \pm 0,001$ ,
- zawartość siarki w żeliwie wyjściowym 0,005 %.

Tabela 2.18. Uzysk Mg w zależności o temperatury początku sferoidyzacji

Temperatura żeliwa	Waga żeliwa w kadzi	Siarka w żeliwie wyjściowym	Zawartość Mg w przecie [%]	Średnia Długość wprowadzonego pręta [mb]	Masa Mg w jednym metrze pręta [g]	Prędkość podawania pręta [m/min]	Zakładany % Mg	Zawartość Mg w żeliwie [%]	Uzysk Mg [%]
1480	1000	0,005	25	18,34	228	28	0,040	0,0410	39,22
1500	1000	0,005	25	19,75	228	28	0,040	0,0400	35,53
1520	1000	0,005	25	21,92	228	28	0,040	0,0410	32,81



Rys. 2.40. Zależność uzysku Mg od temperatury początkowej żeliwa podczas zabiegu jego sferoidyzacji przy użyciu pręta hybrydowego

Biorąc pod uwagę wpływ tylko jednego parametru, jakim jest temperatura można stwierdzić, że uzysk magnezu zwiększa się wraz ze spadkiem temperatury, w której następuje proces sferoidyzacji. Bezpośrednią przyczyną takiej zależności są fizykochemiczne właściwości magnezu, i zwiększenie jego reaktywności oraz stopnia utleniania wraz ze wzrostem temperatury, w której zachodzi proces sferoidyzacji/wermikularyzacji. Maksymalna różnica temperatury, w których były prowadzone badania wynosiła 40°C.

W temperaturze 1520°C występuje spadek uzysku o około 17% w stosunku do temperatury 1480°C. Wydawać by się mogło, że wskazane jest prowadzenie procesu sferoidyzacji w temperaturze 1480°C, jednak w wypadku odlewni Metalpol, temperatura 1480°C jest temperaturą graniczną, pozwalającą na rozlanie 1 tony ciekłego żeliwa z kadzi do form o małej metalochłonności, zapewniając zalanie ostatniej formy w temperaturze nie niższej niż 1360°C.

#### **2.5.4 Porównanie wyników uzysku hybrydowego PE z prętem tradycyjnym N01 - dotychczas stosowanym.**

Wyniki badań uzyskanych podczas prób, przy produkcji żeliwa sferoidalnego przy użyciu hybrydowego PE zestawiono z wynikami uzyskiwanymi podczas sferoidyzacji prętem N01 dotychczas stosowanego w Metalpolu. W zestawieniu skupiono się na szybkości wprowadzania pręta do ciekłego żeliwa oraz jej wpływu na rozpuszczalność i uzysk magnezu.

Pręt N01 stosowany w Metalpolu jest prętem zawierającym sproszkowaną zaprawę magnezową w postaci mieszanki z modyfikatorem, specyfikacje pokazano w tabeli 2.19. Do celów pracy zestawiono średni uzysk magnezu otrzymany dla różnych prędkości wprowadzania pręta N01 z wynikami uzyskanymi dla hybrydowego PE. Założenia badawcze:

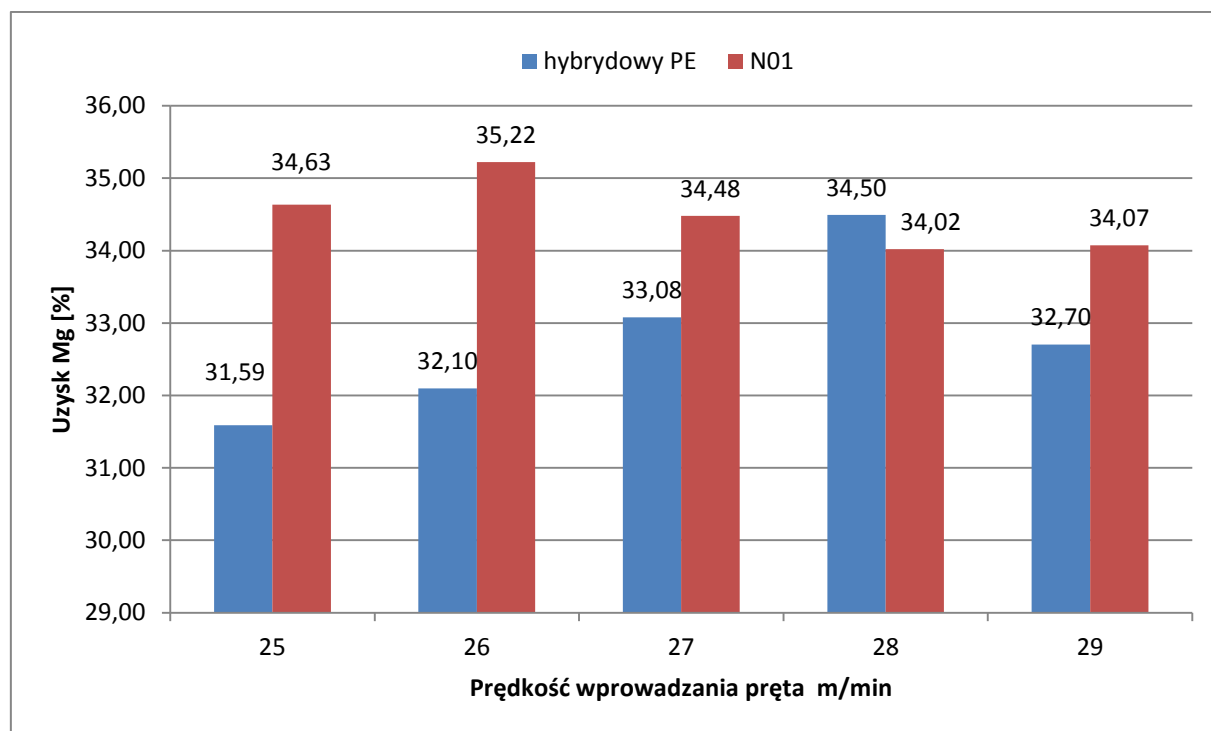
- temperatura przegrzania 1530°C,
- temperatura spustu żeliwa do kadzi 1500 +/- 10°C,
- zawartość siarki przed wprowadzeniem sferoidyzator 0,005+/- 0,001 %,
- masa żeliwa w kadzi 1000kg +/- 10 kg,
- prędkość podawania hybrydowego PE od 25 do 29 m/min.

Tabela 2.19. Skład chemiczny pręta PE do sferoidyzacji N01

<b>Skład chemiczny</b>	<b>Si%</b>	<b>Mg%</b>	<b>RE%</b>	<b>Zr%</b>
<b>Pręt φ 13</b>	54	17	1,3	1,3
<b>Zawartość [g/mb]</b>	115,3	44	2,3	5,7

Tabela 2.20. Zestawienie wyników uzyskanych przy sferoidyzacji ze zmienną prędkością wprowadzania pręta dla pręta hybrydowego oraz N01

Rodzaj pręta	Temperatura żeliwa	Waga żeliwa w kadzi	Siarka w żeliwie wyjściowym	Zawartość Mg w przecie [%]	Średnia długość wprowadzonego pręta [mb]	Masa Mg w jednym metrze pręta [g]	Prędkość podawania pręta [m/min]	Zakładany % Mg	Mg uzyskany w żeliwie [%]	Uzysk Mg [%]
N01	1500 +/- 10	1000	0,005	17	26,02	250	25	0,04	0,0383	34,63
		1000	0,005	17	26,12	250	26	0,04	0,0391	35,22
		1000	0,005	17	26,82	250	27	0,04	0,0393	34,48
		1000	0,005	17	27,94	250	28	0,04	0,0404	34,02
		1000	0,005	17	28,52	250	29	0,04	0,0413	34,07
Hybrydowy		1000	0,005	25	20,27	228	25	0,04	0,0365	31,59
		1000	0,005	25	20,44	228	26	0,04	0,0374	32,10
		1000	0,005	25	20,42	228	27	0,04	0,0385	33,08
		1000	0,005	25	20,14	228	28	0,04	0,0396	34,50
		1000	0,005	25	21,22	228	29	0,04	0,0396	32,70



Rys. 2.41. Wpływ zmiany prędkości wprowadzania pręta na uzysk magnezu przy sferoidyzacji hybrydowym PE oraz N01

Badania prędkości wprowadzania pręta dla obu badanych prętów pokazały, wpływ tego parametru procesu na uzysk magnezu. W przypadku hybrydowego PE, widoczna jest większa zależność zmiany prędkości na zmianę uzysku Mg, pomiędzy najmniejszą a największą wartością wynosi 9 % różnicy. Natomiast uzysku Mg dla pręt N01 jest mniej wrażliwy na zmianę prędkości, różnica wynosi 3,5%. Dla pręta hybrydowego osiągnięto

maksymalna wartość 34,5% tymczasem dla N01 wartość ta oscyluje w granicach 35,2%. Uzyskane wyniki są przybliżone, różnica w głównej mierze wynika z rodzaju wypełnienia pręta. Wypełnienie hybrydowego PE stanowi walcowany pełny pręt magnezowy wykonany z czystego magnezu, który bardziej reaguje z ciekłym żeliwem w stosunku do pręta N01, w którym magnez występuje w postaci proszku z domieszkami FeSi. Hybrydowy PE rozpuszcza się szybciej niż pręt N01, świadczą o tym prędkości podawania pręta, przy których osiągnięto najlepsze wyniki, wynoszą one odpowiednio 28m/min dla pręta hybrydowego i 26 m/min dla pręta N01. Zabieg sferoidyzacji przy użyciu hybrydowego PE, przy stosowaniu kadzi o pojemności 1,0 tony, do osiągnięcia zawartości Mg równej 0,040% wymaga wprowadzenia znacznie mniejszej ilości pręta, wynosi 20 m, gdzie, aby uzyskać tą samą wartość Mg przy użyciu N01 wprowadza się aż 26 metrów. Związane jest to ze zróżnicowaną zawartością magnezu w prętach, która w hybrydowym PE wynosi 25% natomiast w pręcie N01 równa się 17%.

Analizując wyniki w odniesieniu do końcowej zawartości Mg po sferoidyzacji pręt N01, uzyskano maksymalną wartość 0,0393% w przypadku sferoidyzacji Hybrydowym PE ta wartość wynosiła 0,0396%. Wynika to z wypełnienia, w przypadku pręta N01, w stalowej rurce znajduje się proszek, nie mający powtarzalnej zawartości Mg, w każdym metrze pręta w odróżnieniu do pręta hybrydowego.

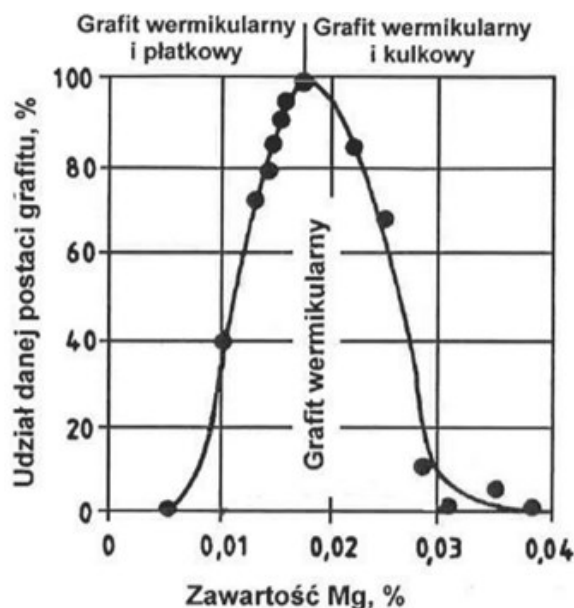
Przy optymalnym doborze prędkości podawania pręta oraz nadzorze nad pozostałymi parametrami tj. temperatury, zawartości siarki, masą ciekłego żeliwa w kadzi podczas sferoidyzacji przy użyciu hybrydowego PE otrzymuje się bardzo stabilne i bliskie zakładanym wartościom wyniki, co do końcowej zawartości Mg oraz stosunkowo dobry uzysk.

Badania prowadzone w czasie sferoidyzacji przy użyciu Hybrydowego PE pozwoliły zebrać bardzo obszerne wyniki dotyczące optymalnych parametrów pracy. Próby prowadzone były w czasie procesu produkcyjnego z uwzględnieniem warunków panujących w odlewni żeliwa Metalpol, co w bardzo istotnym sposób pokazuje, że bez specjalnego nadzoru udało się uzyskać bardzo dobre wyniki, co do powtarzalności oraz stabilności końcowej zawartości magnezu jak również wytrzymałości oraz mikrostruktury. W szczególności wyniki powtarzalności końcowej zawartości Mg w żeliwie, daje bardzo duże prawdopodobieństwo otrzymania żeliwa wermikularnego przy użyciu hybrydowego PE.

