



AGH

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

Wydział Górnictwa i Geoinżynierii
Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki

Rozprawa doktorska

**WPŁYW PARAMETRÓW TECHNOLOGICZNYCH NA EFEKTYWNOŚĆ
WZMOCNIENIA MATERIAŁAMI KOMPOZYTOWYMI ELEMENTÓW
BETONOWYCH OSIOWO ŚCISKANYCH**

Mgr inż. Krzysztof Adam Ostrowski

Promotor: Prof. dr hab. inż. Roman Kinasz

Promotor pomocniczy: Dr inż. Piotr Dybeł

Kraków 2020

Rodzinie mojej, moim bliskim i przyjaciołom pracę tę poświęcam

Krzysztof Adam Ostrowski

***Składam serdeczne podziękowania Promotorom:
Prof. dr hab. inż. Romanowi Kinasz
Dr inż. Piotrowi Dybeł
za nieocenioną pomoc, merytoryczne wskazówki
i życzliwość w trakcie pisania niniejszej pracy.***

*Dziękuję
Dr hab. inż. Jerzemu Cieślik, profesorowi Akademii Górniczo-Hutniczej,
Dr hab. inż. Łukaszowi Sadowski, profesorowi Politechniki Wrocławskiej
Dr inż. Stanisławowi Kańka, Politechnika Krakowska,
Dr inż. Danielowi Wałach, Akademia Górniczo-Hutnicza,
za pomoc w przeprowadzeniu badań.*

*Dziękuję ponadto
Prof. dr hab. inż. Kazimierzowi Furtak, Politechnika Krakowska,
Prof. dr hab. inż. Kazimierzowi Flaga, Politechnika Krakowska,
za liczne merytoryczne dyskusje i życzliwość.*

*Panu mgr inż. Markowi Kawalec, Sika Poland
dziękuję za materiały do przeprowadzenia badań.*

Streszczenie rozprawy

W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu parametrów technologicznych na efektywność wzmocnienia materiałami kompozytowymi elementów betonowych osiowo ściskanych. Badania wstępne wykonano dla próbek betonu zwykłego i wysokowytrzymałościowego z włóknami stalowymi i bez, które zostały wzmocnione jedną warstwą mat z włókien węglowych. Badaniom poddano również rury stalowe wypełnione betonem wysokowytrzymałościowym, wzmocnione materiałami kompozytowymi. Badania właściwe przeprowadzono dla próbek walcowych wykonanych z fibrobetonu samozagęszczalnego wysokowytrzymałościowego. Skupiono się na czterech głównych parametrach technologicznych takich jak: ilość warstw wzmocnienia, jego lokalizacja, rodzaj matrycy zespalającej oraz morfologia powierzchni betonowej. Badane elementy wzmocniono jedną, dwiema i trzema warstwami włókien węglowych, przy użyciu żywicy epoksydowej i matrycy cementowej. Rozważono trzy typy powierzchni betonowej próbek takie jak: nieprzygotowana, piaskowana i szlifowana. Przeanalizowano również możliwość umieszczenia włókien węglowych wewnątrz struktury betonu. Dokonano charakterystyki powierzchni betonowych przy użyciu lasera 3D. Wykazano, że najbardziej optymalne wzmocnienie analizowanego betonu można uzyskać stosując wzmocnienie zewnętrzne przy użyciu żywicy epoksydowej dla powierzchni poddanej szlifowaniu.

Summary of the dissertation

The dissertation contains the results of research on the impact of technological parameters on the effectiveness of reinforcing axially compressed concrete elements with composite materials. Preliminary tests were carried out for normal and high-strength concrete samples, with and without steel fibres, and reinforced with one layer of carbon fiber mats. Steel pipes filled with high-strength concrete and reinforced with composite materials were also tested. The major tests were carried out for cylindrical samples made of self-compacting high-strength fiber-reinforced concrete. The focus was on four main technological parameters, such as the number of reinforcement layers, its location, the type of matrix, and the morphology of the concrete surface. The tested elements were reinforced with one, two and three layers of carbon fibers using epoxy resin and cement matrix. Three types of concrete surfaces were considered - unprepared, sanded and grinded. The possibility of placing carbon fibers inside the concrete structure was also examined. The characteristics of the concrete surfaces were assessed using a 3D laser. It was shown that the most optimal reinforcement of the analysed concrete can be obtained by using external reinforcement with epoxy resin for the surface subjected to the grinding process.

Spis treści:

1. Wprowadzenie	11
2. Przedmiot rozprawy	13
3. Cel i zakres rozprawy	13
4. Tezy pracy	14
5. Etapy badań	16
6. Dotychczasowy stan wiedzy	17
6.1. Materiały kompozytowe	17
6.1.1. Kompozyty	17
6.1.2. Kompozyty FRP	19
6.1.2.1. Definicja	19
6.1.2.2. Rodzaje włókien	19
6.1.2.3. Orientacja włókien w kompozytach FRP	22
6.1.2.4. Proces laminacji	23
6.1.2.5. Matryca	25
6.1.2.6. Przygotowanie powierzchni wzmacnianego betonu	27
6.1.2.7. Ochrona przed wysokimi temperaturami	28
6.1.2.8. Badania nieniszczące laminatów FRP	28
6.1.2.9. Znaczenie kompozytów FRP w inżynierii lądowej	29
6.1.2.10. Znaczenie parametrów technologicznych w technologii FRP	31
6.2. Istota fibrobetonu w kształtowaniu nowoczesnych konstrukcji zespolonych	33
6.3. Wpływ wytrzymałości rdzenia betonowego na efektywność wzmocnienia materiałami kompozytowymi	36
6.4. Konstrukcje zespolone stalowo-betonowo-kompozytowe	45
7. Badania wstępne	47
7.1. Fibrobeton zwykły wzmocniony CFRP	47
7.1.1. Materiał i próbki	47
7.1.2. Przygotowanie próbek	48
7.1.3. Oprzyrządowanie i badania	49
7.1.4. Wyniki przeprowadzonych badań	50
7.1.5. Przebieg zniszczenia	53
7.1.6. Przyczepność zbrojenia CFRP do betonu	55
7.1.7. Podsumowanie	56

7.2. Fibrobeton wysokowytrzymałościowy wzmocniony CFRP	58
7.2.1. Materiał i próbki	58
7.2.2. Przygotowanie próbek	59
7.2.3. Oprzyrządowanie i badania	59
7.2.4. Wyniki przeprowadzonych badań	59
7.2.5. Przebieg zniszczenia	64
7.2.6. Przyczepność zbrojenia CFRP do betonu	65
7.2.7. Podsumowanie	69
7.3. Kolumny CFT/CFCT	71
7.3.1. Rodzaje próbek	71
7.3.2. Właściwości zastosowanych materiałów	72
7.3.3. Przygotowanie próbek	72
7.3.4. Aparatura badawcza i procedura badań	73
7.3.5. Wyniki badań	73
7.3.6. Przebieg zniszczenia	78
7.3.7. Analiza numeryczna	79
7.3.7.1. Model numeryczny	79
7.3.7.2. Symulacja numeryczna	81
7.3.7.3. Wyniki analizy numerycznej	83
7.3.7.4. Podsumowanie	86
8. Badania właściwe	87
8.1. Wpływ lokalizacji włókien węglowych na efektywność wzmocnienia betonu	87
8.1.1. Przygotowanie pierścieni z włókien węglowych	87
8.1.2. Mieszanka betonowa i przygotowanie próbek	89
8.1.3. Aparatura badawcza i procedura badań	92
8.1.4. Wyniki przeprowadzonych badań	93
8.1.4.1. Wybrane właściwości mechaniczne przebadanych próbek	93
8.1.4.2. Przebieg zniszczenia próbek	98
8.1.5. Wnioski	101
8.2. Wpływ przygotowania powierzchni betonu oraz rodzaju matrycy zespalającej włókna węglowe z betonem na efektywność wzmocnienia betonu	103
8.2.1. Materiał i próbki	103
8.2.2. Charakterystyka powierzchni betonowych	105
8.2.2.1. Skaner laserowy 3D	105

8.2.2.2. Charakterystyka powierzchni betonowej.....	106
8.2.2.3. Próbkki.....	108
8.2.2.4. Wyniki	109
8.2.3. Proces laminacji włókien węglowych	116
8.2.4. Aparatura badawcza i procedura badań.....	118
8.2.5. Wyniki badań.....	119
8.2.5.1. Próbkki wzmocnione przy użyciu żywicy epoksydowej.....	119
8.2.5.2. Próbkki wzmocnione przy użyciu matrycy cementowej	131
8.2.5.3. Wnioski.....	142
9. Podsumowanie rozprawy.....	144
10. Zakończenie.....	146
11. Kierunki dalszych badań.....	147
12. Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	148
13. Literatura.....	150

Załączniki:

Spis rysunków

Spis tabel

1. Wprowadzenie

Wraz z rozwojem technologii betonu, we współczesnym budownictwie można wyróżnić tendencję do łączenia różnych materiałów ze sobą celem osiągnięcia większej wydajności i trwałości konstrukcji. Beton jest coraz powszechniej modyfikowany poprzez stosowanie domieszek i dodatków, a odpowiedni dobór jego składu pozwala na nadanie odpowiedniej reologii mieszance betonowej, co pozwala na projektowanie coraz to bardziej zróżnicowanych pod względem geometrii elementów. Skomplikowane kształty elementów konstrukcyjnych, dążenie do uzyskania wytrzymałych, statecznych i stosunkowo lekkich konstrukcji, a także spełnianie dodatkowych wymagań dotyczących trwałości i większej elastyczności wymuszają poszukiwanie odpowiednich technologii poprzez modyfikację podstawowego materiału budowlanego naszych czasów. Z pomocą przychodzi technologia fibrobetonu samozagęszczalnego wysokowytrzymałościowego, łącząca w sobie wiele zalet takich jak znakomita płynność świeżej mieszanki betonowej, wysoka wytrzymałość na ściskanie, rozciąganie, zginanie, udarność i quasiplastyczne zachowanie w momencie uzyskania maksymalnych naprężeń ściskających. We współczesnym budownictwie, zwłaszcza specjalnym, coraz powszechniej łączy się ze sobą różne materiały i techniki w celu osiągnięcia wyznaczonego celu; na przykład uzyskania podwyższonej odporności na oddziaływania dynamiczne czy też zwiększonego zakresu pracy elementów konstrukcyjnych, co przekłada się na znaczący wzrost energii zniszczenia. Powstają zatem elementy hybrydowe, zwane kompozytowymi – składające się z betonu i jego wzmocnienia (w postaci płaszcza stalowego bądź materiałów kompozytowych typu FRP (*Fibre Reinforced Polymer materials*)). Dlatego też naukowcy poszukują nowych sposobów na zmianę charakterystyki pracy betonu poprzez zmianę charakterystyki ze sprężysto-kruchej na sprężysto-plastyczną lub sprężysto-plastyczną ze wzmocnieniem, dzięki czemu beton uzyskuje większą odporność na działanie sił dynamicznych. Dzięki zastosowaniu fibrobetonu jako materiału podstawowego i jego wzmocnieniu przy użyciu kompozytów można uzyskać taką zależność.

W niniejszej pracy zaproponowałem i przeprowadziłem badania nad elementami betonowymi wzmocnionymi materiałami kompozytowymi, poddany osiowemu ściskaniu. Inspiracją do podjęcia prac było postawienie sobie kilku pytań przez autora, na które nie znalazł jednoznacznych odpowiedzi w dostępnej literaturze krajowej i międzynarodowej, dotyczących wzmocniania konstrukcji materiałami kompozytowymi: Czy sposób przygotowania powierzchni betonu poprzez mechaniczną obróbkę poprawia efektywność

wzmocnienia? Jeżeli tak, to jaka powierzchnia pozwala uzyskać najlepsze rezultaty? Czy jest możliwe „uplastycznienie betonu” – zapewnienie charakterystyki sprężysto – plastycznej dla betonu zawierającego mikrobrojenie rozproszone, wzmocnionego przy użyciu włókien węglowych (inspirując się problemem odporności elementów konstrukcyjnych narażonych na oddziaływanie sejsmiczne)? Czy możliwe jest efektywne zastąpienie żywicy epoksydowej (uplastyczniającej się w stosunkowo niskich temperaturach) wysokowytrzymałościową matrycą cementową? Czy można skutecznie wbudować włókna węglowe w wewnętrzną strukturę elementów betonowych tak, by uzyskać ich wzmocnienie, eliminując przy tym stosowanie żywicy epoksydowej wrażliwej na podwyższoną temperaturę?

Na te postawione sobie pytania na początku studiów doktoranckich, po przeprowadzeniu rozpoznania literaturowego i wielu dyskusjach z naukowcami w trakcie studiów oraz licznych konferencjach krajowych i międzynarodowych poszukiwałem odpowiedzi, które zostały zamieszczone w niniejszej pracy.

2. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem rozprawy jest rozwiązanie problemu naukowego związanego z optymalizacją procesu wzmocnienia samozagęszczalnego fibrobetonu wysokowytrzymałościowego przy zastosowaniu włókien węglowych. W wyniku przeprowadzonych prac zaproponowano rozwiązania, które pozwalają osiągnąć optymalną efektywność wzmocnienia rozpatrywanego betonu.

3. Cel i zakres rozprawy

Celem niniejszej rozprawy jest określenie wpływu wybranych parametrów technologicznych na efektywność wzmocnienia materiałami kompozytowymi elementów betonowych osiowo ściskanych. Zakres rozprawy obejmuje przeprowadzenie badań wstępnych i właściwych. W badaniach wstępnych przeanalizowano wpływ zbrojenia z włókien węglowych na charakterystykę naprężenie-odkształcenie dla betonu zwykłego, fibrobetonu zwykłego, betonu wysokowytrzymałościowego oraz fibrobetonu wysokowytrzymałościowego. Ponadto przeanalizowano wpływ ilości warstw wzmocnienia CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymer*) na zachowanie próbek zespolonych stalowo-betonowych. W badaniach właściwych analizie poddano ocenę wpływu parametrów technologicznych na efektywność wzmocnienia próbek betonowych wykonanych z samozagęszczalnego fibrobetonu wysokowytrzymałościowego takich jak: liczba warstw wzmocnienia, lokalizacja włókien węglowych, typ matrycy zespalającej oraz rodzaj przygotowanej powierzchni betonowej. Próbki zostały wzmocnione 1, 2 i 3 warstwami włókien węglowych przy użyciu żywicy epoksydowej i matrycy cementowej. Rozpatrzono zewnętrzne oraz wewnętrzne wzmocnienie betonu. Przeanalizowano trzy rodzaje najczęściej wykonywanych powierzchni betonowych takich jak: powierzchnia nieprzygotowana, piaskowana i szlifowana. Wszystkie przebadane elementy stanowiły próbki walcowe o smukłości równej 2. W celu determinacji charakterystyki powierzchni betonowych przeprowadzono skanowanie powierzchni próbek przy użyciu skanera laserowego 3D.

4. Tezy pracy

Przedstawione poniżej tezy pracy dotyczą samozagęszczalnego fibrobetonu wysokowytrzymałościowego. Dzisiejszy rozwój technologii betonu sprawia, że coraz częściej stosuje się beton, który nie wymaga mechanicznego zagęszczania, co znacznie usprawnia proces wykonywania konstrukcji betonowych. Wskutek zastosowania nowoczesnych domieszek upłynniających, mikrowypełniaczy struktury mieszanki betonowej oraz znacznej ilości drobnych frakcji będących jednym z warunków uzyskania betonu samozagęszczalnego, przekłada się to na uzyskanie szczelnego betonu wysokowytrzymałościowego. Dodając do takiej mieszanki zbrojenie rozproszone uzyskujemy materiał quasi-plastyczny, odporny na czynniki dynamiczne oraz nieskomplikowany w wbudowaniu.

Teza I: Przygotowanie powierzchni betonu poprzez zmianę morfologii powierzchni wpływa na efektywność wzmocnienia elementów betonowych osiowo ściskanych wzmocnionych włóknami węglowymi.

Teza ta wynika z uprzedniego rozpoznania literatury, po którym stwierdzono, że naukowcy zajmujący się tematyką wzmacniania różnego rodzaju elementów i obiektów inżynierskich przy użyciu materiałów kompozytowych, bardzo często pomijają aspekt przygotowania powierzchni wzmacnianych elementów betonowych. W większości przeanalizowanej literatury badacze nie przekazują szczegółowych informacji odnośnie przygotowania powierzchni, ograniczając się nierzadko do podstawowych informacji, iż powierzchnia betonowa przed procesem laminacji została oczyszczona i odpylona. Jedynie w nielicznych pracach pojawia się stwierdzenie, że powierzchnia nie została poddana żadnym zabiegom technologicznym bądź została poddana obróbce (najczęściej szlifowaniu). Brak charakterystyk morfologicznych powierzchni w wielu pracach naukowych zainspirował autora niniejszej pracy do przeanalizowania wpływu przygotowania powierzchni na efektywność wzmocnienia elementów betonowych osiowo ściskanych wzmocnionych włóknami węglowymi. W pracy przeanalizowano trzy rodzaje najczęściej spotykanych powierzchni betonowych: nieprzygotowaną, piaskowaną i szlifowaną.

Teza II: Rodzaj matrycy zespalającej włókna węglowe z powierzchnią betonu ma istotny wpływ na charakterystykę naprężenie–odkształcenie elementów betonowych osiowo ściskanych.

W pracach analizowanych przez autora zdecydowana większość matryc zespalających włókna polimerowe z powierzchnią betonową stanowiły żywice epoksydowe. W przypadku nielicznych prac opublikowanych głównie w ostatnich dwóch-trzech latach odnotowano badania, w których jako matrycę do wzmocnienia elementów betonowych przy użyciu włókien FRP (głównie węglowych, aramidowych i szklanych) stanowiła matryca cementowa. Warto podkreślić, że była ona stosowana do wzmocniania elementów osiowo ściskanych wykonanych z betonu o niskiej i normalnej wytrzymałości. Dlatego też w niniejszej pracy przeanalizowano zarówno możliwość wzmocnienia fibrobetonu przy zastosowaniu zarówno żywicy epoksydowej, jak i matrycy cementowej.

Teza III: Zlokalizowanie włókien węglowych wewnątrz struktury betonu powoduje zmianę nośności elementów osiowo ściskanych.

Niemal wszystkie dostępne prace naukowe dotyczące zastosowania materiałów FRP w technologii wzmocniania konstrukcji dotyczą wzmocniania poprzez przyklejenie mat do powierzchni betonowej. Co więcej, w zdecydowanej większości przypadków stosuje się przy tym żywicę epoksydową, jako lepszą do przesycenia włókien i przyklejenia ich do tejże powierzchni. Ponieważ włókna węglowe mają bardzo wysoką wytrzymałość na oddziaływanie bardzo wysokich temperatur, a żywica epoksydowa uplastycznia się już w temperaturze kilkudziesięciu stopni Celsjusza, autor pracy podjął próbę zastosowania włókien węglowych wzmocnionych niepalną matrycą cementową wysokowytrzymałościową wewnątrz struktury betonu.

5. Etapy badań

Prace badawcze przeprowadzono w kilku następujących etapach:

Etap I: Wpływ zbrojenia CFRP na zachowanie betonu zwykłego i fibrobetonu zwykłego.

Etap II: Wpływ zbrojenia CFRP na zachowanie betonu wysokowytrzymałościowego i fibrobetonu wysokowytrzymałościowego.

Etap III: Wpływ ilości warstw zbrojenia CFRP na efektywność wzmocnienia kolumn zespolonych stalowo-betonowych wypełnionych betonem wysokowytrzymałościowym.

Etap IV: Wpływ lokalizacji zbrojenia z włókien węglowych na zachowanie samozagęszczalnego fibrobetonu wysokowytrzymałościowego.

Etap V: Wpływ ilości warstw zbrojenia CFRP oraz przygotowania powierzchni betonowej na efektywność wzmocnienia samozagęszczalnego fibrobetonu wysokowytrzymałościowego z zastosowaniem żywicy epoksydowej.

Etap VI: Wpływ ilości warstw zbrojenia CFRP oraz przygotowania powierzchni betonowej na efektywność wzmocnienia samozagęszczalnego fibrobetonu wysokowytrzymałościowego z zastosowaniem matrycy cementowej.

Prace przeprowadzone w etapach I – III były badaniami wstępnymi, pozostałe natomiast stanowiły badania właściwe.

6. Dotychczasowy stan wiedzy

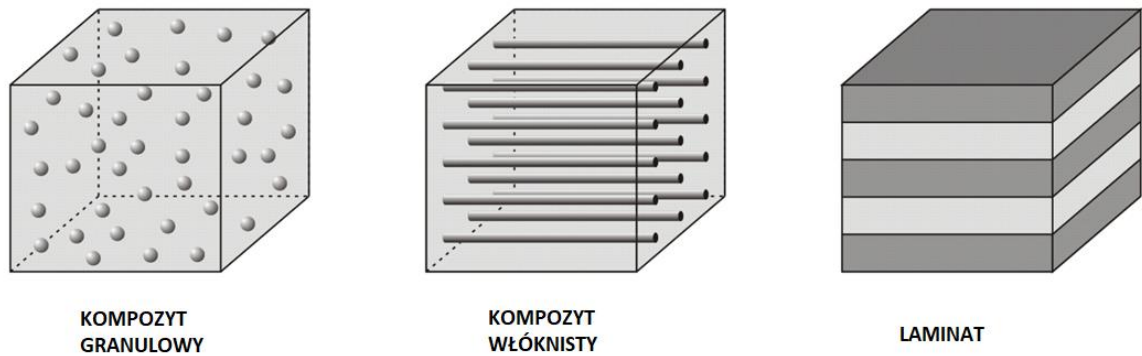
6.1. Materiały kompozytowe

6.1.1. Kompozyty

Kompozyty (materiały łączone) są materiałami świadomie skonstruowanymi z dwóch lub więcej materiałów i mającymi właściwości inne niż poszczególne materiały składowe. Według Rajczyka i Stacheckiego [1] kompozyty mogą łączyć ze sobą różne rodzaje materiałów; takie jak metale, polimery i ceramikę, wykorzystując ich specyficzne cechy, a także materiały tego samego rodzaju. W przypadku kompozytów wzmocnionych cząstkami wyróżniamy dwa podtypy, w zależności od zastosowanej wielkości cząstek. Cząstki dyspersji to te, które są połączone z matrycą na mikroskopijnym poziomie atomowym lub molekularnym. Natomiast najbardziej popularnym przykładem kompozytu wzmocnionego dużymi cząsteczkami (często nazywanego kompozytem kruszywowym) jest beton. Rolę fazy ciągłej stanowi matryca cementowa, podczas gdy jako wzmocnienie traktowane jest kruszywo. W takich wzmocnionych kompozytach (w porównaniu do kompozytów wmacnianych dyspersyjnie) przenoszenie obciążeń zewnętrznych jest wynikiem wspólnej nośności matrycy i fazy rozproszonej, której niezależna sztywność i twardość jest nierzadko większa niż sztywność i twardość otaczającej matrycy. Dlatego też zmienny jest również mechanizm interakcji cząstek z matrycą.

Kompozyty wmacniane włóknami dominują obecnie na rynku materiałów kompozytowych ze względu na najlepsze właściwości mechaniczne i wytrzymałościowe przy minimalnym ich ciężarze. Zasada działania kompozytów włóknistych opiera się na przenoszeniu obciążeń przez różne rodzaje włókien. Matryca służy jedynie jako spoiwo dla włókien i bezpośrednia ochrona przed czynnikami zewnętrznymi. Włókna użyte do ich produkcji mogą być ciągłe (włókna ciągłe) lub nieciągłe (wąsy, włókna cięte). Wiele produktów wykonanych z pojedynczych włókien można również wykorzystać jako wzmocnienie. Kompozyty strukturalne są złożonymi materiałami o jednorodnej lub mieszanej strukturze materiałowej, których ciągła modernizacja i coraz szersze zastosowanie w przemyśle zaowocowało opracowaniem i rozwojem najnowszych technologii. Do tej grupy należą laminaty, tj. połączone warstwy dwuwymiarowych kompozytów i kompozyty warstwowe, tj. systemy o wyraźnym rozkładzie funkcji na wytrzymałość (realizowaną przez rdzeń wewnętrzny) i osłonę ochronną spełnianą przez zewnętrzne okładziny. Podstawowa warstwa laminatu (lamina) tworzona jest przez włókno spajane żywicą (pojedynczy kompozyt). Sam laminat jest systemem połączonych ze sobą warstw kompozytowych (często

o różnych parametrach) odpowiednio zorientowanych w stosunku do kierunku głównego obciążenia, aby zastosować najlepszy możliwy układ poszczególnych warstw. Klasyfikację kompozytów ze względu na ich budowę przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Klasyfikacja kompozytów z uwagi na ich konstrukcję. Źródło: opracowano na podstawie [2].

Kompozyt składa się z matrycy i umieszczonego w niej drugiego komponentu (zbrojenia) o znacznie lepszych właściwościach mechanicznych [3]. Główne funkcje matrycy są następujące:

- utrzymuje cały system w kompaktowej formie (łączy zbrojenie),
- przenosi obciążenia zewnętrzne na zbrojenie,
- zapewnia odpowiednią wytrzymałość na ściskanie,
- decyduje o właściwościach chemicznych i termicznych,
- chroni wzmocnienia przed uszkodzeniami mechanicznymi,
- nadaje produktom określony kształt.

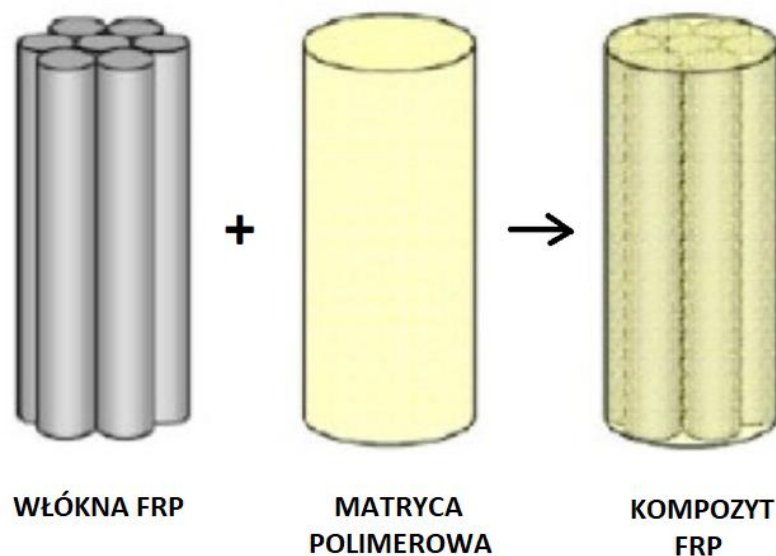
Wewnętrzne zbrojenie natomiast:

- poprawia właściwości wytrzymałościowe,
- zwiększa odporność na ścieranie,
- zmniejsza rozszerzalność cieplną,
- zwiększa odporność na szoki termiczne,
- zatrzymuje rozprzestrzenianie się pęknięć,
- poprawia nośność konstrukcji.

6.1.2. Kompozyty FRP

6.1.2.1. Definicja

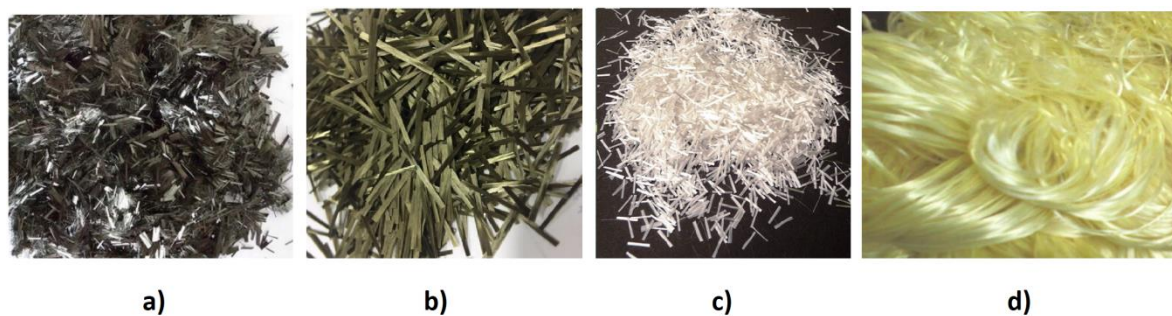
Kompozyty wzmocnione włóknem – *Fibre-Reinforced Polymer materials* (FRP) można zdefiniować jako polimer wzmocniony włóknem (rysunek 2). Zastosowanie FRP w inżynierii lądowej staje się coraz bardziej powszechne w odniesieniu do wzmocniania istniejących i nowo projektowanych konstrukcji. Jest to spowodowane wieloma zaletami materiałów z tej grupy polimerów. Najważniejsze z nich to: wysoki moduł Younga i stosunek wytrzymałości do masy, odporność na agresywne środowisko, dobre właściwości zmęczeniowe, niskie koszty cyklu życia, i niska przewodność cieplna [4-6].



Rysunek 2. Idea kompozytów FRP. Źródło: opracowano na podstawie [7].

6.1.2.2. Rodzaje włókien

Głównymi włóknami stosowanymi jako wzmocnienie w kompozytach są włókna węglowe, bazaltowe, aramidowe i szklane (rysunek 3). Najczęściej stosowanymi laminatami w inżynierii lądowej są materiały z włókien węglowych – *Carbon Fibre Reinforced Polymer* (CFRP), materiały z włókien bazaltowych – *Basalt Fibre Reinforced Polymer* (BFRP), materiały z włókien aramidowych – *Aramid Fibre Reinforced Polymer* (AFRP) i materiały z włókien szklanych – *Glass Fibre Reinforced Polymer* (GFRP). Mechaniczne i fizyczne właściwości włókien FRP przedstawiono w Tabeli 1.



Rysunek 3. Główne rodzaje włókien FRP: a) włókna węglowe; b) włókna bazaltowe; c) włókna szklane; d) włókna aramidowe. Źródło: opracowano na podstawie [8-11].

Tabela 1. Właściwości głównych włókien stosowanych w kompozytach FRP. Źródło: opracowano na podstawie [12-22].

Włókno	Rodzaj	Moduł Younga E[GPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R_r [MPa]	Wydłużenie maksymalne ϵ_{max} [%]	Gęstość ρ [kg/m ³]
Węglowe	High Strength	200-280	2500-5500	1,5-2,2	1800
	High Modulus	330-490	2100-2800	0,7-1,0	2000
Bazaltowe	-	90-110	4000-4840	2,25-3,1	2600-2800
Szklane	S-glass	86-93	4500-4890	1,93	2460-2490
	E-glass	72,3	3345-3400	2,12	2540-2580
Aramidowe	Kevlar 29	70-83	2900-2920	3,5-3,6	1440
	Kevlar 49	124-151,7	2758-3010	2,4	1467
	Kevlar 149	179	3450	1,3-1,6	1470

Włókna węglowe – *Carbon Fibres* (CF) są najczęściej stosowane do wzmacniania konstrukcji inżynierskich. Charakteryzują się dobrą odpornością termiczną i chemiczną, a temperatura pracy jest jednym z najważniejszych kryteriów wyboru danego rodzaju włókna do wzmocnienia materiału kompozytowego [4]. Na przykład właściwości włókien węglowych nie zmieniają się w temperaturze do 2000° C, w przeciwieństwie do włókien szklanych lub aramidowych [23, 24]. Dopuszczalne temperatury dla możliwości wykorzystania włókien podano w Tabeli 2.

Włókna bazaltowe – *Basalt Fibres* (BF) wytwarza się przez stopienie skał bazaltowych w wysokiej temperaturze wynoszącej ok. 1400° C. BF mają lepsze właściwości

fizyczne i mechaniczne niż włókna szklane. Koszt BF jest niższy niż CF i znacznie większy niż włókien szklanych.

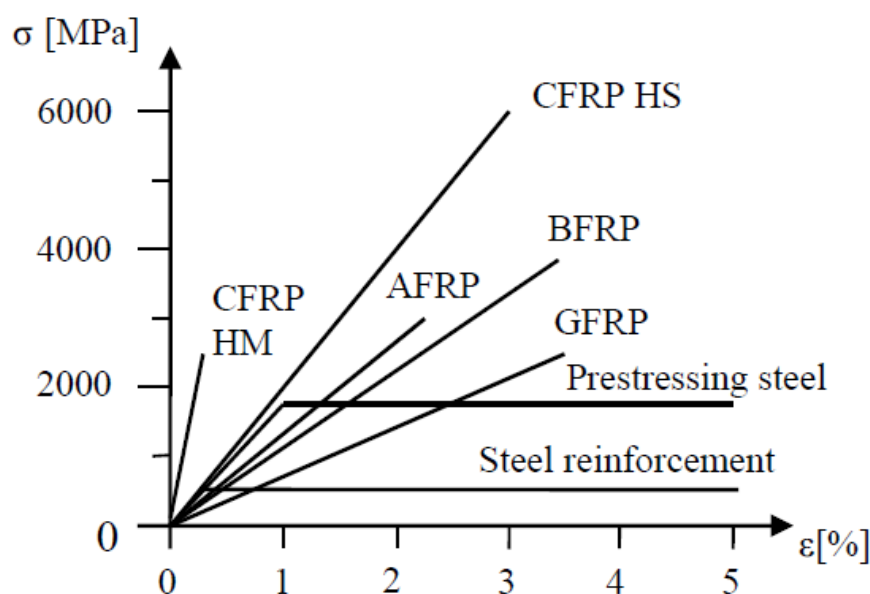
Włókna aramidowe – *Aramid Fibres* (AF) charakteryzują się doskonałymi właściwościami chemicznymi, mechanicznymi i fizycznymi w wysokich temperaturach. Niestety AF mają bardzo niską odporność na oddziaływanie światła ultrafioletowego. Pod wpływem długotrwałego nasłonecznienia właściwości wytrzymałościowe tych włókien mogą zostać zredukowane o ponad 50%. Zmodyfikowane AF nazywamy kevlarem. Charakteryzuje się on znacznie lepszymi właściwościami mechanicznymi niż standardowe włókna AF.

Włókna szklane – *Glass Fibres* (GF) są włóknami chemicznymi, uzyskiwanymi ze szkła wodnego; czasami także ze szkła stopionego. Zmiany proporcji surowców takich jak: glina, aluminium, piasek, krzemionka, tlenek boru, kalcyt oraz tlenek wapnia zapewniają uzyskanie różnych rodzajów włókien szklanych. Zaletami GF są przede wszystkim wysoka wytrzymałość mechaniczna, lekkość i odporność na agresywne środowiska. GF są dostępne w różnych formach i kształtach, dlatego są szeroko stosowane w inżynierii lądowej.

Na rysunku 4 została przedstawiona porównawcza charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla materiałów FRP i stali. W porównaniu do stali zarówno zbrojeniowej, jak i sprężającej na ogół włókna FRP mają wyższą wytrzymałość na rozciąganie, mniejszą odkształcalność, a część z nich (węglowe wysokomodułowe i o wysokiej wytrzymałości) cechują się wyższą sztywnością.

Tabela 2. Dopuszczalne temperatury stosowania włókien. Źródło: opracowano na podstawie [4].

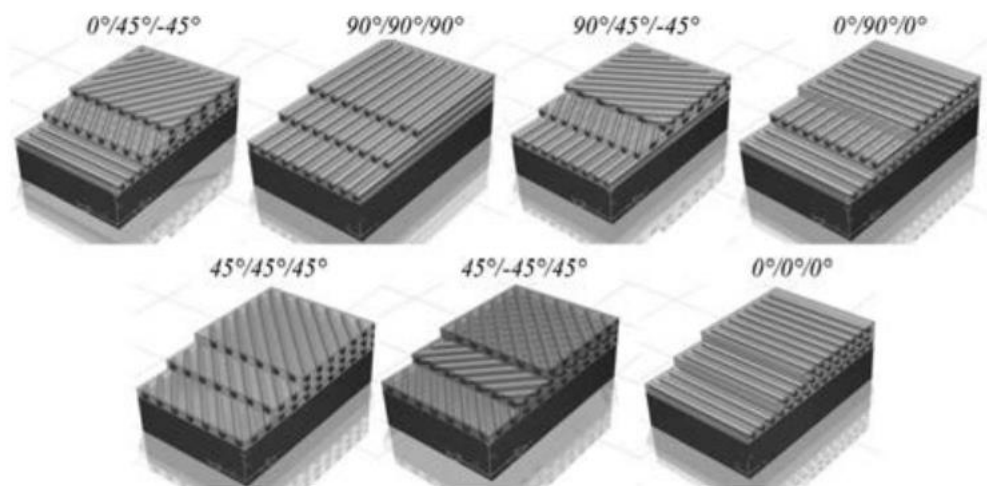
Zakres temperatur	Rodzaj włókien
Niskie temperatury (do 100°C)	wszystkie dostępne włókna: naturalne, szklane, węglowe, ceramiczne, borowe, organiczne, metalowe
Podwyższone temperatury (100°C - 400°C)	niektóre organiczne, szklane, węglowe, ceramiczne, borowe, metalowe
Wysokie temperatury (400°C - 700°C)	ceramiczne, metalowe, węglowe
Bardzo wysokie temperatury (ponad 700°C)	węglowe, ceramiczne



Rysunek 4. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla włókien FRP oraz stali. Źródło: opracowano na podstawie [25].

6.1.2.3. Orientacja włókien w kompozytach FRP

Orientacja włókien w kompozytach FRP ma istotny wpływ na nośność konstrukcji betonowych, stalowych i drewnianych. Produkcja mat z włókien węglowych pozwala na swobodne układanie w nich włókien i tworzenie różnych splotów. W przypadku włókien uporządkowanych właściwości materiału są silnie izotropowe, a moduł Younga i wytrzymałość zależą od ilości poszczególnych typów włókien i matrycy zespalającej. Ponadto moduł sprężystości i wytrzymałość w kierunku uporządkowania włókien są znacznie większe niż w kierunku prostopadłym do uporządkowania. Jeśli włókna są ułożone ortogonalnie, istnieją kierunki uporządkowania i zaburzenia zwane anizotropią. W tym przypadku najlepsze właściwości mechaniczne występują pod obciążeniem wzdłuż włókien. Ostateczna wytrzymałość na rozciąganie nieuporządkowanych włókien jest niższa niż w przypadku materiałów z uporządkowanymi włóknami. Różne ułożenie włókien węglowych w kompozycie wytwarzanym z trzech laminatów CFRP przedstawiono na rysunku 5. W zależności od map naprężeń występujących w konstrukcjach inżynierskich, należy wybrać maty FRP o odpowiednim splotcie, które zapewnią optymalne zachowanie konstrukcji.



Rysunek 5. Zróżnicowana orientacja włókien węglowych w kompozycie wytwarzanym z trzech laminatów CFRP. Źródło: [26].

6.1.2.4. Proces laminacji

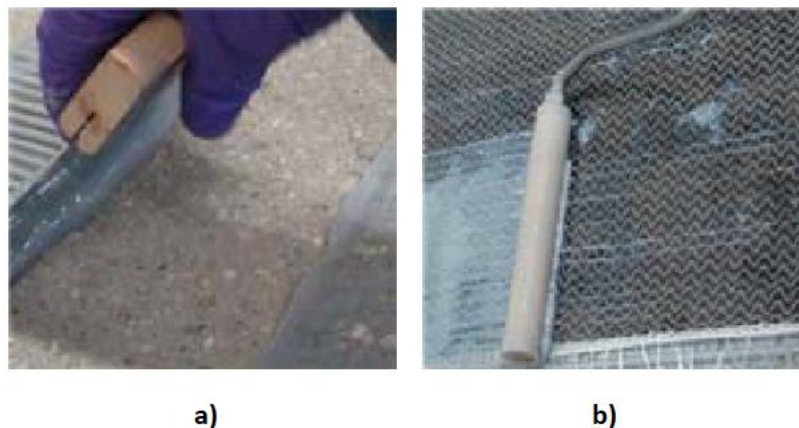
Skuteczność wzmocnienia elementów konstrukcyjnych zależy od prawidłowo przeprowadzonego procesu laminowania włókien. Istnieją dwie metody przeprowadzenia procesu wzmocniania obiektów inżynierskich za pomocą włókien FRP i żywicy epoksydowej: metodą na mokro i na sucho.

Nazwa „metoda układania na mokro” pochodzi od stanu tkaniny FRP w momencie zastosowania w ostatecznej pozycji. W tej metodzie część żywicy epoksydowej nakłada się bezpośrednio na zbrojenie FRP, a drugą część żywicy ze środkiem tiksotropowym stosuje się do wzmocnienia podłoża betonowego. Na początku element konstrukcyjny należy wzmocnić żywicą epoksydową ze środkiem tiksotropowym (rysunek 6a). Żywicę można nanosić mechanicznie za pomocą saturatora lub ręcznie za pomocą wałka, pacy lub pędzla. Następnym krokiem jest namoczenie FRP żywicą epoksydową za pomocą wałka (rysunek 6b). Walcowanie powinno odbywać się wzdłuż włókien FRP. Skuteczność współpracy matrycy ze zbrojeniem zależy od prawidłowego przesączenia mat FRP. Najłatwiejszym sposobem przeniesienia mokrej maty FRP jest umieszczenie jej na tekturowym wałku (rysunek 6c); dzięki temu wszystkie deformacje FRP można wyeliminować. Następnie FRP przykleja się do wcześniej przygotowanego podłoża betonowego. Ważne jest prawidłowe ułożenie FRP (właściwy kierunek ułożenia włókien). W ostatnim etapie należy wygładzić powierzchnię laminatu i usunąć pęcherzyki powietrza z kompozytu FRP (rysunek 6d) za pomocą wałka z tworzywa sztucznego (przy toczeniu wzdłuż włókien FRP).



Rysunek 6. Etapy w procesie mokrego układania: a) wzmocnienie podłoża betonowego, b) nasączenie zbrojenia, c) umieszczenie nasączonego FRP na wałku, d) usunięcie pęcherzyków powietrza za pomocą wałka z tworzywa sztucznego. Źródło: [27].

Nazwa „metoda układania na sucho” również pochodzi od stanu tkaniny FRP w momencie aplikacji w ostatecznym ułożeniu tego materiału. W tej metodzie żywica epoksydowa służy do wzmocniania podłoża betonowego i impregnacji FRP. Po pierwsze, żywicę epoksydową nakłada się na element betonowy za pomocą pacy, pędzla lub wałka (rysunek 7a). Następnym etapem jest umieszczenie uprzednio przygotowanego zbrojenia na powierzchni elementu betonowego. W procesie laminacji włókien FRP stosuje się specjalne wałki do laminacji o odpowiednio ukształtowanej powierzchni, która zapewnia jednorodny, stały nacisk powierzchniowy oraz pozwala odpowiednio odpowietrzyć laminat. Wałkowanie powierzchni laminatu przeprowadza się z uwzględnieniem kierunku ułożenia włókien FRP (rysunek 7b). Jeśli planowane jest nałożenie więcej niż jednej warstwy FRP, należy to zrobić metodą „mokro na mokro” lub odczekać co najmniej dwanaście godzin (ze względu na proces utwardzania żywicy epoksydowej), a następnie nałożyć następną warstwę kompozytu.



Rysunek 7. Etapy w procesie suchego układania: a) wzmocnienie podłoża betonowego, b) zastosowanie zbrojenia FRP na podłożu betonowym. Źródło:[27].

6.1.2.5. Matryca

Rolę matrycy w laminacie pełni najczęściej żywica epoksydowa (rysunek 8a). Niekiedy jest stosowana również matryca cementowa (rysunek 8b). Żywica epoksydowa składa się z dwóch składników: żywicy i utwardzacza. Po połączeniu składników w odpowiednich proporcjach czas nałożenia żywicy wynosi około jednej godziny w temperaturze 20° C i zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. Stwardnieniu żywicy towarzyszy tworzenie znacznej ilości ciepła, o czym należy pamiętać przy wyborze naczynia do jej wymieszania. Żywice epoksydowe są ciekłymi materiałami polimerowymi stosowanymi w przemyśle od ponad 50 lat. W budownictwie służą jako matryca do wzmacniania elementów konstrukcyjnych wykonanych z betonu, metali i drewna. Ze względu na swoje właściwości szepne tworzy dobre połączenia z wymienionymi wyżej materiałami. Matrycę tą stosuje się we wszystkich przypadkach wzmacniania elementów konstrukcyjnych materiałami FRP.

Wydaje się, że największym wyzwaniem przy stosowaniu żywicy epoksydowej w zbrojeniu CFRP jest wpływ temperatury, w której pracuje materiał kompozytowy. Zmieniająca się w zależności od temperatury otoczenia odkształcalność żywicy epoksydowej może powodować zmiany w jej absorpcji energii i ostatecznie wpływać na uszkodzenie CFRP. Temperatura zeszklenia – *glass transition temperature* (T_g) jest kluczowym parametrem w polimerach, ponieważ w tej temperaturze gęstość, sztywność i twardość polimeru maleje. Po jej osiągnięciu element staje się bardziej elastyczny i ciągliwy [28–31].



Rysunek 8. Żywica epoksydowa (a) i matryca cementowa (b). Źródło: opracowanie własne.

Ze względu na uplastycznienie żywicy w stosunkowo niskich temperaturach poszukuje się alternatywnych matryc do wzmacniania konstrukcji betonowych. W niektórych

przypadkach rolę tę może pełnić matryca cementowa, która jest zdecydowanie bardziej odporna na działanie podwyższonych temperatur niż żywica polimerowa.

W ostatnich latach wzrasta liczba badań dotyczących alternatywnego spoiwa zastępującego żywicę epoksydową w kompozytach CFRP. Ze względu na główną wadę żywicy epoksydowej – plastyczne zachowanie w stosunkowo niskich temperaturach około 70°C – naukowcy poszukują alternatywnego spoiwa do wzmocnienia konstrukcji betonowych i murowych z wykorzystaniem matrycy cementowej. Niestety ta wiedza jest nadal niepełna. Podczas wyszukiwania artykułów w bazie danych Scopus poprzez wpisanie słów „CFRP, cement i matrix” uzyskano zaledwie 29 wyników (05/09/2019). Sandrmomtazi i in. przedstawił wpływ matrycy nieorganicznej i organicznej na zachowanie próbek betonowych wzmocnionych FRP. W tych badaniach autorzy uzyskali wzrost wytrzymałości na ściskanie próbek, które zostały wzmocnione matrycą cementową jak i żywicą epoksydową, w porównaniu z betonem niewzmocnionym. Wyniki pokazały, że wytrzymałość na ściskanie wzmocnionych próbek była od 1,11 do 2,42 razy większa niż niepoddanych wzmocnieniu [32]. Colajanni i in. w podobnych badaniach zaobserwowali zauważalny wzrost plastyczności i wytrzymałości dla analizowanych próbek wzmocnionych włóknami p-Phenylene BenzobisOxazole PBO. Analizowana ilość zbrojenia PBO (dwie i trzy warstwy) nie była w stanie zapewnić wzmocnienia po osiągnięciu przekroczeniu maksymalnej wytrzymałości na ściskanie, a przyrosty wytrzymałości próbek wyniosły odpowiednio 19% i 33% dla dwóch i trzech warstw włókien PBO [33]. Al-Abdwais i Al-Mahaidi wykazali natomiast potrzebę modyfikacji zawartości klejów na bazie cementu, w celu zwiększenia właściwości wiązania elementów kompozytowych [34].

Matryca cementowa stosowana w procesie wzmocnienia obiektów techniką FRP jest najczęściej wytwarzana przy użyciu cementu CEM I 52,5R lub CEM I 42,5R, pyłu krzemionkowego, wody i znacznej ilości superplastyfikatora nowej generacji (około 10% masy cementu). Efektywny czas zastosowania matrycy cementowej w laminatach FRP wynosi zwykle nie więcej niż 30 minut. Niestety, jej przyczepność do betonów wysokowytrzymałościowych o wysokiej szczelności jest praktycznie bardzo niska, więc jej zastosowanie jest silnie ograniczone do betonu o niskiej wytrzymałości z uwagi na lepszą penetrację betonu spowodowaną wyższą porowatością otwartą jego powierzchni. Zalety i wady żywicy epoksydowej i matrycy cementowej przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zalety i wady żywicy epoksydowej i matrycy cementowej. Źródło: opracowanie własne.

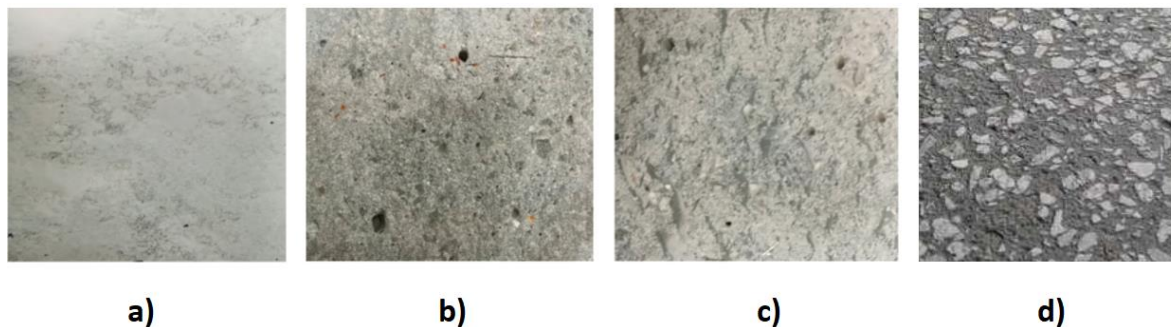
Matryca	Zalety	Wady
Żywica epoksydowa	<ul style="list-style-type: none"> • bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe • wytrzymałość na ściskanie 40-90 MPa • wytrzymałość na rozciąganie 12-40 MPa • wytrzymałość na zginanie 20-60 MPa • wysoka odporność chemiczna na większość roztworów kwasów nieorganicznych i organicznych, wodorotlenków i roztworów soli nieorganicznych • wysoka twardość, ścieranie, zarysowania i odporność na uderzenia 	<ul style="list-style-type: none"> • brak odporności na promieniowanie UV • niska elastyczność • niska odporność chemiczna na substancje utleniające, alkohole, węglowodory, ketony • wrażliwość na wilgoć podczas realizacji • brak odporności na wysokie temperatury (plastyfikacja w temperaturach od 70° C) • palna • wysoki koszt • niska sztywność
Matryca cementowa	<ul style="list-style-type: none"> • wysoka wytrzymałość na ściskanie (do 100 MPa) • wyższa odporność na wysokie temperatury niż w przypadku żywic epoksydowych • brak plastycznego zachowania w wysokich temperaturach • niepalna • niska cena • wysoka sztywność 	<ul style="list-style-type: none"> • niska wytrzymałość na rozciąganie (do kilku MPa) • bardzo niska współpraca / brak współpracy z FRP • niska odporność chemiczna • niska wytrzymałość na zginanie

6.1.2.6. Przygotowanie powierzchni wzmacnianego betonu

Przed procesem laminowania należy odpowiednio przygotować betonowe podłoże, które musi być mocne, czyste i wolne od wilgoci powierzchniowej. Pył, związki utwardzające, oleje, woski, ciała obce, impregnaty i inne powłoki muszą zostać usunięte z powierzchni betonu. W celu uzyskania najlepszych rezultatów zaleca się piaskowanie, szlifowanie lub śrutowanie. Niektóre eksperymenty wykazały, że parametry chropowatości elementów betonowych i przyczepność do żywicy epoksydowej są ważnym parametrem pod względem efektywności kontaktowej [35,36]. Nieprzygotowana powierzchnia betonu została przedstawiona na rysunku 9a.

Szlifowanie to wykończenie powierzchni za pomocą narzędzi ściernych, co zapewnia wysoką dokładność wymiarów i kształtu oraz niską szorstkość. Materiał, z którego wykonane są ściernice, to najczęściej diament, korund, węgiel boru lub węgiel krzemu. Piaskowanie to proces technologiczny polegający na czyszczeniu lub kształtowaniu powierzchni materiałem ściernym (piaskiem) w strumieniu sprężonego powietrza lub cieczy. Efekt piaskowania jest

podobny do efektu szlifowania, jednak oczyszczona powierzchnia jest bardziej równomierna i uzyskuje większą szorstkość. Śrutowanie jest technologią podobną do piaskowania. W tej metodzie zamiast piasku stosuje się specjalne metalowe elementy (w postaci metalowych kulek). Najczęściej kulki stalowe można odzyskać i ponownie wykorzystać. Piaskowana, szlifowana i śrutowana powierzchnia betonu została przedstawiona na rysunkach 9 b-d.



Rysunek 9. Rodzaje przygotowania powierzchni betonowych: nieprzygotowana (a), piaskowana (b), szlifowana (c), śrutowana (d). Źródło: opracowanie własne.

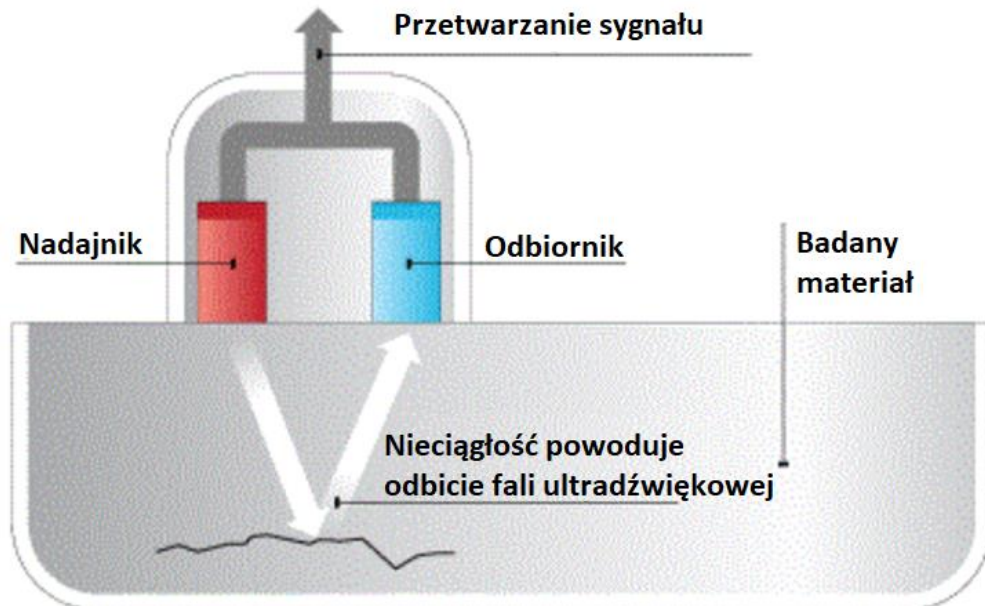
6.1.2.7. Ochrona przed wysokimi temperaturami

Ze względu na dość istotną wadę żywicy epoksydowej, jaką jest niska odporności na oddziaływanie wysokiej temperatury, elementy konstrukcyjne wzmocnione matrycą organiczną należy chronić przed bezpośrednim działaniem wysokiej temperatury i ognia. Głównym sposobem ochrony elementów konstrukcyjnych jest ich odpowiednia izolacja przy użyciu niepalnej wełny mineralnej lub zaprawy cementowej. Pięciodziesięciocentymetrowa warstwa wełny mineralnej na kompozycie FRP z żywicą epoksydową może chronić kompozyt FRP przed wzrostem temperatury żywicy powyżej temperatury uplastycznienia przez 120 minut. Kilkucentymetrowa warstwa zaprawy cementowej na kompozycie FRP zapewnia ochronę przeciwpożarową przez minimum 240 minut [37].

