



Instytut Techniki Budowlanej

mgr inż. Agnieszka Michalik

Rozprawa doktorska na temat:

EFEKTYWNOŚĆ ZBROJENIA BETONU OCZYSZCZONYMI WŁÓKNAMI Z RECYKLINGU OPON

Rozprawa doktorska przygotowana pod kierunkiem:

Promotor

Dr hab. inż. Waldemar Pichór, Prof. AGH

Promotor pomocniczy

Dr inż. Filip Chyliński

Warszawa, rok 2023

Składam serdeczne podziękowania dla
Promotora dr hab. inż. Waldemara Pichóra, Prof. AGH
za ukierunkowanie merytoryczne i cenne rady;
Koleżanek i Kolegów z ITB za pomoc i życzliwość podczas
realizacji niniejszej pracy;
Męża za cierpliwość i wsparcie.

Pracę dedykuję moim Córkom,
aby zawsze w siebie wierzyły i dążyły do realizacji swoich celów.

Spis treści

STRESZCZENIE	5
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I SKRÓTÓW	9
I. WSTĘP.....	10
1.1 Wprowadzenie	10
1.2 Cel i zakres pracy	12
1.3 Teza rozprawy.....	14
II. CZĘŚĆ TEORETYCZNA.....	14
2. Polityka zrównoważonego rozwoju.....	14
2.1 Zrównoważony rozwój	15
2.2 Kryzys klimatyczny.....	17
2.3 Ślad węglowy	18
2.4 Przeciwdziałanie kryzysowi klimatycznemu: Europejski Zielony Ład / Fit for fifty five..	19
3. Recykling opon samochodowych	22
3.1 Budowa i produkcja opon.....	22
3.2 Metody recyklingu opon	28
4. Analiza literatury w zakresie stosowania włókien z opon do betonu	33
4.1 Korzyści środowiskowe i ekonomiczne	34
4.2 Wytrzymałość betonu z dodatkiem włókien z recyklingu	36
5. Elementy mechaniki pęknięcia materiałów ceramicznych	40
5.1 Podstawy teoretyczne mechaniki pęknięcia	40
5.2 Mechanizmy podwyższania odporności na kruche pęknięcie kompozytów cementowych	46
6. Technologia fibrobetonów	49
6.1 Rodzaje włókien do betonu.....	49
6.2 Właściwości fibrobetonów	59
6.3 Wybrana metodyka badań fibrobetonów	60
6.4 Strefa kontaktowa włókno stalowe-zaczyn	67
III. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA	70
7. Aparatura badawcza.....	70
8. Materiały do badań i projektowanie składu betonów	71
8.1 Włókna.....	71
8.2 Beton posadzkowy	73
8.3 Beton wzorcowy	74
9. Badania wstępne	75
9.1 Badania identyfikacyjne włókien.....	75
9.2 Badania betonu posadzkowego z różnymi włóknami z opon	92
9.3 Wybór włókien do badań głównych	94
10. Badania główne - efektywność zbrojenia betonu włóknami	95
10.1 Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu, granica proporcjonalności.....	95
10.2 Praca zniszczenia	101
10.3 Wskaźniki odporności na pęknięcie	105
10.4 Przyczepność włókien do matrycy cementowej.....	110
10.5 Analiza mikroskopowa.....	118
10.6 Obrazowanie dystrybucji włókien metodą tomografii rentgenowskiej	126
10.7 Badania porównawcze z innym rodzajem komercyjnych włókien stalowych.....	128
11. Badania aplikacyjne	136
11.1 Badania właściwości użytkowych betonów posadzkowych	136

12.2	Badania na zgodność z normą PN-EN 14889-1:2007 Włókna do betonu - Część 1: Włókna stalowe - Definicje, wymagania i zgodność	143
12.3	Badania w skali rzeczywistej	146
13.	Podsumowanie i wnioski.....	151
14.	Bibliografia	155
15.	Spis rysunków	170
16.	Spis tabel	172

STRESZCZENIE

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest ocena efektywności zbrojenia betonu włóknami pochodzącymi z recyklingu opon samochodowych, które zostały dodatkowo oczyszczone z zanieczyszczeń gumowych i tekstylnych. Efektywność włókien sformułowano jako skuteczne zbrojenie betonu przez włókna, tj. wzmocnienie kruchej matrycy cementowej poprzez wzrost właściwości związanych z rozciąganiem betonu oraz wzrost pracy zniszczenia. Paca wpisuje się w tematykę zrównoważonego budownictwa poprzez proponowane rozwiązanie wykorzystania włókien z recyklingu do betonu, a także oszczędność surowców naturalnych do produkcji komercyjnych włókien stalowych. Produkcja stali stanowi jedną z gałęzi przemysłu, która w największym stopniu przyczynia się do wzrostu śladu węglowego. Z drugiej strony dynamiczny rozwój infrastruktury komunikacyjnej powoduje zwiększanie produkcji opon gumowych, które po zużyciu zanieczyszczają środowisko. Wyodrębniona z opony stal, w procesie recyklingu materiałowego i odpowiednio przygotowana może stanowić potencjał w zastosowaniu jako zbrojenie rozproszone do betonu. W rozprawie sformułowano następującą tezę: Oczyszczone włókna stalowe z recyklingu opon samochodowych mogą pełnić rolę efektywnego zbrojenia rozproszonego do betonu, a niektóre właściwości betonów z ich dodatkiem są równoważne a nawet lepsze niż właściwości betonów z dodatkiem komercyjnych włókien stalowych. W części teoretycznej przedstawiono zwięzły opis następujących tematów: zrównoważone budownictwo i ślad węglowy; recykling opon samochodowych, technologia fibrobetonów wraz z rodzajem włókien i metodyką badawczą fibrobetonów; elementy mechaniki pęknięcia oraz analizę literatury z zakresu wykorzystania włókien do betonu. Część badawczą podzielono na trzy części: badania wstępne, badania główne i badania aplikacyjne. Badania wstępne miały na celu wybór odpowiednich włókien z recyklingu opon do badań głównych oraz badania identyfikacyjne wybranych włókien z opon. W badaniach głównych oceniono efektywność zbrojenia betonu włóknami stalowymi. Badania wykonano porównawczo, dla betonów z dodatkiem oczyszczonych włókien z opon oraz dla betonów z taką samą ilością komercyjnych włókien stalowych haczykowatych, powszechnie stosowanych jako zbrojenie rozproszone do betonu. Włókna z opon oraz komercyjne dozowano w takiej samej ilości do betonu tj. 10 kg/m³, 20 kg/m³, 30 kg/m³, 40 kg/m³. Efektywność zbrojenia betonu włóknami została oceniona wieloma metodami: wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu belek z nacięciem, praca zniszczenia, wskaźniki odporności na pęknięcie, przyczepność włókien do matrycy cementowej, analizę strefy kontaktowej włókno-zaczyn, dystrybucja włókien metodą tomografii komputerowej. Ponadto dla szerszego porównania, kluczowe badania do oceny efektywności przeprowadzono dla dodatkowych dwóch rodzajów włókien komercyjnych różniących się średnicą i kształtem. W części aplikacyjnej wykonano badania właściwości użytkowych betonów posadzkowych z włóknami z recyklingu opon i włóknami komercyjnymi, tj. m.in. konsystencja, gęstość, wytrzymałość na ściskanie,

zginanie, rozłupywanie, ścieralność, moduł sprężystości, odporność na uderzenie. Przeprowadzono również analizę możliwości wprowadzenia włókien z recyklingu opon do obrotu drogą Krajowej Oceny Technicznej. Zakończeniem pracy są badania wdrożeniowe w skali rzeczywistej, w celu potwierdzenia możliwości dozowania włókien z opon na wytwórni betonu towarowego. Aspektem innowacyjnym w niniejszej pracy jest określenie pracy zniszczenia jako miarę odporności na kruche pękanie i efektywności zbrojenia betonu przez włókna z recyklingu opon. Analizując literaturę nie znaleziono wcześniejszych prac, prezentujących takie podejście. Również badanie przyczepności drutów z opon przedstawione w niniejszej pracy stanowią nowość. W dotychczas opublikowanych pracach badano kompozyty cementowe z dodatkiem jedynie krótkich włókien z opon, a nie drutów pozyskanych z opon. Badania wykazały, że oczyszczone włókna stalowe z recyklingu opon mogą pełnić rolę efektywnego zbrojenia do betonu. Oczyszczone włókna z opon o odpowiedniej długości wzmacniają kruchą matrycę cementową, mostkują pęknięcia powodując ich rozprzestrzenianie się oraz ograniczają powstawanie nowych pęknięć. Niektóre właściwości betonów z odpowiednio wysoką zawartością włókien z recyklingu opon, to jest: wytrzymałość resztkowa, wskaźniki odporności na pękanie, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, na ściskanie, na rozłupywanie, moduł sprężystości, ścieralność, odporność na uderzenia są nawet wyższe niż betonów z taką samą ilością włókien stalowych komercyjnych. Oczyszczone włókna z opon mają chropowatą powierzchnię, spowodowaną procesem recyklingu i oczyszczania, przez co osiągają bardzo dobrą przyczepność do zaczynu cementowego. W niniejszej pracy należy podkreślić trzy główne aspekty wynikające ze stosowania oczyszczonych włókien stalowych z recyklingu opon samochodowych jako zbrojenie rozproszone do betonu: wytrzymałość betonu z dodatkiem włókien z recyklingu (oczyszczone włókna z recyklingu opon mogą pełnić rolę efektywnego zbrojenia rozproszonego do betonu i skutecznie wzmacniać kruchą matrycę cementową); wpływ na środowisko (zmniejszenie śladu węglowego poprzez zastąpienie wysokoemisyjnej produkcji stali włóknami z recyklingu, oszczędność zasobów naturalnych, zagospodarowanie odpadów); korzyści ekonomiczne (koszt włókien z recyklingu opon jest niższy niż włókien stalowych komercyjnych). Aby włókna z recyklingu opon mogły pełnić rolę zbrojenia do betonu muszą być spełnione następujące warunki: włókna muszą być oczyszczone, tj. poddane specjalnej obróbce technologicznej, po której poziom zanieczyszczeń gumowych i tekstylnych wyniesie do 0,2%; włókna muszą być pozbawione włókien znacznie odstających długościami i średnicami; należy tak dozować włókna do mieszanki, aby zapewnić ich jednorodne rozmieszczenie, bez tworzenia miejscowych skupisk włókien; oczyszczone włókna muszą być dozowane w odpowiedniej ilości do betonu ($> 30 \text{ kg/m}^3$).

Słowa kluczowe:

włókna z recyklingu opon, włókna stalowe, beton zbrojony włóknem, wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu, wskaźniki odporności na pękanie, praca zniszczenia, zrównoważone budownictwo

EFFECTIVENESS OF CONCRETE REINFORCEMENT WITH PURIFIED RECYCLED TYRE STEEL FIBRES

SUMMARY

The subject of the PhD Thesis is the assessment of the effectiveness of reinforcing concrete with recycled tyre steel fibres, which have been additionally purified of rubber and textile impurities. Fibres efficiency was formulated as the effective reinforcement of concrete by fibres, i.e. the strengthening of the brittle cement matrix by increasing the tensile properties of concrete and increasing the work of fracture. The work is consistent with the topic of sustainable construction through the proposed solution of using recycled tyre steel fibres for concrete, as well as saving natural resources for the production of manufactured steel fibres. Steel production is one of the industries that contributes most to the increase in the carbon footprint. On the other hand, the dynamic development of communication infrastructure results in an increase in the production of rubber tyres, which pollute the environment when worn out. Steel fibres extracted from the tyre, in the material recycling process and properly prepared, may have potential for use as dispersed reinforcement for concrete. The following thesis was formulated in the PhD Thesis: purified recycled tyre steel fibres can act as effective dispersed reinforcement for concrete, and some properties of concretes with their addition are equivalent or even better than the properties of concretes with the addition of manufactured steel fibres. The theoretical part presents a concise description of the following topics: sustainable construction and carbon footprint; recycling of car tyres, fibre concrete technology with the type of fibres and fibre concrete research methodology; elements of fracture mechanics, from which the main research methods and literature analysis on the use of fibres in concrete were used. The research part was divided into three parts: preliminary research, main research and application research. The preliminary tests were aimed at selecting appropriate fibres from recycled tyres for the main tests and at identifying selected tire fibres. The main tests assessed the effectiveness of reinforcing concrete with steel fibres. The tests were carried out comparatively for concrete with the addition of purified recycled tyre steel fibres and for concrete with the same amount of manufactured hook-shaped steel fibres, commonly used as dispersed reinforcement for concrete. Recycled tyre steel fibres and manufactured tyre fibres were dosed in the same amount into the concrete, i.e. 10 kg/m³, 20 kg/m³, 30 kg/m³, 40 kg/m³. The effectiveness of fiber reinforcement of concrete was assessed by many methods: bending tensile strength of notched beams, work of fracture, toughness indexes, fiber adhesion to the cement matrix, analysis of the fiber-cement interfacial transition zone, fibres distribution by computed tomography. Moreover, for a broader comparison, key tests to assess the effectiveness were conducted for two additional types of commercial fibres differing in diameter and shape. In the application part, tests of the functional properties of flooring concretes with recycled tire fibres and commercial fibres were carried out, i.e. consistency, density, compressive strength, bending, splitting, abrasion, modulus of elasticity, impact

resistance. An analysis of the possibility of introducing recycled tyre steel fibres to the market through the National Technical Assessment was also carried out. The work ends with implementation tests on a real scale to confirm the possibility of dosing fibres from tires at a ready-mix concrete plant. The innovative aspect of this work is the determination of the work of destruction as a measure of the resistance to brittle fracture and the effectiveness of concrete reinforcement with recycled tire fibres. Analyzing the literature, no previous works presenting this approach were found. The adhesion testing of tire wires presented in this work is also new. In the works published so far, cement composites with the addition of only short recycled fibres, and not wires obtained from tires, were tested. Research has shown that purified recycled tyre steel fibres can act as effective reinforcement for concrete. Purified recycled tyre steel fibres of appropriate length strengthen the brittle cement matrix, bridge cracks, causing them to spread, and limit the formation of new cracks. Some properties of concretes with a sufficiently high content of recycled tire fibres, i.e.: residual strength, toughness indexes, tensile strength when bending, compressive strength, splitting strength, modulus of elasticity, abrasion, impact resistance are even higher than those of concretes with such same amount of commercial steel fibres. Purified recycled tyre steel fibres have a rough surface caused by the recycling and cleaning process, which allows them to achieve very good adhesion to the cement grout. In this work, three main aspects should be highlighted resulting from the use of purified steel fibres from recycled car tires as dispersed reinforcement for concrete: strength of concrete with the addition of recycled fibres (purified recycled tyre fibres can act as effective dispersed reinforcement for concrete and effectively strengthen the brittle cement matrix) ; environmental impact (reducing the carbon footprint by replacing high-emission steel production with recycled fibres, saving natural resources, waste management); economic benefits (the cost of recycled tire fibres is lower than commercial steel fibres). In order for fibres from recycled tires to act as concrete reinforcement, the following conditions must be met: the fibres must be purified, i.e. subjected to special technological treatment, after which the level of rubber and textile impurities will be up to 0.2%; the fibres must be free of fibres that differ significantly in length and diameter; fibres should be dosed into the mixture in such a way as to ensure their uniform distribution, without creating local fiber clusters; cleaned fibres must be dosed in the appropriate amount into the concrete (> 30 kg/m³).

Key words:

recycled tyre steel fibres, steel fibres, fibre-reinforced concrete, residual flexural tensile strength, work of fracture, toughness index, sustainable construction

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI I SKRÓTÓW

GHG – greenhouse gases (gazy cieplarniane),
IPPC - Integrated Pollution Prevention and Control (Międzynarodowy Zespół ds. Zmian Klimatu),
LCA - Life Cycle Assessment (ocena cyklu życia),
GWP - Global Warming Potential (potencjał tworzenia efektu cieplarnianego),
CPR - Construction Products Regulation, Dyrektywa 305/2011,
RTSF - Recycled Tyre Steel Fibres (włókna stalowe z recyklingu opon),
MSF - Manufactured Steel Fibres (włókna stalowe komercyjne/przemysłowe),
FRC – Fiber Reinforced Concrete (beton zbrojony włóknami, fibrobeton),
RSFRC – Recycled Steel Fiber Reinforced Concrete (beton zbrojony włóknami z recyklingu opon),
 σ_{\max} - koncentracja naprężeń na wierzchołku szczeliny,
 K_I – współczynnik intensywności naprężeń,
 K_{Ic} – współczynnik odporności na kruche pękanie (odporność na kruche pękanie),
 γ – rzeczywista energia powierzchniowa ,
 γ_{ef} – efektywna energia powierzchniowa, efektywna energia pękania ,
 V_f - nominalna zawartość włókien stalowych w fibrobetonie,
 σ lub δ – ugięcie
CMOD - crack mouth opening displacement (rozwarcie rysy/szczeliny),
 f_R – wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu dla określonej wartości rozwarcia rysy CMOD,
 G_F – energia pękania (fracture energy),
 W_F – praca zniszczenia (work of fracture),
 f_{eq} – wytrzymałość równoważna na rozciąganie przy zginaniu
 $I_5; I_{10}; I_{20}$ - wskaźniki odporności na pękanie (toughness index),
 τd – przyczepność włókien do matrycy cementowej

I. WSTĘP

1.1 Wprowadzenie

Beton jest materiałem kruchym, którego jedną z wad jest niska wytrzymałość na rozciąganie. W celu poprawy tej cechy dodawane są różnego rodzaju włókna, które rozmieszczone równomiernie w matrycy cementowej stanowią zbrojenie rozproszone i wpływają korzystnie na szereg jego właściwości. W porównaniu do betonów bez włókien fibrobetony charakteryzują się głównie większą wytrzymałością na rozciąganie przy zginaniu, wytrzymałością na rozłupywanie, ścinanie oraz podwyższają właściwości mechaniczne betonów. Obecność włókien wpływa korzystnie na hamowanie procesów mikro i makro pękania kompozytów cementowych, zarówno na etapie wiązania i dojrzewania, jak również w trakcie użytkowania, poprawiając cechy wytrzymałościowe i mechaniczne betonu [1–10].

Najczęściej stosowanymi włóknami do zbrojenia konstrukcji betonowych są włókna stalowe, objęte normą zharmonizowaną PN-EN 14889-1:2007 [11]. Stosuje się je głównie jako zbrojenie rozproszone w posadzkach przemysłowych, ale również jako zbrojenie w innych elementach betonowych, np. ścianach, słupach, palach, segmentach obudowy tuneli, prefabrykatach betonowych, mostach, nawierzchniach lotniskowych itd.

Z środowiskowego punktu widzenia, produkcja stali, w tym włókien stalowych, stanowi jedną z gałęzi przemysłu, która w największym stopniu przyczynia się do wzrostu emisji gazów cieplarnianych [12]. W obecnych czasach kryzysu klimatycznego i środowiskowego [12,13] podmioty zobowiązane są do podjęcia konkretnych działań, aby przeciwdziałać temu zagrożeniu. Dodatkowo, stajemy przed zagrożeniem niedoboru zasobów naturalnych, w tym surowców do produkcji stali, dlatego szczególny nacisk jest stawiany na oszczędność surowców naturalnych. Na świecie podejmowane są liczne działania mające na celu rozwój nauki i wspieranie przemysłu w działaniach na rzecz zrównoważonego budownictwa m.in. w celu zrównoważonego wykorzystania zasobów naturalnych, ponownego wykorzystania lub recyklingu oraz użycia materiałów wtórnych [14–20]. Biorąc pod uwagę powyższe rozważania, poszukiwanie nowych rozwiązań możliwości ograniczenia produkcji włókien stalowych lub sposobów ich zastąpienia jest tematem badań naukowych na świecie. Jednym ze sposobów jest zastosowanie włókien stalowych z recyklingu opon (RTSF).

Dynamiczny rozwój infrastruktury komunikacyjnej powoduje zwiększenie produkcji opon gumowych, które po zużyciu zanieczyszczają środowisko naturalne. Utylizacja opon jest globalnym problemem środowiskowym. Rocznie na całym świecie produkuje się około 1,5 miliarda opon [21–25]. Ponad 500 milionów zużytych opon jest składowanych na wysypiskach [26] i stanowi poważne zagrożenie dla ludzi i środowiska [27], poprzez możliwość wywołania trudnych do ugaszenia pożarów, zanieczyszczenie gleby i wód gruntowych, a także przez rozwój specyficznej flory i fauny stwarzającej warunki do rozwoju chorób epidemicznych [6]. Opony są odpadem niezwykle trwałym, który nie ulega

naturalnemu rozkładowi i musi zostać poddany jednej z form recyklingu [28]. Jedną z form jest recycling materiałowy, który polega na rozdzieleniu poszczególnych składników opony i kompleksowym wykorzystaniu gumy, stali i tekstyliów z opony. W efekcie recyklingu materiałowego otrzymuje się m.in. mieszaninę niejednorodnych włókien stalowych, które po oczyszczeniu z resztek gumy i kordu tekstylnego, można wykorzystać jako zbrojenie rozproszone do betonu.

W ciągu ostatnich kilku lat obserwuje się wzrost zainteresowania naukowców nad wykorzystaniem recyklingowych włókien stalowych z opon jako zbrojenie rozproszone do betonu i możliwość zastąpienia komercyjnych włókien stalowych [29–32]. Badania prowadzone są w kierunku wykorzystania kordu stalowego z recyklingu opon zarówno jako samodzielne zbrojenie jak i mieszanina różnego rodzaju włókien [21,29,33–37]. Analiza literatury wskazuje, że recyklingowe włókna z opon skutecznie pełnią rolę zbrojenia rozproszonego do betonu, wpływając na poprawę wytrzymałości betonu na zginanie, oraz wpływały na poprawę właściwości betonu w trakcie pęknięcia, w porównaniu do betonu nie zbrojonego i betonu z dodatkiem włókien stalowych, przy odpowiedniej zawartości włókien z recyklingu opon w betonie i odpowiedniej ich czystości [38–44]. Badania różnego rodzaju włókien z opon oraz ich kombinacji z włóknami komercyjnymi na właściwości reologiczne i mechaniczne betonu wskazują, że pierwotnie pozyskany kord stalowy z opon musi być dozowany w większej ilości niż włókna komercyjne, z uwagi na obecność zanieczyszczeń gumowych, tekstylnych oraz pyłu stalowego [38,45–47]. W wyniku najbardziej powszechnych, pierwotnych metod recyklingu opon, powstają włókna stalowe, które są silnie zanieczyszczone gumą (do 20% masowych). Konieczne jest zatem dalsze ich przetwarzanie, aby zminimalizować zanieczyszczenie gumą do mniejszego poziomu niż 0,5% masy, ograniczenie długości włókien i rozkładu średnicy do tych, które są skuteczne w betonie i zapewniają dobrą homogenizację włókien podczas mieszania betonu. Dopiero po oczyszczeniu i posortowaniu RTSF może być stosowany w betonie jako wzmocnienie konstrukcyjne [33,48–51].

W niniejszej pracy przeprowadzono ocenę efektywności zbrojenia betonu włóknami pochodzącymi z recyklingu opon samochodowych, które zostały dodatkowo oczyszczone z zanieczyszczeń gumowych i tekstylnych. Efektywność włókien sformułowano jako skuteczne zbrojenie betonu przez włókna, tj. wzmocnienie kruchej matrycy cementowej i wzrost właściwości związanych z rozciąganiem betonu oraz wzrost pracy zniszczenia. Efektywność włókien została oceniona w części głównej wieloma metodami: wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu belek z karbem, praca zniszczenia, wskaźniki odporności na pęknięcie, przyczepność włókien do matrycy cementowej, analizę strefy kontaktowej włókno-zaczyn, dystrybucję włókien w mieszance betonowej.

W pracy badania wykonano porównawczo, dla betonów z dodatkiem oczyszczonych włókien z opon oraz dla betonów z taką samą ilością komercyjnych włókien stalowych haczykowatych (MSF), powszechnie stosowanych jako zbrojenie rozproszone do betonu. W części aplikacyjnej wykonano badania właściwości użytkowych betonów posadzkowych z włóknami z recyklingu opon RTSF i włóknami komercyjnymi MSF, analizę

możliwości wprowadzenia włókien RTSF do obrotu oraz badania w skali technicznej dozowania włókien RTSF na wytwórni betonu towarowego.

1.2 Cel i zakres pracy

Celem pracy jest analiza właściwości betonów z dodatkiem oczyszczonych włókien z recyklingu opon samochodowych RTSF, w porównaniu z taką samą ilością (w kg/m^3) włókien komercyjnych haczykowatych MSF, oraz wykazanie, że niektóre właściwości betonów z RTSF są nawet lepsze niż taka sama ilość włókien MSF.

Głównym aspektem naukowym jest ocena efektywności zbrojenia betonów oczyszczonymi włóknami z recyklingu opon, rozumiana jako skuteczność wzmocnienia kruchej matrycy cementowej. Efektywność zbrojenia została określona poprzez badania właściwości betonu różnymi technikami z dziedziny mechaniki pęknięcia kompozytów cementowych tj:

- wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu
- pracę zniszczenia
- wskaźniki odporności na pęknięcie I_5 , I_{10} , I_{20}
- przyczepność włókien do matrycy cementowej

oraz:

- rozmieszczenie włókien w matrycy cementowej
- analiza mikroskopowa strefy kontaktowej włókno-zaczyn.

Rozprawa składa się z części teoretycznej oraz doświadczalnej. W części teoretycznej omówiono zagadnienia z zakresu: kryzysu klimatycznego, zrównoważonego budownictwa, recyklingu opon samochodowych, rodzaju włókien do betonu, technologii fibrobetonów oraz analizy literatury z zakresu wykorzystania włókien stalowych z opon do betonu.

W części doświadczalnej wykonano badania wstępne, główne i aplikacyjne.

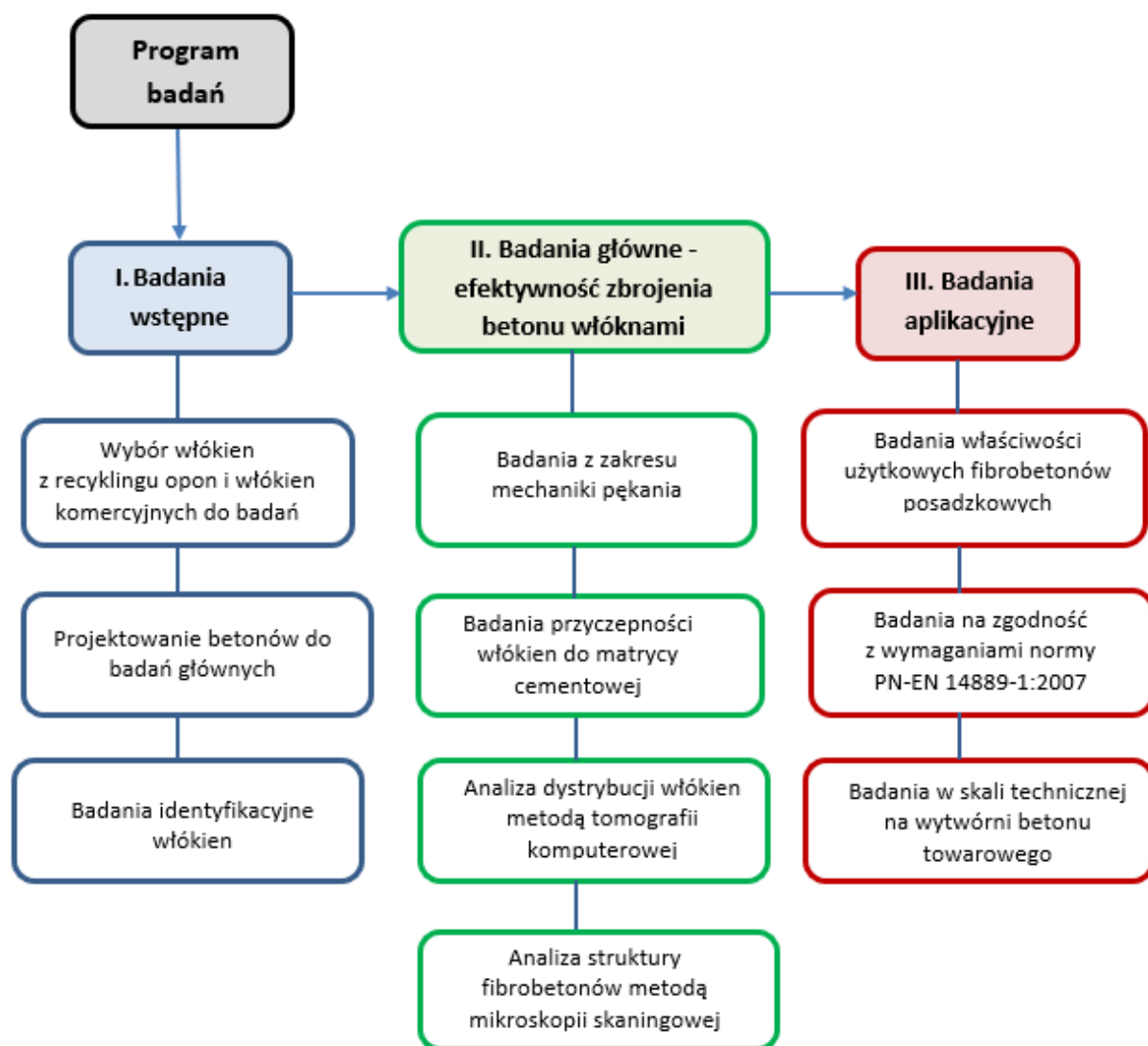
Badania wstępne miały na celu wybór, spośród pięciu zgromadzonych włókien z recyklingu opon, jednego rodzaju włókien do badań głównych. W badaniach wstępnych wykonano również badania identyfikacyjne wybranych włókien RTSF i MSF.

W badaniach głównych określono efektywność zbrojenia betonu wybranymi, oczyszczonymi włóknami z recyklingu opon, w porównaniu z taką samą ilością włókien komercyjnych. Efektywność określono badaniami z zakresu mechaniki pęknięcia kompozytów cementowych, przyczepności włókien, tomografii komputerowej, mikroskopii skaningowej. W tej części badania wykonano dla porównania z dwoma dodatkowymi włóknami komercyjnymi o innej średnicy i kształcie.

W części aplikacyjnej wykonano badania właściwości użytkowych fibrobetonów, w kontekście zastosowania włókien z opon do betonów posadzkowych, tj. typowe właściwości mieszanki betonowej i betonu stwardniałego. Także wykonano badania na

zgodność włókien z opon z wymaganiami normy PN-EN 14889-1:2007 na włókna stalowe do betonu. Zakończeniem badań aplikacyjnych są badania w skali rzeczywistej na wytwórni betonu towarowego.

Pracę kończą podsumowanie i wnioski końcowe, w odniesieniu do postawionej tezy rozprawy. Na Rysunku 1 przedstawiono schemat programu badawczego niniejszej rozprawy doktorskiej.



Rysunek 1. Schemat programu badawczego

1.3 Teza rozprawy

W rozprawie postawiono następującą tezę:

Oczyszczone włókna stalowe z recyklingu opon samochodowych mogą pełnić rolę efektywnego zbrojenia rozproszonego do betonu, a niektóre właściwości betonów z ich dodatkiem są równoważne a nawet lepsze niż właściwości betonów z dodatkiem komercyjnych włókien stalowych.

Efektywność zbrojenia betonu przez włókna została oceniona na podstawie analizy wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu, pracy zniszczenia, wskaźników odporności na pękanie, przyczepności włókien do matrycy cementowej, w części głównej. Dodatkowo właściwości równoważne / lepsze analizowano również w badaniach posadzkowych betonów z włóknami w części aplikacyjnej.

W ocenie wyników: właściwości równoważne / lepsze, stosowano regułę prostej akceptacji, to jest bez uwzględnienia zmienności wynikającej z niepewności pomiarowej. Niepewność pomiaru (związaną z dokładnością zastosowanego systemu pomiarowego oraz odchyleniem standardowym historycznych wyników) podano przy prawdopodobieństwie rozszerzenia wynoszącym około 95% i współczynniku rozszerzenia $k=2$.

II. CZĘŚĆ TEORETYCZNA

2. Polityka zrównoważonego rozwoju

Zastosowanie włókien z recyklingu opon samochodowych jako zbrojenie rozproszone do betonu, oraz ograniczenie produkcji i stosowania komercyjnych włókien stalowych przyczynia się oszczędności surowców naturalnych stosowanych do produkcji stali, i tym samym wpływa na redukcje emisji gazów cieplarnianych do atmosfery, których wartość jest bardzo wysoka dla produkcji stali. Dodatkowo wykorzystanie włókien z recyklingu opon przyczynia się do zagospodarowania materiału odpadowego, którego z roku na rok jest coraz więcej.

W dobie kryzysu klimatycznego oraz ogłoszonych pakietów aktów prawnych nakazujących przeciwdziałanie kryzysowi klimatycznemu, wszystkie gałęzie przemysłu koncentrują się na ograniczeniu śladu węglowego oraz racjonalnym wykorzystaniu odpadów.

W kolejnych podrozdziałach opisano następujące zagadnienia, związane z tematyką niniejszej rozprawy doktorskiej: zrównoważony rozwój (w tym zrównoważone budownictwo), kryzys klimatyczny (oraz związany z nim kryzys ekologiczny), ślad węglowy, przeciwdziałanie kryzysowi klimatycznemu (Europejski Zielony Ład, Fit for fifty five).

2.1 Zrównoważony rozwój

Idea zrównoważonego rozwoju rozpoczęła się w 1987 r. od publikacji Raportu Światowej Komisji do spraw Środowiska i Rozwoju pt. „Our common future” (nasza wspólna przyszłość) [52]. Według tego raportu zrównoważony rozwój to: „taki rozwój społeczno-gospodarczy, w którym następuje proces integrowania działań politycznych, gospodarczych i społecznych, z zachowaniem równowagi przyrodniczej oraz trwałości podstawowych procesów przyrodniczych, w celu zagwarantowania możliwości zaspokajania podstawowych potrzeb poszczególnych społeczności lub obywateli zarówno współczesnego pokolenia, jak i przyszłych pokoleń”. Od tego momentu w Europie i na świecie podejmowano liczne działania mające na celu wdrożenie w każda dziedzinę życia idei zrównoważonego rozwoju.

Zrównoważony rozwój koncentruje się na trzech obszarach, które mają zasadniczy wpływ na poziom zrównoważenia światowej gospodarki [53]:

- społeczeństwo: wzrost poziomu życia, wyrównanie szans, aspekty socjalne;
- środowisko: ochrona środowiska i zapobieganie jego degradacji m.in. poprzez oszczędność zasobów naturalnych, zagospodarowanie materiałów odpadowych;
- ekonomia: wzrost gospodarczy oraz zrównoważony podział korzyści wynikających ze wzrostu.

Istotnym krokiem w ślad za zrównoważonym rozwojem było ogłoszenie przez, zrzeszającą 189 członków Organizację Narodów Zjednoczonych (ONZ), w 2000 roku dokumentu: Millennium Declaration, *Millennium Development Goals (MDG, Milenijne Cele Rozwoju)* [54]. Wyznaczono w nim 8 celów i 21 zadań do realizacji na lata 2000-2015, które przedstawiono na Rysunku 2.



Rysunek 2. Osiem Milenijnych Celów Rozwoju ONZ [55]

Siódmy cel związany jest z ekologią i środowiskiem:

7. Stosować zrównoważone metody gospodarowania zasobami naturalnymi.

Punkt ten koncentruje się na ochronie środowiska naturalnego poprzez stosowanie rozwiązań hamujących zubożenie zasobów środowiska naturalnego. Efektem tego celu były m.in. inicjatywy ONZ wspierające ochronę środowiska naturalnego oraz racjonalne wykorzystanie odpadów.

Kolejnym ważnym momentem było ustanowienie w 2015 roku, przez 193 państwa Organizacji Narodów Zjednoczonych (ONZ) dokumentu: *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development* (Przekształćmy nasz świat: Agenda 2030 na rzecz zrównoważonego rozwoju) [56]. Agenda 2030 zawiera 17 Celów Zrównoważonego Rozwoju (CZR) i 169 zadań na lata 2016-2030, które skupiają się na trzech spójnych elementach zrównoważonego rozwoju: wzroście gospodarczym, inkluzywności społecznej i ochronie środowiska [55]. Cele Zrównoważonego Rozwoju są bardzo obszerne, dotyczą całego świata, państw rozwijających się i rozwiniętych. Natomiast Milenijne Cele Zrównoważonego Rozwoju koncentrowały się głównie na kwestiach społecznych i skupiały się na państwach rozwijających się, szczególnie tych najbardziej potrzebujących. Na Rysunku 3 przedstawiono 17 Celów Zrównoważonego Rozwoju [55].



Rysunek 3. Cele Zrównoważonego Rozwoju OZN [55]

Wśród 17 Celów Zrównoważonego Rozwoju cel 12 to Odpowiedzialna konsumpcja i produkcja. W celu tym zawarte są zalecenia ograniczenia śladu węglowego wynikającego z konsumpcji i produkcji. Produkcja surowców, przetwarzanie ich w materiały oraz utylizowanie i składowanie odpadów wywiera ogromny wpływ na środowisko. Zaleca się oszczędne gospodarowanie zasobami naturalnymi oraz poprawę wydajności w korzystaniu z materiałów na wszystkich etapach życia, oraz zintensyfikowanie działań na

rzecz racjonalnego gospodarowania odpadami tj. ograniczenie wytwarzania odpadów, skutecznej utylizacji i wykorzystania odpadów.

Według danych opublikowanych przez Organizację Współpracy Gospodarczej i Rozwoju (ang. *Organisation for Economic Co-operation and Development*, OECD) [57] Polska należy do grupy najbardziej intensywnie użytkujących surowce naturalne i najbardziej intensywnie emitujących dwutlenek węgla spośród państw OECD, ze względu na stosunkowo duży sektor górnictwa i przemysłu .

W myśl głównych idei zrównoważonego rozwoju kolejne gałęzie gospodarki i przemysłu przechodziły stopniową transformację, w celu dostosowania się do przyjętych zasad.

Zrównoważone budownictwo to szereg działań mających na celu ograniczenie negatywnego wpływu budynków na środowisko w całym ich cyklu życia, począwszy od projektu poprzez proces budowy aż po eksploatację. Działania te dotyczą aspektów socjalnych, ekologicznych i ekonomicznych [58].

Istotnym czynnikiem do pojęcia działań w kierunku zrównoważonego budownictwa było opublikowane w 2011 roku rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 (CPR) [59] ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające dyrektywę Rady 89/106/EWG [60]. Wymagania CPR zwracają uwagę na konieczność oceny obiektów budowlanych pod kątem energooszczędności i bezpieczeństwa w ciągu ich całego cyklu życia: w trakcie projektowania, budowy, rozbiórki i użytkowania. Rozporządzenie CPR wprowadza nowe, siódme wymaganie podstawowe - zrównoważone wykorzystanie zasobów naturalnych, dotyczące spełnienia kryteriów zrównoważonego budownictwa [59].

Kolejnym ważnym etapem związanym ze zrównoważonym budownictwem był ogłoszony w 2014 r. Komunikat Komisji Europejskiej w sprawie możliwości efektywnego gospodarowania zasobami w sektorze budowlanym [61]. W komunikacie tym stwierdzono, że „budownictwo i użytkowanie budynków w Unii Europejskiej odpowiada za około połowę wszystkich wydobywanych surowców i zużycia energii oraz za około jedną trzecią zużycia wody”. Budownictwo wytwarza również około jedną trzecią wszystkich odpadów. Zatem poszukiwanie efektywnych rozwiązań, pozwalających minimalizować powyższe negatywne oddziaływania jest przedmiotem działalności zrównoważonego budownictwa [62]. Zużycie zasobów naturalnych i negatywne oddziaływania na środowisko można ograniczyć m.in. poprzez wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu, ponownemu wykorzystaniu istniejących materiałów, aby ograniczać powstawanie coraz większej ilości odpadów [14,16–18,20].

2.2 Kryzys klimatyczny

Kryzys klimatyczny związany z globalnym ociepleniem, spowodowany jest kumulowaniem się w atmosferze emitowanych gazów cieplarnianych (GHG – greenhouse gases), co jest głównie rezultatem spalania paliw kopalnianych i postępu przemysłowego,

czyli działalności człowieka. Globalne ocieplenie powoduje nasilenie ekstremalnych zjawisk atmosferycznych, takich jak ekstremalne upały, huragany, powodzie, susze.

Dodatkowo współistniejące globalne zanieczyszczenie środowiska, spowodowane składowaniem na szeroką skalę odpadów stanowi zagrożenie dla ludzi, zwierząt i przyrody. Kryzys ekologiczny spowodowany jest głównie gwałtownym rozwojem cywilizacyjnym, wzrostem liczby ludności i podnoszeniem się standardów życia, wzrostem konsumpcji oraz rozwojem przemysłu. Czynniki te prowadzą do stopniowej degradacji naturalnych ekosystemów, postępującym zanieczyszczeniem środowiska, nadmierną eksploatacją naturalnych nieodnawialnych zasobów przyrodniczych oraz pogłębianiem się efektu cieplarnianego. Coraz większe wydobywanie nieodnawialnych surowców naturalnych powoduje, że ich dostępne zasoby maleją w szybkim tempie. Dodatkowo problemem są mało oszczędne instalacje energetyczne i ciepłownicze oraz ogromna ilość odpadów przemysłowych, z których większa część trafia na składowiska a tylko niewielki procent podany jest recyklingowi [63].

Unia Europejska, uwzględniając dane opublikowane przez Międzynarodowy Zespół ds. Zmian Klimatu (IPPC - Integrated Pollution Prevention and Control) w sprawozdaniu specjalnym zatytułowanym „Globalne ocieplenie o 1,5 °C” [12], wprowadza Rezolucję Parlamentu Europejskiego z dnia 28 listopada 2019 r. w sprawie alarmującej sytuacji klimatycznej i środowiskowej (2019/2930(RSP) [64].

2.3 Ślad węglowy

Zasady zrównoważonego budownictwa oraz postępujący kryzys klimatyczny spowodowały konieczność wyznaczania i ograniczania tzw. emisyjności wyrobów i procesów przemysłowych. Pojęcie emisyjność odnosi się do emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia wyroby, tj. od pozyskania surowców, produkcji składników i wbudowywania [65]. Obecnie wszystkie gałęzie przemysłu dążą do kwantyfikacji emisji gazów cieplarnianych, pozwalających na identyfikację czynników i etapów produkcji najbardziej zanieczyszczających środowisko [66]. Miarą wielkości emisji jest ślad węglowy (ang. carbon footprint) definiowany przez EN ISO 14067:2018 [67]. Ślad węglowy wyrażany jest jako suma emitowanych i pochłanianych przez produkt gazów cieplarnianych, wyrażanych ekwiwalentem CO₂, bazująca na ocenie cyklu życia LCA (ang. Life Cycle Assessment). Ślad węglowy, oprócz emisji CO₂, głównego źródła wzmocnienia efektu cieplarnianego, obejmuje także metan, podtlenek azotu, fluorowęglowodory, perfluorowodory [66].

Sektor przemysłowy jest największym sektorem emisji gazów cieplarnianych, którego emisje CO₂ stanowią około 25% całości procesów emisji CO₂ [12]. Szczególnie energochłonny i emisyjny jest przemysł: stali, metali nieżelaznych, chemiczny, minerałów niemetalicznych oraz przemysł celulozowo-papierniczy [12].

W Tabeli 1 podano ślad węglowy wytwarzania przykładowych produktów.

Tabela 1. Ślad węglowy wytworzenia przykładowych produktów [68], [66,69]

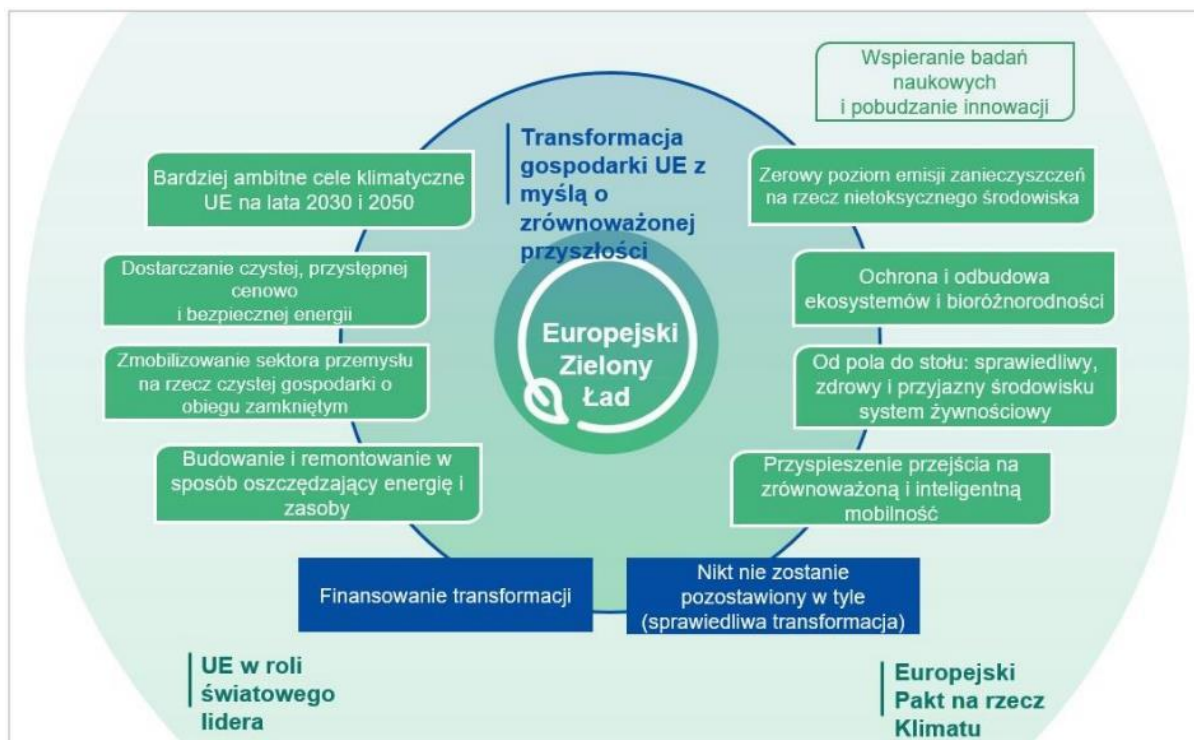
Źródło emisji	Wielkość emisji [kg eCO ₂ /t]
Produkcja stali	1900
Produkcja polipropylenu	1700
Produkcja papieru	940
Produkcja cementu CEM I	875
Produkcja cementu CEM II	715
Produkcja cementu CEM III	578

Jak wynika z Tabeli 1 produkcja stali stanowi jedną z gałęzi przemysłu, która w największym stopniu przyczynia się do emisji / wytwarzania śladu węglowego. Każdego roku sprzedaje się 300 000 ton włókien stalowych na świecie i kwota ta ciągle rośnie o ok. 20% w ciągu roku [48].

Ze względu na wysokie koszty produkcji i negatywny wpływ na środowisko, w ciągu ostatnich lat wzrosło zainteresowanie poszukiwaniem nowych rozwiązań w tym zastosowaniem różnego rodzaju włókien z recyklingu, w tym z recyklingu opon, których przetwarzanie również stanowi istotny problem środowiskowy.

2.4 Przeciwdziałanie kryzysowi klimatycznemu: Europejski Zielony Ład / Fit for fifty five

Kryzys klimatyczny i silne procesy degradacji środowiska naturalnego, wymagają podjęcia szerokich działań na wielu szczeblach, w celu przeciwdziałania tym zagrożeniom. Aby sprostać tym wyzwaniom Unia Europejska opracowała w 2019 roku nową strategię zrównoważonego wzrostu – Europejski Zielony Ład (ang. European Green Deal) [70], który ma przekształcić Unię Europejską w obszar neutralny klimatycznie do roku 2050. Jest to nowa strategia na rzecz wzrostu, której celem jest przekształcenie UE w społeczeństwo żyjące w nowoczesnej, zasobooszczędnej i konkurencyjnej gospodarce, która w 2050 r. osiągnie zerowy poziom emisji gazów cieplarnianych netto, w ramach której wzrost gospodarczy będzie oddzielony **od wykorzystania zasobów naturalnych**. Schemat działań realizowanych w ramach Europejskiego Zielonego Ładu przedstawiono na Rysunku 4.



Rysunek 4. Europejski Zielony Ład [70]

Wśród wymienionych założeń istotny dla sektora materiałów budowlanych jest punkt 2.1.3. Zmobilizowanie sektora przemysłu na rzecz czystej gospodarki o obiegu zamkniętym [70]. W latach 1970-2017 roczne światowe wydobycie surowców naturalnych potrojiło się i nadal wzrasta, co stanowi poważne ryzyko w skali globalnej. Około połowa łącznej emisji gazów cieplarnianych oraz ponad 90% utraty bioróżnorodności i deficytu wody spowodowane są wydobyciem zasobów oraz przetwarzaniem surowców, paliw i żywności. Przemysł odpowiada za 20% gazów cieplarnianych UE [70] i uzależniony jest od przerobu nowych surowców, które są wydobywane, przetwarzane a na koniec usuwane w postaci odpadów lub emisji. Zaledwie 12% materiałów w UE pochodzi z recyklingu [70]. Nowy plan działania dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym ma wspierać rozwój przemysłu o zamkniętym cyklu życia i neutralnym dla klimatu, **czyli jak największe zagospodarowanie i ponowne wykorzystanie odpadów w przemyśle.**

Energochłonne gałęzie przemysłu, takie jak **produkcja stali**, substancji chemicznych i cementu są niezbędne dla gospodarki, jednak należy podjąć działania, aby obniżyć emisyjność tych sektorów. W tym celu konieczne jest wprowadzenie polityki „zrównoważonych produktów”. Priorytetem będzie ograniczenie zużycia materiałów i ich ponowne wykorzystanie przed recyklingiem. Zakłada się, że zrównoważona polityka produktowa doprowadzi również do znacznego ograniczenia odpadów. Tam, gdzie odpadów nie da się uniknąć, należy odzyskać ich wartość gospodarczą oraz zniwelować lub ograniczyć ich wpływ na środowisko i zmianę klimatu.