## 2.6 Wytworzenie żeliwa wermikularnego przy użyciu hybrydowego PE

Materiał doświadczalny zebrany z I oraz II etapu stanowił dane wejściowe do prowadzenia prób nad wytworzeniem żeliwa wermikularnego przez zastosowanie hybrydowego PE do zabiegu wermikularyzacji. Główną barierą rozpowszechnienie tego gatunku żeliwa stanowi konieczność utrzymania w wąskim polu tolerancji zakresu Mg. Zawartość magnezu jest ograniczona przede wszystkim z dołu 0,007%, ale dość dokładnie jest określona również z góry - 0,025%. Kluczowymi przyczynami niestabilności w utrzymaniu w żeliwie zalecanej zawartości Mg są trudności w wyznaczeniu i utrzymaniu na stałym poziomie wskaźnika zwanego stopniem przyswojenia Mg. Wskaźnik ten opisuje stosunek ilości Mg wprowadzonego do metalu, do ilości Mg, która została „zatrzymana” w ciekłym żeliwie. Drugą ważną przyczyną niestabilności są wahania w składzie chemicznym zapraw, głównie zawartości Mg jaka przypada na jednostkę masy lub objętości zaprawy. W technologii przewodu elastycznego (PE) dodatkowym elementem niestabilności może być nierównomierne wypełnienie rurek stalowych sproszkowaną zaprawą, co czyni, iż w kolejnych odcinkach PE w przeliczeniu na jednostkę długości (np.: metr) może być zawarta inna ilość zaprawy, a zatem i inna ilość Mg.

Ogólnie można stwierdzić, że mając na uwadze konieczność utrzymania zawartości Mg w żeliwie wermikularnym (rys. 2.40) w wąskim zakresie - do obróbki pozapiecowej należy stosować materiały charakteryzujące się wysoką stabilnością swoich parametrów, w tym stałą zawartością Mg.



Rys. 2.42. Zasada otrzymywania w żeliwie grafitu wermikularnego metodą obróbki ciekłego metalu regulowaną ilością magnezu [4]

Analizując wyniki uzyskane podczas prób nad wytworzeniem żeliwa sferoidalnego z zastosowaniem hybrydowego PE można zauważyć, że wspomniane powyżej ograniczenia dotyczące utrzymania stopnia przyswojenia Mg na stałym poziomie oraz nierównomierna ilość Mg w pręcie nie występują. Żeliwo otrzymane podczas obróbki pozapiecową przy użyciu hybrydowego PE oraz odpowiednio dobranymi parametrami technologicznymi charakteryzowało się dużą stabilnością struktury oraz powtarzalnością zakładanej wartości Mg w składzie końcowym żeliwa.

Badania prowadzone nad wytworzeniem żeliwa wermikularnego były prowadzone analogicznie jak w przypadku prób związanych z wytworzeniem żeliwa sferoidalnego przy użyciu hybrydowego PE, obniżono jedynie docelową zawartość Mg w żeliwie. Celem wyznaczenia wpływu różnej zawartości Mg na postać wydzieleni grafitu przeprowadzono serię badań. Pierwsza seria obejmowała próby z zakładaną wartością Mg po zabiegu wermikularyzacji na poziomie 0,017 - 0,019%, natomiast w drugiej próbie Mg na poziomie 0,012 - 0,013%.

Założenia i program badań:

- przeprowadzenie wytopów w 6 tonowych piecach indukcyjnym żeliwa wyjściowego o składzie odpowiadającym gatunkowi EN-GJV 350,
- wermikularyzacja na stanowisku zabiegowym z użyciem hybrydowego PE,
- odlewanie próbek do badań spektralnych w okresie zalewania form na linii BMD celem określenia trwałości efektu zabiegu wermikularyzacji, którego wskaźnikiem jest zawartość Mg w żeliwie,
- odlanie znormalizowanych wlewków typu Y dla wykonania badań wytrzymałościowych żeliwa,
- odlanie próbki schodkowej celem sprawdzenia wpływu szybkości chłodzenia na mikrostrukturę,
- wykonanie badań wytrzymałościowych na próbkach wyciętych z wlewków typu Y,
- wykonanie badań mikrostruktury z próbek wyciętych z próbki schodkowej,
- analiza wyników i ich interpretacja.

### 2.6.1 Wytop żeliwa wyjściowego

W trakcie realizacji badań przeprowadzono dwa wytopy w warunkach produkcyjnych. Wytopy prowadzono w piecu indukcyjnym 6 tonowym zgodnie z normą wsadową wytopu pokazaną w tabeli 2.3, użytą podczas prób nad wytworzeniem żeliwa sferoidalnego EN-GJS-500-7. Skład żeliwa wyjściowego uzyskany podczas wytopów sprzyjał tworzeniu się ferrytycznej struktury osnowy, zestawiono w tabeli 2.21.

Tabela 2.21. Skład chemiczny żeliwa wyjściowego

Wytop	Skład chemiczny [%]							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Ti
1	3,58	2,19	0,37	0,027	0,005	0,11	0,0012	0,013
2	3,61	2,22	0,35	0,033	0,008	0,04	0,0009	0,011

Żeliwo wyjściowe w obu przypadkach przed przelaniem do kadzi zabiegowo-zalewowej zostało odżużlone oraz przegrzane do temperatury 1530°C przez około 5 minut.

### 2.6.2 Zabieg wermikularyzacji przy użyciu hybrydowego PE

Zabieg wermikularyzacji prowadzono na stanowisku do sferoidyzacji i wermikularyzacji. Obróbkę żeliwa wyjściowego rozpoczęto w temperaturze 1500°C. Przed procesem wermikularyzacji do komputera zostały wprowadzone dane wytopu oraz prędkość podawania pręta odpowiadająca 28m/min. Prędkość dobrano na podstawie badań i wyników ujętych w punkcie 2.5. Celem określenia oraz wyznaczenia wpływu ilości Mg na postać wydzieleni grafitu dla pierwszych 6 kadzi docelową wartość Mg przyjęto na poziomie 0,016 - 0,018 % natomiast dla kolejnych 6 kadzi w przedziale 0,012% - 0,013% (rys 2.41a, b). Założone wartości mieszczą się w przedziałach, które zgodnie z literaturą powinny gwarantować otrzymanie wydzieleni grafitu w postaci wermikularnej, co zostało pokazane na rysunku 1.12 oraz 2.42.

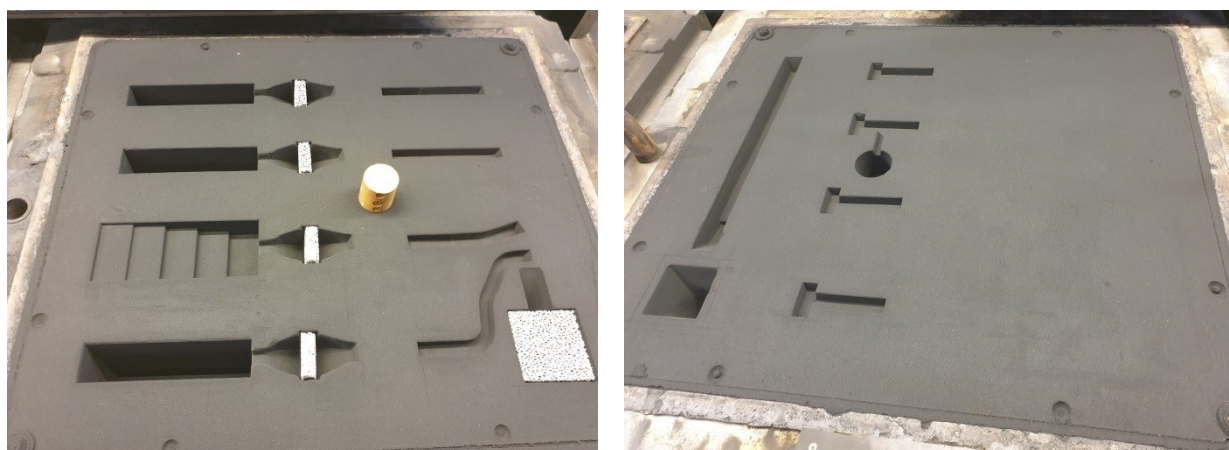
### 2.6.3 Próby wytwarzania żeliwa wermikularnego na linii formierskiej BMD

Przedmiotowe badania, podobnie jak to było w przypadku etapu I badań, prowadzono na automatycznie linii formierskiej BMD z poziomym podziałem formy.

Na potrzeby prowadzenia prób III etapu badań, do płyty modelowej zawierającej model wlewka próbnego oraz próbkę schodkową zamontowano dodatkowy model (rys. 2.43), umożliwiający zastosowanie próbnika zanurzeniowego (rys. 2.43b), pozwalającego na wykonanie próbek do badań spektrometrycznych z każdej zalanej formy.



Rys. 2.43. Płyta modelowa z modelem dla próbnika zanurzeniowego, b) przekrój próbnika zanurzeniowego



Rys. 2.44. Forma doświadczalna z próbnikiem do odlewania próbek do badań spektrometrycznych

Dzięki zastosowaniu próbnika zanurzeniowego można kontrolować bardzo dokładnie zmianę zawartości magnezu wraz z upływem czasu. Jest to bardzo istotne w kontekście sprawdzenia, przy jakiej końcowej zawartości Mg w żeliwie otrzymuje się żeliwo wermikularne. Każda forma została oznaczona, celem odpowiedniej identyfikacji.

## 2.6.4 Ocena składu chemicznego żeliwa wermikularnego

Badania składu chemicznego prowadzono na spektrometrze Bruker. Wyniki w tabeli 2.22 obejmują składy chemiczny z początku oraz końca kadzi dla wszystkich przeprowadzonych prób.

Tabela 2.22. Skład chemiczny żeliwa z kolejnych prób

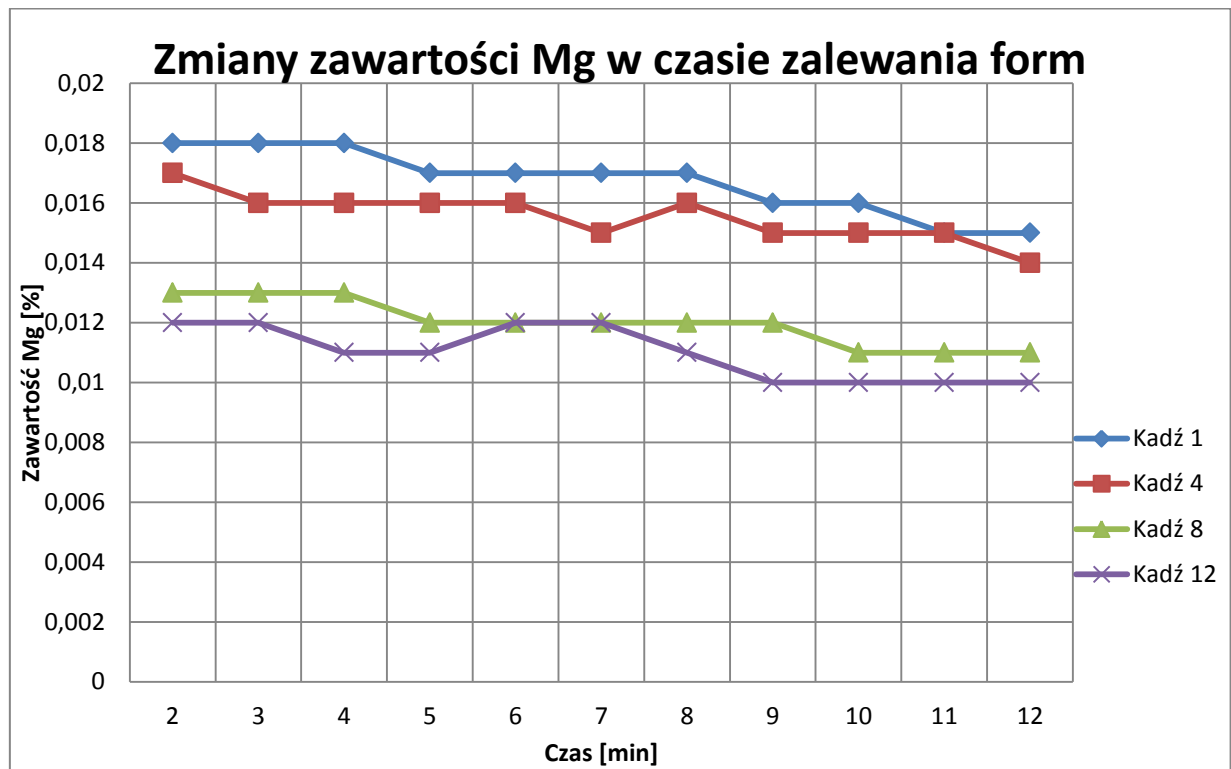
Nr kadzi	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mg	Ti
1P	3,535	2,530	0,372	0,027	0,005	0,111	0,018	0,013
1K	3,501	2,513	0,372	0,027	0,005	0,113	0,015	0,014
2P	3,536	2,535	0,373	0,028	0,006	0,114	0,017	0,013
2K	3,512	2,508	0,372	0,027	0,005	0,113	0,014	0,014
3P	3,541	2,510	0,375	0,027	0,005	0,111	0,018	0,014
3K	3,515	2,503	0,372	0,027	0,005	0,113	0,016	0,013
4P	3,538	2,520	0,378	0,026	0,005	0,114	0,016	0,013
4K	3,522	2,511	0,376	0,026	0,005	0,113	0,014	0,014
5P	3,535	2,531	0,372	0,027	0,005	0,111	0,016	0,014
5K	3,511	2,523	0,372	0,028	0,005	0,113	0,015	0,013
6P	3,536	2,528	0,373	0,027	0,006	0,114	0,016	0,013
6K	3,518	2,517	0,372	0,027	0,005	0,113	0,014	0,014
7P	3,62	2,520	0,352	0,033	0,005	0,04	0,013	0,011
7K	3,581	2,513	0,352	0,032	0,005	0,04	0,012	0,011
8P	3,616	2,528	0,351	0,032	0,005	0,039	0,013	0,012
8K	3,592	2,509	0,350	0,030	0,006	0,038	0,011	0,011
9P	3,625	2,525	0,351	0,033	0,006	0,042	0,013	0,011
9K	3,601	2,503	0,35	0,032	0,005	0,04	0,010	0,010
10P	3,616	2,520	0,353	0,031	0,005	0,41	0,012	0,012
10K	3,592	2,508	0,352	0,030	0,005	0,039	0,011	0,011
11P	3,625	2,518	0,352	0,033	0,005	0,042	0,010	0,012
11K	3,581	2,503	0,352	0,032	0,005	0,041	0,011	0,011
12P	3,626	2,520	0,353	0,033	0,006	0,041	0,012	0,010
12K	3,592	2,508	0,350	0,033	0,005	0,039	0,010	0,010