6.1.2.8. Badania nieniszczące laminatów FRP

Z uwagi na często złożony charakter elementów konstrukcyjnych wzmocnianych kompozytami, metodą pozwalającą wykryć defekty w konstrukcji jest metoda ultradźwiękowa. Badanie ultradźwiękowe polega na wprowadzeniu do obiektu fal ultradźwiękowych, które są odbijane przez nieciągłości materiału, a także załamane i rozproszone na ich krawędziach (rysunek 10). Celem tych testów, w zależności od rodzaju zastosowanych fal, jest wykrycie nieciągłości wewnętrznych, powierzchniowych i podpowierzchniowych, wykrycie braku przyczepności w połączeniach klejonych, a także

spawanych, lutowanych i nitowanych oraz określenie właściwości materiałów. Testy umożliwiają wykrycie nieciągłości płaskich i przestrzennych, pęknięć wewnętrznych i powierzchniowych, a także wtrąceń i rozwarstwień. Ze względu na złożoną konstrukcję struktur kompozytowych metoda ta jest jedyną skuteczną metodą oceny stanu kompozytów FRP.

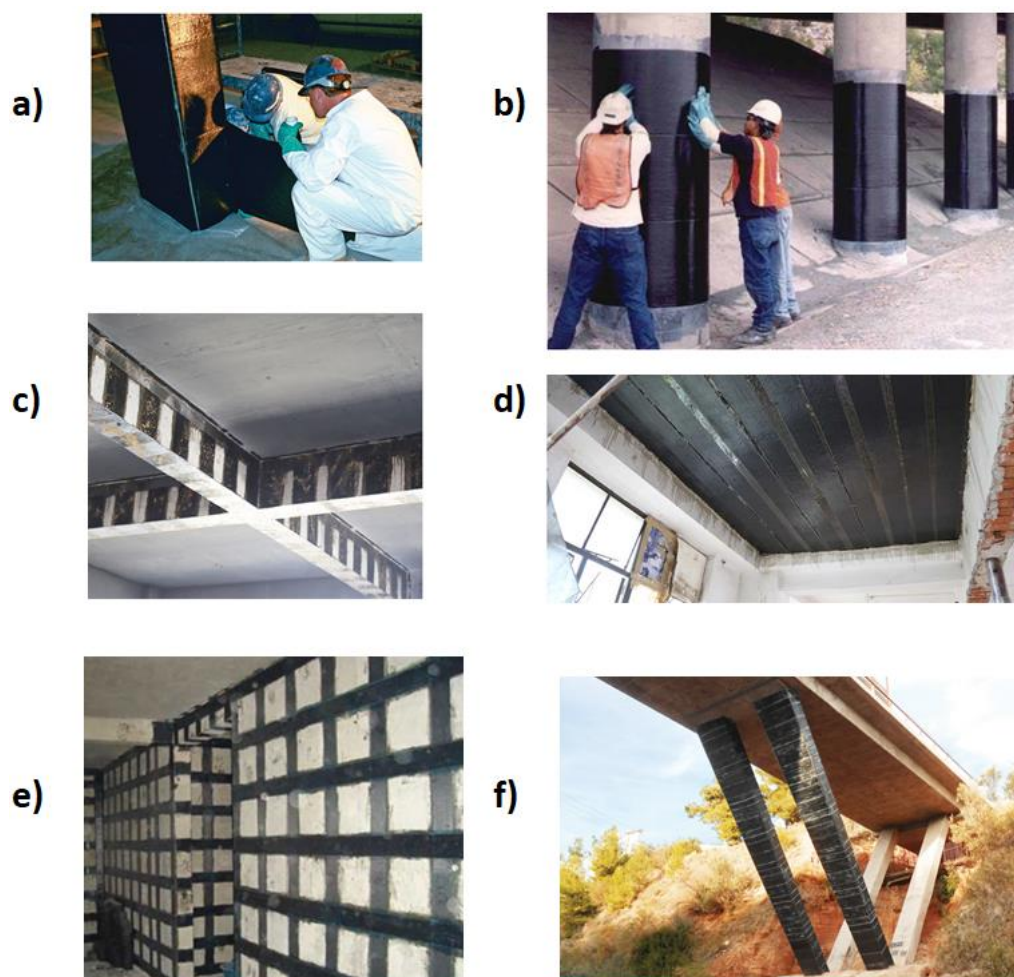


Rysunek 10. Idea przeprowadzenia badań ultradźwiękowych. Źródło: [38].

6.1.2.9. Znaczenie kompozytów FRP w inżynierii lądowej.

Stal, beton i drewno to podstawowe materiały konstrukcyjne powszechnie stosowane w inżynierii lądowej. Każdy z tych materiałów ma inne właściwości wytrzymałościowe, trwałość i skuteczność wzmocnienia. Konstrukcje stalowe charakteryzują się wysoką wytrzymałością mechaniczną, dobrymi właściwościami odkształcającymi i zmęczeniowymi, a jednocześnie niską odpornością na korozję i koniecznością zastosowania zabezpieczeń powierzchniowych. Współczesne konstrukcje betonowe, pomimo swojej wysokiej wytrzymałości na ściskanie i szczelności, są również narażone na agresywne środowisko, które może powodować korozję betonu. Materiałem budowlanym znanym od wieków jest drewno. Charakteryzuje się dobrą wytrzymałością na ściskanie, rozciąganie i zginanie oraz jest materiałem naturalnym o niskiej przepuszczalności ciepła. Konstrukcja drewniana z uwagi na jej organiczny charakter musi być chroniona przed wpływem środowiska agresywnego i naturalnych szkodników w celu zachowania jej właściwości przez długi okres czasu. Warto podkreślić, że zastosowanie materiałów kompozytowych może wzmocnić

i ochronić stal, drewno i beton przed korozją oraz poprawić nośność. Technikę FRP można zatem idealnie dostosować do poprawy ochrony powierzchni materiałów opisanych powyżej oraz zwiększenia nośności i stateczności elementów konstrukcyjnych. Metoda wzmocnienia konstrukcji przy zastosowaniu FRP, w porównaniu z metodami tradycyjnymi jest korzystna w dłuższej perspektywie czasowej. Materiały FRP można stosować do wzmacniania elementów różnego typu. Nie ma znaczących ograniczeń we wzmocnianiu elementów o złożonej geometrii, takich jak belki, kominy, kolumny, ściany, i silosy. Minimalny ciężar własny laminatu FRP, bez dodatkowego obciążenia wzmocnionej konstrukcji jest korzystny dla każdego elementu konstrukcyjnego. Przykłady zastosowania materiałów FRP w konstrukcjach żelbetowych pokazano na rysunku 11.



Rysunek 11. Wzmocniane elementy betonowe przy użyciu technologii FRP: a), b) słupy; c) belki; d) płyty; e) ściany; f) filary. Źródło: [39-44].

Materiały FRP można stosować w konstrukcjach ze stali, betonu i drewna, aby:

- zwiększyć odporność na obciążenia sejsmiczne konstrukcji murowych,

- zwiększyć wytrzymałość betonowych kolumn,
- wymienić brakujące zbrojenie,
- umożliwić zmianę przeznaczenia budynków,
- zwiększyć wytrzymałość poszczególnych elementów i całej konstrukcji,
- poprawić nośność konstrukcji osłabionej z powodu błędów konstrukcyjnych,
- dostosować nośność konstrukcji do obowiązujących norm i wymagań,
- zwiększyć żywotność i trwałość konstrukcji i jej elementów.

6.1.2.10. Znaczenie parametrów technologicznych w technologii FRP

W tabeli 4 przedstawiono główne czynniki technologiczne oraz ich wpływ na efektywność wzmocnienia betonu przy użyciu materiałów kompozytowych. Wnioski te w dużej mierze zostały sformułowane na podstawie doświadczeń autora pracy.

Tabela 4. Parametry technologiczne i ich główny wpływ na skuteczność wzmocnienia konstrukcji betonowych laminatami FRP.

Parametr technologiczny	Znaczenie
Rodzaj włókien	Wraz ze wzrostem wytrzymałości włókna wzrasta nośność konstrukcji.
Liczba warstw kompozytów FRP	Wraz ze wzrostem liczby laminatów FRP wzrasta nośność konstrukcji.
Kierunek ułożenia włókien	Ułożenie włókien równoległe do naprężeń rozciągających zwiększa nośność konstrukcji zespolonej.
Zróżnicowanie włókien	Łączenie różnych włókien FRP w laminatach wielowarstwowych jest możliwe i nie wpływa negatywnie na konstrukcję.
Matryca	Zalecane jest użycie żywicy epoksydowej. W przypadku zbrojenia betonu o niskiej wytrzymałości na ściskanie można zastosować matrycę cementową jako matrycę zespalającą, ale wydajność przenoszenia obciążeń ze względu na właściwości przyczepności jest w tym przypadku niska.
Proces laminacji	Wysoka jakość wykonanych prac, w tym prawidłowe wzmocnienie podłoża betonowego, dokładne odpowietrzenie żywicy oraz prawidłowe przyleganie laminatu do powierzchni betonu gwarantują dobrą pracę konstrukcji zgodnie z projektem wzmocnienia.
Rodzaj betonu	Wraz ze wzrostem wytrzymałości betonu maleje efektywność wzmocnienia przy użyciu FRP.
Rodzaj powierzchni betonu	Piaskowanie, szlifowanie, śrutowanie powierzchni betonowych nie wpływają znacząco na nośność elementu wzmocnionego materiałami kompozytowymi w porównaniu z nieprzygotowaną powierzchnią betonu.

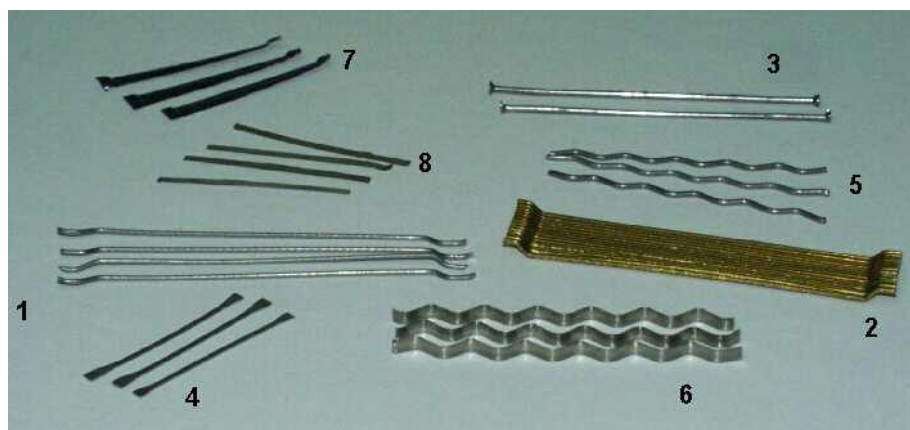
Przygotowanie powierzchni betonu	Podłoże betonowe musi być czyste, wolne od brudu, mleczka cementowego i całkowicie wysuszone.
Rodzaj elementów przeznaczonych do wzmocnienia	Analizowaną metodą można wzmocnić większość elementów betonowych.
Warunki wykonania	Proces laminowania powinien odbywać się w warunkach dodatniej temperatury i niskiej wilgotności.
Projektowanie nowych elementów	Dzięki odpowiedniemu doborowi laminatów FRP możliwe jest wykonanie smukłych elementów o mniejszych przekrojach. Istnieje zaawansowane oprogramowanie komputerowe, które pozwala dokładnie określić wymaganą liczbę warstw laminatu, w zależności od oczekiwanych efektów. Pomocne są również liczne badania eksperymentalne.
Odporność na oddziaływanie wysokich temperatur	W przypadku laminatów FRP z żywicą epoksydową zaleca się ich ochronę przed wysokimi temperaturami za pomocą izolacji niepalnej lub matrycy cementowej. Laminaty FRP z matrycą cementową nie wymagają dodatkowej ochrony przeciwpożarowej, jeśli matryca cementowa ma odpowiednią grubość i stanowi zewnętrzną otulinę.

6.2. Istota fibrobetonu w kształtowaniu nowoczesnych konstrukcji zespolonych

Stosowanie klasycznych niemodyfikowanych betonów w niektórych rodzajach konstrukcji budowlanych jest dziś niewystarczające. Wymagania stawiane konstrukcjom pod względem nośności jak i użyteczności są coraz większe, a ich spełnienie przy użyciu zwykłego betonu staje się nieekonomiczne a nawet niemożliwe.

Wymusiło to poszukiwanie nowych sposobów polepszania właściwości betonu. Dzięki rozwojowi inżynierii materiałowej pojawiła się „nowa klasa betonu” nazwana fibrobetonem. Jest to materiał złożony ze spoiwa, kruszywa mineralnego, piasku, wody i włókien, dodawanych do mieszanki betonowej. Pierwsze rozwiązanie, polegające na dodaniu włókien do betonu zastosowali w roku 1962 Romualdi i Mandel. Wykazali oni, że dodatek włókien stalowych do mieszanki betonowej zmienia charakter zachowania się kruchego betonu na materiał quasi-plastyczny, co powoduje, że po pojawieniu się pierwszej rysy w konstrukcji nie występuje kruche zniszczenie [45]. Konstrukcja dalej przenosi obciążenie utrzymując nośność, a nawet w niektórych przypadkach wykazuje jej zwiększenie. Włókna zastępujące zbrojenie powodują zmniejszenie koncentracji naprężeń, czyli zmniejszenie zarysowań i pęknięć konstrukcji [46,47].

Włókna do betonu dzielimy generalnie na metalowe (głównie stalowe) i polimerowe (bazaltowe, polipropylenowe, szklane), które przedstawiono na rysunkach 12 i 13. Rodzaj włókien, ich kształt, długość, charakter powierzchni, wytrzymałość mechaniczna oraz odporność chemiczna oraz jakże istotna ilość dawkowania, mają istotny wpływ na charakter pracy betonu [48]. Fibrobeton jest więc traktowany jako ciało quasi-plastyczne, którego energia zniszczenia jest nawet kilkukrotnie większa niż energia zniszczenia betonu niezbrojonego [49-51].



Rysunek 12. Przykłady kształtu włókien stalowych przeznaczonych do betonu: z haczykowatymi odgięciami na obu końcach (1), klejone w pasma (2), z zakotwieniami uformowanymi na końcach (3,7), o kształcie wiosłowym (4), faliste (5,6), proste gładkie (8).



a)

b)

c)

Rysunek 13. Mikrowłókna polipropylenowe fibrylowane o długości ok. 12 mm (a), makrowłókna syntetyczne - skręcona wiązka długości 54 mm (b) oraz włókna Fibermesh HPP (c).

Fibrobeton jako beton ze zbrojeniem strukturalnym, jest zaliczany do grupy betonów specjalnych [52], które cechują się specjalnymi właściwościami oprócz wytrzymałości. W porównaniu z betonem zwykłym, fibrobeton charakteryzuje się [53]:

- zwiększoną wytrzymałością na rozciąganie i ścinanie,
- zwiększoną odpornością zmęczeniową i udarnością,
- zwiększoną odpornością na powstawanie rys i pęknięcie.

Włókna rozproszone stosuje się praktycznie od lat 60-tych XX wieku w betonach niezbrojonych oraz w betonach zbrojonych prętami stalowymi, konstrukcjach sprężonych oraz w torkrecie i prefabrykacji [54]. W tabeli 5 zestawiono właściwości włókien najczęściej stosowanych w technologii betonu.

Tabela 5. Właściwości fizyczne i mechaniczne włókien najczęściej stosowanych w betonie [55].

Rodzaj włókna	Średnica d [mm]	Gęstość ρ [kg/dm ³]	Wytrzymałość na rozciąganie R_r [MPa]	Moduł sprężystości E [GPa]
Stalowe	0,1-1	7,85	500-2000	210
Szklane ARG	0,010-0,015	2,6	2500	80
Mikrowłókna polipropylenowe	0,010-0,2	0,9-0,91	200-600	3-5
Makrowłókna polimerowe	1 (pasma)	0,91-0,97	600-750	5-9,5

Potrzeba wznoszenia bardzo wysokich konstrukcji zapoczątkowała rozwój betonu wysokowytrzymałościowego. Beton wysokowytrzymałościowego (BWW) można określić jako beton o stosunkowo niskim wskaźniku wodno-spoiwowym; często poniżej 0,35. Wartość ta powiązana jest ze zmianą mikrostruktury zaczynu w betonie, co przekłada się na wzrost trwałości i odporności korozyjnej [56-58]. Również charakterystyka zniszczenia betonu jest inna niż w przypadku betonu zwykłego. Jeżeli do betonu wysokowytrzymałościowego zostanie dodane stalowe zbrojenie rozproszone, to możliwe jest uzyskanie wysokowytrzymałego materiału quasi-plastycznego [59-60]. Fibrobeton wysokowytrzymałościowy jest coraz częściej stosowany w budownictwie specjalnym. Różne obciążenia o charakterze statycznym lub dynamicznym mogą mieć istotny wpływ na pracę konstrukcji budowlanych. Zwłaszcza obciążenia dynamiczne, które powstają w wyniku przyspieszenia masy oddziałują znacząco na obiekt budowlany [61]. Zarówno w Polsce, jak i na świecie fibrobeton jest wykorzystywany głównie w przypadku wykonywania posadzek przemysłowych oraz w elementach konstrukcyjnych o niskim dopuszczalnym poziomie zarysowania. W ujęciu globalnym, jest wykorzystywany przede wszystkim tam, gdzie istnieje możliwość oddziaływania obciążeń dynamicznych i wzbudzenia drgań konstrukcji spowodowanych przez pracę urządzeń przemysłowych oraz czynniki sejsmiczne (tereny

górnice oraz obszary na granicach płyt litosfery; wzdłuż grzbietów oceanicznych, uskoku i stref subdukcji).

6.3. Wpływ wytrzymałości rdzenia betonowego na efektywność wzmocnienia materiałami kompozytowymi

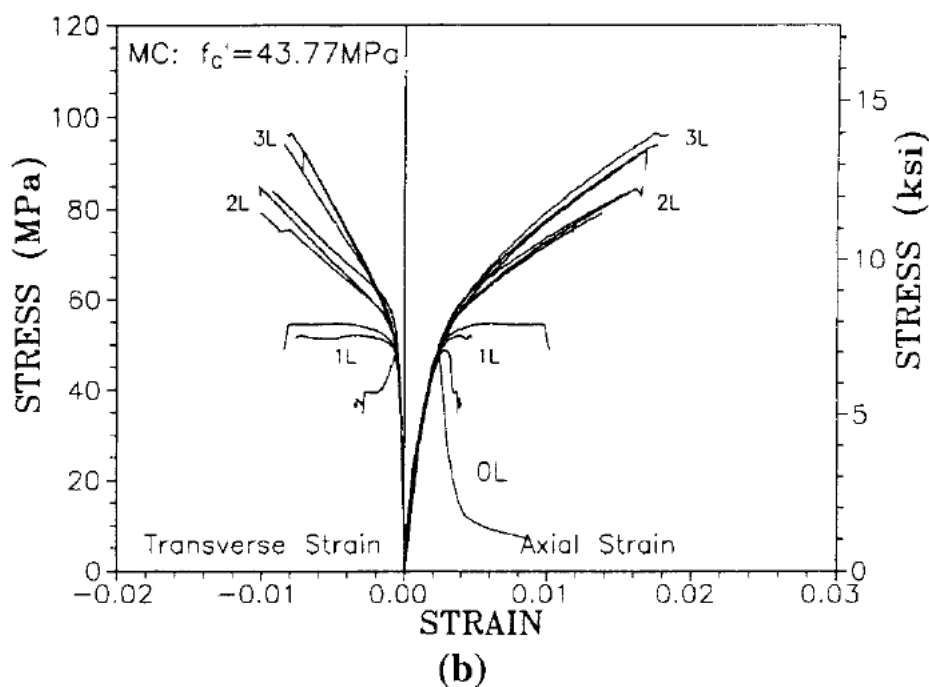
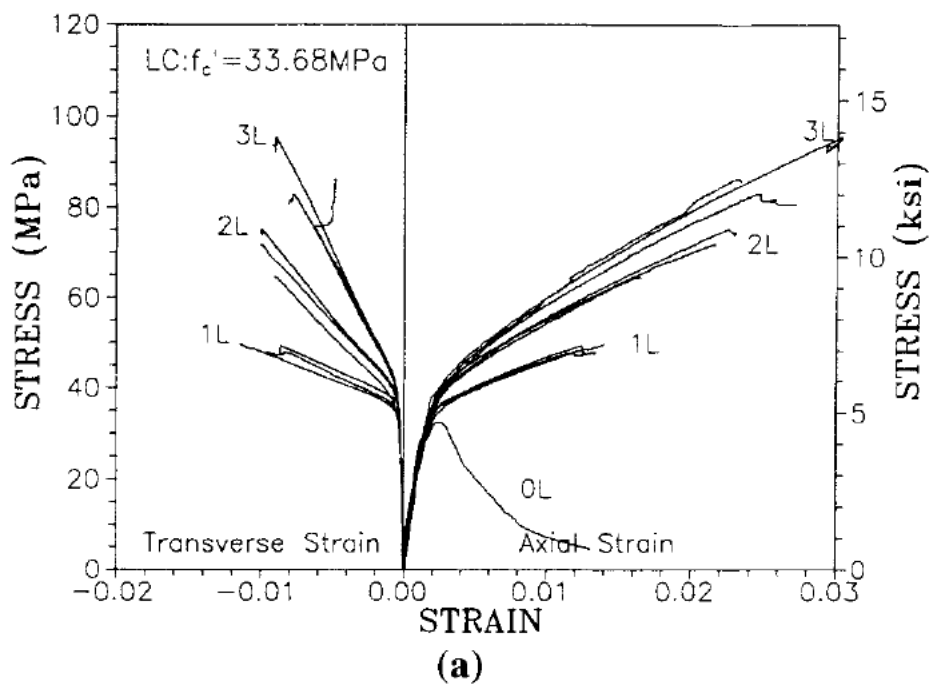
Beton wysokowytrzymałościowy (BWW) jest coraz powszechniej stosowany w budownictwie z uwagi na bardzo dobre parametry wytrzymałościowe, wysoką odporność na czynniki atmosferyczne oraz ścieranie [62]. Dodatkowa obecność zbrojenia rozproszonego w jego strukturze może wpływać na redukcję zarysowań oraz polepszenie właściwości wytrzymałościowych [63, 64], co jest związane z quasi-plastycznością kompozytu [65]. W ostatnim czasie możemy zaobserwować znaczący wzrost stosowania materiałów kompozytowych we wzmacnianiu elementów betonowych, co jest spowodowane wieloma zaletami tych materiałów [66, 67]. Do niedawna jedną z najpowszechniejszych metod wzmacniania kolumn betonowych było stosowanie płaszczy stalowych wokół nich. Jednakże głównymi wadami tego rozwiązania są niska odporność stali na korozję, wysoki koszt wykonania oraz duży ciężar finalny konstrukcji [68]. W rezultacie stosowanie technologii FRP do wzmacniania konstrukcji jest alternatywnym i zarazem bardzo efektywnym rozwiązaniem.

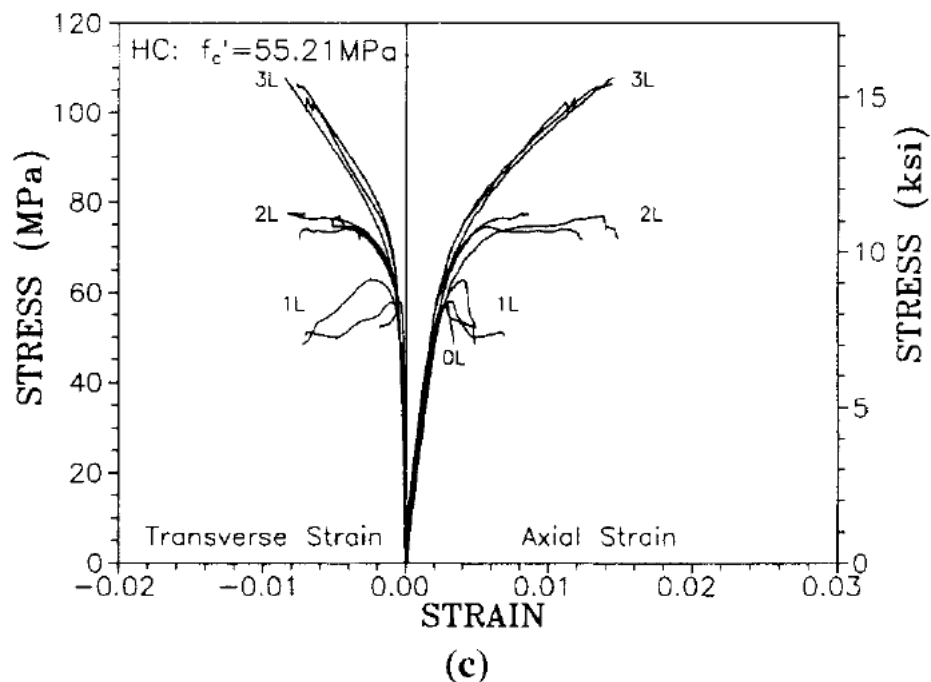
Rezultaty takie jak efektywność wzmocnienia, którą możemy uzyskać zależą od wielu parametrów, np.: rodzaj kompozytu, ilość warstw wzmocnienia, charakter powierzchni kontaktu, rodzaj lepiszcza, warunki dojrzewania, rodzaj betonu. W tym miejscu warto powołać się na badania ukazujące różnice w charakterze pracy elementów betonowych osiowo ściskanych dla betonu zwykłego i wysokowytrzymałościowego, oraz fibrobetonu zwykłego i fibrobetonu wysokowytrzymałościowego [69,70].

W literaturze światowej tematyka ta została dość dobrze przeanalizowana, głównie z rozpoznaniem betonu zwykłego i wysokowytrzymałościowego, bez udziału mikrozbrojenia, lecz ze zbrojeniem tradycyjnym w postaci prętów [71]. Badania te dowiodły, iż stopień wzmocnienia oraz orientacja włókien w tego typu konstrukcjach zespolonych ma istotne znaczenie dla efektywności ściskania i zginania słupów.

Bardzo interesujące badania przedstawiono w pracy [72]. Pokazano w nich wpływ wytrzymałości samego betonu oraz ilości warstw zbrojenia CFRP na efektywność wzmocnienia elementów zespolonych (rysunek 14). Można zauważyć, iż zachowanie się

konstrukcji (jej charakterystyka naprężenie-odkształcenie) ma inny przebieg w przypadku wzmocnienia betonu o niskiej wytrzymałości (a), niż w przypadku betonu o wyższej wytrzymałości (b, c). W przypadku betonu niższej klasy wytrzymałości, możemy zauważyć charakterystykę ze wzmocnieniem przy zwiększeniu zakresu pracy elementów. W przypadku betonu o wyższej wytrzymałości praca elementu nie wykazuje jednoznacznych znamion wzmocnienia. W omawianej pracy odnotowano również wzrost wytrzymałości elementów zespolonych w zależności od ilości warstw wzmocnienia.





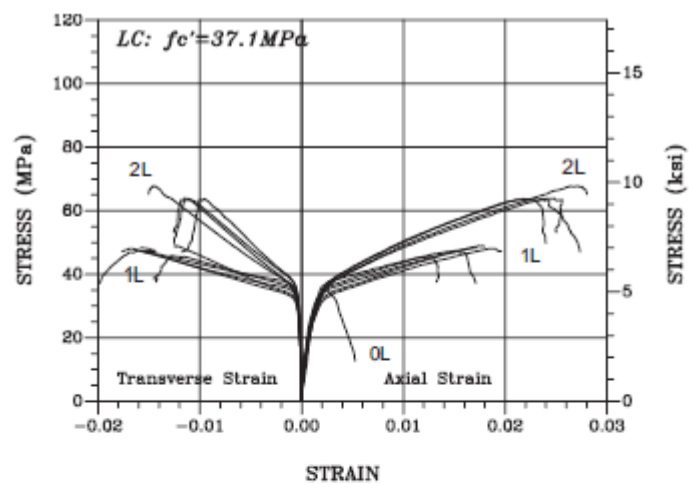
Oznaczenia: LC – Lower Concrete; MC – Medium Concrete; HC – High Concrete; f'_c – wytrzymałość betonu na ściskanie

Rysunek 14. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla betonów wzmocnionych kompozytem: beton o niskiej wytrzymałości na ściskanie (a); beton o średniej wytrzymałości na ściskanie (b); beton o wyższej wytrzymałości na ściskanie (c). Źródło: [72].

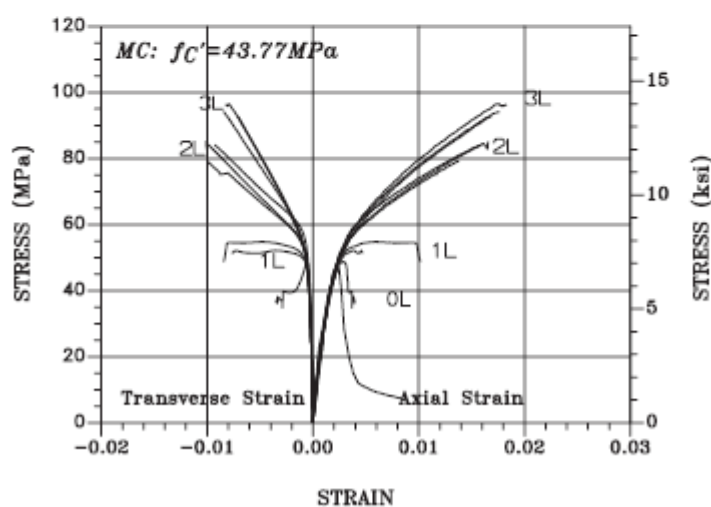
Okazuje się, że charakterystyka naprężenie-odkształcenie w przypadku betonu zwykłego wzmocnionego włóknami węglowymi może być podzielona na dwa odrębne regiony pracy pod obciążeniem, co jest zgodne z literaturą [73,74]. Pierwszy z nich to zakres sprężysty, związany z przenoszeniem naprężeń przez kolumnę betonową, drugi to obszar wzmocnienia, gdzie naprężenia są przenoszone przez CFRP, które zapewnia kolumnie poplastycznieniową sztywność dla przenoszenia obciążeń. Wyniki pokazują, że wzmocnienie betonu kompozytami FRP może znacznie zwiększyć jego wytrzymałość, ciągliwość i zdolność pochłaniania energii [75,76].

Stosowanie mikrobrojenia stalowego może powodować brak wystąpienia natychmiastowego zniszczenia kolumn po przekroczeniu maksymalnych ściskających naprężeń normalnych, w porównaniu do betonu niezbrojonego z CFRP. Stosowanie włókien stalowych w kolumnach z fibrobetonu wysokowytrzymałościowego, wzmocnianych tkaniną CFRP powoduje, że elementy te pracują w zakresie sprężysto-plastycznym.

Bardzo ciekawe badania nad efektywnością wzmocnienia i zachowaniem się elementów zespolonych przedstawiono w pracy [77]. Artykuł ten podsumowuje eksperymentalne badania zróżnicowanych programów badawczych, których celem jest analiza zachowania się konstrukcji z uwzględnieniem charakterystyki naprężenie - odkształcenie dla betonów wzmocnionych różnego rodzaju kompozytami FRP. Rozważono w nich ponad 200 elementów betonowych wzmocnionych 9 rodzajami FRP, które zostały przebadane w teście jednoosiowego ściskania. Badania obejmowały beton niewzmocniony oraz wzmocniony różnymi kombinacjami kompozytów. Rezultaty pokazują, iż wytrzymałość elementów konstrukcyjnych jest związana z liczbą warstw wzmocnienia – im jest ich więcej, tym uzyskuje się większą nośność. Dla efektywności wzmocnienia istotny jest również rodzaj włókien. Wyniki pokazują, że stosując włókna węglowe można uzyskać największy wzrost efektywności wzmocnienia elementów konstrukcyjnych. Co więcej, zaobserwowano nieco inną charakterystykę naprężenie – odkształcenie w przypadku stosowania włókien szklanych i bazaltowych. Stosując włókna szklane możliwe jest zwiększenie zakresu pracy konstrukcji, lecz jej nośność będzie mniejsza niż w przypadku użycia włókien węglowych. Ponadto, wzmacniając elementy przy użyciu CFRP, otrzymuje się większą sztywność konstrukcji, co ma przełożenie na nagłe zniszczenie elementów po przekroczeniu granicy ich wytrzymałości. Następuje wtedy skokowa utrata sztywności. Zbrojenie GFRP powoduje większe uplastycznienie elementu zespolonego. Po przekroczeniu granicy wytrzymałości następuje krucho-plastyczne zachowanie się elementów (rysunek 15).



(a)

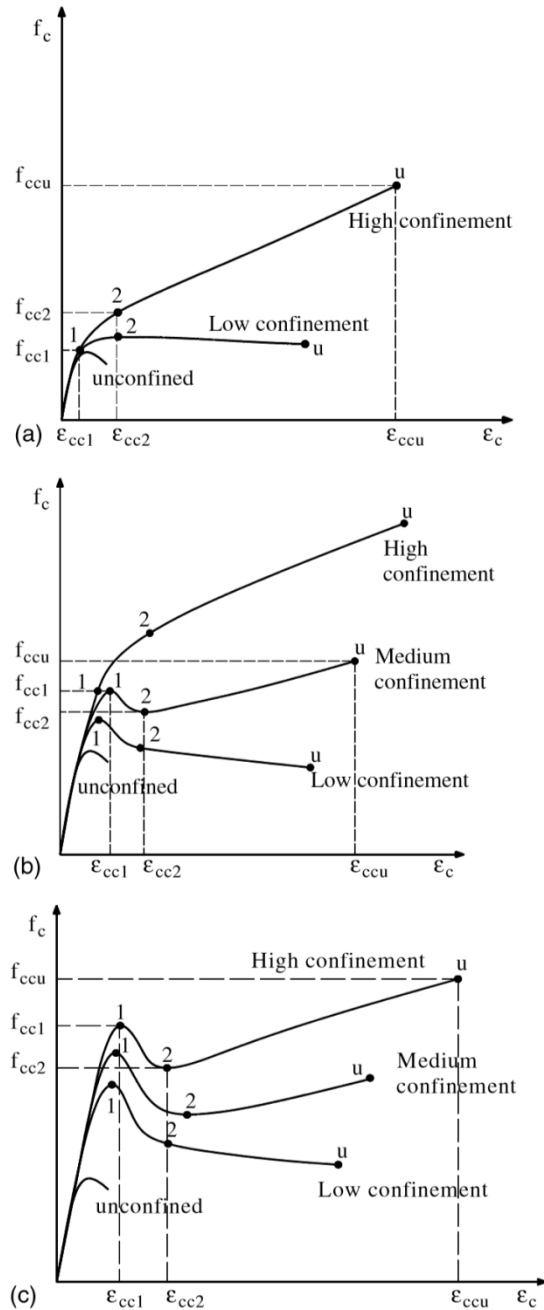


(b)

Rysunek 15. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla betonów wzmocnianych włóknami szklanymi GFRP (a), włóknami węglowymi CFRP (b). Źródło: [76].

Na szczególną uwagę zasługuje praca Oliveira [78], w której przeprowadził eksperymentalne badania betonu o normalnej, wysokiej i ultra wysokiej wytrzymałości, skrępowanego laminatami FRP z włókien węglowych i szklanych. Poddał on analizie 102 próbki cylindryczne o smukłości równej 2 wykonane z betonów o zróżnicowanej wytrzymałości: beton zwykły zawierający mikrokrzemionkę, beton zwykły bez mikrokrzemionki, beton wysokowytrzymałościowy z mikrokrzemionką, beton wysokowytrzymałościowy bez mikrokrzemionki, beton ultra wysokowytrzymałościowy bez i z utwardzaniem termicznym. Wytrzymałość średnia tych betonów wynosiła odpowiednio 38 MPa, 56,7 MPa, 112 MPa, 149 MPa, 161 MPa oraz 204 MPa. Rozpatrzone zostały trzy poziomy wzmocnienia próbek; przy użyciu 1, 2 i 4 warstw FRP. Typową charakterystykę

naprężenie–odkształcenie dla wzmocnionych betonów: zwykłego, wysokowytrzymałościowego oraz ultra wysokowytrzymałościowego przedstawiono odpowiednio na rysunku 16 a – c.



Rysunek 16. Typowe krzywe naprężenie-odkształcenie dla betonu wzmocnionego FRP: beton zwykły (a), beton wysokowytrzymałościowy (b), beton ultra wysokowytrzymałościowy (c). Źródło: [78].

Analizując uogólnione wykresy można stwierdzić, że efektywność wzmocnienia spada wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie betonu. Należy zauważyć, że w badanych

próbkach nie było wewnętrznego wzmocnienia stalowego betonu. Jednak autorzy stwierdzili, że „interakcja między wewnętrznym wzmocnieniem stalowym a zewnętrznym wzmocnieniem FRP jest ważnym tematem, który należy uwzględnić w przyszłych badaniach”. To stanowiło dodatkową motywację dla autora pracy doktorskiej by przeanalizować beton zawierający mikrobrojenie stalowe, który nie został w pełni poznany jako materiał przeznaczony do wzmacniania przy użyciu materiałów kompozytowych.

Ostatnimi laty coraz częściej mamy do czynienia ze wzmacnianiem obiektów zabytkowych; obiektów już istniejących (rysunek 17). Materiał z którego były wykonywane obiekty zabytkowe, nie miał zwykle wysokiej wytrzymałości mechanicznej. Można ją przyrównać do dzisiejszej klasy betonu C16/20, co sprawia, że efektywność wzmocnienia w tego typu obiektach jest bardzo wysoka, i wynosi nawet kilkaset procent przy jednej warstwie wzmocnienia FRP.



Rysunek 17. Wzmocnienie istniejącej kolumny betonowej.

Głównym celem stosowania włókien węglowych, oprócz wzmocnienia konstrukcji jest zwiększenie jej stateczności oraz ograniczenie odkształceń poprzecznych betonu [79,80]. Dzięki temu pozwalamy konstrukcji na dłuższą pracę, co wpływa korzystnie na środowisko poprzez mniejszą konsumpcję energii.

Wielokrotnie udowodniono, że zewnętrzne wzmocnienie CFRP zwiększa efektywność modernizacji i/lub naprawy elementów betonowych. Naukowcy wykazali, że zastosowanie

CFRP w przypadku betonów specjalnych, takich jak fibrobeton zwykły może poprawić nośność elementów i zmienić charakterystykę pracy konstrukcji. Lim i Ozbakkaloglu wykazali, że energia zniszczenia CFRP zależy od wytrzymałości betonu [5]. Jiang i in. [82], w celu określenia zachowania próbek wzmocnionych FRP wykonanych z betonu o bardzo dużej wytrzymałości, przeanalizowali wzmocnienie ich włóknem szklanym. W badaniach tych zaobserwowano znaczne wzmocnienie próbek. Ponadto, w części z nich zauważono delaminację GFRP w obszarze zakładu. W ostatnich latach często określano wytrzymałość oraz odkształcalność betonu o wysokiej wytrzymałości wzmocnionego laminatami CFRP dla elementów o kołowym i kwadratowym przekroju poprzecznym. W efekcie odnotowano zwiększoną skuteczność wzmocnienia zbrojeniem zewnętrznym typu FRP w próbkach o przekroju kołowym [73]. Kamiński i Trapko zaproponowali nowe rozwiązanie wzmocniające dla strukturalnych elementów CFRP w kolumnach żelbetowych, w których CFRP zlokalizowano w wybranych obszarach [83]. Wykazano w nich, że w przypadku elementów wzmocnianych sekcjami podłużnymi CFRP, zniszczenie spowodowane było uszkodzeniem połączenia kompozytu z klejem. Wpływ włókien szklanych E-glass i CFRP na zachowanie betonu o pięciu różnych wytrzymałościach (od 24 do 170 MPa) został przeanalizowany przez Berthet i in. [66]. Dowiedziono w nich, że ostateczna wytrzymałość i odkształcalność betonu skrupowanego kompozytami zależy od naprężeń w zbrojeniu FRP w momencie zniszczenia oraz wytrzymałości rdzenia betonowego. Park i in. [84] zastosowali wąskie paski CFRP w wielu kombinacjach do wzmocnienia betonowych kolumn o wytrzymałości na ściskanie równej 20,72 i 26,08 MPa i uzyskali również istotny poziom wzmocnienia.

Ogólnie rzecz ujmując obecna literatura zawiera bardzo wiele badań, które dotyczą wzmocnienia betonu metodą CFRP w różnych typach próbek, takich jak klasyczne kolumny [85], elementy z materiałem CFRP w zagłębieniach powierzchni betonowych [86] i betonowe kolumny pod obciążeniem mimośrodowym [87]. Rozwój technik CFRP można również zaobserwować w przypadku struktur belkowych. Zaki i in. [88] zaproponował kotwy z włókna CFRP jako wzmocnienie belek w kształcie litery T. Zhang i in. [89] zaproponował zastosowanie strzemion z CFRP do zbrojenia belek betonowych wytwarzanych ze zbrojonego betonu wykonanego na bazie kruszywa z recyklingu. W publikacjach naukowych można znaleźć wiele informacji na temat skuteczności wzmocniania elementów betonowych za pomocą kompozytów FRP ze względu na wytrzymałość betonu i rodzaj zbrojenia. W tabeli 6 przedstawiono wartościowe zdaniem autora pracy publikacje o istotnym znaczeniu

naukowym. Wszystkie zestawione eksperymenty przeprowadzono przy użyciu betonowych próbek walcowych.

Tabela 6. Wpływ kompozytów FRP na zachowanie się betonu.

Wytrzymałość na ściskanie R_c jako wartość referencyjna [MPa]	Rodzaj włókien	Rodzaj matrycy	Liczba warstw zbrojenia	Wytrzymałość na ściskanie wzmocnionych elementów w odniesieniu do wartości referencyjnej [%]	Pozycja	Beton	
31,74	CFRP	ER	1	+128	[46]	beton zwykły	
64,91				+33	[70]	beton wysokowytrzymałościowy	
81,04		CM		+4	[90]	samozagęszczalny fibrobeton wysokowytrzymałościowy	
40,32				+99	[69]	fibrobeton zwykły	
11,32	GFRP		1	+125	[91]	beton o niskiej wytrzymałości	
			2	+225			
55,8	BFRP		2	+0.8	[92]		
			4	+38		beton zwykły	
			6	+69			
43,4	BFRP		1	+2	[93]		
			3	+3		towarowy beton zwykły	
	CFRP		1	+20			
			3	+97			
44	AFRP		1	+242	[94]	beton zwykły	
33,7	CFRP		2	+33	[95]	zbrojony beton zwykły	
			4	+71			
69,5	AFRP	ER	1	+49	[96]		
63,7				2	+109		
69,5				3	+116		
23,8				4	+180		
23,9				1	+99		beton z kruszywem z recyklingu opon
23,8				2	+196		
23,8				3	+296		
25,4				4	+335		
7,1	CFRP		1	+251			
7,2				2	+450		
				3	+719		
7,8				4	+812		
136	GFRP		1	+29	[97]	fibrobeton ultrawysokowartościowy	
			5	+55			
				+35			
			9	+45			
21,18	CFRP		1	+80	[98]	beton lekki zwykły	
				3	+155		
38,83				1	+46		
			3	+120			
15,45	CFRP		1	+236			
				3	+407		

Uwagi: ER- żywica epoksydowa, CM- matryca cementowa

6.4. Konstrukcje zespolone stalowo-betonowo-kompozytowe

Wypełnione betonem rury stalowe - *Concrete-Filled Steel Tube* (CFT) zostały w ostatnich latach intensywnie przebadane i są obecnie coraz częściej stosowane w inżynierii lądowej. Kolumny CFT łączą w sobie zalety stali i betonu. W szczególnych warunkach elementy te są jednak podatne na lokalne wyboczenie, ponadto pojawiają się quasisstałe naprężenia po uplastycznieniu rur stalowych [99,100]. Konstrukcje kompozytowe można uznać za znacznie bardziej efektywne [101]. Dzięki ostatnim postępom w technologii materiałów kompozytowych CFRP zapoczątkowało nowy rozdział w dziedzinie inżynierii lądowej, w zakresie naprawy i modernizacji istniejących elementów konstrukcyjnych oraz nowatorskiego projektowania konstrukcji; nierzadko powiązanego bezpośrednio z architektoniczną wizją lekkości i smukłości konstrukcji. Wypełnione betonem kolumny zespolone stalowo-betonowe wzmocnione laminatami CFRP są alternatywą dla obecnie panujących trendów w infrastrukturze; w szczególności w budownictwie inżynieryjnym, ze względu na ich charakterystykę oraz odporność na korozję. Jak wielokrotnie udowodniono, wypełnione betonem rury stalowe wzmocnione FRP wykazują doskonałą wydajność podczas prób ściskania [80,81,102]. Fam i in. [103] oraz Zhu i in. [104] opisał zachowanie się wypełnionych betonem rur stalowych wzmocnianych włóknami węglowymi w teście osiowego ściskania i obciążenia bocznego. Większość wad elementów typu CFT wzmocnionych materiałami kompozytowymi obejmuje niską i niezadowalającą sztywność, która jest niezbędna do prawidłowego rozłożenia obciążenia na konstrukcję. Udowodniono, że łączenie materiałów o różnych właściwościach może dać korzystne wyniki. Zachowanie przy ściskaniu elementów betonowych wzmocnionych kompozytami o różnych parametrach było badane wiele razy, a modele analityczne i numeryczne zostały rozszerzone w celu oceny zachowania kolumn kompozytowych dla różnych współczynników smukłości [105–107]. Zazwyczaj wypełnione betonem kolumny zespolone CFT wykonywano z betonu o normalnej wytrzymałości. Dotychczas wpływ wysokiej wytrzymałości rdzenia betonowego w osłonie rur stalowych wzmocnionych dodatkowo laminatami CFRP był rzadko rozpatrywany przez naukowców.

W 2005 r. Xiao i in. zaproponował CFRP jako materiał uzupełniający do kolumn CFT w celu kontroli lokalnego wyboczenia stalowej rury i zapewnienia quasiplastycznego zakresu pracy CFT [108]. Uzyskane wyniki testu osiowego ściskania wykazały, że dodatkowe wzmocnienie CFRP zapewnia doskonałą wydajność dynamiczną. Kolumny CFT wzmocnione CFRP były wielokrotnie analizowane [109–111]. Naukowcy udowodnili, że rodzaj,

sztywność i liczba warstw CFRP oraz grubość ścianki stalowej rury mają znaczący wpływ na nośność i plastyczność kolumn CFT. Sundarraja i Prabhu zbadali kolumny CFT wzmocnione CFRP o przekroju kwadratowym. Te eksperymentalne wyniki pokazały, że zastosowanie laminatów kompozytowych podnosi efektywność wzmocnienia badanych próbek poprzez wzrost ciśnienia obwodowego, które krępując elementy ogranicza przemieszczenia poprzeczne. W porównaniu do kolumn CFT, kolumny wzmocnione CFRP mają wyższą nośność i odkształcalność [112,113]. Stosując metody analityczne, zaproponowano wiele modeli teoretycznych opisujących zachowanie się kolumn CFCT [114-116], co pozwala na oszacowanie charakterystyki naprężenie – odkształcenie w zależności od rodzaju i liczby warstw wzmocnienia FRP oraz grubości ścianki rury stalowej.

7. Badania wstępne

7.1. Fibrobeton zwykły wzmocniony CFRP

7.1.1. Materiał i próbki

W pierwszym etapie badań wykonano dwanaście kolumn betonowych o przekroju kołowym, o wysokości 400 mm i średnicy 150 mm, które przebadano w teście jednoosiowego ściskania. Wszystkie próbki zostały wyprodukowane na bazie betonu zwykłego – połowa z nich zawierała stalowe zbrojenie rozproszone w ilości 1,5% (objętościowo). W tabeli 7 przedstawiono szczegółowy skład betonu. Do wykonania mieszanki betonowej zastosowano cement typu II – CEM II / B-V 32.5R (Dyckerhoff) o stosunku cementowo-wodnym 0,5. Jako kruszywo zastosowano diabaz (2-8 mm) i piasek (0-2 mm). W programie eksperymentu zastosowano haczykowane włókno stalowe o długości 50 mm i średnicy 1 mm, o minimalnej wytrzymałości na rozciąganie większej niż 1050 MPa. Mieszankę betonową wykonano za pomocą betoniarki, w której wszystkie składniki zostały zmieszane. Najpierw kruszywo mieszano przez 60 sekund, po czym dodano zbrojenie i mieszano kolejne 60 sekund. Następnie dodano cement i wodę z superplastyfikatorem Sikament FM 6 i mieszano przez 300 sekund. Czas mieszania był stosunkowo długi ze względu na zawartość domieszki. W przypadku betonów zawierających domieszki, efekt działania plastyfikatora można zaobserwować po 3 do 5 minutach mieszania [117]. Beton był dwukrotnie zagęszczany podczas wypełniania form – po wypełnieniu połowy formy i ponownie po betonowaniu całej próbki, przy użyciu ręcznego wibratora.

Wszystkie dwanaście próbek podzielono na cztery podgrupy: kolumny z betonu zwykłego – *normal concrete columns* (NCC); kolumny z fibrobetonu zwykłego – *fibre-reinforced concrete columns* (FRCC); kolumny z betonu zwykłego wzmocnione jedną warstwą włókien węglowych – *normal concrete columns reinforced with CFRP* (NCC-CFRP) oraz kolumny z fibrobetonu zwykłego wzmocnione jedną warstwą włókien węglowych – *fibre-reinforced concrete columns reinforced with CFRP* (FRCC-CFRP). W rezultacie po trzy próbki z betonu zwykłego i fibrobetonu zostały potraktowane jako próbki referencyjne, a pozostałe 6 kolumn wzmocnionych włóknami węglowymi przetestowano w celu oceny wpływu włókien CFRP na efektywność wzmocnienia kolumn betonowych.

Tabela 7. Skład mieszanek betonowych.

Beton	Cement [kg/m ³]	Piasek [kg/m ³]	Diabaz [kg/m ³]	Woda [kg/m ³]	W/C [-]	Plastyfikator [kg/m ³]	Włókna stalowe [% objętości]
Beton zwykły	366	942	942	183	0,5	2	-
Fibrobeton zwykły	366	942	942	183	0,5	2	1,5

7.1.2. Przygotowanie próbek

Betonowe próbki dojrzewały w kąpeli wodnej przez dwadzieścia osiem dni, po czym suszono je przez siedem dni w temperaturze $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Część z nich została następnie wzmocniona włóknami węglowymi Sikawrap301c (Tabela 8) przy zastosowaniu żywicy epoksydowej Sikadur330 (Tabela 9). Właściwości żywicy epoksydowej są deklarowanymi przez producenta, uzyskanymi po 7 dniach dojrzewania żywicy w temperaturze $+23^{\circ}\text{C}$.

Aby uzyskać odpowiednią siłę wiązania między zbrojeniem CFRP a powierzchnią betonową, powierzchnię betonową poddano szlifowaniu, oczyszczono i dokładnie wysuszono. Poziom wilgoci na powierzchni betonu wynosił $5\% \pm 1\%$, co jest wartością zalecaną przez producenta żywic, z uwagi na prawidłowy przebieg procesu laminacji. Każdą z sześciu próbek owinięto jedną warstwą włókien węglowych w sposób ciągły. Proces utwardzania żywicy trwał kolejne siedem dni w temperaturze $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, co zapewniło pełne utwardzenie żywicy epoksydowej. Aby uzyskać niezawodne połączenie, we wszystkich wzmocnionych próbkach zapewniono 150 mm zakład w kierunku ułożenia włókien. Wiek próbek w momencie badania wynosił sześć tygodni.

Tabela 8. Wybrane właściwości włókien węglowych Sikawrap 301c [118].

Parametr i jednoska	f_{frp} [MPa]	E_f [GPa]	δ_{frp} [%]	s_{frp} [g/m ²]	t_{frp} [mm]
Wartość	4900	230	1,7	304	0,167

Tabela 9. Wybrane właściwości żywicy epoksydowej Sikadur 330 [119].

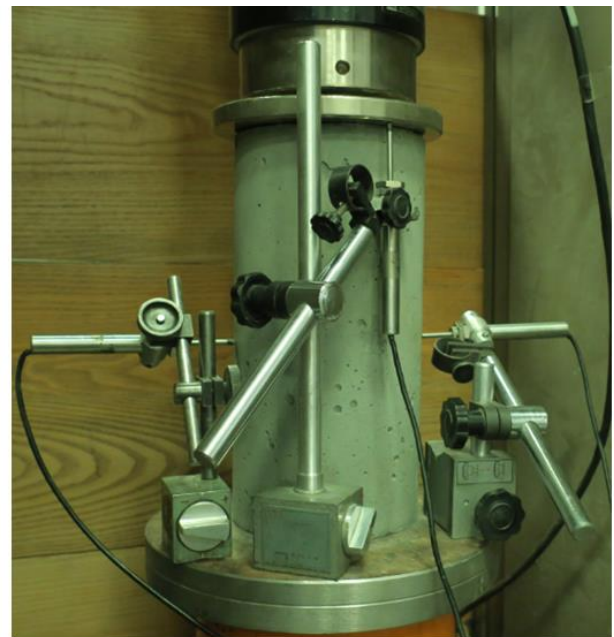
Parametr i jednostka	f_{er} [MPa]	E_{er1} [GPa]	E_{er2} [GPa]	δ_{er} [%]	ρ_{er} [kg/dm ³]
Wartość	30	3,8	4,5	0,9	1,3±0,1

7.1.3. Oprzyrządowanie i badania

Testy jednoosiowego ściskania betonowych kolumn wykonano przy użyciu maszyny serwosterowalnej MTS o maksymalnej sile nacisku 4600 kN. Badania przeprowadzono w pokojowej temperaturze wynoszącej $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ i wilgotności $60\% \pm 5\%$, przy stałej prędkości odkształcenia kolumn betonowych we wszystkich eksperymentach wynoszącej około $5 \times 10^{-5} [\text{s}^{-1}]$. Pomiar siły osiowej przeprowadzono za pomocą przetwornika siły, natomiast przemieszczenia podłużne i poprzeczne zmierzono za pomocą czujników LVDT. Przeszacowania poprzeczne i osiowe wyznaczono poprzez pomiar zmian wymiarów całych kolumn, w których czujniki LVDT zamontowano bezpośrednio między płytami ściskającymi (Rysunek 18).



a)



b)

Rysunek 18. System pomiarowy MTS wykorzystany do przeprowadzenia testów jednoosiowego ściskania (a) i schemat przedstawiający pomiar przemieszczeń osiowych i poprzecznych kolumn betonowych (b).