Następstwem wydania Europejskiego Zielonego Ładu był wydany przez Komisję Europejską w 2021 dokument „Gotowi na 55” (ang. Fit For 55): osiągnięcie unijnego celu

klimatycznego na 2030 r. w drodze do neutralności klimatycznej [71]. Neutralność klimatyczna to pojęcie określające równowagę (zerowy bilans) między emitowanymi gazami cieplarnianymi, a ich składowaniem lub pochłanianiem.

Unia Europejska ustanowiła cel ograniczenia do 2030 r. emisji netto o co najmniej 55% w porównaniu z poziomem z 1990 r. oraz bycia pierwszym kontynentem neutralnym dla klimatu do 2050 r. [71]. W ramach pakietu „Gotowi na 55” wprowadza się pięć nowych inicjatyw: klimat, energię i paliwa, transport, budynki, użytkowanie gruntów i leśnictwo. Na przemysł nakłada się nowe wymagania dotyczące obniżenia emisyjności procesów produkcji, ale również przewiduje się mechanizmy wsparcia w zakresie wdrażania nowych technologii. W związku z koniecznością bardziej zdecydowanej redukcji emisji UE proponuje, aby do 2030 r. sektory objęte zmienionym EU ETS (Unijny system handlu uprawnieniami do emisji), czyli sektor energetyczny, energochłonne gałęzie przemysłu, w tym rafinerie ropy naftowej, **huty stali, oraz produkcji żelaza, aluminium, metali, cementu, wapna, szkła, ceramiki, masy włóknistej, papieru, tektury, kwasów i chemikaliów organicznych** luzem, a także sektor lotniczy i sektor morski., **musiały osiągnąć redukcję emisji gazów cieplarnianych o 61% w porównaniu z poziomem z 2005 r.** [71]. Aby osiągnąć ten cel należy obniżyć roczny pułap emisji zgodnie ze ścieżką ku osiągnięciu ambitniejszego celu na 2030 r. Na Rysunku 5 przedstawiono grafikę Gotowi na 55.



Rysunek 5. Schemat działań: Gotowi na 55 [71]

Tematyka niniejszej pracy wpisuje się w powyższe rozważania, pod względem wykorzystania recyklingowych włókien z odpadowych opon i ograniczenia produkcji wysokoemisyjnych włókien stalowych, co również przyczyni się do mniejszego zużycia zasobów naturalnych przy produkcji stali.

3. Recykling opon samochodowych

3.1 Budowa i produkcja opon

Pierwsze prymitywne opony wynaleziono pod koniec IV wieku p.n.e. jako drewniane koło na które naciągnięto skórę zwierzęcą. Kolejno drewniane koło zostało wyposażone w żelazny pierścień, na który naciągano skórę. W XIX wieku odkryto korzystne właściwości mlecza kauczukowego i 1839 roku Charles Goodyear opracował proces wulkanizacji kauczuku i tak zaczęto stosować opony wykonane w całości z gumy [72,73]. W roku 1846 Robert William Thompson opatentował oponę pneumatyczną, jednak drewniane koła nie były zbyt stabilne, trwałe i bezpieczne. W 1888 r. John Boyd Dunlop wynalazł ogumienie z dętką do roweru, co sprawiło, że jazda była szybsza i cichsza. W roku 1891 bracia André i Édouard Michelin odkryli zalety opony pompowanej. Firma braci Michelin jest obecnie największym w Europie i jednym z największych na świecie producentem opon.

Szybki rozwój opon hamowany był jednak przez ograniczony dostęp do kauczuku. Na przełomie XIX i XX wieku monopol na ten surowiec posiadali Brazylijczycy, jednak jego cena była rekordowo duża, ze względu na rozwój motoryzacji. Poszukiwano rozwiązań zastąpienia naturalnego kauczuku. Dopiero w roku 1940 naukowiec Waldo Semon z firmy BFGoodrich stworzył wersję syntetycznej gumy Ameripol [72,73]. Dętki z syntetycznego kauczuku natychmiast trafiły do produkcji, a w roku 1962 produkcja kauczuku syntetycznego dorównała produkcji naturalnego i w kolejnych latach nawet przekroczyła. Kolejno wynaleziono oponę, która w połączeniu ze specjalną felgą może być łatwo montowana i wymienna. I tak w 1908 roku Henry Ford opracował model Ford Model T wyposażony w oponę firmy Goodyear.

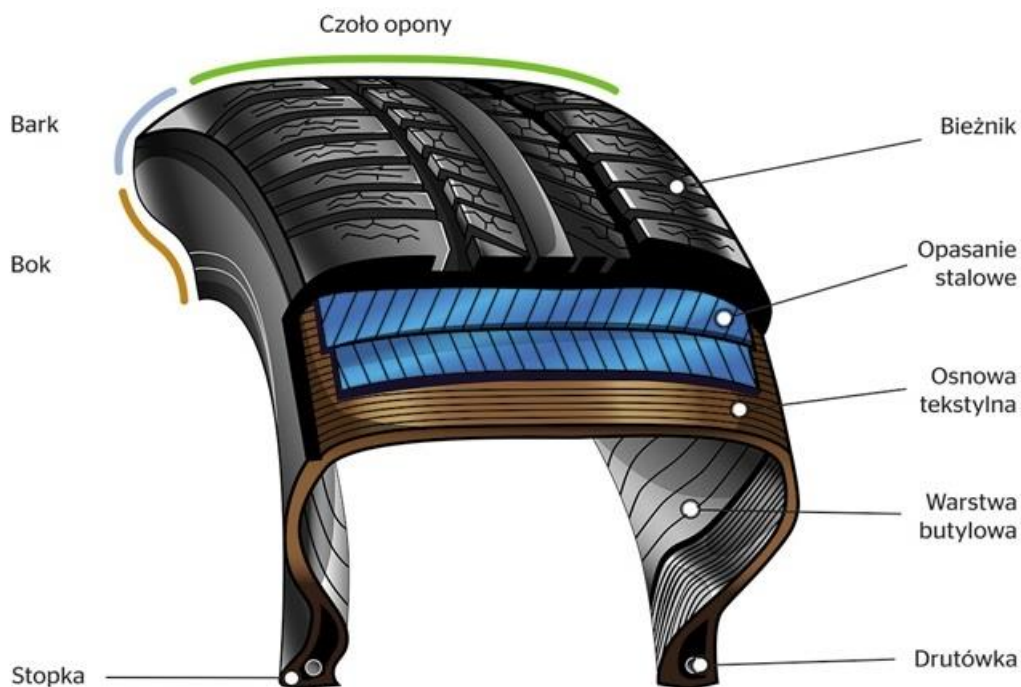
Wraz z rozwojem technologii produkcji opon, prowadzono prace nad różnymi profilami opon, produkowano opony zimowe. Zaczęto również zwracać uwagę na względy ekologiczne, i tak w 1992 roku wyprodukowano „zieloną” oponę z zastosowaniem krzemionki [73], która wzmocniła oponę i zredukowała zużycie paliwa, a tym samym redukcję CO₂ do atmosfery.

W latach 50, ważnym punktem z rozwoju opony było jej uzbrojenie za pomocą druczianych wzmocnień, które wyparty powszechnie stosowaną bawełnę. Zbrojenie stalowe wpłynęło bardzo na stabilność i bezpieczeństwo pojazdów.

Budowa standardowej opony samochodowej (Rysunek 6) [74,75]:

- **Bieżnik**, część opony, która ma kontakt z nawierzchnią. Właściwości bieżnika decydują m.in. o przyczepności do drogi, ścieraniu, odporności na zużycie, zachowaniu w zakręcie przy zachowaniu odpowiedniej elastyczności. W mieszance gumowej bieżnika stosowane są kauczuki syntetyczne i naturalne;
- **Stopka**, część opony składająca się z rdzenia tzw. **drutówki** i owiniętych wokół niego warstw osnowy tekstylnej. Drutówka to wytrzymałe druty, które tworzą kila zwojów. Stopka przylega do felgi i stabilizuje oponę założoną na felgę, a także zapobiega jej odkształcaniu pod wpływem ciężaru samochodu;
- **Bok**, boczne ścianki opony, część opony pomiędzy bieżnikiem a stopką. Utrzymuje cały ciężar pojazdu i musi być przy tym elastyczna i odporna na działanie dużych sił, zabezpiecza także przed otarciami i czynnikami środowiskowymi. Boku opony nie da się naprawić. Na nim znajdują się wszystkie parametry opony (rozmiar, dopuszczalne ciśnienia, kierunek rotacji itd.);
- **Osnowa tekstylna**, do jej budowy wykorzystuje się sploty włókien wykonane z nylonu, rayonu, wiskozy, poliestru czy aramidu o grubości ok 1-1,5 mm. Ułożone są równoległe do siebie i sprasowane z gumą, przebiegają od jednej stopki do drugiej tworząc szkielet opony, który musi utrzymywać jej kształt pod wpływem ciśnienia wewnętrznego. Opony do autobusów i samochodów ciężarowych nie mają osnowy tekstylnej, tylko wykonaną z kordu stalowego.
- **Opasanie stalowe** (osnowa stalowa), to splecione z cienkich, metalowych drutów, zatopione w mieszance gumowej, wzmocnienie opony, nadające jej wytrzymałość. Cienkie druty splata się ze sobą otrzymując elastyczny i wytrzymały kord o średnicy nie przekraczającej 1 mm. Stanowi szkielet konstrukcyjny opony na który działają obciążenia statyczne jak i dynamiczne oraz stabilizuje profil opony;
- **Warstwa butylowa**, szczelna warstwa z gumy syntetycznej znajdująca się od wewnątrz, która uszczelnia wewnętrzną stronę opony, utrzymuje wewnętrzne ciśnienie opony i nie chroni przed dostaniem wilgoci do środka. Wykonana jest z butylu (kauczuk syntetyczny), który nie przepuszcza powietrza.

Na Rysunku 6 przedstawiono przekrój typowej opony.



Rysunek 6. Budowa opony [74]

Wyróżnia się kilka rodzajów opon, które różnią się budową i składem. W Tabeli 2 przedstawiono procentowy udział składników oraz wartość opałową w zależności od rodzaju opony [76].

Tabela 2. Procentowy udział składników i wartość opałowa w zależności od rodzaju opony [76].

Składnik opony	Opony motocyklowe i rowerowe	Opony do samochodów osobowych	Opony do samochodów ciężarowych
	[% masy]		
Guma naturalna (kaczuk)	48	14	27
Guma syntetyczna	10	27	14
Sadza	11	28	28
Stal (kord stalowy)	14-18	14-25	14-25
Tkanina, wypełniacz i in. (kord tekstylny)	12-16	16-17	16-17
Wartość opałowa [MJ/kg]	33,2	36,774	34,743

Produkcja opon

Produkcję opon rozpoczyna jest proces projektowy. Duży rozwój nastąpił w momencie wdrożenia metody elementów skończonych i wykorzystania komputerów do procesu projektowego, w szczególności systemu CAD (projektowanie wspierane komputerowo) [77], dzięki którym możliwe stało się wyprodukowanie już w pierwszym podejściu oczekiwanego prototypu opony. Najczęściej tworzy się kilka prototypów i wybiera ten, który odpowiada przyjętym założeniom. Prototyp poddawany jest badaniom

laboratoryjnym i ekstremalnym testom, a następnie sprawdzeniom w ruchu ulicznym i na torach testowych w celu weryfikacji jego właściwości.

Kolejno następuje przygotowanie i dobór materiałów do produkcji opon, gdzie wykorzystywane są różne surowce m.in. sadza, tkaniny kordowe, kauczuk, druty stalowe, substancje olejowe. Produkcja zaczyna się od wymieszania kauczuku z sadzą, specjalnymi olejami, przyspieszaczami wulkanizacji, przeciwutleniaczami w celu otrzymania optymalnej mieszanki gumowej. Wszystkie składniki są mieszane, formowane na kształt płyt, pokrywane środkiem antyadhezyjnym a następnie wykorzystywane do tworzenia profilowanych elementów gumowych, gdzie za pomocą wyłaczarki jest przeciskana przez odpowiedni szablon. Otrzymane elementy są nawijane na duże kasety lub szpule oraz cięte na określoną długość. W taki sposób produkuje się bieżniki, paski stopowe, wypełniacze i inne profilowane elementy opony [77].

Oprócz gumy w skład opony wchodzi kord tekstylny i stalowy. Obraz przykładowego kordu tekstylnego przedstawiono na Fot. 1 a stalowego na Fot. 2.



Fot 1. Przykłady kordu tekstylnego w oponie (poliester, nylon) [78–80]

Każda nitka kordu tekstylnego składa się ze skręconych splotów wielu cienkich włókien, m.in. nylonowych, wiskozowych, poliestrowych, aramidowych, które są ułożone równolegle i zaimpregnowane. Następnym etapem jest wprasowanie nitek pomiędzy warstwy gumy podczas procesu kalandrowania, gdzie powstaje pogumowana tkanina, która jest odpowiednio przycinana zanim trafi do opony [77].

W produkcji **kordu stalowego** na początku druty stalowe o średnicy kilku mm wyciągane są na maszynach do osiągnięcia średnicy ok 0,2-0,5 mm [77], a następnie splatane w celu otrzymania bardzo wytrzymałego i elastycznego kordu o średnicy ok. 1 mm. W kolejnym etapie kord stalowy pokrywany jest warstwą mosiądzu (stopu miedzi i cynku) lub brązu (stopu miedzi z cyną) [77], co ma na celu dobre połączenie z gumą podczas procesu wulkanizacji. Następnie nitki kordu stalowego trafiają na kalander pomiędzy dwie warstwy gumy i zostają pocięte na odpowiednie kawałki.



Fot 2. Kord stalowy w oponie [81,82].

Po przygotowaniu poszczególnych elementów opony następuje proces konfekcjonowania, czyli przygotowania i ułożenia poszczególnych jej elementów: czoła bieżnika, opasania, osnowy, boków, wypełniacza, wykładziny wewnętrznej. Następnie nakłada się poszczególne elementy w kolejności [77]:

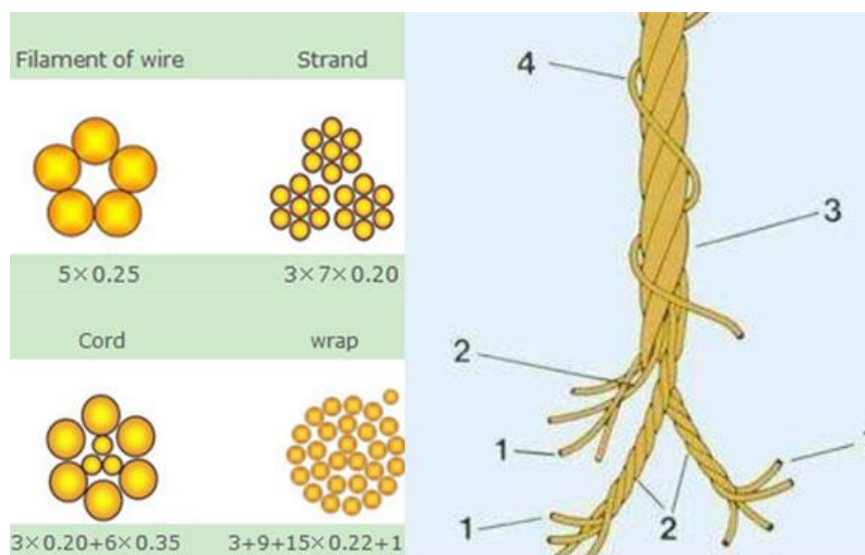
- umieszczenie nieprzepuszczalnej kapy butylowej,
- umieszczenie boków po dwóch stronach,
- poprzeczne nakładanie warstwy kordu tekstylnego i stalowego,
- umieszczenie drutówki wraz z wypełniaczem na warstwie tekstylnej po obu stronach.

Wszystkie elementy kładzie się na bębnie, który zostaje napełniony powietrzem co sprawia, że wszystkie elementy przylegają do siebie. Następnie całość jest poddawana procesowi rolowania, który nadaje oponie odpowiedni kształt, zapewnia połączenie wszystkich elementów. Ostatnim etapem jest proces wulkanizacji w prasach wulkanizacyjnych. Surowa opona pokrywana jest płynami antyadhezyjnymi i nakładana na membranę lub formę prasy. Po zamknięciu prasy przebiega proces wulkanizacji w określonej temperaturze i ciśnieniu, podczas którego opona wypełnia zarys w formie co nadaje pożądaną właściwość oraz kształtu i rzeźby bieżnika. Po ostygnięciu przechodzi proces kontroli końcowej.

Polska jest w czołówce Europy w zakresie produkcji opon. Według danych z 2018 roku, podanych przez Polski Związek Przemysłu Oponiarskiego, w Polsce produkuje się ponad 35 mln sztuk opon rocznie [77]. W kraju funkcjonują zakłady największych światowych producentów opon: w Poznaniu i Stargardzie – Bridgestone, w Dębicy – Goodyear, w Olsztynie – Michelin.

Drut stalowy z recyklingu opon

Włókna stalowe z opon powstają w procesie recyklingu opon samochodowych, podczas którego druty oddzielone są od resztek gumy, kordu tekstylnego i pyłu stalowego. Metody recyklingu opon zostały omówione w kolejnym rozdziale. Na Rysunku 7 przedstawiono budowę poszczególnych elementów kordu stalowego w oponie.



Rysunek 7. Budowa kordu stalowego w oponie [83] (opis w tekście poniżej)

Do produkcji linek stalowych wykorzystuje się metalowy pręt lub kształtownik, tzw. walcówkę ze stali wysokowęglowej o wysokiej czystości, co umożliwia wytwarzanie drutów o bardzo wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, dużej elastyczności i wysokiej odporności na zmęczenie.

Element kordu pokazano na Rysunku 7 [83]:

- 1 - włókno (drut) stosowane jako pojedynczy element kordu lub sznurka. Standardowo dostępne są następujące średnice 0,15/0,175/0,20/0,22/0,27/0,28/0,30/0,35/0,38 mm;
- 2 - to pasma łączone ze sobą w celu utworzenia produktu jednostkowego do dalszego przetwarzania;
- 3 - jest kordem składającym się z dwóch lub więcej włókien pojedynczych, gdy jest używany jako produkt końcowy, lub kombinacją połączenia kilku pasm lub włókien ciągłych i pasm;
- 4 - drut owinięty spiralnie wokół stalowego kordu.

Produkowane druty do kordu stalowego podlegają ścisłym wymaganiom m.in. systemu zarządzania jakością w branży motoryzacyjnej ISO/TS 16949 [84] oraz certyfikacji ISO 9002 [85]. Stal na zbrojenie opon to metalowy pręt lub kształtownik, tzw. walcówka walcowana na gorąco o grubości 5,5 mm, przeznaczona do ciągnięcia do grubości 0,4 mm lub mniejszej przy osiągnięciu końcowych właściwości mechanicznych powyżej 4000 MPa [86].

Wyróżnia się kilka typów drutu stosowanego do produkcji kordu stalowego, które wykonane są z najwyższej jakości stali wysokowęglowej, której powierzchnia pokryta jest powłoką miedziowo-cynkową, która chroni stal przed korozją i nadaje jej określone właściwości wytrzymałościowe. W Tabeli 3 przedstawiono typy drutów do wytwarzania kordu i ich skład [86,87], natomiast w Tabeli 4 zawartość miedzi w drutach do produkcji opon [83].

Tabela 3. Skład stali do wytwarzania kordu stalowego [86,87]

Symbol	Skład [%]					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
C60	0,55-0,65	0,15-0,30	0,40-0,80	max. 0,03	max. 0,03	-
C70	0,65-0,75	0,15-0,30	0,40-0,80	max. 0,03	max. 0,03	-
C80	0,75-0,88	0,15-0,30	0,40-0,80	max. 0,03	max. 0,03	-
C90+Cr	0,90-0,95	0,15-0,30	0,10-0,40	max. 0,03	max. 0,03	0,10-0,30

Tabela 4. Zawartość miedzi w drutach do produkcji opon [83]

Rodzaj	Zawartość miedzi [%]	
	Średnica kordu [mm]	Zawartość miedzi w powłoce Cu-Zn [%]
Normalny typ	< 0,20	67,5
	0,21-0,3	
	>0,30	
Powłoka o niskiej zawartości miedzi	< 0,20	63,5
	0,21-0,3	
	>0,30	

Druty do produkcji kordu stalowego muszą charakteryzować się również wysokimi właściwościami wytrzymałościowymi. Pojedynczy drut do wytwarzania kordu osiąga wytrzymałość na rozciąganie w zakresie 2100-2850 MPa (dla średnic ok. 0,2-0,9 mm) [33,51]. Natomiast spleciony z drutów kord stalowy do zbrojenia opon wykazuje wytrzymałość na rozciąganie ok. 3260 MPa oraz Moduł Younga 177 GPa (dla średnicy 1,5 mm) [88].

3.2 Metody recyklingu opon

Dynamiczny rozwój infrastruktury komunikacyjnej oraz motoryzacji przyczynia się do zwiększenia liczby pojazdów, i tym samym zwiększenie produkcji opon gumowych, które po zużyciu zanieczyszczają środowisko naturalne. Utylizacja opon jest globalnym problemem środowiskowym. Rocznie na całym świecie produkuje się około 1,5 miliarda opon [23–25]. Ponad 500 milionów zużytych opon jest składowanych na nielegalnych wysypiskach [26] i stanowi poważne zagrożenie dla ludzi i środowiska [27], poprzez możliwość wywołania trudnych do ugaszenia pożarów, które powodują wydzielanie toksycznych substancji chemicznych [89], zanieczyszczenie gleby, wód gruntowych a także

przez rozwój specyficznej flory i fauny stwarzającej warunki do rozwoju chorób epidemicznych [90].

W Polsce wg Rocznika Statystycznego Przemysłu 2021 Głównego Urzędu Statystycznego [91] w 2020 roku wytworzono 42 424 000 sztuk opon (nie licząc opon rowerowych, motorowerowych, motocyklowych). Opony są odpadem niezwykle trwałym, który bardzo powoli ulega naturalnemu rozkładowi i musi zostać poddany jednej z form recyklingu [28,92].

W zakresie wymagań legislacyjnych dotyczących gospodarki zużytymi oponami obowiązują stosowane akty prawne. W Unii Europejskiej obowiązuje Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2018/851 w sprawie odpadów [93], w którym omówiono istotne działania w ramach ochrony środowiska: zapobieganie powstania odpadów, recykling i powtórne wykorzystanie odpadów oraz usuwanie pozostałości nie nadających się do odzysku.

W Polsce od 1 lipca 2003 r. obowiązuje zakaz składowania na wysypiskach opon całych, natomiast już od 2006 r. zaczął obowiązywać również zakaz składowania opon rozdrobnionych. Mówi o tym obowiązująca Ustawa o odpadach, Dz.U. 2022 poz. 699 [94], w której Art. 122.1 precyzuje, że składowanie opon i ich części na składowisku odpadów jest zakazane, z wyłączeniem opon rowerowych i opon o średnicy zewnętrznej większej niż 1400 mm.

Ponadto w lipcu 2023 roku opublikowano Uchwałę nr 96 w sprawie Krajowego Planu Gospodarki Odpadami 2028 [95], który zakłada następujące efekty: ograniczenie wytwarzania odpadów, zwiększenie ilości odpadów przekazywanych do recyklingu, wyeliminowanie nieprawidłowo prowadzonego zagospodarowania odpadów, podniesienie świadomości ekologicznej społeczeństwa w zakresie zapobiegania powstawaniu odpadów oraz właściwego postępowania z odpadami. W ramach Krajowego Planu Gospodarki Odpadami dokonano podziału odpadów i opony zdefiniowano jako odpady powstające z produktów. Zużyte opony powstają w wyniku eksploatacji pojazdów, a także podczas demontażu pojazdów wycofanych z eksploatacji. W Tabeli 5 zamieszczono zestawienie danych, dotyczące masy opon wprowadzonych na rynek oraz osiągniętych w latach 2017 i 2018 poziomów odzysku i recyklingu odpadów w postaci zużytych opon [95].

Tabela 5. Poziom odzysku i recyklingu opon w latach 2017-2018 [95]

Rok	Ilość wprowadzonych opon [tys. Mg]			Odpady poddane ogółem [tys. Mg]		Wymagany poziom		Osiągnięty poziom [%]	
	Ogółem	Podlegających obowiązkowi		odzyskowi	recyklingu	odzysku	recyklingu	odzysku	recyklingu
		odzysku	recyklingu						
2017	281,1	262,6	262,6	211,9	92,9	75	15	80,69	35,38
2018	274,5	274,3	274,3	210,1	98,4	75	15	76,55	35,86

Zgodnie z obowiązującymi przepisami podmioty wprowadzające na rynek ogumienie (producenci i dystrybutorzy) są zobowiązani do odzysku minimum 75% masy opon wprowadzonych do obiegu, z czego 15% musi zostać poddane recyklingowi [95]. Jeśli warunek ten nie zostanie spełniony, wprowadzający ma obowiązek zapłaty tak zwanej opłaty produktowej.

Głównym problemem dotyczącym zużytych opon jest nieprawidłowe ich zagospodarowywanie. Niestety, częstym zjawiskiem jest porzucanie opon w nieprzeznaczonych do tego miejscach lub tworzenie nielegalnych wysypisk. Tego typu miejsca stwarzają ogromne zagrożenie dla ludzi i środowiska, ponieważ często dochodzi do ich pożarów, które są bardzo trudne do ugaszenia. Innym problemem związanym z recyklingiem starych opon jest niekontrolowane sprowadzanie ich do Polski z zagranicy.

W kraju ważnym elementem systemu zbierania odpadów komunalnych są [96]:

- Punkty Selektywnego Zbierania Odpadów Komunalnych (PSZOK), w każdej gminie znajduje się PSZOK który ma obowiązek przyjąć zużyte opony,
- zakłady wulkanizacyjne,
- Centrum Utylizacji Opon, do którego oddać opony mogą tylko podmioty do tego uprawnione, zajmujące się obrotem opon.

Selektywne zbieranie jest jedną z podstawowych zasad racjonalnej gospodarki odpadami, umożliwia pozyskanie stosunkowo czystych frakcji odpadów, stanowiących pożądaną wsad do procesów recyklingu.

Zużyta opona samochodowa, jak wcześniej wspomniano, zawiera oprócz gumy, kord tekstylny i stalowy, co znacznie utrudnia jej przetwarzanie. Metody utylizacji opon samochodowych można podzielić na trzy główne grupy:

- recykling produktowy
- recykling materiałowy
- recykling energetyczny

Recykling produktowy oznacza wykorzystanie zużytych opon w całości. W tej grupie znajduje się również bieżnikowanie, czyli wymiana bieżnika w używanej oponie i ponowne zwrócenie jej do obrotu. Polega na usunięciu zużytego bieżnika, sprawdzeniu stanu korpusu oraz założeniu nowego bieżnika. Bieżnikowanie jest ekonomicznie uzasadnionym i bezpiecznym dla środowiska sposobem wykorzystania zużytych opon. Nie każda opona może jednak zostać poddana procesowi bieżnikowania, zależy to od stopnia jej zużycia i innych uszkodzeń opony. Ponadto, zużyte opony w całości, pocięte lub sprasowane mogą znaleźć wiele zastosowań, gdzie wykorzystuje się ich trwałość oraz zdolność do tłumienia hałasu, wstrząsów i uderzeń [97], są to m.in.: bariery ochronne autostrad, bariery dźwiękochłonne, odbojniki statków, zabezpieczenia nabrzeży i falochrony, umocnienie poboczy dróg, izolacje fundamentów budowlanych.

Recykling materiałowy polega na ponownym wykorzystaniu surowców, z których zbudowana jest opona. Podstawowym procesem umożliwiającym recykling materiałowy zużytych opon jest ich rozdrabnianie i separacja na oddzielne grupy materiałów: granulatu gumowego, stali, tekstylii. Wyróżniamy trzy metody recyklingu materiałowego opon: metoda mechaniczna, kriogeniczna i metoda Berstorffa [98,99].

Metoda mechaniczna polega głównie na cięciu i rozdrabnianiu opon a następnie stal oddzielana jest za pomocą separatorów magnetycznych, a reszta składników za pomocą separacji powietrznej i wstrząsowej. Rozdrabnianie opon odbywa się w temperaturze otoczenia w specjalnych maszynach typu szybkoobrotowe młyny, krajalnice, walcarki, granulatorek, separatory oraz sita o różnych wymiarach.

Metoda kriogeniczna polega na schłodzeniu ciekłym azotem pociętych wcześniej opon w tunelu zamrażalniczym, na końcu którego, znajduje się młyn młotowy który oddziela gumę od zbrojenia. Proces przebiega w temperaturze ok. – 80 °C, w której guma uzyskuje bardzo dużą kruchość. Metal i włókna stalowe wyodrębnia się na oddzielaczu. Po końcowym procesie przesiewania otrzymuje się miął gumowy o regularnym kształcie, gładkiej powierzchni i ostrych krawędziach.

Rozdrabnianie metodą Berstorffa polega na udoskonaleniu procesu rozdrabniania mechanicznego poprzez wstępne rozcieranie mechaniczne gumy za pomocą walcarki lub wytłaczarki ślimakowej [98]. Stal oddzielana jest za pomocą separatorów magnetycznych tak jak w metodzie mechanicznej.

Tematyka wykorzystania surowców wtórnych pochodzących z recyklingu materiałowego opon jest od lat przedmiotem wielu badań. Najszersze zastosowanie znalazły odpady gumowe [100], gdzie wyróżnia się kilka frakcji w zależności od wielkości cząstek: cięte kawałki, strzępy, chipsy, granulatu, miął oraz ścier, z których każdy ma swoje zastosowanie w różnych gałęziach gospodarki: budownictwie, drogownictwie, infrastrukturze sportowej i rekreacyjnej, w przemyśle materiałów gumowych oraz poligrafii m.in.: [26,89,106–109,96,97,100–105]:

- do budowy nawierzchni drogowych (asfalt) oraz podkładów kolejowych,
- produkcji wzmocnionego betonu (kruszywo gumowe), wypełnienia lekkie w konstrukcjach budowlanych,
- nasypy, warstwy podłogowe dróg,
- ekrany akustyczne i znaki,
- nawierzchnie sztucznych boisk, place zabaw, boiska do koszykówki,
- przedmioty z gumy takie jak maty, wycieraczki, dywaniki czy podkładki tarasowe;

Recykling materiałowy w Polsce stanowi ponad 15% w ogólnym odzysku opon [110]. Głównym produktem recyklingu materiałowego są różne frakcje gumy: pył, miął, granulatu i grys, które znalazły szerokie zastosowanie m.in. w przemyśle drogowym i gumowym. Oprócz gumy z opon odzyskuje się stal oraz odpady tekstylne. Odpady tekstylne podlegają dalszemu recyklingowi są wykorzystywane dalej w przemyśle tekstylnym, a te które nie mogą zostać podane recyklingowi poddawane są odzyskowi termicznemu w procesie utylizacji. Kord tekstylny, dzięki swojej wysokiej kaloryczności i

niskiej wilgotności, znalazł także zastosowanie jako paliwo alternatywne w cementowniach i elektrocieplowniach [111]. Stal zawarta w oponach stanowi wartościowy materiał wsadowy dla hutniczych pieców stalowniczych, gdzie stanowi materiał do ponownej produkcji stali. Jednak złom stalowy pochodzący z recyklingu opon z powodu rozwiniętej powierzchni i zawartości zanieczyszczeń gumowych, stwarza pewne niebezpieczeństwo wystąpienia silnych płomieni przy załadunku do pieca oraz wysokiej temperatury spalin podczas topienia wsadu, co może powodować zniszczenie filtrów w układzie odpylania spalin [112]. Dlatego stal z recyklingu opon musi charakteryzować się wysoką czystością (do ok. 1% zawartości gumy [112]) aby mogła bezpiecznie trafić do hutniczych pieców stalowych. Wykorzystanie stali jako włókien do zbrojenia betonu przedstawiono w rozdziale 4.

Recykling energetyczny, termiczne przekształcenie, czyli odzysk energii, w którym surowiec jest zamieniany na energię cieplną lub elektryczną. Energia jest uzyskiwana w trakcie spalania całości lub części opon, w specjalnie do tego celu przystosowanych piecach, głównie w cementowniach, a także w ciepłowniach. Do recyklingu energetycznego zalicza się również piroliza i zagospodarowanie produktów pirolizy. Zużyte opony posiadają duży potencjał energetyczny, charakteryzują się wysoką wartością opałową (31-32 MJ/kg) a dodatkową korzystną cechą są niewielkie wahania ich uśrednionego składu chemicznego [113].

Piroliza opon to rodzaj obróbki cieplno-chemicznej, który polega na ogrzewaniu surowca do temperatury przekraczającej 400-700 °C [114] w atmosferze beztlenowej lub obojętnej w reaktorze. W takich warunkach dochodzi do licznych reakcji chemicznych, które powodują powstania sadzy, olejów i gazów, które mogą być potem wykorzystane na przykład do wytwarzania energii elektrycznej, m.in.:

- olej popirolityczny – to cenne źródło związków chemicznych (benzen, toluen, ksylen, dipenten), które może być wykorzystywane także jako olej opałowy lub napędowy.
- gaz popirolityczny – po oczyszczeniu może być użyty jako paliwo.,
- sadza popirolityczna – nadaje się do produkcji węgla aktywnego, a także niskiej jakości produktów gumowych czy pigmentu drukarskiego.

Głównym problemem surowców uzyskanych z pirolizy opon jest wysoka zawartość siarki. Dlatego muszą one być odsiarczane, by poprawić ich jakość.

W Polsce najczęściej opony poddawane są recyklingowi energetycznemu, poprzez odzysk energii. Około 60% zużytych opon trafia do pieców cementowni jako paliwo alternatywne [110], w postaci całych lub pociętych opon. W piecach cementowni panują najwyższe temperatury, wyższe niż np. w ciepłowniach, stąd spalanie opon wydaje się ekonomicznie uzasadnione, gdyż opony mają wyższą kaloryczność w porównaniu do węgla kamiennego. Należy jednak zaznaczyć, że opony w piecach stanowią do ok. 10% całego paliwa [110]. Spalanie opon, zwłaszcza w przemyśle cementowym, energetycznym

i papierniczym wymaga jednak od zakładów inwestycji w infrastrukturę, w celu spełnienia restrykcyjnych norm w zakresie wydalania szkodliwych gazów po spalaniu opon. Należy przy tym zauważyć, że bezpośrednie spalanie opon pozwala na odzysk tylko około 40% energii w nich zawartej. Za to przy zgazowaniu lub pirolizie zużytych opon, efektywność odzysku energii może być znacznie wyższa i osiągać nawet do 70% [113].

Inne źródła wskazują, że wbrew pozorom, recykling energetyczny nie jest najlepszą drogą utylizacji opon, gdyż produkcja kauczuku oponowego zużywa 3–4 razy więcej energii w porównaniu do energii odzyskanej przez recykling energetyczny [115]. W konsekwencji użycie kauczuku z recyklingu do celów pierwotnego przeznaczenia niż spalanie jest bardziej uzasadnione, zarówno z ekonomicznego jak i ekologicznego punktu widzenia.

Recykling zużytych opon jest zróżnicowany w różnych krajach europejskich, przykładowe dane przedstawiono w Tabeli 6.

Tabela 6. Recykling zużytych opon w wybranych krajach europejskich [89]

Kraj	Poziom recyklingu [%]	Rok
Dania	100	2019
Finlandia	84,5	2020
Portugalia	69,3	2020
Grecja	51,6	2018
Czechy	48,7	2019
Polska	35,9	2018
Norwegia	30,0	2020
Francja	21,0	2019

Inne źródła wskazują, że w krajach UE wg danych statystycznych publikowanych przez ETRMA [116] w 2018r. 91% zużytych opon zostało poddanych dalszej obróbce. Recykling materiałowy w krajach UE wynosił 62%, a recykling energetyczny 38%.

W Polsce recykling materiałowy opon w 2015 roku wyniósł 22%, w 2016 roku 32% a w 2018 już 35,9% [117], a całkowite odzyskanie przekroczyło 76%. Przykładowo W Danii recyklingowi materiałowemu podlega 100% opon [96,117].

4. Analiza literatury w zakresie stosowania włókien z opon do betonu

Prace naukowo-badawcze w zakresie stosowania włókien z recyklingu opon jako wzmocnienie betonu prowadzone są od lat, gdyż włókna pozyskane z opon dodane w odpowiedniej ilości do betonu wpływają na poprawę cech wytrzymałościowych, mechanicznych i innych właściwości betonu, w porównaniu z produkowanymi komercyjnie włóknami stalowymi.

Oprócz pełnienia roli zbrojenia rozproszonego do betonu, stosowanie włókien z recyklingu opon jest istotne również pod względem środowiskowym i ekonomicznym. Zagospodarowanie recyklingowych włókien pozyskanych ze zużytych opon przyczynia się do oszczędności zasobów naturalnych. Ponadto produkcja stali wpływa niekorzystnie na środowisko naturalne poprzez wydzielanie szkodliwych gazów do atmosfery (wysoki ślad węglowy), więc ograniczenie ich stosowania w zamian za wykorzystanie materiałów recyklingowych, w dobie kryzysu ekologicznego, jest uzasadnione. Istotny jest również aspekt ekonomiczny: włókna z recyklingu opon są tańsze niż włókna komercyjne, co również stanowi argument dla ich stosowania.

4.1 Korzyści środowiskowe i ekonomiczne

Poszukiwanie możliwości zastąpienia tradycyjnego zbrojenia rozporoszonego do betonu, jakim są włókna stalowe, ma kluczowe znaczenie dla ochrony środowiska naturalnego pod wieloma względami. Stajemy przed zagrożeniem niedoboru zasobów naturalnych, w tym surowców do produkcji stali, dlatego szczególny nacisk jest stawiany na oszczędność surowców naturalnych. Ponad to proces produkcji stali wpływa znacząco na wzrost gazów cieplarnianych zanieczyszczających atmosferę (produkcja stali powoduje wytworzenie znacznej ilości gazów cieplarnianych; ślad węglowy produkcji stali wynosi 1900 kg eCO₂/t) [68].

Recykling zużytych opon może zatrzymać około 1,52 tony emisji CO₂ rocznie [92,118]. Zostało potwierdzone, że proces recyklingu materiałowego opon gumowych składający się na rozdzielenie stali od gumy i tekstyliów poprzez cięcie, separację powietrzną i magnetyczną a także dodatkowy proces czyszczenia kordu stalowego jest bardziej korzystne dla środowiska naturalnego niż produkcja nowej stali [48,118–120].

W celu ujednoczenia jednostek i rozszerzenia pojęcia śladu węglowego na pozostałe gazy wprowadzono termin ekwiwalent dwutlenku węgla (eCO₂), czyli wskaźnik potencjału tworzenia efektu cieplarnianego (ang. Global Warming Potential, GWP). Jest to wskaźnik służący do ilościowej oceny wpływu danej substancji na efekt cieplarniany. Porównuje ilość ciepła zatrzymanego przez określoną masę gazu do ilości ciepła zatrzymanego przez podobną masę dwutlenku węgla [68]. W pracy [48] określony został potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (ang. Global Warming Potential, GWP) dla betonu z dodatkiem włókien stalowych produkowanych komercyjnie oraz włókien z recyklingu opon. W Tabeli 7 przedstawiono wskaźniki GWP dla poszczególnych składników betonu [48].

Tabela 7. Wskaźniki GWP składników betonu [48,51]

Składnik betonu	Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP) [kg eCO ₂ /kg] [48]	Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP) [kg eCO ₂ /kg] [51]
Cement	0,931	0,782
Popiół lotny	0,015	-
Granulowany żużel wielkopiecowy	-	0,0180
Pył krzemionkowy	-	0,00031
Kruszywo	0,0024	0,0024
Superplastyfikator (domieszka)	1,064	0,944
Woda	0,0001	0,00015
Włókna stalowe komercyjne MSF	2,15	2,68
Włókna z recyklingu opon RTSF	0,50	0,083

Z Tabeli 7 wynika, że włókna z recyklingu opon mają wielokrotnie niższy potencjał tworzenia efektu cieplarnianego niż komercyjne włókna stalowe. Różnica zależy od sposobu pozyskania włókien i ich dalszego przetwarzania. Nie mniej jednak wpływ na środowisko jest znacznie niższy niż w przypadku produkcji przemysłowej włókien stalowych.

W Tabeli 8 przedstawiono wskaźnik GWP na 1 m³ betonu bez dodatku włókien oraz betonów z taką samą ilością włókien komercyjnych oraz włókien z recyklingu opon.

Tabela 8. Wskaźniki GWP dla betonów [48]

Składnik betonu	Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP) [kg eCO ₂ /m ³]
Beton bez dodatku włókien	435
Beton z włóknami komercyjnymi MSF w ilości 1,5% (117 kg/m ³)	700
Beton z włóknami z recyklingu opon RTSF w ilości 1,5% (117 kg/m ³)	500

Z Tabeli 8 wynika, że beton z dodatkiem 1,5% włókien stalowych produkowanych przemysłowo MSF ma o ok. 30% większy potencjał tworzenia efektu cieplarnianego niż beton bez dodatku włókien. Natomiast beton z włóknami z recyklingu opon, dodawanych również w ilości 1,5% ma o ok. 15% większy wskaźnik GWP. Z innego punktu widzenia całkowita zamiana włókien MSF na włókna RTSF w betonie, powoduje obniżenie wskaźnika GWP o ok. 29% [48].

W pracach [121,122] analizowano również kalkulację energochłonności oraz emisji CO₂ dla receptury betonu z włóknami komercyjnymi MSF (w ilości 25 kg/m³) oraz porównawczo dla takiego samego betonu, tylko z włóknami z recyklingu opon RTSF (w ilości 50 kg/m³). Dla włókien RTSF stanowiących odpad przy odzysku gumy przyjęto zerową wartość energochłonności oraz zerową wartość emisji CO₂. Przeprowadzona

kalkulacja energochłonności receptury betonu z włóknami MSF wykazała o 31,3% niższą energochłonność oraz o 30,8% niższą emisję CO₂ niż dla betonu z włóknami RTSF.

Dane, uzyskane z Głównego Urzędu Statystycznego dla gospodarki polskiej za rok 2022 w zakresie przetwórstwa przemysłowego [91] wskazują, że produkcja surówki żelazostopów, żeliwa i stali oraz wyrobów hutniczych (w tym włókien stalowych) osiąga jedną z najwyższych wartości energochłonności produkcji sprzedanej, tuż po produkcji cementu, wapna i gipsu a wykazuje podobną energochłonność do produkcji podstawowych chemikaliów, nawozów, tworzyw sztucznych i kauczuku oraz do produkcji masy włóknistej, papieru i tektury [91].

W zakresie ekonomicznym autorzy pracy [48] podaje następujące koszty włókien: 0,80 €/kg włókien MSF oraz 0,50 €/kg włókien RTSF, co daje o ok. 37% niższą cenę dla włókien RTSF niż MSF. Kolejne źródło [51] podaje koszt włókien MSF 3000 £/tonę a włókien RTSF 860 £/tonę, czyli ok. 70% mniej. Autorzy inne pracy [49] podają dane, że stalowe włókna pochodzące z recyklingu są 10 razy tańsze od produkowanych komercyjnie, dlatego cena 1 m³ betonu z dodatkiem włókien może być obniżona o 20-50%.

Zgodnie z obliczeniami złom kordu stalowego dodany do 1 m³ mieszanki betonowej daje oszczędności od 7% do 33% [123]. Inne źródła podają, że koszt RTSF (ok. 150 euro / tonę) jest dziesięciokrotnie niższy niż koszt MSF (ok. 1500 euro / tonę) [124].

4.2 Wytrzymałość betonu z dodatkiem włókien z recyklingu

W ciągu ostatnich kilku - kilkunastu lat obserwuje się wzrost zainteresowania nad wykorzystaniem recyklingowych włókien stalowych z opon jako zbrojenie rozproszone do betonu i możliwość zastąpienia komercyjnych włókien stalowych. Z uwagi na właściwości geometryczne i wytrzymałościowe włókien z recyklingu opon, liczne badania prowadzone są w kierunku ich wykorzystania jako zbrojenie rozproszone do betonu, zarówno jako samodzielne zbrojenie jak i mieszanina różnego rodzaju włókien [24,25,33–37,121,125,126]. Stal jest jednym z głównych składników opony, która stanowi około 14% - 27%.

Kluczową kwestią jest analiza wpływu włókien RTSF na skuteczność zbrojenia kruchej matrycy cementowej. W zależności od metody pozyskania włókien, ich parametrów geometrycznych, zawartości w nich zanieczyszczeń gumowych a przede wszystkim ich zawartości w betonie, wyniki badań są zróżnicowane, ale w zdecydowanej większości pozytywne, co świadczy o tym, że kierunek ich wykorzystania jako zbrojenie rozproszone jest prawidłowy.

Liczne źródła literaturowe wskazują, że beton z dodatkiem recyklingowych włókien z opon osiągał wyższe wytrzymałości betonu na zginanie oraz inne parametry związane z pękaniem fibrobetonów, w porównaniu do betonu niezbrojonego lub betonu z dodatkiem

włókien stalowych komercyjnych. Skuteczność zbrojenia betonu przez włókna z recyklingu opon była większa wraz ze wzrostem włókien w betonie i odpowiedniej ich czystości, czyli jak najmniejszym stopniu zanieczyszczeń gumą [21,22,129,29,38–40,42,44,127,128].

Najczęściej stosowane i opłacalne techniki recyklingu opon obejmują połączenie mechanicznego rozdrabniania i granulacji, w wyniku której powstają włókna stalowe o nieregularnych kształtach, długościach i średnicach. Jednak włókna te są często silnie zanieczyszczone gumą. Badania wskazują, że pierwotnie pozyskany kord stalowy z opon musi być dozowany w większej ilości niż włókna komercyjne, z uwagi na obecność w nim licznych zanieczyszczeń gumowych, tekstylnych oraz pyłu stalowego (do ok. 20% masy) [33], które oblepiają powierzchnię włókien i obniżają przyczepność do betonu [29,38,45–47].

W pracy [51] badano wpływ długości i czystości włókien z opon (RTSF) na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu betonów i wykazano, że guma i inne zanieczyszczenia, a także włókna o długości poniżej 9 mm, znacząco zmniejszają wytrzymałość betonu. Proces czyszczenia i zmniejszenia ilości krótkich włókien są niezbędne dla uzyskania lepszych wytrzymałości resztkowych betonu na rozciąganie przy zginaniu. Resztki gumy i kordu tekstylnego, a także pył stalowy zanieczyszczający powierzchnie włókien włókna stalowe i pogarszają efektywność zbrojenia. Konieczne jest zatem dalsze przetwarzanie RTSF, aby zminimalizować zawartość zanieczyszczeń do poziomu ok. 0,5 % masy [29,33] oraz ograniczenie długości włókien i rozkładu średnicy do tych, które są skuteczne w betonie i zapewniają dobrą homogenizację włókien podczas mieszania betonu. Dopiero po oczyszczeniu i odseparowaniu najkrótszych (najmniej efektywnych) włókien RTSF może być stosowany w betonie jako zbrojenie rozproszone [21,29,33,40,48–50].

Pomimo wielu dobrych wyników nadal istnieją obawy przed zastosowaniem RTSF do zbrojenia betonu. Przyczyną braku zainteresowania aplikacją włókien stalowych z opon jako zbrojenie betonu związane z ich parametrami geometrycznymi. Włókna RTSF znacznie różnią się od wszystkich innych komercyjnych włókien stalowych, dostępnych na rynku, powszechnie stosowanych jako zbrojenie rozproszone w konstrukcjach betonowych, takich jak np. posadzki przemysłowe i okładziny tuneli [130,131]. Ponieważ są otrzymywane z recyklingu zużytych opon, ich parametry są uzależnione od technologii przetwarzania i kontrola ich wymiarów i geometrii jest niemożliwa. Powszechnie wiadomo, że czynniki, które mają największy wpływ na efektywność zbrojenia włókniem w matrycy cementowej to ich parametry geometryczne, takie jak: długość, średnica, kształt itp. [132].

Biorąc pod właściwości geometryczne, włókna hybrydowe jakimi są te z recyklingu opon, czyli mieszanka włókien o różnych długościach, średnicach i kształtach, może być bardziej skuteczne pod kątem zbrojenia niż jednorodne pod względem wymiarów komercyjne włókna stalowe [133]. Zastosowanie włókien tego samego rodzaju może być skuteczne w zatrzymywaniu pęknięć o określonej szerokości, ale proces pęknięcia matrycy

cementowej jest bardziej złożony i stopniowy [134]. Zastosowanie mieszanych włókien o różnych współczynnikach kształtu (długość / średnica) i właściwościach fizycznych może zapewnić lepszą kontrolę pęknięć w większym zakresie szerokości pęknięć. Proces mostkowania pęknięć przez włókna może odbywać się na różnych poziomach mikrostruktury kruchej matrycy cementowej. Badania wykazały, że stosowanie włókien hybrydowych może prowadzić do lepszych wyników niż w przypadku włókien jednego typu [135–139].