Otrzymano skład chemiczny zgodny założeniom badawczym, czyli odpowiadający składowi chemicznemu sprzyjającemu powstaniu ferrytycznej osnowy metalowej oraz z zawartością magnezu, mieszcząca się w przedziale niezbędnym dla tworzenia się wermikularnej postaci wydzielenń grafitu. Żeliwo w pierwszym wytopie charakteryzowało się prawie trzykrotnie większą zawartością miedzi, co sprzyja perlityzacji osnowy i powinno prowadzić do zwiększenia wytrzymałości ( $R_m$ ), przy jednoczesnym spadku wydłużenia ( $A_5$ ) w stosunku to próbek odlewanych z wytopu drugiego. Podczas rozlewania żeliwa z kadzi w okresie około 12 minut odnotowano ubytek magnezu w żeliwie o 0,002 - 0,003% i jest on

mniejszy niż w żeliwie sferoidalnym, co należy wiązać z ogólną mniejszą jego zawartością w żeliwie wermikularnym, a zatem i mniejszą prężnością par Mg. Dzięki zastosowaniu próbnika zanurzeniowego, jego umieszczeniu w formach uzyskano możliwość dokładnej oceny zawartość Mg (tab. 2.23) w funkcji czasu, jaki upłynął od zakończenia zabiegu wermikularyzacji do zalania kolejnych formy.

Tabela 2.23. Zawartość magnezu w żeliwie po wermikularyzacji hybrydowym PE, określana w formach zalewanych metalem z kolejnych kadzi (wytopów)

Zakładana wartość Mg		Kadz 1: 0,018%	Kadz 2: 0,018%	Kadz 3: 0,018%	Kadz 4: 0,016%	Kadz 5: 0,016%	Kadz 6: 0,016%
Numer formy	Czas od zabiegu sferoidyzacji do zalania formy [min]	Uzyskana zawartość Mg w żeliwie z danej formy					
1	2	<b>0,018</b>	<b>0,017</b>	<b>0,018</b>	<b>0,017</b>	<b>0,016</b>	<b>0,016</b>
2	3	<b>0,018</b>	<b>0,017</b>	<b>0,018</b>	<b>0,016</b>	<b>0,016</b>	<b>0,016</b>
3	4	<b>0,018</b>	<b>0,017</b>	<b>0,017</b>	<b>0,016</b>	<b>0,016</b>	<b>0,016</b>
4	5	<b>0,017</b>	<b>0,016</b>	<b>0,017</b>	<b>0,016</b>	<b>0,016</b>	<b>0,016</b>
5	6	<b>0,017</b>	<b>0,016</b>	<b>0,017</b>	<b>0,016</b>	<b>0,015</b>	<b>0,016</b>
6	7	<b>0,017</b>	<b>0,016</b>	<b>0,017</b>	<b>0,015</b>	<b>0,015</b>	<b>0,016</b>
7	8	<b>0,017</b>	<b>0,016</b>	<b>0,017</b>	<b>0,016</b>	<b>0,015</b>	<b>0,015</b>
8	9	<b>0,016</b>	<b>0,015</b>	<b>0,016</b>	<b>0,015</b>	<b>0,014</b>	<b>0,015</b>
9	10	<b>0,016</b>	<b>0,015</b>	<b>0,016</b>	<b>0,015</b>	<b>0,015</b>	<b>0,015</b>
10	11	<b>0,015</b>	<b>0,015</b>	<b>0,016</b>	<b>0,015</b>	<b>0,015</b>	<b>0,015</b>
11	12	<b>0,015</b>	<b>0,015</b>	<b>0,016</b>	<b>0,014</b>	<b>0,014</b>	<b>0,015</b>
Zakładana wartość Mg		Kadz 7: 0,013%	Kadz 8: 0,013%	Kadz 9: 0,013%	Kadz 10: 0,012%	Kadz 11: 0,012%	Kadz 12: 0,012%
Numer formy	Czas od zabiegu sferoidyzacji do zalania formy [min]	Uzyskana zawartość Mg w żeliwie z danej formy					
1	2	<b>0,013</b>	<b>0,013</b>	<b>0,013</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>
2	3	<b>0,013</b>	<b>0,013</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>
3	4	<b>0,012</b>	<b>0,013</b>	<b>0,013</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,011</b>
4	5	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,013</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,011</b>
5	6	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,011</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>
6	7	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,011</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>
7	8	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,011</b>	<b>0,012</b>	<b>0,011</b>
8	9	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,012</b>	<b>0,011</b>	<b>0,011</b>	<b>0,010</b>
9	10	<b>0,011</b>	<b>0,011</b>	<b>0,011</b>	<b>0,010</b>	<b>0,011</b>	<b>0,010</b>
10	11	<b>0,011</b>	<b>0,011</b>	<b>0,011</b>	<b>0,010</b>	<b>0,011</b>	<b>0,010</b>
11	12	<b>0,012</b>	<b>0,011</b>	<b>0,010</b>	<b>0,010</b>	<b>0,011</b>	<b>0,010</b>



Rys. 2.45. Zmiany zawartości magnezu po zabiegu wermikularyzacji w trakcie zalewania form w reprezentatywnych seriach badań

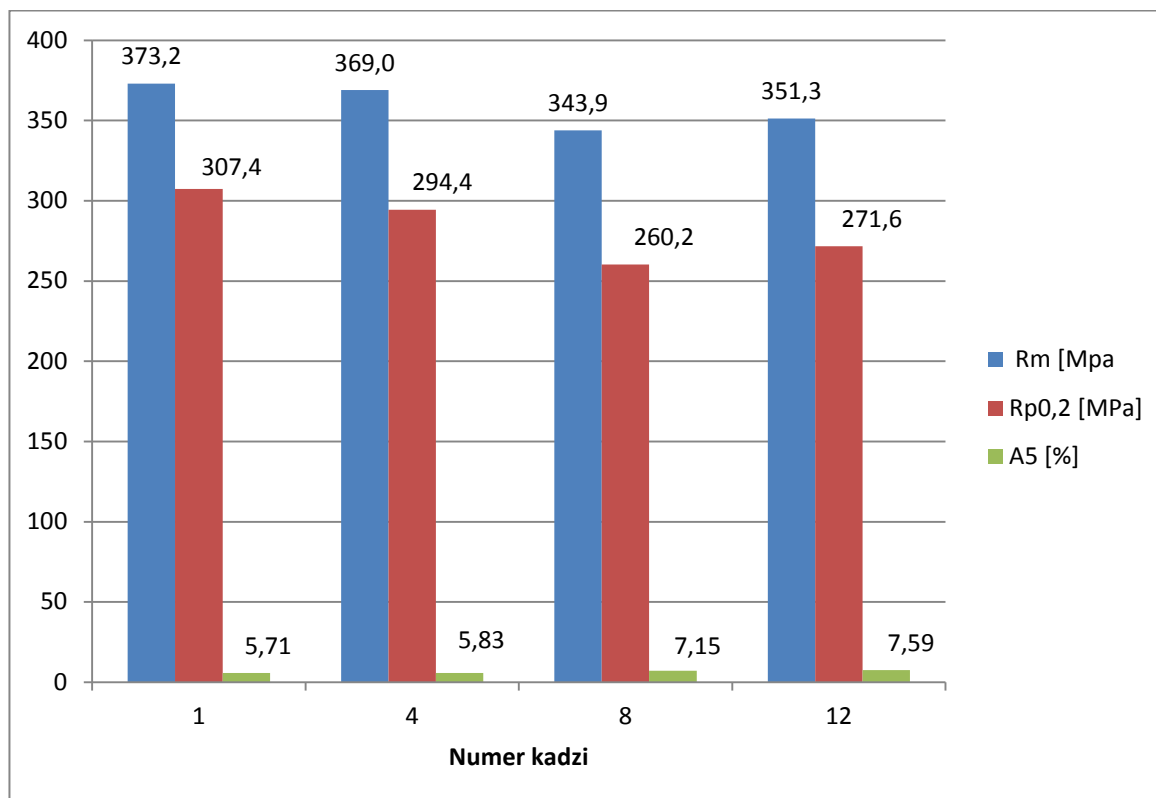
Analizując otrzymane wyniki szczególną uwagę należy zwrócić na początkową wartość Mg uzyskaną w żeliwie - w odlewach, która w 83% odpowiada wartości zakładanej przed prowadzeniem zabiegu wermikularyzacji. W pozostałych przypadkach, które stanowią 17% zawartość Mg odbiega od zakładanej wartości o 0,001%. Na wykresie 2.45 pokazano wyniki reprezentatywne dla danej serii badawczej, w których widoczny jest ubytek magnezu wraz z upływem czasu. W badanych próbkach pomimo upływu czasu, występował wzrost zawartości Mg, zdarzenie to zakwalifikowano, jako błąd pomiarowy spektrometru a wahanie wynosiło zaledwie 0,001%. Uzyskane wyniki oceny zawartości magnezu wskazują, iż w żeliwie powinny występować wydzielania grafitu w postaci wermikularnej.

### 2.6.5 Badania właściwości mechanicznych

Badania wytrzymałościowe żeliwa wermikularnego prowadzono na próbkach przygotowanych z wlewków typu Y odlewanych podczas kolejnych prób – wytopów doświadczalnych.. Badania mechaniczne, podobnie jak w przypadku badań nad żeliwem sferoidalnym, miały na celu określenie wytrzymałości na rozciąganie ( $R_m$ ), umownej granicy plastyczności ( $R_{p0,2}$ ), wydłużenia ( $A_5$ ) oraz twardości (HB).

Tabela 2.24. Wyniki badań właściwości mechanicznych żeliwa wermikularnego

Nr kadzi	Wytrzymałość $R_m$ [MPa]	Umowna granica plastyczności $R_{p0.2}$ [MPa]	Wydlużenie $A_5$ [%]	Twardość HB
1P	373,2	307,4	5,71	147
1K	371,0	291,1	5,86	145
2P	372,7	297,5	5,91	145
2K	369,2	289,8	6,02	146
3P	373,4	292,9	5,88	147
3K	368,5	290,3	5,93	146
4P	369,0	294,4	5,83	145
4K	364,1	287,1	5,79	144
5P	367,8	288,3	6,01	144
5K	360,3	285,3	5,57	143
6P	369,6	294,7	5,41	147
6K	364,6	282,4	5,89	145
7P	349,2	257,2	7,22	139
7K	340,1	263,9	7,31	138
8P	343,9	260,2	7,15	141
8K	344,7	248,7	7,22	138
9P	344,1	265,9	7,41	139
9K	346,6	267,5	7,29	138
10P	345,9	252,3	7,14	142
10K	350,6	258,0	7,16	141
11P	351,1	247,4	7,54	143
11K	352,3	251,3	7,55	146
12P	351,3	271,6	7,59	144
12K	351,5	265,1	7,69	141



Rys. 2.46. Właściwości mechaniczne żeliwa wermikularnego – reprezentatywne kadzie

Wyniki badań uzyskane podczas próby wytrzymałościowej dla żeliwa z wytopu pierwszego charakteryzującego się składem chemicznym o większej zawartości miedzi około 0,1%, są wynikami odpowiadającymi żeliwu wermikularnemu EN-GJV-350. Wytop drugi charakteryzujący się niższą zawartością miedzi na poziomie 0,04% odpowiada gatunkowi EN-GJV 300. Wartości wyników z poszczególnych pomiarów dla danej zawartości miedzi są bardzo do siebie zbliżone, co świadczy o powtarzalności oraz stabilności procesu. Zmienna zawartość magnezu w granicach od 0,010 do 0,018%, podczas prowadzonych prób nie wpłynęła na właściwości żeliwa zarówno pod względem wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  jak i wydłużeniu  $A_5$ . Zawartość Mg w żeliwie utrzymywana była w przedziale, który uznaje się za konieczny do uzyskania wermikularnej postaci grafitu. Każdą próbę wytrzymałościową dokumentowano na wykresach przebiegu rozciągania. Na rysunkach 2.47 oraz 2.48, przedstawiono przykładowe - reprezentatywne wykresy dla wytopu nr 1 oraz nr 2, wygenerowane przez układ rejestracji przebiegu rozciągania podczas prób wytrzymałościowych.