7.1.4. Wyniki przeprowadzonych badań

Wyniki eksperymentu podsumowano w tabeli 10.

Tabela 10. Podsumowanie wyników badań.

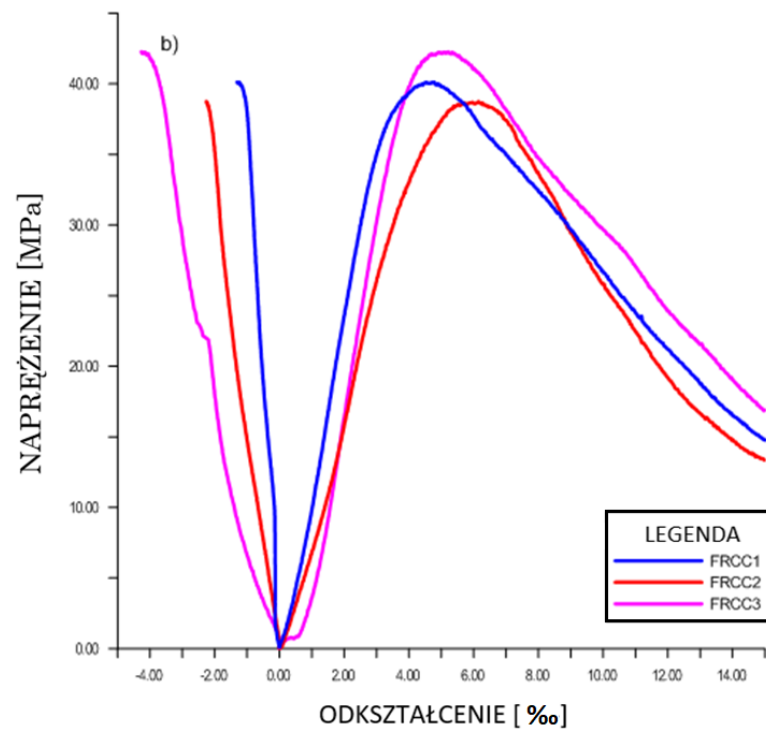
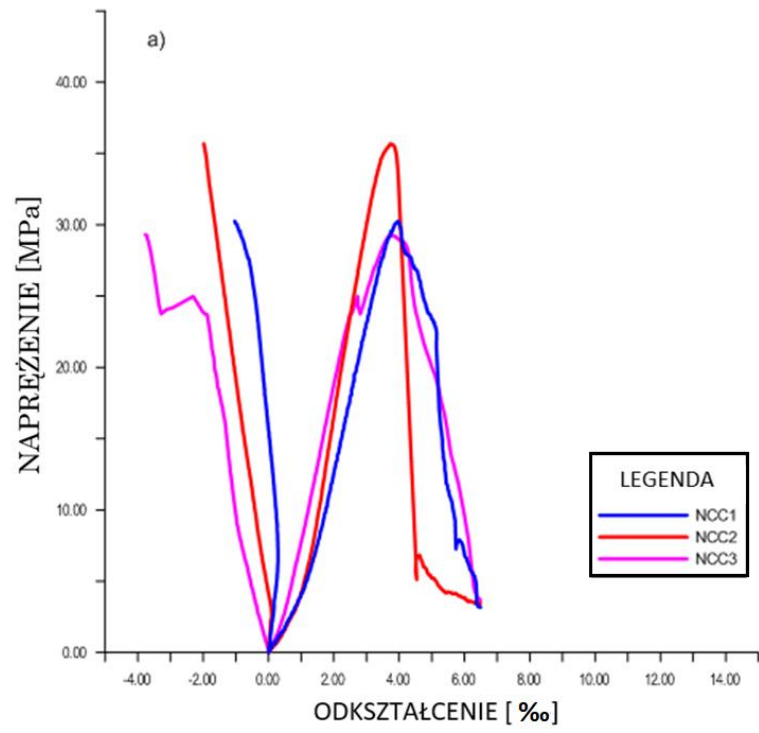
Próbka	Maksymalne obciążenie F_{max} [kN]	Wytrzymałość na ściskanie R_c [MPa]	Odkształcenie osiowe w momencie zniszczenia kolumn ε_1 [‰]	Odkształcenie osiowe w momencie zniszczenia betonu ε_2 [‰]	Odkształcenie poprzeczne w momencie zniszczenia betonu ε_p [‰]	Moduł sprężystości E_1 [GPa]	Moduł wzmocnienia E_2 [GPa]
Beton zwykły							
NCC1	520	30,25	3,95	3,95	1,04	8,52	-
NCC2	622	35,69	3,73	3,73	1,98	12,20	-
NCC3	517	29,28	3,78	3,78	3,77	10,12	-
Fibrobeton zwykły							
FRCC1	690	40,13	4,79	4,79	1,31	12,46	-
FRCC2	648	38,6	6,15	6,15	2,26	8,22	-
FRCC3	727	42,24	5,22	5,22	4,27	13,68	-
Beton zwykły wzmocniony CFRP							
NCC-CFRP1	1290	72,99	25,69	5,44	2,75	12,72	1,36
NCC-CFRP2	1255	71,97	25,21	6,34	4,11	10,30	1,36
NCC-CFRP3	1236	71,87	22,86	5,01	3,57	14,40	1,40
Fibrobeton zwykły wzmocniony CFRP							
FRCC-CFRP1	1386	78,45	23,78	6,67	3,30	12,47	1,60
FRCC-CFRP2	1416	81,20	24,28	6,39	2,76	11,00	1,64
FRCC-CFRP3	1404	80,53	25,30	6,43	1,99	13,16	1,56
Podsumowanie							
Grupa próbek	Średnia wytrzymałość na ściskanie \bar{R}_c [MPa]	Odchylenie standardowe wytrzymałości $\bar{\sigma}$ [MPa]	Średnie odkształcenie osiowe w momencie zniszczenia kolumn $\bar{\varepsilon}_1$ [‰]	Średnie odkształcenie osiowe w momencie zniszczenia betonu $\bar{\varepsilon}_2$ [‰]	Średnie odkształcenie poprzeczne w momencie zniszczenia betonu $\bar{\varepsilon}_p$ [‰]	Średnia wartość modułu sprężystości \bar{E}_1 [GPa]	Średnia wartość modułu wzmocnienia \bar{E}_2 [GPa]
NCC	31,74	2,63	3,82	3,82	2,26	10,28	-
FRCC	40,32	1,28	5,39	5,39	2,61	11,45	-
NCC-CFRP	72,28	0,48	24,59	5,60	3,48	12,47	1,37
FRCC-CFRP	80,06	1,07	24,45	6,50	2,68	12,21	1,60

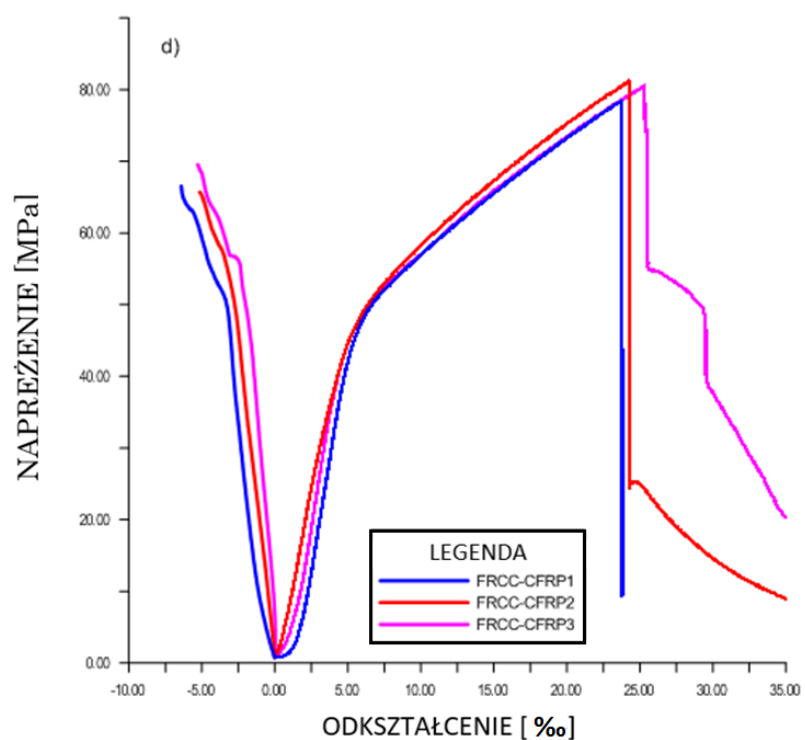
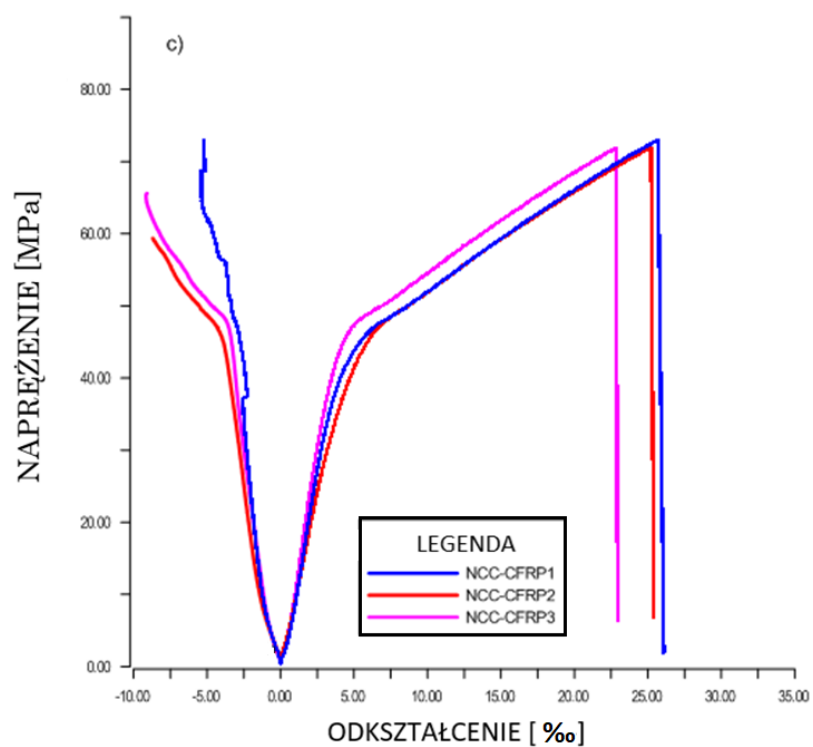
Na rysunkach 19 a – d pokazano naprężenia osiowe w funkcji odkształceń osiowych i poprzecznych dla próbek NCC (a), FRCC (b), NCC-CFRP (c), FRCC-CFRP (d). Nominalne

naprężenia osiowe zostały obliczone poprzez podzielenie obciążeń osiowych przez całkowite pola przekroju kolumn, a znikoma grubość CFRP została w tych obliczeniach pominięta. Moduł sprężystości E_1 i E_2 oznaczono bez cykli obciążenia wstępnego, dlatego wyniki są jakościowe. Moduł sprężystości E_1 i E_2 wyznaczono w zakresie naprężeń odpowiednio od 15% do 33% [120] i od 75% do 95% wartości maksymalnego naprężenia. Naprężenia osiowe i poprzeczne podczas pęknięcia betonu w przypadku kolumn wzmocnionych CFRP określono w punkcie przegięcia krzywej naprężenie-odkształcenie.

Średnia wytrzymałość na ściskanie w przypadku NCC wynosi 31,74 MPa. Średnie podłużne i poprzeczne odkształcenia NCC w chwili zniszczenia wynoszą odpowiednio 3,82‰ i 2,26‰. Średnia wytrzymałość na ściskanie dla FRCC wynosi 40,32 MPa. Średnie odkształcenia wzdłużne i poprzeczne w chwili zniszczenia FRCC wynoszą odpowiednio 5,39‰ i 2,61‰. Zniszczenie jest mniej kruche w porównaniu z NCC. Średnia wytrzymałość na ściskanie NCC-CFRP wynosi 72,27 MPa i jest o 128% wyższa niż NCC. Średnia wartość odkształceń wzdłużnych przy uszkodzeniu jest ponad sześciokrotnie większa w odniesieniu do NCC. Zastosowanie CFRP prowadzi do wystąpienia w betonie trójosiowego stanu naprężenia, który uzyskuje wyższą wytrzymałość. Po przekroczeniu granicy wytrzymałości betonu zbrojenie CFRP zaczyna aktywnie pracować, aż do czasu zniszczenia, które ma charakter eksplozyjny, pomimo sposobu przeprowadzenia tego testu (sterowanie przyrostem przemieszczenia próbki), który umożliwia analizę kolumn po zniszczeniu. Kolumny NCC-CFRP są traktowane jako konstrukcja zespolona pracująca w zakresie sprężysto-plastycznym ze wzmocnieniem. Średni moduł sprężystości E_1 jest o 21% wyższy niż dla NCC i ponad dziewięć razy większy niż moduł sprężystości E_2 .

Zachowanie FRCC-CFRP do czasu jego zniszczenia jest podobne do próbek NCC-CFRP. Średnia wytrzymałość FRCC-CFRP na ściskanie jest o 11% wyższa niż w przypadku NCC-CFRP i prawie o 100% wyższa niż w przypadku niewzmocnionego zewnętrznie FRCC. Średnie wartości odkształceń wzdłużnych przy zerwaniu są takie same, a przyrost odkształceń poprzecznych jest podobny w obu przypadkach. Proces niszczenia ma również charakter wybuchowy, ale w przypadku CFRP-FRCC nie obserwujemy natychmiastowo wartości wytrzymałości resztkowej w każdym przypadku, ze względu na obecność włókien stalowych w strukturze betonu. Średni moduł sprężystości E_1 jest o 6,6% wyższy niż FRCC i prawie osiem razy większy niż moduł sprężystości E_2 .





Rysunek 19. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie osiowe dla próbek: NCC (a), FRCC (b), NCC-CFRP (c), FRCC-CFRP (d).

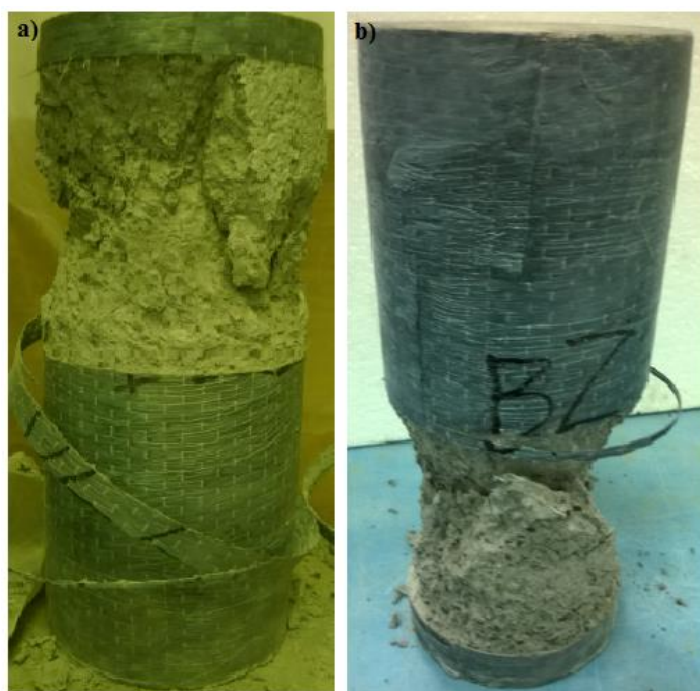
7.1.5. Przebieg zniszczenia

Przebieg zniszczenia w przypadku betonu zwykłego i fibrobetonu zwykłego można uznać za prawidłowy. Na granicy pomiędzy jednoosiowym, a trójosiowym stanem naprężenia

w próbkach można zaobserwować wytworzenie się stożków, co świadczy o poprawnym wykonaniu betonu oraz prawidłowym przygotowaniu próbek do badań niszczących (rysunek 20). W przypadku betonów wzmocnionych CFRP, przewidywanie dokładnej lokalizacji pęknięcia włókien jest niemożliwe. Gwałtowne niszczenie kolumn wzmocnionych CFRP zachodzi w najsłabszym miejscu próbek, z uwolnieniem ogromnych ilości energii (rysunki 21 i 22).



Rysunek 20. Zniszczenie kolumn z betonu zwykłego (a) i fibrobetonu zwykłego (b).



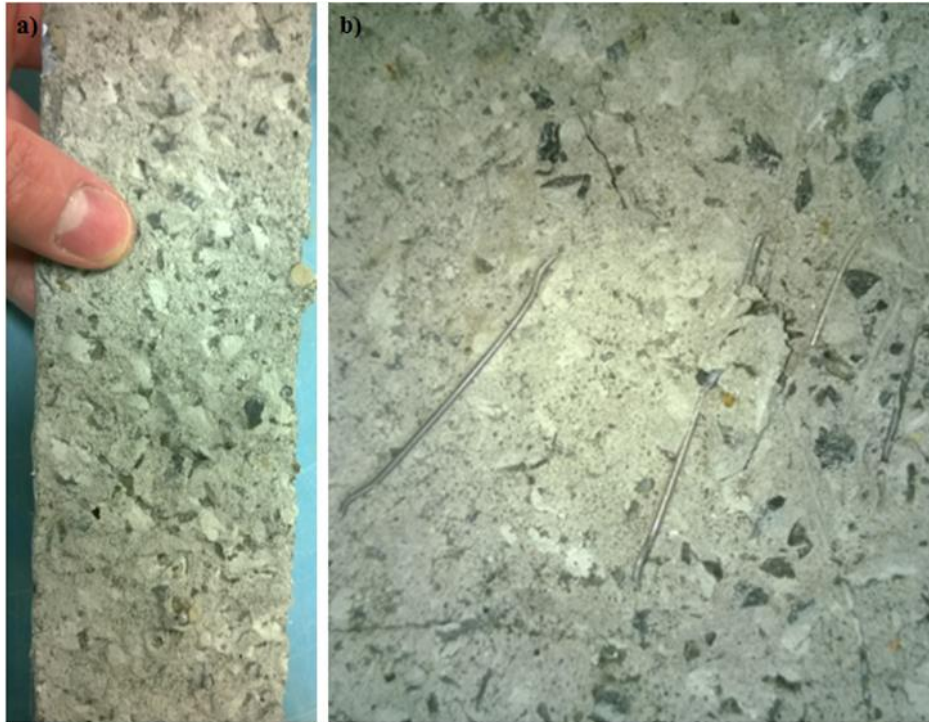
Rysunek 21. Zniszczenie kolumn z betonu zwykłego wzmocnionych CFRP.



Rysunek 22. Zniszczenie kolumn z fibrobetonu zwykłego wzmocnionych CFRP.

7.1.6. Przyczepność zbrojenia CFRP do betonu

Najważniejszym aspektem decydującym o efektywności wykorzystania zbrojenia CFRP jest dobra przyczepność CFRP do powierzchni betonu [121]. Warto zauważyć, że pęknięciu CFRP może towarzyszyć nieznaczna delaminacja warstw. Na podstawie analizy makroskopowej próbek po zniszczeniu, można stwierdzić, że nie wystąpiła delaminacja zbrojenia CFRP od powierzchni betonu, które może wystąpić w technice zbrojenia zewnętrznego. Rysunek 23 przedstawia laminat, który został oderwany podczas badania od powierzchni betonu wskutek zniszczenia próbki. Można zaobserwować, że zastosowana żywica epoksydowa doskonale przylegała do powierzchni betonu. Kruszywo grube i matryca cementowa zostały wyrwane z betonu w przypadku NCC-CFRP. W przypadku FRCC-CFRP, mikrowłókna stalowe dodatkowo zostały wyrwane z rdzenia betonowego, co świadczy o dobrym połączeniu CFRP z powierzchnią betonu.



Rysunek 23. Zbrojenie CFRP oderwane od powierzchni NCC-CFRP (a) i FRCC-CFRP (b).

7.1.7. Podsumowanie

1. Próbkę betonu zwykłego uległy zniszczeniu w wyniku pęknięcia CFRP w losowo zlokalizowanym obszarze. W przeciwieństwie do niewzmocnionych próbek, zewnętrzny ogranicznik odkształceń w postaci CFRP skutecznie zwiększył wytrzymałość betonu na ściskanie.

2. Krzywe naprężenie-odkształcenie próbek wzmocnionych CFRP można podzielić na dwa odrębne regiony, co jest zgodne z literaturą [122-125]. Obszary te obejmują po pierwsze etap sprężysty związany z przenoszeniem naprężeń przez beton; po drugie etap wzmocnienia, w którym naprężenia są przenoszone przez CFRP, które zapewnia elementom sztywność pouplastycznieniową do przenoszenia obciążeń. W przypadku NCC-CFRP i FRCC-CFRP otrzymano zbliżone wartości wytrzymałości na ściskanie i maksymalnych odkształceń podczas pęknięcia – może to wskazywać, że zastosowanie fibrobetonu zwykłego wzmocnionego CFRP w nowych konstrukcjach nie jest uzasadnione.

3. Zastosowanie stalowego mikrobrojenia rozproszonego może powodować brak całkowitego natychmiastowego zniszczenia kolumn betonowych po osiągnięciu naprężeń krytycznych w porównaniu z niezbrojonym betonem z CFRP. Aby jednoznacznie potwierdzić tę hipotezę, należy przeprowadzić dalsze badania na większej liczbie próbek.

4. Odmienny charakter krzywych naprężenie-odkształcenie dla betonu niewzmocnionego i betonu ograniczonego przez CFRP powoduje, że przy projektowaniu konstrukcji betonowych wzmacnianych przez CFRP zastosowanie standardowego modelu rozkładu naprężeń pod wpływem ściskania w funkcji odkształceń, które wykazuje EC2 [126], nie jest w tym przypadku właściwe.

7.2. Fibrobeton wysokowytrzymałościowy wzmocniony CFRP

7.2.1. Materiał i próbki

W drugim etapie wykonano dwanaście próbek betonowych o takich samych wymiarach jak w punkcie 7.1.1. Wszystkie próbki zostały wykonane na bazie betonu wysokowytrzymałościowego – połowa z nich zawierała zbrojenie stalowe rozproszone w postaci włókien w ilości 1,5% (objętościowo). Tabela 11 przedstawia szczegółowy skład mieszanki betonowej zastosowanej w badaniach. Do wytworzenia mieszanki zastosowano matrycę cementową z cementu typu I – CEM I 42.5R (Górażdże) o stosunku cementowo-wodnym 0,4. Jako domieszkę modyfikującą reologię mieszanki betonowej zastosowano Sikament FM6 (Sika) w ilości 2% masy cementu. Jako kruszywo zastosowano diabaz (2-8 mm) i piasek (0-2 mm). W programie eksperymentu zastosowano te same włókna, opisane w punkcie 7.1.2.

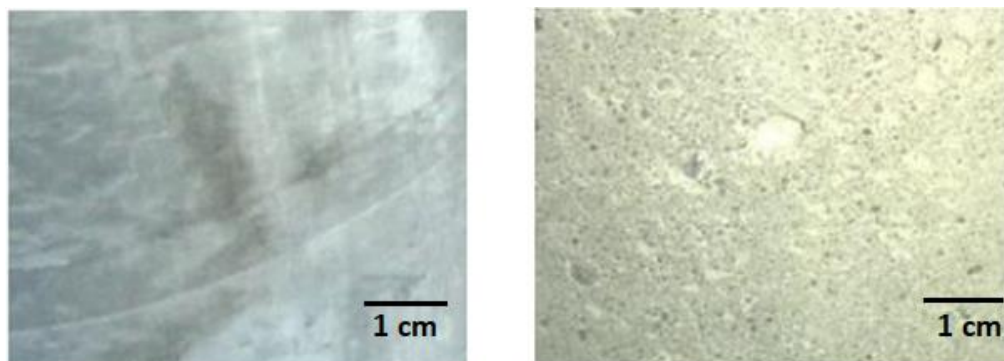
Wszystkie próbki podzielono na cztery podgrupy: kolumny z betonu wysokowytrzymałościowego (BWW); kolumny z fibrobetonu wysokowytrzymałościowego (FBWW); kolumny z betonu wysokowytrzymałościowego wzmocnione jedną warstwą włókien węglowych (BWW-CFRP) oraz kolumny z fibrobetonu wysokowytrzymałościowego wzmocnione jedną warstwą włókien węglowych (BWW-CFRP). W rezultacie, po trzy próbki z betonu wysokowytrzymałościowego i fibrobetonu wysokowytrzymałościowego zostały potraktowane jako próbki referencyjne – pozostałe 6 kolumn wzmocnionych włóknami węglowymi przetestowano w celu oceny wpływu zbrojenia CFRP na efektywność wzmocnienia kolumn betonowych.

Tabela 11. Skład mieszanek betonowych.

Beton	Cement [kg/m ³]	Piasek [kg/m ³]	Diabaz [kg/m ³]	Superplastyfikator [kg/m ³]	Woda [kg/m ³]	w/c [-]	Włókna stalowe [% objętości]
Beton wysokowytrzymałościowy	500	650	1000	10	183	0,5	-
Fibrobeton wysokowytrzymałościowy	500	650	1000	10	183	0,5	1,5

7.2.2. Przygotowanie próbek

Próbki zostały przygotowane w ten sam sposób jak w punkcie 7.1.2. Powierzchnię betonu przed przygotowaniem i po szlifowaniu pokazano na rysunku 24.



Rysunek 24. Widok powierzchni betonu przed (po lewej) i po procesie szlifowania (po prawej).

7.2.3. Oprzyrządowanie i badania.

Próbki zostały przebadane w ten sam sposób jak w punkcie 7.1.3.

7.2.4. Wyniki przeprowadzonych badań.

Wyniki eksperymentu podsumowano w tabelach 12 i 13.

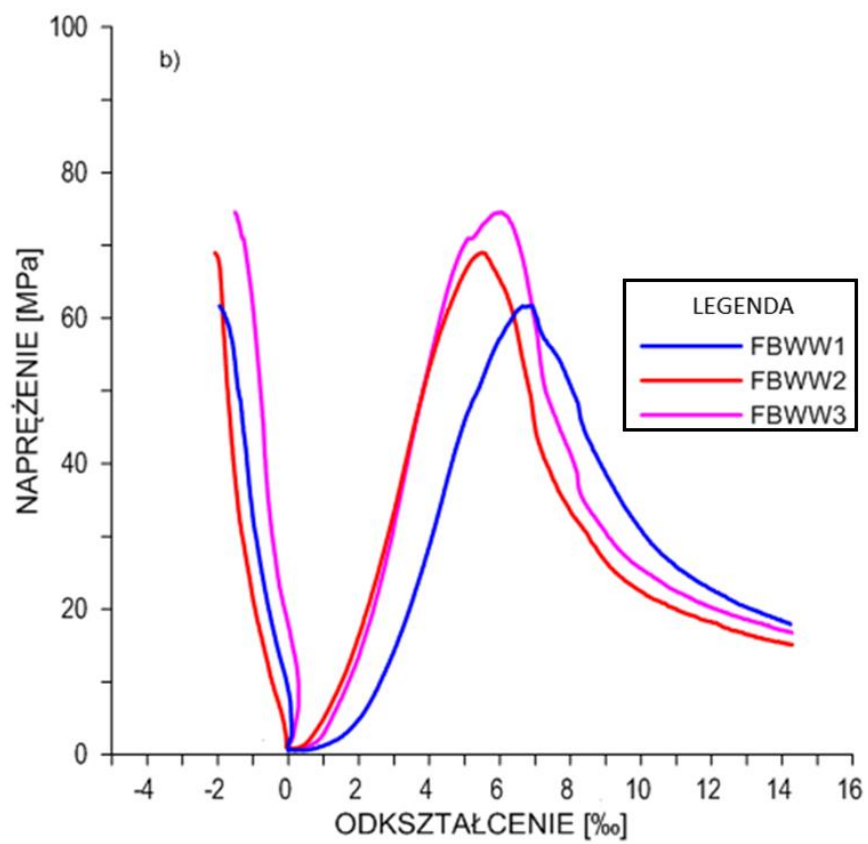
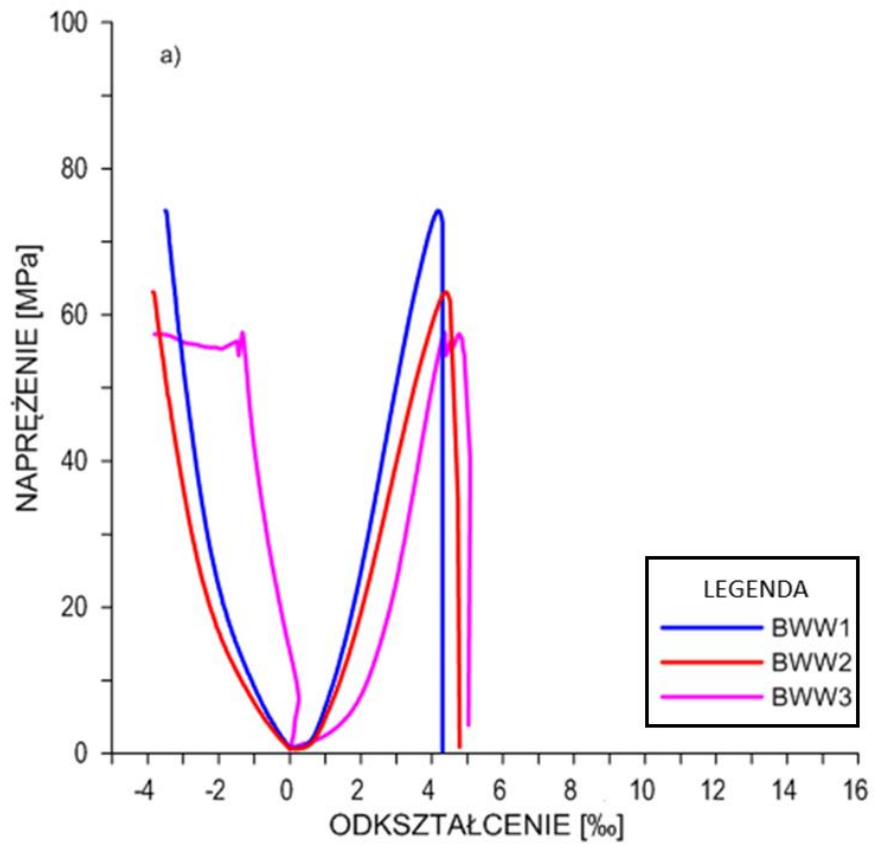
Tabela 12. Wyniki badań dla poszczególnych próbek.

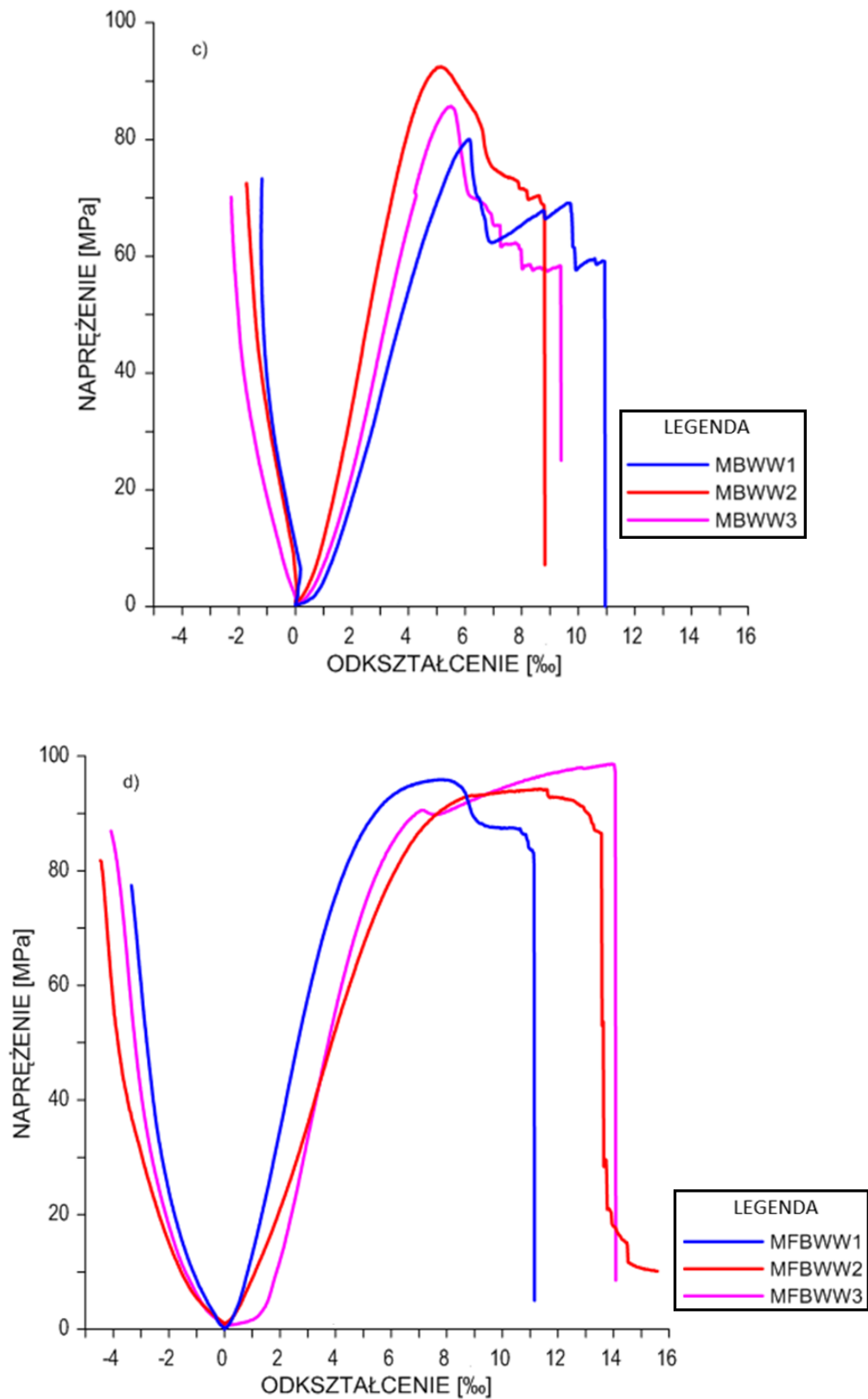
Próbka	Wytrzyma- łość na ściskanie R_c [MPa]	Odkształcenie osiowe w momencie zniszczenia kolumn ε_1 [‰]	Odkształcenie poprzeczne w momencie zniszczenia betonu ε_p [‰]	Moduł sprężystości E_1 [GPa]
Beton wysokowytrzymałościowy				
BWW1	74,25	4,19	3,05	17,15
BWW2	57,36	4,79	3,42	15,25
BWW3	63,12	4,40	3,38	13,47
Fibrobeton wysokowytrzymałościowy				
FBWW1	62,37	7,10	1,98	12,46
FBWW2	69,48	4,91	2,07	16,13
FBWW3	76,32	6,05	1,46	13,95
Beton wysokowytrzymałościowy wzmocniony CFRP				
BWW- CFRP1	80,04	6,16	-	16,87
BWW- CFRP2	92,50	5,17	-	21,05
BWW- CFRP3	85,70	5,52	-	19,20
Fibrobeton wysokowytrzymałościowy wzmocniony CFRP				
FBWW- CFRP1	94,65	7,46	-	21,03
FBWW- CFRP2	95,47	11,47	-	17,31
FBWW- CFRP3	98,75	14,04	-	19,47

Tabela 13. Uśrednione wyniki badań.

Grupa próbek	Średnia wytrzymałość na ściskanie \bar{R}_c [MPa]	Odchylenie standardowe σ [MPa]	Średnie odkształcenie osiowe w momencie zniszczenia $\bar{\varepsilon}_1$ [‰]	Średnie odkształcenie poprzeczne w momencie zniszczenia betonu $\bar{\varepsilon}_p$ [‰]	Średnia wartość modułu sprężystości \bar{E}_1 [GPa]
BWW	64,24	6,23	4,28	3,28	15,29
FBWW	68,38	2,77	6,02	1,83	14,18
BWW-CFRP	86,08	4,28	5,62	-	19,04
FBWW-CFRP	96,29	1,58	10,99	-	19,27

Na rysunkach 25 a – d przedstawiono naprężenia w funkcji odkształceń osiowych i poprzecznych dla walcowych próbek betonu wysokowytrzymałościowego (a), fibrobetonu wysokowytrzymałościowego (b), betonu wysokowytrzymałościowego wzmocnionego jedną warstwą CFRP (c) oraz fibrobetonu wysokowytrzymałościowego wzmocnionego jedną warstwą CFRP (d). Naprężenia osiowe zostały wyznaczone poprzez podzielenie sił osiowych przez całkowite pola przekroju kolumn – niewielka grubość CFRP została pominięta, tak jak w I etapie badań. Średnia wytrzymałość na ściskanie BWW określona na próbkach walcowych wynosiła 64,24 MPa. Średnie podłużne i poprzeczne odkształcenia w momencie zniszczenia tego betonu wynoszą odpowiednio 4,28‰ i 3,28‰. Średnia wytrzymałość na ściskanie FBWW wynosi 68,38 MPa. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego zwiększa tę wartość o ok. 6,4% w stosunku do betonu niezbrojonego. Średnie odkształcenia podłużne i poprzeczne w chwili zniszczenia FBWW wynoszą odpowiednio 6,02‰ i 1,83‰. Średnia wytrzymałość na ściskanie BWW-CFRP wynosi 86,08 MPa i jest o 34% wyższa niż BWW. Średnia wartość odkształceń podłużnych w momencie zniszczenia jest większa w porównaniu z BWW o 31%. Charakterystyka wzmocnienia jest zdecydowanie odmienna niż w przypadku wzmocniania betonu zwykłego. Jest ona zbliżona do zachowania się betonu wysokowytrzymałościowego, czyli liniowo-sprężysta do momentu uzyskania maksymalnych naprężeń ściskających. Po osiągnięciu wytrzymałości maksymalnej obserwuje się stopniowe pękanie pasm CFRP, co charakteryzuje się krucho-plastycznym zniszczeniem. Charakterystyka dla FBWW-CFRP do momentu jego zniszczenia jest podobna do BWW-CFRP. Średnia wytrzymałość FBWW-CFRP na ściskanie jest o 12% wyższa niż w przypadku BWW-CFRP i o 41% wyższa niż w przypadku FBWW. Średnie wartości odkształceń podłużnych przy zerwaniu są jednak znacząco wyższe i wynoszą średnio 10,99‰, co oznacza niemalże dwukrotny wzrost odkształcalności w porównaniu do betonu wysokowytrzymałościowego bez zbrojenia rozproszonego, wzmocnionego CFRP. Przebieg wykresu naprężenie – odkształcenie ma charakter liniowo-sprężysto-plastyczny. Można przyjąć, że plastyczne zachowanie obserwowane jest aż do momentu pęknięcia zbrojenia CFRP, któremu towarzyszy wyzwolenie znacznej ilości energii.





Rysunek 25. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie osiowe dla próbek: BWW (a), FBWW(b), BWW-CFRP c), FBWW-CFRP (d).

7.2.5. Przebieg zniszczenia

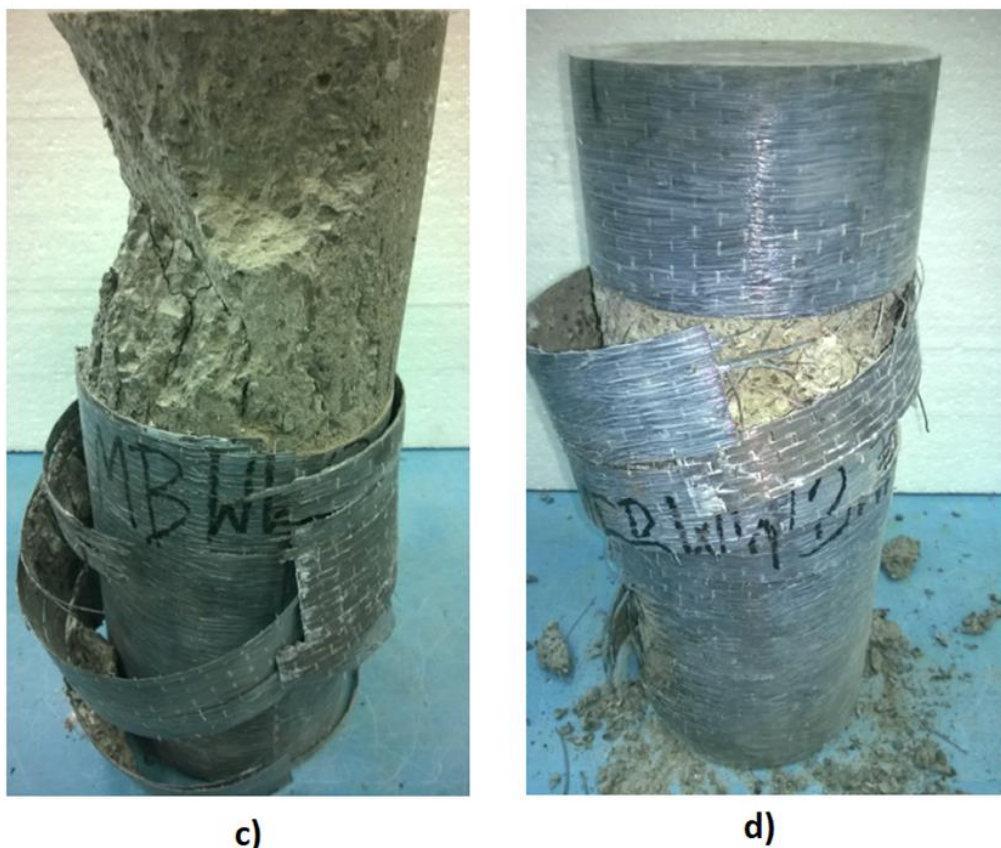
Przebieg zniszczenia w przypadku betonu wysokowytrzymałościowego i fibrobetonu wysokowytrzymałościowego można uznać za prawidłowy. Na granicy pomiędzy jednoosiowym, a trójosiowym stanem naprężenia w próbkach można zaobserwować powstanie charakterystycznych stożków betonowych (rysunek 26 a – b). W przypadku betonów wzmocnionych CFRP, określenie dokładnej lokalizacji pęknięcia zbrojenia CFRP jest niemożliwe. Gwałtowne niszczenie kolumn z CFRP zachodzi w najsłabszym miejscu próbek z uwolnieniem ogromnych ilości energii (rysunek 26 c – d).



a)



b)



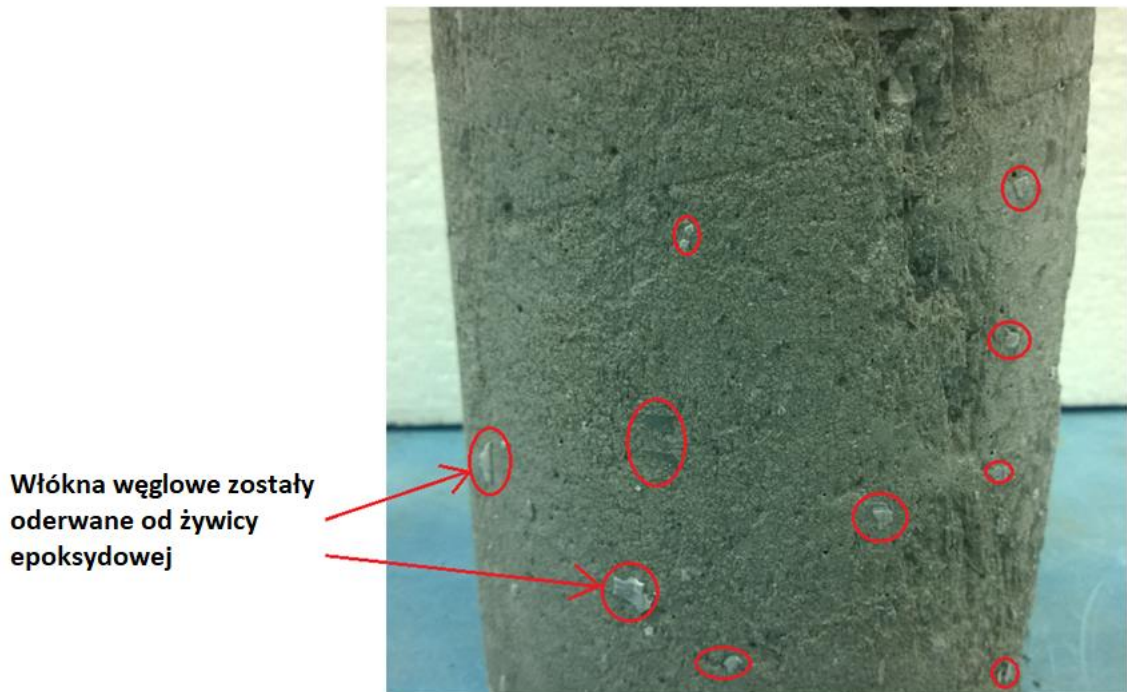
Rysunek 26. Reprezentatywny przebieg zniszczenia próbek: betonu wysokowytrzymałościowego (a), fibrobetonu wysokowytrzymałościowego (b) betonu wysokowytrzymałościowego wzmocnionego CFRP (c) fibrobetonu wysokowytrzymałościowego wzmocnionego CFRP (d).

7.2.6. Przyczepność zbrojenia CFRP do betonu

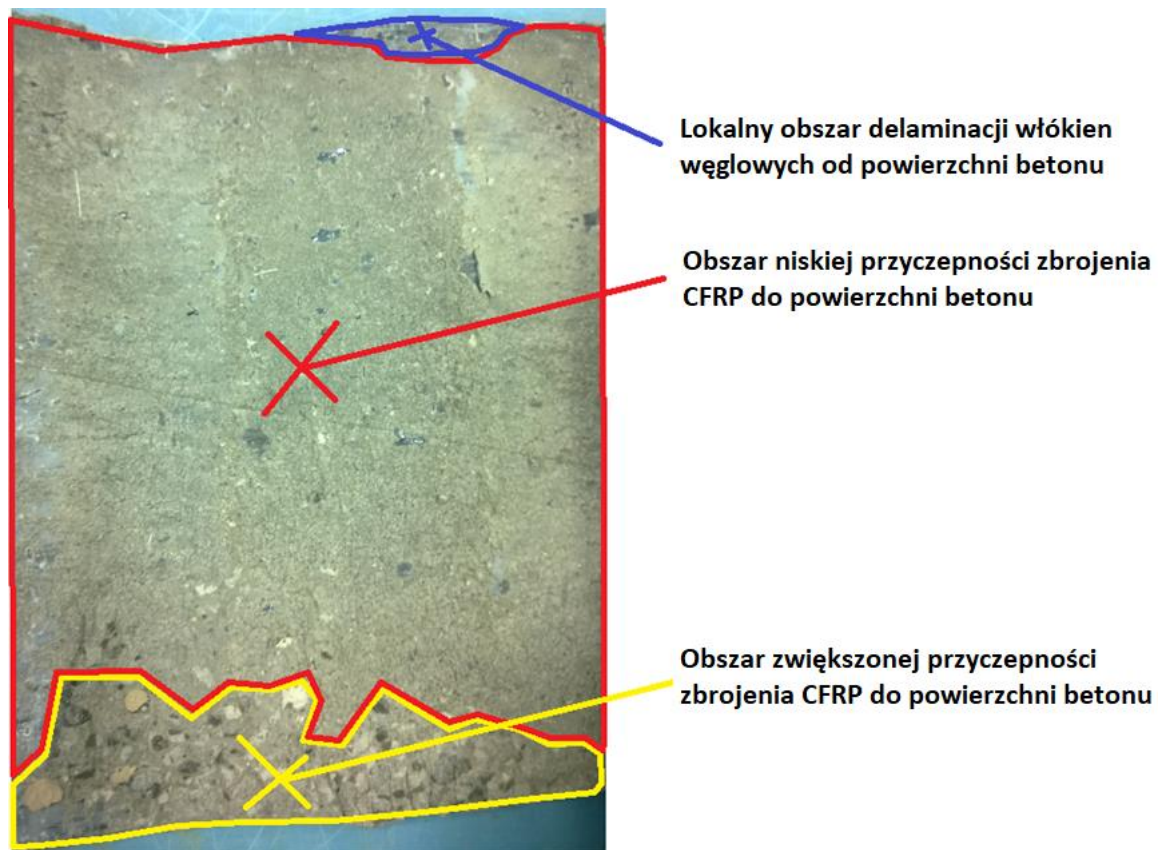
Na podstawie analizy makroskopowej próbek po zniszczeniu, można zauważyć zmienną przyczepność zbrojenia CFRP do powierzchni betonu, w zależności od obecności stalowego zbrojenia rozproszonego. Rysunek 27a przedstawia powierzchnię próbki betonu wysokowytrzymałościowego po oderwaniu się zbrojenia CFRP. Można stwierdzić, iż szerokość współpracy pomiędzy zbrojeniem CFRP a powierzchnią betonu jest minimalna i ogranicza się jedynie do lica betonu – matrycy cementowej. Wysokowytrzymałościowa matryca cementowa tworzy pewnego rodzaju szczelną powłokę, która utrudnia żywicy epoksydowej penetrację betonu na większych głębokościach. W momencie zniszczenia nie obserwuje się oderwania od rdzenia próbki powierzchni betonowych zawierających kruszywo, wraz z powierzchnią zbrojenia CFRP w ilości większej niż ok. 10% powierzchni oderwanego zbrojenia. Lokalnie można zauważyć miejsca z żywicą epoksydową na powierzchni zniszczonego rdzenia, co świadczy o punktowej większej przyczepności żywicy

do betonu niż pomiędzy żywicą a włóknami węglowymi. Może mieć to związek z miejscowym słabszym przesączeniem włókien węglowych. Zdjęcia obrazujące sposób zniszczenia zostały wybrane jako reprezentatywne dla wszystkich grup próbek.

Na rysunku 27b przedstawiono zbrojenie CFRP oderwane od powierzchni BWW-CFRP. Można na nim zauważyć wiodący obszary niskiej przyczepności zbrojenia CFRP do betonu oraz delaminacji włókien węglowych z powierzchni betonu. Co istotne, analizowany element zawiera również niewielki obszar o zwiększonej przyczepności zbrojenia CFRP do betonu, o czym świadczy wyrwanie kruszywa z rdzenia próbki. Oznacza to, iż w tym miejscu naprężenia przyczepności pomiędzy CFRP i betonem są większe niż miejscowa wytrzymałość na rozciąganie/wyrywanie betonu.



a)



b)

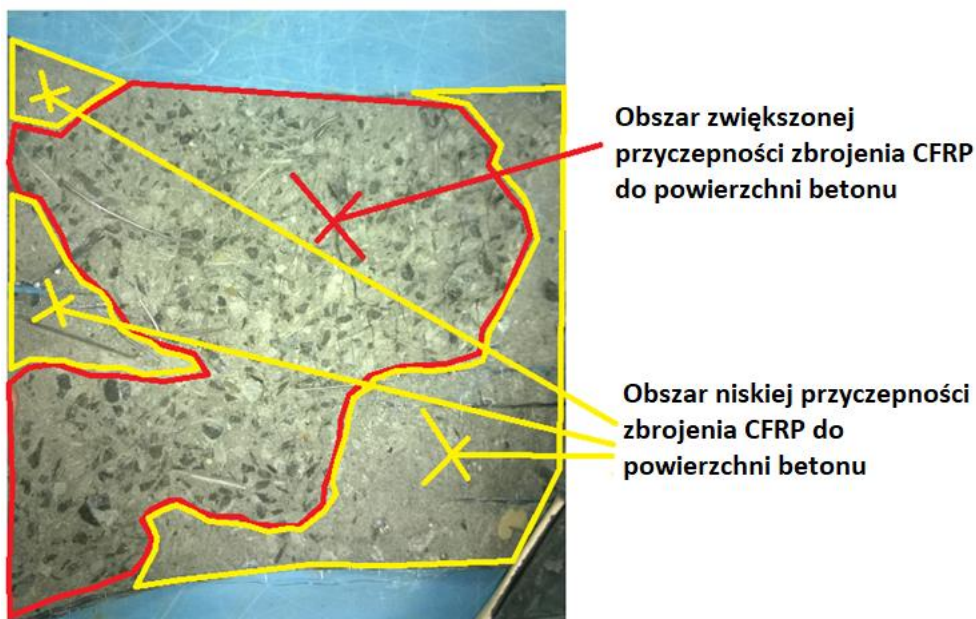
Rysunek 27. Powierzchnia próbki betonu wysokowytrzymałościowego po oderwaniu się zbrojenia CFRP wskutek zniszczenia (a) oraz zbrojenie CFRP oderwane od powierzchni BWW-CFRP (b).

Znacznie lepszą współpracę zbrojenia CFRP z powierzchnią betonu można zaobserwować w przypadku fibrobetonu wysokowytrzymałościowego. Rysunek 28a przedstawia powierzchnię próbki fibrobetonu wysokowytrzymałościowego po oderwaniu się zbrojenia CFRP. Zastosowanie stalowego zbrojenia rozproszonego powoduje zwiększenie przyczepności CFRP do rozpatrywanego betonu. Obecność mikrobrojenia, które nierzadko ma wpływ na rozluźnienie struktury betonowej i jego obecność również przy krawędzi próbek, może przyczynić się do mniejszej ilości matrycy cementowej w tym obszarze oraz lepszej współpracy żywicy epoksydowej z fibrobetonem. Jak powszechnie wiadomo wytrzymałość na rozciąganie fibrobetonu jest znacznie większa w porównaniu do betonu bez zawartości mikrobrojenia. Na podstawie deklaracji producenta żywicy oraz badań doświadczalnych można przyjąć, że wytrzymałość na rozciąganie dla żywicy wynosi 30 MPa. Natomiast wytrzymałość betonu wysokowytrzymałościowego i fibrobetonu wysokowytrzymałościowego na rozciąganie metodą rozłupywania kostki, przy liczbie próbek

n=3 wynosiła dla tego przypadku odpowiednio 3,5 MPa oraz 5,8 MPa. Iloraz wytrzymałości na rozciąganie żywicy epoksydowej i fibrobetonu wysokowytrzymałościowego wynosi zatem 5,17; podczas gdy dla betonu niezawierającego włókien wynosi 8,57. Można zatem przyjąć, że połączenie żywicy epoksydowej oraz fibrobetonu jest bardziej kompatybilne niż żywicy epoksydowej i betonu bez włókien stalowych. Na rysunkach 28a i 28b zaznaczono obszar zwiększonej przyczepności CFRP do powierzchni fibrobetonu – podczas zniszczenia z rdzenia betonowego zostały oderwane kruszywo, matryca cementowa, kawałki betonu, a nawet włókna stalowe. Lokalnie zaobserwowano niewielkie obszary bez odspojenia kruszywa i włókien stalowych z rdzenia betonowego. Zdjęcia obrazujące sposób zniszczenia zostały wybrane jako reprezentatywne dla wszystkich grup próbek.



a)



b)

Rysunek 28. Powierzchnia próbki fibrobetonu wysokowytrzymałościowego po oderwaniu się zbrojenia CFRP wskutek zniszczenia (a) oraz zbrojenie CFRP oderwane od powierzchni FBWW-CFRP (b).