W pracy [123] badania betonu z dodatkiem włókien stalowych z recyklingu opon pozwoliły uzyskać następujące wyniki: beton modyfikowany złomem kordu stalowego ma znacznie obniżoną wartość absorpcji wody; wpływa na zwiększenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie oraz znacznie zwiększa odporność na zamrażanie i rozmrażanie betonu.

W większości analizowanych prac badane były standardowe właściwości fibrobetonów, tj. wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu, które wykazywały zróżnicowane wyniki dla RTSF i RSF w zależności od ilości i sposobu pozyskania. Dodatek RTSF może poprawić wytrzymałość resztkową betonu zwykłego. Właściwości betonu RTSF po pęknięciu zależą nie tylko od rodzaju i dawki włókien, ale także od liczby włókien RTSF obecnych w mieszance betonowej. Wytrzymałość FRC na zginanie wzrastała wraz ze wzrostem zawartości RTSF. Włókna RTSF mogą zapewnić wyniki porównywalne z uzyskanymi przez stalowe włókna komercyjne pod względem wytrzymałości na zginanie i ścinanie oraz resztkowej wytrzymałości na zginanie [38,42,129,140].

W analizowanej literaturze przeważały prace wskazujące na równoważny, korzystny wpływ obu włókien na właściwości betonu oraz potwierdzające możliwość stosowania RTSF jako zamiennik produkowanych przemysłowo włókien RSF [141]. Dodatek włókien stalowych pochodzących z recyklingu (RTSF) ze zużytych opon może znacznie zmniejszyć kruche zachowanie materiałów na bazie cementu, poprawiając jego wytrzymałość i odporność na pękanie. W tym sensie wydaje się, że beton zbrojony włóknami stalowymi z recyklingu ma potencjał do stworzenia trwałego materiału do zastosowań konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych [44]. Wartości uzyskane dla opracowanego RSFRC są wystarczająco wysokie, aby stworzyć dobre perspektywy wykorzystania tego zbrojenia w niektórych zastosowaniach, na przykład w przypadku betonu fundamenty blokowe, płyty wsparte na gruncie lub na palach [44].

Natomiast w pracy [124] stwierdzono, że celu dalszej, szczegółowej analizy wpływu włókien z recyklingu opon na kruche pękanie kompozytów cementowych należy przeanalizować ich energię pękania.

W kilku rozprawach doktorskich [35,122,142,143] analizowano możliwość stosowania włókien z opon do betonu oraz badano właściwości m.in. mechaniczne, reologiczne, trwałość i inne. Wnioski z ww. prac wskazują na możliwość zastosowania włókien z recyklingu opon w budownictwie, jako wzmocnienie kruchej matrycy

cementowej, pod warunkiem odpowiednio dobranej receptury betonu, odpowiedniej ilości włókien i ich jakości (jednorodność wymiarów, brak zanieczyszczeń).

Podsumowując analizę literatury w tym zakresie, włókna stalowe z recyklingu opon (RTSF) mogą być skutecznym zbrojeniem dla betonów konstrukcyjnych i niekonstrukcyjnych, o dużych korzyściach ekonomicznych i ekologicznych. Wzmocnienie przez RTSF może znacznie zmniejszyć kruche zachowanie materiałów na bazie cementu poprzez poprawę ich odporności na pękanie i charakterystykę po pęknięciu. RTSF są również stosowane w betonie w celu ograniczenia propagacji pęknięć poprzez mostkowanie pęknięć, co prowadzi do wzrostu pod względem nośności po zarysowaniu i zdolności pochłaniania energii, co jest również korzystne z punktu widzenia trwałości betonu.

W pracy [48] badano morfologię (przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM)) i topografię powierzchni włókien stalowych komercyjnych i pochodzących z recyklingu. Pofałdowania we włóknach komercyjnych mają średnią wysokość 35 nm, podczas gdy pofałdowania we włóknach stalowych pochodzących z recyklingu mają średnią wysokość 580 nm, czyli RTSF mają około 15× bardziej chropowatą powierzchnię, z głębszymi rowkami niż komercyjne włókna stalowe. Te głębsze rowki mogą zwiększać interakcję między matrycą cementową a włóknami, poprawiając właściwości wiązania na granicy faz. W porównaniu z MSF, włókna RTSF są bardziej złożone i heterogeniczne pod względem mikrostruktury. Ponadto zawartość gumy przyklejonej do powierzchni RTSF może prowadzić do spadku obciążenia wrywania, jeśli ilość gumy pokrywa znaczną obszar powierzchni włókna [40].

Według pomiarów geometrycznych średnia średnica włókien z recyklingu opon wahała się od 0,11 do 1,64 mm (prawdopodobnie ze względu na mieszanie różnych typów opon w procesie recyklingu), charakteryzujące się średnią wartością 0,27 mm. Jednak ponad jedna trzecia (35,7%) pobranych włókien wykazywało średnią średnicę od 0,22 do 0,24 mm. Średnia wartość długości wynosiła około 12 mm i prawie połowa zmierzonych długości włókien (47,1%) stwierdzono w przedziale od 9 do 15 mm [139]. Według innego źródła [39] średnica włókien z recyklingu opon jest zróżnicowana od 0,10 mm do 2,00 mm, natomiast średnia wartość wynosi 0,24 mm. Zakres, w którym uwzględniono największą liczbę wartości średnic, wynosił 0,15–0,2 mm (32,75%), a następnie klasę 0,30–0,35 mm i 0,20–0,25 mm, co stanowiło odpowiednio 27,0% i 24,6%. Jeśli chodzi o zmierzoną długość włókien z recyklingu opon to minimum i maksimum wartość wynosiła odpowiednio 3 mm i 170 mm, podczas gdy średnia wynosiła 31,4 mm. Zakres obejmujący główną liczbę włókien wynosił 26–30 mm (17,20%), a następnie klasy 21–25 mm i 31–35 mm odpowiednio z 15,91% i 14,35% [39].

W zakresie wpływu na konsystencję mieszanki betonowej, analiza literatury wskazuje, że włókna z recyklingu opon mają większy wpływ na spadek konsystencji niż taka sama ilość włókien komercyjnych. Zmniejszenie konsystencji betonu włóknistego z RTSF wykazano również we wcześniejszych pracach [39,50,51], co może być związane z właściwościami geometrycznymi włókien. Spadek konsystencji przy stosowaniu włókien do betonu jest cechą charakterystyczną i nie stanowi to problemu technologicznego, z uwagi na standardowe zastosowanie domieszek upłynniających.

5. Elementy mechaniki pękania materiałów ceramicznych

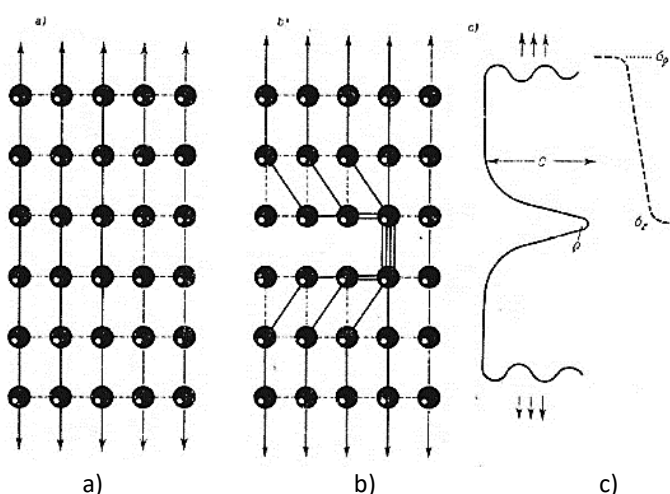
5.1 Podstawy teoretyczne mechaniki pękania

Mechanika pękania jest działem nauki o materiałach, która zajmuje się analizowaniem zachowania się pęknięcia w materiale pod wpływem różnego rodzaju obciążeń (statycznych, dynamicznych, termicznych) [144]. Rozwój mechaniki pękania związany był z licznymi katastrofami budowlanymi (m.in. zbiorników ciśnieniowych, cystern, rurociągów, mostów i innych konstrukcji betonowych), które miały miejsce w tamtym okresie, kiedy to projektowano konstrukcje z pominięciem konieczności zapewnienia ich trwałości w różnych warunkach środowiska. W ówczesnych obliczeniach wytrzymałościowych przyjmowało się, że materiały konstrukcyjne nie mają wad w postaci nieciągłości, ich właściwości są jednorodne i zgodne z danymi katalogowymi producenta. Klasyczne obliczenia projektowe, nawet przy uwzględnieniu współczynników bezpieczeństwa, mogą okazać się zawodne, gdy w materiale znajdują się ukryte wady lub nieciągłości materiału [144–147]. Podstawy mechaniki pękania opracował w 1921 r. Griffith [148], natomiast po trzydziestu latach kontynuował je Irwin [149] i Orowan [150].

W niniejszym rozdziale opisano elementy mechaniki pękania materiałów ceramicznych, jakim jest beton. Ponieważ kruchość betonu ma decydujący wpływ na bezpieczeństwo konstrukcji, istotna jest analiza jego struktury w miejscach, w których występują defekty. W kruchych kompozytach cementowych wszelkie nieciągłości materiałowe oraz różnice właściwości mechanicznych materiału decydować mogą o zniszczeniu materiału pod wpływem działania obciążeń zewnętrznych. Tak zwanymi defektami materiałowymi mogą być mikrospękania, szczeliny, pory powietrzne, rysy, nieciągłości w sieci krystalicznej itp. Wymienione defekty mogły powstać podczas produkcji lub w procesie użytkowania. Pod wpływem obciążeń w pobliżu defektów następuje koncentracja naprężeń, czyli lokalne zwielokrotnienie naprężeń, które mogą powodować gwałtowną propagację uszkodzenia, rozprzestrzenianie się defektów, prowadząc w skrajnym przypadku do zniszczenia całego elementu. Według teorii Griffitha najbardziej niebezpiecznymi koncentratorami naprężeń są drobne szczeliny o ostrych końcach, gdyż przy ich wierzchołkach występuje największa koncentracja naprężeń [144,146,148,151].

W zależności od udziału odkształceń sprężystych i plastycznych towarzyszących rozprzestrzenianiu się pęknięcia, mechanikę pęknięcia dzieli się na liniowo-sprężystą i nieliniową. Jeżeli propagacja pęknięcia odbywa się przy bardzo małym odkształceniu plastycznym w obszarze wierzchołka szczeliny, jak to ma miejsce w materiałach kruchych takich jak beton, wówczas rozpatrywana jest mechanika pęknięcia w zakresie liniowo-sprężystym (liniowo-sprężysta mechanika pęknięcia) [144,146,147,151–153]. Liniowo-sprężysta mechanika pęknięcia analizuje m.in. zagadnienia powstania mikrodefektów i rozprzestrzeniania (propagacji) uszkodzeń. Mechanika pęknięcia kompozytów cementowych analizuje zachowanie tych kruchych materiałów pod wpływem przyłożonych obciążeń, tj. opisuje powstawanie i rozwój uszkodzeń, czego nie analizują tradycyjne testy wytrzymałościowe. Parametry mechaniki pęknięcia analizują odporność na pęknięcie kompozytów cementowych, w tym określają poziom obciążeń przy których nastąpi propagacja pęknięć prowadząca do destrukcji materiału, co ma kluczowe znaczenie dla trwałości konstrukcji i bezpieczeństwa użytkowników.

W liniowej mechanice pęknięcia materiał traktujemy jako układ atomów, tworzących sieć krystalograficzną. Atomy te, nie poddane żadnym obciążeniom, znajdują się w pewnych odległościach od siebie wynikających ze spełnienia warunków równowagi. Defekty materiałowe traktujemy jako nieciągłości w budowie wewnętrznej kompozytu. Oddziaływanie obciążeń mechanicznych na materiał powoduje chwilowe zaburzenie stanu równowagi sieci krystalicznej, a na brzegach lub w wierzchołkach nieciągłości pojawiają się spiętrzenia naprężeń, które inicjują powstawanie bądź rozwój istniejących uszkodzeń [151,153]. Na Rysunku 8 przedstawiono schemat koncentracji naprężeń u wierzchołku defektu, którym może być pęknięcie lub zaburzenie struktury krystalicznej.

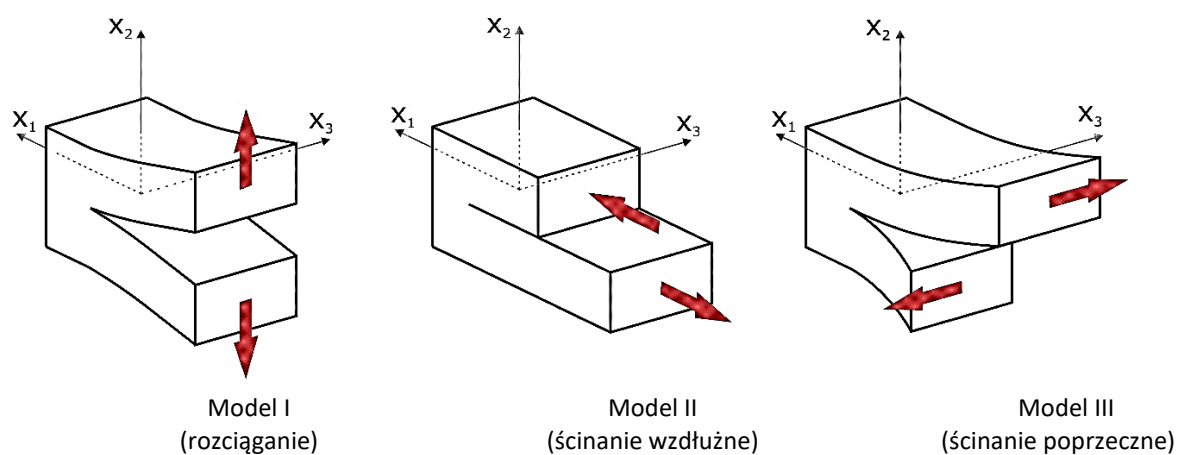


Rysunek 8. Schemat przedstawiający powstawanie naprężeń u wierzchołku defektu, a) model bez defektów, b) model z porem, trajektorie naprężeń przenoszonych przez wiązania atomowe, c) wielkość naprężeń w pobliżu czubka pęknięcia [154]

Na Rysunku 8 przedstawiono dwa modele sieci krystalicznej. Model a) przedstawia układ atomów bez żadnych defektów. Model b) przedstawia układ z obecnym defektem struktury, którym może być np. por, mikrospękanie lub inne zaburzenie struktury.

Podczas przyłożenia zewnętrznego obciążenia w przypadku b) przenoszenie obciążeń musi się odbywać po innym torze, wokół defektu. Poprzez łańcuch atomów położonych na wierzchołku defektu przenosi się kilkukrotnie większe obciążenie niż w modelu a). W ten sposób pęknięcie rozprzestrzenia się, a naprężenia koncentrują się prawie całkowicie w jednym ciągłym łańcuchu wiązań międzyatomowych. Przy wierzchołku defektu występuje zatem tzw. koncentracja naprężeń (Rysunek 8 c)) [154]. Pomimo tego, że materiały ceramiczne odznaczają się dużą wytrzymałością wiązań, to zewnętrzne obciążenia, niższe od wytrzymałości teoretycznej, mogą powodować rozprzestrzenianie się pęknięć i powodować kruche zniszczenie materiału [154].

Do analizy kruchego pęknięcia istotne jest określenie warunków, w których pęknięcia mogą się rozprzestrzeniać w całym materiale. W liniowej mechanice pęknięcia do analizy wytrzymałości konstrukcji określa się stan odkształceń wywołany obciążeniem zewnętrznym. Dla uproszczenia analizy wyróżnia się trzy modele pęknięcia, obrazujące trzy sposoby mechanicznego obciążenia materiału [144,152,155], przedstawione na Rysunku 9.

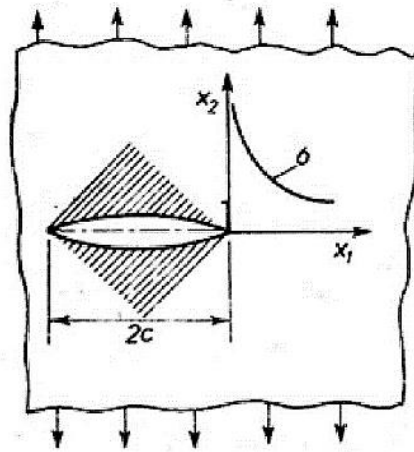


Rysunek 9. Modele pęknięcia [144,146,152,153,155]

W modelu I (rozrywanie) powierzchnie szczeliny rozchodzą się w kierunku prostopadłym do frontu szczeliny. W wyniku działania naprężeń krawędzie szczeliny ulegają rozwieraniu, co w sytuacji krytycznej może doprowadzić do rozprzestrzeniania się szczeliny [144,155]. W modelu II (ściananie wzdłużne) powierzchnie szczeliny ślizgają się po sobie w kierunku prostopadłym do frontu szczeliny. W modelu III (ściananie poprzeczne) powierzchnie szczeliny przesuwają się po sobie w kierunku równoległym do frontu szczeliny [144,152,155].

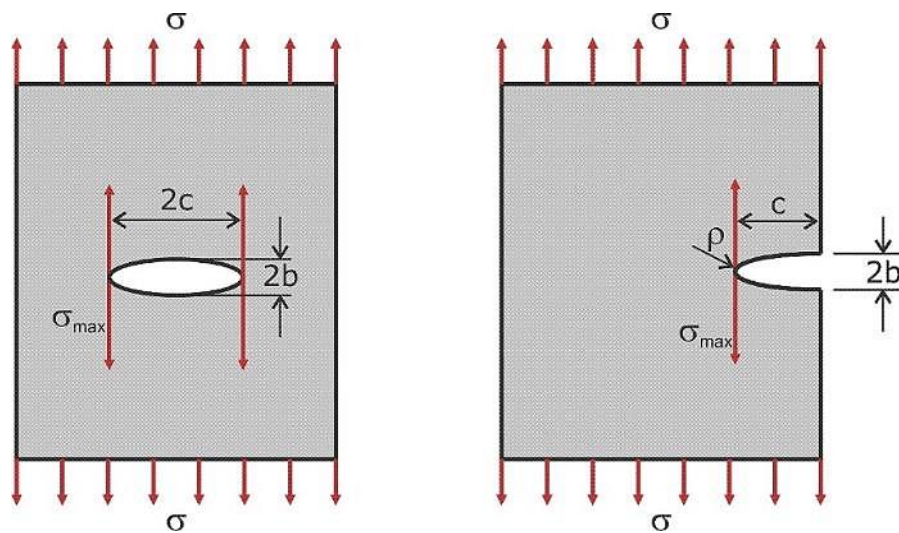
Najbardziej niebezpieczny dla pęknięcia jest model I, gdy występuje płaski stan odkształceń (PSO) przy przestrzennym stanie naprężeń. W płaskim stanie odkształceń występuje trójosiowy stan naprężeń, przy którym możliwość rozładowania naprężeń, np. poprzez odkształcenie plastyczne, jest bardzo znikome, dlatego ryzyko kruchego pęknięcia jest największe. Dlatego analiza zachowania się materiału w I modelu obciążenia jest kluczowa dla określenia dolnej granicy odporności materiału na kruche pęknięcie [144].

Według teorii Griffitha [148] w każdym rzeczywistym materiale występują defekty makroskopowe (pory, szczeliny, mikrospękania), które prowadzą do koncentracji naprężeń. Najbardziej niebezpieczne dla rozprzestrzeniania się kruchego pęknięcia są płaskie, ostrokrawędziste szczeliny u wierzchołku których występują największa koncentracja naprężeń. Model szczeliny Griffitha [148] przedstawiono na Rysunku 10.



Rysunek 10. Rozkład naprężeń przy eliptycznym pęknięciu, szczelina Griffitha [148]

Rozpatrując warunki najbardziej sprzyjające rozprzestrzenianiu się pęknięcia, na Rysunku 11 przedstawiono płaskie odkształcenie płyty, która zawiera w centrum eliptyczny model szczeliny o szerokości $2c$ i wysokości $2b$ i przykładowym naprężeniu σ [144,155].



Rysunek 11. Model rozkładu naprężeń u wierzchołka szczeliny krytycznej [152]

Na wierzchołku tej szczeliny następuje najsilniejsza koncentracja naprężeń [144,155]:

$$\sigma_{max} = \sigma \left(1 + \frac{2c}{b}\right) = \sigma \left(1 + 2\sqrt{\frac{c}{\rho}}\right) = 2\sigma \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (1)$$

gdzie:

σ_{max} – koncentracja naprężeń

$2c$ – szerokość szczeliny

$2b$ – wysokość szczeliny

σ – obciążenie rozciągające

ρ – promień krzywizny wierzchołka szczeliny

Zniszczenie materiału nastąpi gdy $\sigma_{max} = \sigma_t$

gdzie:

σ_t – wytrzymałość maksymalna (teoretyczna) materiału

Porównanie teoretycznej wytrzymałości materiału z wytrzymałościami na rozciąganie wyznaczonymi eksperymentalnie wskazują, że rzeczywista wytrzymałość jest 10-100 razy mniejsza [156].

Mnożąc obydwie strony równania (1) przez $(\pi\rho)^{1/2}$ otrzymuje się równanie na współczynnik intensywności naprężeń K_I [155]:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi c} \quad (2)$$

gdzie:

K_I – współczynnik intensywności naprężeń.

Jeżeli przy określonej tzw. krytycznej długości pęknięcia c_c i obciążenia σ_c naprężenie σ_{max} osiągnie wartość wytrzymałości teoretycznej σ_t , to współczynnik K_I osiągnie wartość krytyczną $K_I=K_{Ic}$, wtedy K_{Ic} nosi nazwę współczynnika odporności na kruche pęknięcie, lub odpornością na kruche pęknięcie. W tych warunkach w materiale rozpoczyna się kruche pęknięcie tzn. niekontrolowane rozprzestrzenianie szczeliny o wielkości krytycznej c_c [144,155].

$$K_{Ic} = \sigma_c\sqrt{\pi c_c} \quad (3)$$

gdzie:

K_{Ic} – współczynnik odporności na kruche pęknięcie (odporność na kruche pęknięcie)

Kruche pęknięcie można również rozpatrywać z energetycznego punktu widzenia. Według Griffitha [148] naprężenia wywołujące zerwanie materiału można określić także na

podstawie bilansu energetycznego, według którego pęknięcie może się rozwijać, gdy towarzyszące temu rozładowanie energii odkształcenia sprężystego zachodzi z równą lub większą szybkością od pochłaniania energii w celu utworzenia nowych powierzchni pęknięcia [154].

Równanie Griffitha można zatem zapisać w postaci [144,154,155]:

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi c_c} = \sqrt{E\gamma} \quad (4)$$

gdzie:

E – moduł sprężystości.

γ – rzeczywista energia powierzchniowa

Dla ceramicznych materiałów amorficznych i polikryształów obliczone wartości wskaźnika odporności na pęknięcie K_{Ic} są zbliżone do wartości rzeczywistych, co sugeruje, że dekohezja następuje wskutek prostego rozprzestrzeniania się pęknięć o długości krytycznej c_c . Natomiast w przypadku np. metali, kompozytów ziarnistych i włóknistych rzeczywiste wartości wskaźników odporności na pęknięcie K_{Ic} były wyższe od oczekiwanych, co wskazuje, że w tego typu materiałach występują dodatkowe zjawiska, które podnoszą odporność na pęknięcie. Te zjawiska uwzględnia tzw. efektywna energia powierzchniowa, która też jest nazywana efektywną energią pęknięcia [155].

Efektywna energia pęknięcia jest wielkością decydującą o odporności materiały na kruche pęknięcie. Energię pęknięcia podwyższają wszystkie procesy pochłaniania energii w toku pęknięcia, co przedstawia następujący wzór [155]:

$$\gamma = \gamma_{ef} = \gamma_{pl} + \gamma_r + \gamma_m + \gamma_{pf} + \gamma_i + \dots \gamma_k \quad (5)$$

gdzie:

γ – rzeczywista energia powierzchniowa

γ_{ef} – efektywna energia powierzchniowa, efektywna energia pęknięcia

γ_{pl} – energia pochłaniania na odkształcenie plastyczne

γ_r – energia pochłaniania przy rozgałęzieniu się pęknięć lub tworzeniu dodatkowych spękań

γ_{pf} – energia pochłaniania w toku przemian fazowych

γ_i – energia pochłaniania przez inne procesy towarzyszące pęknięciu, np. wyciąganie włókien lub wydłużonych ziarn z osnowy.

Stąd wzór na Współczynnik intensywności naprężeń, czyli odporność na kruche pęknięcie można zapisać również

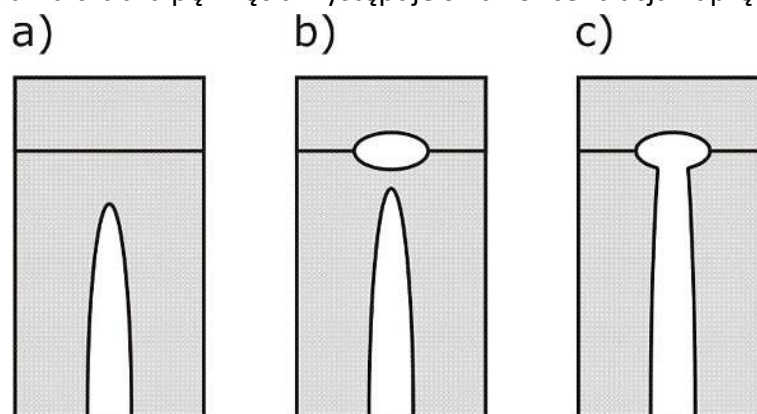
$$K_{Ic} = \sqrt{E\gamma_{ef}} \quad (6)$$

Wymienione we wzorze (6) zjawiska występują w czasie obciążania materiału i rozwoju procesu pęknięcia, jednak zwiększają one efektywną energię pęknięcia i tym samym odporność na kruche pęknięcie [155].

5.2 Mechanizmy podwyższania odporności na kruche pęknięcie kompozytów cementowych

W niniejszym rozdziale przedstawiono mechanizmy które podwyższają odporność na kruche pęknięcie kompozytów cementowych.

Główny mechanizm, któremu przypisuje się podnoszenie odporności na pęknięcie polikryształów to mechanizm Cooka-Gordona [154]. Mechanizm ten polega na hamowaniu rozprzestrzeniania się pęknięć na granicach międzyziarnowych. Dotyczy on polikryształów ale przypisać go można do innych materiałów, w tym kruchych materiałów ceramicznych, gdzie występują granice międzyziarnowe (Rysunek 12). Jak przedstawiono w Rozdziale 4.3 w pobliżu czubka pęknięcia występuje duża koncentracja naprężeń.

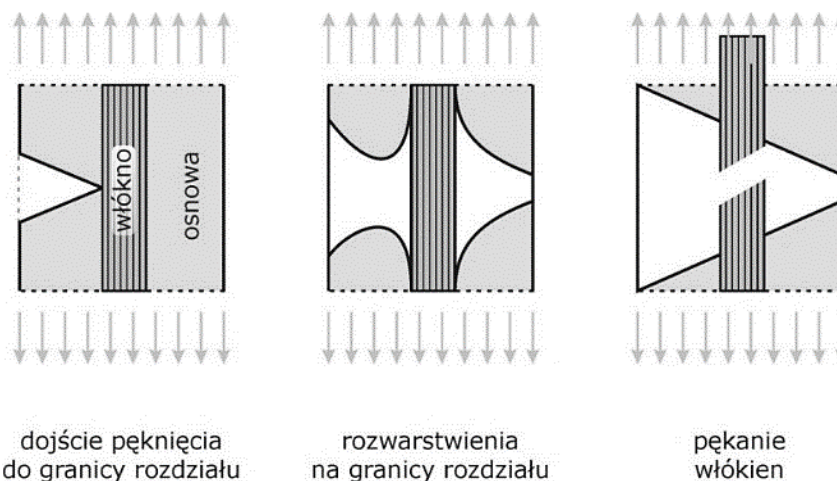


Rysunek 12. Mechanizm Cooka-Gordona hamowania rozprzestrzeniania się pęknięć na granicach międzyziarnowych, a)-c) kolejne etapy procesu [154]

Naprężenia równoległe do osi pęknięcia nie przyczyniają się bezpośrednio do jej rozprzestrzeniania się i mają zerową wartość przy czubku pęknięcia. Natomiast naprężenia prostopadłe do osi pęknięcia przyczyniają się do jego rozwarcia i dalszego rozprzestrzeniania w głąb materiału [154]. Wyznaczono, że stosunek maksymalnych naprężeń równoległych i prostopadłych do powierzchni spękania ma stałą wartość i wynosi $1/5$ [154]. Szczelina napotykać granicę międzyziarnową o wytrzymałości mniejszej od $1/5$ wytrzymałości ziarna [154], wywołuje spękanie granicy, zmianę kierunku penetracji i dodatkowe spękanie. Wszystkie te etapy wpływają na podwyższenie energii pęknięcia i tym samym odporności na pęknięcie. Gdy obszar maksymalnych naprężeń przed czubkiem pęknięcia, dociera do granicy międzyziarnowej prostopadłej do pęknięcia, występuje rozszczepienie pęknięcia. Innymi słowy, obecność w materiale granic międzyziarnowych ma istotne znaczenie dla hamowania rozprzestrzeniania się pęknięcia.

Beton zwykły jest kruchym kompozytem cementowym, który mimo osiągnięcia wysokiej wytrzymałości na ściskanie, ma niską odporność na rozciąganie, co znacznie ogranicza jego zastosowanie. W celu podwyższenia wytrzymałości na rozciąganie i tym samym odporności na kruche pękanie betonu należy odpowiednio ukształtować jego mikrostrukturę. Poza zbrojeniem strukturalnym konstrukcji tj. wykorzystaniem prętów zbrojeniowych, jedną z głównych metod jest zbrojenie betonu za pomocą rozproszonych włókien. Obecnie najczęściej stosowanymi włóknami do betonu są włókna stalowe i polimerowe [11,157].

Na Rysunku 13 przedstawiono mechanizm wzmacniania betonu włóknami. Przy dojściu pęknięcia do granicy z włóknem, następuje jego rozwarstwienie wzdłuż granicy włókno-osnowa, która ma stosunkowo niską wytrzymałość z powodu zaburzonej mikrostruktury (porowatość na granicy, fazy reakcyjne, etc.). Szczegółową budowę granicy kontaktowej włókno-zaczyn omówiono w rozdziale 4.6. Gdy na kompozyt działają obciążenia równoległe do osi włókien, wtedy rozwarstwienia na granicy rozdziału są równoległe do kierunku naprężeń, nie przechodzą więc przez cały kompozyt, gdyż mają ograniczoną długość. Następuje więc pochłonięcie energii odkształceń sprężystych bez dekohezji czyli zniszczenia materiału. Efekt ten nazywany jest mostkowaniem pęknięć przez włókna: wytrzymałe włókno spina (mostkuje) pęknięcie i zatrzymuje jego dalsze rozprzestrzenianie [155].

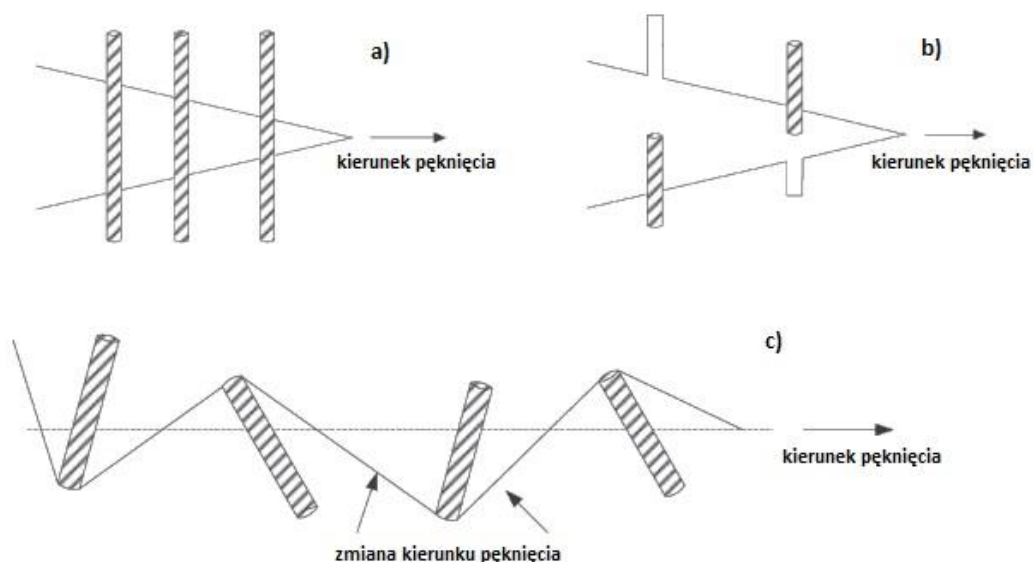


Rysunek 13. Kolejne etapy dekohezji kompozytu o osnowie wzmocnionej włóknami [155]

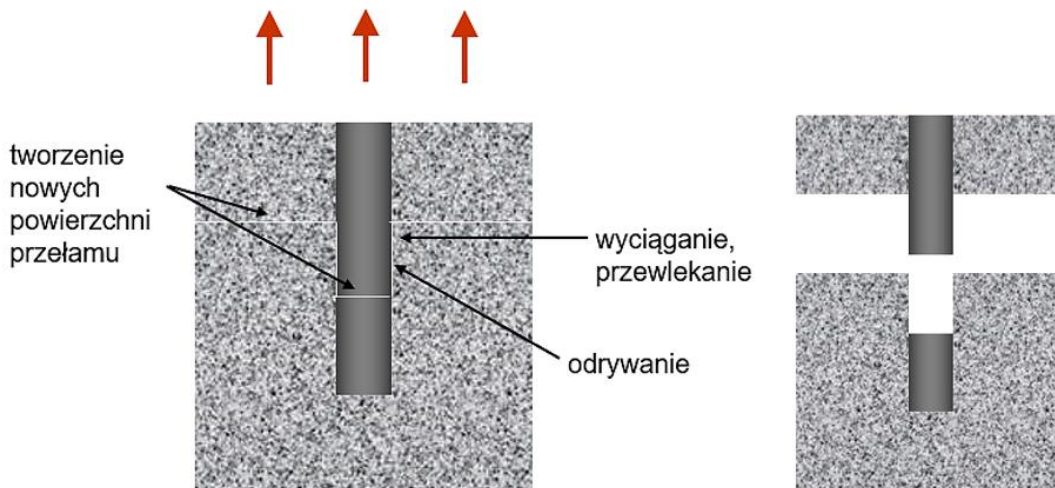
Dodatek włókien stalowych do zaczynu cementowego, zaprawy lub betonu powoduje, że kompozyty mają wytrzymałość na rozciąganie i plastyczność znacznie większą niż sama osnowa cementowa. Zgodnie z pracą [154], do zapewnienia optymalnej wytrzymałości kompozytu konieczny jest taki udział objętościowy osnowy, aby była ona fazą ciągłą i rozdzielała od siebie włókna. Podczas rozciągania kompozytu równoległe do osi zbrojących włókien, zniszczenie materiału zapoczątkowane jest w słabszej mechanicznie osnowie i rozprzestrzeniają się w kierunku poprzecznym do osi włókien. Ponieważ granice rozdziału włókno-osnowa mają mniejszą wytrzymałość niż osnowa czy

włókno, pęknięcie zmienia swój kierunek na równoległy do osi włókien. Tym samym wydłuża się droga pęknięcia, co przyczynia się do zwiększenia energii pęknięcia, poprzez zwiększenie wkładu energii potrzebnej do utworzenia nowych powierzchni swobodnych w materiale [154]. Ponadto, powstałe pęknięcia równoległe wzdłuż włókien mają mniejszą tendencję do dalszego rozprzestrzeniania się. Obydwa procesy przyczyniają się do zwiększenia odporności na kruche pęknięcie i zwiększenia ogólnej wytrzymałości kompozytu cementowego. Efekt mostkowania (spinania) pęknięcia przez włókno trwa dopóki włókno nie ulegnie zniszczeniu (dekohezji) [155].

Oprócz mostkowania pęknięć, włókna podnoszą odporność na kruche pęknięcie również poprzez inne mechanizmy, przedstawione na Rysunkach 14 i 15 [158] m.in. odrywanie i wyciąganie włókien z osnowy, zmiana kierunku pęknięcia z powodu obecności włókien, odkształcanie włókien wyciągniętych z osnowy, tworzenie nowych powierzchni. Wszystkie te procesy wpływają na pochłanianie energii podczas rozprzestrzeniania się pęknięcia i podnoszą odporność na kruche pęknięcie kompozytów cementowych.



Rysunek 14. Schemat mechanizmów podnoszenia odporności na kruche pęknięcie kompozytów cementowych c) mostkowanie pęknięć przez włókna, (d) wyciąganie włókien, (e) zmiana kierunku pęknięcia [158]



Rysunek 15. Mechanizm podwyższania odporności na pęknięcie kompozytu cementowego przez włókna
(źródło: W.Pichór, prace niepublikowane)

Wysokie wartości współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic} dla kompozytów zbrojonych włóknami (30-50 MPam^{1/2}), w porównaniu z materiałami amorficznymi (np. szkło borokrzemianowe 1,5 MPam^{1/2}), polikryształami (Al₂O₃ 3,4-5,6 MPam^{1/2}) wynikają właśnie z obecności włókien i współdziałania szeregu wspomagających się procesów, które pochłaniają energię odkształcenia sprężystego. Procesy spinania pęknięć i wyciągania występują również w kompozytach zbrojonych włóknami krótkimi (wiskersami) i płytkami, a także w kompozytach ziarnistych zawierających wydłużone ziarna [155].

6. Technologia fibrobetonów

6.1 Rodzaje włókien do betonu

Beton jest najczęściej stosowanym materiałem budowlanym na ziemi, jednak pomimo wielu zalet posiada pewne wady. Jedną z podstawowych wad zapraw i betonów jest ich kruchość, co znacznie ogranicza ich zastosowanie. Materiały kruche cechuje stosunkowo niska wytrzymałość na rozciąganie (około dziesięciokrotnie niższa niż wytrzymałość na ściskanie [159]) i niewielka odkształcalność. Kruchość betonu wzrasta wraz ze wzrostem ich wytrzymałości [160]. Jedną z metod polepszenia tych cech jest wprowadzenie zbrojenia rozproszonego w postaci krótkich włókien.

W czasach starożytnych odkryto, że dodatek do gliny i zapraw wapiennych materiałów o wydłużonej budowie wpływa korzystnie na ich właściwości. Jako pierwsze dodatki o formie włóknistej stosowano pociętą słomę i włosie końskie, aby wzmacniać tamtejsze materiały budowlane. W latach 90 XIX wieku stosowano włókna azbestowe,

które skutecznie podnosiły wytrzymałość na zginanie i ograniczały powstawanie pęknięć. Jednak po wykryciu szkodliwości azbestu na zdrowie człowieka szukano jego zamienników. W tym czasie zaczęto stosować włókna szklane, których rozwój technologii rozwinął się dopiero po wprowadzeniu powłoki ZrO_2 (szkło cyrkonowe), która powodowała ich trwałość i środowisku alkalicznym jakim jest beton (bez powłoki włókna szklane ulegają korozji). Równolegle następował rozwój technologii włókien stalowych.

Proces powstawania kompozytów cementowych z dodatkiem włókien stalowych rozpoczął się w 1874 roku przez dodanie do betonu niewielkich opiłków stalowych przez A. Bernarda z Kalifornii [161]. Pierwszy pocięty drut stalowy zastosował 1910 r. H. Porter [162]. W 1918 roku H. Alfsen opatentował zbrojenie betonu długimi włóknami stalowymi, co miało podnieść jego wytrzymałość na rozciąganie. Jako pierwszy zwrócił uwagę na wpływ chropowatości powierzchni włókien na ich przyczepność oraz ideę zakotwienia włókien [161]

Jednak dopiero w 1960 r. nastąpiła gwałtowny wzrost zainteresowania właściwościami betonu z dodatkiem pociętego drutu (drutobetonu) [162]. Badania drutobetonu prowadzone w wielu krajach wykazały, że wykazuje on istotne zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie, zginanie, uderzenie w porównaniu do betonu bez dodatków stalowych. Opracowanie pierwszej teorii drutobetonu nastąpiło w 1963 r. przez Romualda i Bastona [163], którzy na szeroką skalę opracowali teorię, że włókna stalowe utrudniają pojawienie się rys w betonie i hamują ich rozprzestrzenianie. Po tym czasie nastąpiło wdrożenie fibrobetonu w budownictwie [164].

Również w latach 60 XX wieku jako mikrobrojenie stosowano włókna polipropylenowe oraz doskonalono technologię włókien szklanych alkaloodpornych. W latach 70 XX wieku kontynuowano rozwój badań nad włóknami stalowymi, odkrywając m.in. istotny wpływ kształtu na wzrost właściwości wytrzymałościowych i rozpoczęto produkcję włókien stalowych o różnych kształtach. Równocześnie prowadzono badania nad zastosowaniem do betonu innych rodzajów włókien m.in. roślinnych (celulozowych, sizalowych, bambusowych), węglowych, aramidowych i innych polimerowych [162].

Współcześnie jako zbrojenie rozproszone do betonu stosowane są głównie włókna stalowe oraz polipropylenowe, rzadziej szklane i bazaltowe. Do betonów konstrukcyjnych, jako zbrojenie rozproszone stosuje się włókna stalowe [11] oraz polimerowe klasy II (makrowłókna) [157], które ograniczają powstawanie mikrospękań i w sposób istotny wpływają na właściwości wytrzymałościowe, w tym głównie wytrzymałość resztkową na rozciąganie przy zginaniu [165]. Natomiast pozostałe włókna, w tym polimerowe klasy I (mikrowłókna) [157] głównie ograniczają powstawanie nadmiernego skurczu betonu oraz eliminują propagację pęknięć skurczowych.

Włókna stalowe są najszerszej stosowanym zbrojeniem do betonu, mogą być one stosowane jako samodzielne zbrojenie rozproszone, lub jako zbrojenie dodatkowe w elementach z prętami stalowymi. Włókna stalowe do betonu wprowadzane są na rynek

na zgodność ze zharmonizowaną normą PN-EN 14899-1:2007 Włókna do betonu. Część 1: Włókna stalowe. Definicje, wymagania i zgodność [11]. Norma ta dzieli włókna stalowe na pięć grup, w zależności od podstawowego materiału użytego do wykonania włókien:

Grupa I: z drutu ciągnionego na zimno,

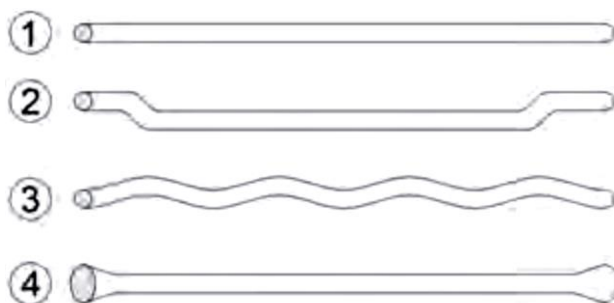
Grupa II: cięte z arkusza,

Grupa III: ze stopu,

Grupa IV: skrawane z drutu ciągnionego na zimno,

Grupa V: skrawane z bloków.

Typowe włókna stalowe wykonywane są ze stali węglowej lub jej stopów. Włókna mogą być powleczone powłoką (np. z mosiądzu lub cynkową), lub bez powłoki. Powłoka cynkowa stwarza ryzyko wydzielania wodoru, w wyniku reakcji cynku ze składnikami hydratacji cementu. Modyfikację powłoką metaliczną o większej odporności stosuje się dla włókien do specjalnych zastosowań np. w betonach pracujących w agresywnych środowiskach lub betonach ogniotrwałych [1]. Najczęściej występujące włókna to ukształtowane fragmenty drutu ciągnionego na zimno. Na Rysunku 16 przedstawiono przykładowe kształty włókien stalowych [159], występują one w różnych średnicach i długościach. Najczęściej spotykane średnice włókien stalowych to 0,55-1,00 mm, natomiast popularne długości to 50-60 mm (zdarzają się też długości 25 mm). Włókna stalowe do betonu dozuje się w ilości 10-60 kg/m³.



Rysunek 16. Przykładowe kształty włókien stalowych [159], (1) włókna proste, (2) włókna haczykowane, (3) włókna falisto-haczykowane, (4) włókna z uformowanymi zakotwieniami

Najczęściej występującymi kształtami włókien są włókna haczykowane i falisto-haczykowane o przekroju okrągłym. Włókna często sklejone są pakiety po 20-30 sztuk [166] za pomocą kleju wodorozpuszczalnego, w celu lepszego dozowania włókien do mieszanki betonowej. Klej rozpuszcza się w mieszance betonowej, a włókna rozprowadzane są równomiernie w mieszance. Na Fot. 3-4 przedstawiono przykładowe zdjęcia włókien stalowych. W zakresie kształtu wyróżniamy następujące parametry włókien: l – długość włókien, l_d – długość rozwinięta włókien, d – średnica zastępcza włókien, λ - współczynnik kształtu włókien ($\lambda=l/d$).



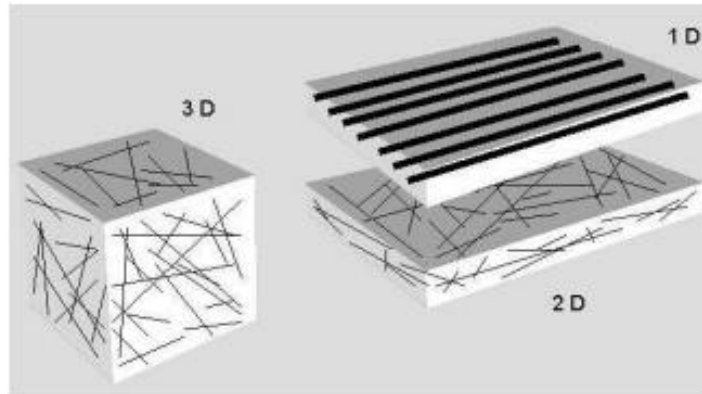
Fot 3. Przykłady włókien stalowych [167]



Fot 4. Przykłady włókien stalowych [168]

Kształt włókien wpływa istotnie na skuteczność zbrojenia betonu, im bardziej rozwinięty kształt tym lepsze mechaniczne zakotwienie w zaczynie cementowym. Oprócz kształtu, na efektywność zbrojenia betonu włóknami wpływa: ilość włókien, jednorodne rozmieszczenie włókien w matrycy cementowej, przyczepność włókien do matrycy cementowej [1].

Istotne jest, aby włókna były równomiernie rozmieszczone w betonie. Na Rysunku 17 przedstawiono modele rozmieszczenia włókien z betonie [1,166]. Model 1D (prosty układ zlinearyzowany [166]) nie jest korzystny dla kompozytów cementowych z uwagi na ich anizotropię i złożony stan naprężeń w jakim zazwyczaj pracują. Układ 2D (włókna rozmieszczone przypadkowo w płaszczyźnie) będzie miał zastosowanie w przypadku elementów cienkościennych, otrzymywanych np. metoda natryskową. Najbardziej korzystny i najbardziej powszechny jest układ 3D (włókna rozmieszczone przypadkowo w objętości), w którym rozmieszczone losowo i równomiernie włókna pełnią rolę skutecznego zbrojenia przy złożonym stanie naprężeń [1].



Rysunek 17. Modele rozmieszczenia włókien w kompozycie 1D, 2D, 3D [1,166]

Główną rolą włókien stalowych jest wzmocnienie matrycy cementowej, przeciwdziałanie kruchości betonu i wzrost jego wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Zaletą włókien stalowych jest również ich wysoka odporność na działanie podwyższonej temperatury i ognia. Dodatek włókien wpływa również na właściwości mieszanki betonowej i spadek jej konsystencji. Im więcej włókien w betonie tym większy spadek konsystencji. Ten mankament można ograniczyć stosując domieszki upłynniające. Ważne jest również jednorodne rozmieszczenie włókien w betonie i ograniczenie powstawania skupisk włókien, czyli tzw. jeży, które są zjawiskiem niepożądanym. Skupiska włókien w jednym punkcie (tzw. jeże) powodują że w innych miejscach tych włókien brakuje, tworzą się puste przestrzenie co obniża skuteczność zbrojenia betonów przez włókna, a proces przenoszenia obciążeń przez włókna będzie ograniczony [1].

Włókna stalowe do betonu, wprowadzane są do obrotu na zgodność z normą [11] według systemu zgodności:

- 1 – do stosowania konstrukcyjnego w betonie, zaprawie lub zaczynie, lub
- 3 – do innych zastosowań w betonie, zaprawie lub zaczynie.