## Parametry testu

Badanie: Badanie metali na rozciąganie - DIN EN ISO 6892-1  
 Typ maszyny: LabTest ZD40  
 Głowica siły: 400kN  
 Ekstensometr: MFA2  
 Uchwyty: bez  
 Obszar roboczy: Dolny obszar roboczy



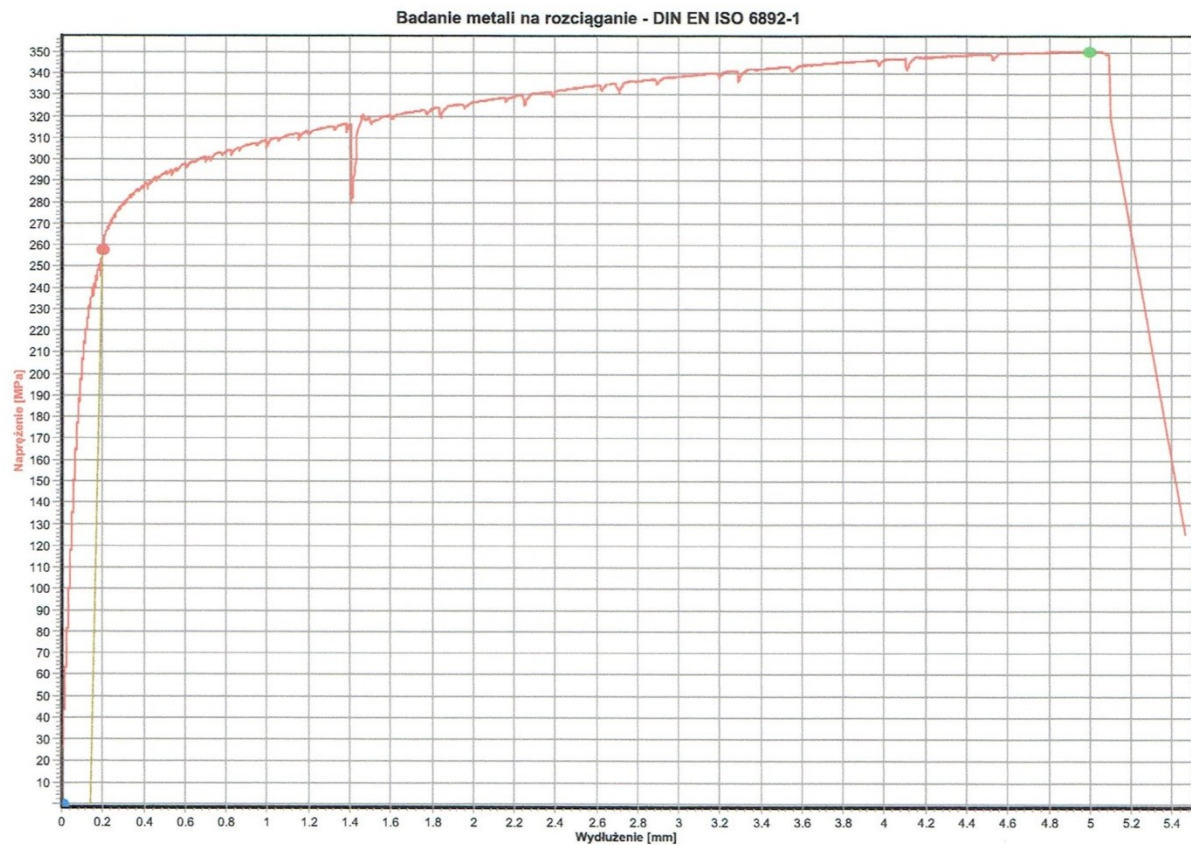
## Tabela wyników

	Data	Czas	Twardość	R <sub>px2</sub> MPa	F <sub>px2</sub> kN	R <sub>m</sub> MPa	F <sub>m</sub> kN	A <sub>5</sub> %
7		10:25		294,42	45,32	369	56,74	5,83

Rys. 2.47. Przebieg rozciągania znormalizowanych próbek wykonanych z wlewków typu Y z żeliwa wermikularnego dla próbki 4P

## Parametry testu

Badanie: Badanie metali na rozciąganie - DIN EN ISO 6892-1  
 Typ maszyny: LabTest ZD40  
 Głowica siły: 400kN  
 Ekstensometr: MFA2  
 Uchwyt: bez  
 Obszar roboczy: Dolny obszar roboczy  
 Predkooci badania: V0 = 2,5 mm/min; V1 = 5 N/mm<sub>2</sub>/s  
 Punkty zmiany predkooci: F0 = 20 N



## Tabela wyników

	Data	Czas	Twardość	R <sub>px2</sub> MPa	F <sub>px2</sub> kN	R <sub>m</sub> MPa	F <sub>m</sub> kN	A <sub>5</sub> %
13		10:34		258,02	39,72	350,65	53,98	7,16

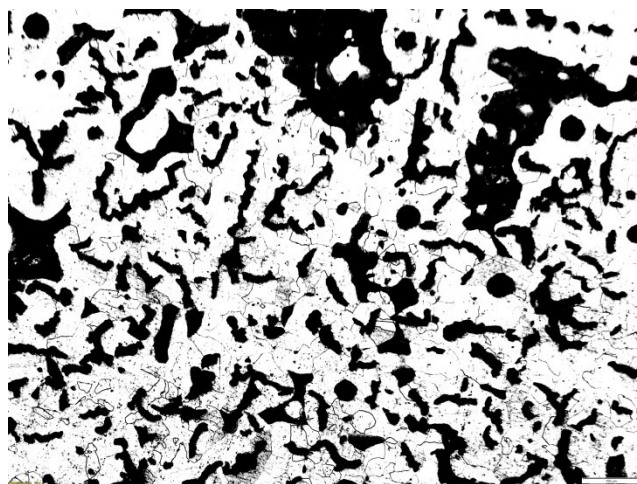
Rys. 2.48. Przebieg rozciągania znormalizowanych próbek wykonanych z wlewków typu Y z żeliwa wermikularnego dla próbki 10K

### 2.6.6 Badanie wpływu szybkości stygnięcia na mikrostrukturę żeliwa wermikularnego

Wpływ szybkości stygnięcia na mikrostrukturę badano na próbkach schodkowych odlewanych w czasie prób. Próbka schodkowa przyjęta w badaniach charakteryzuje się zmienną grubością ścianek w przedziale od 6 mm do 46 mm (rys. 2.24). Z każdej grubości ścianki próbki schodkowej wykonano zglądy do badań mikrostruktury. Reprezentatywne mikrostruktury uzyskane z pierwszego wytopu przedstawiono na rysunkach od 2.49 do 2.58, natomiast mikrostruktury z wytopu drugiego na rysunkach 2.59 - 2.61.



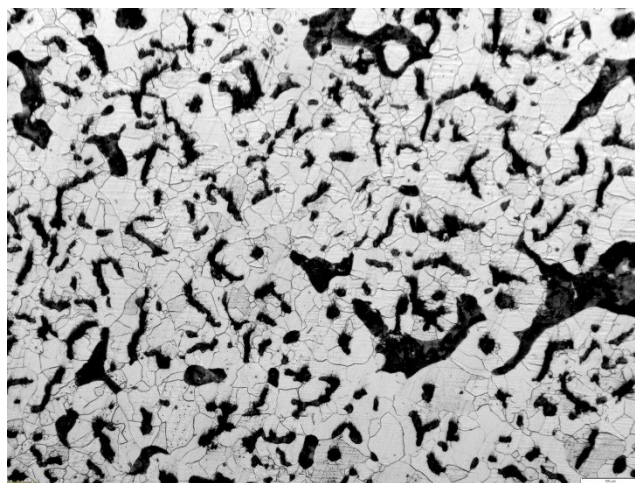
Rys. 2.49. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 6 mm  
zgląd nietrawiony, pow. 100x



Rys. 2.50. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 6 mm  
zgląd trawiony, pow. 100x



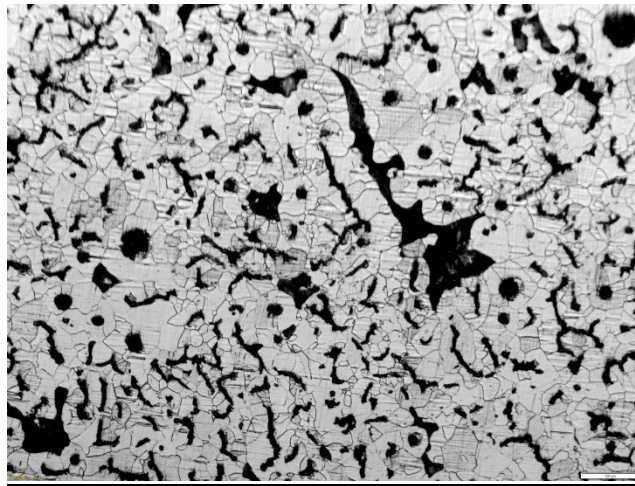
Rys. 2.51. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 12 mm  
zgląd nietrawiony, pow. 100x



Rys. 2.52. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 12 mm  
zgląd trawiony, pow. 100x



Rys. 2.53. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 22 mm  
zgląd nietrawiony, pow. 100x



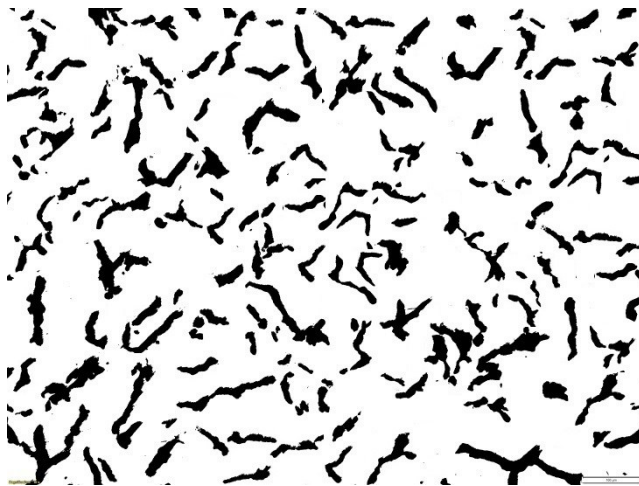
Rys. 2.54. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 22 mm  
zgląd trawiony, pow. 100x



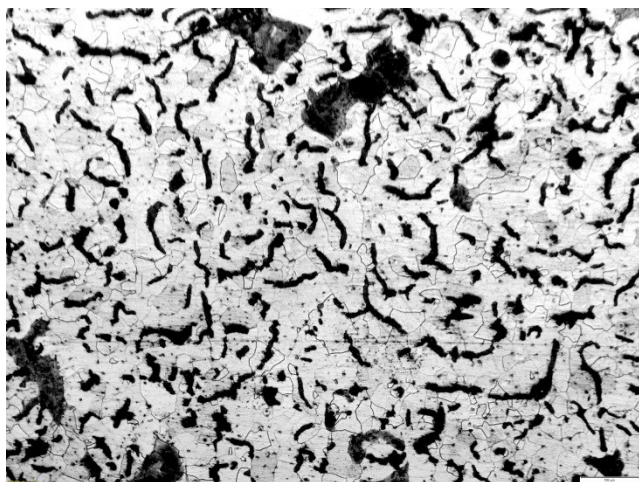
Rys. 2.55. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 34 mm  
zgląd nietrawiony, pow. 100x



Rys. 2.56. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 34 mm  
zgląd trawiony, pow. 100x



Rys. 2.57. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 46 mm  
zgląd nietrawiony, pow. 100x