7.2.7. Podsumowanie

Celem II etapu prac było określenie wpływu zbrojenia rozproszonego na charakterystykę naprężenie–odkształcenie betonu wysokowytrzymałościowego wzmocnionego CFRP. Na podstawie uzyskanych wyników, przedstawiono następujące wnioski:

1. Kolumny wzmocnione CFRP wykonane na bazie betonu wysokowytrzymałościowego uległy zniszczeniu poprzez pęknięcie CFRP w najsłabszym miejscu, któremu towarzyszyła nieznaczna delaminacja włókien węglowych od powierzchni betonu.
2. W przypadku kolumn BWW-CFRP można uzyskać znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie, w porównaniu do betonu niewzmocnionego. Charakterystyka pracy tych kolumn była zbliżona do liniowo sprężystej, w przeciwieństwie do wzmocnianych tym samym sposobem kolumn z betonu zwykłego, które pracowały w zakresie sprężysto-plastycznym ze wzmocnieniem. Ponadto nie zaobserwowano charakterystycznego momentu rozpoczęcia pracy włókien węglowych, który objawia się innym nachyleniem wykresu naprężenie-odkształcenie.

3. Stosowanie włókien stalowych w kolumnach z betonu wysokowytrzymałościowego wzmocnianych CFRP spowodowało, że elementy te pracowały w zakresie quasi-sprężysto-plastycznym. Odkształcenia maksymalne były 157% wyższe niż w przypadku kolumn BWW.
4. Na sposób zniszczenia próbek betonowych wzmocnionych CFRP wpływa obecność zbrojenia rozproszonego w strukturze betonu. Odnotowano lepszą współpracę zbrojenia CFRP z betonem zawierającym włókna stalowe.

7.3. Kolumny CFT/CFCT

7.3.1. Rodzaje próbek

W trzecim etapie badań program obejmował przetestowanie 15 próbek walcowych, które podzielono na 3 grupy: 3 rury stalowe – *steel pipes* (SP), 3 wypełnione betonem wysokowytrzymałościowym rury stalowe – *concrete filled tubes* (CFT) i 9 elementów kompozytowych – rur stalowych wypełnionych betonem wysokowytrzymałościowym–wzmocnianych CFRP – *concrete filled composite tubes* (CFCT), wzmocnionych 1, 2 i 3 warstwami CFRP (po 3 próbki dla każdego rodzaju). Średnica zewnętrzna w przypadku wszystkich wspomnianych elementów odnosi się do średnicy zewnętrznej rury stalowej. Grubość zbrojenia CFRP została pominięta w obliczeniach wytrzymałości i odkształcalności. Szczegóły dotyczące próbek przedstawiono w tabeli 14.

Tabela 14. Szczegółowe informacje dotyczące wykonanych próbek.

Rodzaj próbek	Oznaczenie	Średnica próbek D [mm]	Wysokość próbek H [mm]	Grubość rury stalowej [mm]	Liczba warstw zbrojenia CFRP	Liczba próbek
Rury stalowe (SP)	SP1	400	400	4,5	-	3
	SP2					
	SP3					
Rury stalowe wypełnione betonem (CFT)	CFT1	400	400	4,5	-	3
	CFT2					
	CFT3					
Rury stalowe wypełnione betonem wysokowytrzymałościowym, wzmocnione CFRP (CFCT)	CFCT1-1	159	400	4,5	2	3
	CFCT1-2					
	CFCT1-3					
	CFCT2-1	400	400	4,5	2	3
	CFCT2-2					
	CFCT2-3					
	CFCT3-1	400	400	4,5	3	3
	CFCT3-2					
	CFCT3-3					

Beton wysokowytrzymałościowy (BWW) użyty w badaniach został wykonany w laboratorium konstrukcji betonowych AGH w Krakowie. Skład mieszanki betonowej jest taki sam jak w punkcie 7.2.1. Średnia wytrzymałość na ściskanie 6 próbek sześciennych betonu o wymiarach 150×150×150 mm wynosiła 86,5 MPa, przy odchyleniu standardowym równym 3,5 MPa.

7.3.2. Właściwości zastosowanych materiałów

Właściwości stali, z której zostały wykonane rury są przedstawione w tabeli 15.

Tabela 15. Wybrane właściwości rur stalowych.

Parametr i jednostka	f_y [MPa]	E_s [GPa]	δ_s [%]	f_u [MPa]	t_s [mm]
Wartość	235	210	24	410	4,5

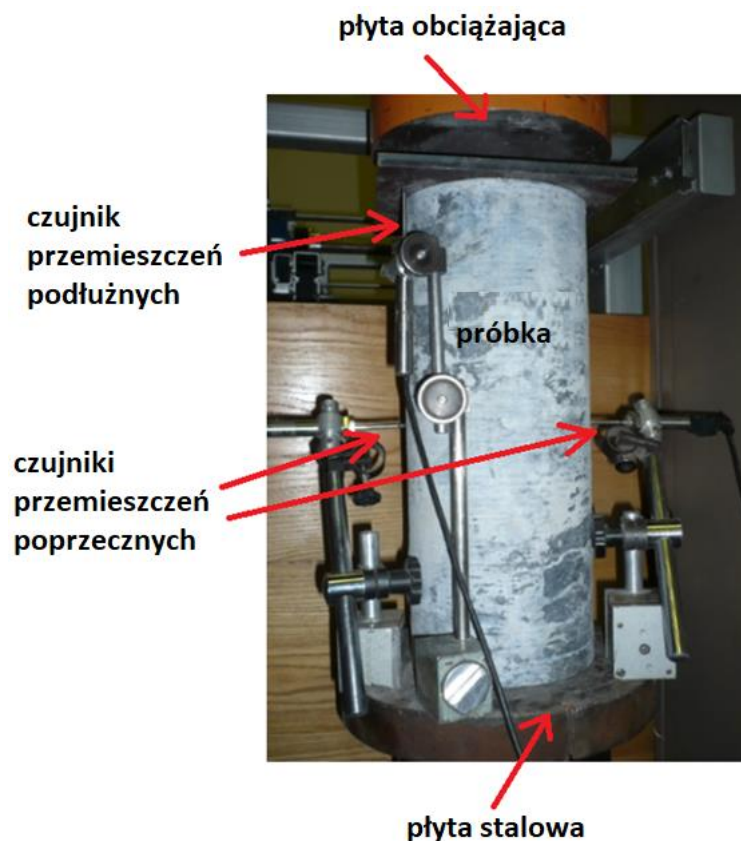
Wzmocnienie próbek zostało wykonane przy zastosowaniu włókien węglowych Sikawrap 301c, przy użyciu żywicy epoksydowej Sikadur 330 (właściwości w punkcie 7.1.2.).

7.3.3. Przygotowanie próbek

Wszystkie rury stalowe użyte w badaniach zostały uprzednio pocięte z jednej rury, aby właściwości stali dla różnych próbek pozostały niezmiennie. Powierzchnie przyłożenia siły niszczącej dla wszystkich próbek poddano obróbce na tokarce i szlifowaniu, aby uzyskać płaską i równoległą względem podstaw walców powierzchnię. Mieszankę betonową wykonano za pomocą betoniarki. Mieszanka, podobnie jak wszystkie opisane w niniejszej pracy, została wykonana zgodnie z EN 206 [125]. Powierzchnię rur stalowych oszlifowano w celu usunięcia lokalnie występującej rdzy, a następnie oczyszczono za pomocą alkoholu, aby uzyskać odpowiednią i niezakłóconą siłę wiązania pomiędzy żywicą epoksydową i stalą. Elementy stalowo-betonowe wzmocniono następnie technologią CFRP przy użyciu żywicy epoksydowej, za pomocą ręcznego procesu układania metodą suchą. Aby wyeliminować powietrze i puste przestrzenie, użyto wałka z tworzywa sztucznego i walcowano powierzchnię CFRP zgodnie z kierunkiem ułożenia włókien podczas procesu laminowania. We wszystkich przypadkach główne włókna były zorientowane prostopadle do osi kolumny, w tak zwanej orientacji 0°. Zapewniono strefę zakładu w przypadku każdej warstwy równą 150 mm. W przypadku elementów wzmocnionych 2 i 3 warstwami, nakładanie kolejnej warstwy zbrojenia CFRP rozpoczynano w miejscu zakończenia zakładu poprzedniej warstwy. Wiek próbek w momencie badania wynosił sześć tygodni.

7.3.4. Aparatura badawcza i procedura badań

Testy jednoosiowego ściskania przeprowadzono przy użyciu serwosterowalnej prasy wytrzymałościowej o maksymalnej sile nacisku 4600 kN. Badania przeprowadzono w temperaturze powietrza $20 \pm 1^\circ\text{C}$ i wilgotności $60 \pm 5\%$, przy stałej prędkości odkształcania osiowego próbek wynoszącej około $3 \times 10^{-5} [\text{s}^{-1}]$. Pomiar siły osiowej dokonano w podobny sposób jak w punkcie 7.1.3. Schematyczny układ próbki podczas badania pokazano na rysunku 29. Wytrzymałość na ściskanie elementów określono zgodnie z EN 12390-3 [128].



Rysunek 29. Schemat przedstawiający pomiar przemieszczeń osiowych i poprzecznych kolumn betonowych.

7.3.5. Wyniki badań

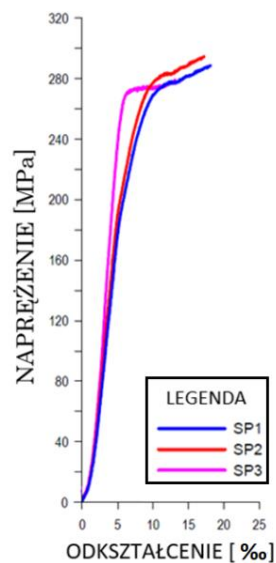
W Tabeli 16 zawarto wyniki uzyskane z badań eksperymentalnych. Trzy kluczowe punkty zostały zdefiniowane jako: początek strefy przejściowej (punkt 1), koniec strefy przejściowej (punkt 2) i punkt końcowy, od którego odkształcenia mają charakter proporcjonalny (ostateczny). Na rysunkach 30 i 31 zestawiono charakterystyki naprężenie – odkształcenie dla analizowanych próbek. Nominalne naprężenia osiowe zostały obliczone

poprzez podzielenie obciążeń przez całkowite pola przekroju próbek, a niewielka grubość CFRP została pominięta w obliczeniach.

Tabela 16. Wyniki przeprowadzonych badań.

Próbka	ϵ_{cc1} [-]	ϵ_{cc2} [-]	ϵ_{cu} [-]	f_{cc1} [MPa]	f_{cc2} [MPa]	f_{ccu} [MPa]
SP1	-	-	18,10	-	-	294,33
SP2	-	-	17,20	-	-	300,22
SP3	-	-	13,24	-	-	283,99
CFT1	7,26	11,65	24,32	101,46	90,32	80,27
CFT2	11,45	15,97	23,00	106,83	73,05	68,79
CFT3	11,89	16,27	25,66	106,55	80,68	70,88
CFCT1-1	12,88	22,66	25,88	120,41	88,84	87,94
CFCT1-2	14,72	19,64	26,00	114,00	82,94	75,10
CFCT1-3	13,21	19,38	25,40	112,51	80,08	74,97
CFCT2-1	21,76	25,96	39,90	139,98	103,16	83,70
CFCT2-2	21,50	27,81	37,59	147,71	90,88	81,00
CFCT2-3	20,83	30,41	33,87	136,60	85,03	84,78
CFCT3-1	20,80	22,50	34,00	143,51	96,28	92,28
CFCT3-2	30,56	32,53	41,47	178,87	109,96	91,04
CFCT3-3	20,42	26,62	35,00	150,15	116,06	103,66

Na rysunku 30 pokazano zależność naprężenie-odkształcenie dla próbek SP. Średnie maksymalne naprężenie ściskające dla rur stalowych wyniosło 292,85 MPa.



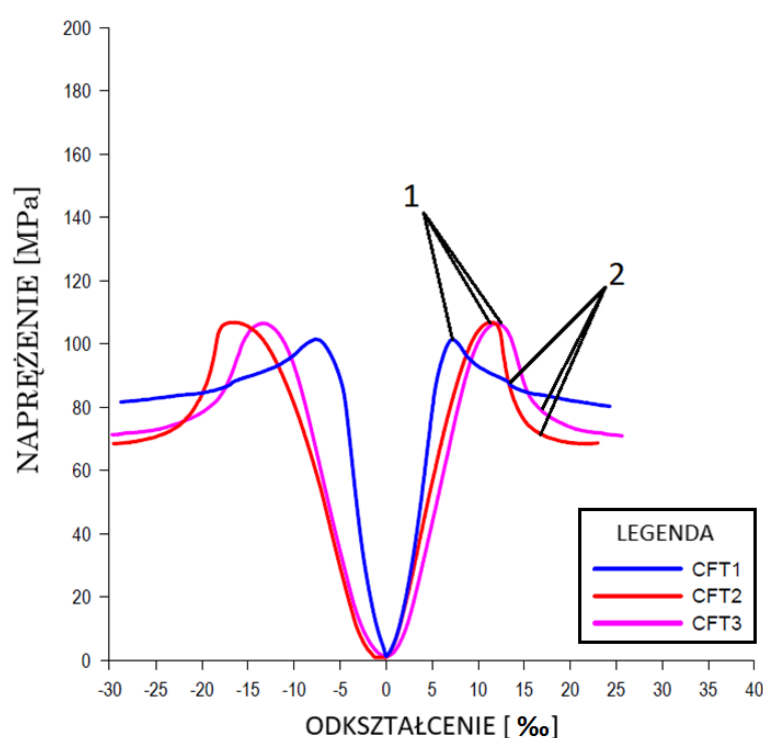
Rysunek 30. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla rur stalowych (SP).

Powszechnie wiadomo, że zdolność do przenoszenia obciążeń i sztywność to dwa podstawowe kryteria oceny konstrukcji. Zależność naprężenie-odkształcenie dla elementów zespolonych stalowo-betonowo-kompozytowych pokazano na rysunku 31. Zachowanie kolumn CFT można opisać jako quasi-liniowe aż do osiągnięcia maksymalnych naprężeń, z wąskim obszarem quasi-plastycznym w okolicy punktu 1 (rysunek 31a). Dalsze zachowanie próbek CFT można opisać jako krucho-plastyczne; szczególnie w obszarach pomiędzy punktami 1-2 i jako plastyczne, po strefie przejściowej. Połączenie HPC ze stalową rurą pozwala uzyskać wyższą nośność i bezpieczniejsze (bardziej przewidywalne) zachowanie elementów w porównaniu z próbkami HPC opisanymi w rozdziale 7.2. Średnia wytrzymałość na ściskanie kolumn CFT jest o 62% większa niż betonu HPC i wynosi 104,95 MPa. Zauważono większą stabilność zachowania próbki i znacznie większą odkształcalność (w odniesieniu do odkształcenia osiowego) kolumn CFT.

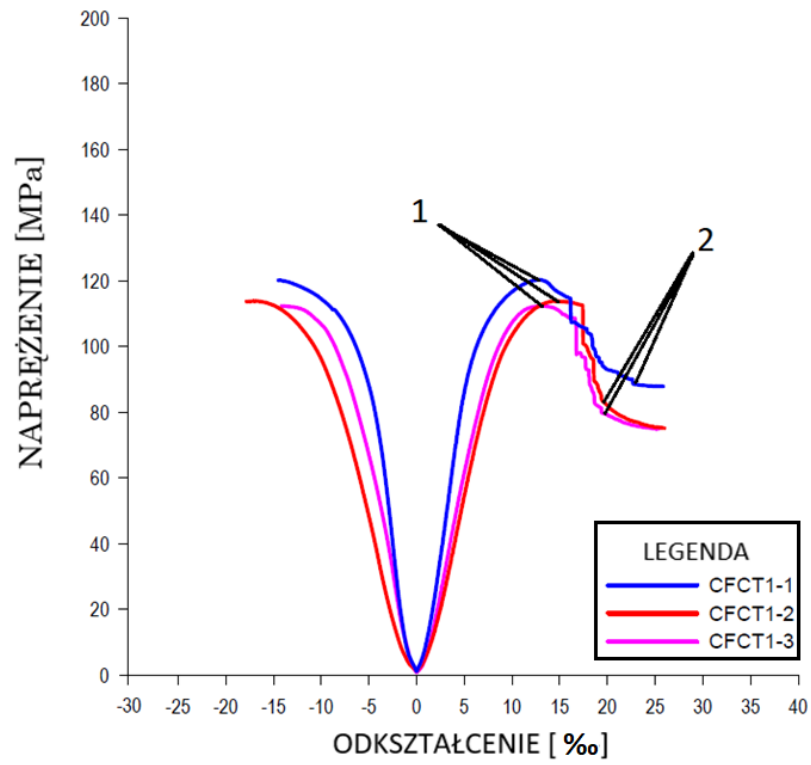
Charakterystykę naprężenie-odkształcenie dla kolumn CFCT z 1, 2 i 3 warstwami zbrojenia CFRP pokazano odpowiednio na rysunkach 31 b – d. W przypadku grupy próbek CFCT1 krzywe naprężenia odkształcenia są podobne do kolumn CFT, z zastrzeżeniem, że zachowanie w przypadku CFCT wzmocnionego 1 warstwą CFRP w obszarze pozniszczeniowym można również określić jako krucho-plastyczne, lecz ze skokową utratą nośności spowodowaną poprzez kolejne pękające pasma laminatu CFRP. Dlatego też zachowanie po przekroczeniu maksymalnych naprężeń ma bardziej kruchy charakter niż w kolumnach CFT. Średnia wytrzymałość na ściskanie dla grupy kolumn CFCT1 jest wyższa o 10% w porównaniu do kolumn CFT i wynosi 115,64 MPa.

Liczba warstw zbrojenia CFRP ma znaczący wpływ na charakterystykę naprężenie-odkształcenie w przypadku elementów typu kolumny CFCT. Wraz ze wzrostem liczby warstw wzmocnienia, wzrasta również maksymalna wytrzymałość próbek. Ponadto w przypadku próbek CFCT wzmocnionych 1 warstwą CFRP, wzmocnienie nie zostało zaobserwowane. W przypadku wzmocnienia kolumn CFCT z 2 i 3 warstwami CFRP, w całej charakterystyce naprężenie-odkształcenie można zauważyć wzmocnienie próbek. Wzmocnienie to jednoznacznie określa moment przeniesienia obciążeń na zbrojenie CFRP, dzięki czemu można określić moduł sprężystości tego wzmocnienia. Wartość maksymalnych i końcowych odkształceń (ϵ_u) podczas zniszczenia również wzrasta wraz ze wzrostem ilości warstw CFRP. Strefa przejściowa we wszystkich tych przypadkach ma podobny przebieg, w którym pękanie kolejnych warstw CFRP powoduje mniej lub bardziej nagły spadek naprężeń ściskających w próbkach. Energia zniszczenia, rozumiana jako pole pod krzywymi

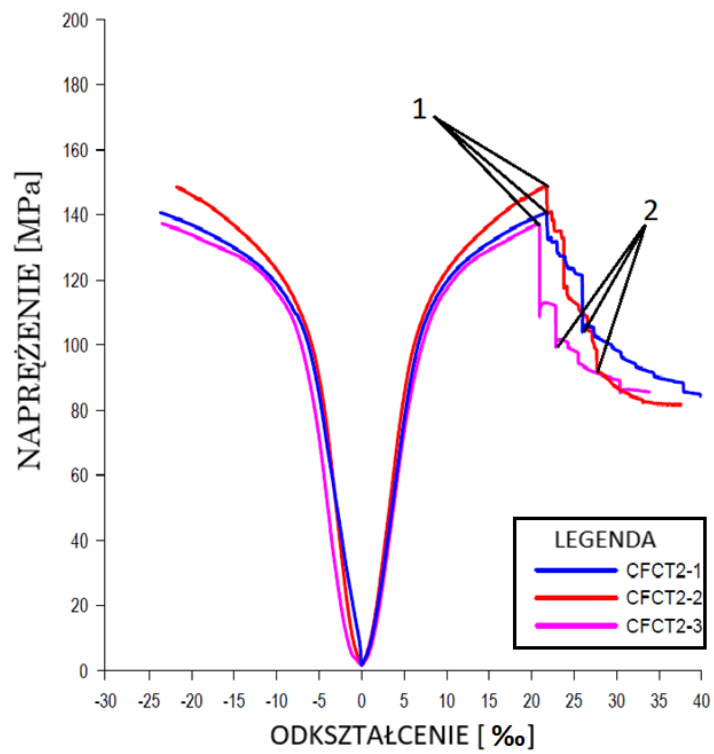
naprężenie-odkształcenie, aż do osiągnięcia maksymalnej nośności, wzrasta wraz ze wzrostem liczby warstw CFRP. W miarę wzrostu wytrzymałości próbek na ściskanie, w strefie przejściowej zaobserwowano bardziej gwałtowne i eksplozyjne zniszczenie laminatów CFRP. Wzrost odkształceń poprzecznych jest proporcjonalny do odkształceń podłużnych dla analizowanych próbek CFCT. Średnie wartości odkształceń osiowych dla próbek CFCT wzmocnionych 1, 2 i 3 warstwami kompozytowymi są odpowiednio o 33%, 109% i 135% wyższe niż dla kolumn CFT. Próbkę CFCT charakteryzują się najwyższą nośnością i odkształcalnością spośród wszystkich próbek poddanych badaniom niszczącym. Wzmocnienie kolumn CFCT za pomocą mat CFRP zwiększa również ich sztywność.



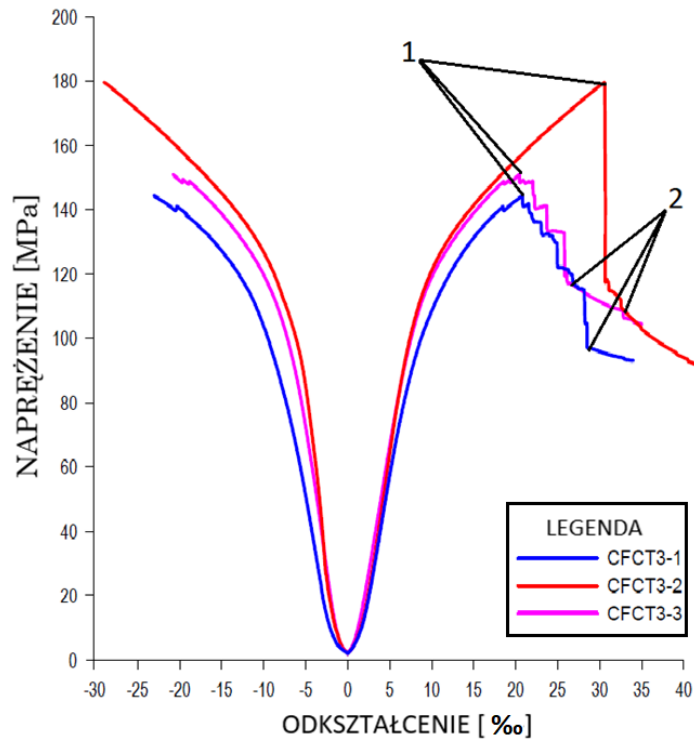
a)



b)



c)



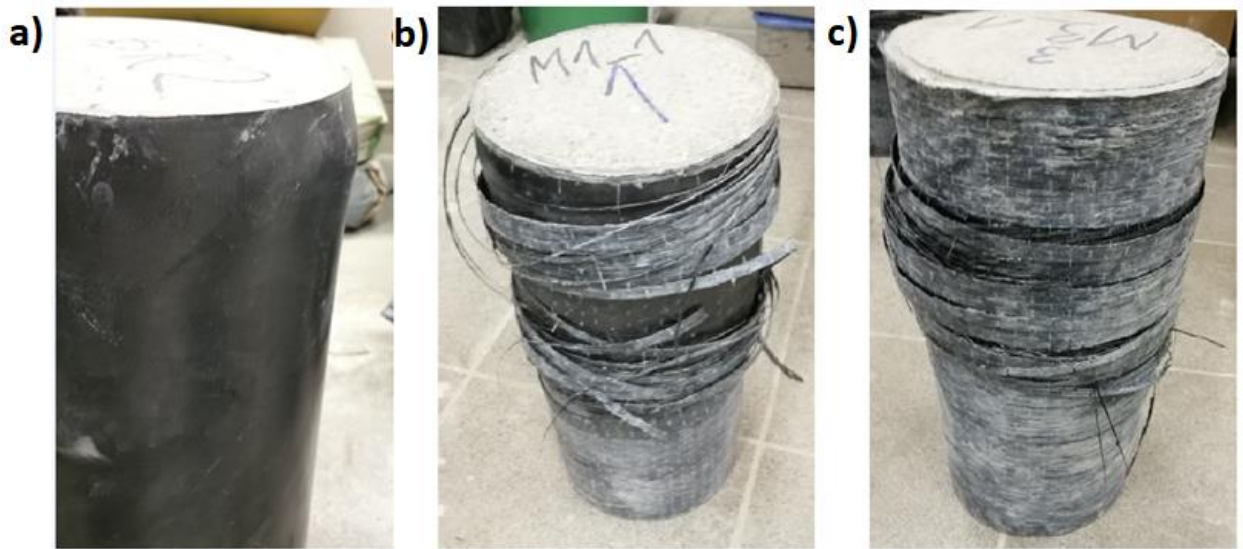
d)

Rysunek 31. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla: wypełnionych betonem HPC stalowych rur (CFT); (a), wypełnionych betonem HPC rur stalowych wzmocnionych 1, 2 i 3 warstwami zbrojenia CFRP (CFCT); (b-d).

7.3.6. Przebieg zniszczenia

Charakterystyczny sposób zniszczenia, reprezentatywny dla wszystkich próbek wzmocnionych CFRP, pokazano na rysunku 32. W przypadku rur stalowych wypełnionych betonem (CFT) we wszystkich przypadkach występowało lokalne uplastycznienie górnej krawędzi próbek. Jest to związane z uplastycznieniem tego obszaru, co można zobaczyć na rysunku 32 a. Analizując wypełnione betonem kolumny z rur stalowych wzmocnionych włóknami węglowymi (CFCT) można zaobserwować, że lokalizacja pęknięcia CFRP zależy od liczby warstw. W przypadku wzmocnienia próbki jedną warstwą CFRP pęknięcie zbrojenia występuje w górnej części próbki (rysunek 32 b). Wraz ze wzrostem liczby warstw CFRP obszar zniszczenia zbrojenia przesuwa się w kierunku środkowej części próbki (jak w przypadku zbrojenia 3 warstwami – rysunek 32 c). W odniesieniu do kolumn CFT i CFCT zaobserwowano pęknięcie warstw CFRP, brak lokalnego wyboczenia, a zaobserwowane odkształcenie charakteryzowało się stabilnym przyrostem. Wszystkie próbki CFT i CFCT

wykazywały dużą zdolność odkształcania się. Delaminacja wystąpiła równocześnie z pęknięciem CFRP.

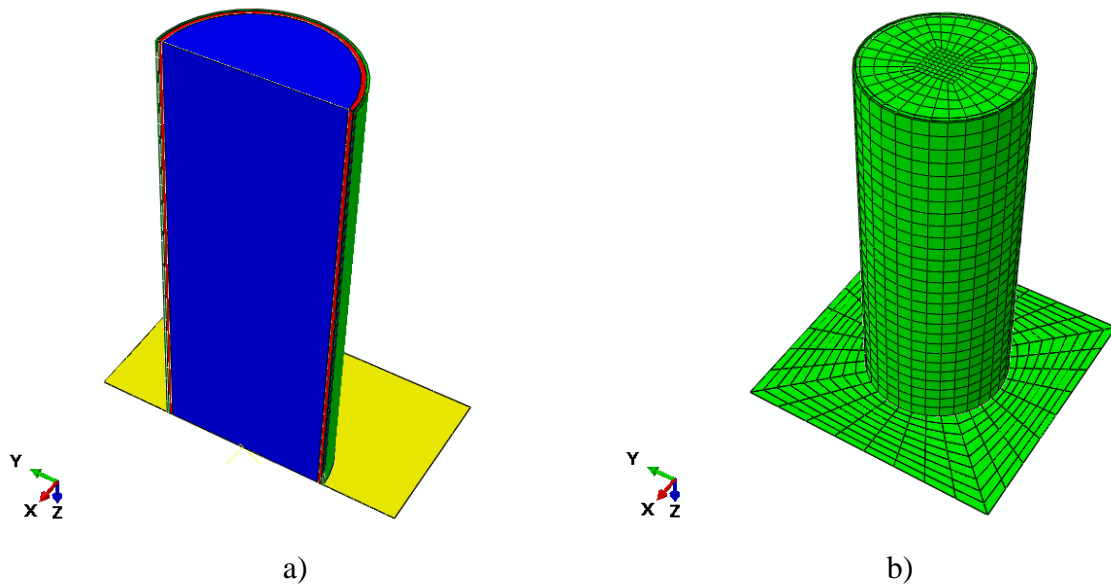


Rysunek 32. Typowy przebieg zniszczenia badanych próbek: miejscowe uplastycznienie górnej części próbki (a), pęknięcie CFRP w górnej części próbki (b), rozłożone w czasie pęknięcie CFRP w środkowej części próbki (c).

7.3.7. Analiza numeryczna

7.3.7.1. Model numeryczny

Modelowanie numeryczne zostało przeprowadzone przy użyciu programu Abaqus, który opiera się na metodzie elementów skończonych (MES). Obejmowało ono próbki z bieżącego rozdziału jak i część próbek z rozdziału 7.2. (beton wysokowytrzymałościowy oraz beton wzmocniony jedną warstwą CFRP). W obliczeniach użyto moduł explicit oprogramowania i przeprowadzono analizę nieliniową. Model 3D składał się z czterech elementów (rysunek 33 a), które stanowiły rdzeń z betonu HPC, stalowa rura, od jednej do trzech warstw CFRP oraz element sztywny (rigid body), przez który przykładano obciążenie (jako przemieszczenie pionowe) do modelowanej kolumny. Przemieszczenia spodu modelu zostały zablokowane we wszystkich kierunkach. Rysunek 33 b przedstawia siatkę elementów skończonych dla modelu CFCT.



Rysunek 33. Model 3D kolumn CFCT: przekrój poprzeczny przedstawiający elementy składowe modelu (HPC – kolor niebieski, rura stalowa – kolor czerwony, CFRP – kolor zielony, element sztywny – żółty); (a), model z siatką elementów skończonych (b).

Wspomniana płyta jest zdefiniowana w modelu elementu skończonego jako sztywny element powiązany z punktem odniesienia i umieszczony w centralnym punkcie na górnej powierzchni modelu 3D. Obciążenie przykładano poprzez przesunięcie punktu odniesienia z pozycji początkowej. Kolumna betonowa została zamodelowana przy użyciu ośmiowęzłowych heksahedralnych elementów w trójosiowym stanie naprężenia. Model elementu HPC składał się z 10 000 elementów. Wymiary wszystkich modeli były takie same, jak w przypadku próbek wykonanych w laboratorium. Stalowa rura została zamodelowana jako element bryłowy i składała się z 2500 ośmiowęzłowych heksahedralnych elementów w trójosiowym stanie naprężenia. Zbrojenie CFRP zostało zamodelowane jako odkształcalna powłoka, która składała się z 2500 elementów czterowęzłowych. Grubość pojedynczej warstwy, która została przyjęta do modelowania wynosiła 0,167 mm i jest równa grubości nominalnej maty z włókien węglowych. Nakładanie warstw CFRP (w przypadku elementów składających się z dwóch lub trzech warstw CFRP) przeprowadzono za pomocą funkcji „composite layup” w oprogramowaniu Abaqus. Ta funkcja umożliwia połączenie więcej niż jednej warstwy bez stosowania dodatkowych ograniczeń między powierzchniami styku.

Celem analizy metodą elementów skończonych wszystkich próbek było zaobserwowanie wyboczenia, odkształceń i wartości naprężeń przy takim samym stopniu przemieszczenia jak tych zaobserwowanych eksperymentalnie. Warto zauważyć przy tym, że

analizowane elementy wciąż nie są w pełni poznanym rozwiązaniem. Modelowanie numeryczne miało na celu odtworzenie testów laboratoryjnych i zostało przeprowadzone w celu lepszego zilustrowania zachowania tego rodzaju elementów. Ponadto przeprowadzenie symulacji numerycznych było niezbędne, aby wykazać, że modelowanie tego rodzaju elementów jest możliwe i w jak największym stopniu odzwierciedla rzeczywistość (rzeczywisty element konstrukcyjny / eksperymenty laboratoryjne). Pokazuje to również, że proponowana metodologia może być z powodzeniem stosowana w symulacjach elementów o większych wymiarach lub rzeczywistych konstrukcji budowlanych. Należy zauważyć, że badania te są jedynie wstępem do testowania większych elementów konstrukcyjnych, a głównym celem jest poznanie właściwości i zachowania rzeczywistego elementu konstrukcyjnego, jakim są słupy CFCT. Analiza ta pokazuje, że elementy typu CFCT mogą być innowacyjnymi systemami konstrukcyjnymi w wielu obszarach inżynierii lądowej.

7.3.7.2. Symulacja numeryczna

Na początku określono parametry HPC. Jako model konstytutywny użyto plastyczny model CDPM (*Concrete Damage Plasticity Model*), natomiast zachowanie sprężyste zamodelowano jako izotropowe i liniowe. W modelu konstytutywnym betonu, przy określaniu nieelastycznej fazy odkształcenia betonu, współpraca dwóch mechanizmów doprowadza obciążenia materiału w sposób zmęczeniowy – a tym samym do jego zniszczenia – degradacji materiału (reprezentowanej przez degradację sztywności) i jego uplastycznienia. Jako maksymalną wytrzymałość na ściskanie betonu HPC przyjęto do symulacji średnią wartość z trzech próbek z badania laboratoryjnego.

Następnie oszacowano parametry fizyko-mechaniczne rury stalowej. Jako konstytutywny model rury stalowej wybrano materiał sprężysto-plastyczny. W tym modelu powierzchnia plastyczności jest definiowana przy użyciu naprężenia jednoosiowego i odpowiadającym mu odkształceniu plastycznemu. Jako parametry wejściowe do obliczeń przyjęto średnie wartości z testów laboratoryjnych (rzeczywiste wartości naprężeń i odkształceń). Wyniki symulacji zostały przedstawione w formie wykresu jako krzywa odkształcenia i naprężenia. Kolejnym krokiem obliczeń było wykonanie analizy dla próbek CFT. W tym przypadku zastosowano parametry z kalibracji modeli SP i HPC (Tabela 17). Procedura obliczeń była taka sama jak uprzednio. Zastosowano ogólne właściwości kontaktu (tarcie i zachowanie normalne) między powierzchniami styku sekcji stalowej i betonowej.

Tabela 17. Podstawowe parametry przyjęte w modelu 3D.

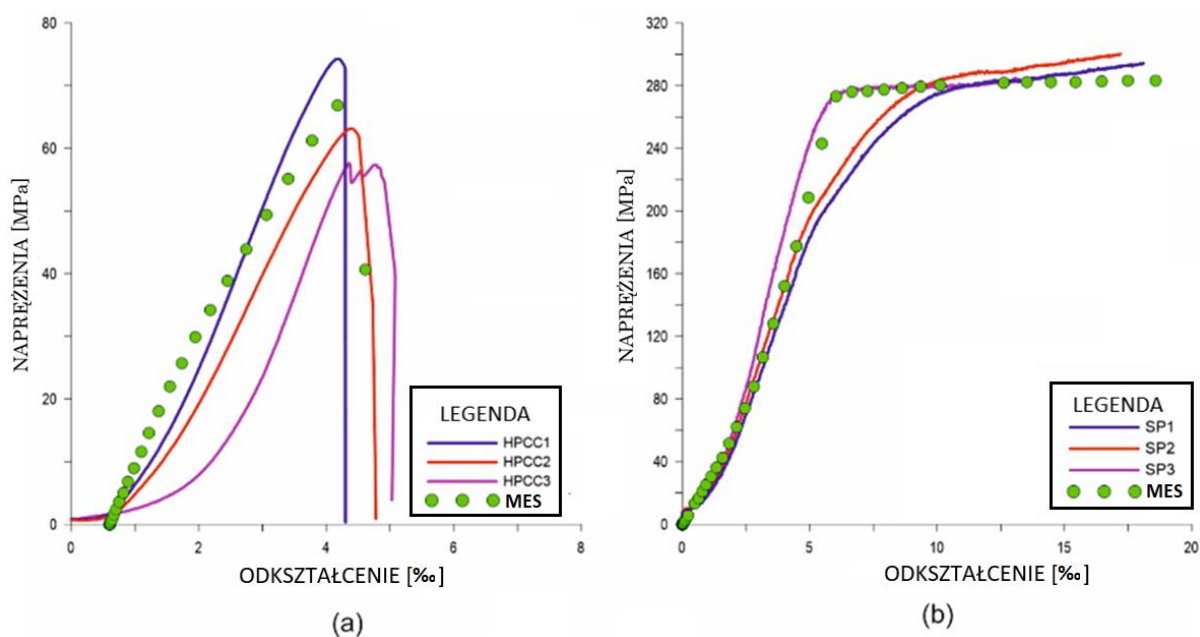
Beton wysokowytrzymałościowy (HPC)		Stal		CFRP	
Moduł sprężystości E_c	36 GPa	Moduł sprężystości E_c	205 GPa	Moduł sprężystości E_f	230 GPa
Liczba Poissona ν_c	0,3	Liczba Poissona ν_s	0,3	Liczba Poissona ν_f	0,3
Naprężenia plastyczne σ_{cY}	22,5 MPa	Granica plastyczności σ_{sY}	235 MPa	Wytrzymałość na rozciąganie CFRP R_{tCFRP}	4900 MPa
Naprężenia niszczące σ_{cU}	65 MPa	Naprężenia graniczne σ_{sU}	410 MPa	Wytrzymałość na rozciąganie w poprzek włókien R_{t1CFRP}	217 MPa
Odkształcenia plastyczne podczas zniszczenia ϵ_{cF}	0,0039			Wytrzymałość na ścinanie CFRP R_{sCFRP}	155 MPa

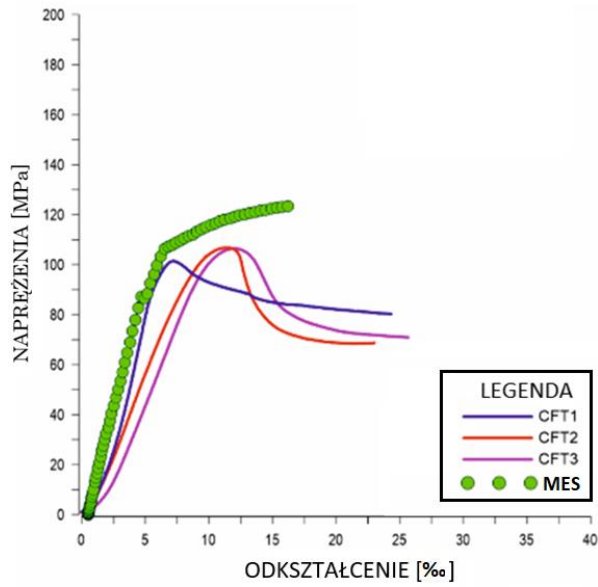
Właściwości fizyko-mechaniczne laminatu CFRP określono teoretycznie z uwagi na fakt, że nie przeprowadzono badań niszczących samego laminatu. Jako model konstytutywny wybrano model Hashin Damage dla kompozytu wzmocnionego włóknem [129]. W tym modelu należy zdefiniować szereg parametrów uszkodzenia, w tym podłużną i poprzeczną wytrzymałość na rozciąganie, podłużną i poprzeczną wytrzymałość na ściskanie oraz podłużną i poprzeczną wytrzymałość na ścinanie. Sposób oszacowania tych właściwości, w tym podejście różnych autorów, pokazano w [130]. Pomysł określania parametrów fizyko-mechanicznych opiera się na podejściu mikromechanicznym. W symulacji próbki HPC-CFRP wykorzystano właściwości fizyko-mechaniczne laminatu CFRP, które zostały oszacowane teoretycznie oraz parametry z kalibracji modelu HPC (Tabela 17). Jak już wspomniano, laminat CFRP został zamodelowany jako materiał kompozytowy. Płaszczyzny kontaktu laminatu CFRP oraz betonu zostały połączone ze sobą na stałe przy użyciu wiązania „tie constrain”. Ostatnim etapem analizy metodą elementów skończonych było wykonanie

obliczeń dla próbek CFCT z 1, 2 i 3 warstwami zbrojenia CFRP. Kontakt pomiędzy CFRP i powierzchnią stalowej rury został wykonany jako „tie constrain”, podczas gdy połączenie między stalową rurą a betonem oparto na ogólnym kontakcie z uwzględnieniem tarcia (współczynnik tarcia) i normalnym zachowaniu (kontakt twardy).

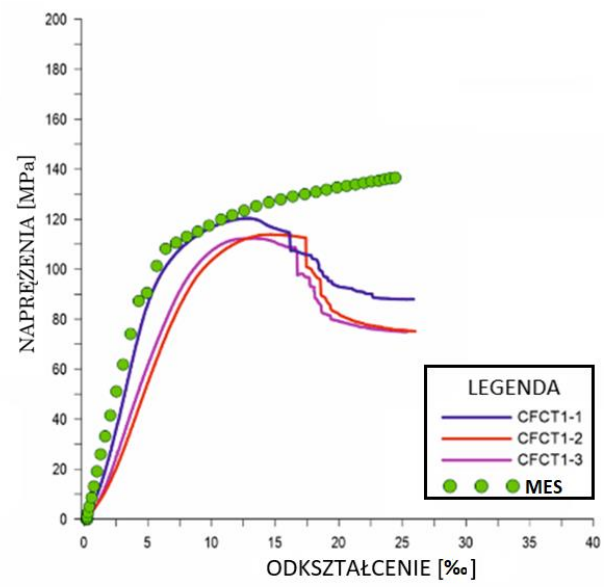
7.3.7.3. Wyniki analizy numerycznej

Wyniki symulacji przedstawiono na krzywych naprężenie-odkształcenie (rysunki 34 a – g) i porównano z wynikami testów laboratoryjnych.

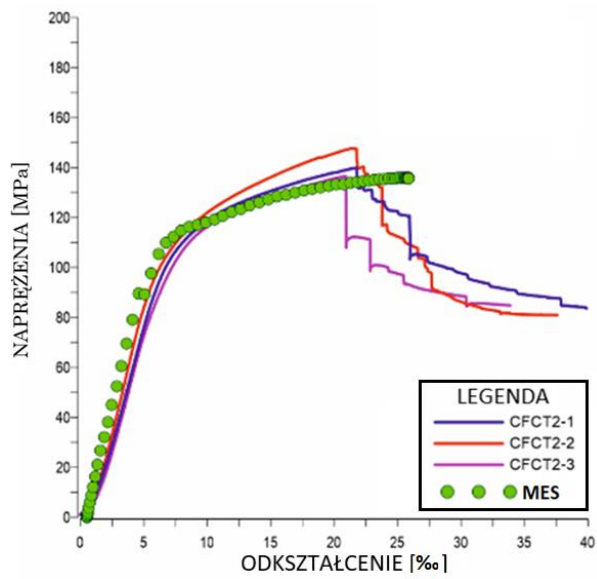




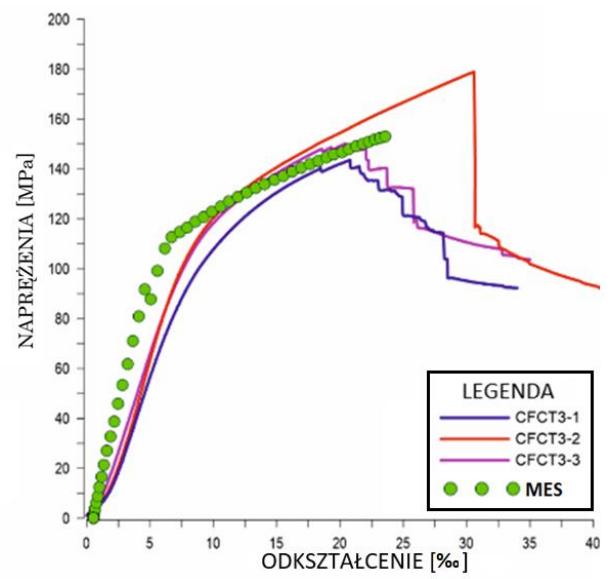
(c)



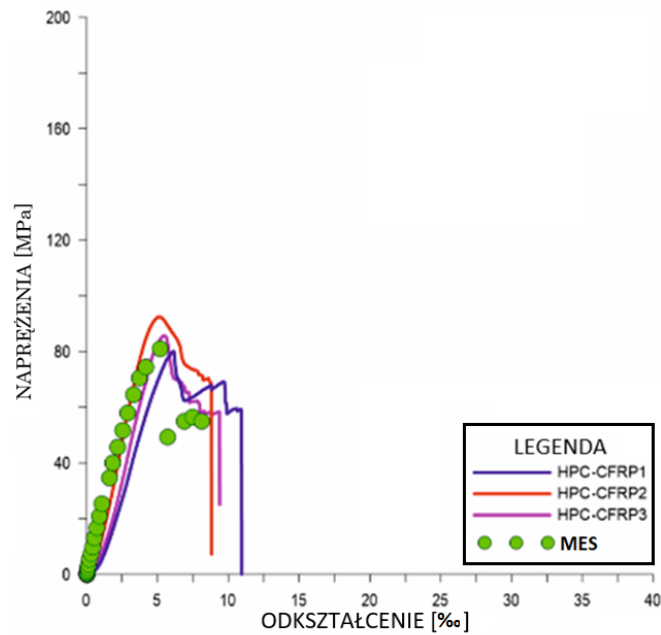
(d)



(e)



(f)



(g)

Rysunek 34. Porównane wyniki analizy MES z wynikami badań laboratoryjnych dla każdej grupy próbek: HPC (a), rura stalowa SP (b), stalowe kolumny wypełnione betonem CFT (c), CFCT 1 (d), CFCT 2 (e), CFCT 3 (f), HPC-CFRP (g).

Jak widać na rysunkach, przebieg funkcji naprężenie-odkształcenie uzyskany w wyniku analizy numerycznej jakościowo odpowiada wynikom badań laboratoryjnych. Wynikające rozbieżności między testami laboratoryjnymi, a symulacjami numerycznymi pojawiają się w wyniku przyjęcia średnich parametrów z trzech testów laboratoryjnych dla poszczególnych materiałów (HPC, SP, oraz CFRP). Biorąc ten aspekt pod uwagę oraz fakt, że konstytutywny model stali był wyidealizowany, a przyjęty model CFRP przyjęty teoretycznie uzyskany model elementów CFCT i wyniki symulacji należy uznać za jakościowo odzwierciedlające rzeczywistość.

W pracy przedstawiono analizę zachowania próbek o wysokości 400 mm, tj. stosunkowo krótkich kolumn ($L/D < 3$). Należy jednak zauważyć, że przeprowadzone badania są wstępem do dalszych rozważań w tej dziedzinie. Planowane jest przeprowadzenie badań laboratoryjnych dla elementów o większym stosunku L/D , aby móc powiązać znane właściwości elementów CFCT z pracą elementów konstrukcyjnych o rzeczywistych wymiarach. Wstępne testy na podobnych elementach o większej smukłości zostały już przeprowadzone między innymi przez Kim i in. [131] i dają pewien pogląd na to, jak takie elementy będą się zachowywać przy stosunku L/D większym niż 3. Autorzy przeprowadzili

testy dla próbek o współczynniku smukłości 7,8 i 11,8. Badania pokazują, że wytrzymałość kolumn wzmocnionych CFRP wypełnionych betonem maleje wraz ze wzrostem stosunku L/D. Bourouz doszedł również do podobnych wniosków [132]. W swojej pracy zawarł porównanie wyników uzyskanych z owiniętych próbek wzmocnionego betonu, które mają równy przekrój. Wyniki pokazują, że wzrost współczynnika smukłości w zakresie wartości od 2 do 7 ogólnie prowadzi do niewielkiego spadku nośności i umiarkowanego zmniejszenia deformacji osiowej. Podobne wnioski przedstawił między innymi Etman [133] w artykule na temat wzmacniania kolumn żelbetowych o różnych wartościach smukłości za pomocą CFRP; Elsanadedy [134] w analizach numerycznych wpływu wielkości elementów betonowych kolumn wzmocnionych CFRP; Jiang i Wu [135] w eksperymentach na kolumnach wypełnionych betonem typu CFRP – PVC; oraz Soliman [136], który analizował betonowe kolumny z CFRP.

7.3.7.4. Podsumowanie

W etapie tym przedstawiono eksperymentalne badania zachowania się rur stalowych wypełnionych wysokowytrzymałościowym betonem wzmocnionym techniką CFRP. Z pracy tej można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Liczba warstw wzmocnienia CFRP znacząco wpływa na charakterystykę naprężenie odkształcenie badanych kolumn CFCT. Na ogół wydajność analizowanych elementów CFCT jest zasadniczo podobna w istocie i zależy od liczby warstw CFRP – wytrzymałość próbek i ich odkształcalność zwiększa się proporcjonalnie do liczby warstw.
2. Wraz ze wzrostem wytrzymałości próbek zwiększała się energia zniszczenia oraz następowało bardziej gwałtowne pękanie w strefie przejściowej i obserwowano więcej zniszczonych włókien CFRP. Obserwowany wzrost deformacji bocznych był proporcjonalny do deformacji podłużnych analizowanych próbek CFCT.
3. Analizowane próbki ulegały zniszczeniu z powodu pęknięcia CFRP w najsłabszym obszarze. Po osiągnięciu maksymalnego odkształcenia można było zaobserwować kruchoplastyczną charakterystykę zachowania się próbek przy skokowej utracie sztywności.
4. Przeprowadzone obliczenia numeryczne opierają się na średnich wartościach parametrów fizyko-mechanicznych uzyskanych z badań laboratoryjnych. Jakościowo wyniki symulacji numerycznych odpowiadają wynikom uzyskanym w testach laboratoryjnych.

8. Badania właściwe

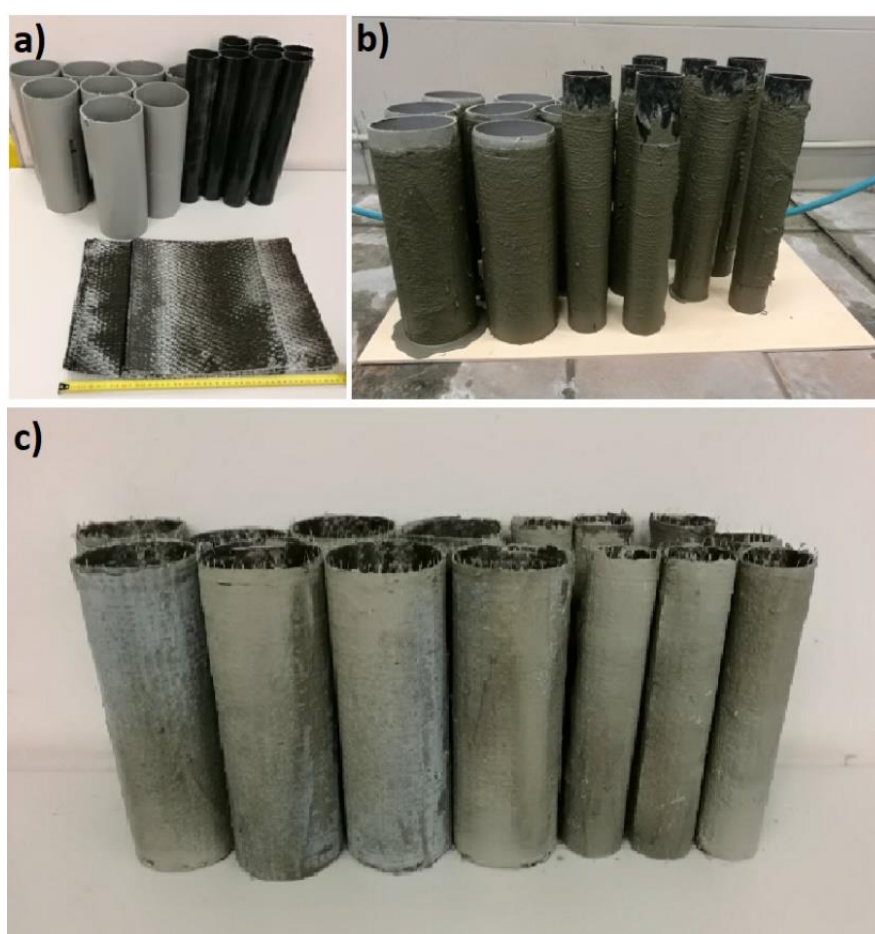
8.1. Wpływ lokalizacji włókien węglowych na efektywność wzmocnienia betonu

Ze względu na wiele aspektów, takich jak plastyczne zachowanie żywicy epoksydowej w kompozytach CFRP, brak zainteresowania badaczy tematem alternatywnej matrycy wzmacniającej CFRP, wpływem oddziaływania środowiska agresywnego na elementy i struktury kompozytowe, konieczność ochrony CFRP wzmacnianych żywicą epoksydową przed działaniem ognia i podwyższonych temperatur, przeanalizowana została możliwość umieszczenia pierścieni z włókien węglowych wzmocnionych wysokowytrzymałościową matrycą cementową, która jest kompatybilna z betonem. Pierścienie te zostały zlokalizowane w strukturze okrągłych betonowych kolumn wykonanych z samozagęszczalnego fibrobetonu wysokowytrzymałościowego – *High-Performance, Self-Compacting, Fibre-Reinforced Concrete* HPSCFRC. Ten rodzaj wzmocnienia został nazwany przez autora pierścieniami z włókien węglowych pokrytymi matrycą – *Carbon Fibre Coated Reinforcement rings* (CFCRr). Jedną z głównych obecnych luk w podjętej tematyce jest określenie zachowania betonów stosunkowo nowych, takich jak SCHPFRC, wzmocnionych materiałami polimerowymi i osnową cementową jako spoiwem. Adhezja między włóknami polimerowymi, a matrycą cementową może być postrzegana jako najważniejsza kwestia i ma zdecydowany wpływ na pracę tego rodzaju elementów kompozytowych [137]. Powszechnie wiadomo, że czynniki środowiskowe mają wpływ na wydajność betonu zbrojonego techniką FRP [138]. Ponadto ekspozycja betonu wzmocnionego CFRP przy użyciu żywicy epoksydowej (lub matrycy cementowej) na oddziaływanie wysokiej temperatury prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości konstrukcji betonowych wzmacnianych kompozytami [139]. Motywacją do podjęcia tego tematu był brak badań wskazujących na zastosowanie włókien węglowych w strukturze betonu SCHPFRC. Celem tego badania była odpowiedź na główne pytania: czy lokalizacja pierścieni CFCRr w strukturze betonu HPSCFRC ma wpływ na charakterystykę naprężeń i odkształceń dla tego rodzaju struktur kompozytowych? Czy można zastosować zbrojenie z materiałów FRP wewnątrz struktury betonu już na etapie projektowania konstrukcji?