Producent włókien stalowych powinien deklarować następujące parametry [11]:

- grupę, ze względu na sposób wytwarzania,
- rodzaj powłoki (jeśli dotyczy),
- kształt,
- wymiary włókien (długość, długość rozwiniętą, średnicę, średnicę zastępczą),
- wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości przy rozciąganiu włókien (zwykle wykonuje się to dla drutu, z którego wytwarza się włókno),
- wpływ na konsystencję (konsystencję mieszanki betonowej wzorcowej i mieszanki betonowej z określoną ilością włókien),
- wpływ na wytrzymałość (producent powinien deklarować zawartość włókien w kg/m^3 przy której osiąga się wytrzymałość resztkową na zginanie równą 1,5 MPa przy rozwarciu rysy CMOD równym 0,5 mm, i wytrzymałość resztkową na zginanie równą 1 MPa przy rozwarciu rysy CMOD równym 3,5 mm),

- uwalnianie substancji niebezpiecznych (włókna nie powinny uwalniać żadnych niebezpiecznych substancji, określa się to np. na podstawie badań składu chemicznego włókien).

Zawartość włókien podaje się w recepturze w kg/m^3 , podobnie jak inne składniki betonu. Włókien nie uwzględnia się w równaniu szczelności [169] przy projektowaniu mieszanki betonowej. W publikacjach naukowych ilość włókien podawana jest również w procentach objętości, która wyznacza się za pomocą następującego wzoru [166]:

$$V_f = \frac{W_f}{\sigma_f} \cdot 100 \quad (7)$$

gdzie:

V_f - nominalna zawartość włókien stalowych w fibrobetonie [%],

W_f - zawartość włókien w jednostkach masy w 1m^3 [kg],

σ_f - gęstość materiału włókien w kg/m^3 .

Przykładowo, $V_f=0,005$ czyli 0,5% odpowiada dozowaniu ok. 39 kg włókien stalowych do 1m^3 mieszanki betonowej (dla gęstości stali 7800kg/m^3) [166].

Włókna polimerowe produkowane są na zgodność z normą zharmonizowaną PN-EN 14899-2:2007 Włókna do betonu. Część 1: Włókna polimerowe. Definicje, wymagania i zgodność [157]. Norma ta dzieli włókna polimerowe na dwie klasy:

Klasa I – mikrowłókna polimerowe o średnicy $< 0,3\text{ mm}$,

la – pojedyncze,

lb – fibrylowane,

Klasa II – makrowłókna polimerowe o średnicy $> 0,3\text{ mm}$.

Włókna klasy I stosowane są w celu redukcji skurczu i rys skurczonych betonu we wczesnym etapie wiązania. Natomiast włókna klasy II pełnią rolę zbrojenia rozproszonego w betonach konstrukcyjnych tzn. wpływają na nośność oraz również ograniczają skurcz.

Włókna polimerowe, według definicji normy PN-EN 14889-2 [157], to proste lub ukształtowane fragmenty wytaczanego kierunkowo i ciętego materiału, odpowiednie do jednorodnego rozmieszczenia w mieszance betonowej lub zaprawie. Natomiast definicja polimeru wg [157], to materiał polimerowy jak poliolefiny, np. polipropylen lub polietylen, poliestery, nylon, polialkohol winylowy, poliakryl, aramid i ich mieszaniny.

Na Fot. 5-8 przedstawiono wygląd przykładowych włókien polimerowych.



Fot 5. Przykłady mikrowłókien polimerowych pojedyncze klasy Ia [162,170]



Fot 6. Przykłady mikrowłókien polimerowych fibrylowane klasy Ib [162,170]



Fot 7. Przykłady makrowłókien polimerowych klasy II [162]



Fot 8. Przykłady makrowłókien polimerowych klasy II [170,171]

Włókna polipropylenowe wytwarza się metodą wyciągania przędzy (włókna o przekroju okrągłym), gdzie otrzymuje się włókna elementarne o długości ok. 6-38 mm i średnicy zazwyczaj poniżej 30 μm . Inną metoda to cięcia folii, gdzie otrzymuje się włókna fibrylowane, o przekroju prostokątnym o szerokości do ok. 600 μm , a gdzie grubość włókien jest grubością folii (ok. 15-100 μm). Arkusz folii polipropylenowych tnę się na taśmy, które są łączone (wzdłuż ich długości lub krzyżowo, otrzymując siateczkę) [1,162].

Włókna polipropylenowe mają wysoką odporność chemiczną (zwłaszcza na wysokie pH) oraz zerową nasiąkliwość [1]. Słaba zwilżalność przez wodę powoduje obniżenie przyczepności do zaczynu cementowego, co stanowi ich wadę. Jednak przyczepność można zwiększyć np. przez profilowany kształt lub specjalną preparację chemiczną czy mechaniczne nadanie szorstkości powierzchni [1], przez co skutecznie mogą pełnić rolę mikrobrojenia rozproszonego. Włókna fibrylowane w postaci siateczek tworzą w matrycy cementowej rodzaj sieci, która blokuje rozprzestrzenianie mikrospęknięć.

Mikrowłókna polimerowe dozuje się do betonu w ilości ok. 0,1-0,3% (0,9-2,7 kg/m^3) [1,162], natomiast makrowłókna w ilości ok. 3-6% [1]. Ich głównym celem jest ograniczenie spękań skurczowych oraz w przypadku makrowłókien, wzmocnienie kruchej matrycy cementowej poprzez wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu. Włókna polimerowe oraz włókna z innych tworzyw nie są odporne na podwyższoną temperaturę i ogień, co może stanowić ich zaletę, z powodu tworzenia pustych przestrzeni po ich wypaleniu przez ogień, dając tym samym przestrzeń do ewakuacji pary wodnej z odwadnianych w czasie pożaru produktów hydratacji cementu [1]. Stąd często do betonów narażonych na działania ognia, do włókien stalowych dodaje się też włókna polimerowe.

Włókna polimerowe i stalowe do betonu, wprowadzane są do obrotu na zgodność z normą [157] według systemu zgodności:

- 1 – do stosowania konstrukcyjnego w betonie, zaprawie lub zaczynie, lub
- 3 – do innych zastosowań w betonie, zaprawie lub zaczynie.

Producent włókien stalowych powinien deklarować następujące parametry [157]:

- rodzaj polimeru,
- kształt (rodzaj i wielkość wiązki, jeżeli dotyczy),
- obróbka powierzchniowa lub powłokowa (jeżeli dotyczy),
- wymiary włókien (długość, długość rozwiniętą, średnicę, średnicę zastępczą),
- gęstość liniową (w przypadku mikrowłókien klasy I),
- wytrzymałość na zrywanie (w przypadku mikrowłókien klasy I),
- wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości przy rozciąganiu (zazwyczaj wykonuje się to dla przędzy polimerowej przed pocięciem na włókna),
- temperatura topnienia i temperatura zapłonu (jeżeli dotyczy),
- wpływ na konsystencję (konsystencję mieszanki betonowej wzorcowej i mieszanki betonowej z określoną ilością włókien),

- wpływ na wytrzymałość (producent powinien deklarować zawartość włókien w kg/m^3 przy której osiąga się wytrzymałość resztkową na zginanie równą 1,5 MPa przy rozwarciu rysy CMOD równym 0,5 mm, i wytrzymałość resztkową na zginanie równą 1 MPa przy rozwarciu rysy CMOD równym 3,5 mm).
- uwalnianie substancji niebezpiecznych (włókna nie powinny uwalniać żadnych niebezpiecznych substancji, określa się to np. na podstawie badań składu chemicznego włókien).

Wzrost zainteresowania **włóknami szklanymi** nastąpił po wprowadzeniu tzw. włókien szklanych alkalooodpornych (AR), czyli zawierających w składzie ZrO_2 . Zwykłe włókna szklane, bez dodatku cyrkonu nie były trwałe w środowisku alkalicznym (w zaczynie cementowym) i ulegały korozji. Obraz włókien szklanych przedstawiono na Fot. 9.



Fot 9. Przykład włókien szklanych [172]

Włókna szklane do betonu produkowane są głównie metodą wyciągania lub niekiedy metodami wirowo-dyszowymi. W metodzie wyciągania, włókna ciągłe w formie wstążki (rovingu) cięte są na wymagana długość. Typowe włókna szklane mają przekrój okrągły a średnicę w przedziale 5-20 μm , a długość zwykle od kilku do ok 50 mm [1].

Głównym kierunkiem zastosowania włókien szklanych jest beton GRC (ang. Glass Reinforced Concrete) i produkcja prefabrykatów GRC [173], np. cienkościennych płyt elewacyjnych, elementów architektonicznych czy płyt i elementów drogowych.

W ostatnim czasie coraz popularniejsze stają się cięte **włókna bazaltowe**. Włókna bazaltowe są produktem naturalnym, nie są toksyczne, nie wydzielają żadnych związków do atmosfery, nie są szkodliwe dla człowieka. Można je stosować jako zbrojenie do zaprawy i betonów, kompozytów polimerowo-cementowych, zapraw, klejów i zaczynów. Włókna bazaltowe mają średnice w zakresie 10-25 μm i długości w zależności od cięcia w zakresie 10-60 mm. Na Fot. 10 przedstawiono przykład włókien bazaltowych.



Fot 10. Przykład włókien bazaltowych [174]

Włókna bazaltowe często powlekane są warstwą polimeru. Uzyskiwane są w wyniku przetopienia skały bazaltowej w temperaturze ok. 1400 °C [175]. Do zalet włókien bazaltowych należą: chropowata powierzchnia, odporność na korozję oraz wysoką i niską temperaturę (od -26 do +75°C), odporność na środowiska kwaśne, zasadowe, w tym alkalia, wysoka wytrzymałość mechaniczna, łatwość recyklingu [175].

Gotowe włókna można dodawać do mieszanki betonowej wprost do betonowozu, ale mogą być one cięte bezpośrednio przed wprowadzeniem do betonowozu. Można również zastosować specjalne metody mieszania lub wykonania betonu z włóknami, np. technika betonu natryskowego, gdzie włókna dozują się poprzez bęben zasilający, a beton z włóknami natryskuje bezpośrednio z dyszy [1]. W wytwórniach betonu stosowane są również specjalne urządzenia dozujące tzw. wstrzeliwarki do włókien. W Tabeli 9 przedstawiono właściwości włókien stosowanych do betonów i zapraw [1,162,167]

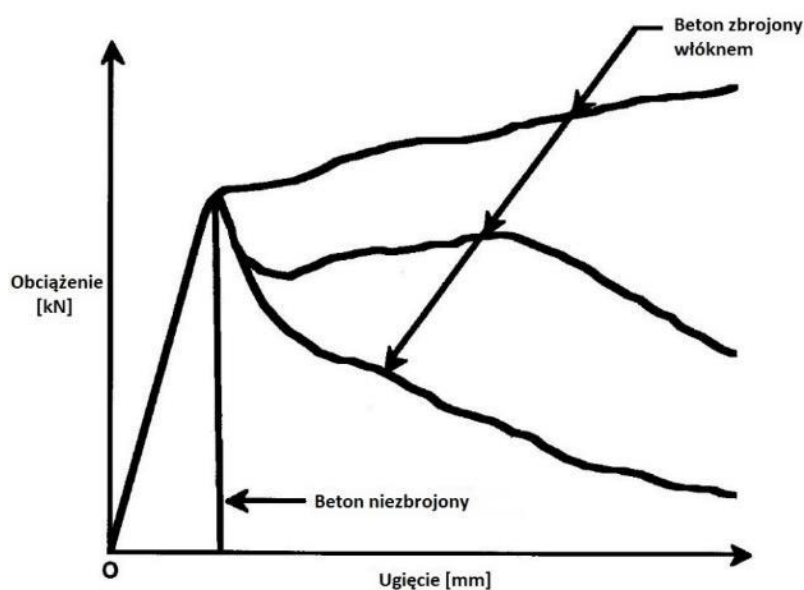
Tabela 9. Właściwości włókien do betonu i zaprawy oraz zaczynu cementowego [1,162,167]

Rodzaj włókna	Średnica [mm]	Gęstość [g/cm ³]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]	Wydłużenie przy zerwaniu [%]
Stalowe	0,1-1	7,8	500-2000	210	0,5-3,5
Makrowłókna polipropylenowe (PP)	0,6-1	0,91-0,97	500-750	5-9,5	15-25
Mikrowłókna polipropylenowe (PP)	0,010-0,20	0,90-0,91	200-600 (1100 N siła zrywająca)	-	7,1
Bazaltowe	0,01-0,025	1,9-2,6	160 N siła zrywająca	-	1,2
Szklane	0,010-0,20	2,6	1500-3000	70-80	2,0-3,5
Węglowe	8-12	1,7	2500-4000	230-380	0,5-1,5
Aramidowe	10-12	1,44	2300-3500	63-120	2-4,5
Poliakrylonitrylowe (PAN)	0,01-0,1	1,18	400-1000	14-20	3-10
Winyłowe (PVA)	0,01-0,03	1,30	1000-1500	35-50	2-5
Azbestowe	0,0001	2,6	3500	160	2-3
Zaczyn cementowy	-	1,8-2,2	3-6	10-40	0,02

6.2 Właściwości fibrobetonów

Istnieje szereg publikacji z zakresu badań i analizy właściwości betonów z dodatkiem włókien. Włókna do zastosowań konstrukcyjnych w betonie [11,157,176] poddanych oddziaływaniom zewnętrznym zmieniają mechanizm zniszczenia betonu i polepszają jego cechy wytrzymałościowe i mechaniczne, [162,163,166,177–180], również wytrzymałość na zginanie [181–185], ścinanie [181,186,187], odporność na uderzenie [188,189] oraz trwałość konstrukcji betonowych [190–192].

Główną różnicę pomiędzy betonem zwykłym, a betonem zbrojonym włóknami przedstawiono na Rysunku 18, gdzie pokazano charakterystykę betonów podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu, gdzie rejestrowana jest zależność obciążenia od ugięcia (lub rozwarcia rysy CMOD).



Rysunek 18. Krzywa obciążenie-ugięcie podczas rozciągania betonów niezbrojonych i fibrobetonów [1,4]

Beton zwykły, po osiągnięciu krytycznych naprężeń zginających pęka, z powodu kruchej natury matrycy cementowej, w której następuje szybka propagacja pęknięć. Natomiast betony z włóknami po pierwszym pęknięciu matrycy cementowej nadal przenoszą obciążenia, niekiedy znacznie przekraczające maksymalną wytrzymałość przy pierwszym pęknięciu. Dodatek włókien do betonu powoduje, że po wystąpieniu pęknięcia lub zarysowania nie ulega dekohezji, lecz dalszemu odkształcaniu, nadal utrzymując swoją nośność. Naprężenia zostają przejęte przez włókna. Włókna, poprzez swoją dobrą przyczepność do matrycy cementowej i odpowiedni kształt zapewniający dobre zakotwienie w zaczynie cementowym. A poprzez efekt mostkowania pęknięć powodują hamowanie rozprzestrzeniania się pęknięć i ograniczają powstawanie nowych. Podsumowując, zbrojenie matrycy cementowej przez włókna odbywa się poprzez redukcję wszelkiego rodzaju zarysowań matrycy cementowej oraz polepszenie

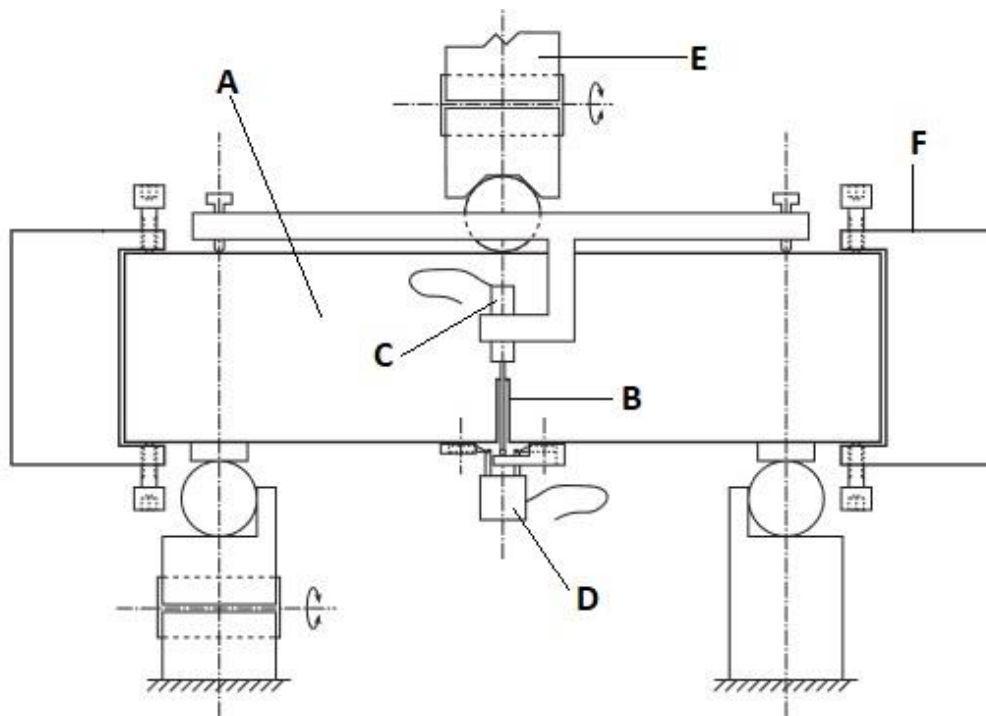
właściwości wytrzymałościowych przez współdział włókien w przenoszeniu naprężeń [7,8,162].

6.3 Wybrana metodyka badań fibrobetonów

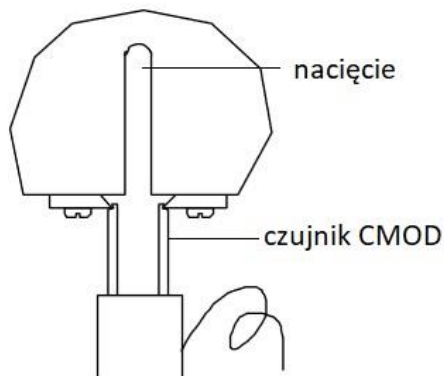
Główny efekt zbrojenia betonu włóknami polega na hamowaniu powstawania i propagacji rys w betonie. Ocenę efektywności zbrojenia uzyskuje się na podstawie badań procesów pękania betonu z włóknami pod działaniem naprężeń rozciągających. Podczas rozciągania próbek fibrobetonów obserwuje się zniszczenie kohezyjne w odróżnieniu od kruchego zniszczenia [193]. Po osiągnięciu maksymalnej siły rozciągającej i powstaniu rys próbka fibrobetonu zachowuje zdolność do dalszego przenoszenia obciążeń i zachowuje swoją nośność.

Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu

Jedną z najważniejszych i charakterystycznych metod badawczych w zakresie mechaniki pękania betonów z włóknami jest próba stabilnego trójpunktowego zginania belek o przekroju prostokątnym z nacięciem (tzw. karbem). Na tej metodzie opierała się praca z teorii mechaniki pękania RILEM [194]. Obecnie ten test wykonujemy według metody badawczej PN-EN 14651 [165]. Betonowe próbki badawcze w tej metodzie mają wymiar 150×150× (550-700) mm. Nacięcie o szerokości 4 mm i wysokości 25 mm wykonuje się na środku belki od strony bocznej. Stalowe podpory mają okrągły przekrój o średnicy 30 mm, rozstaw podpór wynosi 500 mm. Układ badawczy przedstawiono na Rysunkach 19-20.



Rysunek 19. Schemat układu trójpunktowego zginania belki z karbem: A-próbka betonowa o wymiarach 150×150×(550-700)mm, B- nacięcie, C-czujnik ugięcia, D-czujnik rozwarcia rysy (CMOD), E- obciążenie, F- ramy stalowe [195]



Rysunek 20. Schemat czujnika CMOD [195]

W badaniu tym, w zależności od wyposażenia maszyny wytrzymałościowej, rejestruje się rozwarcie rysy (CMOD), lub ugięcie δ .

Zależność pomiędzy rozwarciem rysy a ugięciem przedstawia następujące równanie:

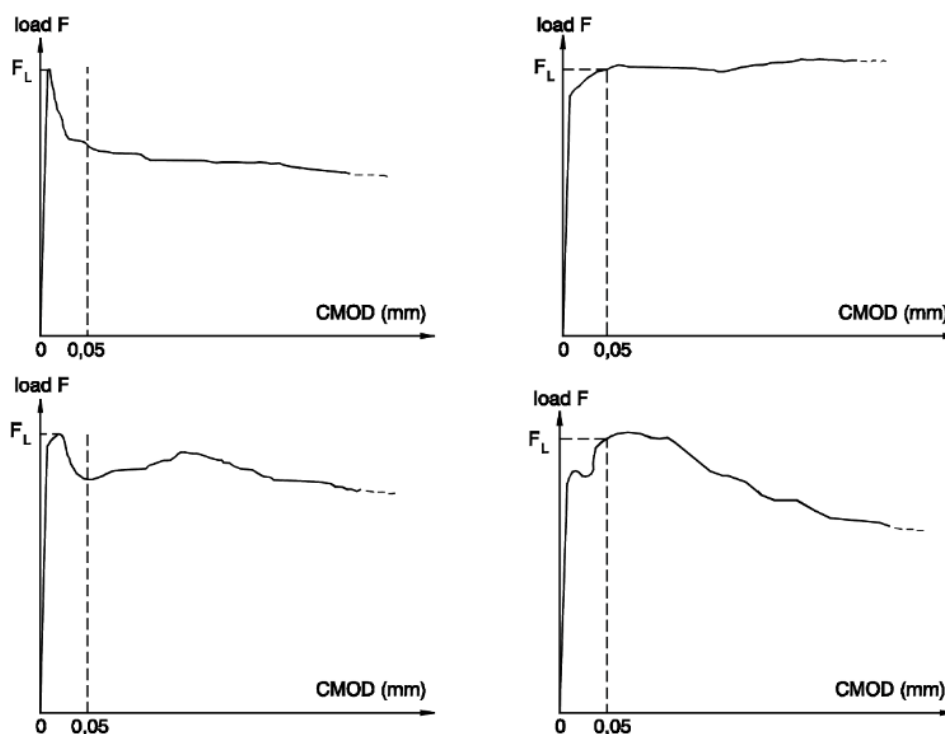
$$\delta = (0,85\text{CMOD} + 0,04) \quad (8)$$

gdzie:

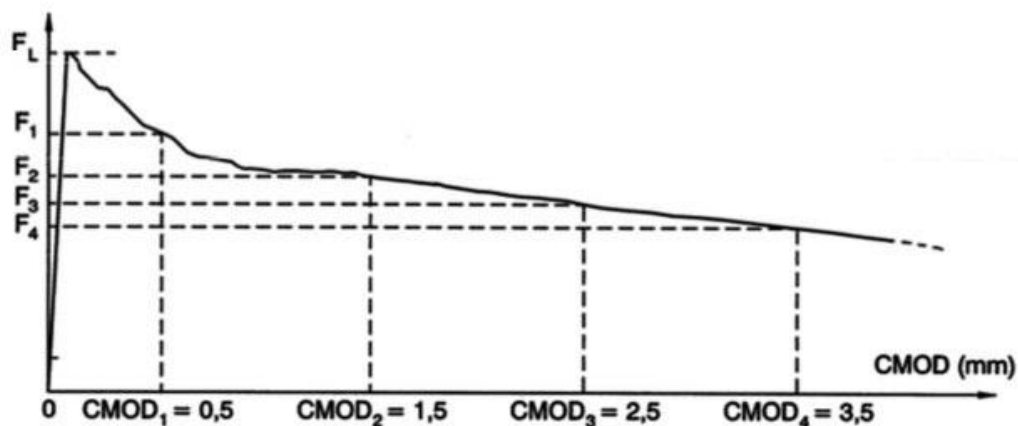
δ – ugięcie [mm]

CMOD – rozwarcie szczeliny/rysy [mm].

W badaniu tym rejestruje się zależność obciążenia od rozwarcia rysy (lub ugięcia). Badanie prowadzi się do osiągnięcia $CMOD = 4$ mm (lub więcej, jeśli jest wymagane). W metodzie tej określa się granicę proporcjonalności betonu (LOP-limit of proportionality), którą wyznacza się z maksymalnego obciążenia w zakresie rozwarcia rysy $CMOD$ od 0 do wartości 0,05 mm [165]. A następnie wyznacza się wytrzymałości resztkowe na rozciąganie przy zginaniu dla określonych wartości rozwarcia rysy: $CMOD = 0,5; 1,5; 2,5; 3,5$, co pokazano na Rysunku 22. Wynikiem badania jest wykres obciążenie/rozwarcie rysy (lub ugięcie). Sposób wyznaczania granicy proporcjonalności betonu pokazano na Rysunku 21.



Rysunek 21. Sposób wyznaczania granicy proporcjonalności betonu LOP [165]



Rysunek 22. Zależność obciążenie-rozwarcie rysy $CMOD$ [165]

Mając wyznaczone obciążenia dla granicy proporcjonalności betonu (F_L), oraz dla konkretnych wartości rozwarcia rysy (F_j), można wyznaczyć granicę proporcjonalności betonu (LOP) oraz wytrzymałości resztkowe na rozciąganie przy zginaniu z następującego równania:

$$f_R = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \quad (9)$$

gdzie :

f_R – wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu dla określonej wartości rozwarcia rysy CMOD [MPa]

F_j – maksymalna siła dla określonej wartości rozwarcia rysy [N]

l – rozstaw podpór, $l=500$ [mm]

b – szerokość próbki, $b=150$ [mm]

h_{sp} – wysokość próbki w miejscu nacięcia, $h_{sp}=125$ [mm].

Nacięcie w niniejszym badaniu stanowi miejsce propagacji pęknięcia matrycy cementowej. Po pęknięciu kruchego betonu w zainicjowanym miejscu, następuje dalsze przenoszenie obciążeń przez włókna zamocowane w matrycy cementowej. Stwierdzono, że karb musi być na tyle wąski aby działał jak pęknięcie, a co za tym idzie jego szerokość musi być znacznie mniejsza niż wysokość próbki [195].

Praca zniszczenia

Na podstawie wykresu obciążenie-rozwarcie rysy (CMOD), lub obciążenie-ugięcie można wyznaczyć szereg parametrów charakteryzujących fibrobetony i ich zachowanie w warunkach pęknięcia. Można na podstawie ww. wykresów porównywać ze sobą różnego rodzaju włókna i wpływ ich właściwości (rodzaj materiału, kształt, moduł sprężystości) na efektywność zbrojenia betonu.

Jednym z parametrów charakteryzujących fibrobetony jest energia pęknięcia kompozytu G_f . Podczas badania kontrolowanego przemieszczenia pod obciążeniem rozciągającym, beton wykazuje stabilną nieliniową odpowiedź na pęknięcie. Przyczyną nieliniowości jest rozwój strefy procesu pęknięcia przed wierzchołkiem szczeliny. W quasi kruchym materiale, jakim jest beton, energia rozpraszana w celu utworzenia procesu pęknięcia przed wierzchołkiem pęknięcia, nazywana jest energią pęknięcia. Energia pęknięcia jest jednym z najbardziej użytecznych parametrów w analizie spękanej struktury betonu [196]. Energia pęknięcia jest zdefiniowana jako ilość energii potrzebnej do wytworzenia pęknięć potrzebnych do zniszczenia materiału [194]. Energię pęknięcia G_F oblicza się jako całkowite zużycie energii podzielone przez pole przekroju poprzecznego próbki nad

nacięciem. Całkowitą energię obliczono jako sumę pola całkowitego pod krzywą obciążenia-ugięcie i pracę wykonaną przez ciężar własny próbki, stosując następujące wzory [194,195,197–199]:

$$G_F = \frac{W_F + mg\delta_0}{bh_{sp}} \quad (10)$$

lub:

$$G_F = \frac{W_F}{bh_{sp}} \quad (11)$$

gdzie:

G_F – energia pęknięcia [N/m]

W_F – praca zniszczenia [N·m]

m – masa próbki [g]

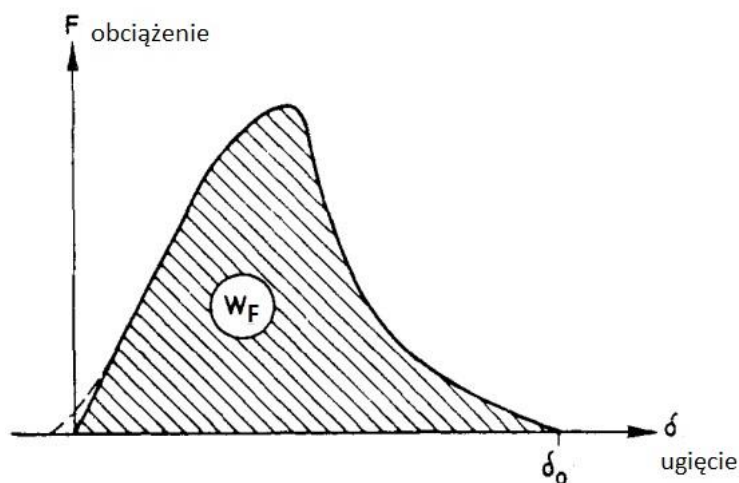
g – przyspieszenie ziemskie, 9,81 [m/s²]

δ_0 – ugięcie w momencie zniszczenia próbki [mm]

b – szerokość próbki [mm]

h_{sp} – wysokość próbki w miejscu nacięcia [mm]

Pracę zniszczenia W_F określa się jako całkowite pole powierzchni pod wykresem obciążenie-ugięcie, od momentu rozpoczęcia zginania do momentu zniszczenia próbki. Na Rysunku 23 przedstawiono obszar pod wykresem, stanowiący pracę zniszczenia [194,195].



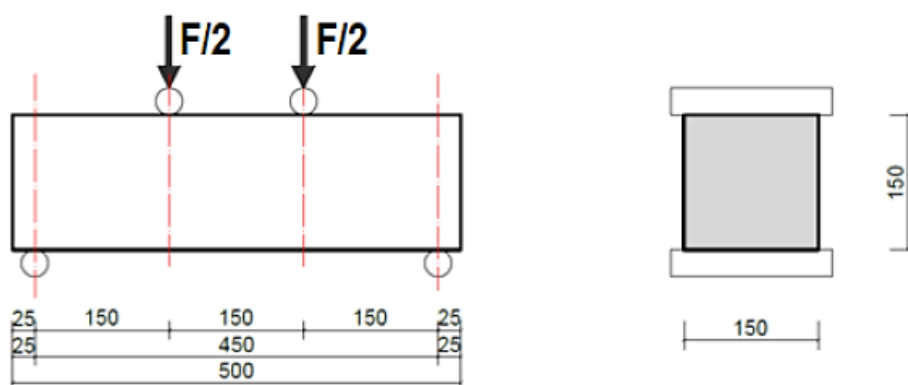
Rysunek 23. Sposób wyznaczania pracy zniszczenia [194,195]

Zdaniem autora energia pęknięcia, określa kontrolowany rozrost szczeliny w czasie pęknięcia wywołanego przykładaną siłą w przypadku pęknięcia czysto kruchego. W przypadku pęknięcia kompozytów cementowych z włóknami, na proces po pierwszym pęknięciu matrycy cementowej składa się kilka elementów, m.in. wywlekanie włókna po

jego oderwaniu od matrycy (tarcie włókna, jego odkształcenie plastyczne), na co jest zużytkowana energia. Nie jest to więc proces samego pęknięcia matrycy cementowej, gdyż na wzrost ilości pochłanianej energii w czasie niszczenia mają wpływ inne mechanizmy. Natomiast w procesie pęknięcia fibrobetonów zawsze wykonywana jest praca zniszczenia, która została określona jako pole powierzchni pod krzywą. Wyznaczając pracę zniszczenia można w prosty sposób porównać włókna lub receptury fibrobetonowe ze sobą.

Wytrzymałość równoważna

Do określenia odporności fibrobetonu na pęknięcie stosuje się również metodę wytrzymałości równoważnej na rozciąganie przy zginaniu [200]. Metoda ta różni się od metody wytrzymałości resztkowej [165] tym, że przy wytrzymałości resztkowej bada się trójpunktowe zginanie belki z karbem (nacięciem), natomiast przy wytrzymałości równoważnej bada się czteropunktowe zginanie belki i określa pole powierzchni pod wykresem do ugięcia wynoszącego 1/150 rozpiętości belki. Wytrzymałość równoważną często określa się w celu wymiarowania grubości posadzek przemysłowych na podłożu gruntowym. Schemat układu badawczego do badania wytrzymałości równoważnej przedstawiono na Rysunku 24.



Rysunek 24. Schemat układu badania wytrzymałości równoważnej [193,200,201]

Badanie wytrzymałości równoważnej polega na czteropunktowym zginaniu belki o przekroju 150x150 mm i długości 500 mm. Podczas badania dwie siły działają na belkę w równej odległości od siebie i równej odległości od podpór (1/3 rozpiętości belki to odległość między siłami, a także odległość między siłą a podporą). Na odcinku między siłami działa moment zginający. Podczas zginania rejestruje się siłę oraz ugięcie belki, miernik ugięcia zamocowany jest w linii wyjściowego położenia osi obojętnej belki [193]. Wytrzymałość równoważną oblicza się ze wzoru:

$$f_{eq} = \frac{T_b l}{\sigma_{tb} b h^2} \quad (12)$$

gdzie :

f_{eq} – wytrzymałość równoważna na rozciąganie przy zginaniu [MPa],

T_b – praca zniszczenia do ugięcia σ_{tb} , pole powierzchni pod wykresem siła-ugięcie do wartości ugięcia σ_{tb} [J], [N·m],

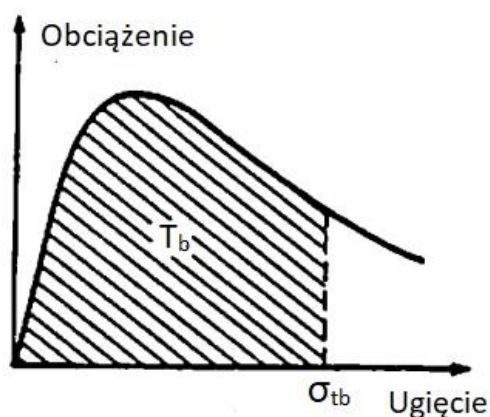
l – rozstaw podpór [mm],

σ_{tb} – ugięcie belki równe 1/150 rozpiętości między podporami (dla l -rozpiętość między podporami = 450, σ_{tb} = 3 mm), [mm],

b – szerokość próbki, $b=150$ [mm]

h – wysokość próbki, $h=150$ [mm].

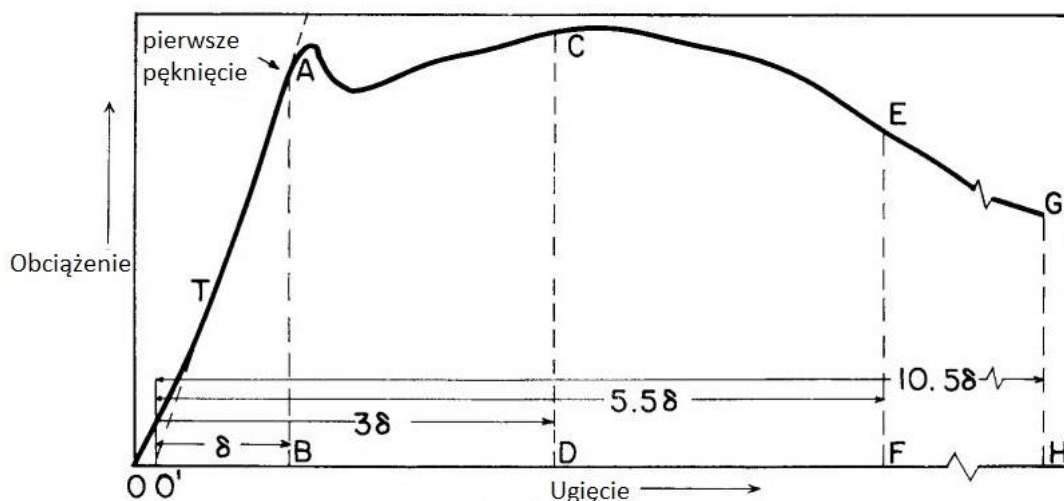
Schemat wyznaczania pracy zniszczenia przy wytrzymałości równoważnej T_b przedstawiono na Rysunku 25.



Rysunek 25. Sposób wyznaczania pracy zniszczenia do ugięcia równego 1/150 rozpiętości belki [200]

Wskaźniki odporności na pękanie I_5, I_{10}, I_{20}

Wskaźniki odporności na pękanie określone są w celu oceny fibrobetonu poddanego trójpunktowemu zginaniu. Wskaźniki odporności na pękanie charakteryzują zachowanie kompozytu tuż po pęknięciu, pod obciążeniem statycznym zginającym. Określone są poprzez podzielenie określonego obszaru pod krzywą obciążenie ugięcie przez obszar w którym wystąpiło pierwsze pęknięcie kompozytu. Schemat wyznaczania wskaźników odporności na pękanie przedstawiono na Rysunku 26.



Rysunek 26. Sposób wyznaczania wskaźników odporności na pęknięcie [202]

Wskaźniki odporności na pęknięcie wyznaczone według następujących zależności:

$$I_5 = \frac{OACD}{OAB} \quad (13)$$

$$I_{10} = \frac{OAEF}{OAB} \quad (14)$$

$$I_{20} = \frac{OAGH}{OAB} \quad (15)$$

gdzie:

OAB – pole pod krzywą wyznaczone do ugięcia odpowiadającego pierwszemu pęknięciu δ

$OACD$ – pole pod krzywą do ugięcia 3δ

$OAEF$ – pole pod krzywą do ugięcia $5,5\delta$

$OAGH$ – pole pod krzywą do ugięcia $10,5\delta$

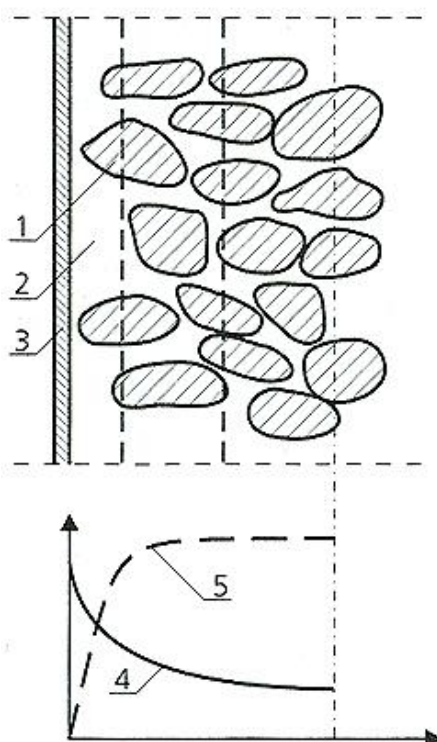
Za pomocą wskaźników odporności na pęknięcie można określić efektywność zbrojenia betonu różnymi włóknami, porównać różne włókna lub różne fibrobetony ze sobą. Charakteryzują one zachowanie kompozytu tuż po pierwszym pęknięciu, gdzie najistotniejsza jest rola włókien w przenoszeniu dalszych obciążeń. Mogą być również użyte do monitorowania jakości betonu z włóknami oraz sprawdzenia zgodności z wymaganiami konstrukcyjnymi lub oceny efektywności betonu już użytkowanego. Wskaźniki odporności na pęknięcie zależą od rodzaju włókien w osnowie, ich ilości oraz przyczepności do zaczynu cementowego.

6.4 Strefa kontaktowa włókno stalowe-zaczyn

Istotną rolę w kształtowaniu efektywności zbrojenia betonu przez włókna stalowe i odporności na kruche pęknięcie stanowi tzw. strefa kontaktowa włókno-zaczyn, czyli miejsce styku włókna z matrycą cementową. Bardziej zwarta, jednorodna i ciągła strefa

kontaktowa włókno-zaczyn, tym skuteczniejsza rola zbrojenia rozproszonego. Podobnie jak w betonie zwykłym, który jest kompozytem ziarnistym, gdzie matryca cementowa stanowi osnowę, a kruszywo stanowi zbrojenie, strefa kontaktowa kruszywo-zaczyn istotnie wpływa na właściwości wytrzymałościowe betonu. W przypadku fibrobetonów, strefa kontaktowa włókno-zaczyn uważana jest jako najłabsza część mikrostruktury betonów, z powodu niedoskonałości wiązania włókno-zaczyn. Na budowę strefy kontaktowej włókno-zaczyn ma wpływ również powierzchnia włókien, która kształtuje przyczepność włókien do matrycy cementowej. Im gładsza powierzchnia włókien, tym mniejsza przyczepność do zaczynu cementowego.

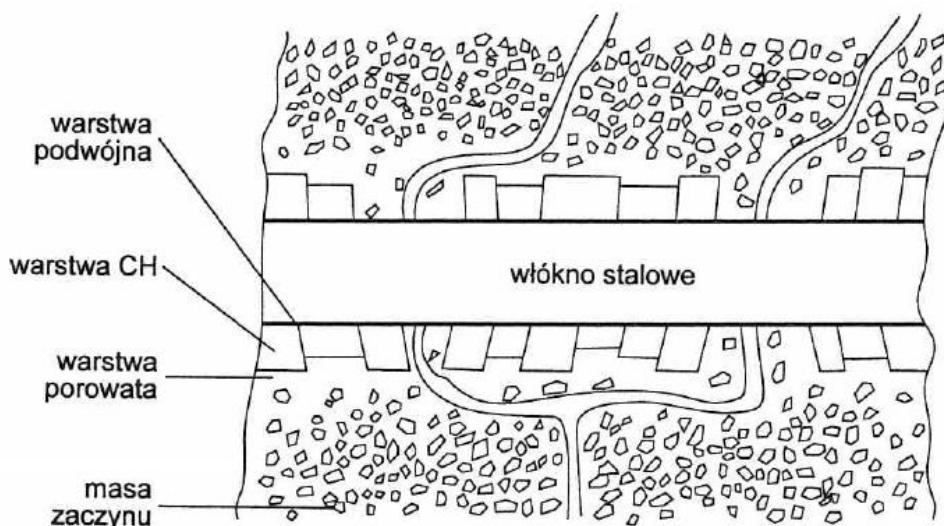
Ponadto w obszarze strefy kontaktowej występuje zwiększona porowatość zaczynu cementowego, która spowodowana jest tak zwanym „efektem ściany”, czyli charakterystycznym koncentrowaniem się przez blokowanie ziaren cementu (i piasku) w pewnej odległości od włókna stalowego [177,203]. Podobnie w betonie zwykłym „efekt ściany” występuje przy styku mieszanki betonowej z formą (ścianą), gdzie koncentracja kruszywa grubego w pewnej odległości od ściany powoduje wzrost zaprawy cementowej przy ścianie i tym samym wzrost jej jamistości i porowatości. Ogólny schemat efektu ściany przedstawiono na Rysunku 27. Idąc skalę niżej, również efekt ściany występuje w przypadku styku zaprawy cementowej z ziarnami kruszywa grubego, które stanowią „ścianę” dla ziaren piasku i cementu.



Rysunek 27. Efekt ściany przy włóknie stalowym (lub przy deskowaniu) [169]. 1-ziarna cementu (lub kruszywa), 2-zaczyn cementowy, 3-ściana (włókno lub deskowanie), 4-krzywa obrazująca zmiany zawartości zaczynu, 5-krzywa obrazująca szczelność

W przypadku fibrobetonów, włókna stalowe stosowane w praktyce, mają średnicę co najmniej kilkadziesiąt razy większą od ziaren cementu, stąd efekt ściany występujący przy granicy zaczynu z włóknem, powoduje wzrost porowatości w tym obszarze [177].

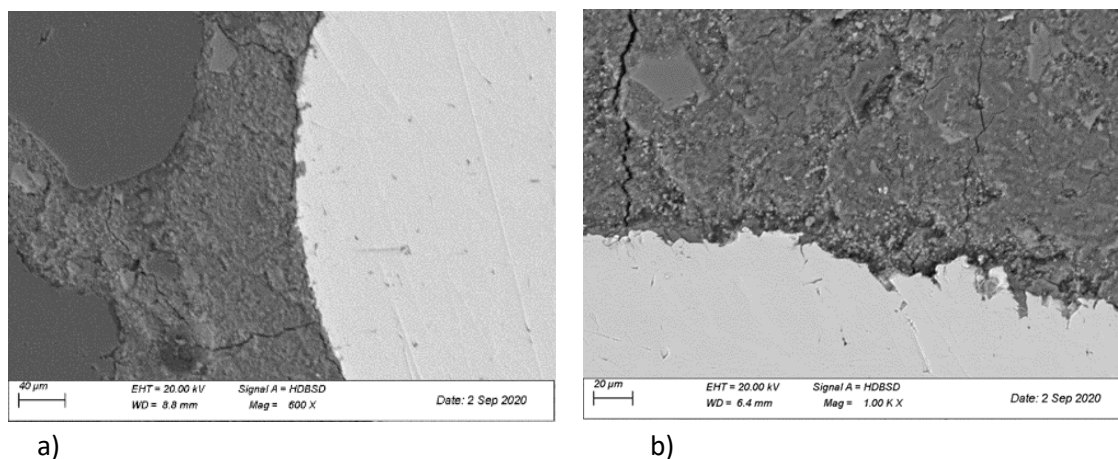
W literaturze model budowy strefy kontaktowej włókno-stalowe zaczyn opisywany jest podobnie jak strefa kontaktowa kruszywo niereaktywne-zaczyn, opisany przez Bentura [177,203,204] (kruszywa reaktywne w uwagi na zachodzące reakcje chemiczne przy kruszywie wykazują znacznie inny model strefy). Na Rysunku 28 przedstawiono model strefy kontaktowej włókno stalowe-zaczyn.



Rysunek 28. Model strefy kontaktowej włókno stalowe-zaczyn [177,203,204]

W strefie tej można wyróżnić trzy charakterystyczne warstwy, w kolejności od włókna stalowego: warstwa podwójna, warstwa kryształów wodorotlenku wapnia oraz warstwa porowata [203]. Warstwę podwójną stanowią kryształki portlandytu Ca(OH)_2 ułożone prostopadle do powierzchni włókna oraz faza C-S-H. Warstwa porowata składa się z podwyższonej zawartości portlandytu Ca(OH)_2 i mniejszej ilości niezhydratyzowanych ziaren cementu. Jednym z czynników, wpływających na tworzenie się zwiększonej ilości portlandytu w pobliżu włókna jest wspomniany „efekt ściany”, czyli koncentracja ziaren cementu pewnej odległości od włókna. Kolejnym czynnikiem jest lokalne zwiększenie wskaźnika wodno/cementowego przy granicy z włóknem. Wzrost w/c w tym obszarze spowodowany jest przez zjawisko adsorpcji wody na powierzchni włókna stalowego. Woda tworzy na powierzchni gładkiego włókna cienką błonkę (tzw. woda błonkowa), co w efekcie generuje przestrzeń do wzrostu kryształów portlandytu [177,203,204].

Budowa strefy kontaktowej włókno-zaczyn na poziomie mikrostruktury ma istotny wpływ na skuteczność zbrojenia betonu przez włókna i kształtowanie właściwości mechanicznych fibrobetonu. Na Fot. 11 przedstawiono obrazy mikroskopowe SEM strefy kontaktowej włókno stalowe-zaczyn na spreparowanych zgładach (szlifach) betonu.



Fot 11. Obrazy mikroskopowe SEM strefy kontaktowej włókno stalowe-zaczyn, a) pow. 600x, b) pow. 1000x

Na przedstawionych obrazach strefa kontaktowa włókno-zaczyn jest prawidłowo wykształcona, jednorodna i zwarta, bez widocznej zwiększonej porowatości i spękań wzdłuż włókna, co przekładać się będzie na efektywność zbrojenia.

III. CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

7. Aparatura badawcza

W pracy doktorskiej wykorzystano następującą aparaturę badawczą:

- **Maszyna wytrzymałościowa CONTROLS**, C 56Z00 do prób statycznych z konsolą sterowniczą z czterema ramami do 15 kN, 100 kN, 300 kN, 3000 kN, konstrukcja pionowa, fundamentowana, napęd elektrohydrauliczny. Prasę stosowano do badania właściwości wytrzymałościowych betonów z włóknami. Do pomiaru odkształceń w badaniu modułu sprężystości zastosowano trzy ekstensometry CONTROLS, model 55-C0222/G.
- **Maszyna wytrzymałościowa INSTRON** o zakresie ± 100 kN i przesuwie trawersy 1235mm. Z wyposażonym dodatkowo siłomierzem o zakresie ± 10 kN oraz płytą do mocowania próbek o wymiarach 500x550 mm. Tensometr elektroniczny 12,5mm (czujnik przemieszczenia) produkcji Epsilon. Oprogramowanie BlueHill2. Prasę wykorzystano do badania wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości drutów stalowych.
- **Maszyna wytrzymałościowa do prób statycznych Zwick/Roell GmbH & Co.KG** - Konstrukcja pionowa, wolnostojąca. Siły: rozciągające/ściskające. Nośność ramy: 10 kN. Prasę wykorzystano do badania przyczepności drutów do matrycy cementowej.