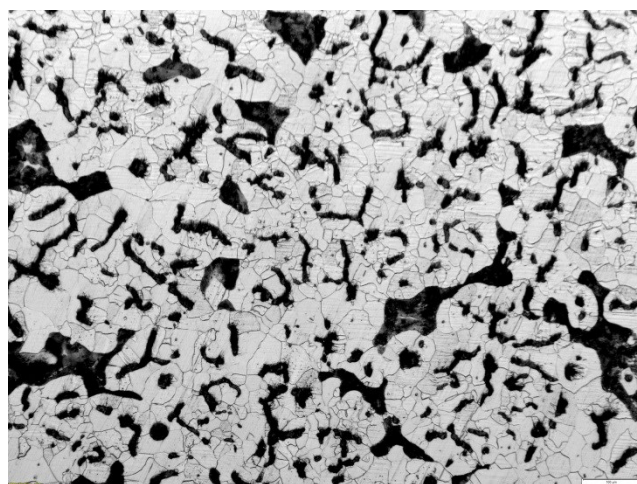


Rys. 2.58. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 46 mm  
zgląd trawiony, pow. 100x

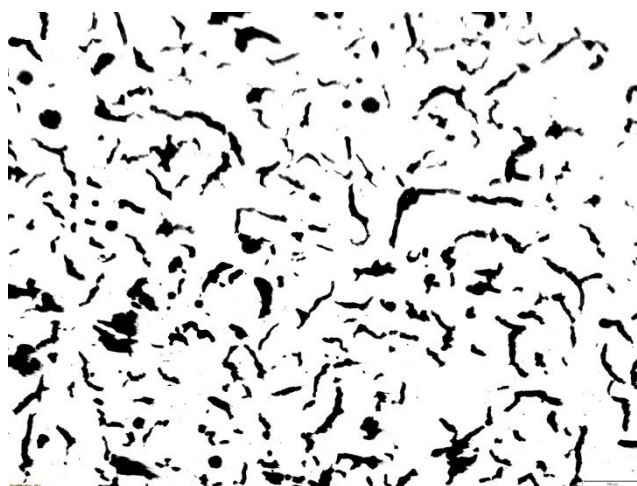
Mikrostruktury uzyskane dla wytopu 2 cechującego się zawartości Mg w przedziale 0,010 – 0,013 % oraz zawartością Cu 0,004%.



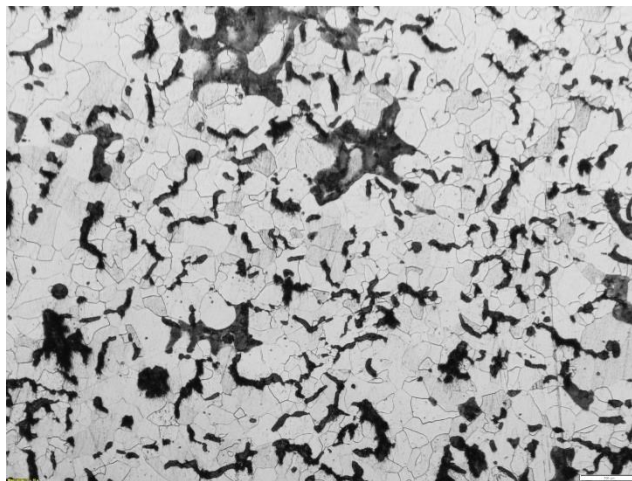
Rys. 2.59. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 6 mm  
zgląd nietrawiony, pow. 100x



Rys. 2.60. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 6 mm  
zgląd trawiony, pow. 100x



Rys. 2.61. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 12 mm  
zgląd nietrawiony, pow. 100x



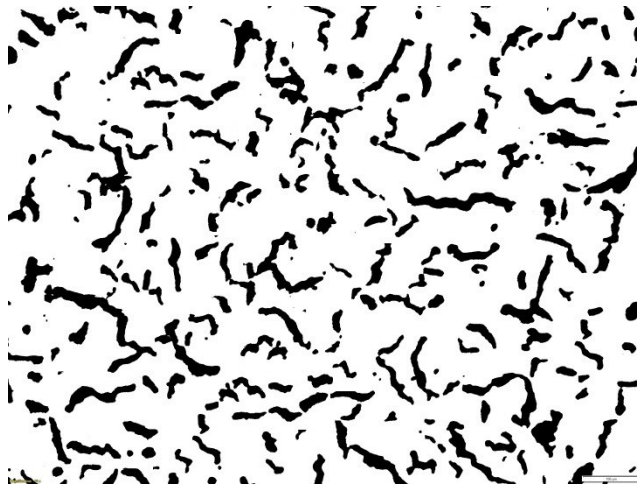
Rys. 2.62. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 12 mm  
zgląd trawiony, pow. 100x



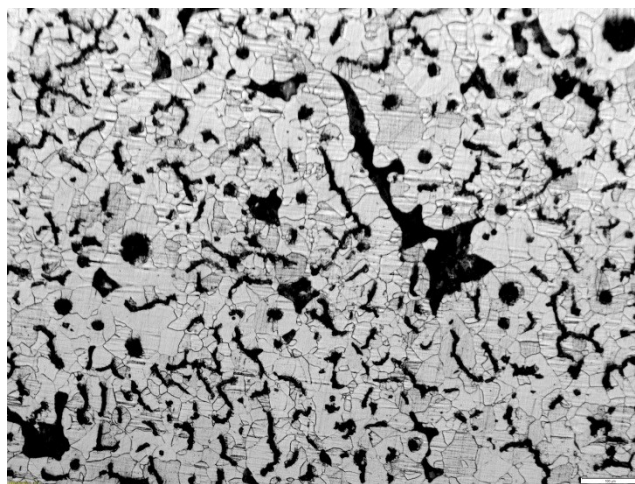
Rys. 2.63. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 22 mm  
zgląd nietrawiony, pow. 100x



Rys. 2.64. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 22 mm  
zgląd trawiony, pow. 100x



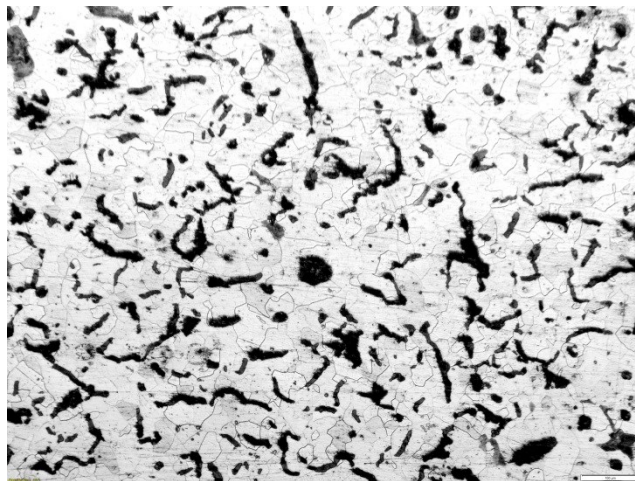
Rys. 2.65. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 34 mm  
zgląd nietrawiony, pow. 100x



Rys. 2.66. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 34 mm  
zgląd trawiony, pow. 100x



Rys. 2.67. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 46 mm  
zgląd nietrawiony, pow. 100x



Rys. 2.68. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 46 mm  
zgląd trawiony, pow. 100x

Badanie mikrostruktury żeliwa wytworzonego przy zastosowaniu hybrydowego PE do zabiegu wermikularyzacji potwierdziły jego skuteczność w otrzymywaniu żeliwa wermikularnego. Analiza struktur przy pomocy mikroskopu optycznego wykazała, że we wszystkich badanych próbkach występuje grafit w postaci wermikularnej w ilości większej niż 80% wszystkich wydzieleni, a pozostałą część stanowił grafit w postaci kulkowej. Zawartość Mg na poziomie od 0,010 do 0,018 %, nie wpłynęła znacząco na liczbę oraz wielkość wydzieleni. Otrzymane wyniki mikrostruktury w pełni odpowiadają wymaganiom stawianym żeliwu wermikularnemu zgodnie z normą PN-EN- ISO 945-1, w której to dla tego rodzaju żeliwa wymagana ilość wydzieleni grafitu w postaci wermikularnej wynosi min 80%, a pozostały udział stanowi grafit w postaci węgla żarzenia (kształt IV) nieregularny grafit kulkowy (kształt V) oraz grafit kulkowy (kształt VI). W badanych strukturach, poza najcieńszymi ściankami, dominuje osnowa ferrytyczna stanowiąc 80 - 95 % wartości, pozostałą część osnowy stanowi perlit.

Dzięki użyciu próbki schodkowej charakteryzującą się zmienną grubością ścianki zbadano wpływ grubości ścianki odlewu (ściślej szybkości stygnięcia) na mikrostrukturę. Porównując otrzymane mikrostruktury ze względu na cechy grafitu można zauważyć, że w ściance o najmniejszej grubości poza grafitem wermikularnym występuje największa ilość grafitu w postaci sferoidalnej, która to zmniejsza się wraz ze wzrostem grubości ścianki i przy grubości od 34 mm występuje w ilości poniżej 10%. Grubość ścianki wpływa również na liczbę wydzieleni, które maleją wraz z jej wzrostem. Analizując cechy osnowy można zauważyć, że udział ferrytu rośnie wraz ze wzrostem grubości ścianki. Różnica w ilości miedzi w poszczególnych wytopach nie wpłynęła znacząco na zwiększenie ilości perlitu.

Tabela 2.25. Klasyfikacja według cech grafitu oraz osnowy żeliwa próbki schodkowe

	Grubość ścianki	Klasyfikacja według cech grafitu				Klasyfikacja według cech osnowy			
		Kształt	Wielkość wydzieli grafitu kulkowego	Liczba wydzieli grafitu /mm <sup>2</sup>	% ilość wydzieli grafitu wermikularnego	Symbol Perlitu	Powierzchnia zajmowana przez perlit %	Symbol Ferrytu	Powierzchnia zajmowana przez ferryt %
Wytop 1	6	III	5	232	81,5	P20	25	F80	75
	12	III	5	203	86,7	P20	15	F80	85
	22	III	5	189	87,2	P20	10	F80	90
	34	III	5	167	89,8	P20	10	F80	90
	46	III	5	154	93,2	P20	10	F80	90
Wytop 2	6	III	5	241	82,2	P20	20	F80	80
	12	III	5	213	85,4	P20	10	F80	70
	22	III	5	190	87,8	P20	10	F80	70
	34	III	5	173	90,3	P6	8	F94	92
	46	III	5	159	92,6	P6	5	F94	95

## 2.7 Podsumowanie pracy badawczej i wnioski

Wyniki badań prowadzonych w Odlewni Metalpol Węgierska Górka potwierdziły, że przez stosowanie w metodzie PE hybrydowego przewodu elastycznego do zabiegu obróbki pozapiecowej możliwe jest otrzymanie żeliwa zarówno o kulkowej jak i żeliwa o wermikularnej postaci grafitu.

Efekt zabiegu sferoidyzacji oraz wermikularyzacji w dużym stopniu zależy od doboru oraz kontroli parametrów technologicznych obróbki pozapiecowej oraz temperatury i jakości żeliwa wyjściowego, w którym na szczególną uwagę zasługuje zawartość siarki. Zastosowanie hybrydowego przewodu elastycznego w metodzie PE wpływa korzystnie na uzyskiwanie z dużą powtarzalnością ustalonej zawartości magnezu w żeliwie po pełnej obróbce pozapiecowej. W dużej mierze związane jest z konstrukcją hybrydowego PE a w szczególności z stabilną i powtarzalną zawartością magnezu w każdym odcinku (metrze) długości pręta.

W pracy przedstawiono technologię otrzymywania żeliwa sferoidalnego oraz wermikularnego w metodzie PE z zastosowaniem hybrydowego przewodu elastycznego. Przeprowadzono szereg badań polegających na zbadaniu wpływu parametrów technologicznych tj. temperatura zabiegu wprowadzania hybrydowego PE do kąpieli, zawartość siarki w żeliwie wyjściowym oraz prędkość dozowania pręta na przyswajalność magnezu. Optymalizacja oraz dostosowanie poszczególnych parametrów technologicznych

ma kluczowe znaczenie w otrzymaniu zadanej zawartości magnezu w żeliwie końcowym. Otrzymane podczas prób żeliwo sferoidalne oraz wermikularne poddano badaniom metalograficznym, otrzymane mikrostruktury w pełni odpowiadały gatunkowi żeliwa, który reprezentowały. Mikrostruktury badane w próbkach pobranych z wlewka o budowie schodkowej pokazały, iż istnieje duży wpływ grubości ścianki na liczbę wydzielań grafitu, których liczba malała wraz ze zwiększaniem grubości ścianki. Wszystkie otrzymane mikrostruktury cechowała powtarzalna ilość wydzielań grafitu w odniesieniu do badanej grubości ścianki. Podczas badań, nie stwierdzono wpływu w badanych granicach zawartości magnezu na liczbę oraz gęstość wydzielań grafitu. Mała wrażliwość żeliwa na szybkość stygnięcia jest wynikiem dobrze przeprowadzonego zabiegu modyfikacji, który przebiegał dwu etapowo. Modyfikacja pierwotna, przy użyciu modyfikatora znajdującego się w pręcie hybrydowym, natomiast modyfikacja wtórna bezpośrednio podczas zalewania formy, techniką „na strugę” metalu.