8.1.1. Przygotowanie pierścieni z włókien węglowych

Do przygotowania pierścieni CFCRr zastosowano włókna węglowe Sikawrap 301c, rury polipropylenowe jako szalunek nadający kształt powstającej warstwie kompozytowej oraz wysokowytrzymałościową matrycę cementową. W badaniach przygotowano pierścienie

CFCRr o średnicach zewnętrznych 60 mm i 110 mm, wysokości 300 mm i grubości 3 mm. W przypadku wszystkich pierścieni CFCRr zapewniono zakład o długości 50 mm. Początkowo maty z włókna węglowego pocięto na odpowiednią długość (rysunek 35 a). Kolejny etap obejmował ułożenie włókien węglowych na powierzchni wstępnie przyciętych rur polipropylenowych o średnicy zewnętrznej 117 mm i 57 mm za pomocą drutu stalowego o średnicy 0,3 mm w pięciu miejscach na całej wysokości elementów, w odstępie co 50 mm. Następnie włókna węglowe pokryto warstwą matrycy cementowej o grubości 3 mm (rysunek 35 b). Po siedmiu dniach pierścienie CFCRr zostały wyjęte z rur polipropylenowych (rysunek 35 c).



Rysunek 35. Etapy przygotowania pierścieni CFCRr: pocięte na odpowiedni wymiar włókna węglowe (a), włókna węglowe pokryte świeżą matrycą cementową (b) oraz pierścienie CFCRr (c).

Właściwości włókien węglowych na podstawie danych producenta przedstawiono w tabeli 8 w rozdziale 7.1.2. Proporcje (masowe) matrycy cementowej użytej do pokrycia

włókien węglowych były następujące: Cement CEM I 52,5R: SikaFume: Woda: Superplastyfikator Sikament FM6 były równe 100: 30: 40: 10. Średnia wytrzymałość na ściskanie matrycy cementowej wynosiła 62 MPa i została określona przy użyciu 4 próbek, podczas gdy odchylenie standardowe wyniosło zaledwie 1,2 MPa.

8.1.2. Mieszanka betonowa i przygotowanie próbek

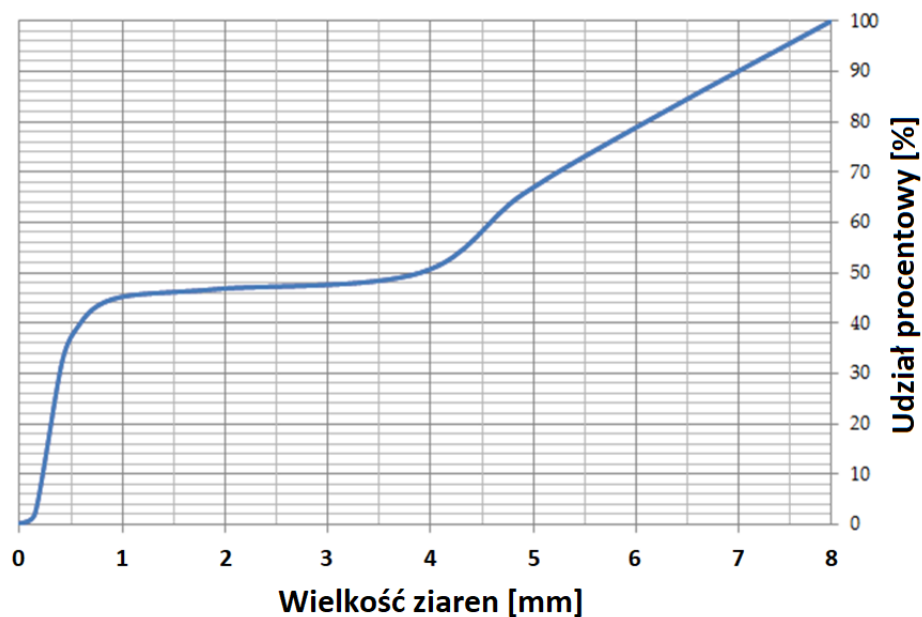
W badaniach wykorzystano mieszankę betonową z wysokowytrzymałościowego fibrobetonu samozagęszczalnego (HPSCFR). Szczegóły dotyczące mieszanki betonowej zestawiono w tabeli 18. Składniki mieszanki betonowej były następujące: cement portlandzki CEM I 52,5R (skład – tabela 19), Sika Fume, jako strukturalny mikrowypełniacz, superplastyfikator Sikament FM6, diabaz, jako kruszywo gruboziarniste o średnicy ziaren 2-8 mm, piasek, jako kruszywo drobne o średnicy ziaren 0-2 mm oraz woda z wodociągu. Krzywa uziarnienia kruszywa drobnego i grubego została przedstawiona na rysunku 36. Zbrojenie rozproszone miało formę włókien stalowych o średnicy zewnętrznej 0,5 mm i długości 10 mm (rysunek 37 a). Wytrzymałość stali na rozciąganie, z której zostały wykonane włókna stalowe, w oparciu o informacje producenta wynosiła 700 MPa. Właściwości świeżej mieszanki betonowej takie jak granica płynięcia i lepkość plastyczna określono za pomocą metody rozplywu stożka (rysunek 37 b). Lepkość plastyczna wynosiła 12,5 s, a granica płynięcia wyniosła 650 mm (rysunek 37 c); które zostały określone w zgodzie z normą [140]. Nie zaobserwowano wycieku zaprawy oraz segregacji składników mieszanki, co świadczy o prawidłowym wykonaniu mieszanki betonowej.

Tabela 18. Skład mieszanki betonowej.

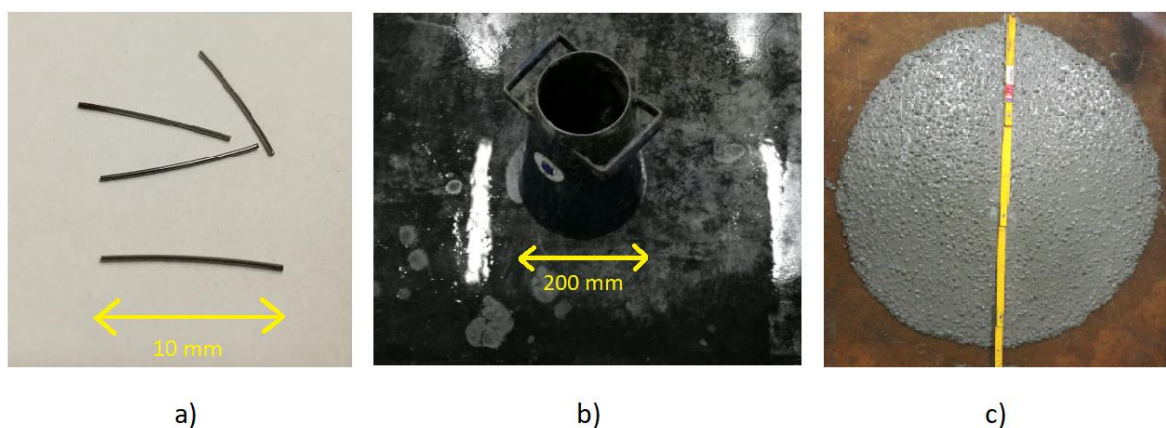
Cement [kg/m ³]	Sika Fume [kg/m ³]	Kruszywo grube [kg/m ³]	Kruszywo drobne [kg/m ³]	Superplastyfikator [kg/m ³]	Włókna stalowe [kg/m ³]	Woda [kg/m ³]	W/C [-]
500	60	1000	650	17,5	78	160	0,32

Tabela 19. Skład chemiczny cementu CEM I 52,5 R.

CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Cl	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ Oeq	Straty prażenia
64,61	2,61	20,04	5,56	1,46	2,55	0,058	0,103	0,791	0,623	1,81



Rysunek 36. Krzywa uziarnienia kruszywa drobnego i grubego.



Rysunek 37. Stalowe zbrojenie rozproszone (a), stożek rozplywu (b) test rozplywu (c).

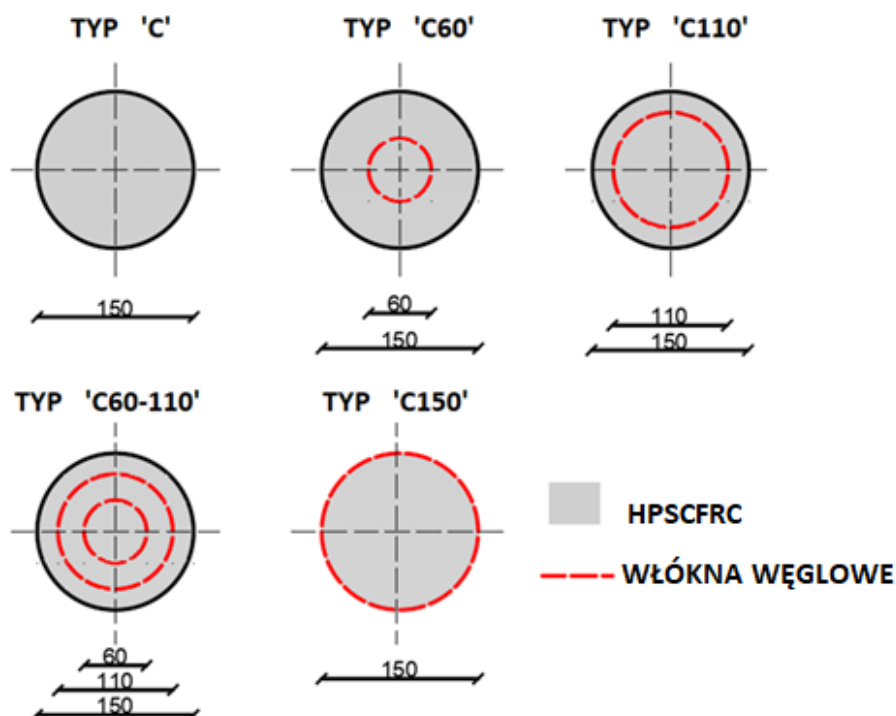
W analizowanym etapie badań laboratoryjnych przebadano 20 próbek betonowych. Wszystkie próbki miały wysokość 300 mm i zewnętrzną średnicę 150 mm. Kolumny o przekroju kołowym zostały podzielone na pięć grup, każda reprezentowana przez cztery próbki (Tabela 20): beton HPSCFRC; jako referencyjny (oznaczony C1-4), beton z jednym pierścieniem CFCRr 110 mm (C110-1-4), beton z jednym pierścieniem CFCRr 60 mm (C60-1-4), beton z pierścieniami CFCRr 60 mm i 110 mm (C60-110-1-4) i beton wzmocniony włóknami węglowymi przy użyciu matrycy cementowej (C150-1-4). Na przykład oznaczenie C60-110-1 opisuje pierwszą próbką wykonaną z betonu HPSCFRC, w której zawarte są dwa pierścienie CFCRr o średnicach 60 mm i 110 mm. Pierścienie CFCR zostały umieszczone

pośrodku osi symetrii i przymocowane w formie do podstawy za pomocą silikonu. Na rysunku 38 przedstawiono przekrój poprzeczny wykonanych próbek.

Tabela 20. Analizowane próbki.

Rodzaj	Średnica pierścienia CFRr [mm]
C	-
C60	60
C110	110
C60-110	60 i 110
C150	150*

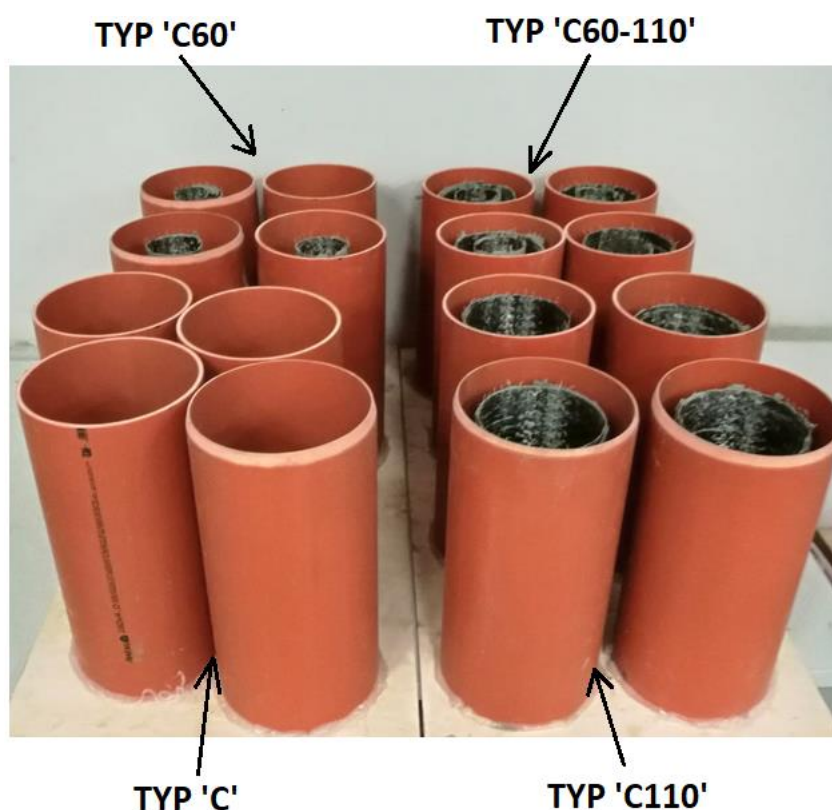
*włókna zostały przyklejone do powierzchni zewnętrznej betonu



Rysunek 38. Przekrój poprzeczny analizowanych próbek.

Jako formę dla próbek zastosowano rurę polipropylenową o wysokości 310 mm i średnicy wewnętrznej 150 mm. Betonowanie wykonano w sposób ciągły dla wszystkich próbek. Następnego dnia po betonowaniu, próbki umieszczono w kąpeli wodnej, po czym dojrzewały przez 28 dni. Następnie, podstawy przycięto i wyszlifowano do wysokości 300 mm. Umieszczenie pierścieni CFRr wewnątrz rury przedstawiono na rysunku 39. W przypadku betonu HPSCFRC ze zbrojeniem zewnętrznym z włókien węglowych,

powierzchnia betonu została wyszlifowana tarczą bitumiczną, aby zapewnić lepsze właściwości adhezyjne. Następnie powierzchnia betonu została oczyszczona, umyta i wysuszona. Tą samą matrycę cementową, jak w przypadku pierścieni CFCRr, zastosowano do połączenia włókien węglowych z betonem HPSCFRC. W tym przypadku zapewniono zakład maty równy 150 mm. Najpierw na powierzchnię betonu nałożono matrycę cementową, następnie na nią nałożono jedną warstwę maty z włókien węglowych, a na końcu nałożono matrycę cementową na matę. Grubość warstw matrycy cementowej pod i nad warstwą włókien węglowych dla próbek typu „C150” wynosiła 5 mm.

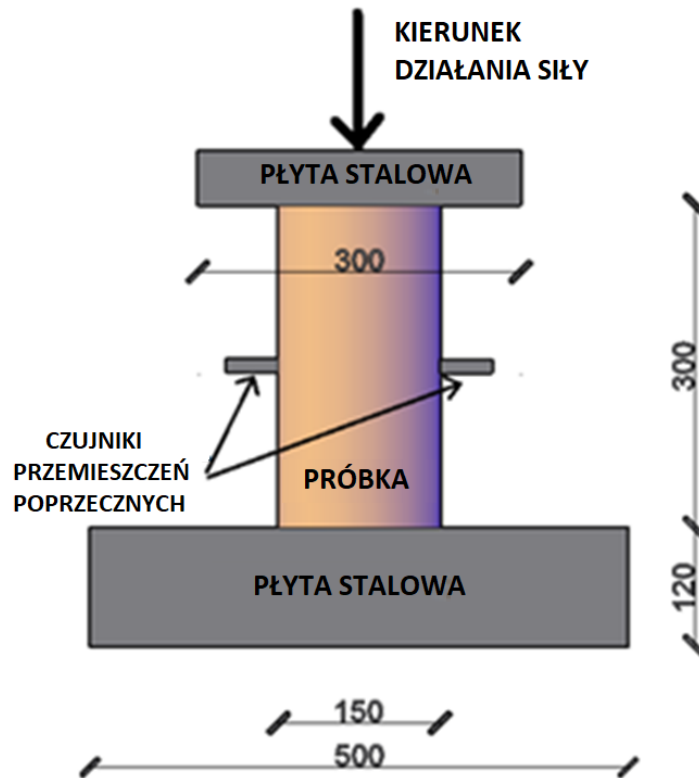


Rysunek 39. Pierścienie zbrojenia CFCRr wewnątrz szalunku z rur polipropylenowych.

8.1.3. Aparatura badawcza i procedura badań

Próbki przebadano w teście jednoosiowego ściskania przy użyciu prasy hydraulicznej o maksymalnej sile nacisku 6000 kN (Walter + Bai AG, Löhningen, Szwajcaria) w Laboratorium Badań Konstrukcji na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej. Wszystkie badania przeprowadzono w laboratorium przy temperaturze powietrza $25 \pm 1^\circ \text{C}$ i wilgotności $55 \pm 5\%$. Podczas próby ściskania zapewniono stałą prędkość odkształcenia osiowego równą $4 \times 10^{-5} [\text{s}^{-1}]$. Przemieszczenia osiowe i poprzeczne (w połowie wysokości próbek) zmierzono za pomocą czujników elektronicznych

o dokładności 1×10^{-3} mm. Schemat układu testowego przedstawiono rysunku 40. Moduł Younga próbek określono w zakresie charakterystycznych wartości naprężeń od 5% do 40% przewidywanej wytrzymałości każdej próbki. Test przeprowadzono zgodnie z normą [120].



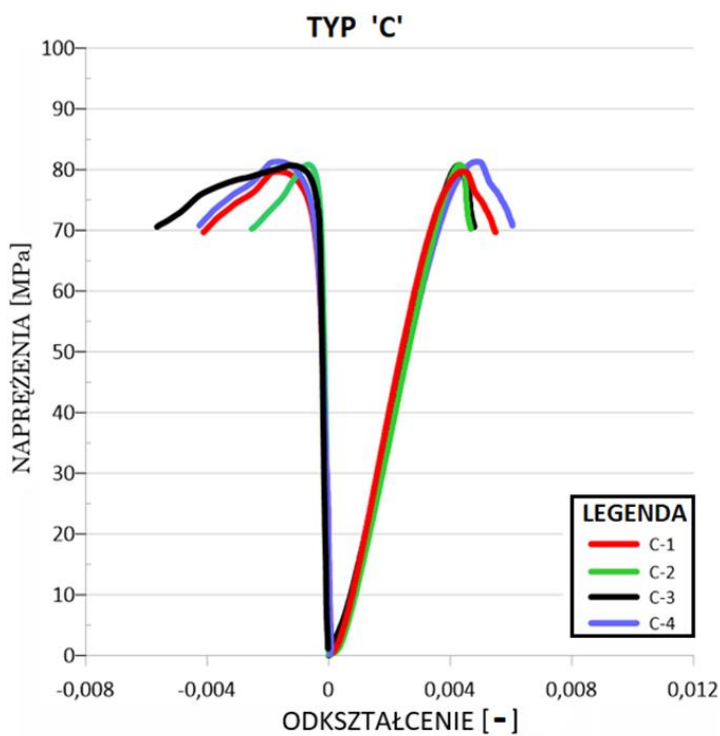
Rysunek 40. Schemat badania próbek z zastosowaniem czujników przemieszczeń w połowie wysokości próbek.

8.1.4. Wyniki przeprowadzonych badań

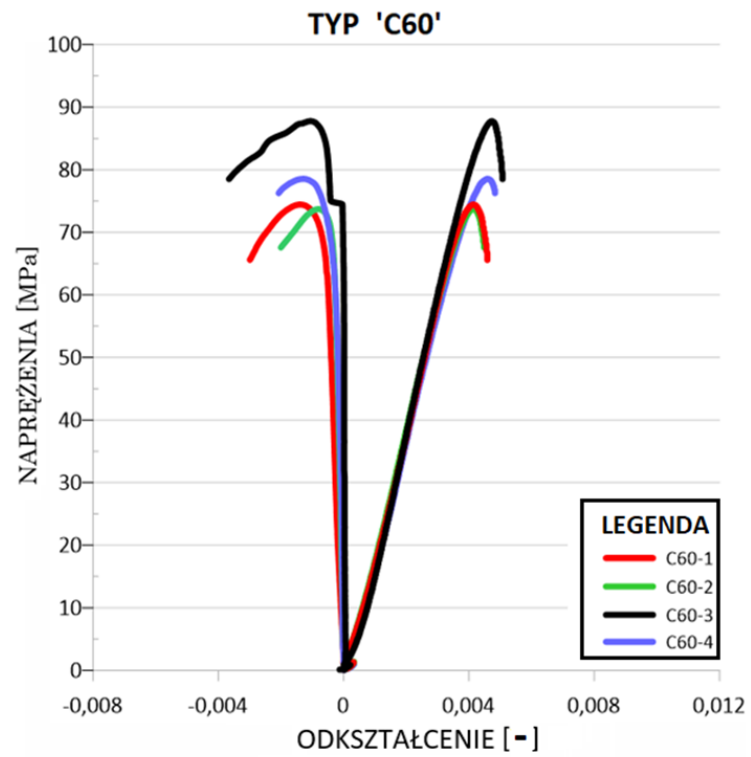
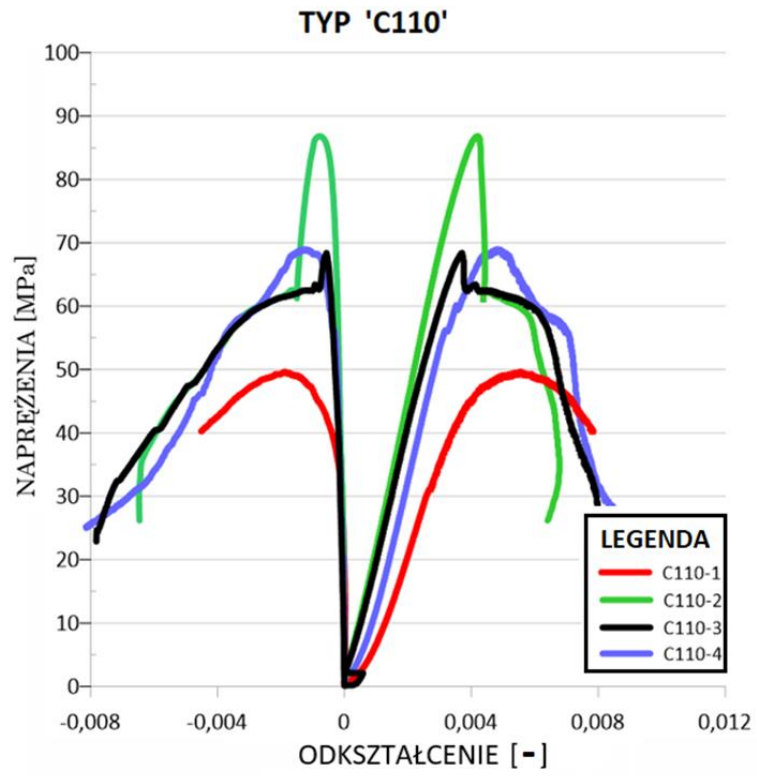
8.1.4.1. Wybrane właściwości mechaniczne przebadanych próbek

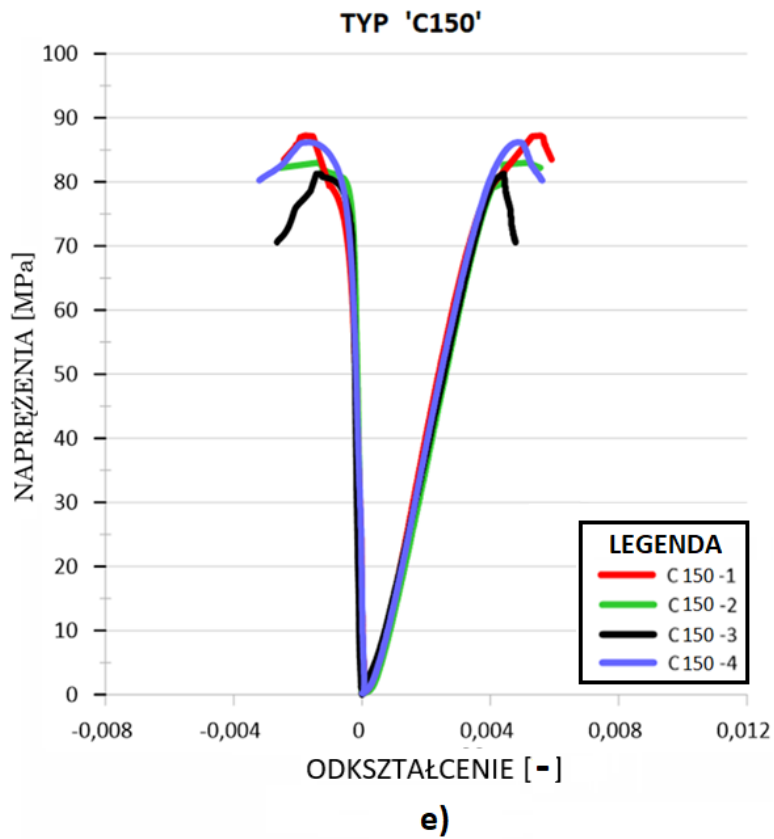
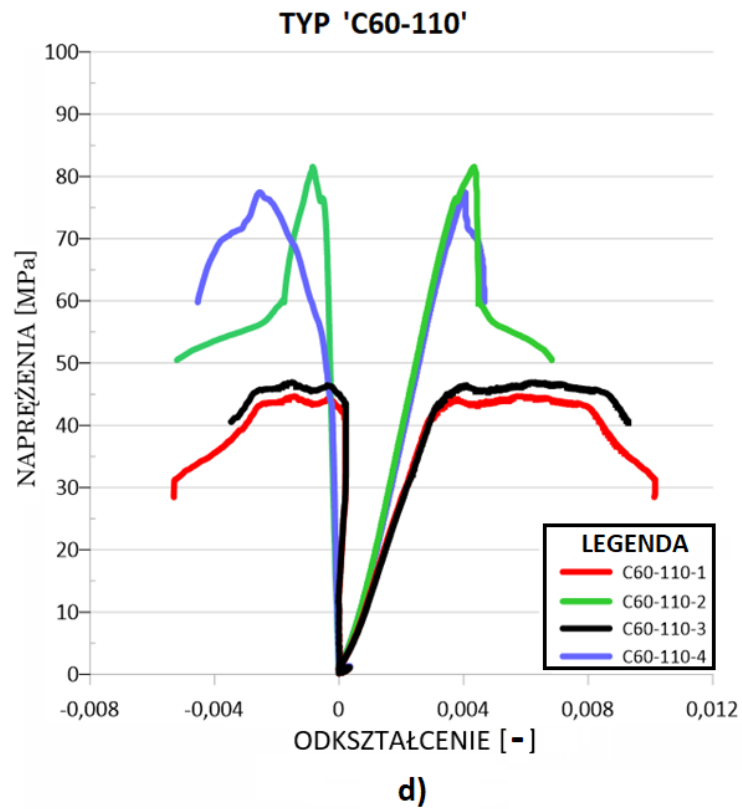
Charakterystyka pracy HPSCFRC z pierścieniami CFCRr została przedstawiona za pomocą krzywych naprężenie-odkształcenie. Zależności te pokazano na rysunkach 41 a – e. Oś pionowa przedstawia naprężenia uzyskiwane podczas ściskania próbek. Pozioma dodatnia część wykresów przedstawia odkształcenie osiowe, a w części ujemnej – odkształcenia poprzeczne. W tabeli 21, w celu przedstawienia parametrów statystycznych, pokazano wybrane właściwości badanych próbek. Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, że przebieg naprężeń i odkształceń w przypadku betonu HPSCFRC jest liniowy i sprężysty, z pewnym niewielkim quasi-plastycznym zakresem pracy. Ten typowy przebieg

charakterystyki naprężenie-odkształcenie wiąże się z obecnością włókien stalowych w strukturze betonu. Cechą charakterystyczną tego betonu jest to, że po przekroczeniu maksymalnego naprężenia ściskającego, pomimo naruszenia jego struktury, nie następuje gwałtowne zniszczenie. Zauważalny jest niewielki, ale znaczący odcinek plastycznego płynięcia materiału. Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu HPSCFRC wyniosła 81,04 MPa, przy bardzo małym odchyleniu standardowym wynoszącym 0,32 MPa. Wskazuje to, że zarówno produkcja, układanie mieszanki betonowej oraz dojrzewanie próbek przebiegło zgodnie z zasadami technologii betonu. Średnie odkształcenia osiowe i poprzeczne betonu HPSCFRC wyniosły odpowiednio 4,48‰ i 1,30‰. Po przekroczeniu zakresu quasi-plastycznego można zaobserwować następstwo krucho – plastycznego zniszczenia betonu.



a)





Rysunek 41. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla analizowanych próbek: grupa C (a), grupa C110 (b), grupa C60 (c), grupa C60-110 (d), grupa C150 (e).

Tabela 21. Wybrane właściwości mechaniczne analizowanych próbek.

Próbka	Wytrzymałość na ściskanie R_c [MPa]	Średnia wytrzymałość na ściskanie \bar{R}_c [MPa]	Odchylenie standardowe σ [MPa]	Wzrost/spadek wytrzymałości średniej w odniesieniu do betonu referencyjnego [%]	Osiowe odkształcenia w momencie zniszczenia ε [-]	Wartość średnia osiowych odkształceń $\bar{\varepsilon}$ [-]	Odształcenia poprzeczne w momencie zniszczenia ε_p [-]	Wartość średnia odkształceń poprzecznych $\bar{\varepsilon}_p$ [-]	Moduł Younga E [GPa]	Wartość średnia modułu Younga \bar{E} [GPa]
C-1	81,31				4,51		1,64		34,67	
C-2	80,81	81,04	0,32	0	4,29	4,48	0,67	1,30	31,78	34,89
C-3	80,71				4,27		1,23		36,78	
C-4	81,31				4,86		1,64		36,31	
C60-1	74,44				4,16		1,39		34,77	
C60-2	73,70	78,62	6,47	-2,99	4,15	4,41	0,81	1,34	34,93	34,42
C60-3	87,78				4,72		1,06		35,65	
C60-4	78,54				4,61		1,33		34,34	
C110-1	49,32				5,83		2,17		30,36	
C110-2	86,82	68,35	15,31	-15,66	4,29	4,71	0,78	1,18	38,29	37,65
C110-3	68,39				3,80		0,57		43,20	
C110-4	68,86				4,90		1,18		38,75	
C60-110-1	44,40				6,49		1,65		28,05	
C60-110-2	81,53	62,49	19,73	-22,89	4,34	5,51	0,85	1,71	35,49	33,51
C60-110-3	46,56				7,20		1,79		27,08	
C60-110-4	77,45				4,02		2,55		43,40	
C150-1	87,11				4,63		1,56		36,45	
C150-2	82,76	84,29	2,69	4,01	4,42	4,58	1,05	1,23	32,48	35,01
C150-3	81,35				4,56		1,12		35,15	
C150-4	85,94				4,71		1,18		35,97	

W przypadku betonu z jednym 60 mm-wym pierścieniem CFCRr zaobserwowano podobne odkształcenie i naprężenia, jak w przypadku HPSCFRC. Średnią maksymalną wytrzymałość próbek C60 określono na poziomie 78,62 MPa, czyli niespełna o 3% mniej niż HPSCFRC. Wartość ta znajduje się w granicach 5% błędu statystycznego. Główna różnica dotyczy odchylenia standardowego, w przypadku C60 jest równa 6,47 MPa, podczas gdy dla betonu HPSCFRC zaledwie 0,32 MPa. W odniesieniu do średnich odkształceń osiowych i poprzecznych wyniki są prawie identyczne jak dla HPSCFRC. Jednak jedyną różnicą jest zachowanie C60 po przekroczeniu maksymalnego naprężenia ściskającego. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie ma w tym odcinku również krucho-plastyczny przebieg, lecz bardziej kruchy niż w przypadku HPSCFRC. Grupa próbek C110 charakteryzuje się znacznym odchyleniem standardowym średniej wytrzymałości na ściskanie, które wynosi 15,31 MPa. W tym przypadku zaobserwowano o 15,66% niższą wytrzymałość na ściskanie. Po osiągnięciu maksymalnej nośności odnotowano gwałtowny spadek sztywności. Poprzez zastosowanie dwóch pierścieni CFCRr o średnicy 60 i 110 mm średnia wytrzymałość na

ściskanie ma najniższą wartość w zestawieniu z pozostałymi typami próbek. W przypadku próbek C60-110 odnotowano największe odchylenie standardowe wytrzymałości na ściskanie oraz zróżnicowane odkształcenia osiowe i poprzeczne. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie różni się w obrębie tego samego rodzaju próbek. Zachowanie dwóch próbek jest liniowo-sprężyste przed uzyskaniem maksymalnych naprężeń ściskających, plastyczne do odkształcenia osiowego równego 0,008, i krucho-plastyczne po przekroczeniu tej wartości. Dla tych dwóch próbek maksymalna wytrzymałość na ściskanie nie przekracza wartości 50 MPa. Wartości te różnią się od pozostałych dwóch próbek, których zachowanie jest zbliżone do grupy próbek C60. Podczas formowania konstrukcji betonowych, a zwłaszcza w cienkich elementach, można było zaobserwować efekt ściany [141]. Zjawisko to może prowadzić do zaburzeń, takich jak niższa miejscowa zawartość zaprawy cementowej w mieszance betonowej. Z tym efektem może być związane znaczne odchylenie standardowe części próbek. Średnia wartość modułu Younga jest podobna dla wszystkich analizowanych grup. Najwyższą średnią wartość modułu sprężystości podłużnej zaobserwowano w przypadku grupy C110, która wynosi 37,65 GPa. Rozważając HPSCFRC wzmocniony jedną zewnętrzną warstwą tkaniny z włókien węglowych przy użyciu matrycy cementowej (grupa C150) można zauważyć, że wytrzymałość na ściskanie jest podobna do wytrzymałości betonu HPSCFRC. Wzrost średniej wytrzymałości na ściskanie tylko o 4,01% mieści się w granicach błędu statystycznego. W tym przypadku odnotowano niewiele niższe średnie odkształcenie poprzeczne podczas zniszczenia w odniesieniu do próbek referencyjnych. Średnie odkształcenie osiowe i sztywność są nieznacznie wyższe w porównaniu z grupą próbek „C”. W zależności od charakterystyki naprężenie-odkształcenie, dla każdej próbki odnotowano zmienną wartość sztywności.

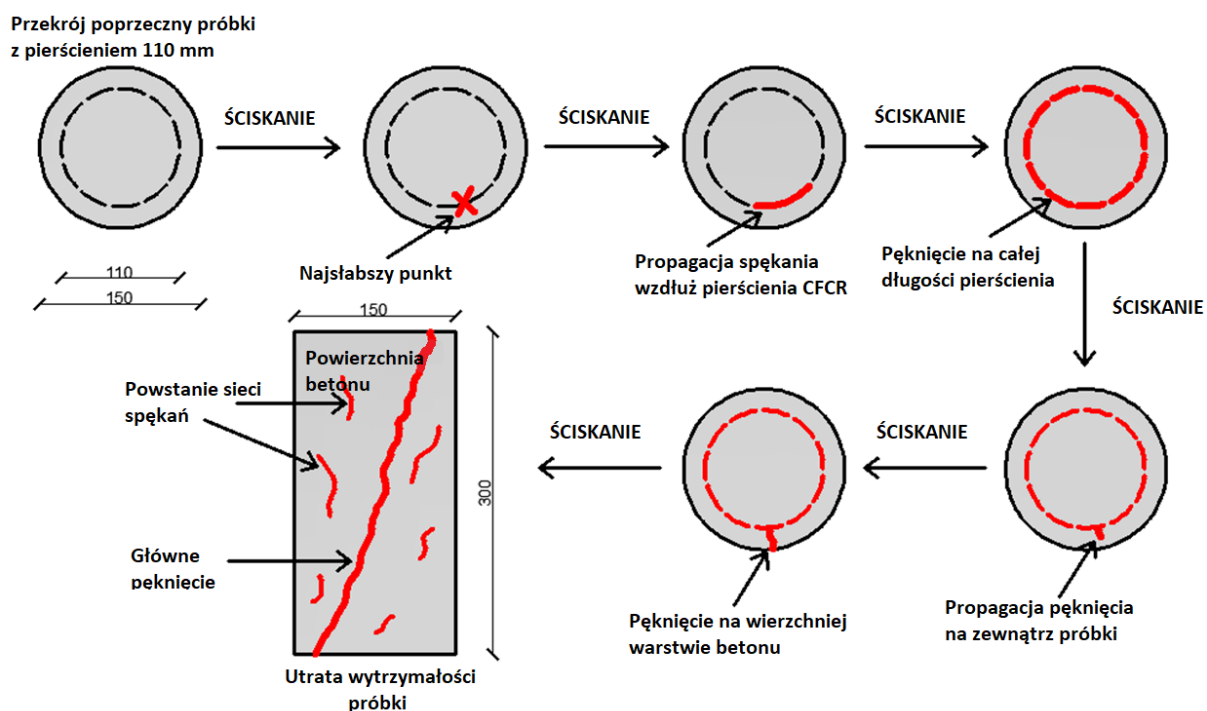
8.1.4.2. Przebieg zniszczenia próbek

Typowe reprezentatywne modele zniszczenia próbek z pierścieniami CFCRr przedstawiono na rysunku 42. Wszystkie próbki uległy zniszczeniu bez eksplozyjnego przebiegu, co jest sprzeczne z klasycznym zachowaniem elementów betonowych wzmocnianych warstwą CFRP (przy użyciu żywicy epoksydowej) na ich powierzchni. Jak pokazano na rysunku 42, w przypadku próbek z pierścieniami CFCRr wystąpiło duże pionowe pęknięcie po wysokości próbek. Zaobserwowano, że pęknięcie rozchodzi się od zewnętrznej powierzchni styku między betonem a pierścieniem CFCRr. W miarę wzrostu obciążenia w strukturze betonowej powstaje większa sieć spękań, co z kolei prowadzi do progresywnego rozwoju sieci nieciągłości. Następnie pomiędzy pierścieniem CFCRr,

a zewnętrzną warstwą betonu propagują pęknięcia, które rozprzestrzeniają się z powierzchni pierścienia CFRr w kierunku zewnętrznym. W chwili zniszczenia na powierzchni zewnętrznej próbek można zaobserwować liczne pęknięcia, z których można wyróżnić od jednego do dwóch dużych pęknięć (spękań). Ten rodzaj zniszczenia jest spowodowany brakiem odpowiedniej przyczepności między pierścieniami CFRr i betonem HPSCFRC. Z tego powodu, siły ścinające na zewnętrznej powierzchni pierścieni CFRr prowadzą do zniszczenia zewnętrznej części betonu, a w konsekwencji do utraty nośności próbek. Warto podkreślić, że ze względu na obecność rozproszonego zbrojenia stalowego oraz sposób sterowania przebiegiem badania (przyrost odkształceń próbki) wszystkie próbki pozostały spójne. Wynika to z dobrej przyczepności zbrojenia rozproszonego do wysokowytrzymałościowego betonu samozagęszczalnego (HPSCC) oraz niewielkich wymiarów zbrojenia, co poprawia przyczepność [142]. Etapy procesu niszczenia próbki w teście jednoosiowego ściskania, na przykładzie próbki typu „C110”, przedstawiono na rysunku 43. W przypadku pozostałych grup betonu z pierścieniami CFRr zaobserwowano podobny proces zniszczenia.



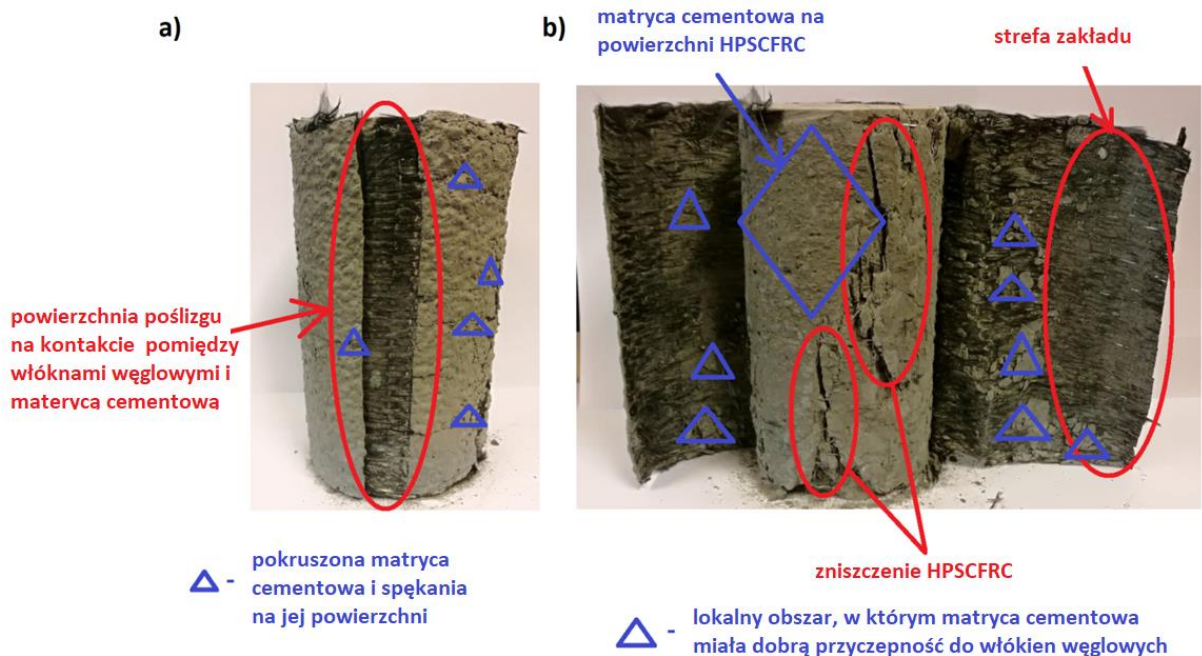
Rysunek 42. Reprezentatywny przebieg zniszczenia betonu HPSCFRC zawierającego zbrojenie w postaci CFRr (próbka C110-3).



Rysunek 43. Zaobserwowane etapy postępującego procesu zniszczenia próbek, reprezentatywne dla próbek zawierających zbrojenie CFRR, na przykładzie próbki betonowej z jednym pierścieniem CFRR o średnicy 110 mm.

W celu lepszego wyjaśnienia zjawiska wpływu zbrojenia CFRR na charakterystykę naprężenie-odkształcenie betonu HPSCFRC, przeanalizowano zniszczenie betonu zewnętrznio wzmocnionego matą z włókien węglowych przy użyciu matrycy cementowej. Rysunek 44 przedstawia typowy charakter zniszczenia tego rodzaju próbek. Jak widać, pojawiła się powierzchnia poślizgu na styku włókien węglowych i matrycy cementowej (rysunek 44 a). Ze względu na wzrost naprężeń w próbce, a w szczególności wzrost odkształceń poprzecznych, zakład został ścięty po całej wysokości próbki, w miejscu łączenia się włókien węglowych ze sobą. Naprężenie ścinające było wyższe niż przyczepność pomiędzy włóknami węglowymi a matrycą cementową. Na powierzchni próbek można było zaobserwować spękaną matrycę cementową. Rysunek 44 b przedstawia więcej szczegółów dotyczących charakterystyki kontaktu. Włókna węglowe nie zostały rozerwane, a struktura HPSCFRC została zniszczona. Na części powierzchni betonu można było zaobserwować matrycę cementową, co pokazuje, że przyczepność między betonem i matrycą cementową była ogólnie dobra. Dobre właściwości adhezyjne między włóknami węglowymi i matrycą cementową występowały lokalnie, w tym przypadku przyczepność była wyższa, niż między HPSCFRC, a matrycą cementową (matryca cementowa została oderwana od powierzchni

betonu). Warto podkreślić, że matryca cementowa nie ma takich samych właściwości i parametrów wiązania jak żywica epoksydowa, co prowadzi do braku pełnego wnikanie i przesączenia struktury włókien węglowych analizowanym spoiwem.



Rysunek 44. Typowy przebieg zniszczenia HPSCFRC wzmocnionego jedną warstwą włókien węglowych przy użyciu matrycy cementowej: powierzchnia poślizgu (a) i oderwane włókna węglowe od powierzchni betonu (b).

8.1.5. Wnioski

W rozdziale tym przeanalizowano wpływ lokalizacji pierścieni kompozytowych z włókien węglowych wewnątrz struktury betonu na zachowanie wysokowytrzymałościowego fibrobetonu samozagęszczalnego. Na podstawie wyników eksperymentu można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Przy zastosowaniu wewnętrznych pierścieni CFRCr można zaobserwować spadek nośności elementów betonowych w porównaniu do betonu niewzmacnianego. Wraz ze wzrostem zarówno liczby warstw CFRCr, jak i odległości od środka ciężkości próbek, zmniejsza się wytrzymałość na ściskanie analizowanych próbek. W przypadku zastosowania dwóch pierścieni wewnątrz konstrukcji betonu, zaobserwowano największą utratę wytrzymałości na ściskanie wynoszącą 23% w porównaniu do betonu niewzmacnianego.

2. Nie zaobserwowano współpracy między pierścieniami CFCRr i betonem. Szczególnie zewnętrzna powierzchnia pierścienia CFCRr może być traktowana jako powierzchnia ścinania, co nie pozwala na współpracę między pierścieniami CFCRr i HPSCFRC. Pęknięcia pojawiały się na powierzchni pierścieni CFCRr, a następnie propagowały do zewnętrznych krawędzi próbek, co z kolei prowadziło do ich zniszczenia.
3. Użycie pierścieni CFCRr wewnątrz struktury HPSCFRC nie jest uzasadnione ze względu na trudności wykonawcze i charakterystykę naprężenia-odkształcenia dla każdej analizowanej konfiguracji.
4. Wydajność wzmocnionego betonu HPSCFRC przy użyciu zewnętrznego zbrojenia włókien węglowych zespolonych matrycą cementową nie jest wystarczająca. Ze względu na zaobserwowaną niską przyczepność między zbrojeniem kompozytowym a betonem w próbkach typu „C150”, nie zaleca się wzmocniania tego rodzaju betonu za pomocą włókien węglowych przy użyciu nietopliwej matrycy cementowej.

8.2. Wpływ przygotowania powierzchni betonu oraz rodzaju matrycy zespalającej włókna węglowe z betonem na efektywność wzmocnienia betonu

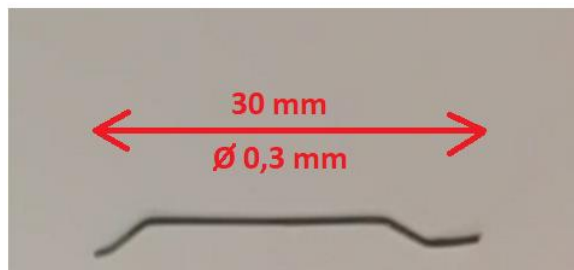
W tej części badań przeprowadzono analizę wpływu rodzaju przygotowanej powierzchni fibrobetonu samozagęszczalnego wysokowytrzymałościowego na efektywność wzmocnienia próbek betonowych przy użyciu włókien węglowych. Jako matrycę zespalającą włókna węglowe z betonem użyto żywicy epoksydową i matrycę cementową.

8.2.1. Materiał i próbki

W ostatnim etapie badań wykonano 76 próbek betonowych walcowych o stosunku wysokości h do średnicy d równym 2 ($h = 200$ mm i $d = 100$ mm) – 72 próbki przeznaczone do wzmocnienia oraz 4 próbki referencyjne. Wszystkie próbki zostały wykonane na bazie fibrobetonu wysokowytrzymałościowego samozagęszczalnego w Laboratorium Konstrukcji Betonowych AGH (rysunek 45). Trzydzieści sześć próbek zostało przeznaczonych do wzmocnienia żywicą epoksydową, kolejne 36 do wzmocnienia przy użyciu matrycy cementowej. Właściwości włókien węglowych i żywicy epoksydowej przedstawiono odpowiednio w tabelach 8 i 9 w rozdziale 7. Skład mieszanki betonowej był taki sam jak w przypadku badań przeprowadzonych w punkcie 8.1.2., z zastrzeżeniem, – że jako mikrozbrojenie rozproszone użyto haczykowate włókna stalowe (z uwagi na lepszą przyczepność do betonu w porównaniu do włókien prostych) o długości 30 mm i średnicy 0,3 mm (rysunek 46). Właściwości świeżej mieszanki betonowej pozostały niezmiennie. Lepkość plastyczna mieszanki betonowej wynosiła 12,5 s, podczas gdy granicę płynięcia określono na poziomie 650 mm.



Rysunek 45. Formy po zabetonowaniu mieszanką betonową.

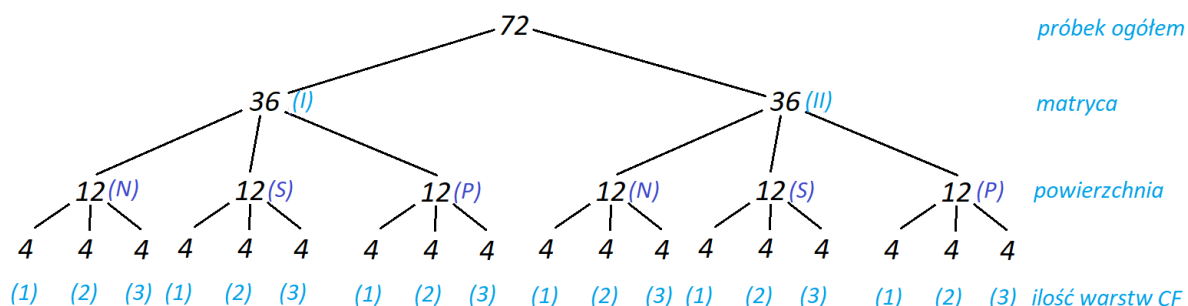


Rysunek 46. Haczykowane stalowe mikrobrojenie rozproszone użyte w badaniach.

Wszystkie 76 próbek przeznaczonych do wzmocnienia podzielono na następujące podgrupy:

- 36 próbek przeznaczonych do wzmocnienia przy użyciu żywicy epoksydowej,
- 36 próbek przeznaczonych do wzmocnienia przy użyciu matrycy cementowej,
- 4 próbki referencyjne.

W każdej podgrupie po 12 próbek poddano piaskowaniu i szlifowaniu, pozostałe 12 próbek miało nieprzygotowaną powierzchnię. Następnie próbki zostały przeznaczone do wzmocnienia 1, 2 i 3 warstwami włókien węglowych, po 4 próbki dla każdej serii. Na rysunku 47 zilustrowano serie próbek z uwzględnieniem zmiennych (rodzaj matrycy i powierzchnia betonu).



oznaczenia:

I - żywica epoksydowa

II - matryca cementowa

N - powierzchnia nieprzygotowana

S - powierzchnia szlifowana

P - powierzchnia piaskowana

Rysunek 47. Podział próbek przeznaczonych do wzmocnienia z uwagi na rozpatrywane zmienne.

Próbki oznaczono w następujący sposób: I/II-N/S/P-1:3-1:4. Przykładowo I-P-2-4 oznacza czwartą próbkę betonową z powierzchnią piaskowaną, wzmocnioną dwiema warstwami włókien węglowych przy użyciu żywicy epoksydowej; natomiast II-N-1-1 oznacza pierwszą próbkę betonową z powierzchnią nieprzygotowaną, wzmocnioną jedną warstwą włókien węglowych przy użyciu matrycy cementowej. Próbki S-1, S-2, S-3 oraz S-4 to próbki świadki, niewzmocnione w żaden sposób.

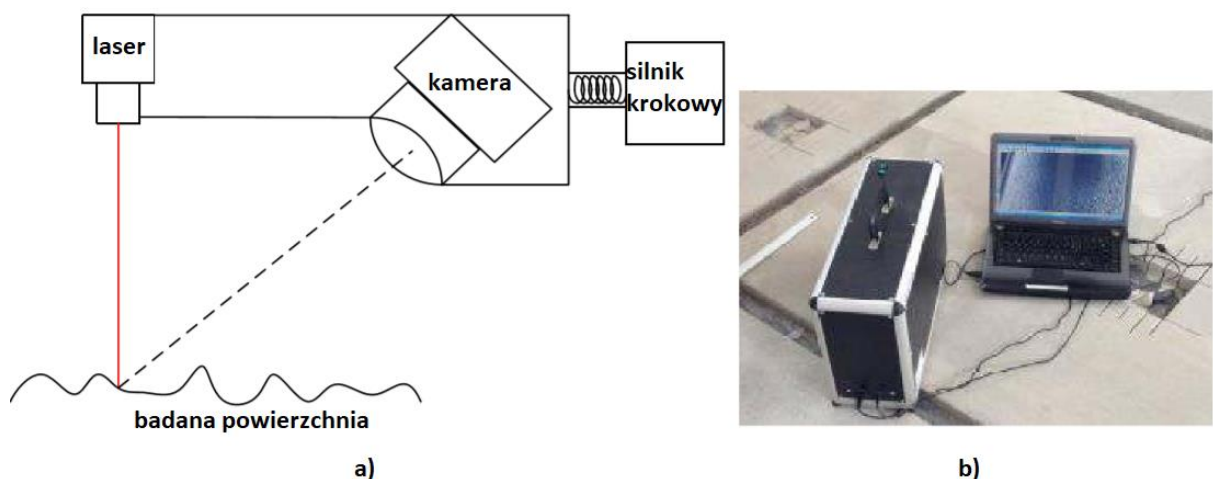
8.2.2. Charakterystyka powierzchni betonowych

8.2.2.1. Skaner laserowy 3D

Charakterystykę powierzchni betonowych zdeterminowano poprzez scanning powierzchni. Skanowanie powierzchni betonowych wykonano przy użyciu nowatorskiego skanera laserowego 3D opartego na metodzie triangulacji laserowej, która polega na pomiarze deformacji linii wytwarzanej przez wiązkę laserową (rysunek 48 a). Odległości między poszczególnymi punktami znajdującymi się na badanej powierzchni są mierzone kamerą napędzaną silnikiem krokowym, dzięki czemu pomiary można wykonywać z dokładnością 15 μm w profilach oddalonych od siebie o 10 μm . Laser ma zwartą budowę, dzięki czemu badania można przeprowadzać zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i terenowych (rysunek 48 b). Urządzenie przypisuje trzy współrzędne do każdego punktu pomiarowego, opisując jego położenie na badanej powierzchni. Plik z danymi pomiarowymi jest zapisywany w formacie .asc. Rezultatem skanowania jest wirtualny obraz 3D morfologii badanej

powierzchni. Obraz jest analizowany w celu uzyskania wartości parametrów opisujących morfologię powierzchni [143].