- **Mikroskop skaningowy ZEISS Sigma 500 VP** (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Köln, Germany) z detektorem EDS Oxford Ultim Max 40 firmy Oxford (Oxford Instruments, High Wycombe, UK), do analizy mikroskopowej włókien oraz kompozytów cementowych z włóknami, z detektorami
 - SE (secondary electron),
 - BSE (backscattered electron),
 - EDX (do określenia składu pierwiastkowego i mapowania powierzchni).
- **Analizator termogravimetryczny firmy TA Instruments, STD Q600**, do wyznaczania krzywych TG/DTA w badaniu zawartości zanieczyszczeń,
- **spektrometr Agilent 5100** - metoda ICP OES - optyczna spektrometria emisyjna ze wzbudzeniem z płamie indukcyjnie sprzężonej (badanie składu włókien wykonano w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metalurgii Żelaza)
- **analizatora azotu, tlenu i wodoru TCHN 600 Leco** - metoda HT - ekstrakcja wysokotemperaturowa (badanie składu włókien wykonano w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metalurgii Żelaza)
- **analizator węgla i siarki CS-600 Leco** - metoda HFIR -metoda absorpcji promieniowania podczerwonego (badanie składu włókien wykonano w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metalurgii Żelaza)
- **Tomograf komputerowy General Electric (GE V|TOME|X M300)**, do obrazowania 3D dystrybucji włókien w próbkach betonowych (badania wykonano na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie).

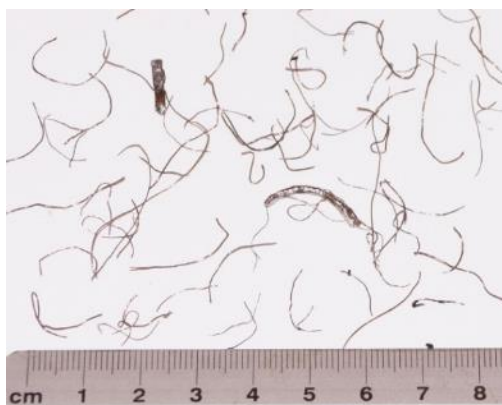
8. Materiały do badań i projektowanie składu betonów

8.1 Włókna

Do badań we wstępnym etapie pracy pozyskano pięć rodzajów komercyjnych włókien z recyklingu opon (RTSF) i jeden rodzaj komercyjnych włókien stalowych (MSF), stosowanych standardowo do zbrojenia betonu. Na Fot. 12-17 przedstawiono obraz pozyskanych włókien.



Fot 12. Włókna oczyszczone RTSF-A1



Fot 13. Włókna oczyszczone RTSF-A2



Fot 14. Włókna RTSF-B – metoda tarcia



Fot 15. Włókna RTSF-C – metoda mechaniczna



Fot 16. Włókna RTSF-D – metoda cieplna



Fot 17. Włókna stalowe komercyjne MSF-1

Kolejno przedstawiono krótką charakterystykę metod pozyskania poszczególnych rodzajów włókien z recyklingu opon.

Włókna RTSF-A1 i RTSF-A2 - metoda oczyszczania - **metoda mieszana cięcia/tarcia**. Materiał wprowadzony jest do młyna tnąco ciernego, wysokoobrotowego. W pierwszej fazie materiał ulega cięciu a następnie zostaje przetarty w celu uzyskania materiału czystego. W komorze młyna poprzez wysokie obroty zostają oddzielone również tekstylia. Materiał po wyjściu z młyna przenoszony jest na separatory wibracyjne, oraz magnetyczne

znajdujące się w komorze zamkniętej w której odbywa się ostateczne oddzielenie tekstyliów za pomocą podciśnienia, oraz granulatu gumowego powstałego w procesie doczyszczania. Po separacji uzyskiwana jest frakcja czystego granulatu gumowego, oraz kordu stalowego o pożądanym przedziale długości.

Włókna RTSF-B – pozyskane **metodą tarcia (cierna)** - jeden z rodzajów obróbki mechanicznej. Zanieczyszczony kord stalowy wprowadzony jest na młyny cierne, gdzie układ noży płaskich rozciera materiał po sicie o odpowiedniej perforacji. Materiał po wyjściu z młyna ciernego trafia do procesu separacji wibracyjnej oraz magnetycznej. W procesie separacji oddzielana jest czysta stal od resztek gumy, a tekstylia są odsysane za pomocą separatorów powietrznych. Pożądaną frakcję jeżeli chodzi o długość uzyskuje się za pomocą odpowiedniego ustawienia perforacji sita.

Włókna RTSF-C - pozyskane **metodą mechaniczną** - rozdrabnianie odbywa się w trój etapowo. W pierwszym etapie następuje cięcie opon samochodowych na kęsy o wymiarach około 40x40 mm, jednocześnie za pomocą separatora magnetycznego i powietrznego oddzielane są druty kordu stalowego i kordy tkaninowe. W drugim etapie kęsy gumy są podawane do walcarki mielącej, gdzie następuje dalsze rozdrobnienie gumy oraz separacja resztek kordu stalowego i tkaninowego przy użyciu umieszczonych pod walcarką separatorów magnetycznych i powietrznych. W trzecim etapie granulata jest podawany do wyłaczarki mielącej z dwustopniowym układem chłodzenia (zapobiegającym skoksowaniu i zapaleniu produktu). Na końcu linii znajdują się sita do rozdzielania granulatu/miała. W wyniku tego całego trój etapowego procesu otrzymuje się rozdrobnioną gumę, metal i odcinki kordu tkaninowego.

Włókna D – pozyskane techniką **pirolizy** (termolizy) to cieplno-chemiczna obróbka surowca. Odpady gumowe trafiają do reaktora, gdzie następuje ogrzewanie wsadu do temperatury ponad 400 °C w obojętnej lub pozbawionej tlenu atmosferze. Końcowym efektem pirolizy zużytych opon są: gaz i olej pirolityczny, węgiel popirolityczny, który w dużej części stanowi przekształcona sadza, stal uzyskana z kordu i drutówki.

Włókna komercyjne MSF-1 – włókna stalowe haczykowate do betonu, zgodne z normą PN-EN 14889-1 [11].

8.2 Beton posadzkowy

Badania wykonano w dwóch etapach. W pierwszym etapie wykonano badania porównawcze betonów tzw. posadzkowych z dodatkiem włókien z opon RTSF (A1, A2, B, C, D) oraz z włóknami stalowymi MSF-1. Beton tzw. posadzkowy został wybrany do badań z uwagi na fakt, że zbrojenie rozproszone w postaci włókien najczęściej stosuje się do posadzek przemysłowych i taki kierunek zastosowania upatruje się również dla włókien

pozyskanych z opon samochodowych. Wszystkie włókna dozowano w ilości 20 kg/m³, która jest średnią ilością, często stosowaną do mieszanki betonowej (według informacji od producentów włókien stalowych). Dodatkowo wykonano beton referencyjny bez włókien – REF. Ideą badań wstępnych betonu posadzkowego było wybranie spośród pięciu rodzajów włókien z opon, tych które osiągnęły największy wpływ na właściwości wytrzymałościowe i mają największe szanse na stosowanie.

Założenia do projektowania betonu posadzkowego w pierwszym etapie:

- klasa ekspozycji XC3,
- klasa wytrzymałości na ściskanie C25/30,
- minimalna zawartość cementu 280 kg/m³,
- maksymalne W/C 0,55,
- konsystencja S2.

W Tabeli 10 przedstawiono recepturę betonu posadzkowego.

Tabela 10. Receptura betonu posadzkowego, współczynnik W/C=0,53

Składnik		Zawartość [kg/m ³]
Cement portlandzki CEM II /B-S 32,5R		300
Woda wodociągowa		159
Kruszywo	Piasek wiślany płukany 0/2 mm	695
	Żwir naturalny 2/16 mm	1271
Domieszka plastyfikator		1% m.c.

8.3 Beton wzorcowy

Badania na betonie wzorcowym dla włókien do betonu wykonano w celu sprawdzenia właściwości związanych z odpornością na kruche pękanie betonów z włóknami. W pracy wykonano badania betonu z dodatkiem włókien stalowych komercyjnych i taką samą ilością włókien z recyklingu opon, w celu porównania i oceny efektywności zbrojenia obu rodzajów włókien.

Beton wzorcowy zaprojektowano według normy PN-EN 14845-1:2008 [205]. W normie tej podano cztery typy betonu wzorcowego, które dobiera się według rodzaju wyrobu lub systemu, w którym mają być stosowane włókna do betonu. Do badań wybrano beton obligatoryjny. W Tabeli 11 przedstawiono recepturę betonu wzorcowego. Według założeń normy, beton wzorcowy projektowany jest bez domieszki uplastyczniającej, w celu określenia wpływu włókien na mieszankę betonową wzorcową, bez dodatkowego wpływu domieszki na konsystencję.

Skład wybranego betonu wzorcowego, powinien spełniać wymagania:

- maksymalna ilość cementu CEM I 42,5 R 350 kg/m³,

- maksymalny wymiar kruszywa 16 mm, naturalne, niekruszone, krzemionkowe,
- współczynnik woda/cement 0,55,
- wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu $4,3 \pm 0,3$ MPa (min. klasa betonu 25/30),
- konsystencja mieszanki badana metodą VeBe V3 (czas od 10 do 6 s).

Tabela 11. Receptura betonu wzorcowego wg PN-EN 14845-1 [205]

Składnik	Zawartość [kg/m ³]
Cement portlandzki CEM I 42,5 R	310
Woda wodociągowa	171
Kruszywo naturalne 0/2 mm (piasek)	432
Kruszywo naturalne krzemionkowe 2/8 mm (żwir)	902
Naturalne krzemionkowe 8/16 mm (żwir)	545

Dla betonu zaprojektowanego wg Tabeli 11 wykonano próby laboratoryjne, w celu określenia ilości dodawanych włókien. Badania wstępne mieszanek betonowych wskazały, że przy ilości powyżej 40 kg/m³ włókien z recyklingu opon, występuje problem z ich dozowaniem i zapewnieniem odpowiedniej homogenizacji w mieszance betonowej. Ponadto powyżej 40 kg/m³ występowało pogorszenie urabialności i spadek konsystencji mieszanki betonowej. Do badań zaprojektowano mieszanki wg Tabeli 11, z dodatkiem 10, 20, 30 i 40 kg/m³ (tj. ok. 0,15%, 0,3%, 0,42%, 0,6%) wybranych włókien z recyklingu opon i włókien komercyjnych.

9. Badania wstępne

9.1 Badania identyfikacyjne włókien

9.1.1 Wymiary

W Tabeli 12 przedstawiono wyniki badań długości i średnic włókien użytych do badań. Włókna pozyskane z opon RTSF (A1, A2, B, C, D) stanowią mieszaninę włókien stalowych o różnych długościach i średnicach, niektóre są zanieczyszczone kawałkami gumy i pyłu stalowego.

Tabela 12. Wyniki badań długości i średnicy włókien z opon

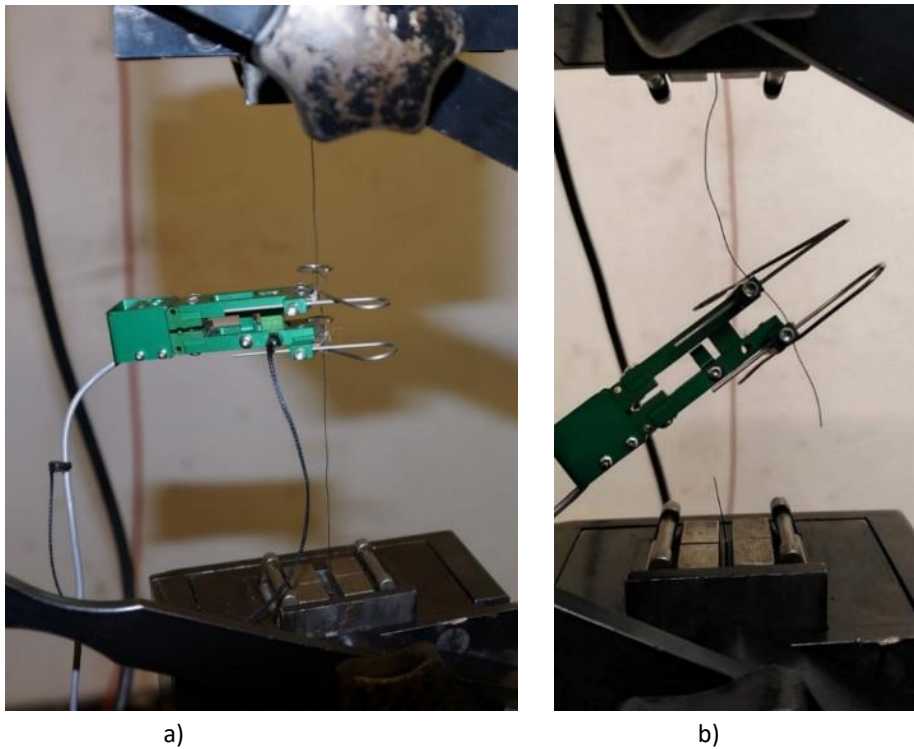
Rodzaj włókna	Długość [mm]		Średnica [mm]		Charakterystyka
	przedział	mediana	przedział	mediana	
RTSF-A1	8,4 – 81,6	40,2	0,17 – 0,46	0,23	Włókna dłuższe, czyste, bez obecności gumy i frakcji pylastych. Mały rozrzut średnic włókien.
RTSF-A2	7,2 – 43,6	30,1	0,18 – 1,59	0,22	Włókna krótsze, czyste, miejscowo obecność drobnych kawałków gumy. Zdarzają się włókna o grubszych średnicach.
RTSF-B	7,2 – 102,9	35,0	0,16 – 1,62	0,26	Włókna zanieczyszczone drobnymi kawałkami gumy oraz frakcją pylastą z gumy i stali. Obecność grubych średnic.
RTSF-C	4,8 – 97,7	36,2	0,16 – 1,57	0,34	Włókna zanieczyszczone drobnymi kawałkami gumy, tekstyliów oraz frakcją pylastą z gumy i stali. Obecność grubych średnic.
RTSF-D	3,8 – 214,5	37,6	0,17 – 2,01	0,34	Włókna najbardziej zanieczyszczone drobnymi kawałkami gumy, tekstyliów oraz frakcją pylastą z gumy i stali. Włókna najbardziej niejednorodne, o największym rozrzucie długości i średnic. Obecność bardzo grubych i długich włókien.
MSF	50,5		1,00		Włókna stalowe haczykowane, przekrój okrągły

9.1.2 Wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości

W Tabeli 13 przedstawiono porównanie wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości włókien wg PN-EN ISO 6892-1 [206]. Badanie, zarówno dla włókien RTSF oraz MSF, przeprowadzono na trzydziestu odcinkach drutów o długości ok 30-40 cm. Druty pozyskane z opon, z uwagi na rozrzut średnic podzielono na dwie grupy, w każdej grupie badano po 30 odcinków. Na Fot. 18 przedstawiono druty z opon, a na Fot. 19 widok cienkiego zerwanego drutu RFST po badaniu wytrzymałości na rozciąganie.



Fot 18. Dwie grupy drutów z opon RTSF



Fot 19. Badanie wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości drutów z opon, a) układ badawczy, b) zerwany drut z opon

Tabela 13. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości włókien

Rodzaj włókien	Średnia średnica włókien [mm]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]
RTSF	$0,30 \pm 0,08$	1418 ± 54	$158,8 \pm 22,5$
	$1,34 \pm 0,06$	1653 ± 40	$191,8 \pm 31,2$
MSF	$1,00 \pm 0,04$	1082 ± 26	$201,6 \pm 17,8$

Wyniki badań wskazują, że włókna (druty) z opon pomimo obciążającego procesu recyklingu i wyciągania z opon, wykazują o ok. 30-50% większą wytrzymałość na rozciąganie w porównaniu do komercyjnych stalowych włókien, co stanowi potencjał w ich zastosowaniu. Osnowa stalowa w oponie stanowiąca szkielet konstrukcyjny, na który działają wszystkie obciążenia, jest produkowana z wysokogatunkowej i wysokowytrzymałej stali, której wytrzymałość na rozciąganie wynosi średnio 2500 MPa [33,40,51]. Druty pozyskane z recyklingu opon wykazały mniejszy moduł sprężystości niż druty komercyjne. Dodatkowo moduł jest niższy dla niższych średnic drutów. Niższy moduł sprężystości włókien RTSF mógł być spowodowany tym, że badane odcinki drutów RTSF były wygięte i skręcone, przed badaniem poddane procesowi prostowania, co mogło wpłynąć na końcowy wynik badania modułu sprężystości.

9.1.3 Zawartość zanieczyszczeń

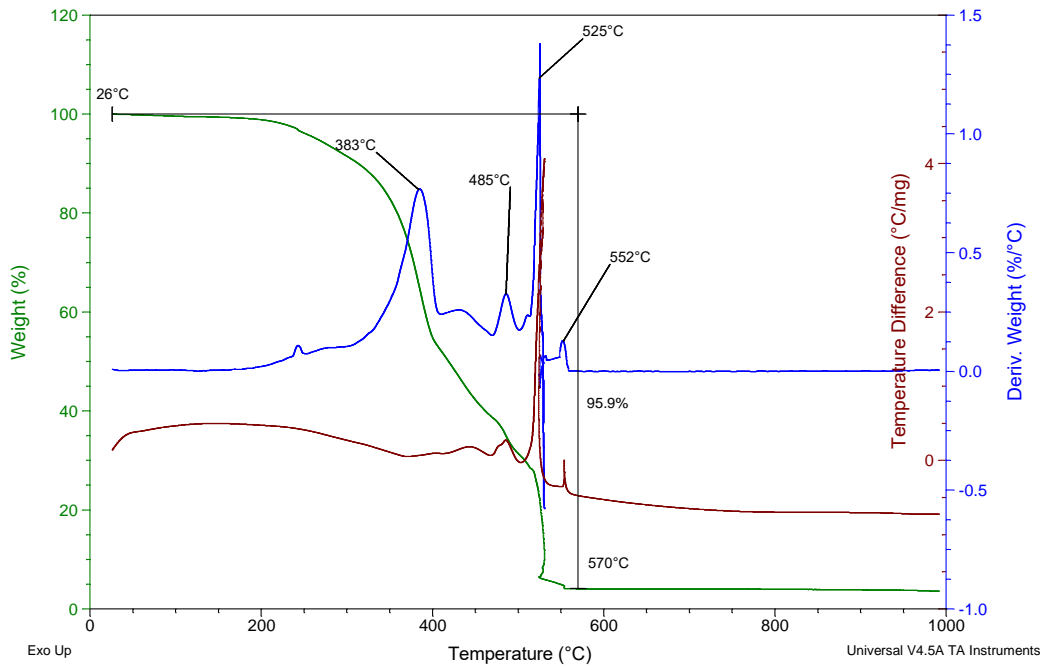
Wykorzystując fakt, że obecne we włóknach zanieczyszczenia mają charakter organiczny do oznaczenia ich zawartości we włóknach wykorzystano metodę rozkładu termicznego i pomiaru ubytku masy przed i po prażeniu. Zanieczyszczenia organiczne w temperaturze powyżej około 500°C powinny zostać całkowicie rozłożone. Podczas prażenia materiału może dojść do utleniania włókien stalowych w atmosferze powietrza, które będzie się wiązało ze wzrostem masy próbki, co z kolei będzie zaburzać wynik oznaczania. W związku z powyższym w pierwszej kolejności przeprowadzona badania termogravimetryczne w atmosferze powietrza samych włókien oraz wyseparowanych różnych rodzajów zanieczyszczeń (tekstylii, guma) w celu wyznaczenia optymalnej temperatury prażenia. Jako optymalną temperaturę rozumiana jest taka wartość, w której całość lub większość zanieczyszczeń ulegnie rozkładowi, natomiast stal nie ulegnie jeszcze utlenianiu w stopniu zaburzającym wynik pomiaru. Na Fot. 20 przedstawiono przykładowe próbki poddane analizie termicznej.



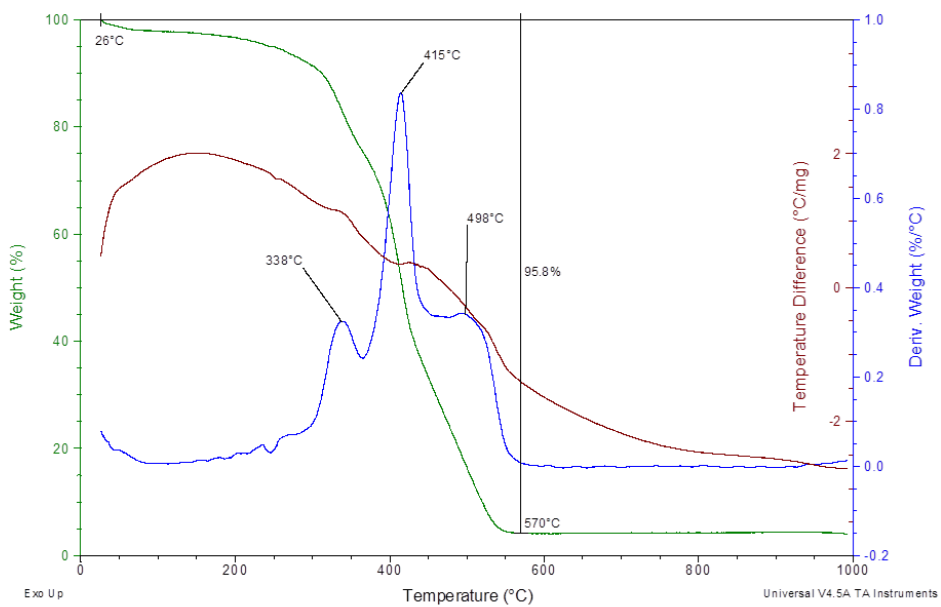
Fot 20. Przykładowe próbki poddane analizie termicznej

Pomiary wykonywano z wykorzystaniem analizatora termogravimetrycznego firmy TA Instruments, STD Q600. Pomiary wykonywano w tyglach platynowych w atmosferze

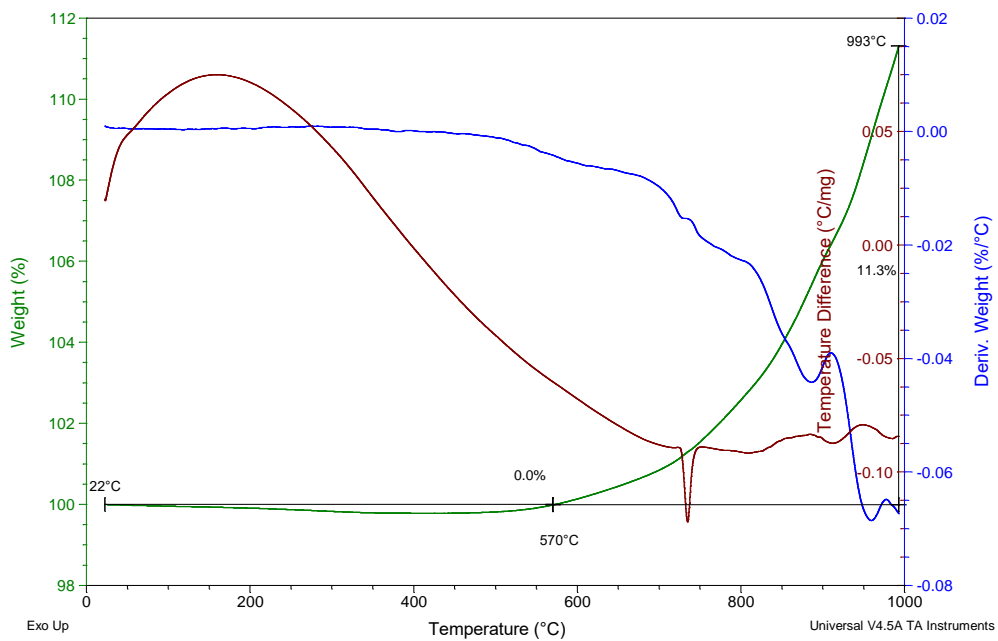
powietrza o przepływie 100 ml/min w zakresie temperatur 20 - 1000°C. Przyrost temperatury wynosił 10°C/min, masa badanych próbek – 20-30 mg. Rejestrowano krzywe TG, DTG oraz DTA. Na Rysunku 29-33 przedstawiono przykładowe termogramy badanych próbek.



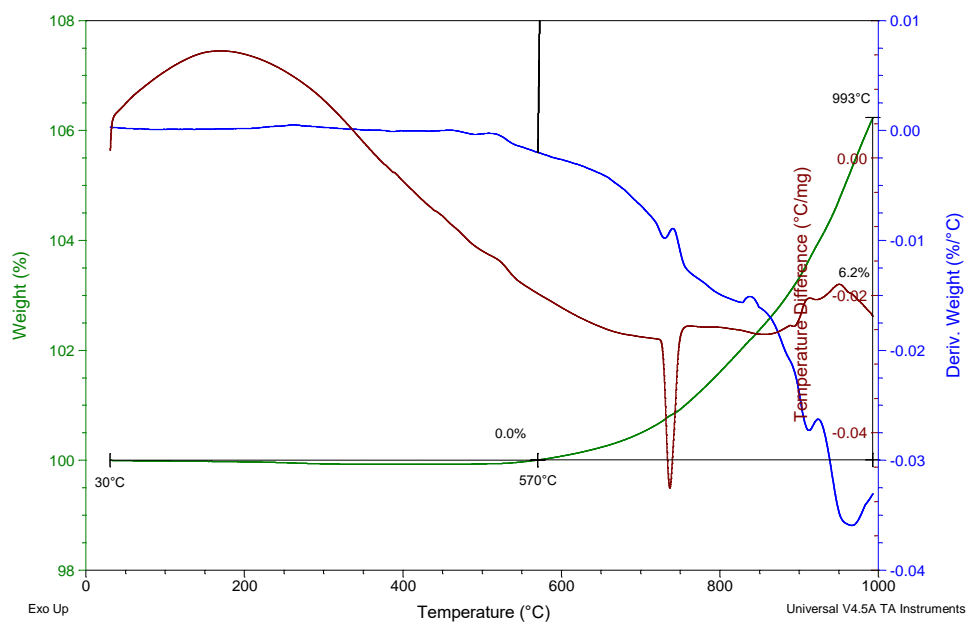
Rysunek 29. Guma z próbki RTSF-B



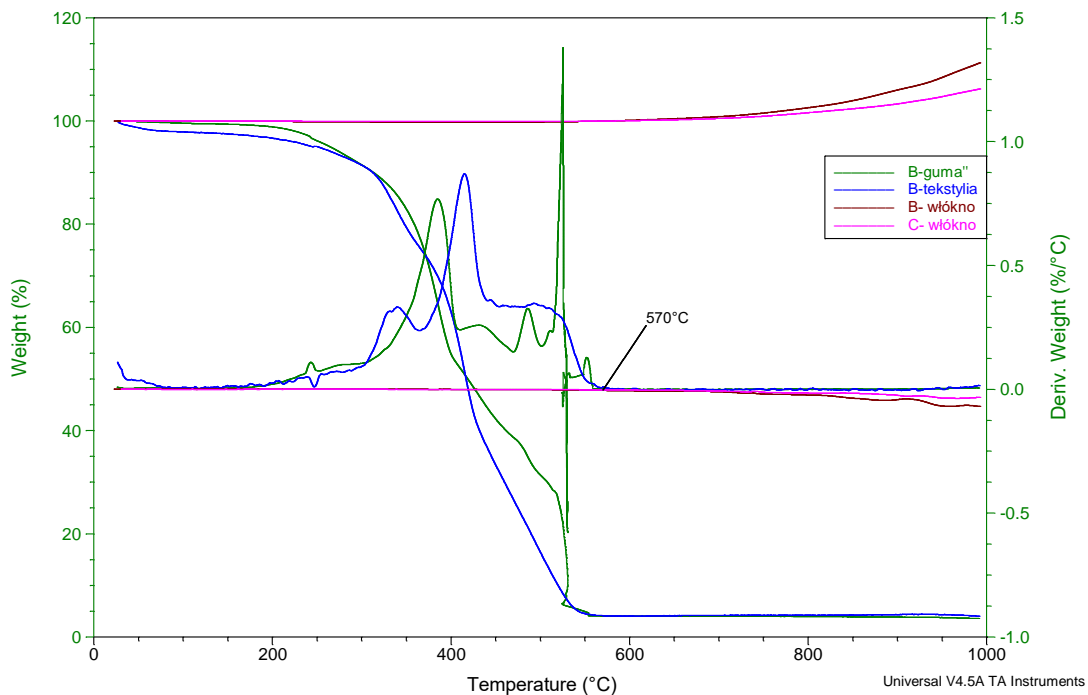
Rysunek 30. Tekstyli z próbki RTSF-B



Rysunek 31. Włókno RTSF-B



Rysunek 32. Włókno RTSF-C



Rysunek 33. Zestawienie termogramów

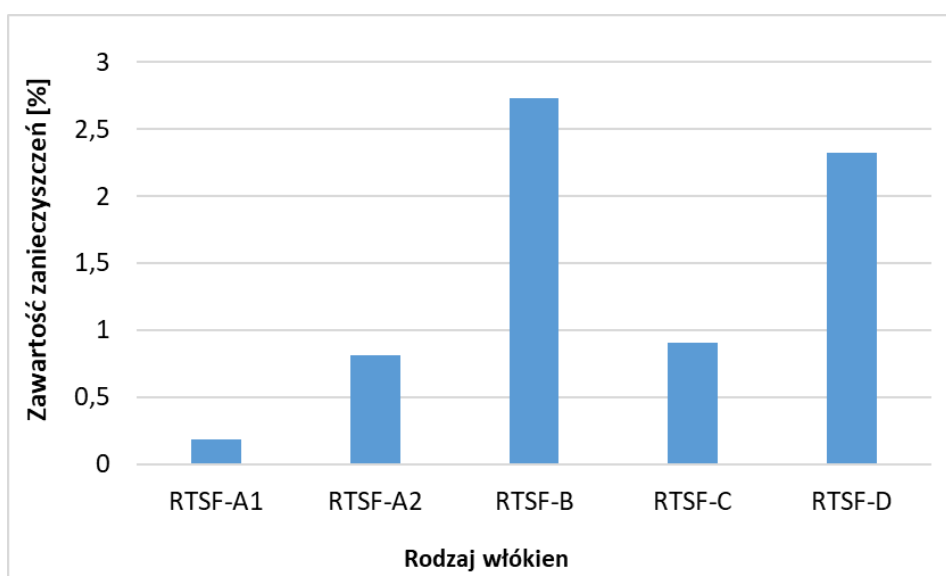
Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań ustalono, że optymalną temperaturą, w której należy wyprażyć próbki w celu ich oczyszczenia jest temperatura 570°C, w której zanieczyszczenia organiczne ulegają praktycznie całkowitemu rozkładowi (około 96%), natomiast włókna stalowe nie ulegają jeszcze procesowi utleniania.

Oznaczanie zawartości zanieczyszczeń we włóknach odpadowych z opon przeprowadzono w następujący sposób. Parownice kwarcowe wyprażono w temperaturze 570°C przez 1 godzinę, a następnie po wystudzeniu zważono. Do parownicy odważono około 100 g badanych włókien. Następnie parownicę razem z włóknami ogrzano w piecu do temperatury 570°C i pozostawiono w tych warunkach na 2 h. Po ostudzeniu próbka została zważona. Na podstawie ubytku masy wyznaczono zawartość zanieczyszczeń we włóknach. Wykonano po dwa badania dla każdego rodzaju włókien. W Tabeli 14 przedstawiono uśrednione wyniki badań oznaczania zawartości zanieczyszczeń w odpadowych włóknach stalowych z opon.

Tabela 14. Wyniki badania zawartości zanieczyszczeń

Oznaczenie próbki	Zawartość zanieczyszczeń [%]
RTSF-A1	0,18
RTSF-A2	0,81
RTSF-B	2,73
RTSF-C	0,91
RTSF-D	2,32

Analiza wyników przeprowadzonych badań wykazała znaczne zróżnicowanie w ilości zanieczyszczeń obecnych w badanych włóknach widoczne na Rysunku 34.



Rysunek 34. Zawartość zanieczyszczeń w badanych włóknach

Włókna z opon rodzaju B i D były najbardziej zanieczyszczone i zawierały odpowiednio 2,7 % oraz 2,3 % zanieczyszczeń. Włókna A2 oraz C posiadały zanieczyszczenia w ilości około 1 %. Pod kątem czystości najlepsze z badanych włókien były A1 gdzie zawartość zanieczyszczeń była bardzo niewielka i wynosiła poniżej 0,2 %, co stanowi potencjał w ich wykorzystanie w charakterze zbrojenia rozproszonego do betonu.

9.1.4 Skład chemiczny włókien

W Tabeli 15 przedstawiono wyniki badań składu chemicznego włókien z opon, wykonanych przez Sieć Badawczą Łukasiewicz – Instytut Metalurgii Żelaza.

Do badań wyznaczono następujące włókna stalowe oznakowane symbolami:

- RTSF-A – włókna stalowe z recyklingu opon, oczyszczone,
- RTSF-B – włókna z recyklingu opon, zanieczyszczone,
- MSF-1 – włókna stalowe komercyjne, haczykowane,
- MSF-2 – włókna stalowe komercyjne, falisto-haczykowane.

Tabela 15. Wyniki badania składu chemicznego włókien

Pierwiastek	Rodzaj włókien – wynik badania [%]			
	RTSF-A	RTSF-B	MSF-1	MSF-2
Al	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
C	0,83	0,75	0,064	0,097
Ca	<0,005	<0,005	0,015	<0,005
Co	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cr	0,30	0,036	0,073	0,020
Cu	0,097	0,045	0,095	0,018
Fe	97,8	98,2	99,2	99,3
Mn	0,59	0,69	0,37	0,39
Mo	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
N	0,0120	0,0045	0,0116	0,0080
Nb	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ni	0,033	0,049	0,058	0,024
P	0,008	0,009	0,018	0,012
S	0,011	0,009	0,006	0,009
Si	0,21	0,20	0,071	0,074
Ti	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
V	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Zn	0,037	<0,005	0,011	<0,005

Do badań właściwych betonów z włóknami, wytypowano włókna RTSF i MSF-1, zaznaczone kolorem zielonym i niebieskim w Tabeli 15. Włókna RTSF różnią się od włókien MSF-1 następującymi zależnościami:

- wyższą o ok. 1200% zawartością węgla C,
- wyższą o 310 % zawartością chromu Cr,
- wyższą o 60% zawartością manganu Mn,
- niższą o 43% zawartością niklu Ni,
- niższą o 55% zawartością fosforu P,
- wyższą o 195% zawartością krzemu Si,
- wyższą o 236% zawartością cynku Zn.

9.1.5 Gęstość włókien

Do badania gęstości włókien wytypowano włókna oczyszczone RTSF-A1 i RTSF-A2, oraz dwa rodzaje włókien stalowych komercyjnych: haczykowane i faliste. Gęstość włókien wyznaczono metodą piknometryczną na podstawie normy PN-EN 1097-7:2008 [207]. Zastosowano piknometry o objętości 50 ml, a gęstość wyznaczano w wodzie. Przed badaniem włókna komercyjne były przecięte na pół, na długość ok. 25 mm. Wyniki badań gęstości włókien przedstawiono w Tabeli 16.

Tabela 16. Wyniki badania gęstości włókien

Oznaczenie próbki	Gęstość włókien [g/cm ³]
RTSF-A1	6,86
RTSF-A2	6,95
MSF-1	7,58
MSF-3	7,39

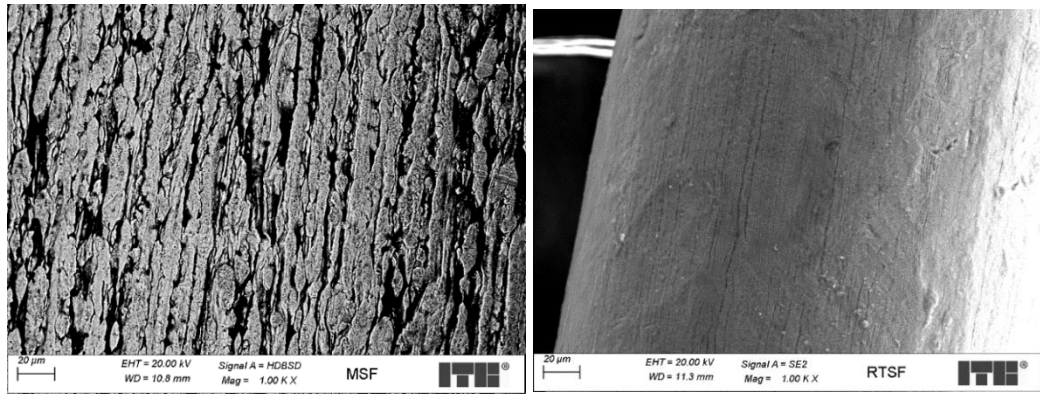
Włókna z recyklingu opon mają nieco mniejszą niż włókna komercyjne.

9.1.6 Trwałość włókien w środowisku alkalicznym

Celem badań była ocena odporności włókien stalowych z recyklingu opon na oddziaływanie stężonego roztworu alkalicznego. Zapisy w normie PN-EN 206 [208] świadczą o tym, że niektóre włókna stalowe mogą być pokryte powłoką metali chroniących je przed korozją atmosferyczną jak na przykład cynk. Metale te w środowisku silnie alkalicznym mogą prowadzić do powstawania gazowego wodoru, co w mieszance betonowej może być niekorzystne i wpływać na obniżenie trwałości stwardniałego betonu.

Wybrane włókna stalowe komercyjne (MSF) oraz z recyklingu opon (RTSF) zostały wypłukane w acetonie i umieszczone osobno w plastikowych, przezroczystych pojemnikach, zalane roztworem NaOH o stężeniu 4 mol/dm³ i szczelnie zamknięte. Następnie pojemniki były przechowywane w temperaturze 40°C przez 28 dni. Przez ten czas były regularnie obserwowane pod kątem uwalniania pęcherzyków gazu z powierzchni. Po tym czasie próbki zostały starannie wypłukane w wodzie demineralizowanej i wysuszone w 40°C. Obserwacje mikroskopowe powierzchni były przeprowadzone w czasie do 48h od wysuszenia. Następnie próbki były przechowywane w warunkach laboratoryjnych przez okres trzech miesięcy i ponownie analizowane z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej w celu sprawdzenia ich odporności również na takie warunki korozyjne.

Powierzchnia włókien RTSF poddanych oddziaływaniu stężonego roztworu alkalicznego nie przejawiała oznak korozji mogących wskazywać na brak ich trwałości w środowisku zaczynu cementowego. Powierzchnia włókien była stosunkowo gładka i bez wżerów. Powierzchnia włókien referencyjnych MSF poddana oddziaływaniu takiego samego stężonego roztworu alkalicznego również nie przejawiała oznak korozji. Widoczne na przedstawionych zdjęciach (Fot. 21) spękania są efektem metody produkcji drutu na włókna i we włóknach nie poddanych oddziaływaniu stężonego roztworu alkalicznego wygląda ona podobnie. Na podstawie przeprowadzonych powyższych analiz można stwierdzić, że badane włókna stalowe z recyklingu opon będą trwałe w środowisku silnie alkalicznego zaczynu cementowego i nie będą przyczyną powstawania gazowego wodoru w zaczynie cementowym.



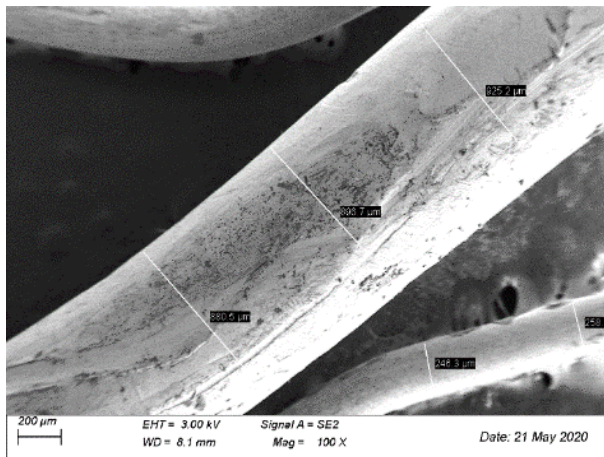
a)

b)

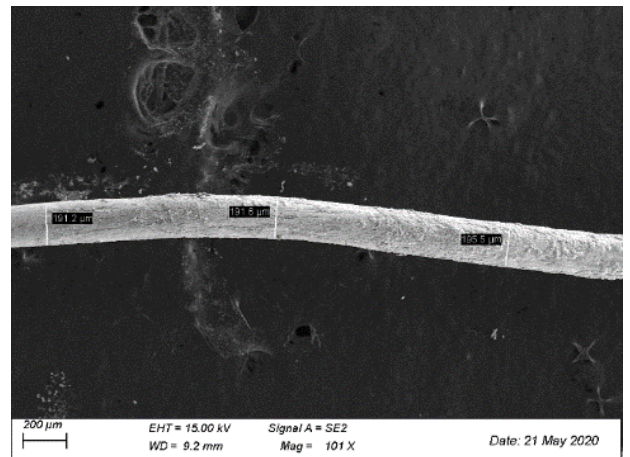
Fot 21. Obraz włókien po oddziaływaniu stężonego roztworu alkalicznego, a) włókno MSF, b) włókno RTSF

9.1.7 Analiza mikroskopowa włókien

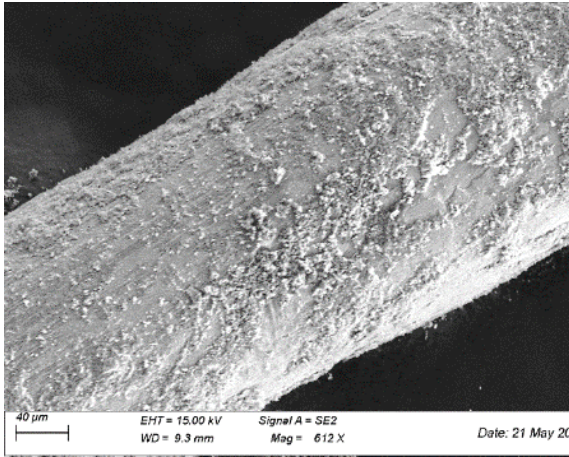
Obrazy mikroskopowe włókien RTSF przedstawiono na Fot.22-29, natomiast obrazy mikroskopowe włókien komercyjnych MSF przedstawiono na Fot. 30-33.



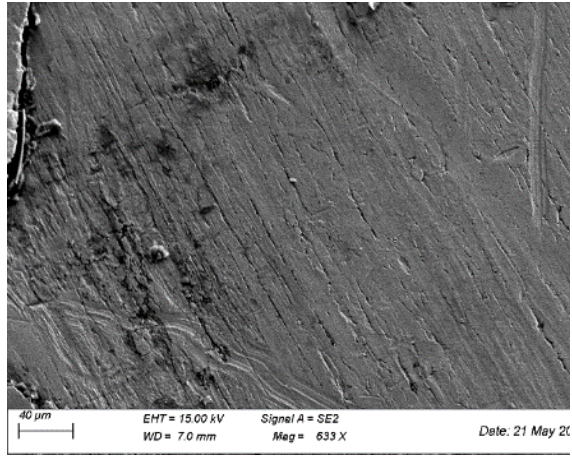
Fot 22. Włókno RTSF



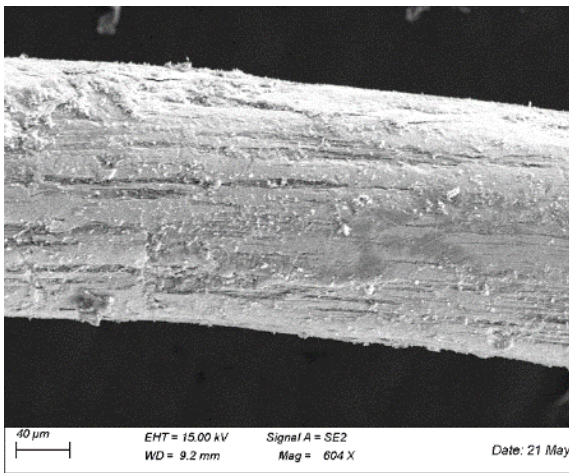
Fot 23. Włókno RTSF



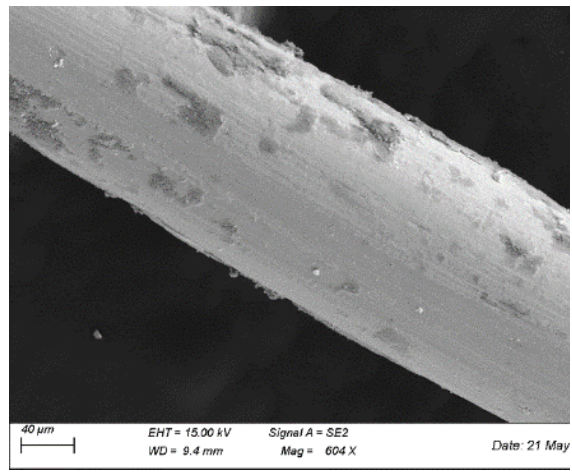
Fot 24. Włókno RTSF



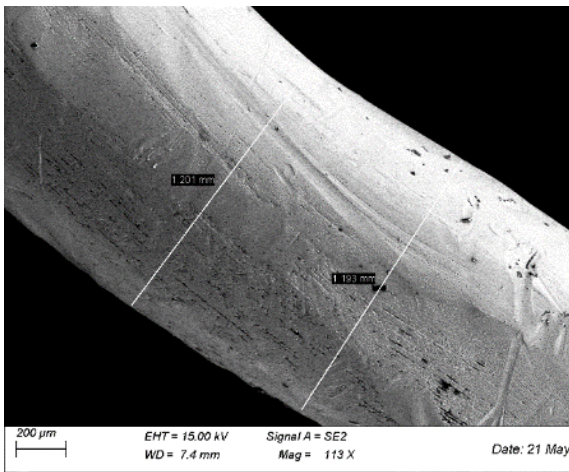
Fot 25. Włókno RTSF



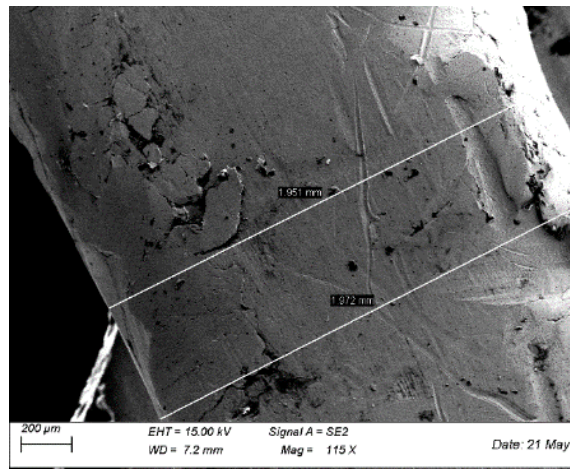
Fot 26. Włókno RTSF



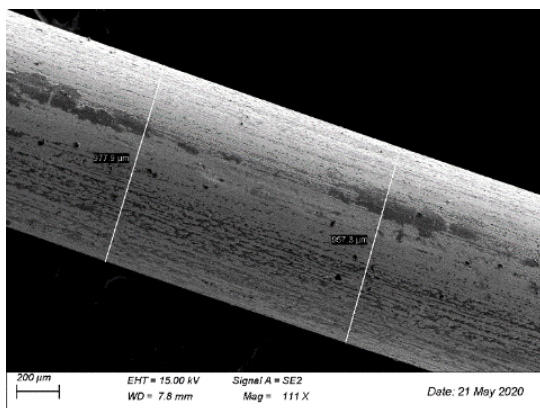
Fot 27. Włókno RTSF



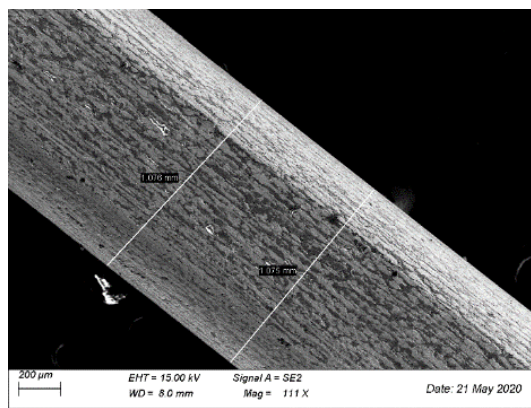
Fot 28. Włókno RTSF



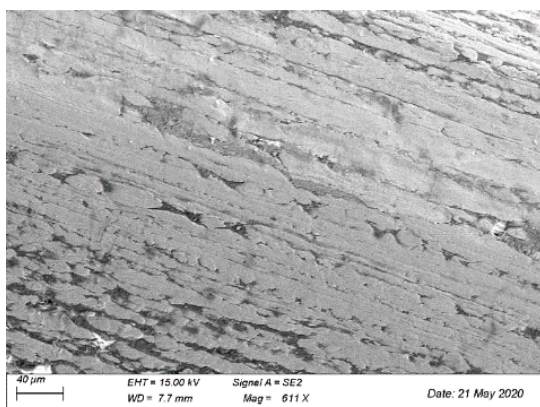
Fot 29. Włókno RTSF



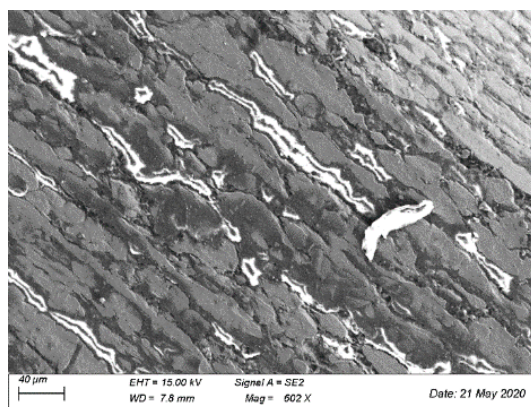
Fot 30. Włókno MSF



Fot 31. Włókno MSF



Fot 32. Włókno MSF



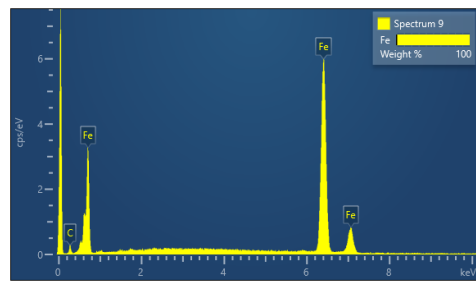
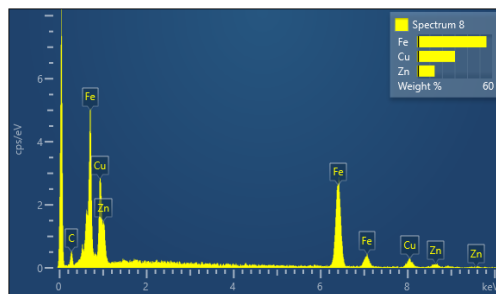
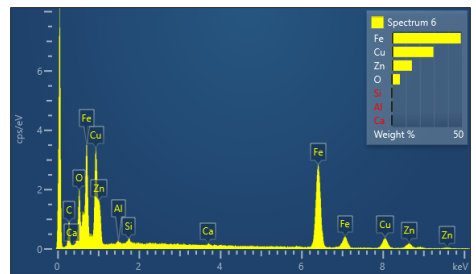
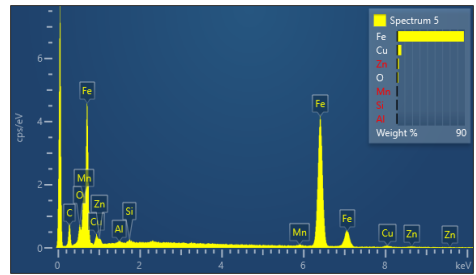
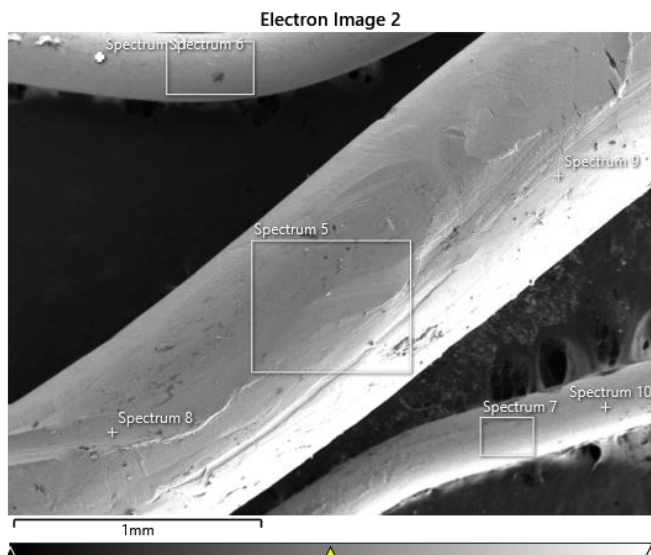
Fot 33. Włókno MSF

Włókna z recyklingu opon RTSF mają kształt nieregularny, zakrzywiony (wygięty) w różnych kierunkach. Powierzchnia włókien jest chropowata, niejednorodna, z miejscowo wyżłobionymi ubytkami, mogącymi powstać w procesie recyklingu opon. Powierzchnia włókien stalowych komercyjnych jest jednorodna, gładka, bez większych nieregularnych wyżłobień. Kształt włókien MSF jest prosty, średnica jest jednorodna na całej długości.