Wyniki badań właściwości wytrzymałości zarówno dla żeliwa wermikularnego jak i sferoidalnego odpowiadały zakładanemu gatunkowi. Otrzymane wyniki cechowała duża powtarzalność wytrzymałości na rozciągania  $R_m$  oraz plastyczności  $A_5$ .

Opracowana technologia z zastosowaniem w metodzie PE hybrydowego przewodu elastycznego pozwoliła na otrzymanie w sposób powtarzalny oraz stabilny żeliwa z wydzieleniami grafitu sferoidalnego oraz wermikularnego. Opracowana technologia wytwarzania żeliwa jest przedmiotem patentu PL (11) 234059 (13) B1 [43]. Zatem teza pracy została udowodniona. Z podsumowania badań można wyciągnąć następujące wnioski końcowe:

1. Sferoidyzacja oraz wermikularyzacja metodą PE przy zastosowaniu hybrydowego pręta elastycznego pozwala w sposób stabilny i powtarzalny otrzymać zakładany rodzaj żeliwa w warunkach odlewni Metalpol Węgierska Górka.
2. Hybrydowy PE posiada stałą zawartość Mg w każdym odcinku - metrze bieżącym, co sprzyja w dokładnym dozowaniu sferoidyzatora.
3. Końcowa zawartość Mg zależy od parametrów technologicznych zabiegu sferoidyzacji/ wermikularyzacji.
4. Dostosowanie parametrów technologicznych wpływa na zwiększenie uzysku magnezu oraz jego zawartość w żeliwie końcowym.
5. Żeliwo wermikularne, ze względu na wąski przedział zawartości magnezu gwarantujący otrzymanie wermikularnej postaci grafitu, jest żeliwem trudniejszym w produkcji od żeliwa sferoidalnego.

6. Zakres końcowej zawartości Mg w żeliwie, przy utrzymaniu, której uzyskano żeliwo wermikularne, mieści się w przedziale od 0,010 – 0,018% Mg.
7. Zastosowanie w pręcie sproszkowanego modyfikatora pozwala uzyskiwać duże rozdrobnienie wydzieleni grafitu wermikularnego oraz sferoidalnego, sprzyjając uzyskiwaniu wysokich właściwości mechanicznych ( $R_m$  i  $A_5$ ).
8. Pierwotna i wtórna modyfikacja wpłynęły na zmniejszenie wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia.
9. Liczba wydzieleni grafitu tak w żeliwie sferoidalnym jak i wermikularnym wytwarzanych z użyciem hybrydowego pręta PE zależy od grubości ścianki odlewu.
10. Optymalna prędkość wprowadzania pręta do ciekłego żeliwa w kadzi zabiegowej zależy od jego konstrukcji, rodzaju wypełnienia oraz procentowej zawartości magnezu.

## Literatura

- [1] Odlewnictwo XXI w. Stan aktualny i kierunki rozwoju metalurgii i odlewnictwa stopów żelaza. Instytut Odlewnictwa. Kraków (2003).
- [2] Podrzucki C., Wojtysiak A.: Żeliwo plastyczne niestopowe. Wydawnictwo AGH; Kraków (1987).
- [3] Praca zbiorowa pod redakcją J.J. Sobczaka: Prognozy i trendy rozwojowe w odlewnictwie światowym i krajowym. Instytut Odlewnictwa. Kraków 2011.
- [4] Guzik E.: Procesy uszlachetniania żeliwa. Wybrane zagadnienia. Monografia PAN. Archives of Foundry. Katowice (2001).
- [5] Podrzucki C.: Żeliwo. Struktura, właściwości, zastosowanie. Tom 1,2 Wydawnictwo ZG STOP Kraków (1991).
- [6] Fraś E.: Krystalizacja metali i stopów. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa (1992).
- [7] Fraś E.: Krystalizacja żeliwa. Skrypt AGH. (wyd. II), Kraków (1981).
- [8] Fraś E., Podrzucki C.: Żeliwo modyfikowane. Skrypt AGH.( wyd. II), Kraków (1981).
- [9] Pietrowski S., Pisarek B., Władysław R.: Zbadanie krystalizacji żeliwa z grafitem wermikularnym oraz opisanie jej modelem analityczno-numerycznym. Projekt badawczy KBN Nr 7T08B 006 13. Łódź (2000).
- [10] Piaskowski J., Jankowski A.: Żeliwo sferoidalne. WNT Warszawa (1974).
- [11] Czikel J.: Beitragzum Problem der Graphitkristallisation in Fe-C-Legierungen. Giesserei, tech.-wiss. Beith. 11 (1959), Nr 25. s.1385.
- [12] Guzik E., Dzik S.: Możliwości kształtowania struktury i właściwości wysokojakościowego żeliwa wermikularnego. Inżynieria Materiałowa. Nr 3/2006.
- [13] Estes J.W., Shneidewing R.: New high strength cast irons produced by injection methods. Trans. Am Founrym. Soc. 63 (1955), s.541.
- [14] Guzik E., Asłanowicz M., Kluk R.: Zabieg sferoidyzowania przy użyciu przewodu elastycznego. Krzepnięcie Metali i Stopów. (1995), Nr 22. s. 76÷81.
- [15] Jonuleit M.: Metoda drutowa sferoidyzowania żeliwa. Wskazówki praktyczne. Przegląd Odlewnictwa (1995), Nr 3. s. 98.
- [16] Fraś E.: Metallurgical and Materials Transactions A.( 2005),v. 36A, s. 3075.
- [17] Girshowih N.: Krystalizacja i swoista czuguna w otlivkach. Moskwa(1966).
- [18] Fraś E., Górny M., Lopez H.: [SI] International. (2007), vol. 47, no. 3, s. 260.
- [19] Zych J.: Żeliwo sferoidalne - zasilanie odlewów zalewanie form. Wydawnictwo Naukowe Akapit. Kraków 2019

- [20] Bunin K., Malinoczka J., Taran J.: *Osnovy metallografii czuguna*. Metallurgia Moskwa (1969).
- [21] Norma PN-EN 1563.
- [22] Pietrowski S.: *Kompedium Wiedzy o Żeliwie Wermikularnym. Krzepnięcie Metali i Stopów*. (2000), Nr 44. PAN – Katowice PL ISSN 0208-9386.
- [23] Norma PN-EN ISO 945.
- [24] *Instrukcje Metalpol : Wytwarzanie żeliwa sferoidalnego*.
- [25] Karsay S.J.: *Ductile iron I. Production, QIT — Fer & Titane*. Canada (1992).
- [26] Songlin F., Minqin R., Ming Z.: *Analysis of the distribution of trace elements in nodular cast iron by SPM*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* (1995), s. 557-560.
- [27] Feng S.L., Ren M.Q., Zhong M.: *PIXE analysis of antinodularizing elements Al, Pb and Bi in nodular cast iron*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* (1996), s. 584-586.
- [28] Hoque M.M., Young J.M.: *Production of spheroidal graphite aluminium cast iron and the factors affecting it*. *Jurna of Materials Processing Technology* (1995), s. 186-192.
- [29] *Sorelmetal: O żeliwie sferoidalnym. Tłumaczenie na język polski Kaczorowski M.* Wydanie polskie nakładem Metals & Minerals. Warszawa (2006).
- [30] Rómtter H.: *New technologies about the production of ductile iron castings*. 5th International Foundrymen Conference, Opatija, June 24, s. 1-5 ( 2004)
- [31] Orłowicz W.: *Ocena właściwości mechanicznych żeliwa sferoidalnego metodą ultradźwiękową*. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*. Nr 66. Mechanika. Z.20. Rzeszów (1990).
- [32] Orłowicz W.: *Zastosowanie ultradźwięków w odlewnictwie*. Monografia. *Krzepnięcie metali i stopów*. (2000), nr 45.
- [33] Zych J.: *Ultradźwiękowa metoda kontroli procesu sferoidyzacji żeliwa*. *Przegląd Odlewnictwa*. (1997) Nr 2. 77-80.
- [34] Fałęcki Z., Zych J., Pyka M.: *Badanie i opracowanie kompleksowej kontroli jakości ciekłego żeliwa przy pomocy analizy termicznej*. *Praca naukowo-badawcza*. Nr 5.371.50. Kraków, AGH (1982).
- [35] Zych J.: *Badanie wrażliwości żeliwa na szybkość stygnięcia metodą ultradźwiękową*. *Krzepnięcie metali i stopów*. PAN. Katowice (2000), Nr 43 s.543-552.
- [36] Zych J.: *Wieloetapowa, ultradźwiękowa kontrola procesu wytwarzania odlewów z żeliwa sferoidalnego*. *Archiwum Odlewnictwa Rogów* (2001) vol. 1(2001) nr 1(1/2), s. 227-235.

- [37] Fałęcki Z., Zych J. i inni: Szybka ocena stopnia sferoidyzacji grafitu nieniszczącą metodą ultradźwiękową. XIV Symp. Nauk. z Okazji Dnia Odl. AGH, Kraków (1988), s.103-113.
- [38] Stawarz M., Szajnar J., Metoda ATD jako sposób oceny stopnia sferoidyzacji żeliwa sferoidalnego, *Archiwum Odlewnictwa (Archives of Foundry)*,(2004), V. 4, Nr 11, s.206-212.
- [39] A. Pytel.: Żeliwo z grafitem wermikularnym - materiał konstrukcyjny na elementy pracujące w warunkach zmęczenia cieplnego. *Materiały Konferencyjne. Zakopane* (2012).
- [40] Zych J, Żyrek A.: Wytwarzanie, w warunkach Odlewni Metalpol, żeliwa wermikularnego w technologii in-mould, ocena jego odporności na zmęczenie cieplne. *52 Konferencja Krzepnięcie i Krystalizacja Metali* (2011).
- [41] Dyrłaga M., Zych J., Bahuon O. : Badania w Odlewni Żeliwa METALPOL nad opracowaniem technologii wytwarzania żeliwa wermikularnego techniką PE z użyciem pręta hybrydowego. *Przegląd Odlewnictwa.* (2017), Nr 7-8, s. 280-285.
- [42] Bahuon O.: Ductile Iron And Compacted Graphite Iron treatment with Hybrid magnesium Cored Wire process. *73 Proceedings of World Foundry Congress. 23-27 September. Kraków, Poland* (2018).
- [43] Dyrłaga M., Podgrodzki M., Bahuon O., Zych J.: Sposób wytwarzania żeliwa zwłaszcza żeliwa wermikularnego oraz żeliwa sferoidalnego. *Polska. Patent 234059* Opubl. 03.06.2019.
- [44] Tandon L.C.: Cored wire process of ductile iron rolls into the 21th century. *Międzynarodowa Konferencja Naukowa Żeliwo Sferoidalne w XXI Wieku. Kraków* (2003), s. 1-8.
- [45] Pribulowa A., Emmima E. M., Mikhlok L.: The influence of treatment technology by ductile iron production on its properties an working enviroment. *5th International Foundrymen Conference. June 2-4, Opatija* (2004), s. 30-38.
- [46] Guzik E.: Struktura odlewów wykonanych z żeliwa wermikularnego. *Miedzinarodna konferencja slowenskófch, ćeslich a pol'slch zlievarenslich odbomikov SPOLUPRACA, Tatranska Lomnica* (2004), s. 235-240.
- [47] Guzik E.: Ogólna ocena metody PE sferoidyzowania żeliwa. *Archiwum Odlewnictwa.*( 2001), Nr 1, s. 83-91.
- [48] Gaede G.: Gusseisen mit Vermiculargraphit – ein Werkstoff für speziele Anwendungsgebiete. *Giesserei* 69, (1982), Nr 18, s.492.
- [49] Nechtelberger E.: Stand und Entwicklung von Gusseinen mit Vermiculargraphit – Herstellung, Eigenschaften und Adwendung. Ref. Nr 1 na 49 M.K.O., Chicago 1982. *Giesserei Prax.* (1982), nr22, s.359; Nr 23/24, s.275.