Główną zaletą nowatorskiego skanera 3D w porównaniu do skanerów poprzednich generacji jest rozmiar badanego obszaru. Skaner sprawdza powierzchnię $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$. Rozmiar analizowanego obszaru odpowiada obszarowi badanemu metodą pull-off – w celu zidentyfikowania przyczepności warstw betonowych. Dlatego też w przeciwieństwie do skanerów, które skanują dużą część powierzchni lub całą powierzchnię badanego elementu, nowatorski skaner 3D umożliwia precyzyjne nieniszczące badanie morfologii powierzchni $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$. Kolejną zaletą skanera jest to, że wartości parametrów określonych w normie [144] można uzyskać za pomocą programów komputerowych przeznaczonych do analizy morfologii powierzchni, przystosowanych do analizy wirtualnych obrazów powierzchni 3D uzyskanych za pomocą tego skanera.



Rysunek 48. Skaner 3D oparty na metodzie triangulacji laserowej: schemat konfiguracji testu (a), widok konfiguracji testu (b). Źródło: [143].

8.2.2.2. Charakterystyka powierzchni betonowej

Krzywą udziału materiałowego profilu nazywa się krzywą obrazującą udział materiałowy profilu na pewnym poziomie (najczęściej wyrażany w procentach) w funkcji odległości c od linii przechodzącej przez najwyższy punkt profilu i równoległej do linii średniej. Krzywa ta nazywana jest również krzywą Abbotta – Firestone’a [145]. Dzięki krzywej kształtu udziału materiałowego profilu możliwe jest przeanalizowanie odporności powierzchni danego materiału na zużycie tribologiczne. Kształt krzywej udziału

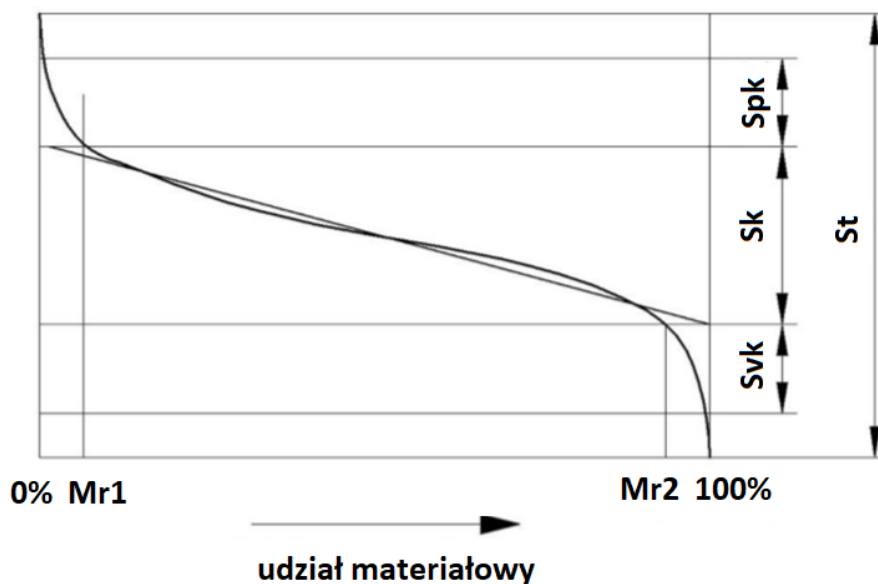
materiałowego determinowany jest przy użyciu parametrów wyznaczanych na jej podstawie [146]. Można wyróżnić następujące obszary w obszarze krzywej udziału materiałowego:

- strefa wzniesień profilu,
- strefa rdzenia profilu,
- strefa wgłębień profilu.

Wyróżnia się następujące parametry krzywej udziału materiałowego profilu chropowatości powierzchni (rysunek 49):

- średnią wysokość wysokich wzniesień położnych ponad rdzeniem profilu chropowatości – zredukowaną wysokość wzniesień S_{pk}
- głębokość części środkowej profilu, wyznaczona przez prostą linearyzującą krzywą udziału materiałowego – głębokość rdzenia chropowatości S_k
- średnią głębokość głębokich wgłębień znajdujących się pod rdzeniem profilu chropowatości
- zredukowaną głębokość wgłębień S_{vk}

Udział materiałowy $Mr1$ odpowiada górnej granicy rdzenia profilu, natomiast udział materiałowy $Mr2$ – dolnej granicy rdzenia.



Rysunek 49. Krzywa udziału materiałowego profilu chropowatości i jej parametry. Źródło: [144].

Chropowatość powierzchni jest obrazowana przez parametr S_k . Jeżeli zaś wartość parametru S_{pk} dla danej powierzchni jest stosunkowo duża, to ma ona duże wzniesienia. W przypadku takim współpraca pomiędzy rozpatrywaną powierzchnią, a inną do niej przylegającą jest mała z uwagi na małe pole kontaktu pomiędzy nimi.

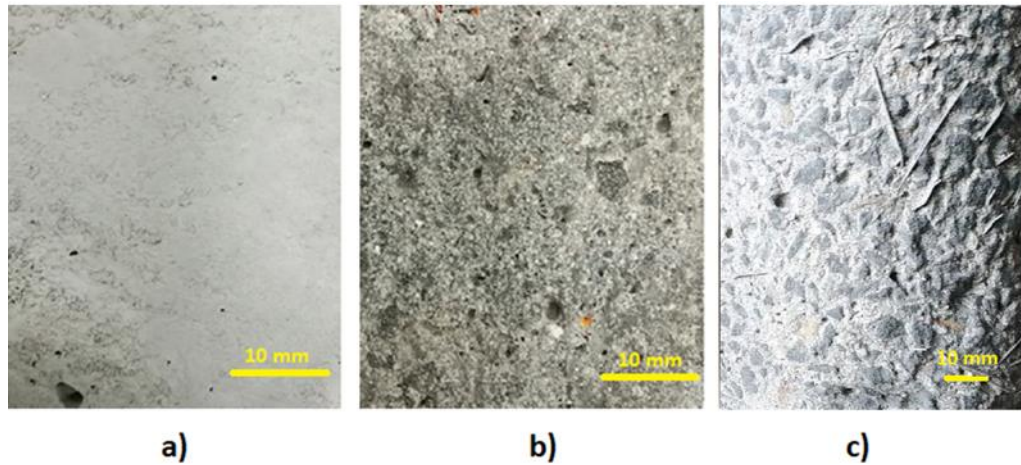
8.2.2.3. *Próbki*

W celu charakterystyki powierzchni betonowych wykonano dodatkowo sześć próbek sześciennych z fibrobetonu samozagęszczalnego wysokowytrzymałościowego (kostek o wymiarach 10×10×10 cm). Po dwie kostki zostały poddane piaskowaniu (próbki P1 i P2) i szlifowaniu powierzchni (próbki S1 i S2), z zastosowaniem tych samych urządzeń, co próbki walcowe analizowane w niniejszym rozdziale. Pozostałe dwie próbki miały nieprzygotowaną powierzchnię (próbki N1 i N2). Szlifowanie powierzchni przeprowadzono przy użyciu tarczy szlifierskiej ceramicznej (rysunek 50 a), natomiast powierzchnię piaskowaną wykonano przy użyciu piaskarki syfonowej z dyszą wodną (rysunek 50 b). Na rysunku 51 przedstawiono wszystkie trzy typy rozważanych powierzchni betonowych.

Następnie wszystkie sześć próbek zostało zeskanowanych w Laboratorium Badań Nieniszczących na Wydziale Budownictwa Lądowego i Wodnego na Politechnice Wrocławskiej, w Katedrze Budownictwa Ogólnego, przy użyciu skanera 3D opisanego w punkcie 8.2.2.1. Z każdej próbki została wybrana jedna powierzchnia 10×10 cm, która została poddana skanowaniu. Jak wspomniano powyżej, urządzenie jest w stanie przeskanować powierzchnię maksymalnie 5×5 cm; takie też skanowanie zostało przeprowadzone.



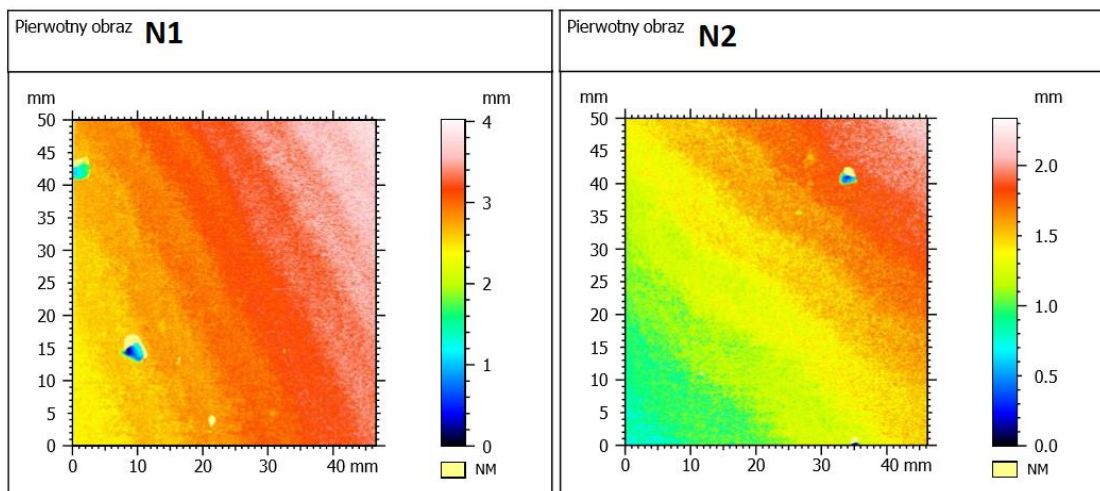
Rysunek 50. Tarcza szlifierska ceramiczna (a) oraz piaskarka syfonowa z dyszą wodną (b).



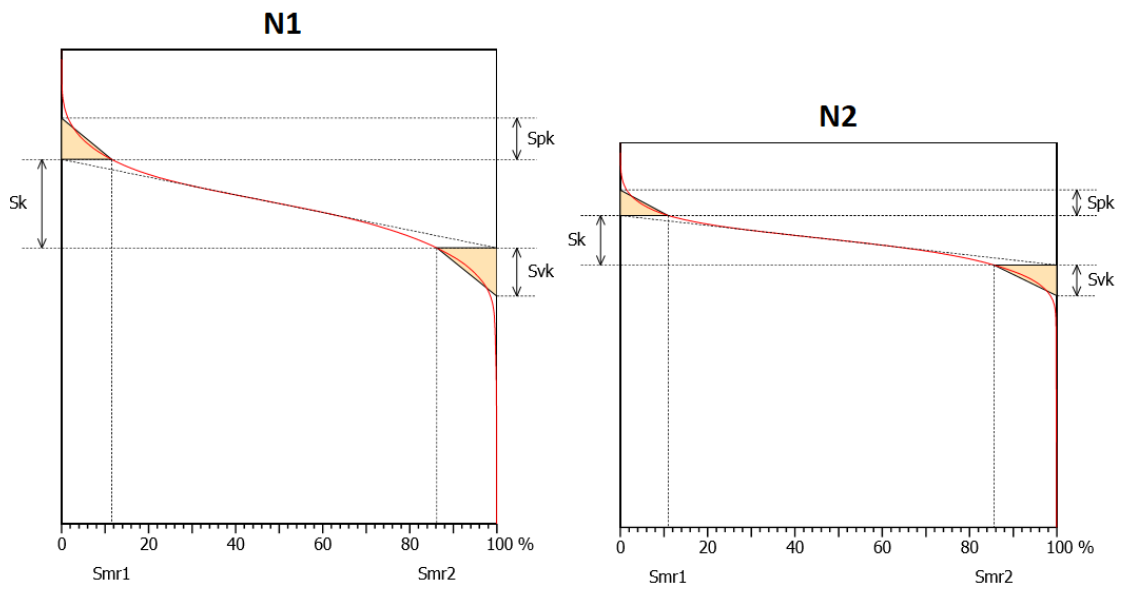
Rysunek 51. Powierzchnia nieprzygotowana (a), powierzchnia szlifowana (b) oraz powierzchnia piaskowana (c).

8.2.2.4. Wyniki

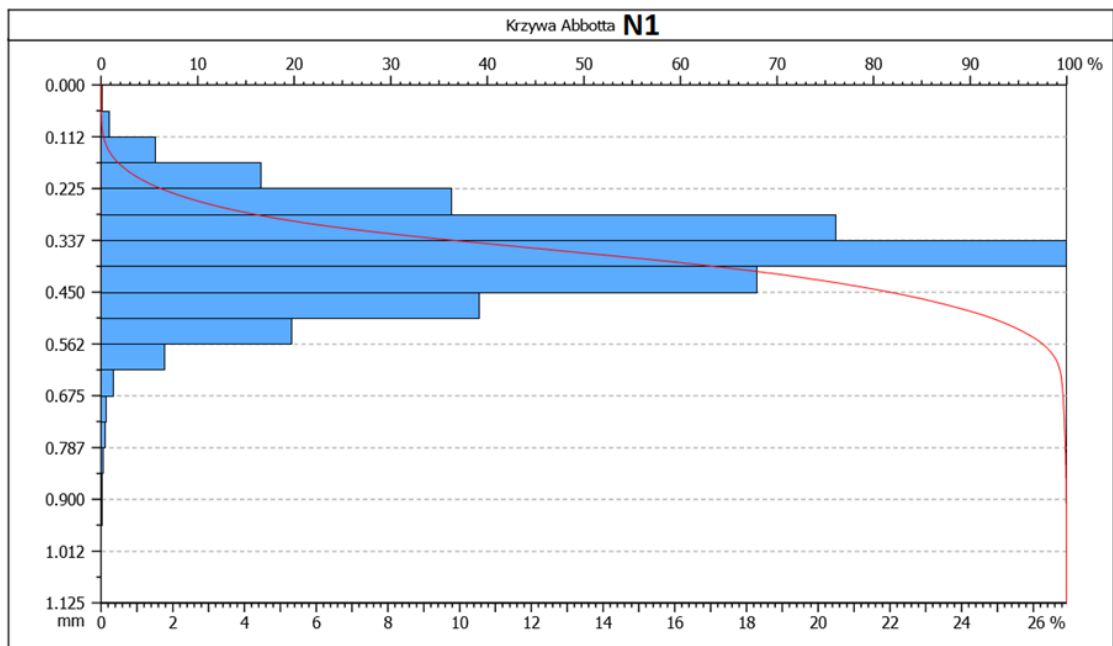
Uzyskano sześć skanów powierzchni 3D, po dwa dla każdego typu powierzchni (rysunki 52 – 54). Obraz przeskanowanych powierzchni oraz ich analiza zostały przedstawione poniżej.

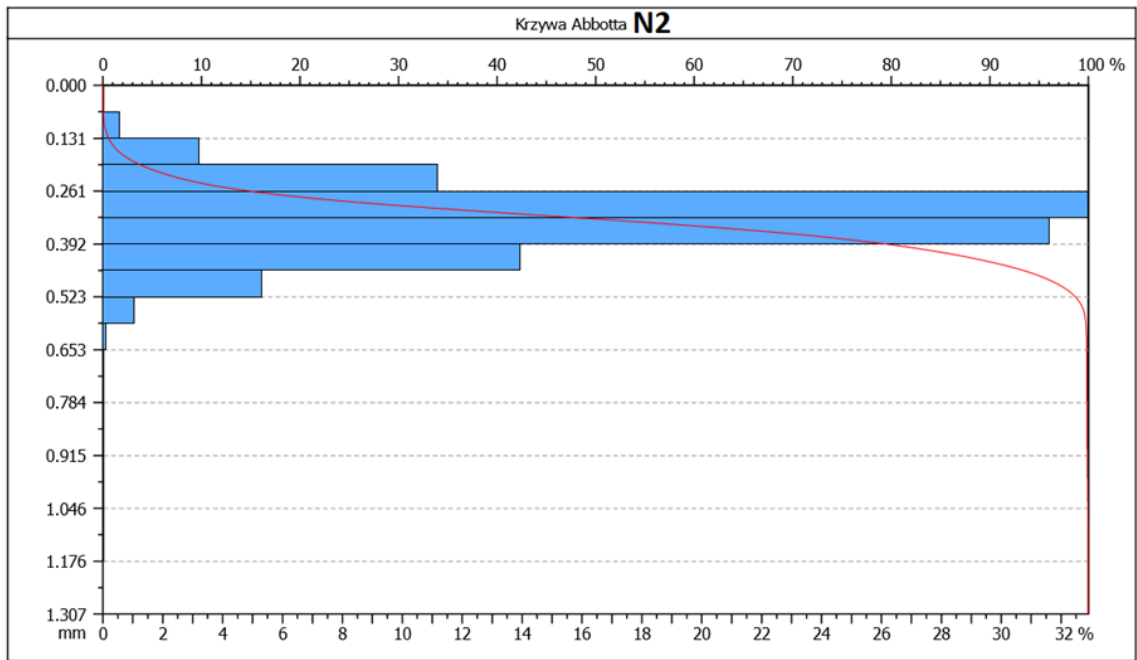


a)



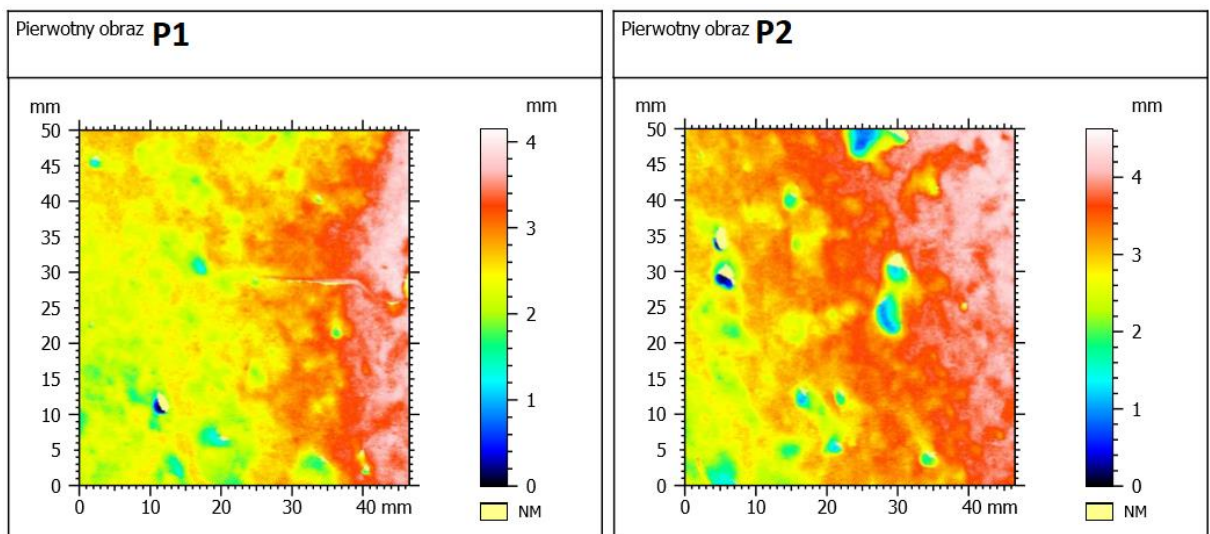
b)



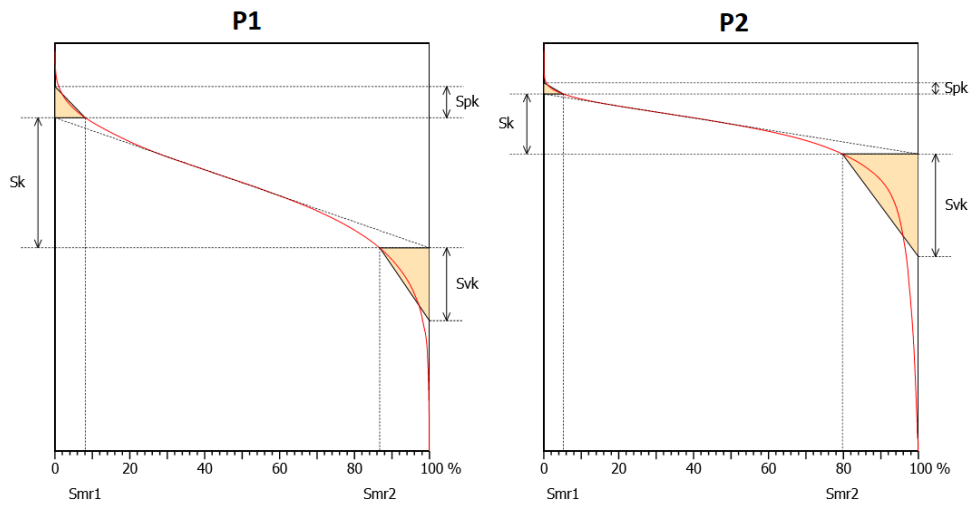


c)

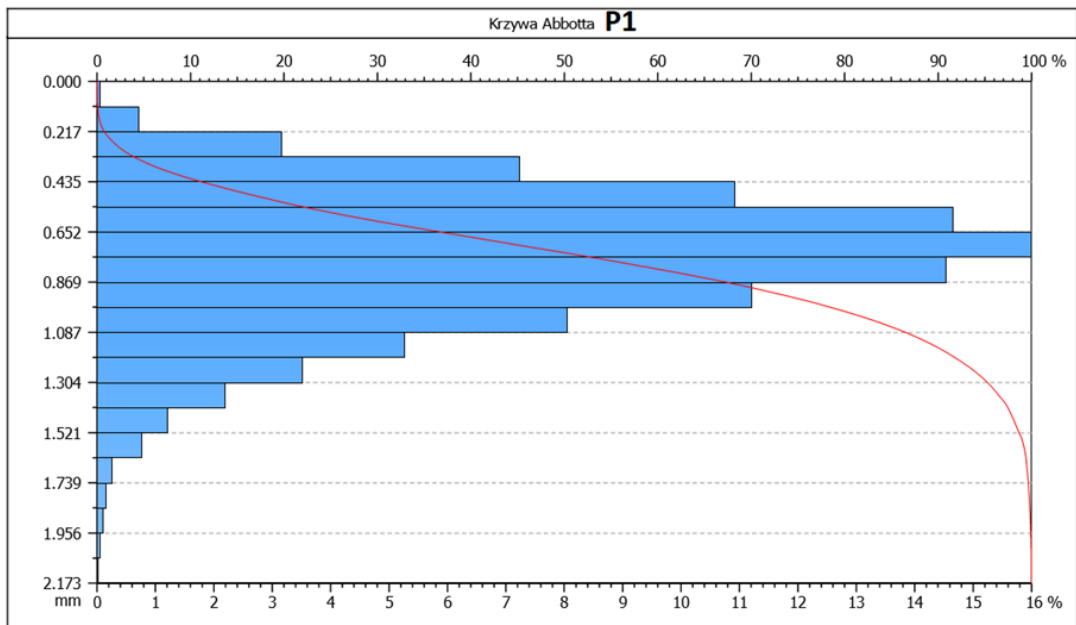
Rysunek 52. Pierwotny obraz powierzchni nieprzygotowanej próbek N1 i N2 po przeskanowaniu skanerem (a) parametry profilu chropowatości (b) oraz krzywe Abotta (c).

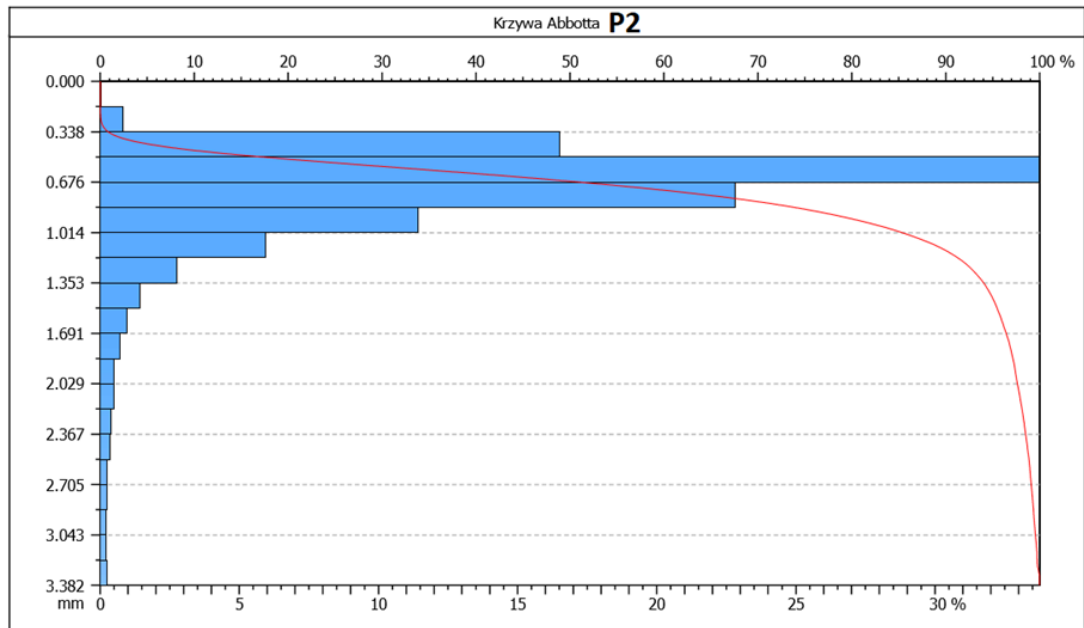


a)



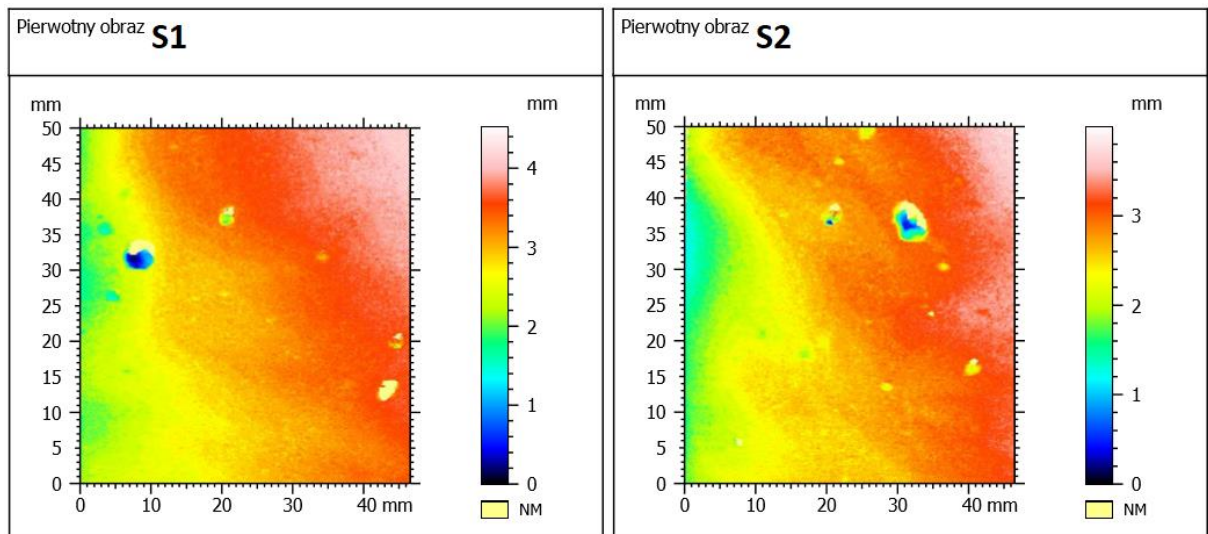
b)



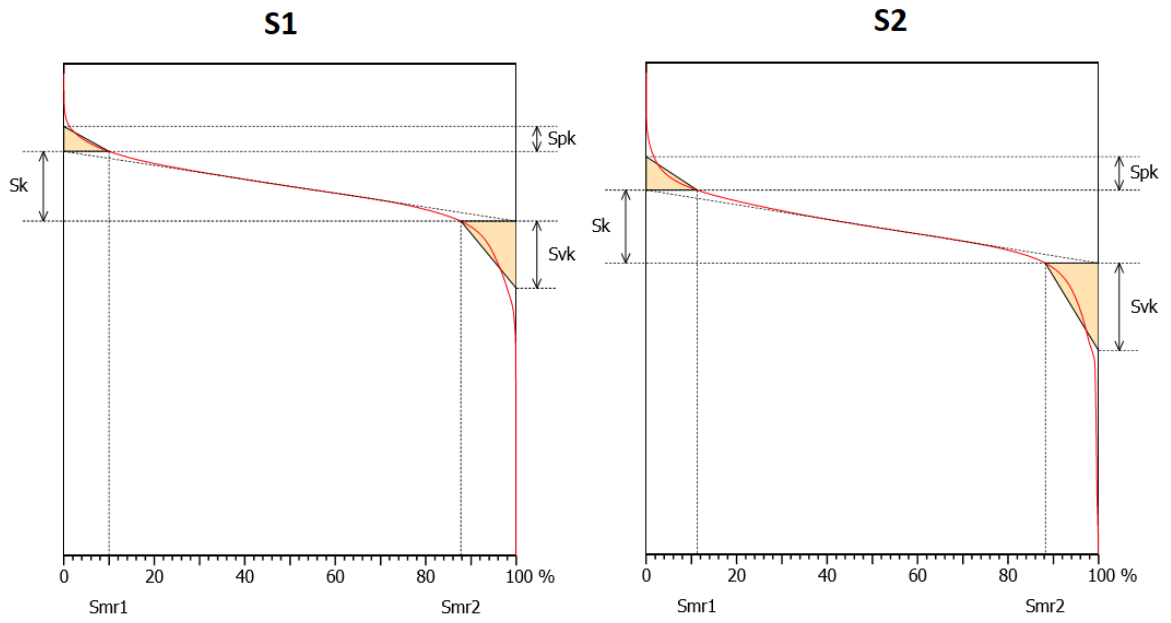


c)

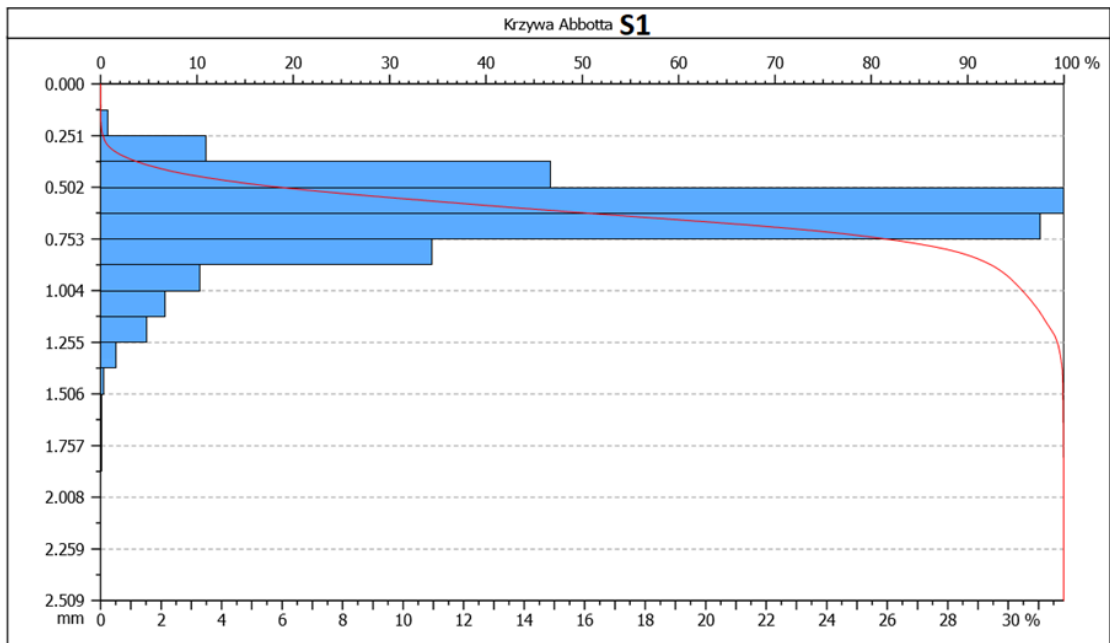
Rysunek 53. Pierwotny obraz powierzchni piaskowanej próbek P1 i P2 po przeskanowaniu skanerem (a) parametry profilu chropowatości (b) oraz krzywe Abotta (c).

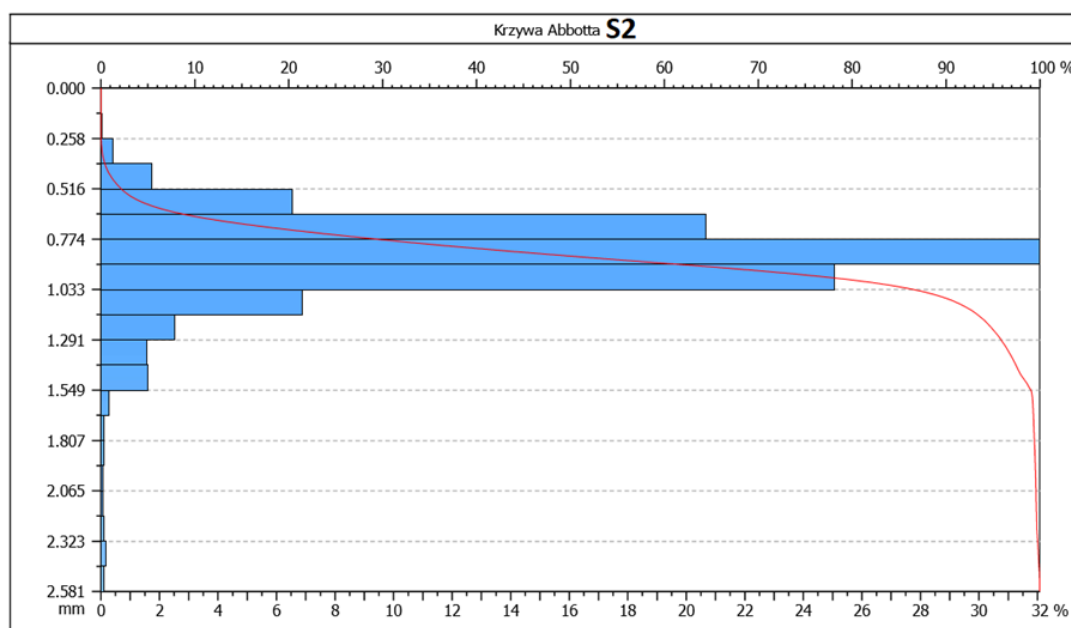


a)



b)





c)

Rysunek 54. Pierwotny obraz powierzchni szlifowanej próbek S1 i S2 po przeskanowaniu skanerem (a) parametry profilu chropowatości (b) oraz krzywe Abotta (c).

W tabeli 22 przedstawiono podstawowe parametry profilu chropowatości analizowanych powierzchni. Analizując uzyskane wartości średnie można stwierdzić, iż udziały materiałowe odpowiadające górnej (S_{mr1}) i dolnej (S_{mr2}) granicy rdzenia są zbliżone dla powierzchni nieprzygotowanej i szlifowanej. W przypadku powierzchni piaskowanej należy zauważyć, iż udział materiałowy odpowiadający górnej granicy rdzenia jest mniejszy o ponad połowę, a dolna granica rdzenia ma najmniejszą wartość z pozostałych dwóch powierzchni. Głębokość rdzenia chropowatości S_k jest najistotniejszym parametrem, który mówi bardzo wiele o charakterze powierzchni. Analizując makroskopowo próbki można było jednoznacznie stwierdzić, iż powierzchnia nieprzygotowana cechuje się najmniejszą chropowatością, powierzchnia szlifowana pośrednią, a powierzchnia piaskowana największą chropowatością. Badania skaningowe potwierdziły ten fakt dając konkretne dane liczbowe.

Tabela 22. Parametry profilu chropowatości.

Parametr	N1	N2	N_{sr}	P1	P2	P_{sr}	S1	S2	S_{sr}
S_k [mm]	0,21	0,1682	0,1891	0,6935	0,497	0,5953	0,3556	0,3833	0,3695
S_{pk} [mm]	0,09805	0,08702	0,0925	0,166	0,09292	0,1295	0,1282	0,1759	0,1521
S_{vk} [mm]	0,1142	0,1047	0,1095	0,3884	0,8511	0,6198	0,3427	0,4596	0,4012
S_{mr1} [%]	11,48	10,96	11,22	8,079	5,176	6,63	9,953	11,25	10,60
S_{mr2} [%]	86,17	85,58	85,88	86,71	79,7	83,21	87,74	88,22	88

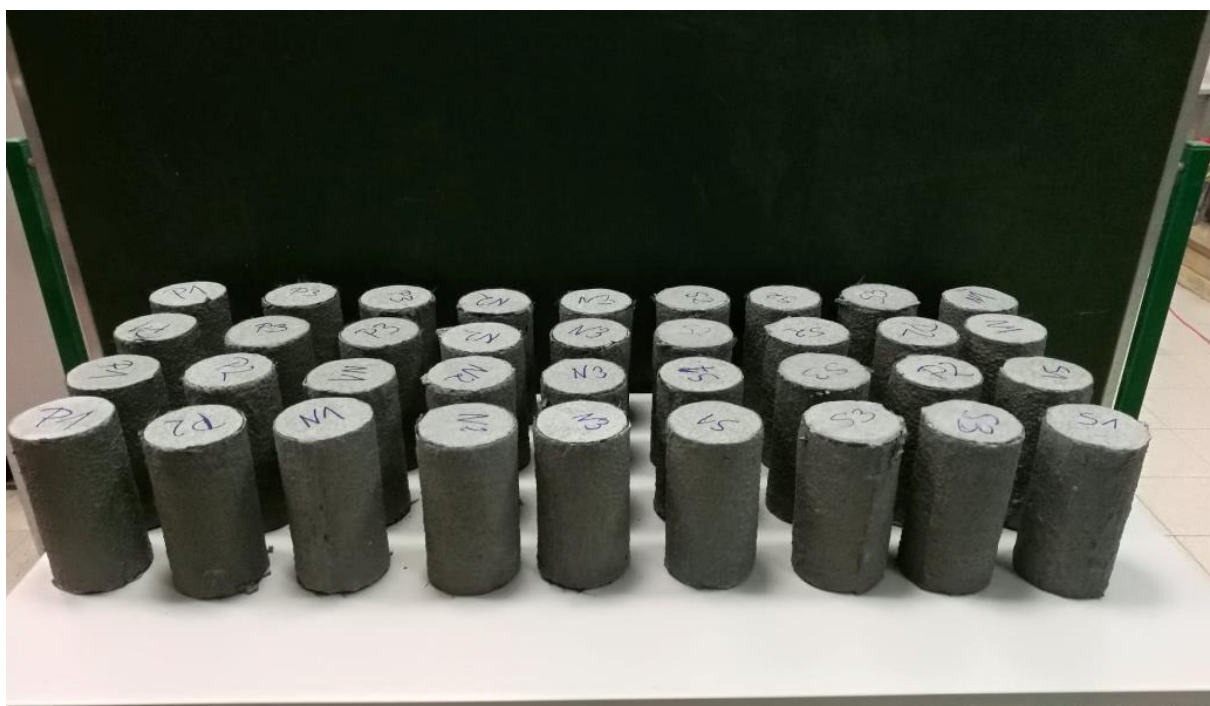
Głębokość części środkowej profilu była najmniejsza dla powierzchni nieprzygotowanej i wynosiła średnio 0,1891 mm, podczas gdy dla powierzchni szlifowanej i piaskowanej była równa odpowiednio 0,3695 mm i 0,5953 mm. Średnia głębokość głębokich wgłębień znajdujących się pod rdzeniem profilu chropowatości była największa dla powierzchni piaskowanej (0,6198 mm), malejąc dla powierzchni szlifowanej (0,4012 mm) i osiągając najmniejszą wartość dla powierzchni nieprzygotowanej (0,1095 mm). Średnia wysokość wysokich wzniesień położonych ponad rdzeniem profilu chropowatości nie różniła się znacząco pomiędzy powierzchniami w porównaniu do paramentów S_k i S_{vk} i wynosiła 0,0925 mm, 0,1295 mm i 0,1521 mm odpowiednio dla powierzchni nieprzygotowanej, piaskowanej i szlifowanej. Podsumowując można stwierdzić, że największą chropowatością cechowała się powierzchnia piaskowana a najmniejszą nieprzygotowana. Powierzchnia szlifowana pod tym względem jest pośrednią pomiędzy dwiema pozostałymi.

8.2.3. Proces laminacji włókien węglowych

Włókna węglowe i matryca cementowa, które zostały użyte w badaniach są tożsame z zastosowanymi w punkcie 8.1. Jako klej epoksydowy zastosowano żywicę epoksydową Sikadur 330 (właściwości w punkcie 7.1.2.). Dla każdej próbki zapewniono zakład z włókien węglowych wynoszący 50 mm. W przypadku, gdy próbki były wzmacniane ilością warstw większą niż jedna, przygotowano uprzednio przycięty arkusz maty z włókien węglowych tak, by zapewnić odpowiednią długość wzmocnienia. W przypadku próbek wzmacnianych jedną warstwą zużyto 36,4 cm zbrojenia CF, dwiema i trzema warstwami – odpowiednio 67,8 cm i 99,2 cm maty o wysokości 20 cm. Żywicę epoksydową наносzono równomiernie na powierzchnię betonową, następnie przykładano nienasączoną matę CF, którą pokrywano warstwą żywicy epoksydowej przy użyciu pędzla oraz rozprowadzano równomiernie po całej powierzchni włókien, a na końcu odpowietrzano wzdłuż włókien przy użyciu wałka do laminacji. W przypadku próbek wzmocnionych matrycą cementową, na początku zatapiano całą próbkę betonową w matrycy cementowej, po czym przykładano do niej matę CF, którą pokrywano przy pomocy pędzla matrycą cementową starając się przy tym nasączyć i przesączyć włókna węglowe. Grubość matrycy cementowej wynosiła około 4 mm. Prace przeprowadzano w temperaturze $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, przy wilgotności powietrza $65\% \pm 5\%$. Próbki wzmocnione żywicą epoksydową badano po 7 dniach od laminacji, natomiast te wzmocnione matrycą cementową po 28 dniach od laminacji. Przygotowane do badań niszczących próbki po laminacji pokazano na rysunkach 55 i 56.



Rysunek 55. Próbki betonowe wzmocnione włóknami węglowymi przy użyciu żywicy epoksydowej oraz próbki świadki.



Rysunek 56. Próbki betonowe wzmocnione włóknami węglowymi przy użyciu matrycy cementowej.

8.2.4. Aparatura badawcza i procedura badań

Próbki przebadano w teście jednoosiowego ściskania przy użyciu maszyny wytrzymałościowej o maksymalnej sile nacisku 3000 kN (Walter + Bai AG, Löhningen, Szwajcaria). Badania przeprowadzono w laboratorium przy temperaturze powietrza $23 \pm 1^\circ\text{C}$ i wilgotności $60 \pm 5\%$. Podczas próby ściskania zapewniono stały przyrost siły niszczącej równy 5 kN/s. Przesunięcie osiowe, wartość siły i czas badania odczytano z pliku tekstowego będącego zapisem parametrów badania dla każdej z próbek. Oznacza to, że wartości przemieszczeń są wartościami przemieszczeń tłoka maszyny wytrzymałościowej w trakcie badania elementów. Przesunięcia poprzeczne były mierzone w połowie wysokości próbek przy użyciu czterech czujników elektronicznych w rozstawie 90° , o dokładności 1×10^{-3} mm. Wartości przemieszczeń z czujników były zapisywane automatycznie po każdym przyroście siły niszczącej o 5 kN/s. Prasę wytrzymałościową oraz schemat układu testowego przedstawiono rysunkach 57 i 58.



Rysunek 57. Maszyna wytrzymałościowa Walter + Bai AG o maksymalnej sile nacisku 3000 kN.



Rysunek 58. Sposób pomiaru przemieszczeń poprzecznych przy użyciu czujników elektronicznych.

8.2.5. Wyniki badań

8.2.5.1. *Próbki wzmocnione przy użyciu żywicy epoksydowej*

Na rysunkach 59 a – d przedstawiono charakterystyki naprężenie–odkształcenie (osiowe i poprzeczne) dla fibrobetonu wysokowytrzymałościowego bez wzmocnienia (59 a) oraz wzmocnionego CFRP (59 b – d) przy użyciu żywicy epoksydowej. Naprężenia osiowe zostały wyznaczone poprzez podzielenie obciążeń osiowych przez pole przekroju betonu – nieznaczna grubość CFRP została pominięta. W tabeli 23 zostały zestawione szczegółowe wyniki dla każdej z próbek grupy I. Tabela 24 przedstawia natomiast wartości średnie uzyskanych wyników dla próbek FW oraz grupy I. Średnia wytrzymałość fibrobetonu wysokowytrzymałościowego wynosi 80,35 MPa, przy odkształceniach osiowych i poprzecznych podczas zniszczenia wynoszących odpowiednio 0,0062 i 0,0023. W przypadku wszystkich próbek wzmocnionych CFRP z grupy I zaobserwowano znaczący wzrost wytrzymałości i odkształcalności.

Tabela 23. Szczegółowe wyniki dla próbek wzmocnionych żywicą epoksydową.

Próbka	Maksymalne napężenie ściskające σ_{\max}[MPa]	Odształcenie osiowe podczas zniszczenia ε [-]	Odształcenie poprzeczne podczas zniszczenia ε_p [-]
S-1	82,35	0,00604	0,00227
S-2	81,43	0,00630	0,00236
S-3	78,55	0,00604	0,00220
S-4	79,05	0,00633	0,00244
I-N-1-1	111,59	0,00904	0,00389
I-N-1-2	110,94	0,01060	0,00424
I-N-1-3	113,92	0,00934	0,00392
I-N-1-4	121,16	0,01030	0,00402
I-N-2-1	135,68	0,01699	0,00697
I-N-2-2	131,60	0,01334	0,00600
I-N-2-3	137,24	0,01195	0,00517
I-N-2-4	132,02	0,01354	0,00558
I-N-3-1	171,58	0,02327	0,01094
I-N-3-2	144,56	0,01455	0,00640
I-N-3-3	156,19	0,01630	0,00750
I-N-3-4	158,96	0,01769	0,00672
I-P-1-1	114,78	0,00882	0,00370
I-P-1-2	118,06	0,00935	0,00374
I-P-1-3	115,84	0,00992	0,00367
I-P-1-4	107,42	0,01085	0,00424
I-P-2-1	146,37	0,01550	0,00651
I-P-2-2	133,89	0,01486	0,00684
I-P-2-3	142,78	0,01542	0,00648
I-P-2-4	143,35	0,01737	0,00695
I-P-3-1	160,65	0,01976	0,00889
I-P-3-2	157,54	0,01708	0,00700
I-P-3-3	163,38	0,01729	0,00761
I-P-3-4	167,76	0,02047	0,00880
I-S-1-1	106,76	0,01324	0,00490
I-S-1-2	117,29	0,01166	0,00501
I-S-1-3	117,89	0,01232	0,00525
I-S-1-4	115,99	0,01293	0,00543
I-S-2-1	138,29	0,01512	0,00620
I-S-2-2	146,16	0,01610	0,00633

I-S-2-3	147,45	0,02058	0,00864
I-S-2-4	145,29	0,02188	0,00875
I-S-3-1	151,64	0,01351	0,00638
I-S-3-2	175,40	0,02408	0,01108
I-S-3-3	164,62	0,01986	0,00874
I-S-3-4	160,29	0,02096	0,00788

Tabela 24. Wartości średnie uzyskanych wyników dla próbek FW oraz grupy I.

Matryca	Rodzaj powierzchni	Liczba warstw CF	Średnia wartość maksymalnych naprężeń ściskających $\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	Odchylenie standardowe σ [MPa]	Średnie odkształcenia osiowe podczas zniszczenia $\bar{\epsilon}$ [-]	Średnie odkształcenia poprzeczne podczas zniszczenia $\bar{\epsilon}_p$ [-]
-/ Próbki bez wzmocnienia	N	0	80,35	1,83	0,0062	0,0023
		1	114,40	4,68	0,0098	0,0040
		2	134,14	2,76	0,0140	0,0059
Żywica epoksydowa	P	3	157,82	11,09	0,0180	0,0079
		1	114,03	4,61	0,0097	0,0038
		2	141,60	5,37	0,0158	0,0067
	S	3	162,33	4,33	0,0187	0,0081
		1	114,48	5,21	0,0125	0,0051
		2	144,30	4,10	0,0184	0,0075
		3	162,99	9,88	0,0196	0,0085

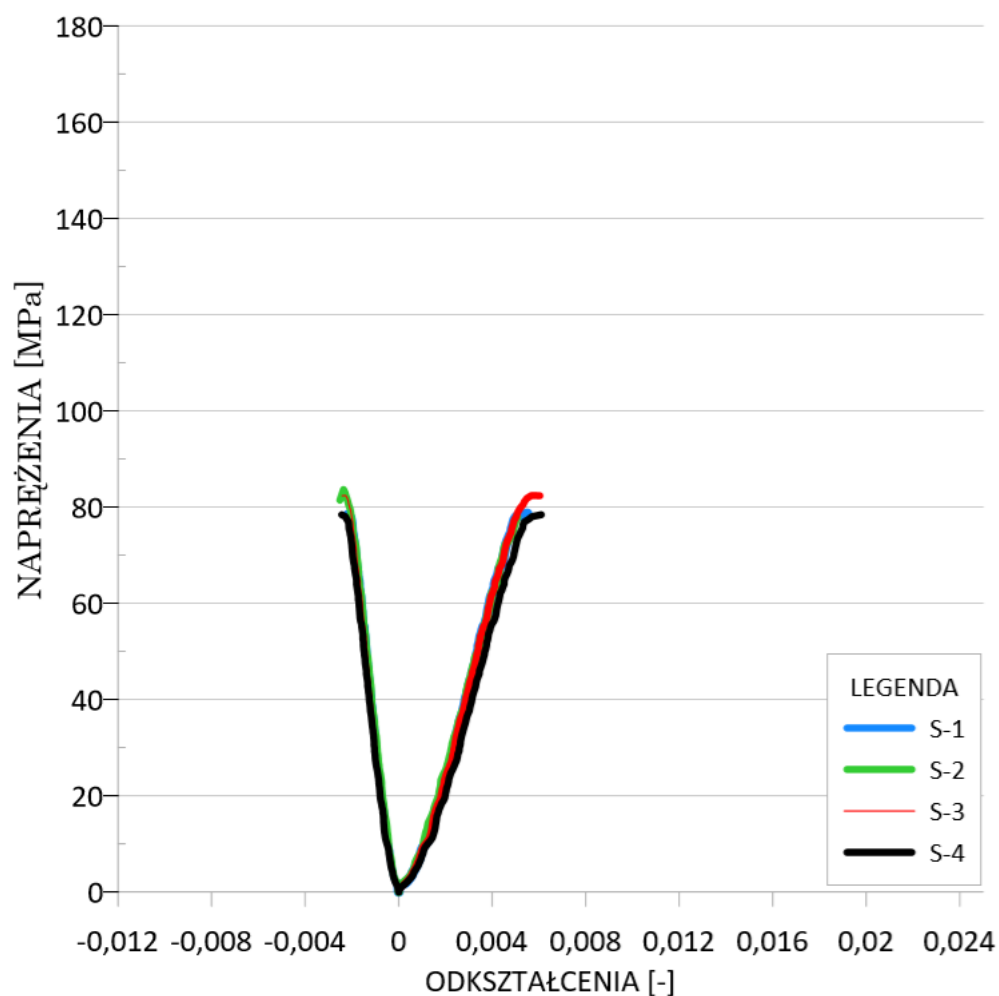
Dla betonu wzmocnionego jedną warstwą CFRP zaobserwowano niemal identyczną wytrzymałość na ściskanie niezależnie od przygotowania powierzchni próbek równą ok. 114 MPa, co oznacza wzmocnienie rzędu 42% w odniesieniu do betonu bez wzmocnienia. Odkształcalność osiowa próbek w momencie uzyskania maksymalnej nośności wynosi w tym przypadku 0,0098; 0,0097 oraz 0,0125 odpowiednio dla betonu o powierzchni nieprzygotowanej, piaskowanej i szlifowanej. Odkształcalność poprzeczna próbek w tym samym momencie zniszczenia jest równa odpowiednio 0,0040; 0,0038 i 0,0051. Analizując te dane można stwierdzić, że w przypadku powierzchni nieprzygotowanej i piaskowanej uzyskane wartości są niemalże tożsame. W przypadku powierzchni szlifowanej, pomimo tej samej nośności wartość odkształceń osiowych i transwersalnych jest relatywnie wyższa

średnio o 31% i 28% w odniesieniu do próbek o powierzchni nieprzygotowanej i piaskowanej. W przekonaniu autora niniejszej pracy jest to wartość znacząca, wpływająca na energię zniszczenia próbek.

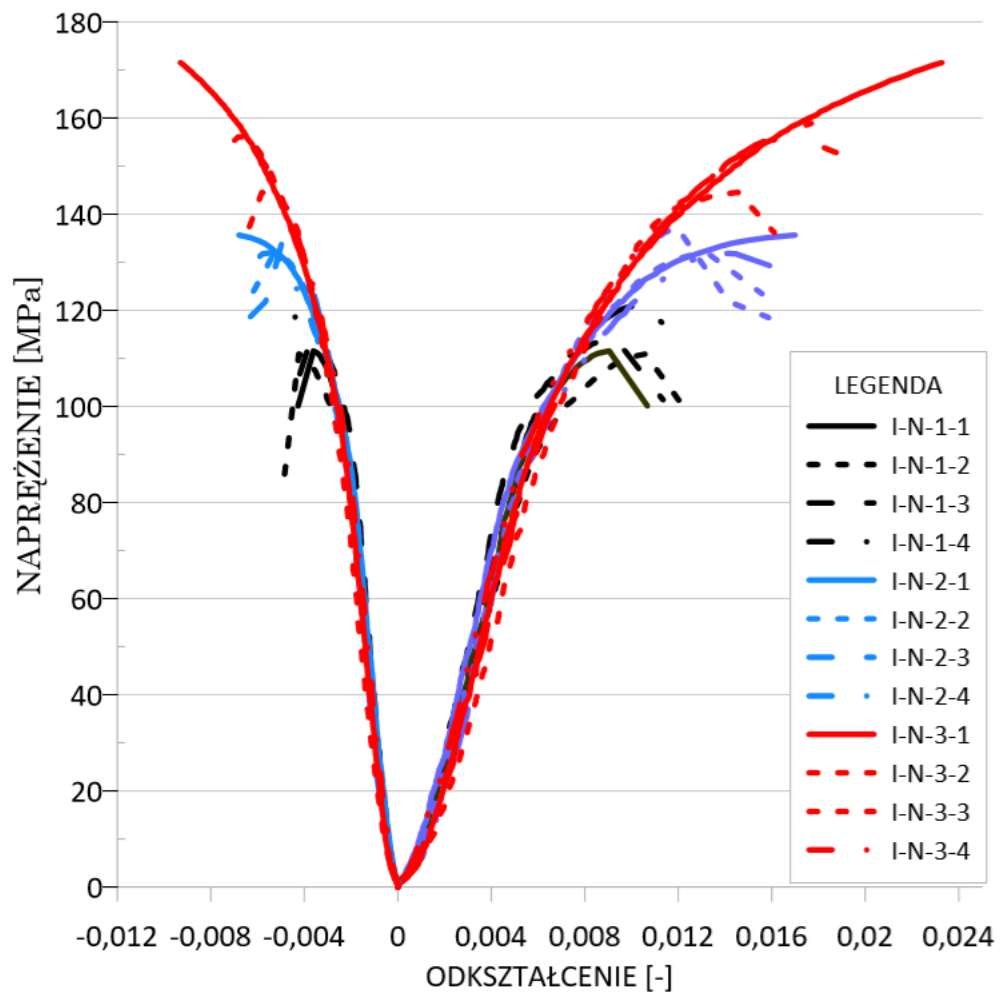
W przypadku próbek wzmocnionych dwiema warstwami CFRP również odnotowano zbliżoną wartość wytrzymałości na ściskanie wynoszącą odpowiednio dla próbek o powierzchni nieprzygotowanej, piaskowanej i szlifowanej 134,14 MPa; 141,60 MPa i 144,30 MPa. Oznacza to wzrost wytrzymałości w stosunku do betonu niewzmocnionego odpowiednio o 67%, 76% i 80%. Odchylenie standardowe wytrzymałości na ściskanie było najniższe dla próbek z powierzchnią nieprzygotowaną. Zaobserwowano ponadto nieznaczną zależność wytrzymałości na ściskanie od powierzchni przygotowania próbek; mianowicie proces piaskowania powierzchni zwiększył nośność próbek o 5,6%, a szlifowania o 7,6% w odniesieniu do próbek o nieprzygotowanej powierzchni. Odkształcalność osiowa próbek w momencie zniszczenia wyniosła 0,0140; 0,0158 i 0,0184, odpowiednio dla betonu o powierzchni nieprzygotowanej, piaskowanej i szlifowanej. Odkształcalność poprzeczna próbek w tym samym momencie była równa odpowiednio: 0,0059; 0,0067 i 0,0075. Dla powierzchni szlifowanej uzyskano więc wyższą średnią odkształcalność osiową o 31% i 16% niż próbek o powierzchni nieprzygotowanej i piaskowanej. Średnie odkształcenia poprzeczne również były większe – odnotowano wzrost dla betonu z powierzchnią szlifowaną o 27% i 12% w zestawieniu z próbkami z powierzchniami nieprzygotowaną i piaskowaną.