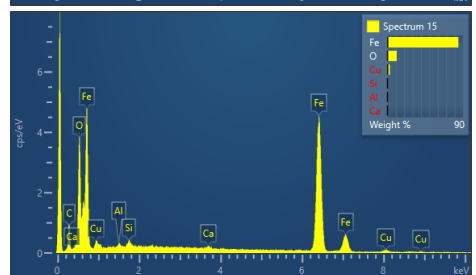
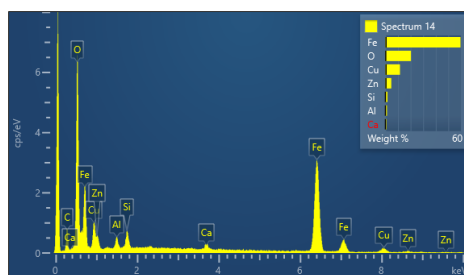
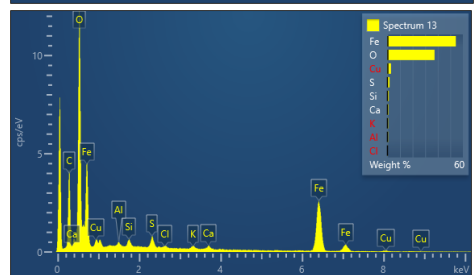
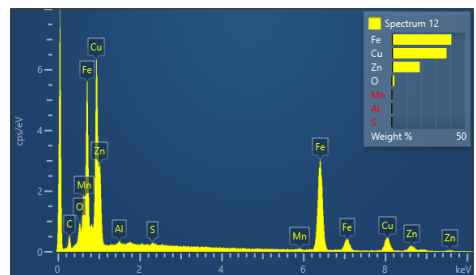
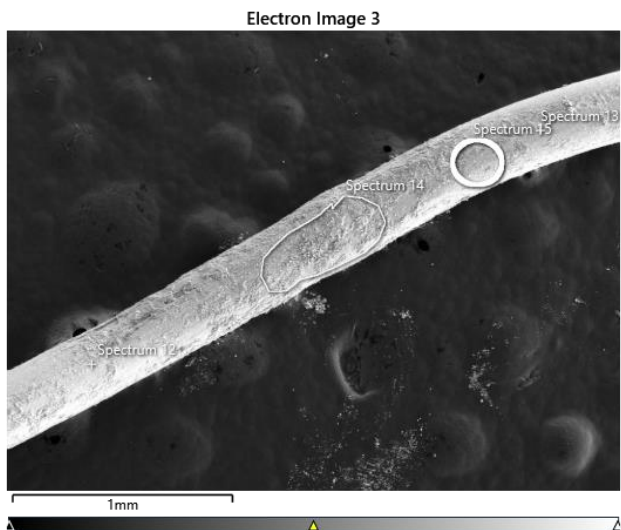
Na wybranych włóknach RTSF określono średnicę włókien, która wynosi od 166,1 μm do 1201 mm, co świadczy o różnorodnych wymiarach kordu stalowego z opon. Natomiast średnica włókien MSF mierzona za pomocą mikroskopu skaningowego wynosi od 957,3 do 977,9 μm.

Analiza składu pierwiastkowego w mikroobszarze SEM-EDS

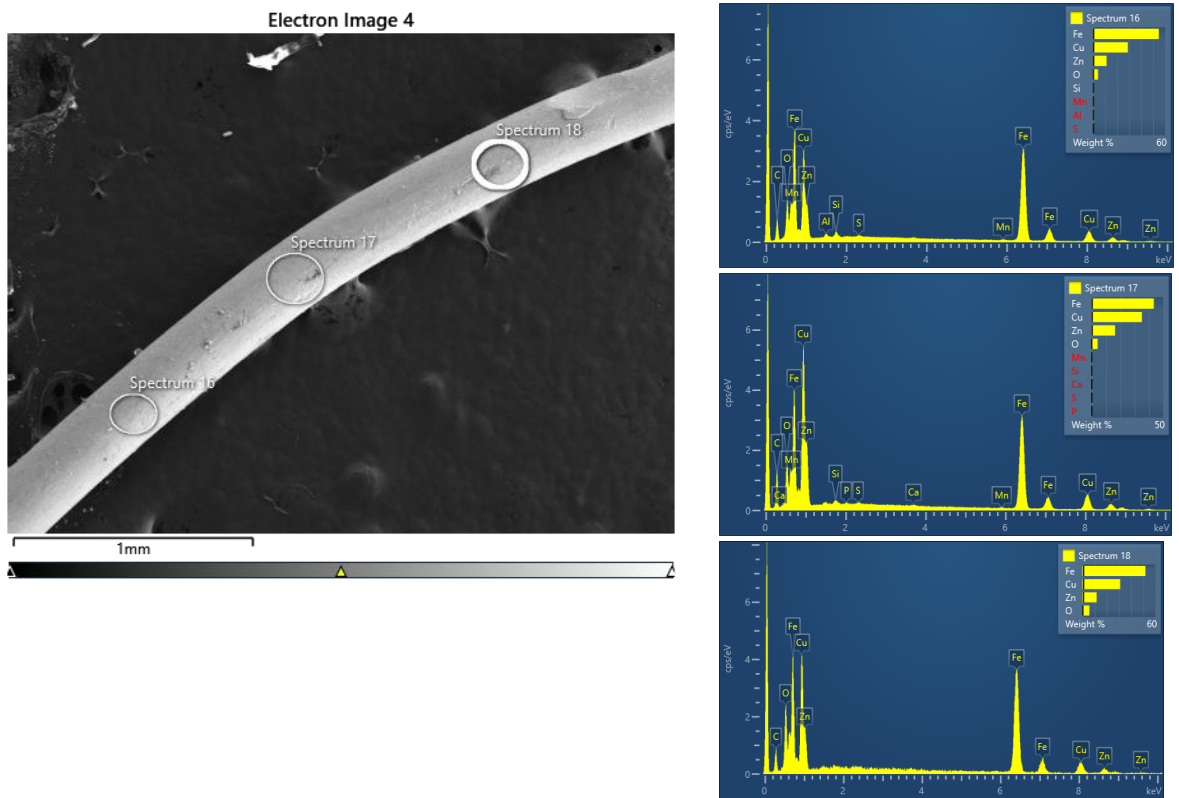
Wyniki analizy składu pierwiastkowego włókiem RTSF przedstawiono na Rysunku 35-42, natomiast włókien stalowych komercyjnych MSF na Rysunkach 43-44.



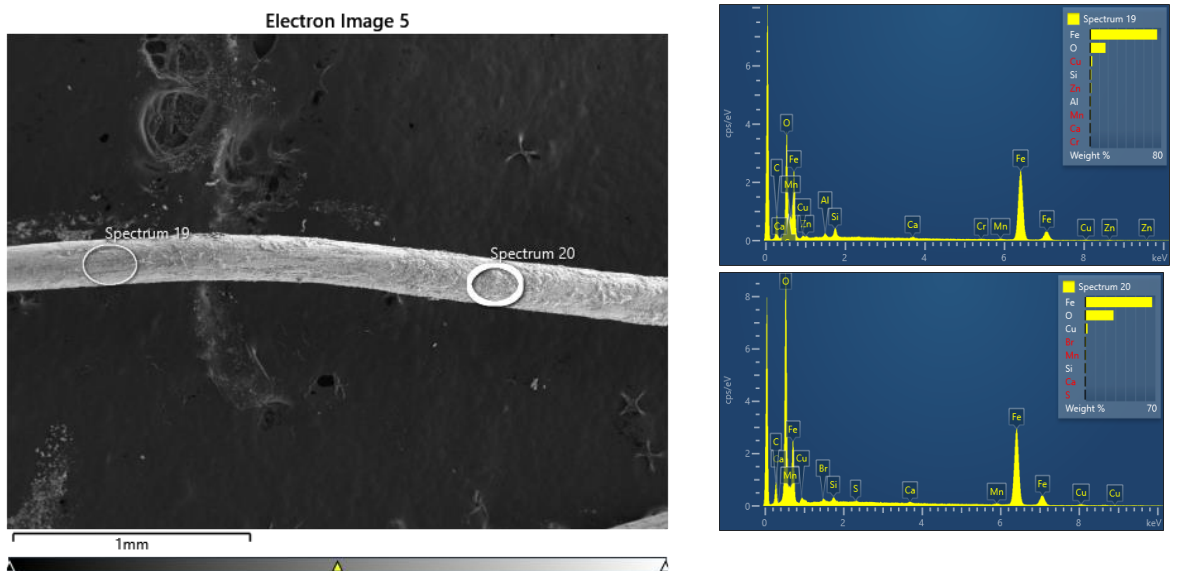
Rysunek 35. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF



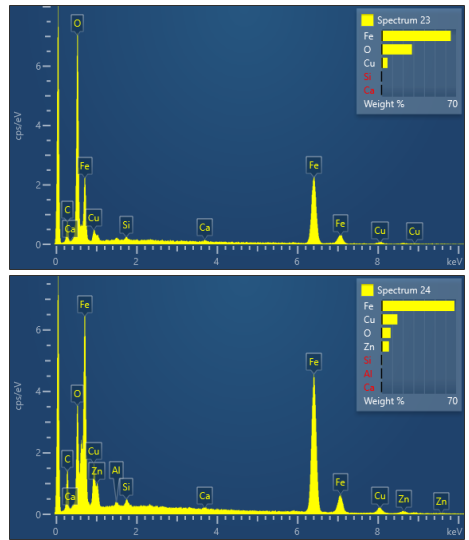
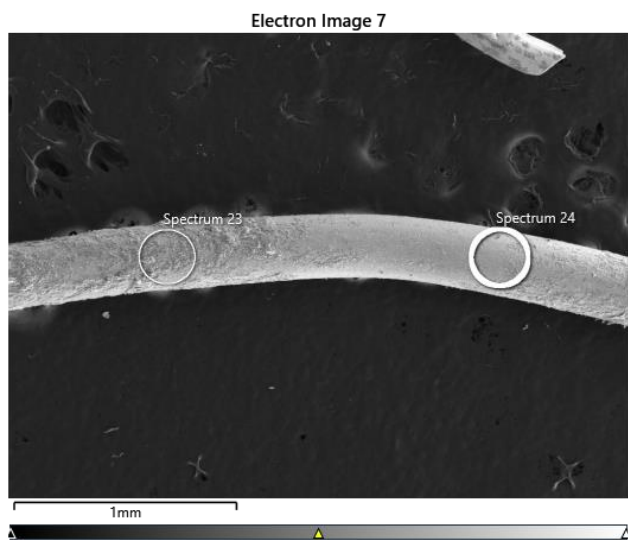
Rysunek 36. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF



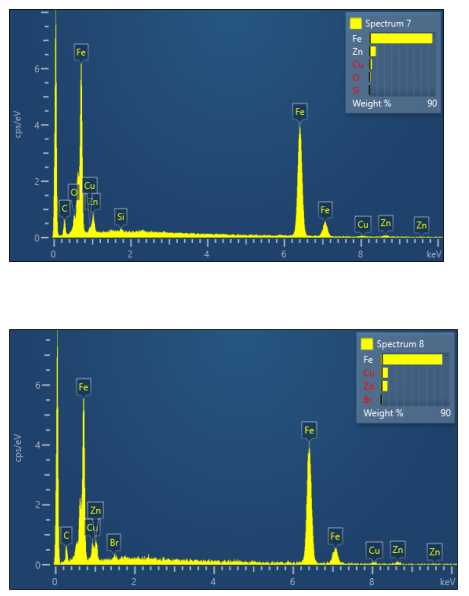
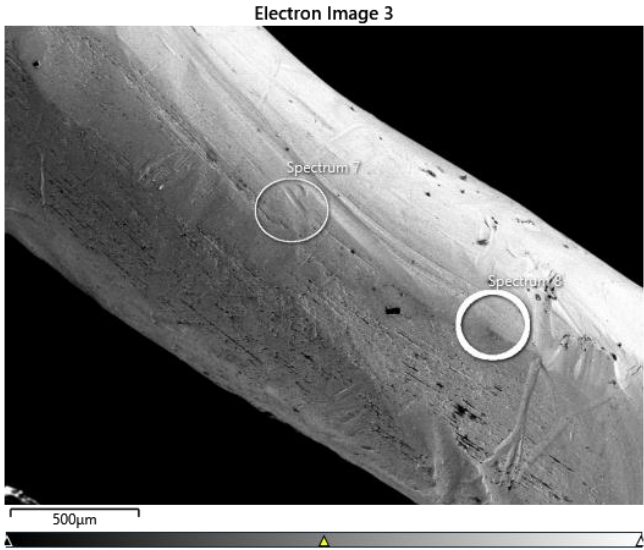
Rysunek 37. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF



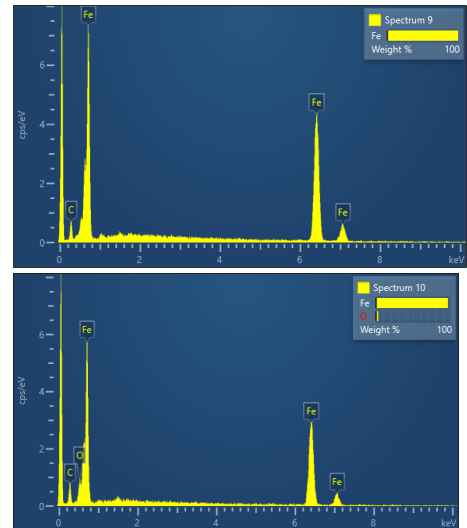
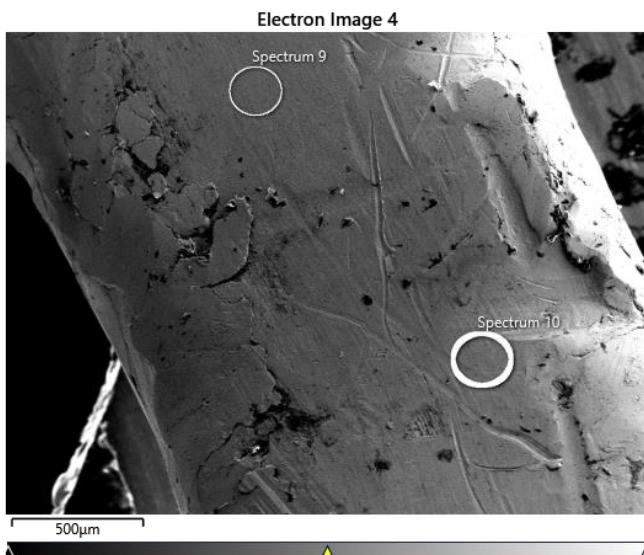
Rysunek 38. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF



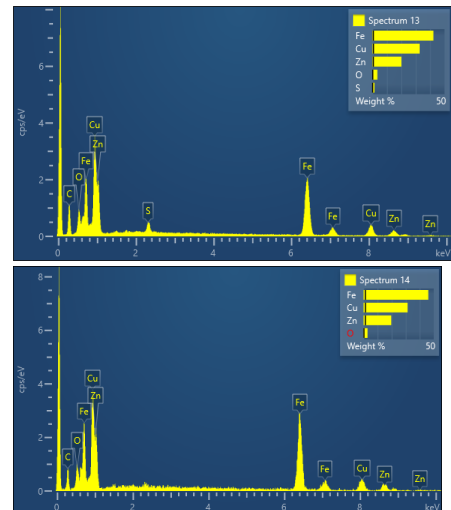
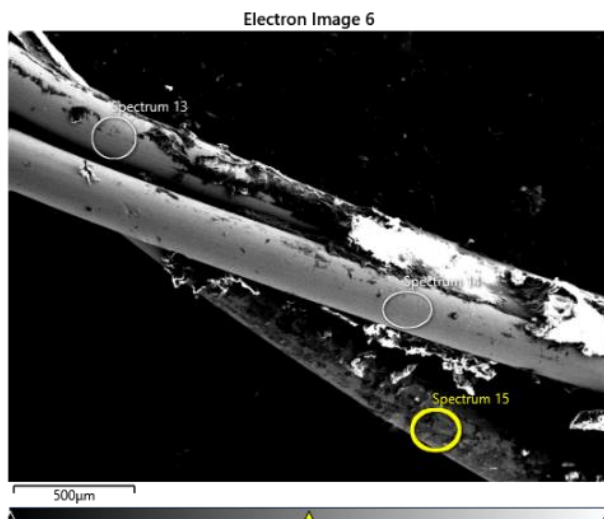
Rysunek 39. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF



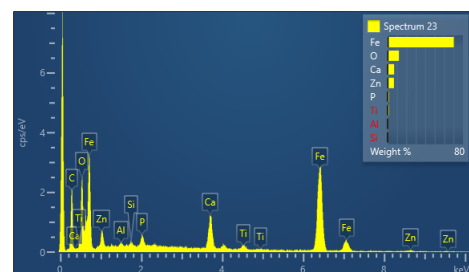
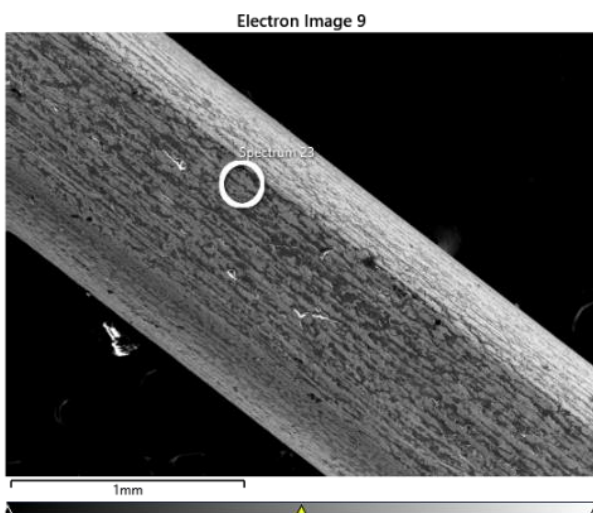
Rysunek 40. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF



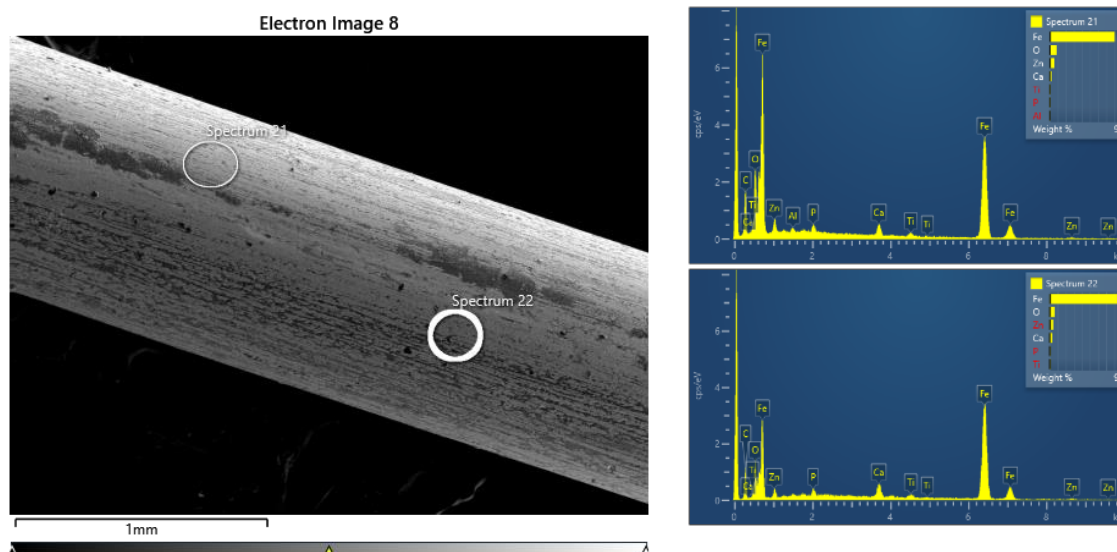
Rysunek 41. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF



Rysunek 42. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF



Rysunek 43. Analiza EDS włókna MSF



Rysunek 44. Analiza EDS włókna MSF

Na podstawie analizy mikroskopowej w mikroobszarze włókien z recyklingu RTSF i komercyjnymi MSF określono główne składniki stopów z których wykonane są włókna:

- z recyklingu opon RTSF: składniki główne Fe, Cu oraz Zn, śladowe ilości Mn, S oraz Al,
- komercyjne włókna stalowe MSF: składniki główne Fe, oraz śladowe ilości Zn i Cu.

9.2 Badania betonu posadzkowego z różnymi włóknami z opon

W pierwszym etapie wykonano badania porównawcze betonów posadzkowych z dodatkiem włókien z opon RTSF (A1, A2, B, C, D) oraz z włóknami komercyjnymi MSF. Beton posadzkowy został wybrany do badań z uwagi na fakt, że zbrojenie rozproszone w postaci włókien często stosowane jest do posadzek przemysłowych i taki kierunek zastosowania upatruje się również dla włókien pozyskanych z opon samochodowych. Wszystkie włókna dozowano w ilości 20 kg/m^3 (ok. 0,3%), która jest średnią ilością, często stosowaną do mieszanki betonowej (według informacji od producentów włókien stalowych). Dodatkowo wykonano beton referencyjny bez włókien – REF. Celem badań wstępnych było wybranie spośród pięciu rodzajów włókien z opon, jednego rodzaju do dalszych badań głównych – efektywności zbrojenia betonu włóknami. Kryterium wyboru stanowiły aspekty technologiczne (sposób dozowania włókien i ich homogenizacja w mieszance betonowej) oraz wpływ na właściwości wytrzymałościowe betonu.

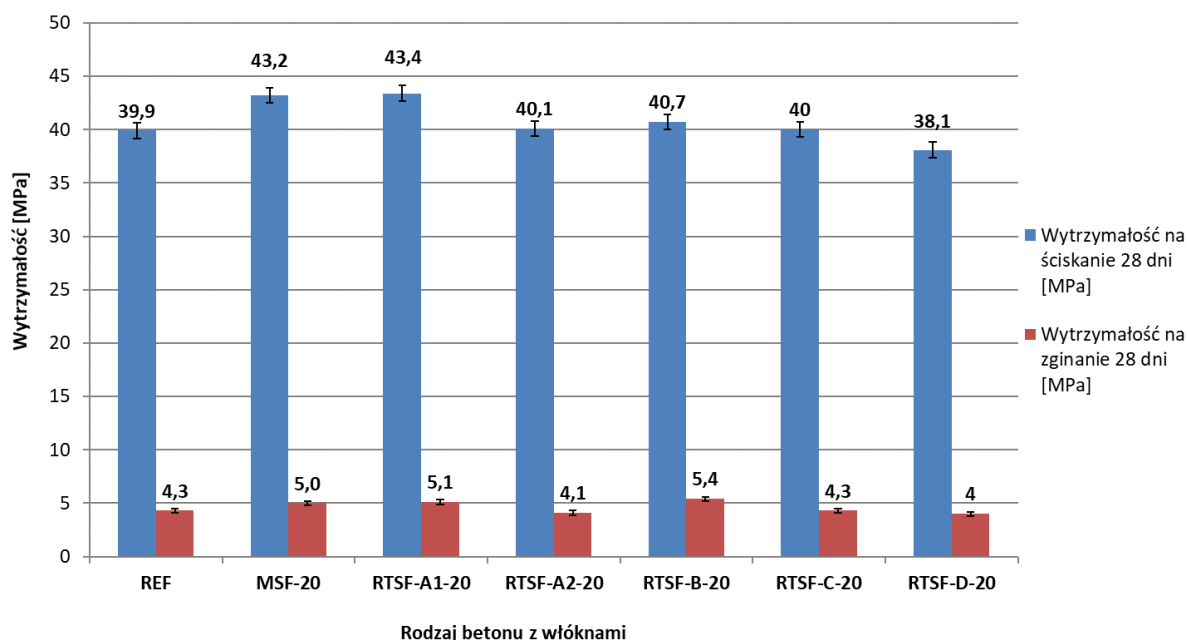
Wykonano badania konsystencji mieszanki betonowej metodą opadu stożka wg [209], oraz badanie wytrzymałości na zginanie po 28 dniach wg [210] i wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach wg [211]. W Tabeli 17 przedstawiono wyniki badania konsystencji

mieszanki betonowej i gęstości stwardniałego betonu, a na Rysunku 45 wyniki badania wytrzymałości na zginanie i ściskanie po 28 dniach badanych betonów.

Tabela 17. Konsystencja mieszanek betonowych z włóknami w ilości 20 kg/m³

Oznaczenie mieszanki	Konsystencja mieszanki (opad stożka) [mm]	Gęstość betonu [kg/m ³]
REF	120	2310
MSF-20	110	2340
RTSF-A1-20	90	2370
RTSF-A2-20	80	2350
RTSF-B-20	80	2360
RTSF-C-20	80	2340
RTSF-D-20	90	2330
niepewność pomiaru	± 10	± 20

Wyniki badań wskazują, że wszystkie włókna stalowe dozowane w ilości 20 kg/m³ wpływają na spadek konsystencji mieszanki betonowej, większy spadek wykazują włókna recyklingowe pozyskane z opon w stosunku do włókien komercyjnych. Nie zaobserwowano istotnych różnic w gęstościach betonu. Na Rysunku 45 przedstawiono wyniki badań wytrzymałościowych betonu posadzkowego z dodatkiem włókien z opon i włókien komercyjnych w ilości 20 kg/m³.



Rysunek 45. Wytrzymałość na zginanie i ściskanie betonów z włóknami

Z uzyskanych wyników badań wynika, że włókna komercyjne MSF wpływają na zwiększenie wytrzymałości na ściskanie i zginanie betonu REF bez włókien. Analiza

wyników wskazuje, że najlepsze wyniki zaobserwowano dla betonu z włóknami RTSF-A1 (oczyszczone włókna dłuższe z recyklingu opon), dla którego zarówno wytrzymałość na zginanie jak i ścisnienie po 28 dniach, są wyższe niż dla betonu ze stalowymi włóknami normowymi MSF.

9.3 Wybór włókien do badań głównych

Na podstawie wyników badań mieszanki betonowej oraz stwardniałego betonu, a także badań czystości włókien do dalszych badań wybrane zostały włókna RTSF-A1, czyli dłuższe, oczyszczone włókna z recyklingu opon. Wybrane włókna RTSF mają najmniej zanieczyszczeń gumowych, tekstylnych oraz tzw. pyłu stalowego (<0,2%), które mogą niekorzystnie wpływać na efektywność zbrojenia betonu przez RTSF. Dodatkowo włókna RTSF-A1 mają bardziej jednorodne wymiary od pozostałych włókien, nie zdarzają się tam włókna skrajnie grube i długie, przez co ich homogenizacja w mieszance betonowej jest jednorodna. Wyniki badań wstępnych przedstawione na Rysunku 45 wskazują, że dla betonu RTSF-A1 zaobserwowano najlepsze parametry w porównaniu do betonu MSF oraz REF.

Na Fot. 34 przedstawiono obraz włókien MSF i RTSF, które wybrano do badań głównych.



Fot 34. Włókna MSF (po lewej stronie) oraz RTSF (po prawej stronie) wybrane do badań głównych.

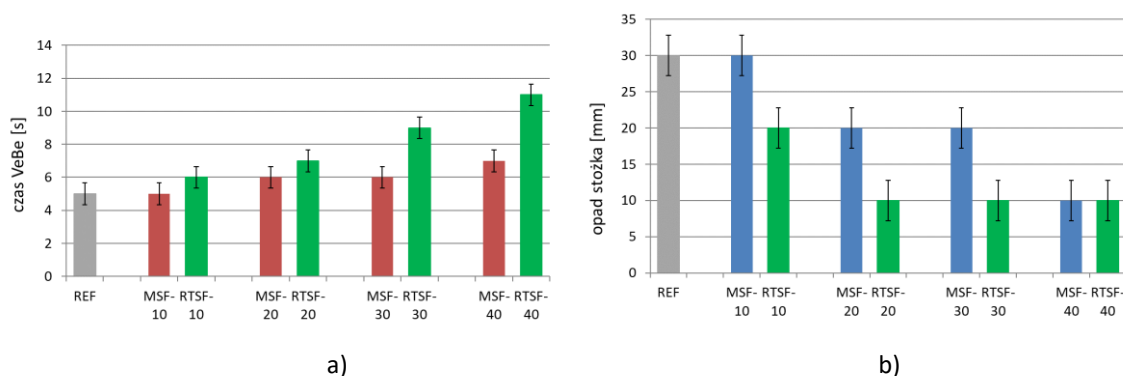
Włókna MSF są stosowane jako zbrojenie konstrukcyjne betonu i spełniają wymagania normy PN-EN 14889-1 [11]. Deklarowany przez producenta rodzaj materiału to: SAE 1006. Włókna pochodzą z drutu okrągłego ciągniętego na zimno o średnicy nominalnej 1,0 mm wykonany ze stali niskowęglowej (poniżej 0,1% C). Włókna RTSF otrzymywane są poprzez recykling mechaniczny opon i poddawane dodatkowej obróbce.

Dodatkowa obróbka polega na zastosowaniu separatorów powietrznych, wibracyjnych i magnetycznych, a końcowe oddzielenie tekstu resztek tekstylnych odbywa się za pomocą podciśnienia. Po oddzieleniu otrzymuje się frakcję granulatu gumowego i stalowego kordu. Właściwości geometryczne włókien MSF i RTSF przedstawiono w Tabeli 12.

10. Badania główne - efektywność zbrojenia betonu włóknami

10.1 Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu, granica proporcjonalności

Podczas formowania próbek w kształcie belek do badania wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu badano również konsystencję mieszanki betonowej wykonanej według betonu wzorcowego, którego skład zaprojektowano wg PN-EN 14845-1:2008 [205] i podano w Tabeli 11. Betony oznaczono symbolem włókien oraz ilością dozowanych włókien w kg/m^3 . Włókna MSF i RTSF dozowano ręcznie do mieszanki betonowej i mieszano ok. 10 min w celu uzyskania odpowiedniej homogenizacji włókien. Konsystencję badano metodą czasu VeBe i opadu stożka wg PN-EN 12350-3 [212]. Wyniki badań podano na Rysunku 46.



Rysunek 46. Konsystencja betonów wzorcowych z włóknami, a) metodą czasu VeBe, b) metodą opadu stożka

Analiza właściwości reologicznych fibrobetonów jest istotna z uwagi na znaczny wpływ dodatku włókien na spadek konsystencji mieszanek betonowych. Analizę wyników wykonano porównując mieszanki betonowe z taką samą ilością włókien MSF i RTSF.

Wyniki badań wskazują, że wraz ze wzrostem zawartości włókien, zarówno MSF jak i RTSF wpływają na spadek konsystencji mieszanki. Większy spadek konsystencji wykazały włókna recyklingowe z opon niż włókna stalowe normowe, jednak spadek nie jest na tyle duży, aby można było stwierdzić, że jest to problem technologiczny w tym zakresie. Problemem byłaby brak możliwości zbadania konsystencji jakkolwiek metodą (test VeBe lub opad stożka). Aby poprawić konsystencję fibrobetonów do mieszanki

betonowej dodawane są domieszki chemiczne. W tym przypadku beton wzorcowy nie zakładał dodatku domieszki chemicznej, w celu określenia wpływu jedynie na konsystencję włókien.

Spadek konsystencji fibrobetonów z dodatkiem RTSF wykazano również we wcześniejszych pracach [39,50,51,128], co może być związane z właściwościami geometrycznymi włókien.

Podkreślić należy, że mieszanka betonowa z dodatkiem oczyszczonych włókien recyklingowych z opon była jednorodna nawet przy dodatku 40 kg/m^3 włókien. Proces dodatkowego czyszczenia usuwa z powierzchni drutów resztki gumy i tekstyliów, przez co możliwa jest odpowiednia homogenizacja. Ręczne dozowanie włókien spowodowało, że w mieszance betonowej nie tworzyły się skupiska włókien (tzw. jeże). Równomierne rozmieszczenie włókien RTSF i MSF w mieszance betonowej wykazały również badania techniką tomografii komputerowej 3D (patrz rozdział 10.6).

Wytrzymałość resztkową na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach badano wg PN-EN 14651 [165] jako trójpunktowe zginanie belek z karbem. Badanie wykonano na 8 próbkach $150 \times 150 \times 500 \text{ mm}$ dla każdej receptury z włóknami przedstawionej w Tabeli 10, z nacięciem w połowie belki o szerokości ok 4 i głębokości ok 25 mm, stanowiącym propagację miejsca pęknięcia belki. Wynik wytrzymałości resztkowych stanowi średnią z 8 próbek. Podczas zginania rejestrowano obciążenie (kN) i rozwarcie rysy CMOD (mm) z częstotliwością 5 Hz do rozwarcia rysy CMOD = 3,5 mm, co pozwoliło na zarejestrowanie ok 5200 wyników obciążenie/CMOD dla jednej próbki. Zastosowana prędkość przyrostu obciążenia to 0,05 mm/min do CMOD = 0,1 mm, a następnie 0,2 mm/min. We wszystkich badanych próbkach pęknięcie nastąpiło w miejscu nacięcia i rozprzestrzeniło się prostopadle do dłuższej krawędzi belki. Pierwsze pęknięcie (granice proporcjonalności) wyznaczano zgodnie z EN 14651 [213] jako najwyższe obciążenie przy rozwarciu rysy CMOD od 0 do 50 μm . Na Fot. 35 przedstawiono obraz trójpunktowego zginania belki z nacięciem.

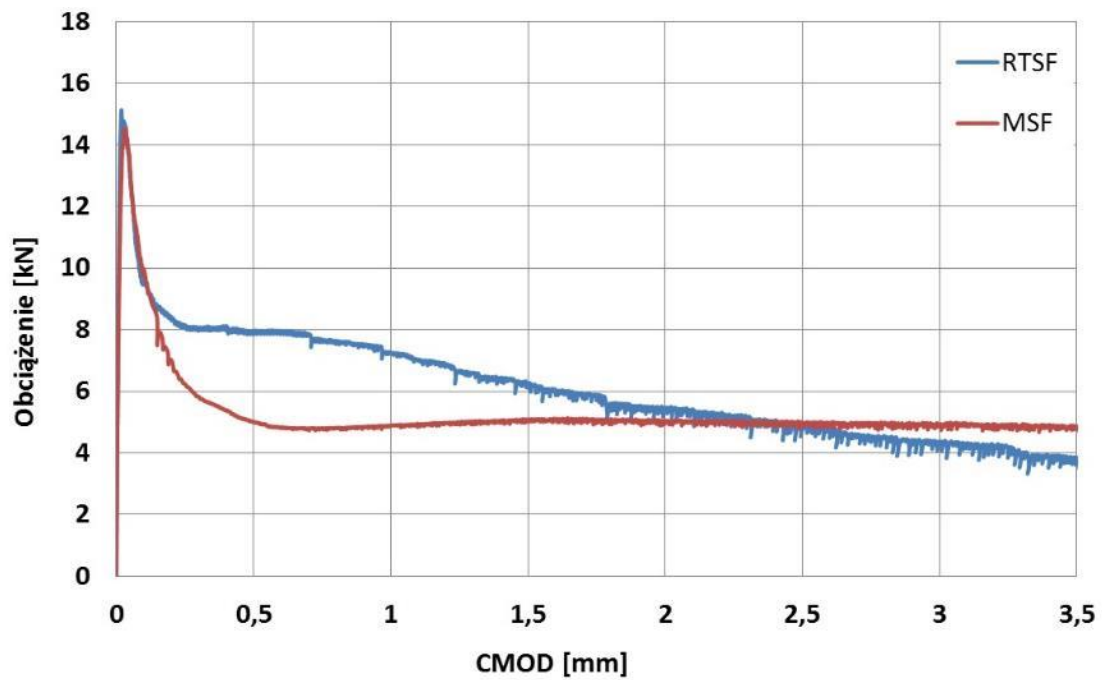


Fot 35. *Betonowa belka z włóknami po badaniu wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu w układzie trójpunktowego zginania*

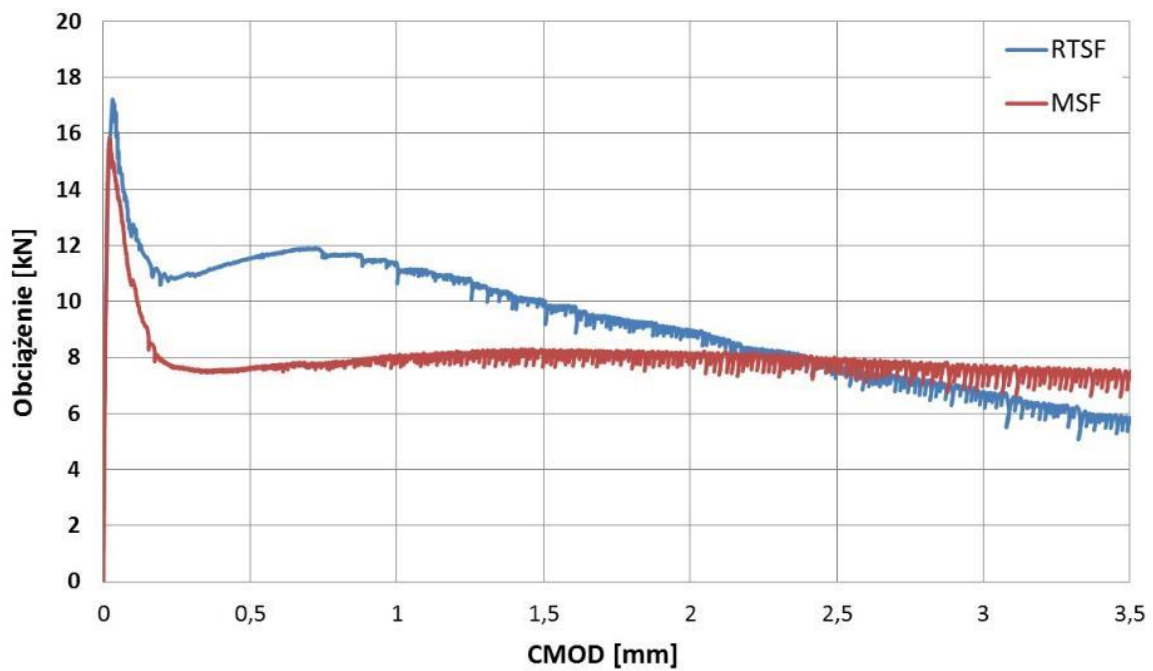
W Tabeli 18 podano średnie wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu betonów z włóknami MSF i RTSF. Natomiast na Rysunkach 47-49 przedstawiono porównanie krzywych obciążenie –rozwarcie rysy dla przykładowych próbek z włókinami RTSF i MSF.

Tabela 18. Wyniki wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu, średnie z 8 próbek

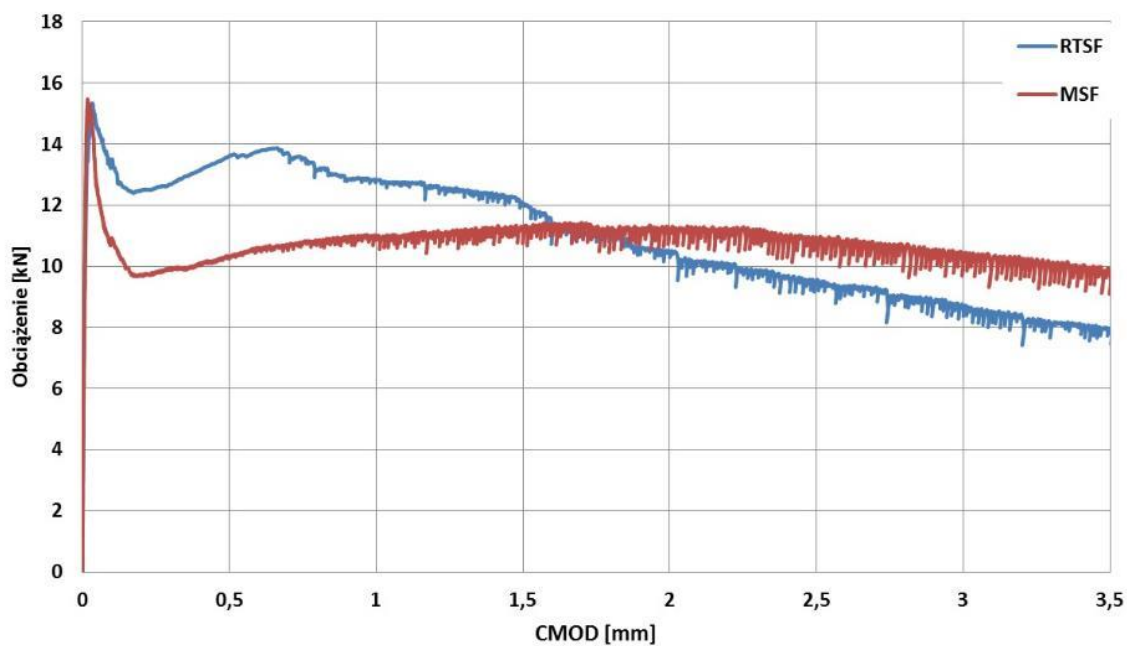
Oznaczenie betonu	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]				
	przy granicy proporcjonalności LOP	resztkowa wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu			
		CMOD ₁ = 0,5 mm	CMOD ₂ = 1,5 mm	CMOD ₃ = 2,5 mm	CMOD ₄ = 3,5 mm
MSF-10	4,73	1,69	1,57	1,48	1,32
MSF-20	4,71	2,30	2,10	2,14	1,97
MSF-30	4,79	2,70	2,70	2,55	2,36
MSF-40	4,86	3,79	3,93	3,74	3,28
RTSF-10	5,06	1,48	0,98	0,78	0,65
RTSF-20	4,53	2,16	1,69	1,25	1,01
RTSF-30	5,19	3,28	2,58	1,98	1,57
RTSF-40	5,14	4,33	3,65	2,88	2,28
niepewność pomiaru	±0,34	±0,18	±0,15	±0,16	±0,17



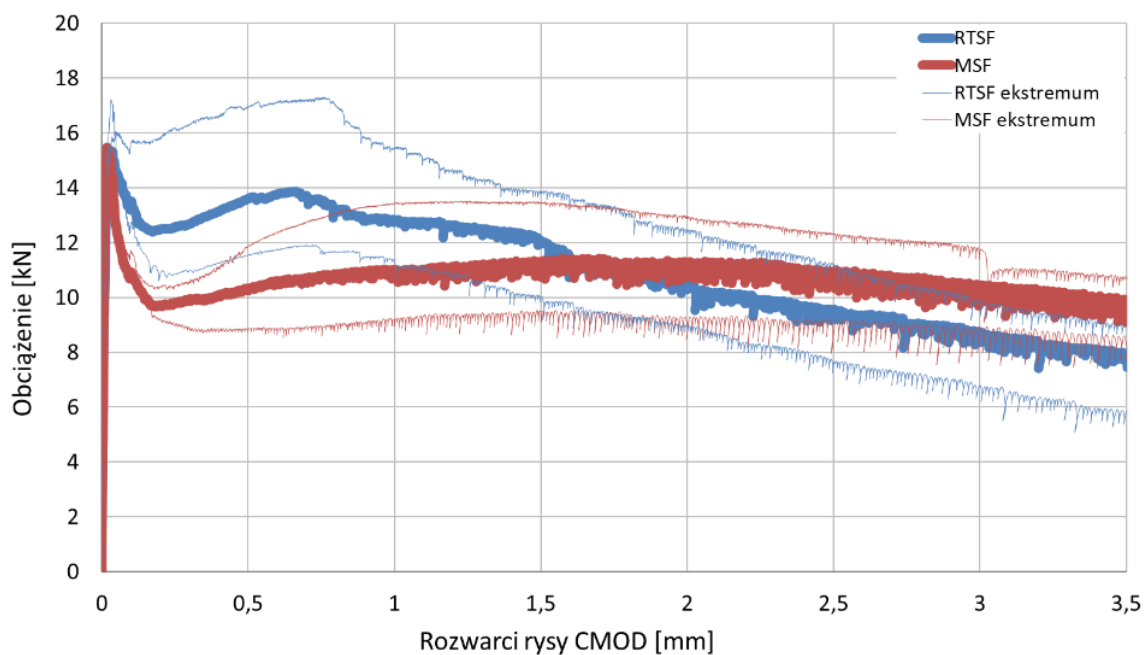
Rysunek 47. Zestawienie przykładowych wykresów obciążenie-rozwarcie rysy CMOD dla dozowania 20 kg/m³ włókien



Rysunek 48. Zestawienie przykładowych wykresów obciążenie-rozwarcie rysy CMOD dla dozowania 30 kg/m³ włókien.



Rysunek 49. Zestawienie przykładowych wykresów obciążenie-rozwarcie rysy CMOD dla dozowania 40 kg/m³ włókien



Rysunek 50. Krzywe obciążenie-rozwarcie rysy dla dozowania 40 kg/m³ włókien. Grube linie w środku przedstawiają najbardziej charakterystyczne kształty krzywych po pęknięciu, cienkie linie oznaczają wartości skrajne dla ośmiu badanych próbek

Analizując wyniki można stwierdzić, że dodatek włókien z recyklingu opon wpływa na nieznaczny wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu przy granicy

proporcjonalności, w porównaniu do włókien komercyjnych. Zależność tę obserwuje się zwłaszcza dla dozowania 30 i 40 kg/m³.

Wyniki wytrzymałości resztkowych na rozciąganie przy zginaniu oraz proces pęknięcia i przenoszenia obciążeń przez włókna ma inny przebieg dla włókien RTSF niż dla MSF (Rysunki 47-50). Krzywa obciążenie-rozwarcie rysy dla fibrobetonu z włóknami MSF po pęknięciu matrycy cementowej wykazuje stały, równomierny przebieg. Natomiast dla włókien RTSF wykres obciążenie-rozwarcie rysy, tuż po pęknięciu betonu, wykazuje tendencję do charakterystycznego wzrostu. Efekt skuteczniejszego zbrojenia włókien RTSF w porównaniu do MSF jest widoczny od momentu pęknięcia do rozwarcia szczeliny/rysy CMOD ok 1,3 mm (dla niektórych próbek nawet 2,3 mm). W tych przedziałach rozwarcia rysy można potwierdzić większą efektywność włókien RTSF niż MSF.