- [50] NovaCast : PQ-CGI Inmold – Seryjna produkcja żeliwa wermikularnego (CGI). Biuletyn 1/2002 Metals-Minerals.
- [51] Ecob C.M., Hartung C.: Alternatywna metoda produkcji żeliwa wermikularnego. Materiały konferencyjne Casting Clinic (2006).
- [52] Lampic, M., Henkel, H.: BMW-V8-Dieselylinderblock, Tragholkonzept und Gusseisen mit Vermiculargraphit. In: Gießerei-Praxis, (1999), Nr 6, s.296 -301.
- [53] Rohring K.: Gusseisen mit Vermiculargraphit - Herstellung, Eigenschaften, Anwendung. Konstruieren Giessen, (1991), No.1, s. 7-27.
- [54] Henderson H.E.: Compliance with specifications for Ductile Iron Castings Assures Quality. Met. Prog. 89, (1996), Nr 5, s.82.
- [55] Dawson S., Zhang F.: Compacted graphite iron – a material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads. Proceedings of 69th World Foundry Congress. 16-20 October. Hangzhou China, (2010), p. 359-364.
- [56] Pytel A.: Żeliwo wermikularne z żeliwiaka przeznaczone na odlew grubościennie, eksploatowane w warunkach zmęczenia cieplnego. Prace Instytutu Odlewnictwa. Z.4, T.XLII, (1992)
- [57] Roučka J., Šenberger J., Gawroński J., Szajnar J.: In-mould inoculation of graphitic cast irons using inoculations bodies. 5th International Foundrymen Conference, Opatija, June 2-4, (2004), s. 76-83.
- [58] Cabanne P.M., Forrest F.: Gusseisen mit kugelgraphit. Sorelmetal®. Rio Tinto Iron and Titanium, (2002).
- [59] Gawroński J., Jura J., i inni: Production of ductile cast iron from iron blast furnace pig iron by "In Mold" method. Krzepnięcie Metali i Stopów, (2000), Nr 44, s. 109-112.
- [60] Jędrzejczyk D., Podzucki C., Porębski M.: Zastosowanie pierwiastków ziem rzadkich w metalurgii żeliwa. Przegląd Odlewnictwa (1994) Nr 3, s. 25-28
- [61] Riiotter H.: In mold — metoda sferoidyzacji w formie. Metals Minerals (2001), Nr 1, s. 26-30.
- [62] Ciupiał J., Piech K.: Modyfikowanie żeliwa wysokojakościowego dwuwarstwowym zespołem modyfikująco filtrującym. Biuletyn Instytutu Odlewnictwa, (2000), Nr 6, s. 34-40.
- [63] Tybulczuk J., Jarosz A.: Proces produkcji żeliwa sferoidalnego materiały szkoleniowe. Stowarzyszenie Techniczne Odlewników Polskich, listopad 2013.

- [64] C. Podrzucki, D. Jędrzejczyk: Dwustopniowe modyfikowanie grafityzujące żeliwa obrabianego stopem cerowym (mismetalem). Przegląd Odlewnictwa, (1995), t. 45, nr 2, s. 49
- [65] Ductile Iron Data for Design Engineers Published by Rio Tinto Iron and Titanium a member of Ductile Iron Marketing Group, Revised and Reprinted (1998)
- [66] Poradnik inżyniera. Odlewnictwo. Praca zbiorowa. WNT Warszawa (1986).
- [67] Fraś E., Kuształ J., Podrzucki Cz.: Zagadnienia modyfikacji żeliwa w formie. Metalurgia i Odlewnictwo. Kraków (1974), s.60.
- [68] S. Pietrowski: Mechanizm krystalizacji grafitu wermikularnego w żeliwie. Krzepnięcie Metali i Stopów. PAN (1998 ), v. 37, s. 97.
- [69] Cabanne P.M., Gagn O.M.: High purity Pig Iron for Ductile Iron Castings Production, Sorel Metal, presented at the 54th Indian Foundry Conference (2006).
- [70] Lerner Y.S.: Modern Casting of Ductile Iron, American Foundry Society (2006).
- [71] Ecob C.M., Hartung C.: Alternatywna Metoda Produkcji Żeliwa Wermikularnego. Elkem. Materiały Konferencyjne Casting Clinic 24.10. Kraków (2006).
- [72] Ductile Iron Handbook. Ductile Iron Society. Chicago (2012 ).
- [73] Soiński M.S.: Badania nad wytwarzaniem żeliwa z grafitem wermikularnym. Sympozjum Naukowe nt. „Zjawiska fizykochemiczne w odlewnictwie”. Zielona Góra - Przełazy, 17-18.XI(1994), s. 47-53.
- [74] Zych J.: Wpływ molibdenu na odporność na zmęczenie cieplne żeliwa z grafitem płatkowym, wermikularnym i sferoidalnym. XX Konferencja Wydziału Odlewnictwa AGH. Nowoczesne Tendencje w Odlewnictwie. Kraków 8-10 Czerwca (1995).
- [75] Lampic M., Henkel H. BMW — V8 — Dieselzylinderblock Tragholmkonzept und Gusseisen mit Vermiculargraphit, Giesserei — Prax. (1999), Nr 6, s. 296-301.
- [76] Dawson S. Das Sinter Cast — Verfahren zur Herstellung von Gusseisen mit Vermiculargraphit. Giesserei— Prax. (1995), Nr 1/2, s. 29-34.
- [77] Guzik E., Kleingartner T.: A study on the structure and mechanical properties of vermicular cast iron with pearlitic ferritic matrix. Arch. of Foundry Engineering (2009), vol. 9, nr 10, s. 55-60.
- [78] Onsoien M.I., Skaland T., Grong Q.: Mechanisms of graphite formation in ductile cast iron containing cerium and lanthanum. Int. Journal Cast Metals Res. (1999), Nr 11, s. 319-324.

- [79] Dawson S., Hang F.: Compacted graphite iron — a material solution for modern Diesel engine cylinder blocks and heads. Proc. of 69<sup>th</sup> World Foundry Congress, Hangzhou China, 16-20 Oct. (2010), s. 359-364.
- [80] Dawson S.: Controlling the Production of Compacted Graphite Iron. Modern Casting. (1998), Nr 12, s. 38-41.
- [81] David E.: Developing In — the — Mold Treatment for CGJ. Modern Casting. (2001), Nr 3, s. 50-54.
- [82] Hampel J., Elbel T.: On modelling of the effect of oxygen on graphite morphology and properties of modified cast irons. Arch. of Foundry Engineering (2010), vol. 10, nr 10, s. 54-59.
- [83] Fraś E., Serrano J.: Fundiciones de Hierro, ILAFA, Santiago de Chile, 1990.
- [84] Riposan I., Safrani J., Marginean J., Muresan G.: Fontes a graphite lamelaire et spheroidal obtenues par modification en moule. Hommes et fonderie. (1977).
- [85] Elkem, Technical Information. (2004), No 2.1.
- [86] Instrukcje zakładowe odlewni Metalpol dotyczące produkcji żeliwa sferoidalnego i szarego.
- [87] Mivar P., Trbizan M., Medved J.: Inoculation of gray iron with inoculants on base of Zr, Ca and Sr. 5th International Foundrymen Conference, Opatija, June 2-4, (2004), s. 9-29.
- [88] Materiały techniczne firmy Heraeus Elektro-Nit.
- [89] Jones T., Kondoh K.: Ballistic analysis of new military grade magnesium alloys for armor applications. In: Magnesium technology 2011. San Francisco. CA: John Wiley & Sons. Inc.: TMS. Metals and Materials Society (2011), s. 425-430.
- [90] Claeys S. Lampman S.: Specialty applications of metal powders. In: ASM handbook. vol.7. Materials Park. OH: ASM International Publishers. (1998), s. 1083-1092.
- [91] Neikov O. et al. Advanced high-strength nanostructured Al-Mg alloys produced by rapid solidification technology. Compiled by European powder metallurgy association, (Bellstotte Shrewsbury. UK) proceedings of PM 2010 world congress. Florence (2010), vol. 4, p. 25-32.
- [92] Stawarz M.: Kompleksowa ocena jakości żeliwa sferoidalnego. Eksploatacja i Niezawodność. (2004), s. 55-58.

- [93] Sobczak J.J., Balcer E., Kryczek A.: *Odlewnictwo polskie na tle odlewnictwa światowego, stan aktualny - tendencje*. Ogólnopolski Dzień Odlewnika, Kraków (2015).
- [94] Arligunie J.P.: *La traintment de la Fonte. Avec la fil fourre*. Pechiney Electrometallurgie, (1996).
- [95] Stefański Z., Pytel A.: *Nowa ekologiczna metoda wytwarzania odlewów z żeliwa sferoidalnego i wermikularnego w formie odlewniczej*. Konferencja Naukowo-Techniczna "Badania i rozwój nowoczesnej technologii tworzyw odpornych na zmęczenia cieplne", Zakopane (2013).
- [96] Riposan J., Sofroni L., Chisamera M.: *Verschleissverhalten von Gusseisen mit Vermiculargraphit bei trockener Reibung*. Giesserei - Prax. (1978) Vol 21, s.351.
- [97] Dawson S.: *Based on a paper presented at: Werkstoff und Automobilantrieb Materials in Powertrain*. VDI (Verein Deutscher Ingenieure) Dresden Germany 28-29 October 1999 *Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design*.
- [98] Zych J., Jędrzejczyk D.: „*Badania odporności na zmęczenie cieplne żeliwa z grafitem wermikularnym*”: *Przegląd Odlewnictwa* 1991, Nr 6 s. 215-218

## Spis Rysunków

Rys. 1.1. Struktura żeliwa szarego, wermikularnego i sferoidalnego. Mikroskop optyczny (u góry), pow. x 100 i mikroskop skaningowy (u dołu) pow. x 500 [50] .....	9
Rys. 1.2. Kształt grafitu wg normy PN EN ISO 945 .....	10
Rys. 1.3. Sekwencja wzrostu ziaren eutektycznych z grafitem płatkowym (a), wermikularnym (b) i kulkowym (c) $\gamma$ - austenit [4].....	12
Rys. 1.4. Schemat kształtowania ziaren eutektycznych z grafitem płatkowym [7].....	13
Rys. 1.5. Sieć krystalograficzna grafitu (a), oznaczenie osi, kierunków płaszczyzn sieciowych (b) [4, 5] .....	14
Rys. 1.6. Schemat zmian prędkości wzrostu poszczególnych ścian grafitu; kulkowego, wermikularnego i płatkowego, w wyniku adsorpcji obcych atomów [4] .....	15
Rys. 1.7. Wpływ udziału perlitu na wytrzymałość $R_m$ oraz granicę sprężystości $R_{p0.2}$ perlitu żeliwa wermikularnego [28] .....	18
Rys.1.8. Schemat porównujący właściwości żeliwa szarego, wermikularnego oraz sferoidalnego [4] .....	20
Rys.1.9. Typowy zakres zawartość węgla i krzemu w żeliwie sferoidalnymi .....	21
Rys. 1.10. Wpływ zawartości węgla na własności wytrzymałościowe żeliwa sferoidalnego (1- żeliwo perlityczno-ferrytyczne, 2 - żeliwo ferrytyczne) [19].....	22
Rys. 1.11. Wpływ krzemu na własności mechaniczne żeliwa sferoidalnego .....	23
Rys. 1.12. Zależność postaci wydzielań grafitu w strukturze żeliwa od zawartości Mg [4] ...	26
Rys. 1.13. Kompleksowe efekty wermikularyzacji dodatkiem Mg oraz modyfikatora [4] .....	29
Rys. 1.14. Wprowadzanie zaprawy magnezowej do ciekłego żeliwa metodą dzwonową [4].	30
Rys. 1.15. Wprowadzanie zaprawy magnezowej do ciekłego żeliwa metodą zalewania na dnie kadzi, w metodzie Sandwich (a), w metodzie Tundish (b) [29].....	31
Rys. 1.16. Schemat układu wlewowego stosowanego w metodzie Inmold: 1-wlew główny, 2 -szyjka doprowadzająca, 3- komora reakcyjna, 4 - zwężenie wylotowe, 5 – wlew rozprowadzający, 6- wlewy doprowadzające [29] .....	32
Rys. 1.17. Ogólny schemat stanowiska do zabiegu sferoidyzowania żeliwa metodą przewodu elastycznego; z pojedynczym przewodem (a) 1 – kadź zabiegowa z ciekłym metalem, 2 – pokrywa ogniotrwała, 3 – podajnik rolkowy, 4 – szpula z nawiniętym na nią przewodem sferoidyzującym, 5 – pulpit sterowania komputerowego, 6 – odciąg gazów znad lustra metalu, [4,29].....	33
Rys. 1.18. Wpływ czasu od momentu modyfikacji na liczba sferoidów w żeliwie [29] .....	34
Rys. 1.19. Schemat pokazujący efekt końcowego modyfikacji żeliwa sferoidalnego [29] .....	35
Rys. 1.20. Widok odlanej próbki do badań ultradźwiękowych .....	36
Rys. 1.21. Wpływ kształtu wydzielań grafitu i struktury osnowy na prędkość fali ultradźwiękowej [33].....	37
Rys.1.22. Wlewki do badań wytrzymałości na rozciąganie: a) w kształcie litery U; b) w kształcie litery Y; c) w kształcie wałka; d) przyłany do ścianki odlewu [21].....	38
Rys. 1.23. Próbka do badania wytrzymałości w próbie statycznego rozciągania .....	38