W przypadku próbek wzmocnionych trzema warstwami CFRP zaobserwowano po raz kolejny zbliżoną wartość wytrzymałości na ściskanie wynoszącą odpowiednio dla próbek o powierzchni nieprzygotowanej, piaskowanej i szlifowanej równą odpowiednio 157,82 MPa; 162,33 MPa i 162,99 MPa. Oznacza to wzrost wytrzymałości w stosunku do betonu niewzmocnionego odpowiednio o 96%, 102% i 103%. Odchylenie standardowe wytrzymałości na ściskanie było najniższe dla próbek z powierzchnią piaskowaną i wynosiło 4,33 MPa – znacznie większe wykazano w przypadku powierzchni szlifowanej – 9,88 MPa i nieprzygotowanej – aż 11,09 MPa. Zaobserwowano przy tym, iż wytrzymałość na ściskanie próbek o powierzchni szlifowanej i piaskowanej nie różni się od siebie znacząco i jest średnio wyższa zaledwie o 3% w odniesieniu do próbek o nieprzygotowanej powierzchni, co mieści się w granicy błędu statystycznego. Odkształcalność osiowa próbek w momencie zniszczenia wyniosła 0,0180; 0,0187 i 0,0196 odpowiednio dla betonu o powierzchni nieprzygotowanej, piaskowanej i szlifowanej. Odkształcalność poprzeczna próbek w tym samym momencie była równa odpowiednio: 0,0079; 0,0081 i 0,0085. Dla powierzchni szlifowanej uzyskano

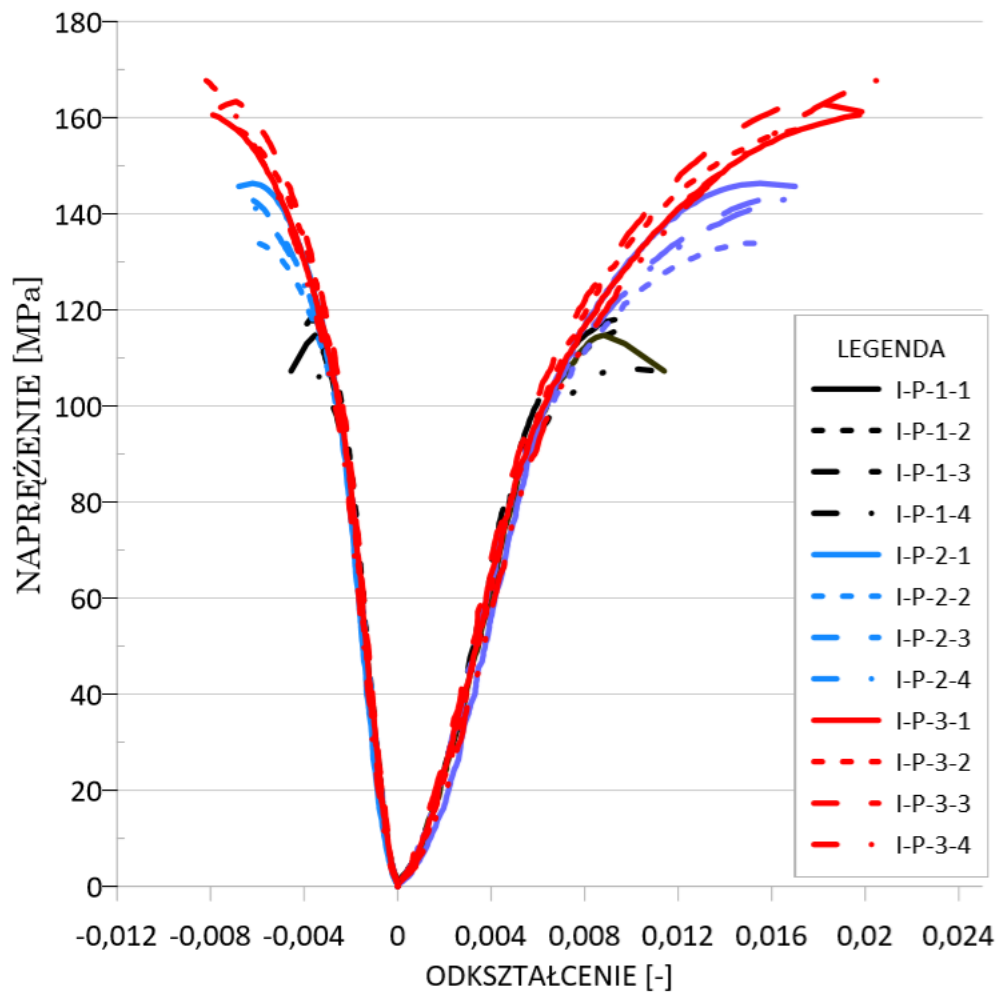
ponownie wyższą średnią odkształcalność osiową o 9% i 5%, niż dla próbek o powierzchni nieprzygotowanej i piaskowanej. Średnie odkształcenia poprzeczne również były większe – odnotowano wzrost dla betonu z powierzchnią szlifowaną o 8% i 5% w zestawieniu z próbkami o powierzchni nieprzygotowanej i piaskowanej.

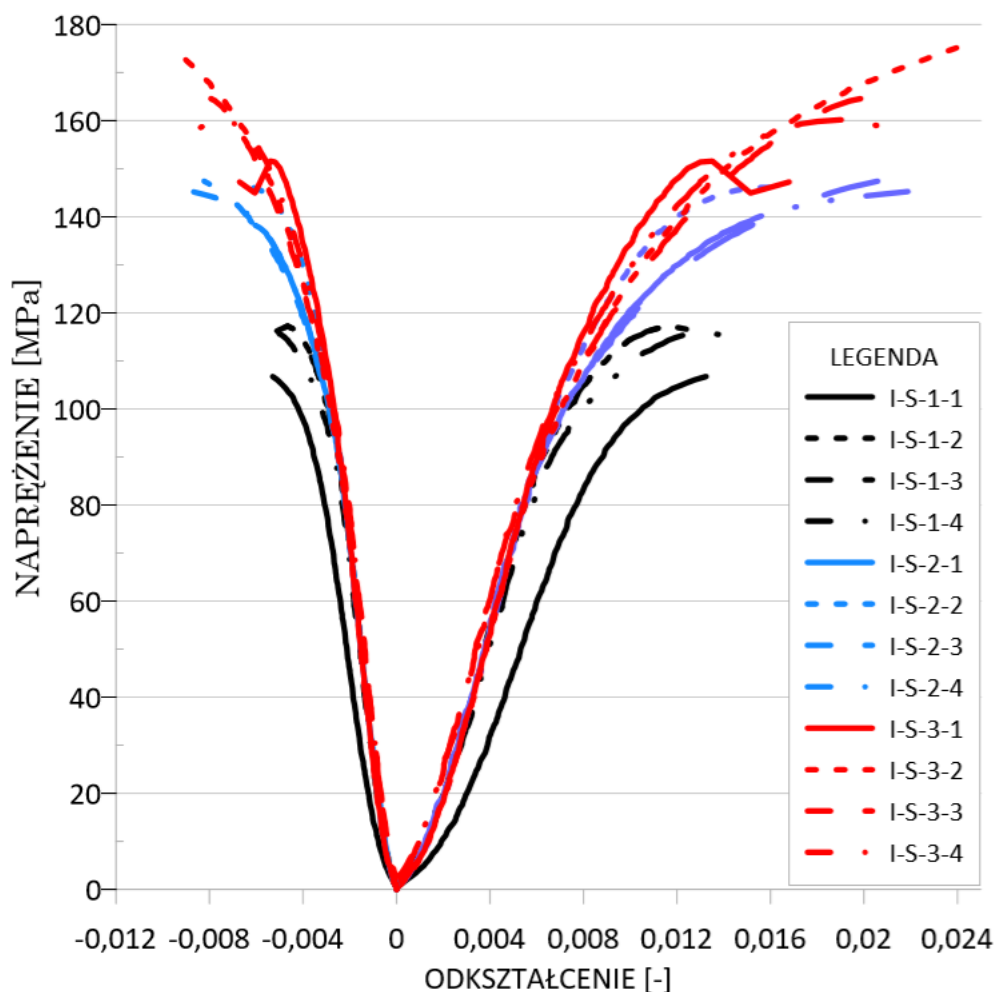


a)



b)





d)

Rysunek 59. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla: fibrobetonu wysokowytrzymałościowego (FW) – (a), FW wzmocnionego CFRP o nieprzygotowanej powierzchni betonu – (b), FW wzmocnionego CFRP o piaskowanej powierzchni betonu – (c), FW wzmocnionego CFRP o szlifowanej powierzchni betonu – (d).

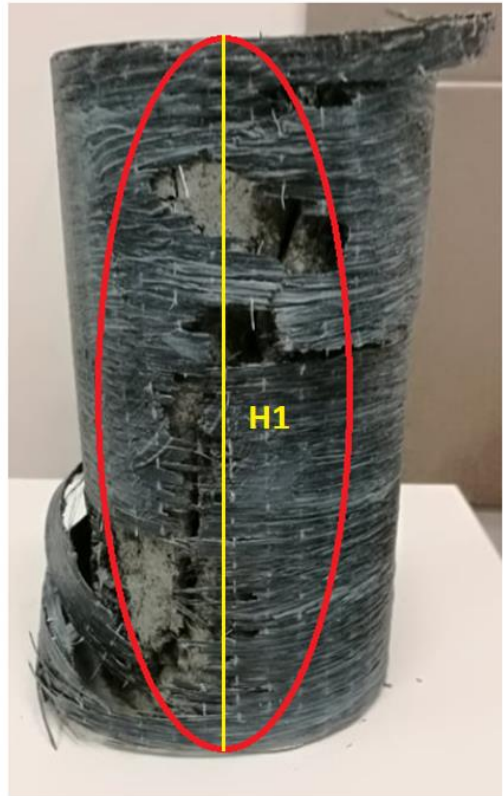
Poniżej przedstawiono makroskopową analizę zniszczenia próbek wzmocnionych jedną warstwą włókien węglowych. W przypadku większej ilości warstw zniszczenie miało podobny przebieg. Wszystkie próbki po przeprowadzeniu badań przedstawiono na rysunku 60. We wszystkich przypadkach nastąpiło zniszczenie poprzez pęknięcie zbrojenia CFRP. Dla żadnej z próbek nie wystąpiło ścięcie zakładu.



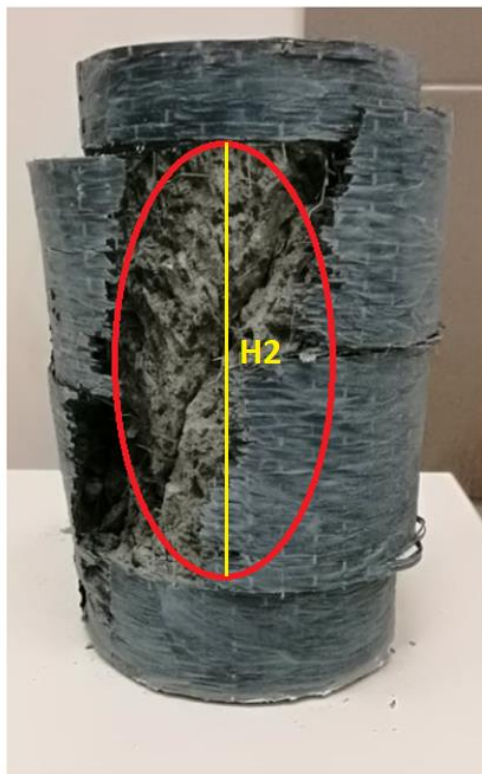
Rysunek 60. Próbki betonowe wzmocnione włóknami węglowymi przy użyciu żywicy epoksydowej po zniszczeniu.



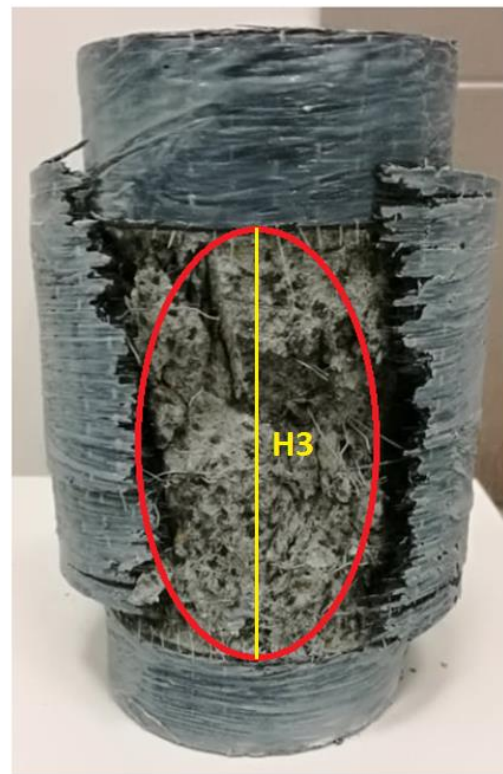
A



B



C

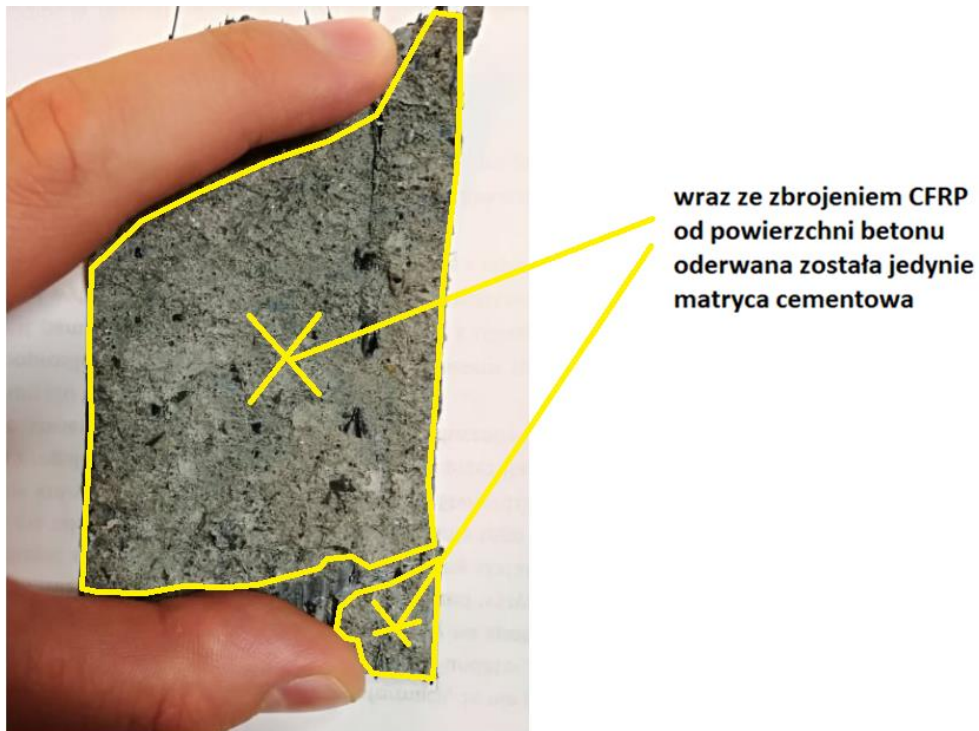


D

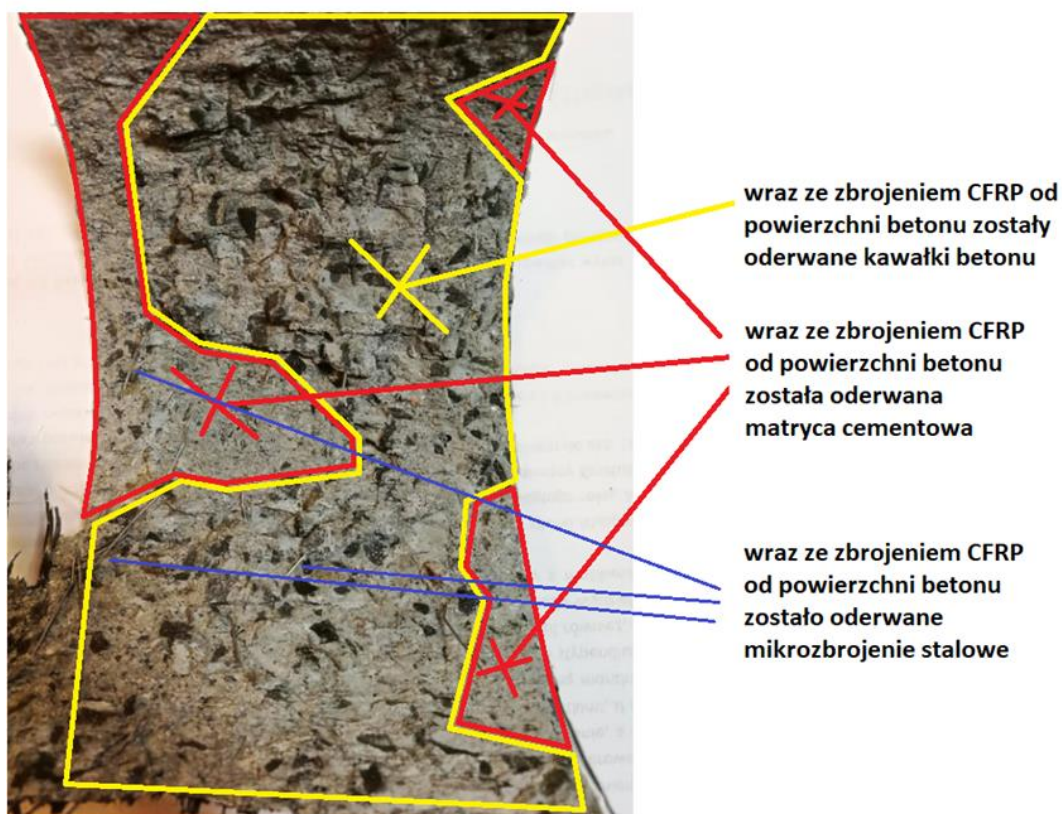
Rysunek 61. Przebieg zniszczenia próbek niewzmocnionych (a) oraz wzmacnionych jedną warstwą CFRP o powierzchni: nieprzygotowanej (b), piaskowanej (c) i szlifowanej (d).

Na rysunkach 61 a – d przedstawiono reprezentatywny dla większości analizowanych grup próbek przebieg zniszczenia. Rodzaj powierzchni nie wpływał na charakter zniszczenia w ujęciu globalnym; zanotowano ten wpływ lokalnie, w miejscu zespolenia pierwszego laminatu CFRP z powierzchnią betonu. Można zauważyć, że obszar pęknięcia zmniejsza się wraz ze wzrostem ilości warstw wzmocnienia (rysunki 61 b – d). W przypadku próbek wzmocnionych jedną warstwą CFRP następuje rozerwanie zbrojenia CFRP na całą wysokość próbek. W przypadku próbek wzmocnionych trzema warstwami, obszar ten jest najmniejszy ($H1 > H2 > H3$).

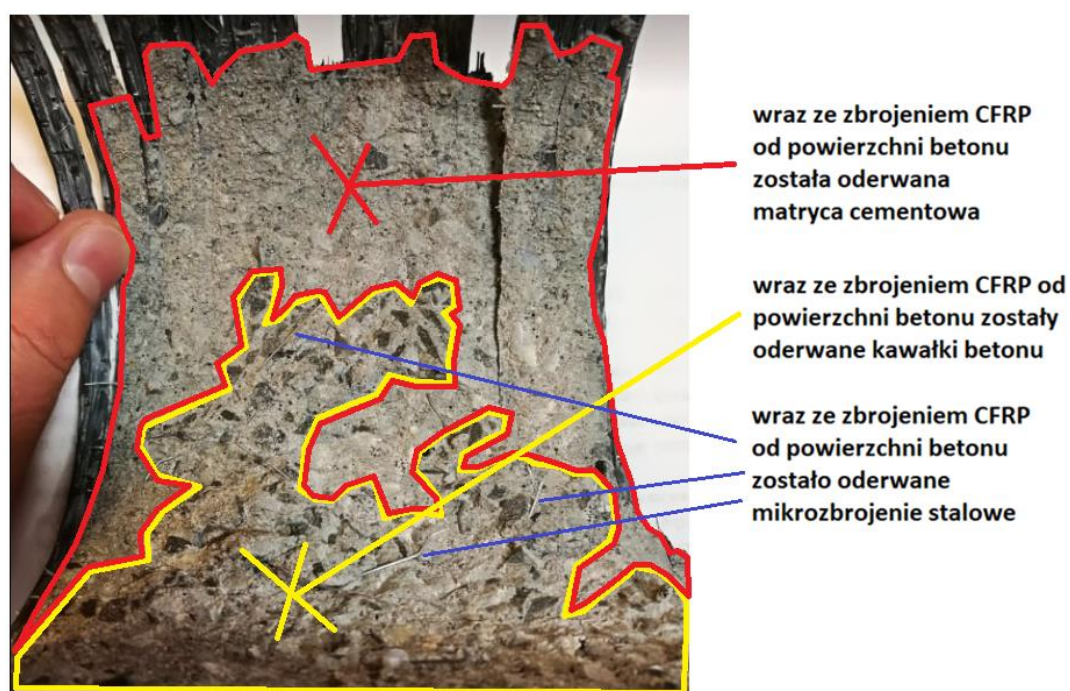
Warto zwrócić uwagę na sposób oderwania się zbrojenia CFRP od powierzchni betonu. Z uwagi na charakter kleju epoksydowego nie nastąpiło oderwanie się włókien węglowych od matrycy. Wszystkie warstwy włókien węglowych zostały odpowiednio przesączone, przyklejone do powierzchni betonu oraz połączone między sobą w przypadku większej ilości warstw i zakładu. Nie wystąpiło rozwarstwienie pomiędzy nakładanymi warstwami zbrojenia CFRP. Na rysunkach 62 a – c przedstawiono oderwane zbrojenie CFRP od powierzchni betonu wzmocnionego jedną warstwą kompozytu, po przeprowadzeniu badań niszczących. W przypadku powierzchni nieprzygotowanej (rysunek 62 a) można zauważyć, że na powierzchni oderwanego CFRP znajduje się jedynie matryca cementowa. Oznacza to, że głębokość penetracji żywicy w głąb rdzenia betonowego była niewielka.



a)



b)



c)

Rysunek 62. Fragment oderwanego zbrojenia CFRP od powierzchni betonu po zniszczeniu próbek: nieprzygotowana powierzchnia betonu (a), piaskowana powierzchnia betonu (b), szlifowana powierzchnia betonu (c).

W przypadku powierzchni piaskowanej można zauważyć, iż wraz z CFRP z rdzenia betonowego oderwana została duża ilość betonu (zarówno matrycy cementowej, kruszywa oraz mikrobrojenia stalowego). Powierzchnia ta cechuje się największą nierównością, licznymi zagłębieniami i wzniesieniami. W takich warunkach żywica może mocniej penetrować w głąb rdzenia betonowego (z uwagi na fakt, iż znajduje się zarówno w nieckach jak i wzniesieniach powierzchni betonowej), co powoduje wyrywanie „kawałków” betonu z rdzenia próbki (rysunek 62 b).

Szlifowanie powierzchni również poprawia przyczepność żywicy do betonu z uwagi na usunięcie wierzchniej warstwy matrycy cementowej. Pozwala to na lepszą penetrację żywicy w głąb betonu i współpracę zbrojenia CFRP z rdzeniem betonowym. W tym przypadku zaobserwowano porównywalny charakter oderwania CFRP jak w przypadku powierzchni piaskowanej. Z rdzenia betonowego zostały wyrwane matryca cementowa, kruszywo oraz mikrobrojenie. Jednakże ilość oderwanego betonu z powierzchni próbki szlifowanej jest mniejsza, niż w przypadku piaskowanej (rysunek 62 c). Można to wyjaśnić mniejszą różnicą wysokości niecek i wzniesień obszarów powierzchni szlifowanej w porównaniu do piaskowanej.

8.2.5.2. Próbkę wzmocnione przy użyciu matrycy cementowej

Szczegółowe wyniki dla próbek wzmocnionych matrycą cementową przedstawiono w tabeli 25. Tabela 26 przedstawia natomiast wartości średnie uzyskanych wyników dla próbek FW oraz grupy II. Dla betonu wzmocnionego jedną warstwą CFRP zaobserwowano nieznaczny wzrost wytrzymałości w zależności od rodzaju powierzchni betonu. Średnia wytrzymałość na ściskanie wynosiła: 82,94 MPa, 83,87 MPa i 84,91 MPa dla betonu z powierzchnią nieprzygotowaną, piaskowaną i szlifowaną. Średnia odkształcalność osiowa próbek w momencie uzyskania maksymalnej nośności wyniosła w tym przypadku: 0,0066; 0,0070 oraz 0,0072, odpowiednio dla betonu o powierzchni nieprzygotowanej, piaskowanej i szlifowanej. Średnia odkształcalność poprzeczna próbek w tym samym momencie zniszczenia była równa odpowiednio: 0,0027; 0,0028 i 0,0029. Analizując te dane można stwierdzić, że nie ma istotnej różnicy pomiędzy uzyskanymi wartościami wytrzymałości i odkształcalności betonów w zależności od rodzaju przygotowania powierzchni. Omawiane wartości różnią się od siebie na tyle nieznacznie, że można przyjąć, iż różnice mieszczą się w granicach 5 – procentowego błędu statystycznego.

W przypadku próbek wzmocnionych dwoma warstwami CFRP zaobserwowano nieznaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie wynoszący odpowiednio dla próbek o powierzchni nieprzygotowanej, piaskowanej i szlifowanej: 88,69 MPa; 83,67 MPa i 94,79 MPa. Oznacza to wzrost wytrzymałości w stosunku do betonu niewzmocnionego odpowiednio o 10%, 4% i 18%. Odchylenie standardowe wytrzymałości na ściskanie było najniższe dla próbek z powierzchnią piaskowaną i wynosiło 1,95 MPa – większe wykazano w przypadku powierzchni szlifowanej – 11,89 MPa i nieprzygotowanej – 5,44 MPa. Odształcalność osiowa próbek w momencie zniszczenia wyniosła: 0,0081; 0,0080 i 0,0088, odpowiednio dla betonu o powierzchni nieprzygotowanej, piaskowanej i szlifowanej. Średnia odształcalność poprzeczna próbek była równa odpowiednio: 0,0033; 0,0033 i 0,0038. Dla próbek o powierzchni szlifowanej uzyskano wyższą średnią odształcalność osiową o 9% i 10%, niż dla próbek o powierzchni nieprzygotowanej i piaskowanej. Średnie odształcenia poprzeczne również były większe – odnotowano wzrost dla betonu z powierzchnią szlifowaną o 15% w porównaniu z próbkami z powierzchniami nieprzygotowaną i piaskowaną.

W przypadku próbek wzmocnionych trzema warstwami CFRP również odnotowano zmieniającą się wartość wytrzymałości na ściskanie wynoszącą odpowiednio dla próbek o powierzchni nieprzygotowanej, piaskowanej i szlifowanej: 86,34 MPa; 81,82 MPa i 95,57 MPa. Oznacza to wzrost wytrzymałości w stosunku do betonu niewzmocnionego o 7%, 2% i 19%. Odchylenie standardowe wytrzymałości na ściskanie było największe dla próbek z powierzchnią szlifowaną. Zaobserwowano także brak zmiany średniej wartości wytrzymałości na ściskanie próbek z powierzchnią piaskowaną. Średnia odształcalność osiowa próbek w momencie zniszczenia wyniosła: 0,0091; 0,0084 i 0,0098, odpowiednio dla betonu o powierzchni nieprzygotowanej, piaskowanej i szlifowanej. Odształcalność poprzeczna próbek w tym samym momencie badania była równa odpowiednio 0,0036; 0,0035 i 0,0041. Dla powierzchni szlifowanej uzyskano ponownie wyższą średnią odształcalność osiową o 8% i 17%, niż dla próbek o powierzchni nieprzygotowanej i piaskowanej. Średnie odształcenia poprzeczne również były większe – odnotowano wzrost dla betonu z powierzchnią szlifowaną o 14% i 17%, w zestawieniu z próbkami z powierzchniami nieprzygotowaną i piaskowaną.

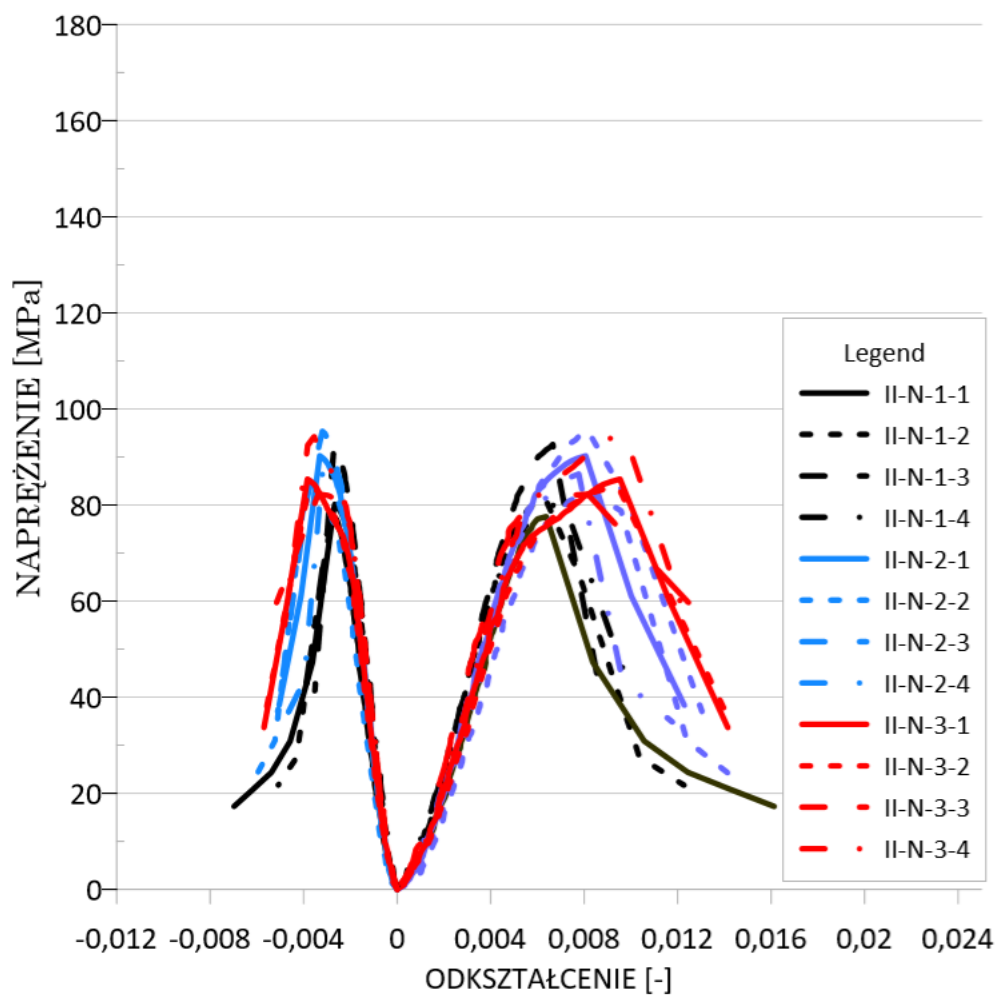
Tabela 25. Szczegółowe wyniki dla próbek wzmocnionych matrycą cementową.

Próbka	Maksymalne napężenie ściskające σ_{\max}[MPa]	Odkształcenie osiowe podczas zniszczenia ε [-]	Odkształcenie poprzeczne podczas zniszczenia ε_p [-]
II-N-1-1	77,63	0,00638	0,00276
II-N-1-2	81,32	0,00634	0,00263
II-N-1-3	92,64	0,00665	0,00270
II-N-1-4	80,16	0,00716	0,00282
II-N-2-1	90,25	0,00806	0,00331
II-N-2-2	82,63	0,00829	0,00350
II-N-2-3	95,38	0,00818	0,00321
II-N-2-4	86,48	0,00776	0,00321
II-N-3-1	85,42	0,00954	0,00384
II-N-3-2	83,46	0,00949	0,00380
II-N-3-3	82,25	0,00816	0,00338
II-N-3-4	94,24	0,00919	0,00356
II-P-1-1	78,20	0,00672	0,00290
II-P-1-2	84,63	0,00681	0,00261
II-P-1-3	90,01	0,00790	0,00290
II-P-1-4	82,65	0,00661	0,00294
II-P-2-1	83,99	0,00792	0,00332
II-P-2-2	84,58	0,00811	0,00324
II-P-2-3	80,85	0,00837	0,00360
II-P-2-4	85,81	0,00816	0,00310
II-P-3-1	83,25	0,00758	0,00303
II-P-3-2	89,99	0,0109	0,00447
II-P-3-3	78,58	0,00755	0,00332
II-P-3-4	75,97	0,00798	0,00337
II-S-1-1	90,37	0,00770	0,00300
II-S-1-2	80,80	0,00574	0,00215
II-S-1-3	85,80	0,00829	0,00332
II-S-1-4	82,66	0,00710	0,00303
II-S-2-1	103,89	0,00969	0,00410
II-S-2-2	88,38	0,00745	0,00306
II-S-2-3	81,26	0,00738	0,00319
II-S-2-4	105,61	0,01079	0,00478
II-S-3-1	102,47	0,00879	0,00343
II-S-3-2	88,88	0,01155	0,00462

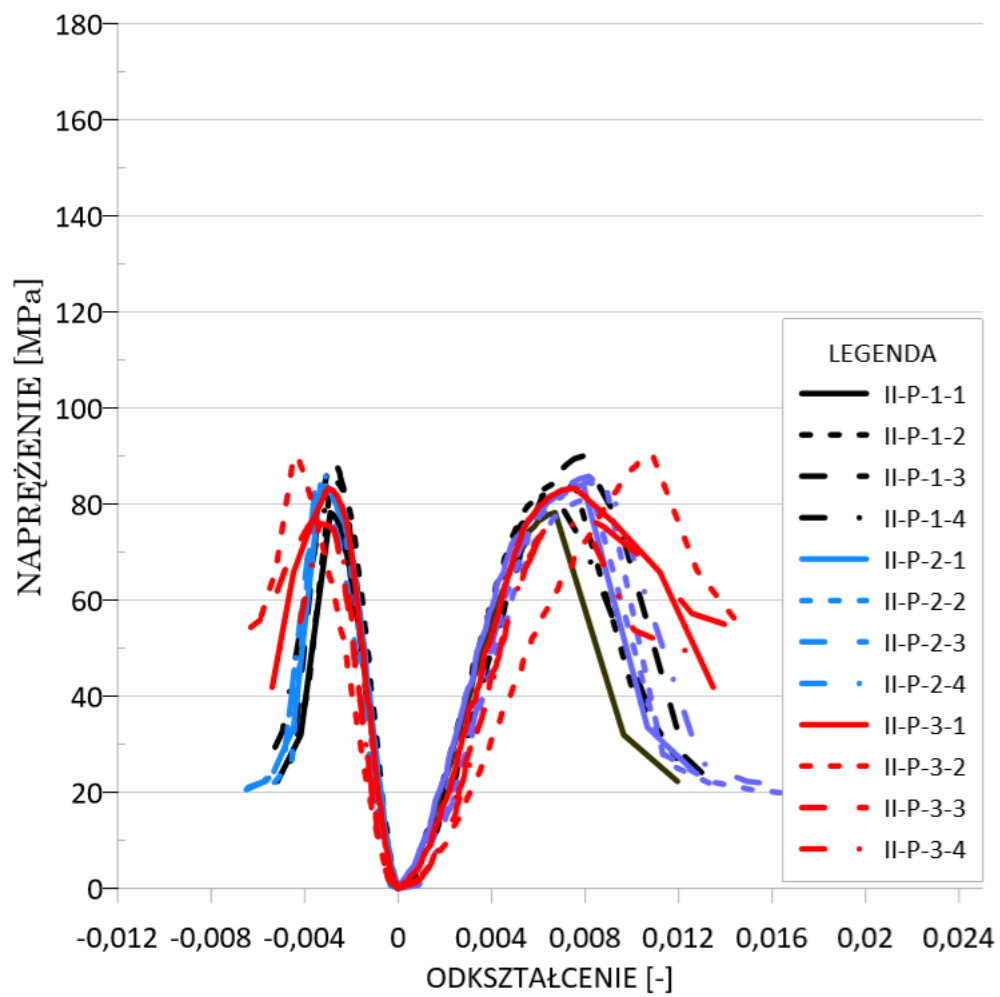
II-S-3-3	85,32	0,00803	0,00353
II-S-3-4	105,60	0,01067	0,00480

Tabela 26. Wartości średnie uzyskanych wyników dla próbek FW oraz grupy II.

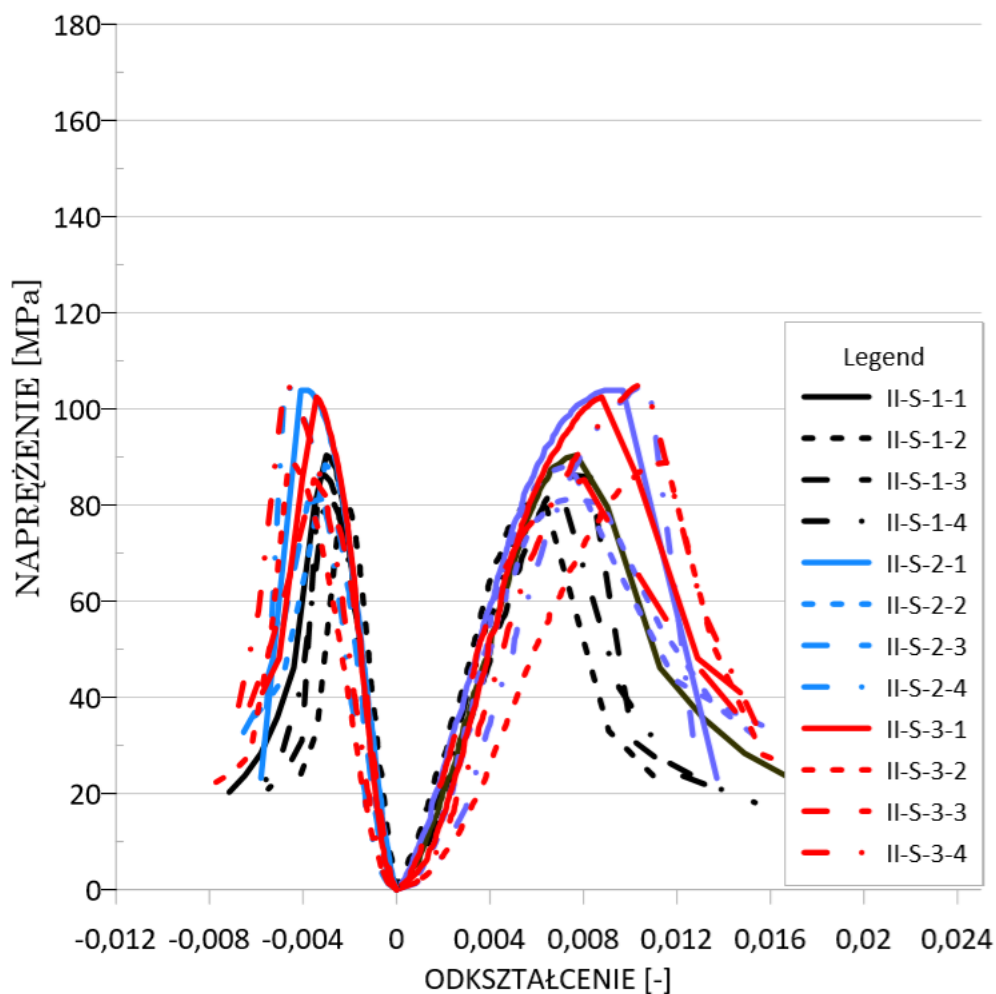
Matryca	Rodzaj powierzchni	Liczba warstw CF	Średnia wartość maksymalnych naprężeń ściskających $\bar{\sigma}_{max}$ [MPa]	Odchylenie standardowe σ [MPa]	Średnie odkształcenia osiowe podczas zniszczenia $\bar{\epsilon}$ [-]	Średnie odkształcenia poprzeczne podczas zniszczenia $\bar{\epsilon}_p$ [-]
-/ Próbki bez wzmocnienia	N	0	80,35	1,83	0,0062	0,0023
		1	82,94	6,65	0,0066	0,0027
Matryca cementowa	N	2	88,69	5,44	0,0081	0,0033
		3	86,34	5,42	0,0091	0,0036
		1	83,87	4,90	0,0070	0,0028
	P	2	83,67	1,95	0,0080	0,0033
		3	81,82	6,25	0,0084	0,0035
		1	84,91	4,19	0,0072	0,0029
	S	2	94,79	11,89	0,0088	0,0038
3		95,57	9,97	0,0098	0,0041	



a)



b)



c)

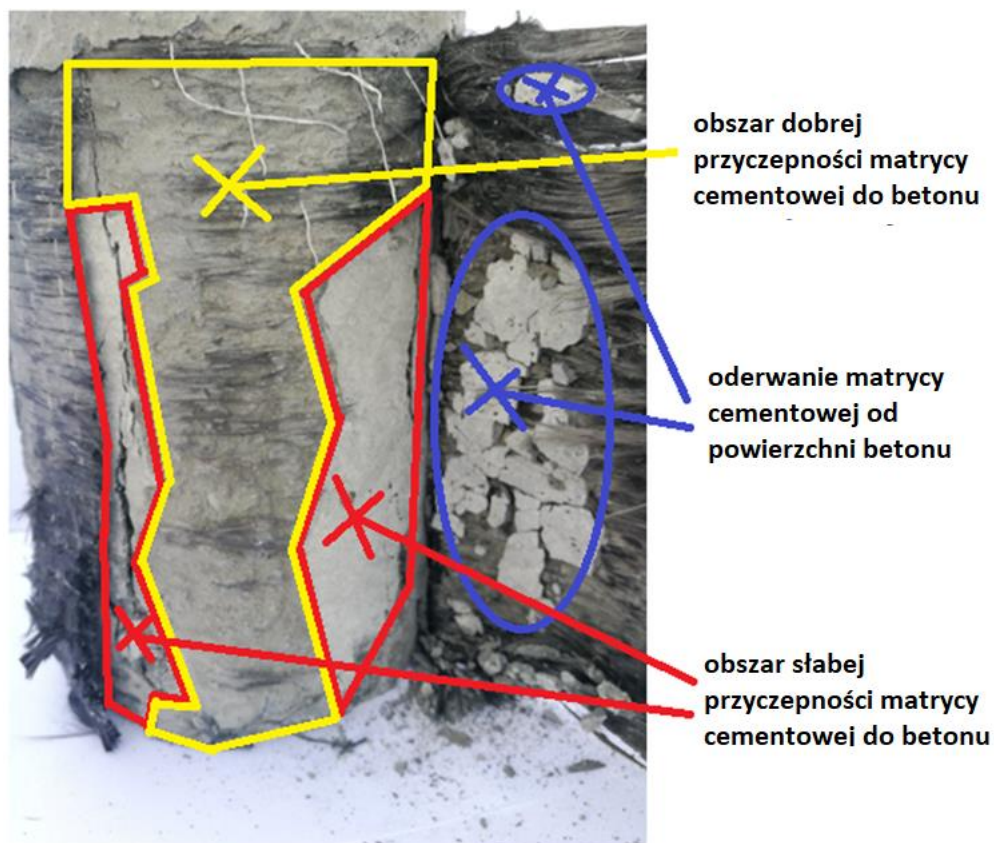
Rysunek 63. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla: FW wzmocnionego CFRP o nieprzygotowanej powierzchni betonu (a), FW wzmocnionego CFRP o piaskowanej powierzchni betonu (b), FW wzmocnionego CFRP o szlifowanej powierzchni betonu (c).

Poniżej przedstawiono makroskopową analizę zniszczenia próbek wzmocnionych jedną warstwą włókien węglowych. W przypadku większej ilości warstw zniszczenie miało podobny przebieg, a decydująca dla zniszczenia jest przyczepność pomiędzy pierwszą warstwą wzmocnienia i betonem. We wszystkich przypadkach nastąpiło ścięcie zakładu. Wszystkie próbki po przeprowadzeniu badań przedstawiono na rysunku 64.



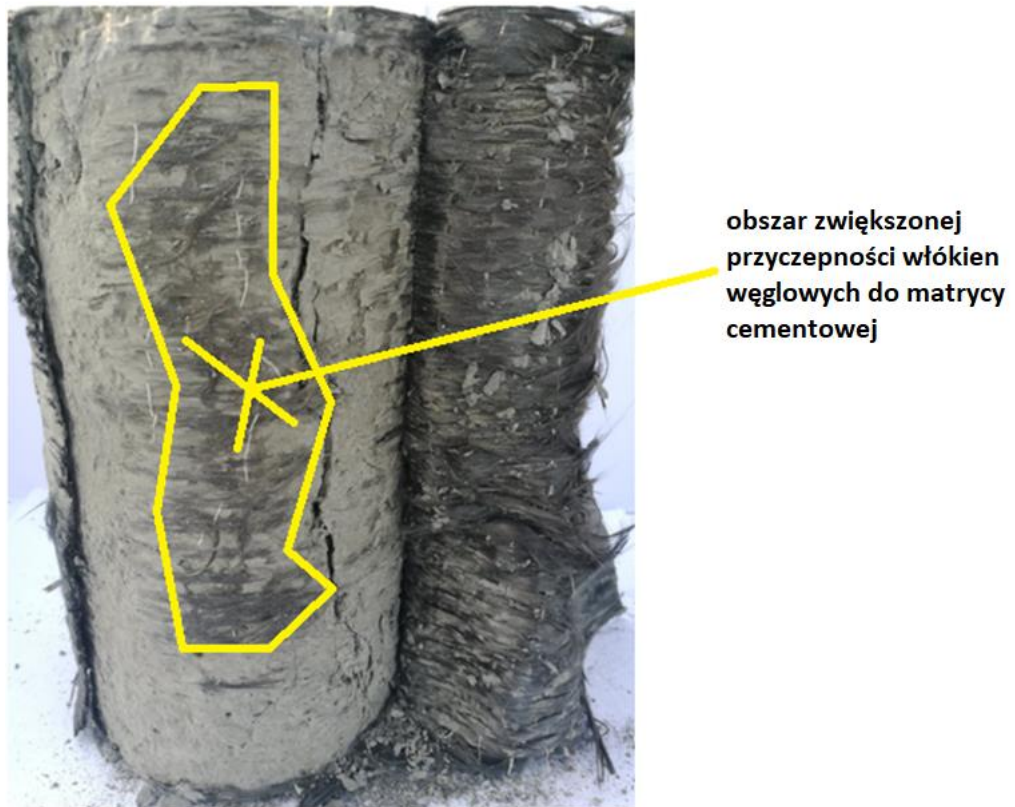
Rysunek 64. Próbki betonowe wzmocnione włóknami węglowymi przy użyciu matrycy cementowej po zniszczeniu.

W przypadku próbek o powierzchni nieprzygotowanej należy zauważyć, że przyczepność włókien węglowych do wysokowytrzymałościowej matrycy cementowej jest zbliżona do przyczepności tejże matrycy do powierzchni betonu. Na rysunku 65 widać, że na pewnym obszarze matryca cementowa została oderwana od powierzchni betonu (obszar czerwony) i przylega do włókien węglowych. Obszar żółty wskazuje, że przyczepność pomiędzy matrycą cementową a powierzchnią betonową była stosunkowo dobra. Na powierzchni matrycy można zaobserwować miejscami występujące grupy włókien węglowych, które są do niej przyklejone. Może to świadczyć o lokalnym, lepszym przesączeniu włókien węglowych matrycą cementową.



Rysunek 65. Analiza zniszczenia połączenia włókien węglowych wzmocnionych matrycą cementową z nieprzygotowaną powierzchnią betonu.

Lepszą przyczepność matrycy cementowej do powierzchni betonu można zaobserwować w przypadku powierzchni piaskowanej. Jedynie znikoma część matrycy cementowej pozostała przyklejona do włókien węglowych – część z nich podczas zniszczenia zachowała się na wysokowytrzymałościowej matrycy (rysunek 66). Lokalnie zaobserwowano miejsca niewielkiej przyczepności matrycy do powierzchni betonu – mogło być to spowodowane miejscowym dociskiem powierzchni laminatu w miejscu większego zagłębienia powierzchni, co mogło spowodować przemieszczenie się świeżej mieszanki wskutek jej wyciśnięcia.



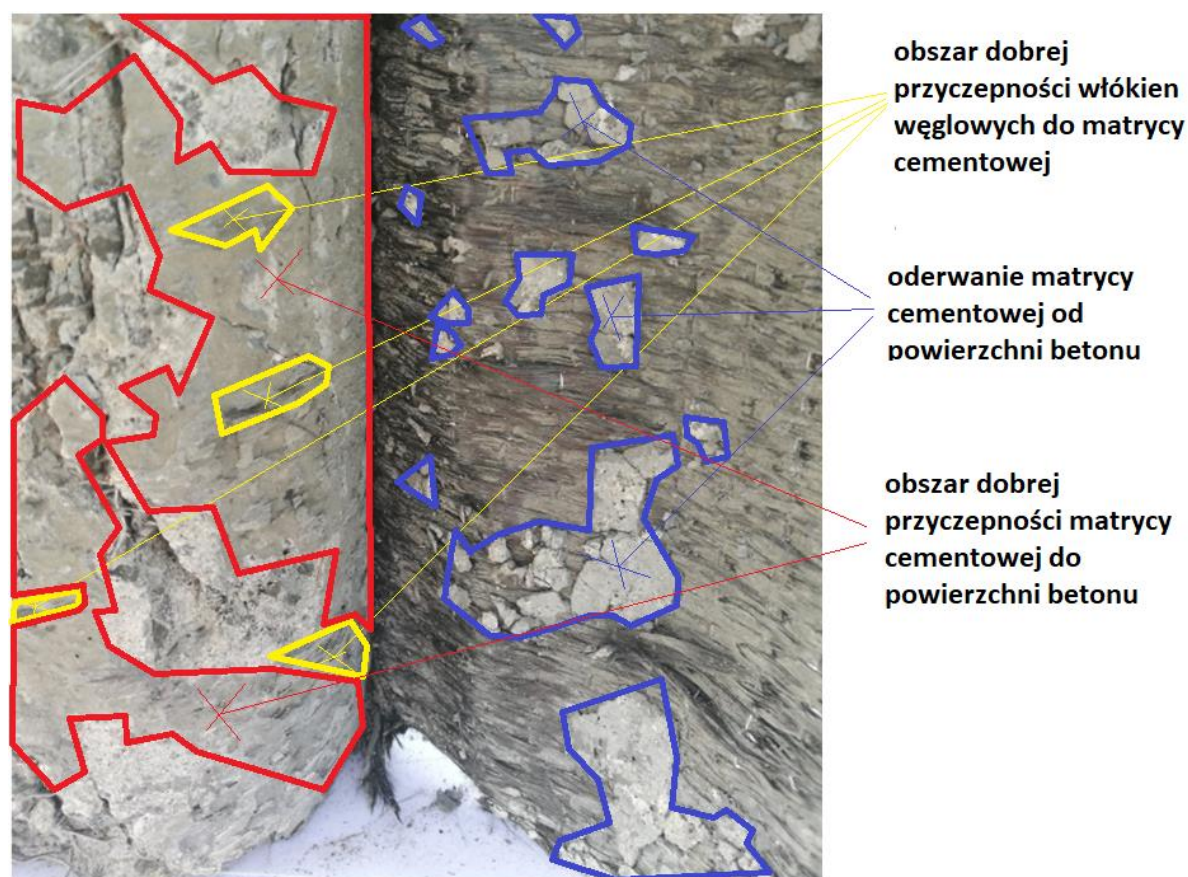
a)



b)

Rysunek 66. Analiza zniszczenia połączenia włókien węglowych wzmocnionych matrycą cementową z piaskowaną powierzchnią betonu: widok całej próbki (a) oraz powiększenie obszaru wycięcia matrycy cementowej (b).

W przypadku powierzchni szlifowanej zaobserwowano podobne zjawiska jak dla powierzchni nieprzygotowanej, z tym zastrzeżeniem, że w tej sytuacji są one bardziej rozproszone i nie występują na dużych powierzchniach. Na rysunku 67 można zauważyć licznie występujące niewielkie obszary, w których naprężenia przyczepności pomiędzy włóknami węglowymi a matrycą cementową są większe niż pomiędzy matrycą cementową i powierzchnią betonu. Zaznaczono również te rejony, w których przyczepność pomiędzy matrycą cementową i powierzchnią betonu jest większa niż pomiędzy włóknami węglowymi i matrycą cementową. Charakterystyczne dla tej powierzchni jest lepsze przesączenie włókien węglowych matrycą cementową, niż w pozostałych przypadkach, co może wpływać na fakt, iż największa efektywność wzmocnienia została wykazana właśnie dla powierzchni szlifowanej.