Analiza wyników badania na rozciąganie przy zginaniu dla konkretnych wartości rozwarcia rysy CMOD=(0,5; 1,5; 2,5; 3,5)mm wskazuje że przy dozowaniu 10 i 20 kg/m³ włókna RTSF wykazują niższe wartości wytrzymałości resztkowych niż włókna MSF. Dla dozowania 30 i 40 kg/m³ przy rozwarcia rysy 0,5 mm betony z oczyszczonymi włóknami RTSF wykazują wyższe wartości wytrzymałości resztkowych niż betony z taką samą ilością włókien MSF, co potwierdza skuteczność zbrojenia włóknami RTSF przy wyższym dozowaniu. Natomiast dla rozwarcia rysy 1,5 mm wytrzymałości resztkowe przy dozowaniu 30 i 40 kg/m³ są równoważne dla betonów z RTSF oraz MSF, a dla rozwarcia rysy 2,5 i 3,5 mm betonu z dodatkiem włókien MSF wykazują wyższe wytrzymałości resztkowe od RTSF. Powyższe rozważania można zaobserwować również na Rysunku 35-38, gdzie widać wyższe wytrzymałości betonów z włóknami RTSF dla rozwarcia rysy CMOD ok.1,2-1,5 mm. Podsumowując powyższe rozważania można stwierdzić, że efektywność zbrojenia betonu rośnie wraz ze wzrostem ilości dodawanych oczyszczonych włókien z recyklingu opon.

Podobne zależności wykazano we wcześniejszej pracy [33], gdzie wytrzymałości resztkowe na rozciąganie przy zginaniu rosną wraz ze wzrostem udziału RTSF w betonie, oraz w przypadku mieszania pewnej ilości RTSF z MSF. W pracy [42] betony z dodatkiem 35 kg/m³ włókien RTSF osiągnęły równoważną wytrzymałość na zginanie niż beton z taką samą ilością włókien stalowych komercyjnych. Natomiast w pracy [51] betony z dodatkiem RTSF osiągnęły niższe wytrzymałości niż z MSF, lecz w tej pracy badano beton ulrawysokowartościowy, którego właściwości nie można bezpośrednio porównać z betonem z niniejszej pracy.

W przypadku mniejszej ilości dozowanych włókien efekt wzmocnienia matrycy cementowej w betonie silnie zależy od efektywnej liczby włókien w polu przekroju próbki. Włókna z recyklingu opon są cieńsze niż MSF, przez co łatwiej jest je odkształcić. Dlatego przy większych odkształceniach liczba włókien z obszarem „zasięgu” próbek po obu stronach pęknięcia, porównywalna z ich długością, jest znacznie mniejsza niż w przypadku sztywnych (ze względu na średnicę) włókien MSF. Jednocześnie całkowita ilość włókien w polu przekroju poprzecznego jest znacznie większa dla włókien RTSF niż MSF, dlatego

efekt ich działania będzie szczególnie widoczny przy niewielkich odkształceniach. Efektywność zbrojenia betonu przez włókna dla małych wartości rozwarcia rysy zależy również od ilości włókien w betonie, kiedy efekt ilości włókien zaczyna dominować. Podsumowując, można stwierdzić, że im większa ilość przetworzonych włókien stalowych z recyklingu opon, tym lepsza skuteczność zbrojenia betonu.

10.2 Praca zniszczenia

O ile wytrzymałości resztkowe na rozciąganie przy zginaniu opisują charakterystykę mechaniczną fibrobetonów dla konkretnych ustalonych wartości rozwarcia rysy CMOD, tak praca zniszczenia charakteryzuje pełny przebieg procesu pęknięcia kompozytów cementowych z włóknami i stanowi miarę odporności na pęknięcie oraz efektywności zbrojenia betonu przez dane włókno. Praca zniszczenia betonu z włóknami została określona jako całkowite pole powierzchni pod krzywą obciążenie-ugięcie. Wykresy obciążenie-ugięcie dla każdej badanej próbki zostały przekształcone z wykresów obciążenie/rozwarcie rysy CMOD, stosując następujący przelicznik [213]:

$$\delta = (0,85\text{CMOD} + 0,04) \quad (16)$$

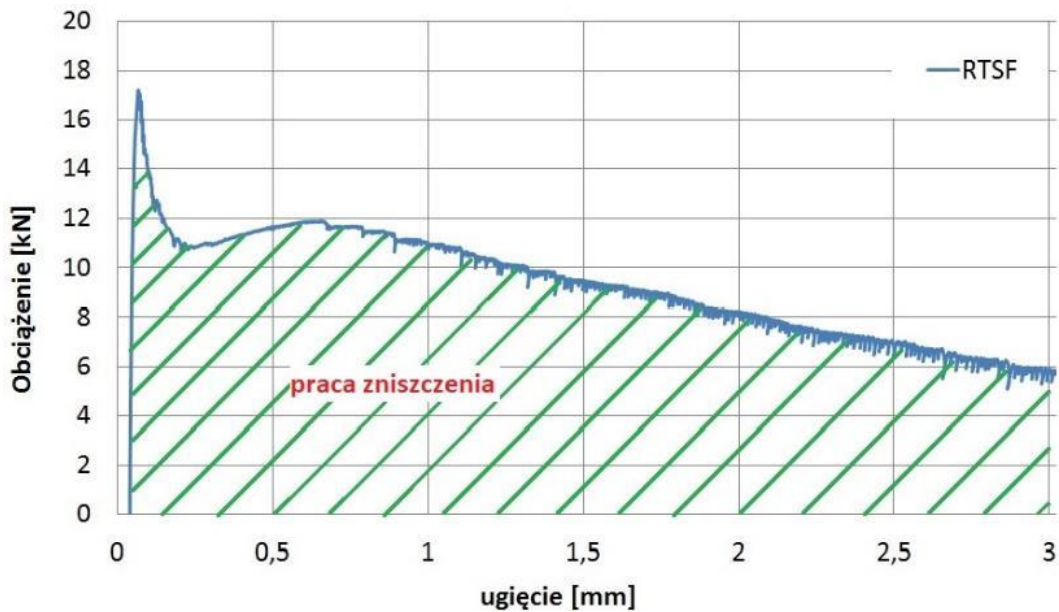
gdzie:

δ – ugięcie [mm]

CMOD – rozwarcie rysy/szczeliny [mm]

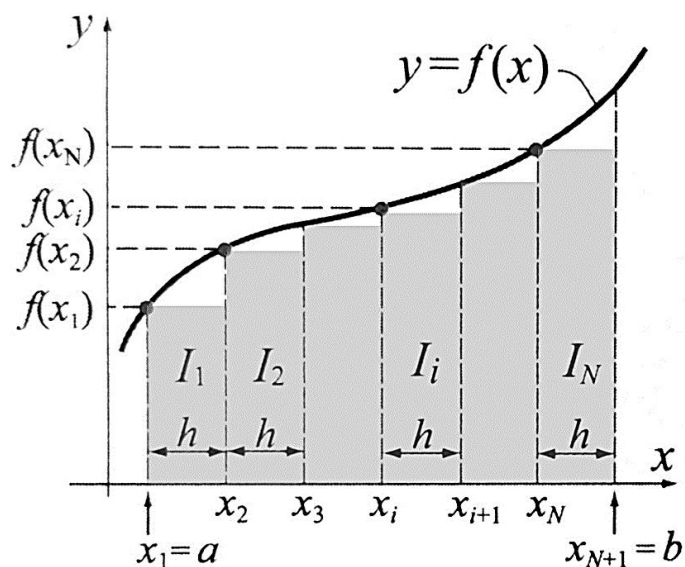
Pracę zniszczenia dla każdego wykresu wyznaczono do CMOD=3,5 mm (ugięcie=3,02 mm). Badanie przeprowadzono dla ośmiu próbek dla każdej receptury betonu wzorcowego, według Tabeli 11. Na Rysunku 51 przedstawiono schemat wyznaczania pracy zniszczenia, jako pola powierzchni pod wykresem obciążenie-ugięcie.

W niektórych pracach miara odporności na pęknięcie kompozytów zbrojonych włóknami wyznaczana była na podstawie energii pęknięcia [194,195,199], która oprócz pola powierzchni pod krzywą uwzględnia dodatkowe parametry jak wymiary, masę próbki i przyspieszenie ziemskie. Zdaniem autorów energia pęknięcia określa kontrolowany rozrost szczeliny w czasie pęknięcia wywołanego przykładową siłą w przypadku pęknięcia czysto kruchego. W przypadku pęknięcia kompozytów cementowych z włóknami, na proces po pierwszym pęknięciu matrycy cementowej składa się kilka procesów, m.in. wywlekanie włókna po jego oderwaniu od matrycy (tarcie włókna, jego odkształcenie plastyczne), na co jest zużytkowana energia. Nie jest to więc proces samego pęknięcia matrycy cementowej, gdyż na wzrost ilości pochłanianej energii w czasie niszczenia mają wpływ inne mechanizmy. Natomiast w procesie pęknięcia fibrobetonów zawsze wykonywana jest praca, która została określona jako pole powierzchni pod krzywą.



Rysunek 51. Schemat wyznaczania pracy zniszczenia jako pole powierzchni pod wykresem obciążenie-ugięcie

Pole powierzchni pod krzywą obciążenie-ugięcie wyznaczono metodą prostokątów. Podczas zginania jednej belki z nacięciem zgodnie z PN-EN 14651 [165] rejestrowanych jest ok 5200 wyników obciążenie-CMOD dla jednej próbki. Do obliczenia pola powierzchni pod wykresem, od ugięcia 0 mm do 3,02 mm wykorzystano metodą całkowania numerycznego (prostokątów). Schemat wyznaczania pola powierzchni pod wykresem, metoda prostokątów przedstawiono na Rysunku 52.



Rysunek 52. Schemat wyznaczania pola powierzchni pod wykresem metodą prostokątów [214]

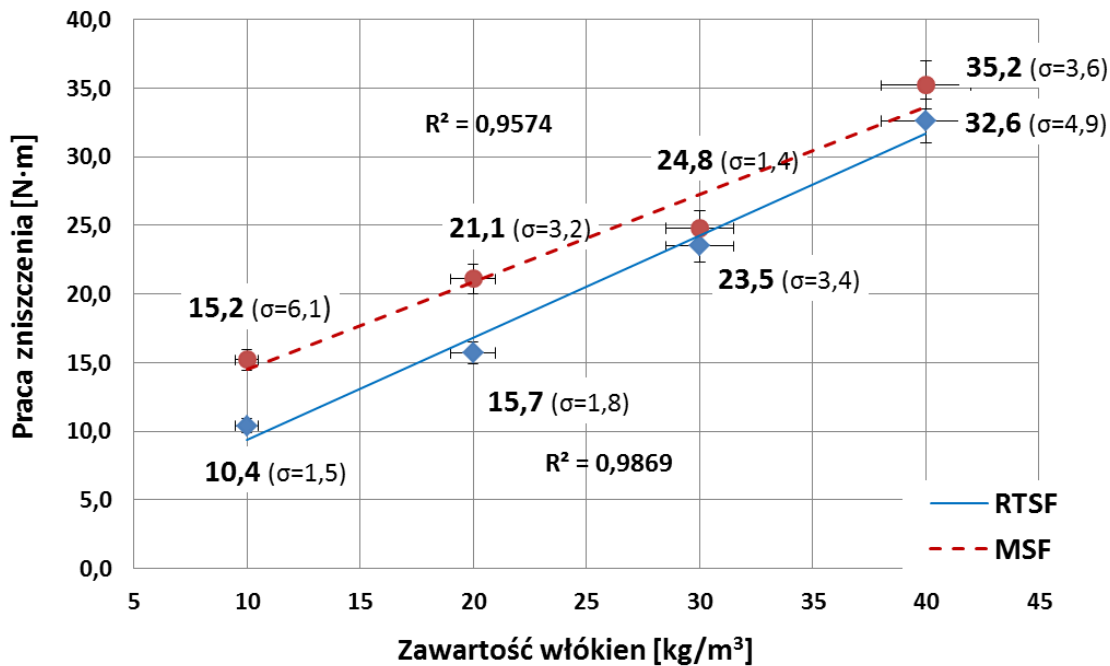
Metoda prostokątów polega na przybliżeniu pola powierzchni pod $f(x)$ w przedziale $[a,b]$ sumą pól prostokątów, utworzonych przez podział $[a,b]$ na N mniejszych podprzedziałów, natomiast h to szerokość przedziału. Formuła obliczeniowa przedstawia się następująco [214]

$$I(f) = \int_a^b f(x)dx \approx h \sum_{i=1}^N f(x_i) \quad (17)$$

Metoda prostokątów to suma prostokątów w obszarze ograniczonym wykresem funkcji, gdzie wysokość prostokątów jest równa długości kroku całkowania a wysokość prostokątów jest równa wartości funkcji w przedziale określonym przez krok całkowania [215]. Im mniejszy krok całkowania tym dokładniejsze wyznaczenie pola powierzchni. W przypadku niniejszej pracy doktorskiej pole powierzchni dla jednej próbki wyznaczano jako sumę ok. 5200 prostokątów pod wykresem, co daje bardzo dokładny wynik obliczeń. Wyniki badań pracy zniszczenia przedstawiono w Tabeli 19 i na Rysunku 53. Wynik stanowi średnią z ośmiu próbek betonowych dla każdego dozowania włókien RTSF i MSF.

Tabela 19. Wyniki badań pracy zniszczenia dla próbek z włóknami MSF i RTSF

Praca zniszczenia [N·m]								
I.p.	RTSF-10	MSF-10	RTSF -20	MSF -20	RTSF -30	MSF -30	RTSF -40	MSF -40
1	9,1	11,2	14,5	23,4	27,7	25,7	31,3	35,4
2	11,2	22,6	18,5	24,3	19,3	24,7	26,2	36,8
3	12,8	19,5	15,7	15,8	25,5	23,9	30,2	32,8
4	9,5	7,1	14,0	22,0	27,5	24,3	39,4	33,8
5	10,3	23,1	14,5	25,2	23,6	22,3	33,1	43,2
6	10,8	8,7	18,5	20,6	21,8	27,1	38,8	33,2
7	11,6	14,3	14,5	19,6	23,8	24,8	30,0	32,0
8	8,0	15,1	15,7	18,5	18,6	25,2	26,8	34,4
średnia	10,4	15,2	15,7	21,2	23,5	24,8	32,0	35,2



Rysunek 53. Zależność pracy zniszczenia od ilości i rodzaju włókien (σ – odchylenie standardowe)

Zarówno dla betonów z włóknem MSF jak i RTSF praca zniszczenia, czyli odporność na kruche pękanie rośnie wraz ze wzrostem ilości włókien w betonie, jednak dla włókien MSF ta korelacja jest nieco słabsza (współczynnik korelacji $R^2=0,9574$) w stosunku do dla włókien RTSF ($R^2=0,9869$). Analiza wyników wskazuje, że dla dozowania 10 kg/m³ i 20 kg/m³ betony z dodatkiem włókien komercyjnych MSF wykazują większą pracę zniszczenia odpowiednio o 32% i 28% niż betony z dodatkiem włókien z recyklingu opon RTSF. Jednak dla dozowania 30 kg/m³ praca zniszczenia dla betonów z MSF jest większa tylko o 5 % a dla dozowania 40 kg/m³ o 7% od betonów z RTSF. Biorąc pod uwagę charakterystykę materiału można wnioskować, że praca zniszczenia, obu porównywanych kompozytów z dodatkiem 30 i 40 kg/m³ włókien jest równoważna.

Efektywność zbrojenia betonu włóknami RTSF jest większa przy większej ilości włókien w betonie. Przedstawione wnioski można zaobserwować również na Rysunkach 47-50, gdzie widać zupełnie inny przebieg pęknięcia dla obu betonów. Dla betonów z włóknami RTSF po pęknięciu matrycy cementowej widoczny jest wzrost wartości obciążenia w przedziale ok. 0,3-1,3 CMOD na wykresie obciążenie-rozwarcie rysy, związana z efektywnym zbrojeniem włókien tuż po pęknięciu matrycy cementowej, gdzie swoją pracę zaczyna wykonywać zbrojenie rozproszone.

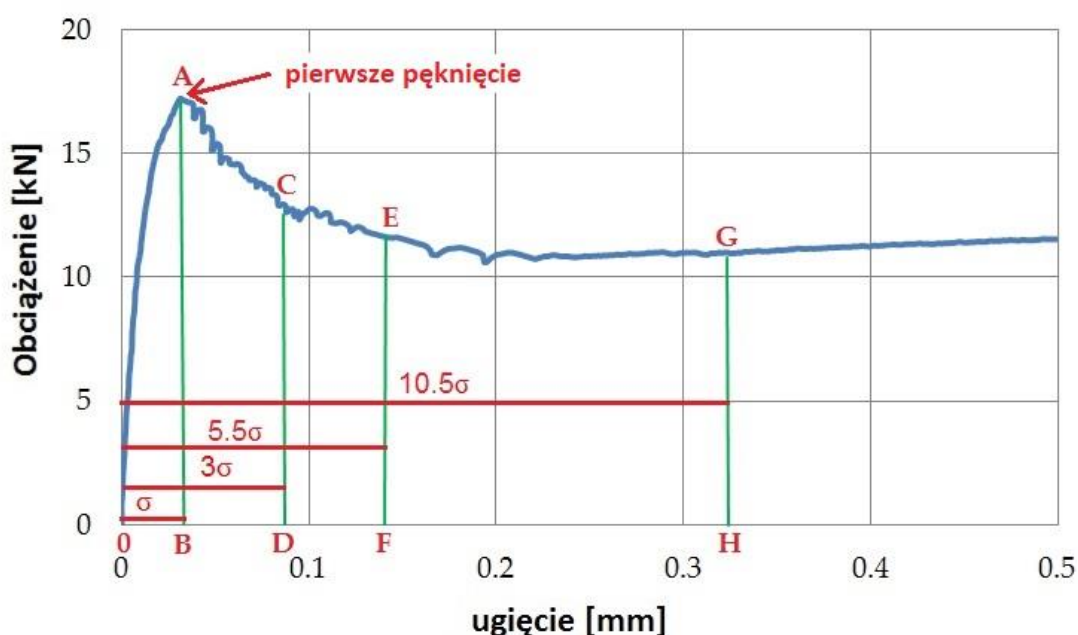
Określenie pracy zniszczenia jako miarę odporności na kruche pękanie i efektywności zbrojenia betonu przez włókna z recyklingu opon jest aspektem innowacyjnym w niniejszej pracy jest. Analizując literaturę nie znaleziono wcześniejszych prac, które określały odporność na pękanie mierzoną pracą zniszczenia dla betonów z dodatkiem włókien z recyklingu opon. Badania pracy zniszczenia wykazały, że wraz z

dotądkiem włókien RTSF praca zniszczenia różnie i dla dodatku 30 i 40 kg/m³ jest równoważna jak dla betonów z dodatkiem MSF.

10.3 Wskaźniki odporności na pęknięcie

Wskaźniki odporności na pęknięcie I_5 , I_{10} , I_{20} zostały wyznaczone wg ASTM C1018-97 [202] z wykresów obciążenie/ugięcie dla próbek betonowych po 28 dniach dojrzewania. Obciążenie przy granicy proporcjonalności F_{LOP} obliczono wg PN-EN 14651[165]. Dla wartości obciążenia F_{LOP} wyznaczono ugięcie σ_{LOP} , a następnie ugięcie $3\sigma_{LOP}$, $5,5\sigma_{LOP}$ oraz $10,5\sigma_{LOP}$, oraz odpowiadające tym ugięciom obciążenia. Następnie wyznaczono pole powierzchni pod wyznaczonymi obszarami na wykresie obciążenie–ugięcie oraz obliczono wskaźniki I_5 , I_{10} i I_{20} . Badanie przeprowadzono dla 8 każdej receptury betonu z włóknami MSF i RTSF.

Różnica pomiędzy badaniem wskaźników odporności na pęknięcie a pracą zniszczenia polega na tym, że pracę zniszczenia wyznacza się jako całkowite pole powierzchni pod krzywą obciążenie-ugięcie, do ugięcia 3,02 mm dla każdej próbki. Natomiast wskaźniki odporności na pęknięcie wyznacza się jako stosunek pola powierzchni $3\sigma_{LOP}$, $5,5\sigma_{LOP}$ oraz $10,5\sigma_{LOP}$ do pola powierzchni przypadającą ugięciu na granicy proporcjonalności σ_{LOP} . Stąd wskaźniki odporności na pęknięcie określają charakterystykę pęknięcia materiału tylko w początkowym procesie pęknięcia próbki. Na Rysunku 54 przedstawiono schemat wyznaczania wskaźników odporności na pęknięcie zgodnie z ASTM C1018-97 [202].



Rysunek 54. Schemat wyznaczania wskaźników odporności na pęknięcie zgodnie z ASTM C1018-97 [202]

Wskaźniki odporności na pękanie wyznaczone według następujących zależności:

$$I_5 = \frac{OACD}{OAB} \quad (13)$$

$$I_{10} = \frac{OAEF}{OAB} \quad (14)$$

$$I_{20} = \frac{OAGH}{OAB} \quad (15)$$

gdzie:

OAB – pole pod krzywą wyznaczone do ugięcia odpowiadającego pierwszemu pęknięciu σ ,

$OACD$ – pole pod krzywą do ugięcia 3σ ,

$OAEF$ – pole pod krzywą do ugięcia $5,5\sigma$,

$OAGH$ – pole pod krzywą do ugięcia $10,5\sigma$.

Pole powierzchni pod wykresem dla wyznaczonych ww. obszarów obliczono metodą całkowania numerycznego – metodą prostokątów. Wyniki badań wskaźników odporności na pękanie przedstawiono w Tabelach 20-23, oraz na Rysunkach 55-58.

Tabela 20. Wskaźniki odporności na pękanie I_5 , I_{10} , I_{20} dla 10 kg/m³ włókiem MSF i RTSF

MSF-10	Wskaźniki odporności na pękanie			RTSF-10	Wskaźniki odporności na pękanie		
	I_5	I_{10}	I_{20}		I_5	I_{10}	I_{20}
1	3,4	5,5	8,6	1	3,2	5,1	7,7
2	3,1	5,1	8,3	2	3,1	5,1	7,5
3	3,4	5,7	8,8	3	3,2	5,2	8,4
4	3,0	5,0	7,2	4	3,5	5,8	9,1
5	3,2	5,4	9,1	5	3,1	4,8	7,2
6	3,7	6,3	9,9	6	3,1	4,9	7,6
7	3,5	5,7	9,1	7	3,0	4,7	7,4
8	3,2	5,2	8,1	8	3,1	4,9	7,0
średnia	3,3	5,5	8,6	średnia	3,2	5,1	7,7

Tabela 21. Wskaźniki odporności na pękanie I₅, I₁₀, I₂₀ dla 20 kg/m³ włókiem MSF i RTSF

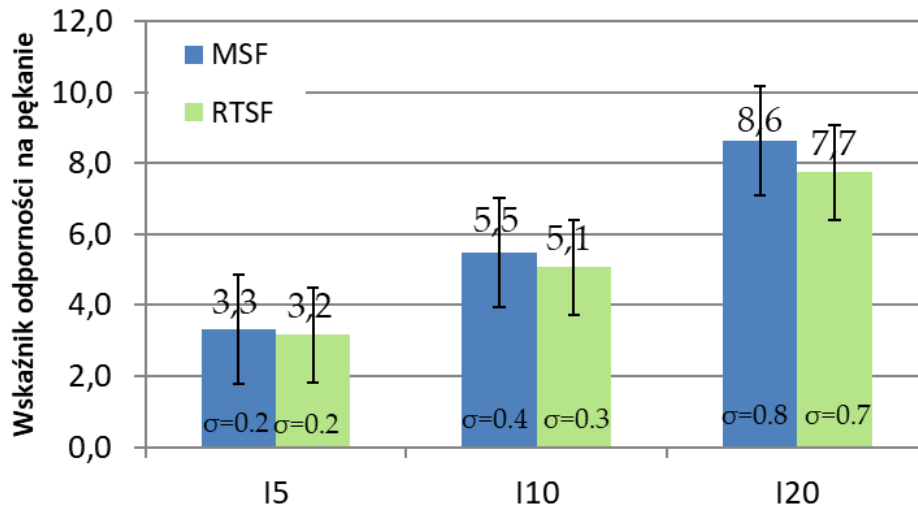
MSF-20	Wskaźniki odporności na pękanie			RTSF-20	Wskaźniki odporności na pękanie		
	I ₅	I ₁₀	I ₂₀		I ₅	I ₁₀	I ₂₀
1	3,4	6,1	10,8	1	3,5	5,8	9,3
2	3,4	5,9	10,1	2	3,9	6,5	11,1
3	3,2	5,2	8,0	3	3,6	6,0	10,0
4	3,4	5,7	9,2	4	3,4	5,7	9,3
5	3,4	5,9	10,1	5	3,5	5,9	9,7
6	3,3	5,6	9,1	6	3,9	6,5	11,1
7	3,2	5,2	8,4	7	3,7	6,3	10,3
8	3,1	5,1	8,2	8	3,2	5,5	9,2
średnia	3,3	5,6	9,2	średnia	3,6	6,0	10,0

Tabela 22. Wskaźniki odporności na pękanie I₅, I₁₀, I₂₀ dla 30 kg/m³ włókiem MSF i RTSF

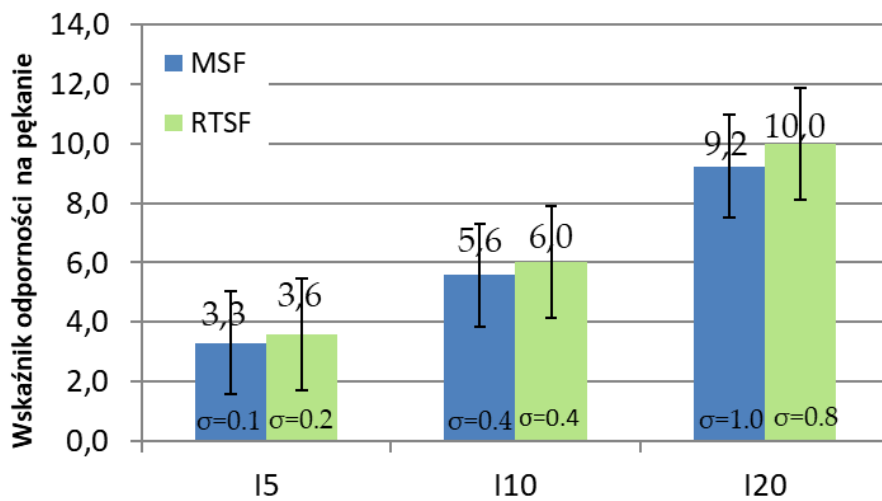
MSF-30	Wskaźniki odporności na pękanie			RTSF-30	Wskaźniki odporności na pękanie		
	I ₅	I ₁₀	I ₂₀		I ₅	I ₁₀	I ₂₀
1	3,3	5,7	10,0	1	3,4	5,7	10,1
2	3,6	6,2	10,7	2	3,6	6,5	11,5
3	3,6	6,2	10,1	3	3,3	5,8	10,5
4	3,6	5,8	9,9	4	3,5	6,3	11,3
5	4,0	7,1	12,3	5	3,6	6,2	10,9
6	3,8	6,8	12,0	6	3,5	6,1	10,6
7	3,4	5,8	10,1	7	3,4	5,9	10,2
8	3,5	5,9	10,2	8	3,4	5,7	9,5
średnia	3,6	6,2	10,7	średnia	3,5	6,0	10,6

Tabela 23. Wskaźniki odporności na pękanie I₅, I₁₀, I₂₀ dla 40 kg/m³ włókiem MSF i RTSF

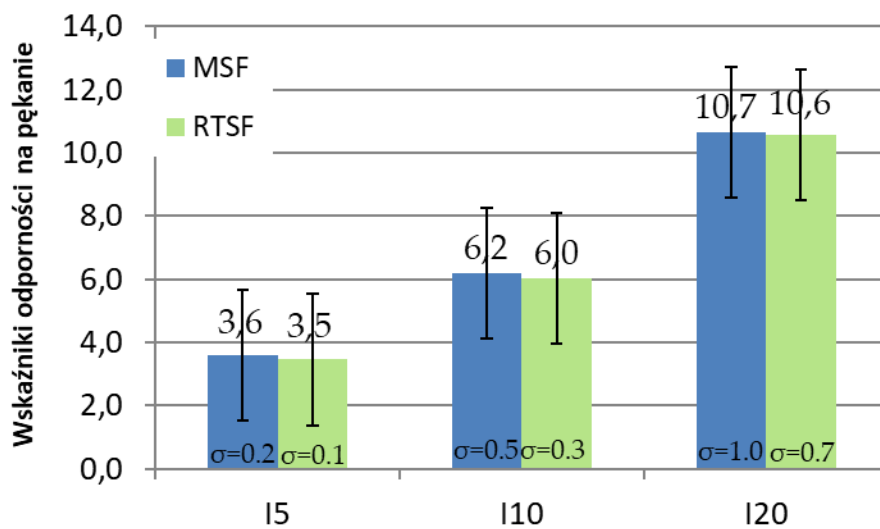
MSF-40	Wskaźniki odporności na pękanie			RTSF-40	Wskaźniki odporności na pękanie		
	I ₅	I ₁₀	I ₂₀		I ₅	I ₁₀	I ₂₀
1	3,2	5,5	10,0	1	3,5	6,5	12,3
2	3,0	5,2	9,6	2	3,4	5,9	11,0
3	3,6	6,4	11,6	3	3,4	6,0	10,8
4	3,5	6,1	10,9	4	3,4	6,4	12,8
5	3,4	6,1	11,8	5	3,4	6,1	11,6
6	3,4	6,3	12,4	6	3,4	6,3	12,4
7	3,8	6,7	11,9	7	3,5	6,6	11,7
8	3,5	6,0	10,9	8	3,4	6,2	11,4
średnia	3,4	6,0	11,1	średnia	3,4	6,3	11,8



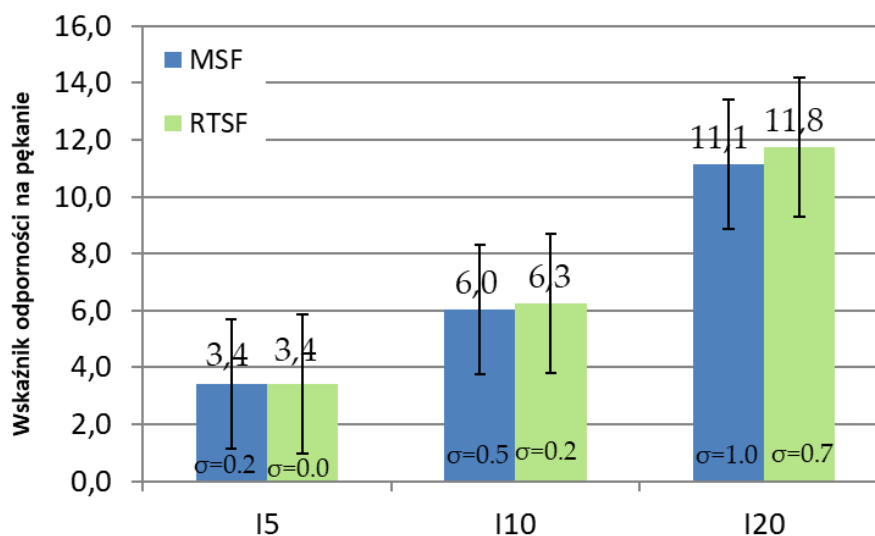
Rysunek 55. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 10 kg/m³



Rysunek 56. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 20 kg/m³



Rysunek 57. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 30 kg/m³



Rysunek 58. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 40 kg/m³

Analiza wskaźników odporności na pękanie I₅, I₁₀ i I₂₀ wskazuje, że przy dozowaniu 10 kg/m³ betony z dodatkiem włókien MSF osiągają wyższe wartości niż betony z włóknami RTSF. Jednak wraz ze wzrostem ilości włókien RTSF wskaźniki odporności na pękanie osiągają równoważne, a nawet wyższe wartości niż włókna MSF. Wyraźną różnicę zaobserwować można dla dozowania 40 kg/m³ gdzie wskaźniki odporności na pękanie I₁₀ i I₂₀ są wyższe dla betonów z dodatkiem oczyszczonych włókien z recyklingu opon RTSF w porównaniu z taką samą ilością włókien MSF. Dla dozowania > 30 kg/m³ włókna z recyklingu opon RTSF wykazują większą skuteczność zbrojenia niż włókna MSF.

Biorąc pod uwagę charakterystykę materiału można stwierdzić, że wskaźniki odporności na pękanie I₅ są na tym samym poziomie (wartości 3,2 - 3,6) dla każdej zawartości włókien RTSF i MSF. Podobnie dla wskaźników I₁₀ (wartości 5,1 - 6,2). Dla wskaźników I₂₀ zaobserwowano nieznaczny wzrost wartości wraz ze wzrostem ilości włókien, zarówno dla RTSF, jak i MSF.

Przeanalizowano również wcześniejsze prace w zakresie wyznaczania wskaźników odporności na pękanie dla betonów z dodatkiem RTSF. W pracy [128] badano wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu i wskaźniki odporności na pękanie podczas 4-punktowego zginania betonów z dodatkiem włókien RTSF w ilości 1,0% i z dodatkiem mieszaniny włókien RTSF oraz mikrowłókien polimerowych. Beton z dodatkiem tylko RTSF w ilości 1,0% osiągnął najlepsze wyniki wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (większą o 116% niż beton bez włókien) w porównaniu do pozostałych betonów z mieszaniną włókien. Natomiast wskaźniki odporności na pękanie kształtowały się różnie, najlepsze wyniki uzyskał beton z dodatkiem 50% włókien RTSF i 50% mikrowłókien polimerowych. W pracy [49] badano również wskaźniki odporności na pękanie I₅, I₁₀ i I₂₀ betonu z dodatkiem 30 kg/m³ włókien komercyjnych i włókien z recyklingu opon. W tych badaniach wskaźniki I₅, I₁₀ i I₂₀ były niższe dla betonu z włóknami z opon niż dla betonu z włóknami komercyjnymi.

Uogólniając powyższe rozważania można podsumować, że odporność na pękanie betonów z udziałem dodatkowo oczyszczonych włókien RTSF, mierzona na podstawie wskaźników odporności na pękanie I_5 , I_{10} i I_{20} jest równoważna, lub w niektórych przypadkach większa niż betonów z dodatkiem komercyjnych włókien stalowych MSF. Wyniki te można przypisać charakterystycznemu przebiegowi pękania betonów z włóknami RTSF, które po pęknięciu matrycy cementowej wykazują wzrost siły na wykresie obciążenie-ugięcie, i to właśnie w tym obszarze określane są wskaźniki I_5 , I_{10} i I_{20} .

Dobłą efektywność zbrojenia betonu włóknami RTSF można przypisać hybrydowej charakterystyce geometrycznej włókien, które stanowią mieszaninę włókien o różnym zakresie długości, średnic i kształtu co umożliwia oddziaływanie mechanizmu mostkowania mikropęknięć na kilku poziomach mikrostruktury matrycy cementowej [133,135–139,216]. Należy podkreślić że włókna RTSF porównywane są z jednorodnymi włóknami komercyjnymi o grubszej średnicy, jednakowej długości i dodatkowo haczykowatym kształcie, co stanowi konkurencję dla włókien z recyklingu opon. Ponadto oprócz właściwości geometrycznych, kluczową rolę w skutecznym zbrojeniu kompozytów cementowych przez włókna z recyklingu opon pełni ich czystość. Jak wskazują liczne prace naukowe [33,38,45–51] zanieczyszczenia gumowe i tekstylne, obecne w nieoczyszczonych dodatkowo włóknach z opon, wpływają na pogorszenie skuteczności zbrojenia, m.in. poprzez tworzenie ciągłej otoczki na powierzchni włókien i tym samym zmniejszenie przyczepności włókien do matrycy cementowej.

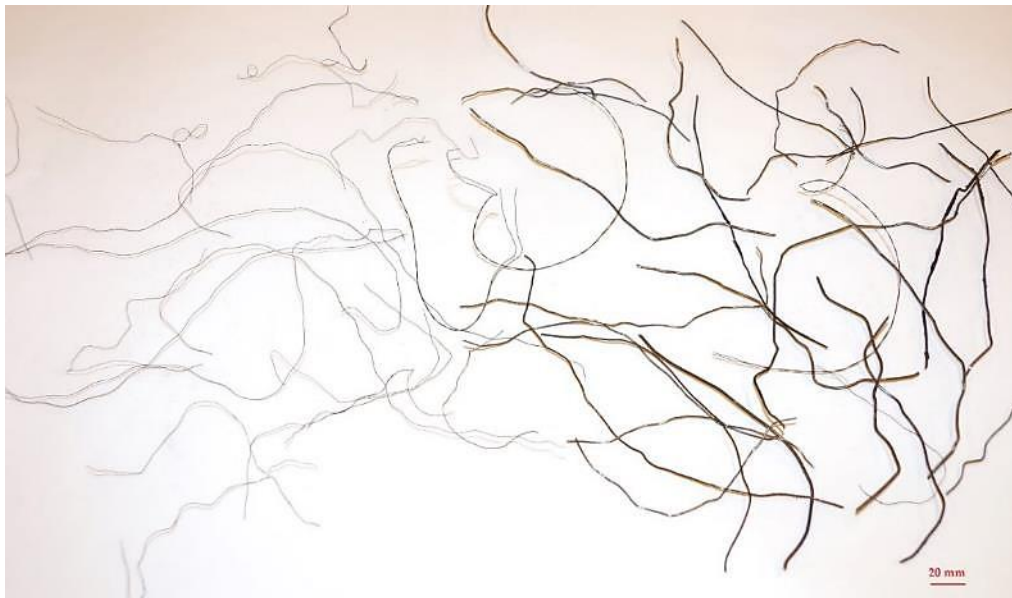
Dobłą przyczepność do matrycy cementowej potwierdzają również bezpośrednie badania przyczepności włókien do matrycy cementowej a także zdjęcia mikroskopowe, na których widać produkty hydratacji na włóknach zarówno MSF jak i RTSF. Wyniki badań przyczepności i analiz mikroskopowych przedstawiono w kolejnych rozdziałach.

10.4 Przyczepność włókien do matrycy cementowej

Badanie przyczepności włókien do matrycy cementowej zostało wykonane w celu oceny i porównania przyczepności włókien z opon i włókien komercyjnych do matrycy cementowej, gdyż przyczepność ma kluczowe znaczenie dla oceny efektywności zbrojenia. Do badania przyczepności wykorzystano druty, tj. dłuższe odcinki włókien stalowych o długości ok. 30 cm. Od producenta oczyszczonych włókien z recyklingu opon pozyskano dwa rodzaje drutów RTSF, różniące się średnicami tj. ok 0,23 mm i ok. 1,1 mm. Natomiast od producenta włókien stalowych MSF-1 i MSF-2 pozyskano druty przed pocięciem, z tej samej stali co włókna. Wygląd drutów MSF i RTSF przed badaniem przedstawiono na Fot. 36 i 37.



Fot 36. Druty MSF do badania przyczepności (MSF-1 po prawej, MSF-2 po lewej)



Fot 37. Druty RTSF do badania przyczepności

Badanie przyczepności drutów stalowych do matrycy cementowej wykonano na próbkach zaprawy cementowej o wymiarach 40x40x160 mm do których zostały włożone druty stalowe na głębokość 40 mm (przez całą wysokość próbki). Obraz przygotowanych próbek badawczych przedstawiono na Rysunku 59. Zaprawę cementową wykonano na cemencie CEM I 32,5 N oraz piasku normowym CEN zgodnym z normą PN-EN 196-1 [217]. Proporcje składników były następujące: 450 g cementu CEM I 32,5N, 1350 g piasku normowego CEN, 225 g wody. Skład ilościowy zaprawy dobrano w ten sposób, aby jej wytrzymałość na ściskanie nie była zbyt wysoka po to, aby podczas badania *pull-off* druty stalowe były wyciągane bez zerwania. Wytrzymałość na ściskanie próbek zaprawy cementowej wyniosła średnio 20,0 MPa. Badania przeprowadzono na czterech rodzajach drutów: dwa rodzaje drutów z opon RTSF o dwóch średnicach oraz dwa rodzaje drutów

komercyjnych MSF o dwóch średnicach, z których wytwarzane są następnie włókna stalowe:

- RTSF o średnicy ok. 0,23 mm i ok. 1,1 mm,
- MSF o średnicy 0,65 mm (z których produkowane są włókna MSF-2) oraz o średnicy 1,0 mm (z których produkowane są włókna MSF-1).

Dla każdego rodzaju włókien i każdej średnicy wykonano 10 pomiarów przyczepności w próbie wyciągania. Próbkę z włóknem zamocowano w maszynie wytrzymałościowej dociskając próbkę zaprawy metalową płytą z otworem, a końce drutów zamocowano w szczękach maszyny wytrzymałościowej, zachowując osiowość oraz taką samą dla wszystkich próbek odległość pomiędzy szczękami maszyny a płytka blokująca. Zastosowano prędkość wyciągania 100 mm/min. Układ badawczy przedstawiono na Rysunku 60. W badaniu rejestrowano maksymalną siłę przy wyciąganiu, podczas której włókno oderwało się od zaczynu cementowego.

Przyczepność przy wyciąganiu jest wyrażone symbolem τd i obliczane jest ze wzoru (1).

$$\tau d = \frac{F}{\pi d l} \quad (18)$$

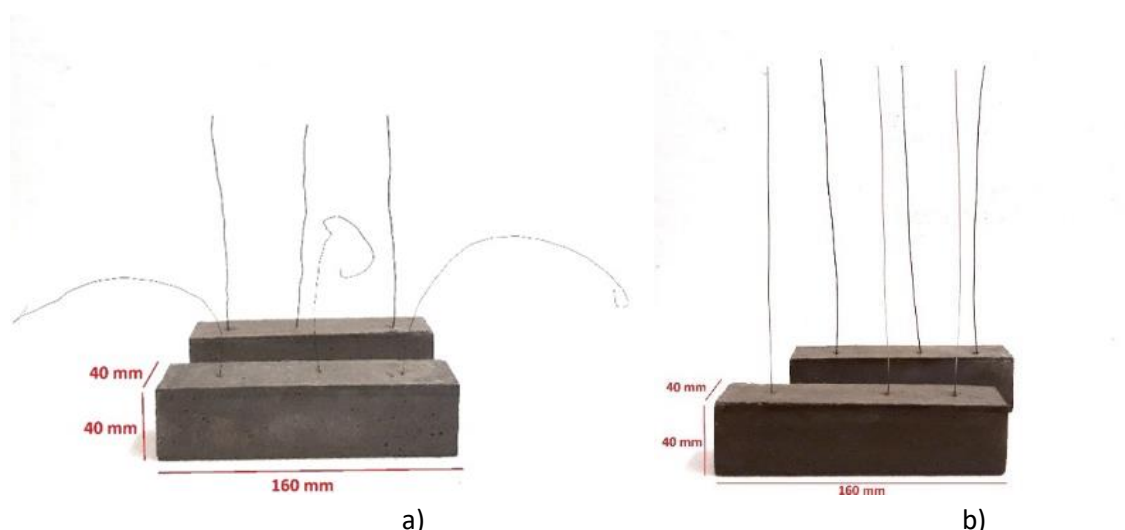
gdzie :

τd – przyczepność [MPa]

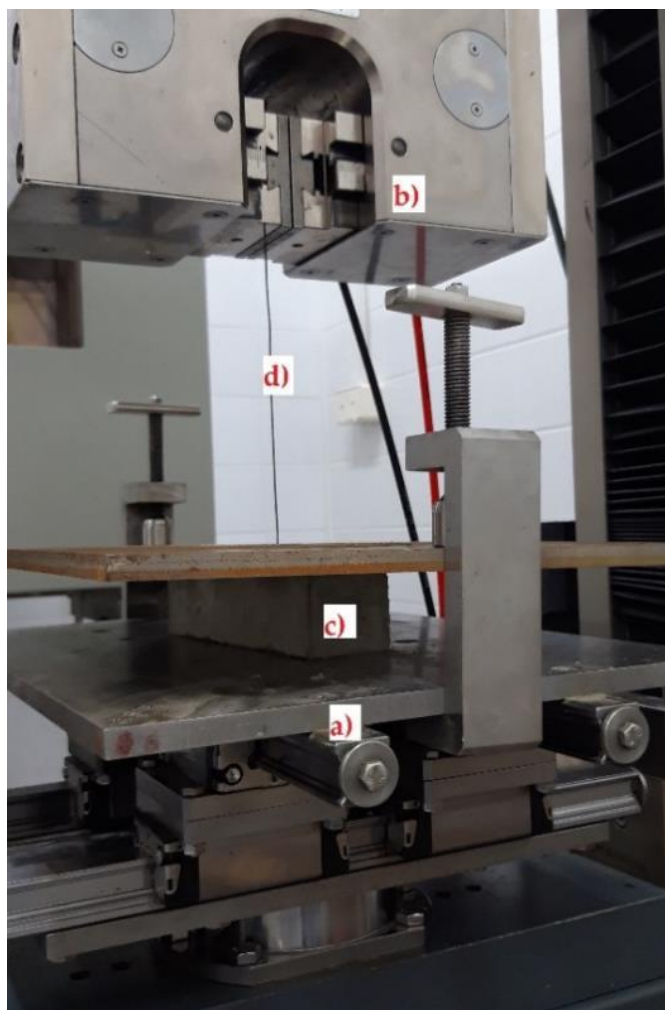
F – maksymalna siła przy wyciąganiu [N]

d – nominalna średnica drutu [mm]

l – wysokość zakotwienia drutu [mm], $l=40$ mm

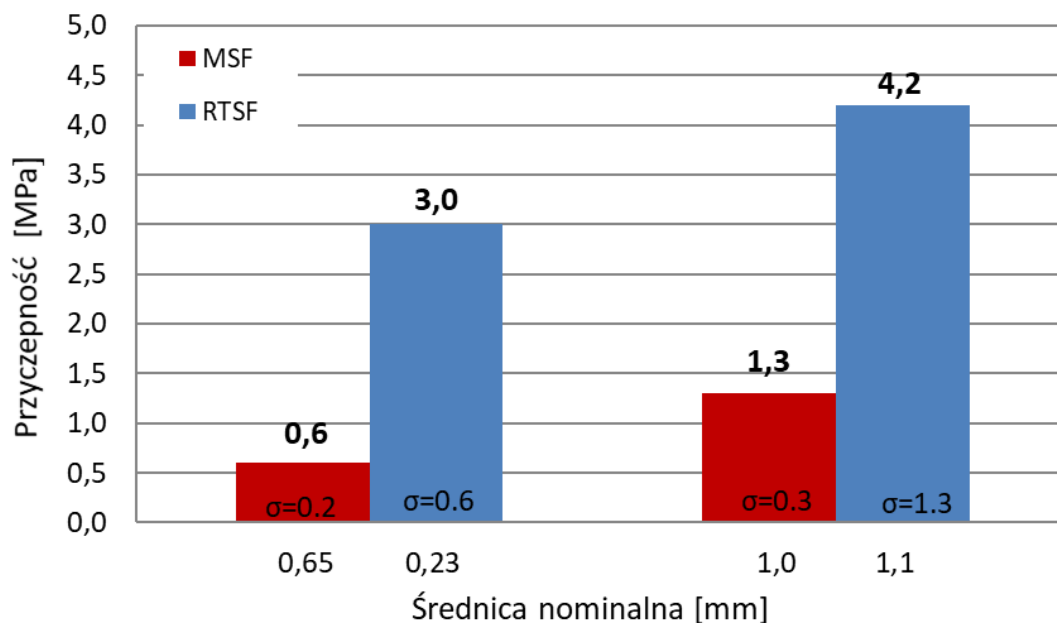


Rysunek 59. Przykładowe próbki do badania przyczepności przy wyciąganiu, (a) RTSF druty, (b) druty MSF



Rysunek 60. Badanie przyczepności – próba wyciągania: a) podpora stała, b) głowica zaciskowa, c) próbka zaprawy, d) drut RTSF

Uzyskanie drutów z recyklingu opon RTSF o takich samych średnicach jak druty stalowe komercyjne jest niemożliwe, dlatego w badaniu przyczepności porównywano ze sobą druty RTSF i MSF o najbardziej zbliżonych średnicach, w celu oceny przyczepności. Na Rysunku 61 przedstawiono wyniki badań przyczepności dla drutów RTSF i MSF, zakotwionych w zaprawie cementowej.