Rys. 1.24. Blok silnika Diesel dla Forda [79] .....	40
Rys. 1.25 Głowica silnika samochodu ciężarowego [55] .....	40
Rys. 1.26. Schemat stanowiska sferoidyzacji / wermikularyzacji metoda pręta elastycznego	42
Rys. 1.27. Zależność par magnezu od temperatury ciekłego żeliwa [93] .....	43
Rys. 1.28. Przybliżony uzysk magnezu w żeliwie sferoidalnym w funkcji temperatury [59].	44
Rys.1.29. Przykłady prędkości podawania pręta podczas zabiegu sferoidyzacji/ wermikularyzacji: a) zbyt niska prędkość, b) optymalna prędkość, c) za duża prędkość [42].	45
Rys. 1.30. Zależność prężności par Mg od temperatury dla żeliwa sferoidalnego [42] .....	47
Rys. 2.1. Budowa Hybrydowego PE („Hybrid Cored Wire”): A- zewnętrzna stalowa powłoka; B- warstwa pośrednia – sproszkowany modyfikator; C- warstwa wewnętrzna - magnez w postaci pręta [42].....	54
Rys. 2.2. Pole wsadowe w Odlewni Metalpol.....	58
Rys. 2.3. Pole wsadowe – załadunek materiałów metalowych.....	58
Rys. 2.4. Wytop żeliwa wyjściowego w piecu indukcyjnym.....	59
Rys. 2. 5. Parametry: a) pręta hybrydowego, b) uzyskane z wytopu żeliwa wyjściowego – wprowadzane do komputera podczas procesu sferoidyzacji.....	60
Rys. 2.6. Dobór prędkości wprowadzania do metalu pręta w metodzie PE.....	61
Rys. 2.7. Obróbka pozapiecowa żeliwa a) spust z pieca, b) sferoidyzacja metodą PE.....	61
Rys. 2.8. Płyta modelowa z wlewkami typu Y oraz próbką schodkową .....	62
Rys. 2.9. a) rdzennica, b) wyprodukowane foremki do badań ultradźwiękowych .....	62
Rys. 2.10. Forma doświadczalna przygotowana do procesu zalewania.....	63
Rys. 2.11. Zalewanie form z żeliwa sferoidalnego na linii BMD .....	63
Rys. 2.12. Zalewanie próbek do badań ultradźwiękowych.....	65
Rys. 2.13. Widok a) defektoskop USM 25, b) odlana próbka do badań ultradźwiękowych ...	66
Rys. 2.14. Przebieg rozciągania znormalizowanych próbek wykonanych z wlewków typu Y z żeliwa sferoidalnego dla próbki 1P .....	68
Rys. 2.15. Przebieg rozciągania znormalizowanych próbek wykonanych z wlewków typu Y z żeliwa sferoidalnego dla próbki 1K.....	69
Rys. 2.16. Stanowisko do badań metalograficznych.....	70
Rys. 2.17. Wydzielenia grafitu w próbce z kadzi 1- początek zalewania zgład nietrawiony, pow. 100x.....	70
Rys. 2.18. Mikrostruktura żeliwa w próbce 1 –początek zalewania, zgład trawiony, pow. 100x.....	70
Rys. 2.19. Mikrostruktura żeliwa w próbce z kadzi 1– początek zalewania zgład trawiony, pow. 200x.....	71
Rys. 2.20. Wydzielenia grafitu w próbce z kadzi 1 – koniec zalewania zgład nietrawiony, pow. 100x.....	71
Rys. 2.21. Mikrostruktura żeliwa w próbce z kadzi 1– koniec zalewania zgład trawiony, pow. 100x.....	71
Rys. 2.22. Mikrostruktura żeliwa w próbce z kadzi 1–koniec zalewania zgład trawiony, pow. 200x.....	72
Rys. 2. 23. Model próbki schodkowej.....	73

Rys. 2.24. Pomiar próbki schodkowej metodą ultradźwiękową .....	74
Rys. 2.25. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 6mm, zgląd nietrawiony, pow. 100x.....	75
Rys. 2.26. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 6 mm, zgląd trawiony, pow. 100x.....	75
Rys. 2.27. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 12 mm, zgląd nietrawiony, pow. 100x.....	75
Rys. 2.28. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 12 mm, zgląd trawiony, pow. 100x.....	76
Rys. 2.29. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 22 mm, zgląd nietrawiony, pow. 100x.....	76
Rys. 2.30. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 22 mm, zgląd trawiony, pow. 100x.....	76
Rys. 2.31. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 34 mm, zgląd nietrawiony, pow. 100x.....	77
Rys. 2.32. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 34 mm, zgląd trawiony, pow. 100x.....	77
Rys. 2.33. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 46 mm, zgląd nietrawiony, pow. 100x.....	77
Rys. 2.34. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 46 mm, zgląd trawiony, pow. 100x.....	78
Rys. 2.35. Wpływ grubości ścianki na liczbę wydzieleni grafitu .....	79
Rys. 2.36. Wpływ grubości ścianki na udział perlitu w osnowie.....	79
Rys. 2.37. Średnia zawartość magnezu uzyskana dla danych prędkości wprowadzania pręta hybrydowego do ciekłego metalu .....	84
Rys. 2.38. Wpływ zmiany prędkości wprowadzania hybrydowego PE na uzysk magnezu ....	85
Rys. 2.39. Zależność uzysku Mg w procesie sferoidyzacji od zawartości siarki w żelowie wyjściowym .....	87
Rys. 2.40. Zależność uzysku Mg od temperatury początkowej żeliwa podczas zabiegu jego sferoidyzacji przy użyciu pręta hybrydowego .....	88
Rys. 2.41. Wpływ zmiany prędkości wprowadzania pręta na uzysk magnezu przy sferoidyzacji hybrydowym PE oraz N01 .....	90
Rys. 2.42. Zasada otrzymywania w żelowie grafitu wermikularnego metodą obróbki ciekłego metalu regulowaną ilością magnezu [4].....	92
Rys. 2.43. Płyta modelowa z modelem dla próbnika zanurzeniowego, b) przekrój próbnika zanurzeniowego.....	95
Rys. 2.44. Forma doświadczalna z próbnikiem do odlewania próbek do badań spektrometrycznych .....	95
Rys. 2.45. Zmiany zawartości magnezu po zabiegu wermikularyzacji w trakcie zalewania form w reprezentatywnych seriach badań .....	98
Rys. 2.46. Własności mechaniczne żeliwa wermikularnego – reprezentatywne kadzie.....	100
Rys. 2.47. Przebieg rozciągania znormalizowanych próbek wykonanych z wlewków typu Y z żeliwa wermikularnego dla próbki 4P .....	101

Rys. 2.48. Przebieg rozciągania znormalizowanych próbek wykonanych z wlewków typu Y z żeliwa wermikularnego dla próbki 10K .....	102
Rys. 2.49. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 6 mm zgląd nietrawiony, pow. 100x .....	103
Rys. 2.50. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 6 mm zgląd trawiony, pow. 100x .....	103
Rys. 2.51. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 12 mm zgląd nietrawiony, pow. 100x .....	104
Rys. 2.52. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 12 mm zgląd trawiony, pow. 100x .....	104
Rys. 2.53. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 22 mm zgląd nietrawiony, pow. 100x .....	104
Rys. 2.54. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 22 mm zgląd trawiony, pow. 100x .....	105
Rys. 2.55. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 34 mm zgląd nietrawiony, pow. 100x .....	105
Rys. 2.56. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 34 mm zgląd trawiony, pow. 100x .....	105
Rys. 2.57. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 46 mm zgląd nietrawiony, pow. 100x .....	106
Rys. 2.58. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 46 mm zgląd trawiony, pow. 100x .....	106
Rys. 2.59. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 6 mm zgląd nietrawiony, pow. 100x .....	107
Rys. 2.60. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 6 mm zgląd trawiony, pow. 100x .....	107
Rys. 2.61. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 12 mm zgląd nietrawiony, pow. 100x .....	107
Rys. 2.62. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 12 mm zgląd trawiony, pow. 100x .....	108
Rys. 2.63. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 22 mm zgląd nietrawiony, pow. 100x .....	108
Rys. 2.64. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 22 mm zgląd trawiony, pow. 100x .....	108
Rys. 2.65. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 34 mm zgląd nietrawiony, pow. 100x .....	109
Rys. 2.66. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 34 mm zgląd trawiony, pow. 100x .....	109
Rys. 2.67. Wydzielenia grafitu dla ścianki o grubości 46 mm zgląd nietrawiony, pow. 100x .....	109
Rys. 2.68. Mikrostruktura żeliwa dla ścianki o grubości 46 mm zgląd trawiony, pow. 100x .....	110

## Spis Tabel

Tabel 1.1. Właściwości żeliwa wermikularnego wg PN EN 16079 .....	16
Tabel 1.2. Właściwości żeliwa sferoidalnego wg PN EN 1563 .....	17
Tabel 1.3. Podstawowe właściwości mechaniczne żeliwa z grafitem płatkowym [PN EN 1561] wermikularnym [PN EN 16079] i kulkowym [PN EN 1563].....	18
Tabel 1.4. Podstawowe właściwości fizyczne żeliwa z grafitem płatkowym [PN EN 1561] wermikularnym [PN EN 16079] i kulkowym [PN EN 1563].....	19
Tabel 1.5. Przykładowe składy chemiczne prętów stosowanych do zabiegu sferoidyzacji w metodzie PE.....	48
Tabel 1.6. Przykładowe składy chemiczne prętów stosowanych do zabiegu modyfikacji w metodzie PE.....	48
Tabel 1.7. Charakterystyka metod sferoidyzacji żeliwa .....	49
Tabela 2.1. Skład chemiczny modyfikatora zawartego w hybrydowym PE.....	55
Tabela 2.2. Zakładany skład żeliwa końcowego EN-GJS 500 -7 .....	58
Tabela 2.3. Zakładowa norma wsadowa dla przygotowania wsadu do 6,0 tonowego pieca przy wytopie żeliwa GJS 500-7.....	59
Tabela 2.4. Uzyskany skład żeliwa wyjściowego .....	60
Tabela 2.5. Skład chemiczny wytworzonego żeliwa EN-GJS 500-7.....	64
Tabela 2.6. Prędkości fali w próbkach odlanych wykonanych z żeliwa sferoidalnego .....	66
Tabela 2.7. Wyniki badań wytrzymałościowych dla żeliwa sferoidalnego .....	67
Tabela 2.8. Klasyfikacja według cech grafitu oraz osnowy żeliwa .....	72
Tabela 2.9. Prędkość rozchodzenia fali ultradźwiękowej w zależności od grubości ścianki w próbkach schodowych wykonanych w kolejnych wytopach. ....	74
Tabela 2.10. Klasyfikacja według cech grafitu oraz osnowy żeliwa próbki schodkowe.....	78
Tabela 2.11. Przykładowe zestawienie parametrów technologicznych wpływających na proces sferoidyzacji dla pręta magnezowego stosowanego w bieżącej produkcji Metalpol .....	81
Tabela 2.12. Wartość uzysku Mg przy prędkości wprowadzania pręta 25 m/min .....	82
Tabela 2.13. Wartość uzysku Mg przy prędkości wprowadzania pręta 26 m/min .....	82
Tabela 2.14. Wartość uzysku Mg przy prędkości wprowadzania pręta 27 m/min .....	83
Tabela 2.15. Wartość uzysku Mg przy prędkości wprowadzania pręta 28 m/min .....	83
Tabela 2.16. Wartość uzysku Mg przy prędkości wprowadzania pręta 29 m/min .....	84
Tabela 2.17. Uzysk Mg w zależności o zawartości S w żeliwie wyjściowym .....	86
Tabela 2.18. Uzysk Mg w zależności o temperatury początku sferoidyzacji .....	88
Tabela 2.19. Skład chemiczny pręta PE do sferoidyzacji N01 .....	89
Tabela 2.20. Zestawienie wyników uzyskanych przy sferoidyzacji ze zmienną prędkością wprowadzania pręta dla pręta hybrydowego oraz N01 .....	90
Tabela 2.21. Skład chemiczny żeliwa wyjściowego .....	94
Tabela 2.22. Skład chemiczny żeliwa z kolejnych prób .....	96
Tabela 2.23. Zawartość magnezu w żeliwie po wermikularyzacji hybrydowym PE, określana w formach zalewanych metalem z kolejnych kadzi (wytopów) .....	97

Tabela 2.24. Wyniki badań właściwości mechanicznych żeliwa wermikularnego ..... 99  
Tabela 2.25. Klasyfikacja według cech grafitu oraz osnowy żeliwa próbki schodkowe ..... 111