Rysunek 67. Analiza zniszczenia połączenia włókien węglowych wzmocnionych matrycą cementową z szlifowaną powierzchnią betonu.

Podsumowując, najlepszą współpracę zbrojenia CFRP z rdzeniem betonowym wykazano dla szlifowanej powierzchni betonu. Powierzchnia betonu wysokowytrzymałościowego jest powierzchnią charakterystyczną między innymi z uwagi na

jej wysoką szczelność i niską porowatość otwartą. Stąd też może wynikać niska przyczepność matrycy cementowej do powierzchni nieprzygotowanej. W procesie wzmocniania próbek rozpatrywaną metodą, powierzchnię po nałożeniu zbrojenia poddano pewnemu dociskowi, którego celem było lepsze przesączenie włókien. Docisk ten był wykonywany ręcznie, przez tą samą osobę w przypadku wszystkich próbek. W przypadku powierzchni piaskowanej, możliwe były lokalne wyciśnięcia świeżej matrycy cementowej z głębszych niecek tej powierzchni, co po odciążeniu wpływało na powstanie pustej przestrzeni pomiędzy matą z włókna węglowego, a zagłębioną powierzchnią. Mogło to mieć wpływ na uzyskane rezultaty. Powierzchnia szlifowana, która ma większą chropowatość od powierzchni nieprzygotowanej i mniejszą od piaskowanej, w momencie docisku maty z włókien węglowych mogła podlegać najlepszemu zespoleniu ze wszystkich rozważonych typów powierzchni, co zostało potwierdzone wynikami wytrzymałości tych próbek na ściskanie.

8.2.5.3. Wnioski

W niniejszym rozdziale zdeteminowano wpływ rodzaju matrycy zespalającej, ilości warstw wzmocnienia oraz sposobu przygotowania powierzchni betonowej na zachowanie wysokowytrzymałościowego fibrobetonu samozagęszczalnego wzmocnionego włóknami węglowymi. Na podstawie wyników badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Matryca cementowa nie powinna być stosowana jako lepiszcze w procesie wzmocniania betonu wysokowytrzymałościowego przy pomocy mat z włókien węglowych, z uwagi na niską przyczepność do powierzchni betonu oraz niski poziom przesączenia rozpatrywanych mat. Zniszczenie elementów betonowych następuje wskutek zniszczenia matrycy cementowej.
2. Zastosowanie żywicy epoksydowej w procesie wzmocniania betonu przy użyciu mat z włókien węglowych powoduje znaczący wzrost wzmocnienia betonu (wzrost wytrzymałości na ściskanie, odkształcalności oraz energii zniszczenia), proporcjonalny do ilości warstw wzmocnienia CFRP. Zniszczenie kompozytu następuje wskutek pęknięcia włókien węglowych w najsłabszym miejscu, czemu towarzyszy wydzielenie dużej ilości energii oraz charakterystyczny huk.
3. Rozpatrując wpływ przygotowania powierzchni betonu na efektywność jego wzmocnienia należy stwierdzić, że najwyższą efektywność wzmocnienia uzyskano dla powierzchni szlifowanej; zarówno w przypadku wzmocnienia z zastosowaniem matrycy

cementowej, jak i żywicy epoksydowej. Należy podkreślić, że uzyskana korzyść z przeprowadzenia procesu szlifowania powierzchni betonowej (rozumiana jako wzrost wytrzymałości i odkształcalności próbek) jest zaledwie kilkuprocentowa przy zastosowaniu lepiszcza organicznego i sięgająca kilkunastu procent przy stosowaniu matrycy nieorganicznej, w odniesieniu do pozostałych rodzajów powierzchni betonowych.

9. Podsumowanie rozprawy

Na podstawie badań doświadczalnych przeprowadzonych w niniejszej pracy oraz wykonanych analiz można przedstawić następujące wnioski.

1. W pierwszym etapie badań wprowadzających wykazano, iż zarówno beton zwykły, jak i fibrobeton zwykły wzmocniony jedną warstwą CFRP przy zastosowaniu żywicy epoksydowej wykazują znaczące wzmocnienie. W obu przypadkach charakterystyka naprężenie-odkształcenie przybiera charakter liniowo-sprężysty w części przenoszenia obciążenia tylko przez beton, nieliniowy w obszarze rozpoczęcia współpracy betonu z włóknami węglowymi oraz wzmocnienie będące obszarem pracy włókien węglowych, aż do momentu zniszczenia poprzez pęknięcie CFRP. Wskutek wzmocnienia betonu niezawierającego mikrobrojenia rozproszonego uzyskano wzrost wytrzymałości na ściskanie o 128%. W przypadku wzmocnienia fibrobetonu zwykłego wzrost ten wyniósł niemal 100%.
2. W kolejnym etapie badań wstępnych wykazano, że zachowanie się betonu wysokowytrzymałościowego wzmocnionego w ten sam sposób, co beton zwykły jest odmienne. Beton ten wykazuje charakterystykę liniowo-sprężystą do momentu uzyskania maksymalnej wytrzymałości na ściskanie, po czym następuje kruchoplastyczne zniszczenie wskutek pęknięcia kolejnych pasm włókien węglowych. Wzrost wytrzymałości na ściskanie w odniesieniu do próbek niewzmocnionych jest znaczenie niższy, niż w przypadku betonu zwykłego i wynosi 34%. W przypadku fibrobetonu wysokowytrzymałościowego wzmocnionego jedną warstwą CFRP uzyskano analogicznie nieco większy wzrost wytrzymałości na ściskanie równy 41%. Natomiast istotną różnicę stanowi charakter zależności naprężenie-odkształcenie. W części wykresu przed osiągnięciem maksymalnych naprężeń jest zbliżony do betonu wysokowytrzymałościowego i wykazuje liniowo-sprężysty przebieg. Natomiast po osiągnięciu maksymalnej wartości siły niszczącej, uśredniając można stwierdzić, że jego charakter jest plastyczny, po czym następuje nagłe zniszczenie.
3. W trzecim etapie badań wstępnych przeanalizowano kolumny stalowo-betonowe niewzmocnione oraz wzmocnione 1, 2 i 3 warstwami CFRP. Uzyskane wyniki wskazują, że stosując beton wysokowytrzymałościowy jako wypełnienie rur stalowych, a następnie wzmacniając elementy przy użyciu materiałów kompozytowych uzyskuje się znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie badanych elementów oraz ich odkształcalności.

4. Dowód tezy I został przedstawiony w rozdziale 8. Przeanalizowano trzy różne powierzchnie betonu i stwierdzono, iż przygotowanie jej poprzez piaskowanie lub szlifowanie nie wpływa znacząco na wzrost wytrzymałości próbek na ściskanie (zwłaszcza w przypadku próbek wzmocnionych przy użyciu żywicy epoksydowej). Natomiast zaobserwowano znaczący wzrost odkształcalności zarówno podłużnej jak i poprzecznej próbek, co przekłada się na wzrost energii zniszczenia. Największą energię zniszczenia mają próbki wzmocnione CFRP o powierzchni szlifowanej, nieco mniejszą o powierzchni piaskowanej, a najmniejszą w przypadku nieprzygotowania powierzchni. Zatem powierzchnia szlifowana, o wartości głębokości części środkowej profilu wynoszącej 0,3695 mm (nieprzygotowana – 0,1891 mm, piaskowana – 0,5953 mm) jest optymalną powierzchnią do stosowania. Dzięki niej można uzyskać wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie, zwiększony zakres pracy oraz większą energię potrzebną do zniszczenia elementów.
5. Udowodnienie tezy II stanowią uzyskane wyniki badań dla próbek wzmocnionych matrycą organiczną (żywica epoksydowa) i nieorganiczną (matryca cementowa). Matryca cementowa nie powinna być używana w przypadku wzmacniania elementów betonowych o wysokiej wytrzymałości, z uwagi na bardzo niską wytrzymałość na rozciąganie i słabą przyczepność do powierzchni betonowej, w porównaniu do kleju epoksydowego. Uzyskane wzrosty wytrzymałości próbek, niezależnie od ilości warstw wzmocnienia są bardzo niskie, i nie różnią się znacznie pomiędzy sobą. Również w tym przypadku zanotowano wzrost wytrzymałości i odkształcalności próbek o powierzchni szlifowanej, w porównaniu do pozostałych, jednakże stosowanie tej techniki w przypadku wzmacniania betonu wysokowytrzymałościowego jest nieuzasadnione i nieopłacalne.
6. Próba umieszczenia zbrojenia pierścieniowego z włókien węglowych wzmocnionych matrycą cementową wewnątrz struktury fibrobetonu samozagęszczalnego wysokowytrzymałościowego wykazała, iż rozwiązanie to nie zwiększa nośności analizowanych elementów. Wraz ze zwiększeniem ilości zbrojenia tego typu w betonie maleje jego wytrzymałość na ściskanie. Próba motywowana ochroną zbrojenia pierścieniowego z włókien węglowych w betonie przed ewentualnym działaniem ognia i ekstremalnych temperatur, a także jego efektywnego wykorzystania nie powiodła się. Spowodowane jest to niewystarczającą współpracą pomiędzy włóknami węglowymi i matrycą cementową oraz powstałym z tych

materiałów wzmocnieniem pierścieniowym i samozagęszczalnym fibrobetonem wysokowytrzymałościowym.

10. Zakończenie

Przeprowadzone badania, zarówno te wstępne, jak i zasadnicze dostarczyły szeregu interesujących wyników i obserwacji. Wykazano, że efektywność wzmocnienia elementów betonowych osiowo ściskanych zmniejsza się wraz ze wzrostem wytrzymałości rdzenia betonowego. Udowodniono, że wytrzymałość na ściskanie kolumn betonowych zwiększa się wraz z liczbą warstw zbrojeni CFRP zarówno w przypadku samozagęszczalnego fibrobetonu wysokowytrzymałościowego, jaki i kolumn stalowo–betonowych typu CFT. Wykazano, że stosując wspomniany beton specjalny i wzmacniając go materiałami kompozytowymi można uzyskać liniowo–sprężysto–plastyczną charakterystykę naprężenie–odkształcenie, co ma istotny wpływ na możliwość wykorzystania tego typu kombinacji materiałowych w elementach o dużych obciążeniach statycznych oraz dynamicznych, również na obszarach sejsmicznych. W pracy udowodniono i wyjaśniono, że przygotowanie powierzchni betonu przed procesem laminacji poprzez obróbkę powierzchniową przyczynia się do nieznacznego wzrostu nośności i istotnego odkształcalności elementów betonowych, co przekłada się na większą energię zniszczenia; zwłaszcza w przypadku wykonania powierzchni szlifowanej. Wykazano, że matryca cementowa nie powinna być stosowana jako zamiennik żywicy epoksydowej. Udowodniono również brak zasadności stosowania włókien węglowych jako zbrojenie wewnątrz struktury betonu.

11. Kierunki dalszych badań

Tematyka badawcza poruszona przeze mnie w niniejszej pracy będzie kontynuowana i rozwijana. Przeprowadzone zostaną dalsze prace badawcze związane bezpośrednio z tematyką wzmacniania elementów konstrukcyjnych przy użyciu CFRP. Dotyczą one między innymi zagadnień nośności elementów betonowych wzmocnionych włóknami węglowymi pochodzącymi z recyklingu. Włókna węglowe z recyklingu mogą być w przyszłości ponownie zastosowane do wzmocnienia konstrukcji inżynierskich. Dotyczy to zarówno elementów wzmocnionych włóknami węglowymi przy użyciu matrycy cementowej, jak i żywicy epoksydowej. W celu usunięcia matrycy włókna węglowe zespolone z matrycą cementową mogą być poddane mechanicznej obróbce, natomiast te poddane laminacji przy użyciu żywicy epoksydowej – obróbce termicznej.

Kolejnym zagadnieniem badawczym, które zrealizuję, będzie wpływ teksturowania powierzchni betonu na charakterystykę naprężenie-odkształcenie samozagęszczalnego fibrobetonu wysokowytrzymałościowego wzmocnionego CFRP. Teksturowanie powierzchni betonu może przyczynić się do zwiększenia efektywności współpracy zbrojenia zewnętrznego i betonu, a także zmniejszyć koszty prac związanych z przygotowaniem powierzchni przed procesem laminacji.

Innym możliwym kierunkiem badań jest wzmocnienie przy użyciu CFRP betonu zawierającego w składzie kruszywo pochodzące z recyklingu opon samochodowych. Liczba zużywających się opon rośnie w szybkim tempie, a problem ich utylizacji staje się jednym z istotnych problemów środowiskowych i ekologicznych obecnych czasów. Dlatego też naukowcy na całym świecie poszukują możliwości ponownego ich zastosowania. Technologia CFRP w połączeniu z betonem zawierającym kruszywo z opon może stać się w krótkim okresie czasu nowym obszarem badań naukowych.

12. Wykaz ważniejszych oznaczeń

E – moduł sprężystości Younga

R_r – wytrzymałość na rozciąganie

ε_{\max} – wydłużenie maksymalne

ρ – gęstość objętościowa

d – średnica włókien

f_{frp} – wytrzymałość na rozciąganie dla maty z włókien węglowych

E_f – moduł sprężystości E przy rozciąganiu dla maty z włókien węglowych

δ_{frp} – wydłużenie przy zerwaniu maty z włókien węglowych

s_{frp} – gęstość powierzchniowa maty z włókien węglowych

t_{frp} – nominalna grubość maty z włókien węglowych

f_{er} – wytrzymałość na rozciąganie żywicy epoksydowej

E_{er1} – moduł sprężystości E żywicy epoksydowej przy zginaniu

E_{er2} – moduł sprężystości E żywicy epoksydowej przy rozciąganiu

δ_{er} – wydłużenie przy zerwaniu żywicy epoksydowej

ρ_{er} – gęstość objętościowa żywicy epoksydowej

E_1 – moduł sprężystości betonu określany jakościowo

E_2 – moduł sprężystości wzmocnienia określany jakościowo

F_{\max} – siła niszcząca

R_c – wytrzymałość na ściskanie

ε_1 – Odkształcenie osiowe w momencie zniszczenia kolumn betonowych

ε_2 – Odkształcenie osiowe w momencie zniszczenia betonu

ε_p – Odkształcenie poprzeczne w momencie zniszczenia betonu

\bar{R}_c – Średnia wytrzymałość na ściskanie

$\bar{\sigma}$ – Odchylenie standardowe wytrzymałości

$\bar{\varepsilon}_1$ – Średnie odkształcenie osiowe w momencie zniszczenia kolumn

$\bar{\epsilon}_2$ - Średnie odkształcenie osiowe w momencie zniszczenia betonu

$\bar{\epsilon}_b$ - Średnie odkształcenie poprzeczne w momencie zniszczenia betonu

\bar{E}_1 - Średnia wartość modułu sprężystości

\bar{E}_2 - Średni wartość modułu sprężystość wzmocnienia

f_y – granica plastyczności stali

E_s – moduł sprężystości stali

δ_s – wydłużenie stali przy zerwaniu

f_u – wytrzymałość na rozciąganie stali

t_s – grubość ścianki rury stalowej

ϵ_{cc1} – odkształcenia osiowe w początkowej fazie strefy przejściowej

ϵ_{cc2} – odkształcenia osiowe w końcowej fazie strefy przejściowej

ϵ_{cu} – końcowe odkształcenia osiowe

f_{cc1} – wytrzymałość na ściskanie w początkowej fazie strefy przejściowej

f_{cc2} – wytrzymałość na ściskanie w końcowej fazie strefy przejściowej

f_{ccu} – końcowa wytrzymałość na ściskanie

S_{pk} – średnia wysokość wysokich wzniesień położnych ponad rdzeniem profilu chropowatości

S_k – głębokość części środkowej profilu chropowatości

S_{vk} – średnia głębokość głębokich wgłębień znajdujących się pod rdzeniem profilu chropowatości

Mr_1 - udział materiałowy odpowiadający górnej granicy rdzenia profilu

Mr_2 - udział materiałowy odpowiadający dolnej granicy rdzenia profilu

σ_{max} – maksymalne naprężenie ściskające

$\bar{\sigma}_{max}$ – średnia wartość maksymalnych naprężeń ściskających

13. Literatura

1. Rajczyk, M., Stachecki, B.: Współczesne materiały kompozytowe – wybrane kierunki rozwoju nowych technologii. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*. Poland, 2011; pp.202-211.
2. Lis, J.: Composites. *Academic lecture*, 2017, AGH University of Science and Technology, Poland.
3. Zubel, I.: Composites. *Academic lecture*, 2010, Wrocław University of Technology, Poland.
4. Mayer, P., Kaczmar J.: Właściwości i zastosowania włókien węglowych i szklanych. *Tworzywa Sztuczne i Chemia*, 2008.
5. Lim J.C., Ozbakkaloglu T. Confinement model for FRP-confined high-strength concrete. *Journal of Composites for Construction*, 2013.
6. W. Yang, W. Gang, L. Guofen. Performance of circular concrete-filled fiber-reinforced polymer-steel composite tube columns under axial compression. *J Reinf Plast Compos*, 33 (20) (2014), pp. 1911-1928.
7. Bahira Abdulsalam, Behaviour of shear critical FRP reinforced concrete one-way slabs. *Phd Thesis*, 2014.
8. <https://m.made-in-china.com/product/Chopped-Basalt-Fibre-for-Cement-Concrete-730621802.html>
9. <https://www.indiamart.com/proddetail/carbon-fiber-chopped-strand-9434027430.html>
10. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aramid_fiber.jpg
11. <https://www.indiamart.com/proddetail/kevlar-fiber-11675619333.html>
12. Ostrowski, K.; Dudek, M.; Sadowski, Ł. Compressive behaviour of concrete-filled carbon fiber-reinforced polymer steel composite tube columns made of high performance concrete. *Compos. Struct.* 2019, 111668.
13. Aidy Ali, Z., Shaker R., Khalina A., Sapuan S. M.: Development of Anti-Ballistic Board from Ramie Fiber. *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 50(6):622-634,2011.
14. Yeung, K. K. H., & Rao, K. P.: Mechanical Properties of Kevlar-49 Fibre Reinforced Thermoplastic Composites. *Polymers and Polymer Composites*, 20(5), 2012, 411–424.
15. Manigandan, S.: “Determination of Fracture Behavior under Biaxial Loading of Kevlar 149.” *Applied Mechanics and Materials* 766–767 (June 2015): 1127–32.
16. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026635389390037H>
17. Dobrzański, L.A.: Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, WNT, 2002, Poland.

18. <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/e-glass>
19. Krishan P, Purna S.: Properties and Applications of Basalt Fiber and Its Composites. *Proceeding of National Conference on Advances in Structural Technologies*. 2019.
20. <https://basaltfiberworld.wordpress.com/basalt-fiber-properties/>
21. www.toraycma.com%2Ffile_viewer.php%3Fid%3D5081&usg=AOvVaw0bwOBXjdqvfbuuJADhli4M35 High Modulus Carbon Fibre, Technical Card.
22. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/carbon-fiber-properties>
23. Leda, H.: Szklane czy węglowe włókna w kompozytach polimerowych. *Kompozyty*, 3, 2003, Poland.
24. Kobets, L.P., Deev, I.S.: Carbon fibres: structure and mechanical properties. *Composites Science and Technology*, 57, 1997.
25. Carolin, A.: Carbon Fibre Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements. Doctoral thesis. Lulea: Lulea University of Technology, 194 p. 2003.
26. Tyczynski, P., Sliwa, R.E., Ostrowski, R.: Analysis of possibilities for modification of drill bit geometrical parameters used to drill holes in composite materials of various composition. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 87(2):120-130, 2015.
27. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwi4s5Gr7d_mAhXIAxAIHcNdA8oQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fpol.sika.com%2Fdocs%2Fgetdocument.get%2F60837435-f1c9-37a8-8c39-705a1a1ec4b7%2FMS_2011_06%2520Maty%2520SikaWrap_dry_PL.pdf&usg=AOvVaw353Vak-FutaFSSmbEr8oKX Instructions for Use Mat SikaWrap, Technical Card, Sika, 2019.
28. García-Moreno, I.; Caminero, M.Á.; Rodríguez, G.P.; López-Cela, J.J. Effect of Thermal Ageing on the Impact Damage Resistance and Tolerance of Carbon-Fibre-Reinforced Epoxy Laminates. *Polymers* 2019, 11, 160. doi:10.3390/polym11010160.
29. Trapko, T. The effect of high temperature on the performance of CFRP and FRCM confined concrete elements. *Compos. Part B* 2013, 54, 138–145. doi:10.1016/j.compositesb.2013.05.016.
30. Aktaş, M.; Karakuzu, R.; Arman, Y.: Compression-after impact behavior of laminated composite plates subjected to low velocity impact in high temperatures. *Compos. Struct.* 2009, 89, 77–82. doi:10.1016/j.compstruct.2008.07.002.
31. Al-Abdwais, A.; Al-Mahaidi, R.; Al-Tamimi, A.: Performance of NSM CFRP strengthened concrete using modified cement-based adhesive at elevated temperature. *Constr. Build. Mater.* 2017, 132, 296–302. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.136.

32. Sadrmomtazi, A.; Khabaznia, M.; Tahmouresi, B.: Effect of Organic and Inorganic Matrix on the Behavior of FRP-Wrapped Concrete Cylinders. *J. Rehabil. Civ. Eng.* 2016, 4, 52–66. doi:10.22075/jrce.2017.1763.1154.
33. Colajanni, P.; De Domenico, F.; Recupero, A.; Spinella, N. Concrete columns confined with fibre reinforced cementitious mortars: experimentation and modelling. *Constr. Build. Mater.* 2014, 52, 375–384. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.048.
34. Al-Abdwais, A.; Al-Mahaidi, R.: Modified cement-based adhesive for near-surface mounted CFRP strengthening system. *Constr. Build. Mater.* 2016, 124, 794–800. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.07.147.
35. Szymanowski, J.: Evaluation of the Adhesion between Overlays and Substrates in Concrete Floors: Literature Survey, Recent Non-Destructive and Semi-Destructive Testing Methods, and Research Gaps. *Buildings* 2019, 9, 203.
36. Sadowski, Ł.; Czarnecki, S.; Hoła, J.: Evaluation of the height 3D roughness parameters of concrete substrate and the adhesion to epoxy resin. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2016, 67, 3–13.
37. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjn3Piu7t_mAhVuxosKHYQnDSQQFjAAegQIBhAC&url=https%3A%2F%2Fpol.sika.com%2Fdms%2Fgetdocument.get%2F868db253-ebc3-37a2-8b0b-1dee36403f07%2FSikacrete-213F_pl_PL_\(082016\)_1_1.pdf&usg=AOvVaw16mnfQziMbfstMqVB14aaM](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjn3Piu7t_mAhVuxosKHYQnDSQQFjAAegQIBhAC&url=https%3A%2F%2Fpol.sika.com%2Fdms%2Fgetdocument.get%2F868db253-ebc3-37a2-8b0b-1dee36403f07%2FSikacrete-213F_pl_PL_(082016)_1_1.pdf&usg=AOvVaw16mnfQziMbfstMqVB14aaM) Instructions for Use Sikacrete®-213 F, Technical Card, Sika, 2019.
38. <http://novotest.biz/ultrasonic-testing-of-welds/>
39. <https://www.structuremag.org/?p=8643>
40. <https://www.horseen.com/project/frp-reinforcement-brick-concrete-structure-reinforcement>
41. <https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/externally-applied-frp-reinforcement-for-concrete-structures-pdf-detail.html>
42. <https://www.horseen.com/solution/frp-reinforcement-masonry-buildings-republic-china>
43. https://www.horseen.com/index/customer_case/index?page=5
44. <https://theconstructor.org/structural-engg/frp-rcc-column-axial-strengthening/16683/>
45. Glinicki, M.: Beton ze zbrojeniem strukturalnym, XXV Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji, Szczyrk, 2010.

46. Ostrowski, K.; Kinasz, R.; Cieřlik, J.; Wałach, D.: The influence of CFRP sheets on strength of short columns produced from normal strength concrete and fibre reinforced concrete . Technical Transaction, Civil Engineering, 2016.
47. Kinash, R.; Bilozir, V.: Deformational calculation method of bearing capability of fiber-concrete steel bending elements. Technical Transactions, Architecture, Politechnika Krakowska, 2014.
48. Karwowska, J.; Łapko, A.: Przydatność stosowania nowoczesnych kompozytów fibrobetonowych w konstrukcjach budowlanych, Politechnika Białostocka, 2011.
49. Kasperkiewicz, J.: Struktura uzbrojenia w kompozytach z włóknami rozproszonymi, Mechanika kompozytów betonopodobnych. Konferencja naukowa Jabłonna, 1979. Ossolineum, Wrocław 1982.
50. Mesba, H.A., Buyle-Bodin, F.: Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars. Construction and Building Materials. 13,1999, 439-447.
51. Sun, W., Zhang, Y.M., Yan, H.D., Mu, R.: Damage and damage resistance of high strength concrete under the action of load and freeze-thaw cycles. Cement and Concrete Research. 26, 1999, 1519-1523.
52. Jamroży, Z.: Beton i jego technologie. PWN, Warszawa 2005.
53. Brandt, A.M.: Cement Based Composites: Materials, Mechanical Properties and Performance. "Taylor and Francis". London and New York 2009.
54. Beckett, D.: Comparative Tests of Plain, Fabric Reinforced and Steel Fibre Reinforced Concrete Ground Slabs. "Concrete". 24(3), 1990, 43-45.
55. Ostrowski, K.: Wpływ zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość betonu zwykłego. II Ogólnopolska Studencka Konferencja Budowlana, Poznań, 2015.
56. Małolepszy, J. et. al.: Technologia betonu. Wydawnictwa AGH, 2011.
57. Szwabowski, J.; Ponikiewski, T.: Analiza testów i urabialności fibrobetonów, Politechnika Śląska w Gliwicach, 2000.
58. RILEM TC162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. "Materials and Structures". 36, 2003, 560-567.
59. Zbylut, S.: Minimalna zawartość włókien stalowych w fibrobetonie z punktu widzenia zarysowalności i nośności, Politechnika Krakowska, 2008.
60. Standards for test methods of Fiber Reinforced Concrete, JCI SF-4 - Method of Test for Flexural Strength and Toughness of Fiber Reinforced Concrete, Concrete Library No. 50 Japan Society of Civil Engineering. 1984.

61. Golewski, G.: A novel specific requirements for materials used in reinforced concrete composites subjected to dynamic loads. *Composite Structures*, vol. 223, 110939
62. Wałach, D.; Dybeł P.; Jaskowska-Lemańska, J.: Diagnostyka konstrukcji budownictwa transportowego wykonanych z betonów wysokowartościowych, *Logistyka*, 2014.
63. Smarzewski, P.; Poręba, J.; Rentflejsz, A.: Badania doświadczalne tarcz żelbetowych z betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien. *Budownictwo i Architektura*, 2012.
64. Katzer, J.: Wpływ włókien stalowych na właściwości wybranych kompozytów cementowych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008.
65. Shehata, I., Carneiro, L., Shehata, L.: Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets. *Materials and Structures*, Volume 35, 2002.
66. Berthet, J.F.; Ferrier, E.; Hamelin, P.: Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: experimental study. *Construction and Building Materials*, 2005.
67. Karbhari, M.; Douglas, A.E.: Effects of Short-Term Environmental Exposure on Axial Strengthening Capacity of Composite Jacketed Concrete. American Society for Testing and Materials, 1995.
68. Mirmiran, A.; Yuan, W.; Chen, X.: Design for Slenderness in Concrete Columns Internally Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. *ACI Structural Journal*, 2002.
69. Ostrowski, K.: The influence of CFRP sheets on the strength of specimens produced using normal concrete and high-performance concrete assessed using uniaxial compression tests. *Technical Transaction, Civil Engineering*, 2017.
70. Ostrowski, K., Kinasz, R., Cieślik, J., Wałach, D., Ahmida, B.: Bearing capacity of concrete columns produced from high performance concrete and high performance fibre reinforced concrete confined by CFRP sheets under uniaxial compression. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, 2016.
71. Khan, Q.S.; Sheikh, M.N.; Hadi, M.N.S.: Concrete Filled Carbon FRP Tube (CFRP-CFFT) columns with and without CFRP reinforcing bars: Axial-flexural interactions. *Composites Part B: Engineering*, 2018.
72. Xiao, Y.; Wu, H.: Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets. *Journal of material in civil engineering*, 2000.
73. Chikh, N.; Gahmous, M.; Benzaid, R.: Structural Performance of High Strength Concrete Columns Confined with CFRP Sheets. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, 2012.

74. Bogdanovic, A.: Strengthening Circular Concrete Columns Using FRP Sheets-Applications. *Composite Materials in Civil Engineering*, 2002.
75. Sakino, K.; Nakahara, H.; Morino, S. et al.: Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns. *Journal of Structural Engineering ASCE* 2004.
76. Saafi, M.; Toutanji, H.A.; Li, Z.J.: Behavior of concrete columns confined with fiber reinforced polymer tubes. *ACI Mater J* 1999.
77. Xiao, Y. Wu, H.: Compressive behavior of concrete confined by various types of FRP composite jackets. *Journal of reinforced plastic and composites*, 2003.
78. Oliveira, D. S.; Raiz, V.; Carrazedo, R.: Experimental Study on Normal-Strength, High-Strength and Ultrahigh-Strength Concrete Confined by Carbon and Glass FRP Laminates. *J. Compos. Constr.*, 2019, 23(1): 04018072.
79. Athanasios, I.; Theodoros, C.: Carbon FRP confined concrete elements under axial load. Democritus University of Thrace, Xanthi utopia.duth.gr/~trousak/files/papers/paper1CICE%200103.pdf
80. Ozbakkaloglu, T.: Behavior of square and rectangular ultra high-strength concrete-filled FRP tubes under axial compression. *Compos Part B Eng* 2013.
81. Ozbakkaloglu, T.: Compressive behavior of concrete-filled FRP tube columns: Assessment of critical column parameters. *Eng Struct* 2013.
82. Jiang, S.; Fernando, D.; Ho, JCM, Heitzmann M.: Behavior of FRP confined ultrahighstrength concrete columns under axial compression: An experimental study. In: *Mechanics of Structures and Materials: Advancements and Challenges, Proceedings of the 24th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM/24)*, Perth,WA, 6-9 December 2016. p. 1737-1744.
83. Kaminski, M.; Trapko, T.: Experimental behavior of reinforced concrete column models strengthened by CFRP materials. *J Civ Eng Manage* 2006;12(2):109–115.
84. Park, TW.; Na, UJ; Chung, L.; Feng, MQ.: Compressive behavior of concrete cylinders confined by narrow strips of CFRP with spacing. *Composites: Part B* 2008;39(7–8):1093–103.
85. Campione, G.; Miraglia, N.: Strength and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP. *Cement Concr Compos* 2003;25(1):31–41.
86. Koosha, K.; Pedram, S.: Performance of high-modulus near-surface-mounted FRP laminates for strengthening of concrete columns. *Composites: Part B* 2019;164:90-102.

87. Rajai, Z.; Al-Rousan, Muneer HB.: Impact of curvature type on the behaviour of slender reinforced concrete rectangular column confined with CFRP composite. *Composites: Part B* 2019;173:106939.
88. Mohammed, AZ.; Hayder, AR.; Alkhrdaji, T.: Performance of CFRP-strengthened concrete beams fastened with distributed CFRP dowel and fiber anchors. *Composites: Part B* 2019; in press, accepted manuscript.
89. Huifeng, Z.; Jin, W.; Fengyu, J.; Chengjun, Z.: Effect of corroded tension reinforcements on flexural performance of reinforced recycled aggregate concrete beams strengthened with CFRP. *Composites: Part B* 2019;162: 589-599.
90. Ostrowski, K.: Does the Carbon Fibre Coating Reinforcement Have an Influence on the Bearing Capacity of High-Performance Self-Compacting Fibre-Reinforced Concrete? *Materials* 2019, 12, 4054.
91. Kissman, V.; Sundar, Lenin.: An experimental study on strengthening of RC column with GFRP, *Materials Today: Proceedings*, 2019,
92. Sadeghian, P.; Fillmore, B.: Strain distribution of basalt FRP-wrapped concrete cylinders, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 9, 2018.
93. Campione et. al.: Behavior in compression of concrete cylinders externally wrapped with basalt fibers. *Composites Part B Engineering* 69:576-586, 2015.
94. Toutanji, H.; Deng Y.: Strength and durability performance of concrete axially loaded members confined with AFRP composite sheets. *Composites Part B Engineering* 33(4):255-261, 2011.
95. Eid, R.; Paultre, P.: Compressive behavior of FRP-confined reinforced concrete columns, *Engineering Structures*, Volume 132, pages 518-530, 2017.
96. Bompa D.V., Elghazouli, A.Y.: Stress–strain response and practical design expressions for FRP-confined recycled tyre rubber concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 237, 2020,117633.
97. Weiqiang, W.; Chengqing, W.; Zhongxian, L.; Honglan, S.: Compressive behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) confined with FRP, *Composite Structures*, Volume 204, pages 419-437, 2018.
98. Zhou, Y.; Xiaoming, L.; Feng, X.; Hongzhi, C.; Lili, S.: Axial compressive behavior of FRP-confined lightweight aggregate concrete: An experimental study and stress-strain relation model. *Materials Science*, 2016.
99. O’Shea MD, Bridge RQ.: Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes. *J Struct Eng ASCE* 2000;126:1295–1303.

100. Gardner, N.J.; Jacobson, E.R.: Structural behavior of concrete filled steel tubes. *ACI J Proc* 1967;64:404–413.
101. Jizhong, W.; Lu, Ch.; Junlong Y.: Compressive behavior of CFRP-steel composite tubed steel-reinforced columns with high-strength concrete. *J Constr Steel Research* 2018;150:354–370.
102. Ozbakkaloglu, T.: Axial compressive behavior of square and rectangular high-strength concrete-filled FRP tubes. *J Compos Constr* 2013;17:151–161.
103. Fam, A.; Manda, S.; Rizkalla S.: Rectangular filament wound glass fiber reinforced polymer tubes filled with concrete under flexural and axial loading: Analytical modelling. *J Compos Constr* 2005;9:34–43.
104. Zhu, ZY.; Ahmad, I.; Mirmiran, A.: Seismic performance of concrete-filled FRP tube columns for bridge substructure. *J Bridge Eng* 2006;11:359–370.
105. Karimi, K.; Tait, M.J.; El-Dakhakhni, W.W.: Influence of slenderness on the behaviour of a FRP-encased steel concrete composite column. *J Compos Constr* 2012;16:100–109.
106. Karimi, K.; Tait, M.J.; El-Dakhakhni, W.W.: Analytical modelling and axial load design of a novel FRP-encased steel-concrete composite column for various slenderness ratios. *Eng Struct* 2013;46:526–534.
107. Huang, L.; Gao, C.; Yan, L.; Yu, T.; Kasal, B.: Experimental and numerical studies of CFRP tube and steel spiral dual-confined concrete composite columns under axial impact loading. *Composites Part B: Engineering* 2018;152:193-208.
108. Xiao, Y.; He, W.H.; Choi, K.K.: Confined concrete-filled tubular columns. *J Struct Eng ASCE* 2005;131:488–497.
109. Liu, L.; Lu, Y.Y.: Axial bearing capacity of short FRP confined concrete-filled steel tubular columns. *J Wuhan Univ Technol* 2010;25:454–458.
110. Hu, Y.M.; Yu, T.; Teng, J.G.: FRP-confined circular concrete-filled thin steel tubes under axial compression. *J Compos Constr* 2011;15:850–860.
111. Park, J.W.; Hong, Y.K.; Hong, G.S.; Kim, J.H.: Design formulas of concrete filled circular steel tubes reinforced by carbon fiber reinforced plastic sheets. *Procedia Eng* 2011;14:2916–2922.
112. Prabhu, G.G.; Sundararaja, M.C.: Behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) short columns externally reinforced using CFRP strips composite. *Constr Build Mater* 2013;47:1362–1371.
113. Sundararaja, M.C.; Prabhu, G.G.: Investigation on strengthening of CFST members under compression using CFRP composites. *J Reinf Plast Compos* 2011;30:1251–1264.

- 114.Teng, JG.; Hu, YM.; Yu, T.: Stress-strain model for concrete in FRP-confined steel tubular columns. *Eng Struct* 2013;49:156–167.
- 115.Smith, ST.; Kim, MSJ.; Zhang, HW.: Behaviour and Effectiveness of FRP Wrap in the Confinement of Large Concrete Cylinders. *J. Compos. Constr.* 2010;14:573–582.
- 116.Yiyan, L.; Na, L.; Shan, L.: Behaviour of FRP-Confined Concrete-Filled Steel Tube Columns. *Polymers* 2014;6(5):1333-1349
- 117.Golewski, G.: Domieszki do betonu. Efekty działania, ocena i badania efektywności, stosowanie, Politechnika Śląska, Gliwice, 2013
- 118.<https://pol.sika.com/pl/refurbishment-redirect/sika-refurbishment-solutions/02a013/02a013sa06.html>
- 119.<https://pol.sika.com/pl/refurbishment-redirect/sika-refurbishment-solutions/02a025/02a025sa02/02a025sa02ssa04.html>
- 120.EN 12390-13:2013, Testing hardened concrete, Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression.
- 121.Piekarczyk, J.; Macherzyńska, B.; Błażewicz, S.: Badania nad wykorzystaniem laminatów węglowych do wzmacniania kształtek betonowych. *Kompozyty*, 2005.
- 122.de Lorenzis, L.; Tepfers, R.: Applicability of FRP Confinement to Strengthen Concrete Columns, *Nordic Concrete Research*, Publication No. 31. The Nordic Concrete Federation, 2000.
- 123.Faella, C.; Realfonzo, R.; Salerno, N.: FRP confined concrete constitutive relationships, *FRP Composites in Civil Engineering*, Adelaide 2004.
- 124.Olivová, K.; Bilčík, J.: Strengthening of concrete columns with CFRP, *Slovak Journal of Civil Engineering*, Vol. 1, 2009.
- 125.Rousakis, T.: Experimental Investigation of Concrete Cylinders Confined by Carbon FRP Sheets, under Monotonic and cyclic Axial Compressive Load, *Chalmers University of Technology*, Göteborg 2001.
- 126.PN-EN 1992-1-1:2004, Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- 127.EN 206:2013, Concrete – Specification, performance, production and conformity.
- 128.EN 12390-3:2009, Testing Hardened Concrete. Compressive Strength of Test Specimens; Polish Committee for Standardization: Warszawa, Poland, 2009.
- 129.Hashin, Z.: Failure criteria for unidirectional fibre composites. *ASME Journal of Applied Mechanics* 1980;47(2):329-334.

- 130.Lupășteanu, V.; Țăranu, N.; Popoaei, S.: Theoretical Strength Properties of Unidirectional Reinforced Fiber Reinforced Polymer Composites. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy* 2013;63(6):83-98.
- 131.Kim, H.; Suntharavadivel, TG.; Duan, K.: Experimental Study of Concrete Filled FRP Tubes under Axial Loading. *5th International Conference on Sustainable Built Environment*. Kandy, Srilanka. 2014;1-6.
- 132.Bourouz, A.; Chikh, N.; Benzaid, R.; Laraba, A.: Confinement of High Strength Concrete Columns with CFRP Sheets. *Proceedings of the World Congress on Engineering*. London, UK. 2014
- 133.Etman, EE.: Efficiency of strengthening R C columns, with different slenderness ratios, using “CFRP” wraps. *27th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES*. Singapore, 2002.
- 134.Elsanadedy, HM.; Al-Salloum, YA.; Alsayed, SH.; Iqbal, RA.: Experimental and numerical investigation of size effects in FRP-wrapped concrete columns. *Construction and Building Materials*. 2012;29:56-72
- 135.Jiang, SF.; Ma, SL.; Wu, ZQ.: Experimental study and theoretical analysis on slender concrete-filled CFRP–PVC tubular columns. *Construction and Building Materials*. 2014;53:475-487
- 136.Soliman, AES.: Behaviour of long confined concrete column. *Ain Shams Engineering Journal*. 2011;2(3-4):141-148
- 137.Al-Abdwais, A.; Hasan Al-Mahaidi, R.S.: Bond properties between carbon fibre reinforced polymer (CFRP) textile and concrete using modified cement-based adhesive. *Construction and Building Materials*. 2017, 154: 983-992. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.027>
- 138.Zhou, A.; Qin, R.; Lun Chow, C.; Lau, D. :Structural performance of FRP confined seawater concrete columns under chloride environment. *Composite Structures*. 2019, 216: 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.058>
- 139.Jadooe, A.; Al-Mahaidi, R.; Abdouka, K.: Bond Behavior between NSM CFRP Strips and Concrete Exposed to Elevated Temperature Using Cement-Based and Epoxy Adhesives. *Journal of Composites for Construction*. 2017;04017033. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000812](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000812)
- 140.Fpr EN 12350-8:2009, Testing fresh concrete - Part 8: Self-compacting concrete - Slump flow test.

- 141.Śliwiński, J.: Wall effect - essence of the phenomenon and the way of taking it into account in the concrete mix design. Cement, Wapno, Beton. 1998, 151-154.
- 142.Cattaneo, S.; Rosati, G.: Bond between Steel and Self-Consolidating Concrete: Experiments and Modeling. ACI Structural Journal. 2009, 106-S52.
- 143.Czarnecki, S.; Hoła, J.; Sadowski, Ł.: A nondestructive method of investigating the morphology of concrete surfaces by means of newly designed 3D scanner. 1th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic.
- 144.ISO 25178: Geometric Product Specifications (GPS) – Surface texture: areal.
- 145.Zaleski, K.; Matuszak, J.; Zaleski R.: Metrologia warstwy wierzchniej. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej 2018.
- 146.Cybo, J.; Gołąb, A.; Służalek, G.: Badania struktury geometrycznej warstwy wierzchniej metodą 3D. Solidification of Metals and Alloys, Year 2000, Volume 2, Book No. 44 Krzepnięcie Metali i Stopów, Rok 2000, Rocznik 2, Nr 44 PAN – Katowice PL ISSN 0208-9386

Spis rysunków:

Rysunek 1. Klasyfikacja kompozytów z uwagi na ich konstrukcję.

Rysunek 2. Idea kompozytów FRP.

Rysunek 3. Główne rodzaje włókien FRP: a) włókna węglowe; b) włókna bazaltowe; c) włókna szklane; d) włókna aramidowe.

Rysunek 4. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla włókien FRP oraz stali.

Rysunek 5. Zróżnicowana orientacja włókien węglowych w kompozycie wytwarzanym z trzech laminatów CFRP.

Rysunek 6. Etapy w procesie mokrego układania: a) wzmocnienie podłoża betonowego, b) nasączenie zbrojenia, c) umieszczenie nasączonego FRP na wałku, d) usunięcie pęcherzyków powietrza za pomocą wałka z tworzywa sztucznego.

Rysunek 7. Etapy w procesie suchego układania: a) wzmocnienie podłoża betonowego, b) zastosowanie zbrojenia FRP na podłożu betonowym.

Rysunek 8. Żywica epoksydowa (a) i matryca cementowa (b).

Rysunek 9. Rodzaje przygotowania powierzchni betonowych: nieprzygotowana (a), piaskowana (b), szlifowana (c), śrutowana (d).

Rysunek 10. Idea przeprowadzenia badań ultradźwiękowych.

Rysunek 11. Wzmacniane elementy betonowe przy użyciu technologii FRP: a,b) słupy; c) belki; d) płyty; e) ściany; f) filary.

Rysunek 12. Przykłady kształtu włókien stalowych przeznaczonych do betonu (z haczykowatymi odgięciami na obu końcach (1), klejone w pasma (2), z zakotwieniami uformowanymi na końcach (3,7), o kształcie wiosłkowym (4), faliste (5,6), proste gładkie (8).

Rysunek 13. Mikrowłókna polipropylenowe fibrylowane o długości ok. 12mm (a), makrowłókna syntetyczne - skręcona wiązka długości 54mm (b) oraz włókna Fibermesh HPP (c).

Rysunek 14. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla betonów wzmocnionych kompozytem: beton o niskiej wytrzymałości na ściskanie (a); beton o średniej wytrzymałości na ściskanie (b); beton o wyższej wytrzymałości na ściskanie (c).

Rysunek 15. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla betonów wzmacnianych włóknami szklanymi GFRP (a), włóknami węglowymi CFRP (b).

Rysunek 16. Typowe krzywe naprężenie-odkształcenie dla betonu wzmocnionego FRP: beton zwykły (a), beton wysokowytrzymałościowy (b), beton ultra wysokowytrzymałościowy (c).

Rysunek 17. Wzmocnienie istniejącej kolumny betonowej.

Rysunek 18. System pomiarowy MTS wykorzystany do przeprowadzenia testów jednoosiowego ściskania (a) i schemat przedstawiający pomiar przemieszczeń osiowych i poprzecznych kolumn betonowych (b).

Rysunek 19. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie osiowe dla próbek: NCC (a), FRCC (b), NCC-CFRP (c), FRCC-CFRP (d).

Rysunek 20. Zniszczenie kolumn z betonu zwykłego (a) i fibrobetonu zwykłego (b).

Rysunek 21. Zniszczenie kolumn z betonu zwykłego wzmocnionych CFRP.

Rysunek 22. Zniszczenie kolumn z fibrobetonu zwykłego wzmocnionych.

Rysunek 23. Zbrojenie CFRP oderwane od powierzchni NCC-CFRP (a) and FRCC-CFRP (b).

Rysunek 24. Widok powierzchni betonu przed (po lewej) i po procesie szlifowania (po prawej).

Rysunek 25. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie osiowe dla próbek: BWW (a), FBWW(b), BWW-CFRP (c), FBWW-CFRP (d).

Rysunek 26. Reprezentatywny przebieg zniszczenia próbek: betonu wysokowytrzymałościowego (a), fibrobetonu wysokowytrzymałościowego (b) betonu wysokowytrzymałościowego wzmocnionego CFRP (c) fibrobetonu wysokowytrzymałościowego wzmocnionego CFRP (d).

Rysunek 27. Powierzchnia próbki betonu wysokowytrzymałościowego po oderwaniu się zbrojenia CFRP wskutek zniszczenia (a) oraz zbrojenie CFRP oderwane od powierzchni BWW-CFRP (b).

Rysunek 28. Powierzchnia próbki fibrobetonu wysokowytrzymałościowego po oderwaniu się zbrojenia CFRP wskutek zniszczenia (a) oraz zbrojenie CFRP oderwane od powierzchni FBWW-CFRP (b).

Rysunek 29. Schemat przedstawiający pomiar przemieszczeń osiowych i poprzecznych kolumn betonowych.

Rysunek 30. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla rur stalowych (SP).

Rysunek 31. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla: wypełnionych betonem HPC stalowych rur (CFT); (a), wypełnionych betonem HPC rur stalowych wzmocnionych 1, 2 i 3 warstwami zbrojenia CFRP (CFCT); (b-d)

Rysunek 32. Typowy przebieg zniszczenia badanych próbek: miejscowe uplastycznienie górnej części próbki (a), pęknięcie CFRP w górnej części próbki (b), rozłożone w czasie pęknięcie CFRP w środkowej części próbki (c).

Rysunek 33. Model 3D kolumn CFCT: przekrój poprzeczny przedstawiający elementy składowe modelu (HPC – kolor niebieski, rura stalowa – kolor czerwony, CFRP – kolor zielony, element sztywny – żółty); (a), model z siatką elementów skończonych (b).

Rysunek 34. Porównane wyniki analizy MES z wynikami badań laboratoryjnych dla każdej grupy próbek: HPC (a), rura stalowa SP (b), stalowe kolumny wypełnione betonem CFT (c), CFCT 1 (d), CFCT 2 (e), CFCT 3 (f), HPC-CFRP (g)

Rysunek 35. Etapy przygotowania pierścieni CFRR (carbon fibre coated reinforcement rings): pocięte na odpowiedni wymiar włókna węglowe (a), włókna węglowe pokryte świeżą matrycą cementową (b) oraz pierścienie CFRR (c).

Rysunek 36. Krzywa uziarnienia kruszywa drobnego i grubego.

Rysunek 37. Stalowe zbrojenie rozproszone (a), stożek rozplywu (b) test rozplywu (c).

Rysunek 38. Przekrój poprzeczny analizowanych próbek.

Rysunek 39. Pierścienie zbrojenia CFRR wewnątrz szalunku z rur polipropylenowych.

Rysunek 40. Schemat badania próbek z zastosowaniem czujników przemieszczeń w połowie wysokości próbek.

Rysunek 41. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla analizowanych próbek: grupa C (a), grupa C110 (b), grupa C60 (c), grupa C60-110 (d), grupa C150 (e).

Rysunek 42. Reprezentatywny przebieg zniszczenia betonu HPSCFRC zawierającego zbrojenie w postaci CFRR.

Rysunek 43. Zaobserwowane etapy postępującego procesu zniszczenia próbek, reprezentatywne dla próbek zawierających zbrojenie CFRR, na przykładzie próbki betonowej z jednym pierścieniem CFRR o średnicy 110mm.

Rysunek 44. Typowy przebieg zniszczenia HPSCFRC wzmocnionego jedną warstwą włókien węglowych przy użyciu matrycy cementowej: powierzchnia poślizgu (a) i oderwane włókna węglowe od powierzchni betonu (b).

Rys. 45. Formy po zabetonowaniu mieszanką betonową.

Rysunek 46. Haczykowate stalowe mikrozbrojenie rozproszone użyte w badaniach.

Rysunek 47. Podział próbek przeznaczonych do wzmocnienia z uwagi na rozpatrywane zmienne.

Rysunek 48. Skaner 3D oparty na metodzie triangulacji laserowej: schemat konfiguracji testu (a), widok konfiguracji testu (b).

Rysunek 49. Krzywa udziału materiałowego profilu chropowatości i jej parametry.

Rysunek 50. Tarcza szlifierska ceramiczna (a) oraz piaskarka syfonowa z dyszą wodną (b).

Rysunek 51. Powierzchnia nieprzygotowana (a), powierzchnia szlifowana (b) oraz powierzchnia piaskowana (c).

Rysunek 52. Pierwotny obraz powierzchni nieprzygotowanej próbek N1 i N2 po przeskanowaniu skanerem (a) parametry profilu chropowatości (b) oraz krzywa Abotta.

Rysunek 53. Pierwotny obraz powierzchni piaskowanej próbek P1 i P2 po przeskanowaniu skanerem (a) parametry profilu chropowatości (b) oraz krzywa Abotta (c).

Rysunek 54. Pierwotny obraz powierzchni szlifowanej próbek S1 i S2 po przeskanowaniu skanerem (a) parametry profilu chropowatości (b) oraz krzywa Abotta (c).

Rysunek 55. Próbkki betonowe wzmocnione włóknami węglowymi przy użyciu żywicy epoksydowej oraz próbki świadki.

Rysunek 56. Próbkki betonowe wzmocnione włóknami węglowymi przy użyciu matrycy cementowej.

Rysunek 57. Maszyna wytrzymałościowa Walter + Bai AG o maksymalnej sile nacisku 3000 kN.

Rysunek 58. Sposób pomiaru przemieszczeń poprzecznych przy użyciu czujników elektronicznych.

Rysunek 59. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla: fibrobetonu wysokowytrzymałościowego (FW) – (a), FW wzmocnionego CFRP o nieprzygotowanej powierzchni betonu – (b), FW wzmocnionego CFRP o piaskowanej powierzchni betonu – (c), FW wzmocnionego CFRP o szlifowanej powierzchni betonu – (d).

Rysunek 60. Próbkki betonowe wzmocnione włóknami węglowymi przy użyciu żywicy epoksydowej po zniszczeniu.

Rysunek 61. Przebieg zniszczenia próbek niewzmocnionych (a) oraz wzmocnionych jedną warstwą CFRP o powierzchni: nieprzygotowanej (b), piaskowanej (c) i szlifowanej (d).

Rysunek 62. Fragment oderwanego zbrojenia CFRP od powierzchni betonu po zniszczeniu próbek: nieprzygotowana powierzchnia betonu (a), piaskowana powierzchnia betonu (b), szlifowana powierzchnia betonu (c).

Rysunek 63. Charakterystyka naprężenie-odkształcenie dla: FW wzmocnionego CFRP o nieprzygotowanej powierzchni betonu (a), FW wzmocnionego CFRP o piaskowanej powierzchni betonu (b), FW wzmocnionego CFRP o szlifowanej powierzchni betonu (c).

Rysunek 64. Próbkki betonowe wzmocnione włóknami węglowymi przy użyciu matrycy cementowej po zniszczeniu.

Rysunek 65. Analiza zniszczenia połączenia włókien węglowych wzmocnionych matrycą cementową z nieprzygotowaną powierzchnią betonu.

Rysunek 66. Analiza zniszczenia połączenia włókien węglowych wzmocnionych matrycą cementową z piaskowaną powierzchnią betonu: widok całej próbki (a) oraz powiększenie obszaru wyciśnięcia matrycy cementowej (b).

Rysunek 67. Analiza zniszczenia połączenia włókien węglowych wzmocnionych matrycą cementową z szlifowaną powierzchnią betonu.

Spis tabel:

- Tabela 1. Właściwości głównych włókien stosowanych w kompozytach FRP.
- Tabela 2. Dopuszczalne temperatury stosowania włókien.
- Tabela 3. Zalety i wady żywicy epoksydowej i matrycy cementowej.
- Tabela 4. Parametry technologiczne i ich główny wpływ na skuteczność wzmocnienia konstrukcji betonowych laminatami FRP.
- Tabela 5. Właściwości fizyczne i mechaniczne włókien najczęściej stosowanych w betonie.
- Tabela 6. Wpływ kompozytów FRP na zachowanie się betonu.
- Tabela 7. Skład mieszanek betonowych.
- Tabela 8. Wybrane właściwości włókien węglowych Sikawrap 301c.
- Tabela 9. Wybrane właściwości żywicy epoksydowej Sikadur 330.
- Tabela 10. Podsumowanie wyników badań.
- Tabela 11. Skład mieszanek betonowych.
- Tabela 12. Wyniki badań dla poszczególnych próbek.
- Tabela 13. Uśrednione wyniki badań.
- Tabela 14. Szczegółowe informacje dotyczące wykonanych próbek.
- Tabela 15. Wybrane właściwości rur stalowych.
- Tabela 16. Wyniki przeprowadzonych badań.
- Tabela 17. Podstawowe parametry przyjęte w modelu 3D.
- Tabela 18. Skład mieszanki betonowej.
- Tabela 19. Skład chemiczny cementu CEM I 52,5 R.
- Tabela 20. Analizowane próbki.
- Tabela 21. Wybrane właściwości mechaniczne analizowanych próbek.
- Tabela 22. Parametry profilu chropowatości.
- Tabela 23. Szczegółowe wyniki dla próbek wzmocnionych żywicą epoksydową.
- Tabela 24. Wartości średnie uzyskanych wyników dla próbek FW oraz grupy I.
- Tabela 25. Szczegółowe wyniki dla próbek wzmocnionych matrycą cementową.
- Tabela 26. Wartości średnie uzyskanych wyników dla próbek grupy II.