Rysunek 61. Przyczepność drutów MSF i RTSF o różnych średnicach (σ – odchylenie standardowe)

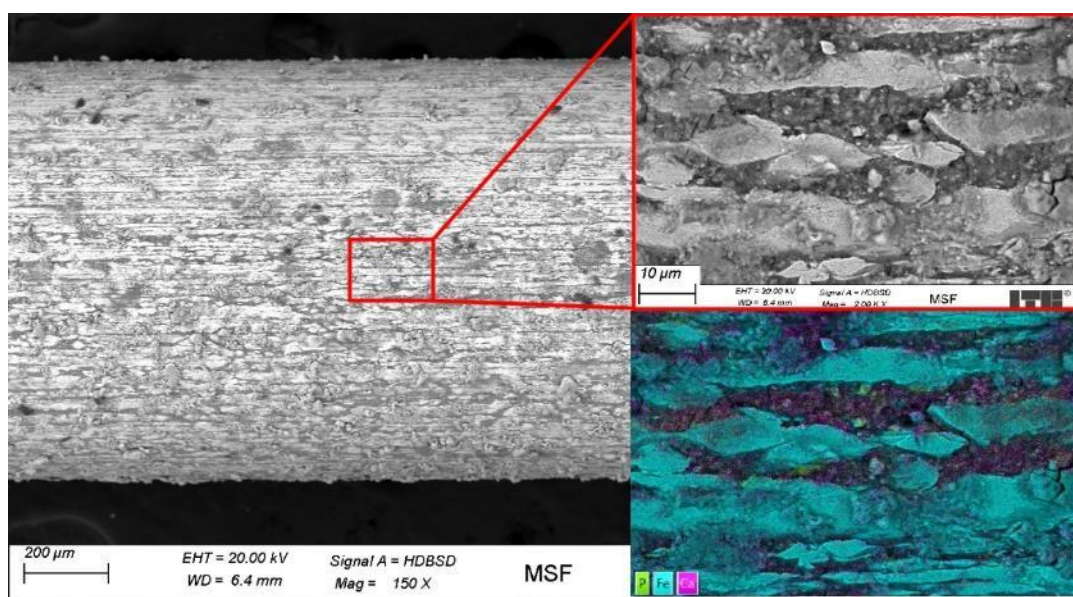
Z Rysunku 52 wynika, że druty z opon RTSF w każdym z dwóch przypadków wykazują znacznie większą przyczepność niż druty komercyjne. W pierwszej grupie drutów o cieńszych średnicach, druty RTSF wykazały o 400% większą przyczepność niż druty MSF, pomimo znacznie cieńszej średnicy. Podobnie w drugiej grupie większych średnic, druty RTSF wykazały o 220 % większą przyczepność niż druty MSF o zbliżonej średnicy. Należy zaznaczyć, że druty RTSF o cienkiej średnicy ok. 0,23 mm mają wyższą przyczepność nawet od drutów MSF o większej średnicy 1,0 mm.

Badanie przyczepności potwierdziło postawioną w rozprawie tezę, że włókna RTSF mogą pełnić rolę skutecznego zbrojenia do betonu, a przyczepność oczyszczonych włókien RTSF do zaczynu cementowego jest większa niż włókien MSF.

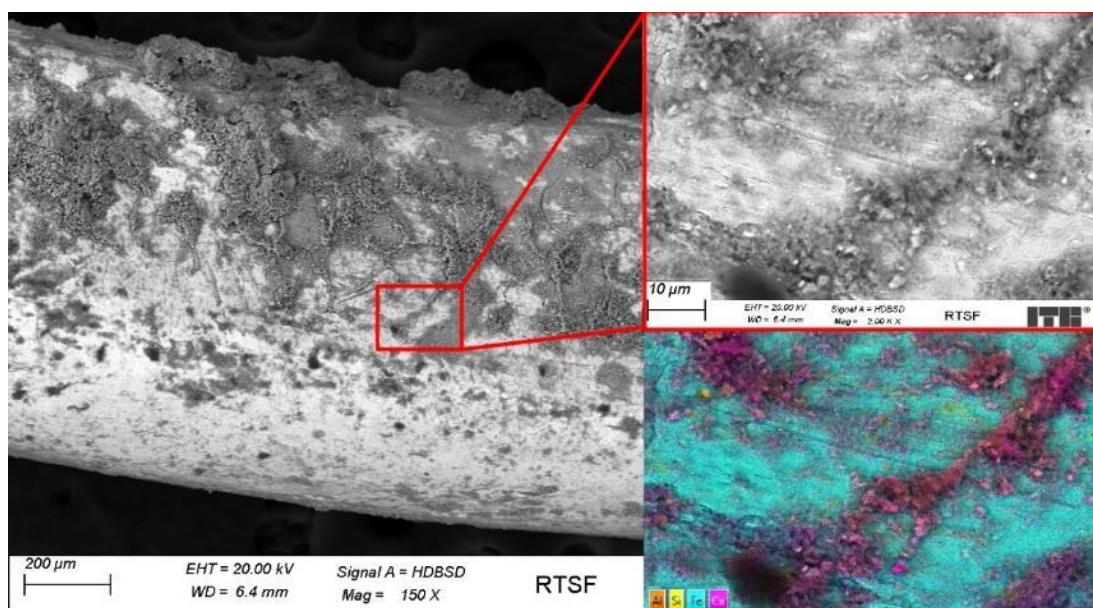
Analiza mikroskopowa jako ocena przyczepności drutów MSF i RTSF

Do analizy przyczepności drutów RTSF i MSF wykonano również analizę mikroskopową, która stanowi jakościowe uzasadnienie przyczepności drutów RTSF i MSF. Obserwacjom mikroskopowym poddano próbki drutów po badaniu przyczepności do zaprawy cementowej metodą *pull-out*. Ponad to analizowano również przekroje zapraw w miejscach wyrwania drutów. Analizę mikroskopową wykorzystano również do oceny strefy kontaktowej włókno. Badania realizowano z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego ZEISS Sigma 500 VP. Rejestrowano obrazy z wykorzystaniem detektora SE oraz BSE. Skład pierwiastkowy oraz mapowanie wykonano z wykorzystaniem detektora EDX. Próbki zgładów zapraw przed badaniem były napyłane złotem.

Fot. 38 i 39 przedstawiają powierzchnię drutów stalowych odpowiednio MSF i RTSF, które zostały wyrwane z zaprawy podczas badania *pull-out*.



Fot 38. Druty MSF po badaniu przyczepności



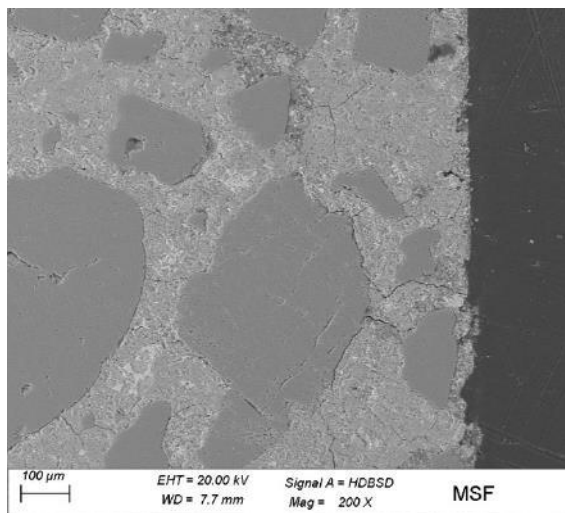
Fot 39. Druty RTSF po badaniu przyczepności

Powierzchnia drutów MSF po wyrwaniu z zaprawy jest jednorodna z widocznymi regularnymi spękaniami, które powstały na etapie produkcji drutu stalowego. W zagłębieniach powierzchni widoczne są niewielkie ilości pozostałości zaczynu cementowego w postaci nalotu o zwiększonej ilości wapnia.

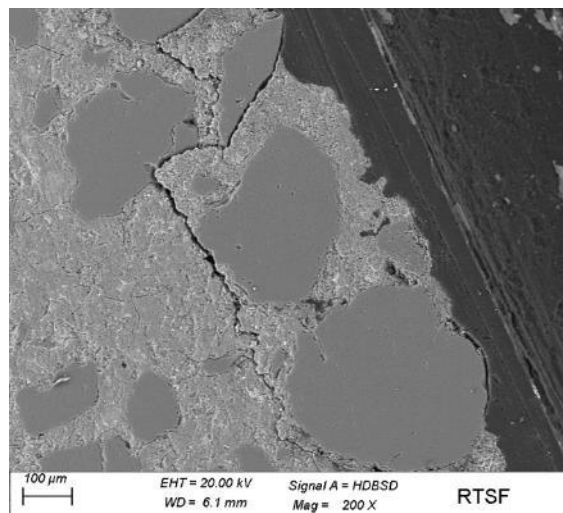
Powierzchnia samych drutów RTSF jest gładzsza niż włókien MSF, co może świadczyć o nieco odmiennej technologii produkcji lub stosowaniu powłok ochronnych. Pomimo to analizując powierzchnię włókien RTSF po badaniu *pull-out* zaobserwowano, że zaczyn cementowy wykazuje większą adhezję do powierzchni tych włókien niż włókien MSF. Objawia się to nie tylko w postaci nalotu na powierzchni, ale również w postaci wyrwanych większych fragmentów zaczynu.

Obecność powłoki miedziowo-cynkowej na powierzchni włókien z recyklingu opon potwierdzają również źródła literaturowe [40].

Fot. 40 i 41 przedstawiają przekrój przez zaprawę, z której zostały wyrwane druty odpowiednio MSF i RTSF metodą pull-out.



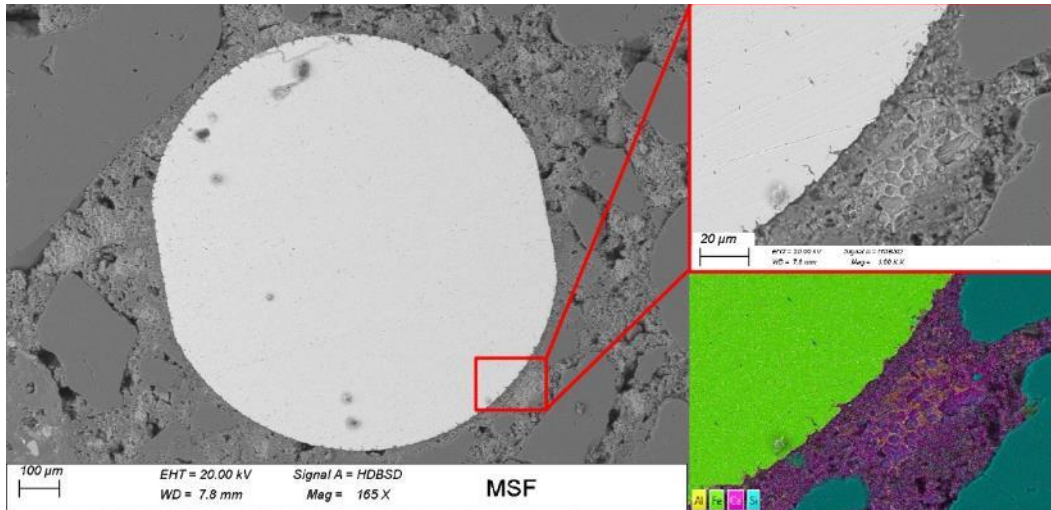
Fot 40. Granica kontaktowa w zaprawie po wyrywaniu drutów MSF



Fot 41. Granica kontaktowa w zaprawie po wyrywaniu drutu RTSF

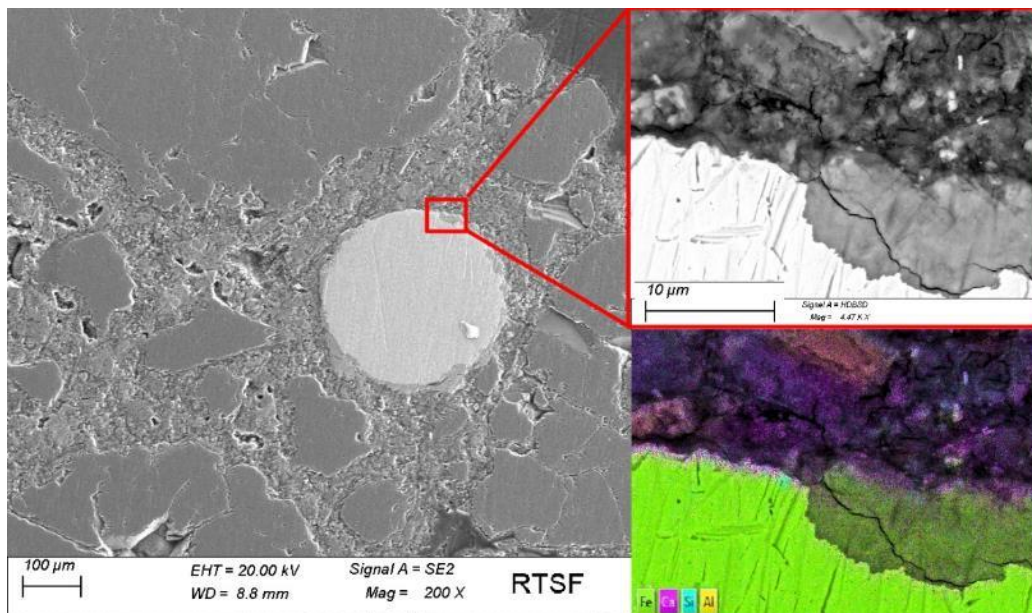
Strefa kontaktowa drut MSF-zaczyn jest stosunkowo równa i gładka z niewielkimi spękaniami zaczynu w obrębie strefy. Natomiast strefa kontaktowa drut RTSF-zaczyn cementowy po badaniu *pull-out* wykazuje znaczą degradację wywołaną wyciąganiem drutu ze struktury. Jest to związane ze znacznie większą adhezją zaczynu do powierzchni drutów RTSF. Częściowo może to wynikać również z bardziej zróżnicowanej średnicy włókien oraz kształtu ich przekroju, co wpływa na lepsze zakotwienie drutów w zaprawie niż włókien MSF.

Fot. 42 i 43 przedstawiają przekrój przez zaprawę cementową oraz włókno odpowiednio MSF oraz RTSF.



Fot 42. Włókno MSF w zaprawie cementowej

Strefa kontaktowa włókno-zaczyn w obrębie włókien MSF jest dobrze wykształcona bez nadmiernych pustek powietrznych oraz segregacji zaczynu, co wskazuje na prawidłowe przygotowanie próbek. Powierzchnia włókien MSF jest stosunkowo gładka i mało zróżnicowana, co może mieć wpływ na adhezję zaczynu.



Fot 43. Włókna RTSF w zaprawie cementowej

Analiza strefy kontaktowej na przekroju zaprawy z włóknami RTSF (Fot. 43) wykazała znacznie większe rozwinięcie granicy faz niż we włóknach MSF. Strefa kontaktowa jest pozbawiona nadmiernych porów powietrznych i nie zaobserwowano segregacji zaczynu w tym obszarze. Powierzchnia włókien RTSF jest znacznie bardziej rozwinięta niż we włóknach MSF przez co zaczyn cementowy w większym stopniu może wpływać na adhezję włókien do zaprawy.

Badanie przyczepności drutów z opon jest badaniem innowacyjnym, nie spotykanym dotąd w literaturze. Jako miarę porównania przyczepności włókien RTSF i MSF przeprowadzono wyciągania drutów RTSF i MSF, o różnych średnicach. Badanie przyczepności w próbie wyciągania z zaprawy cementowej, pozwala na analizę przyczepności powierzchni drutów do matrycy cementowej, bez dodatkowego wpływu zakotwienia włókien spowodowanego haczykowatym lub falistym kształtem. Uzyskane wyniki badań wskazują, że druty RTSF mają bardzo wysoką przyczepność do zaczynu cementowego w porównaniu do drutów MSF. Jest to spowodowane chropowatą, rozwiniętą powierzchnią drutów RTSF, na powierzchni której zaobserwowano heteronukleację, czyli tworzenie produktów hydratacji, które zespalają drut z zaczynem cementowym. Nawet druty o bardzo cienkiej średnicy (0,23 mm) mają o ok. 400% i 130% większą przyczepność niż druty MSF o średnicy odpowiednio 0,65 mm i 1,0 mm. Podobnie druty RTSF o większej średnicy (1,1 mm) mają o ok. 600% i 220% większą przyczepność niż druty MSF o średnicy odpowiednio 0,65 mm i 1,0 mm. Powierzchnia drutów MSF jest gładka co ułatwia wyciągnięcie ze stwardniałej zaprawy cementowej.

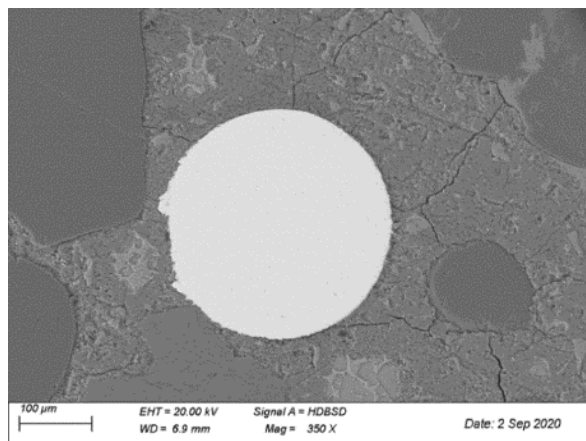
W analizowanej literaturze nie znaleziono wyników badań przyczepności drutów pozyskanych z recyklingu opon w porównaniu z drutami komercyjnymi. W pracy [38] przedstawiono wyniki badań przyczepności metodą *pull-out* krótkich włókien RTSF o średnicy ok. 0,25 mm, które zagłębione były w próbkach betonowych na 15, 20, 30 i 40 mm. Wyniki przyczepności dla głębokości zagłębienia 40 mm są porównywalne z wynikami badań zagłębienia drutów na 40 mm w niniejszej pracy, z tym że wyciąganie było z różnych kompozytów cementowych (betonu i zaprawy). Niemniej jednak również w analizowanym artykule [38] stwierdzono dobrą przyczepność włókien RTSF do matrycy cementowej, za którą odpowiadają nieregularne rysy (rowki) na powierzchni włókien.

10.5 Analiza mikroskopowa

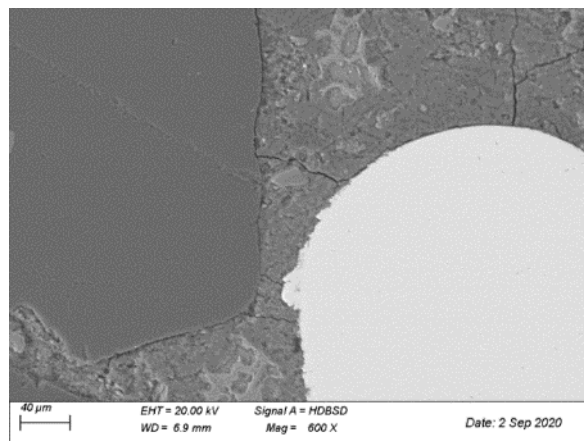
Analizę mikroskopową wykonano w celu oceny budowy strefy kontaktowej włókno-zaczyn oraz analizy wpływu gumy na przyczepność do matrycy cementowej. Obserwacjom poddano włókna z recyklingu opon i włókna komercyjne, przełamane betonowe z włóknem MSF i RTSF oraz zgłady (szlify) betonowe z włóknami MSF i RTSF, po ok 28 dniach dojrzewania, oraz betony z dodatkiem włókien RTSF zanieczyszczonych gumą. Badania wykonano z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego ZEISS Sigma 500 VP.

Analizę mikroskopową przygotowanych zgładów betonowych z włóknami RTSF i MSF przeprowadzono w celu oceny strefy kontaktowej włókno stalowe - zaczyn cementowy, gdyż jakość tej strefy jest miarą przyczepności włókna do matrycy cementowej i wpływa na skuteczność zbrojenia betonu przez włókna. Obrazy

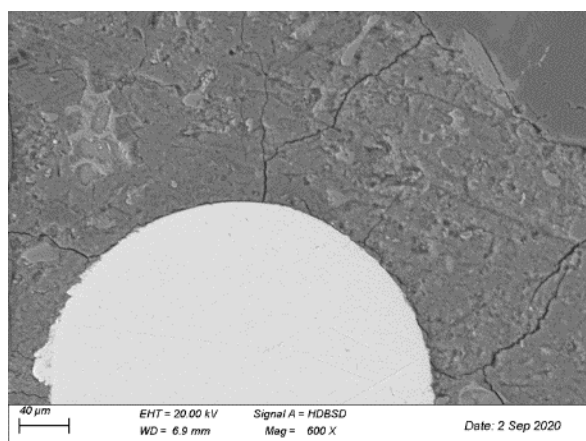
mikroskopowe zglądów betonowych z włóknami RTSF przedstawiono na Fot. 44-53, natomiast z włóknami MSF na Fot. 54-59. Na zglądach betonowych wykonano również mapowanie powierzchni czyli rozkład pierwiastków na powierzchni, wyniki mapowania przedstawiono na Fot. 60 i 61.



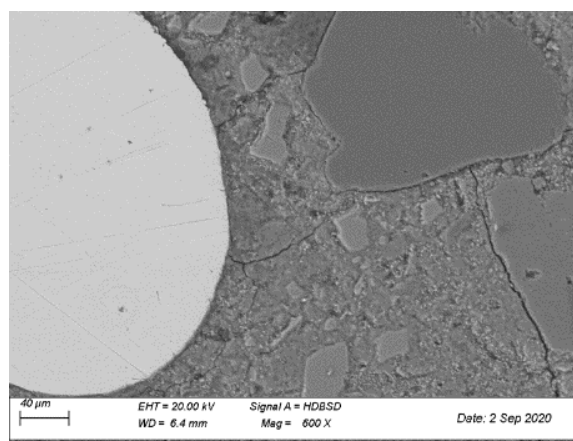
Fot 44. Strefa kontaktowa włókno RTSF-zaczyn



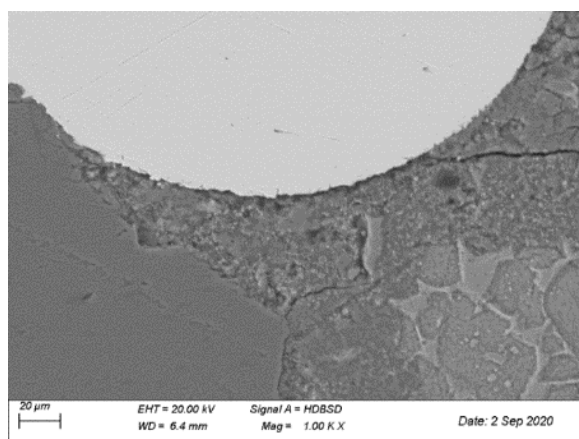
Fot 45. Strefa kontaktowa włókno RTSF-zaczyn



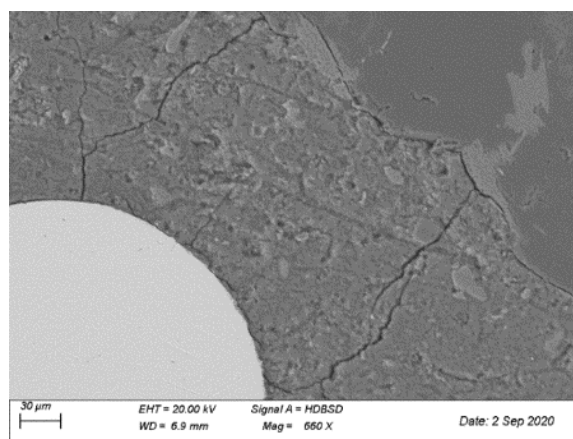
Fot 46. Strefa kontaktowa włókno RTSF-zaczyn



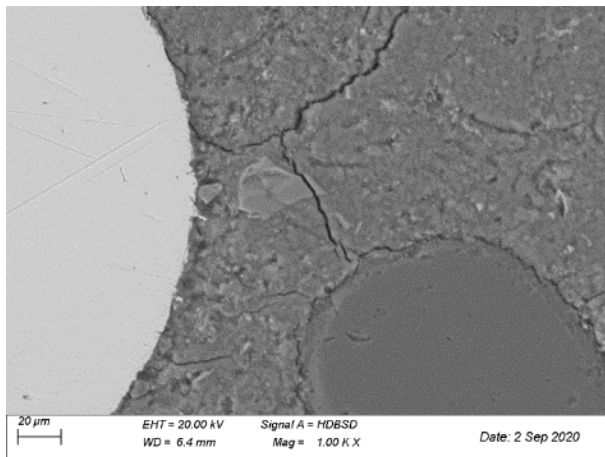
Fot 47. Strefa kontaktowa włókno RTSF-zaczyn



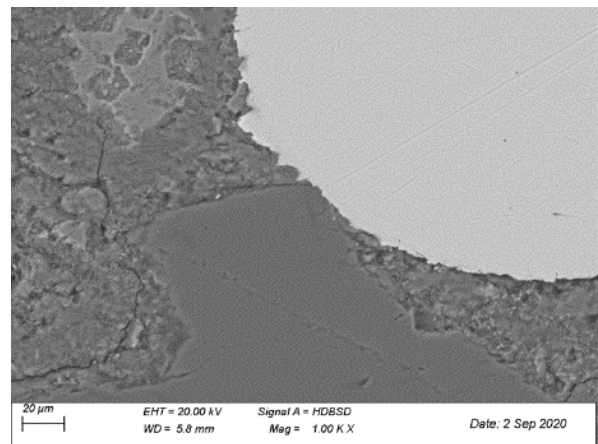
Fot 48. Strefa kontaktowa włókno RTSF-zaczyn



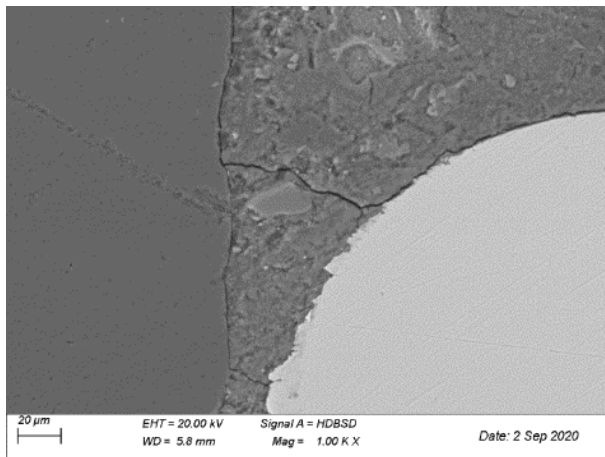
Fot 49. Strefa kontaktowa włókno RTSF-zaczyn



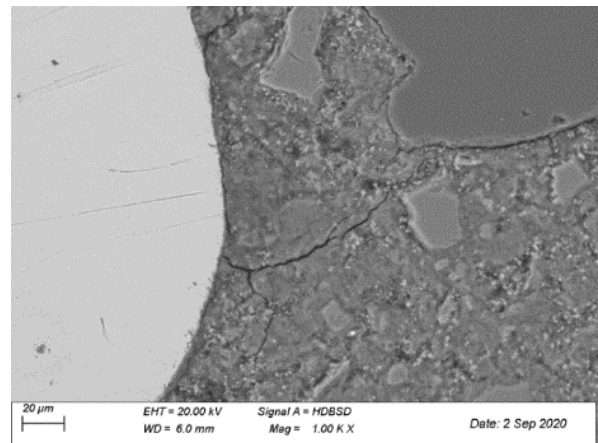
Fot 50. Strefa kontaktowa włókno RTSF-zaczyn



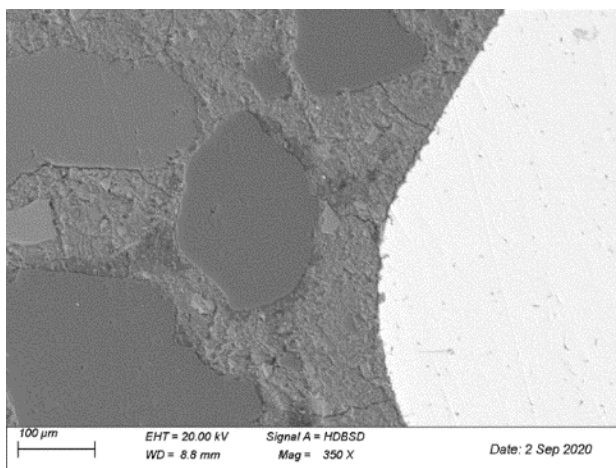
Fot 51. Strefa kontaktowa włókno RTSF-zaczyn



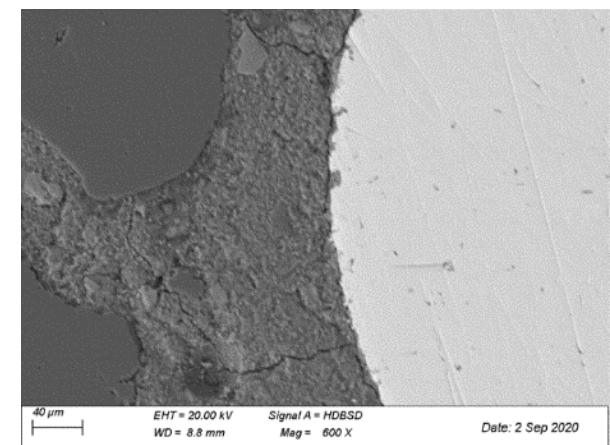
Fot 52. Strefa kontaktowa włókno RTSF-zaczyn



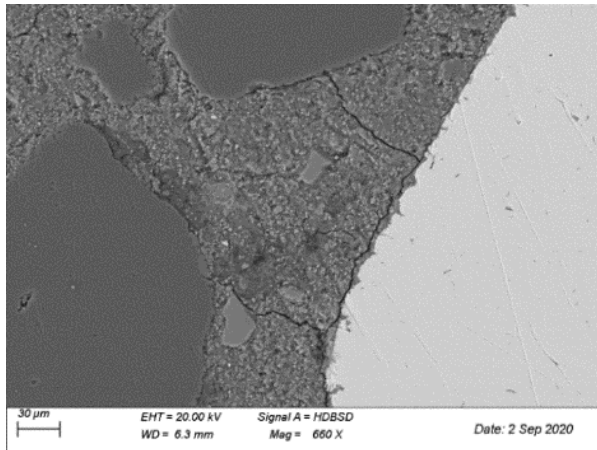
Fot 53. Strefa kontaktowa włókno RTSF-zaczyn



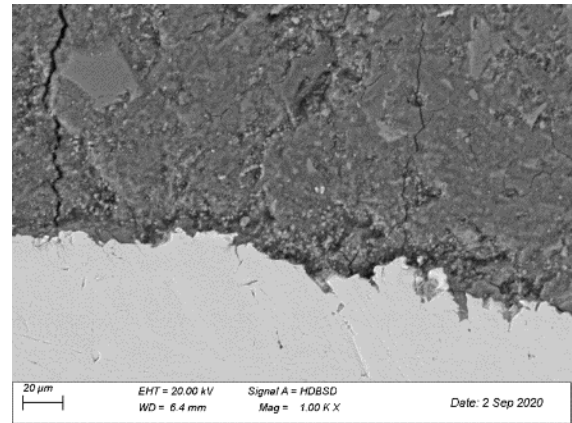
Fot 54. Strefa kontaktowa włókno MSF-zaczyn



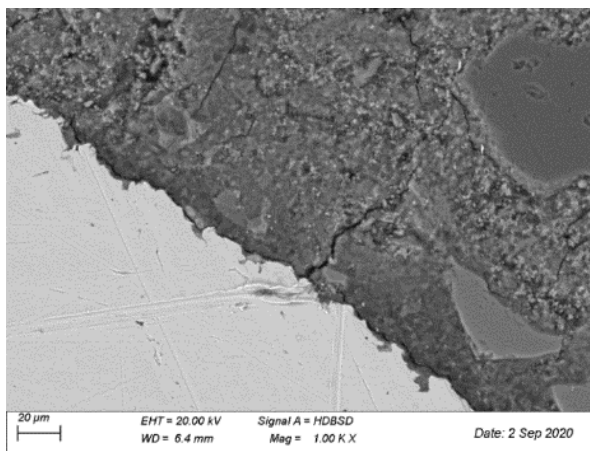
Fot 55. Strefa kontaktowa włókno MSF-zaczyn



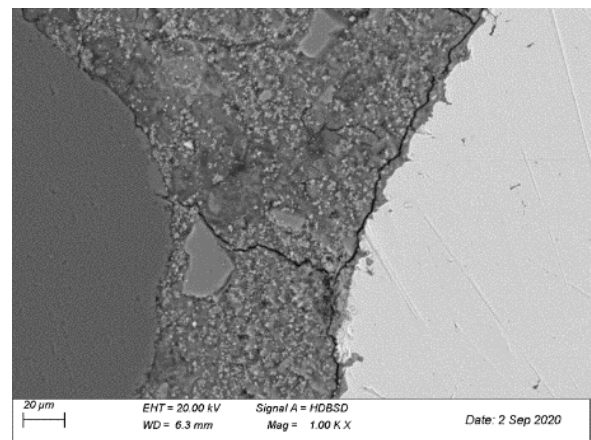
Fot 56. Strefa kontaktowa włókno MSF-zaczyn



Fot 57. Strefa kontaktowa włókno MSF-zaczyn



Fot 58. Strefa kontaktowa włókno MSF-zaczyn

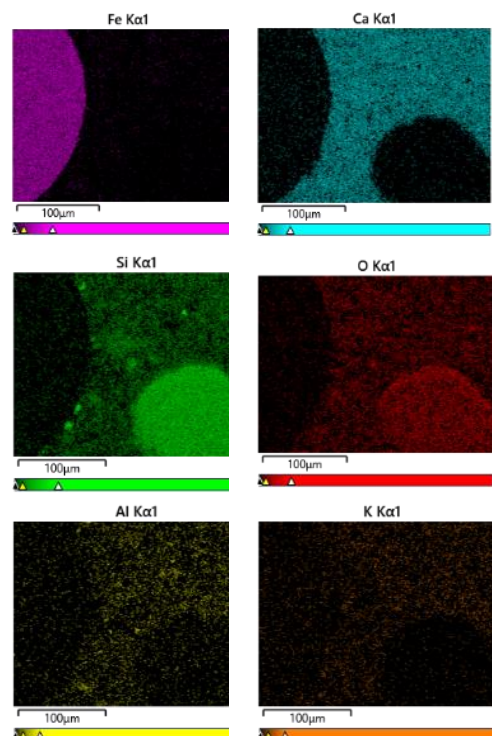
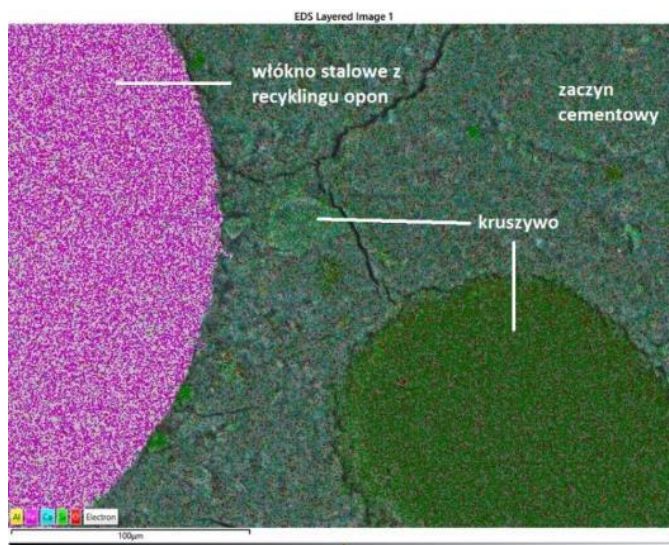


Fot 59. Strefa kontaktowa włókno MSF-zaczyn

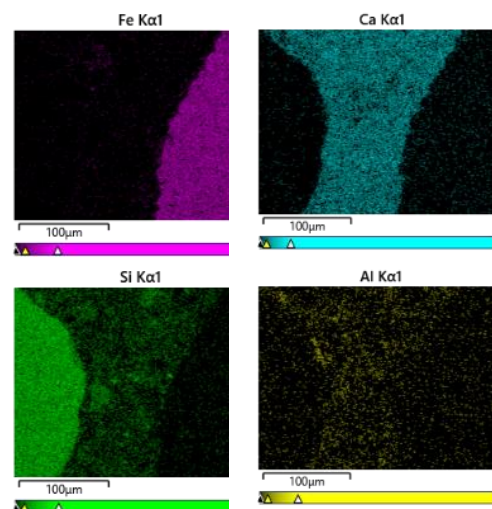
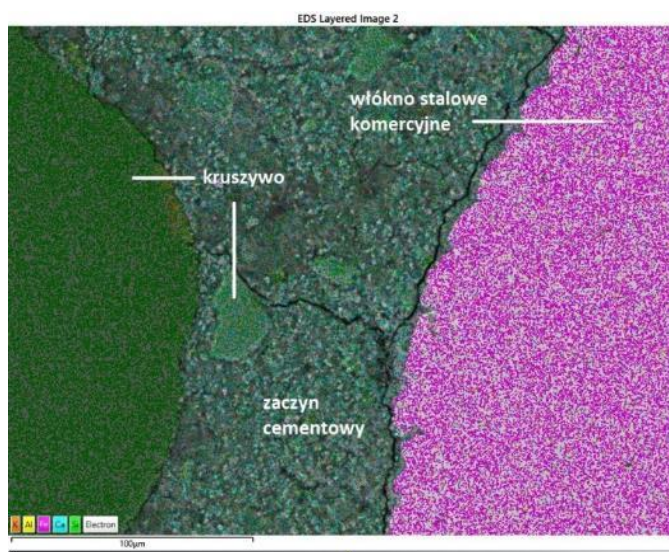
Strefa kontaktowa włókno RTSF-zaczyn jest prawidłowo wykształcona, nieporowata, włókno nie odspaja się od zaczynu i jest w nim dobrze zakotwione, co jest korzystne dla efektywności zbrojenia rozproszonego do betonu. Na zdjęciach widać również efekt mostkowania pęknięć przez włókno (i kruszywo), tj. proces zatrzymania pęknięcia przez włókno, mikropęknięcie dochodzi do włókna i albo się zatrzymuje, albo zmienia kierunek wzdłuż włókna, lecz ze znacznie mniejszą energią.

W przypadku betonów z włóknami stalowymi komercyjnymi MSF, podobnie jak dla włókien RTSF, strefa kontaktowa włókno MSF-zaczyn jest dobrze wykształcona, nie porowata, włókno jest prawidłowo związane z zaczynem, co przyczynia się do redukcji mikropęknięć poprzez mechanizm mostkowania pęknięć.

Na Fot. 60 i 61 przedstawiono proces mapowania powierzchni betonów z włóknami kolejno RTSF i MSF. Proces mapowania wykazał prawidłowy rozkład pierwiastków w próbkach i główny skład betonów: włókna stalowe z recyklingu i komercyjne – żelazo Fe; kruszywo – krzem Si, tlen O; zaczyn cementowy: wapń Ca, krzem Si, glin Al.



Fot 60. Mapowanie powierzchni betonu z włóknami RTSF



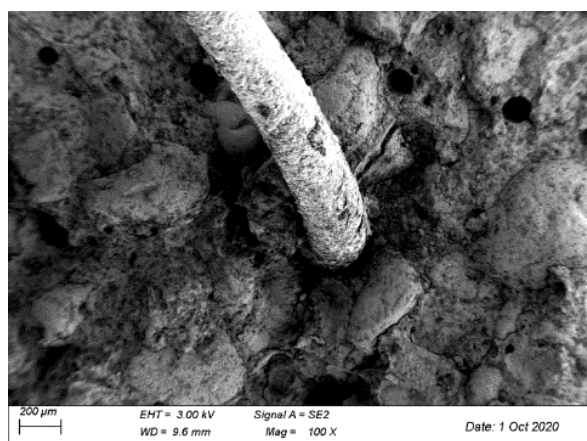
Fot 61. Mapowanie powierzchni betonu z włóknami komercyjnymi MSF

Analizę mikroskopową przełamów betonów z włóknami wykonano w celu obserwacji powierzchni włókien w betonie, ich zakotwienia oraz obserwacji strefy kontaktowej włókno-zaczyn. Zdjęcia przełamów betonowych z dodatkiem włókien z recyklingu RTSF przedstawiono na Fot. 62-66, a na Fot. 67-72 przełamów betonów z dodatkiem włókien komercyjnych MSF.

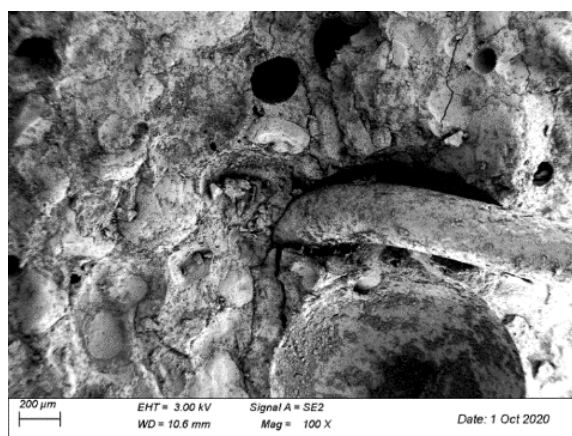
Z analizy obrazów mikroskopowych przełamów betonowych wynika, że zarówno włókna MSF jak i RTSF są dobrze zakotwione w zaczynie cementowym, co świadczy o ich

dobrej przyczepności. Strefa kontaktowa włókno-zaczyn w obu przypadkach jest prawidłowa, zwarta i nie porowata. Na powierzchni włókien MSF jak i RTSF widoczne są produkty hydratacji cementu. Dodatkowo na Fot. 62 i 63 widać mikropęknięcie zatrzymane na granicy włókno-zaczyn, czyli mechanizm mostkowania pęknięć przez włókna z recyklingu opon.

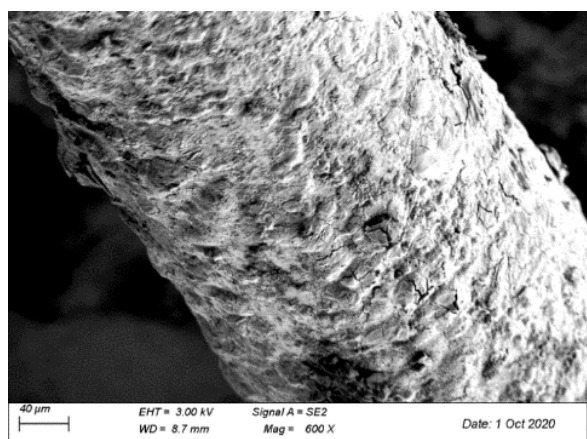
Analiza mikroskopowa jest potwierdzeniem i uzasadnieniem otrzymanych wyników badań mechanicznych, świadczących o czystości włókien z recyklingu opon, ich dobrej przyczepności do zaczynu cementowego i efektywnym zbrojeniu kruchej matrycy cementowej, przez co mogą stanowić zamiennik produkowanych przemysłowo stalowych włókien MSF.



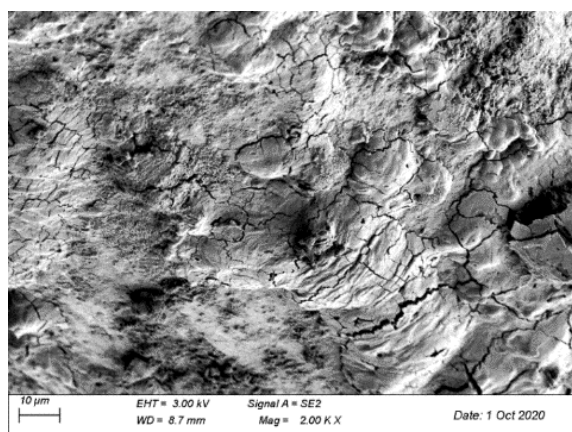
Fot 62. Przełam betonu z włóknem RTSF



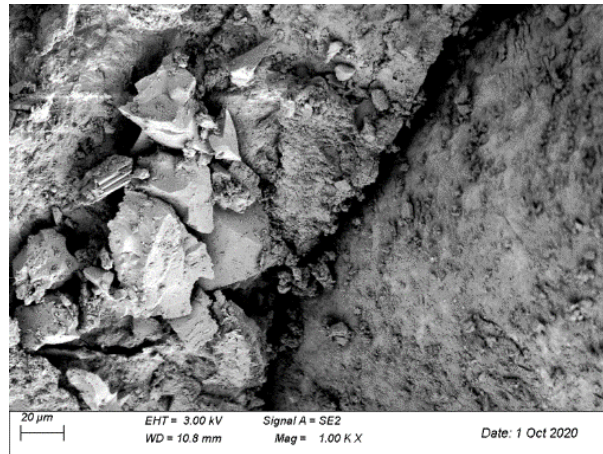
Fot 63. Przełam betonu z włóknem RTSF



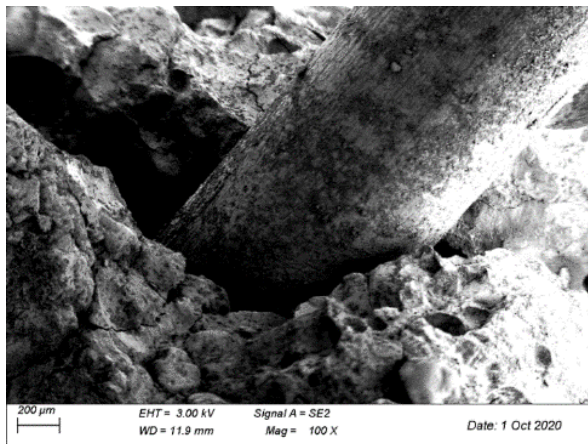
Fot 64. Włókno RTSF w betonie



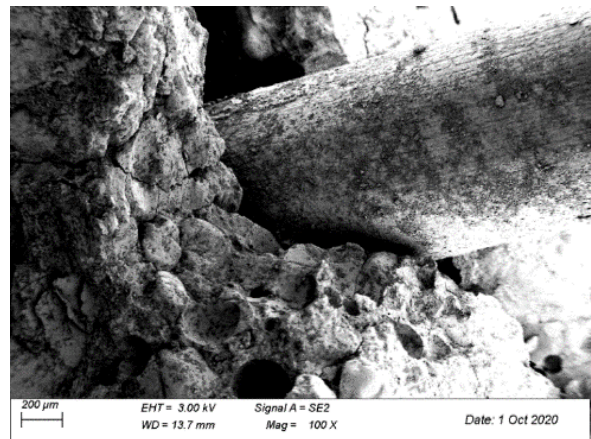
Fot 65. Powierzchnia włókna RTSF



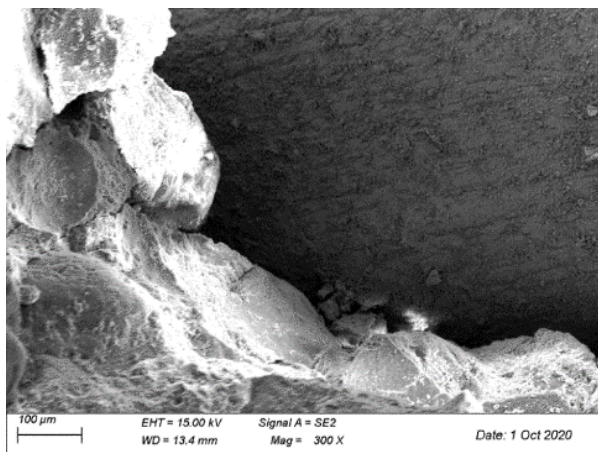
Fot 66. Strefa kontaktowa włókno RTSF - zaczyn



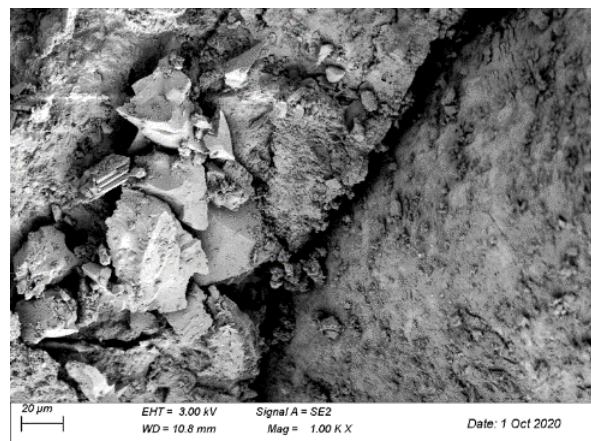
Fot 67. Przełam betonu z włóknem MSF



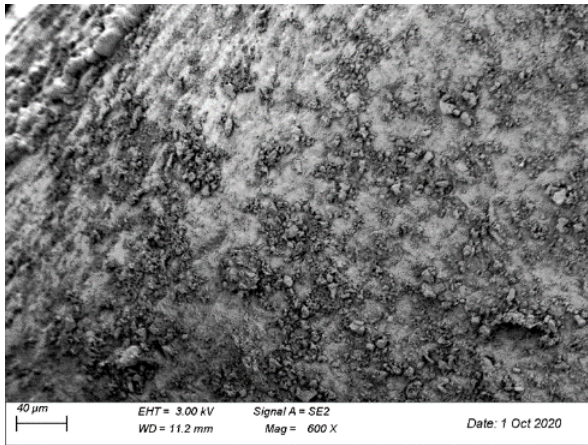
Fot 68. Przełam betonu z włóknem MSF



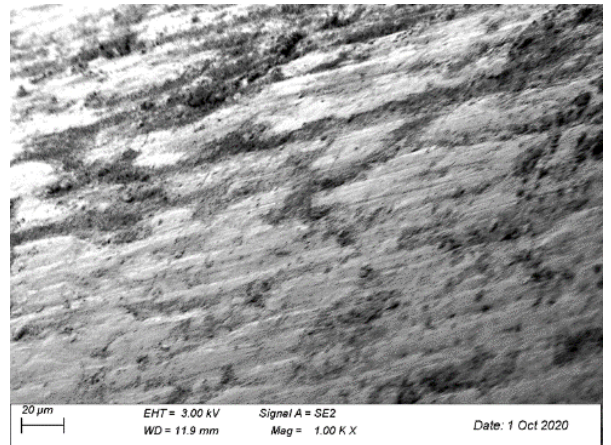
Fot 69. Strefa kontaktowa włókno MSF - zaczyn



Fot 70. Strefa kontaktowa włókno MSF - zaczyn



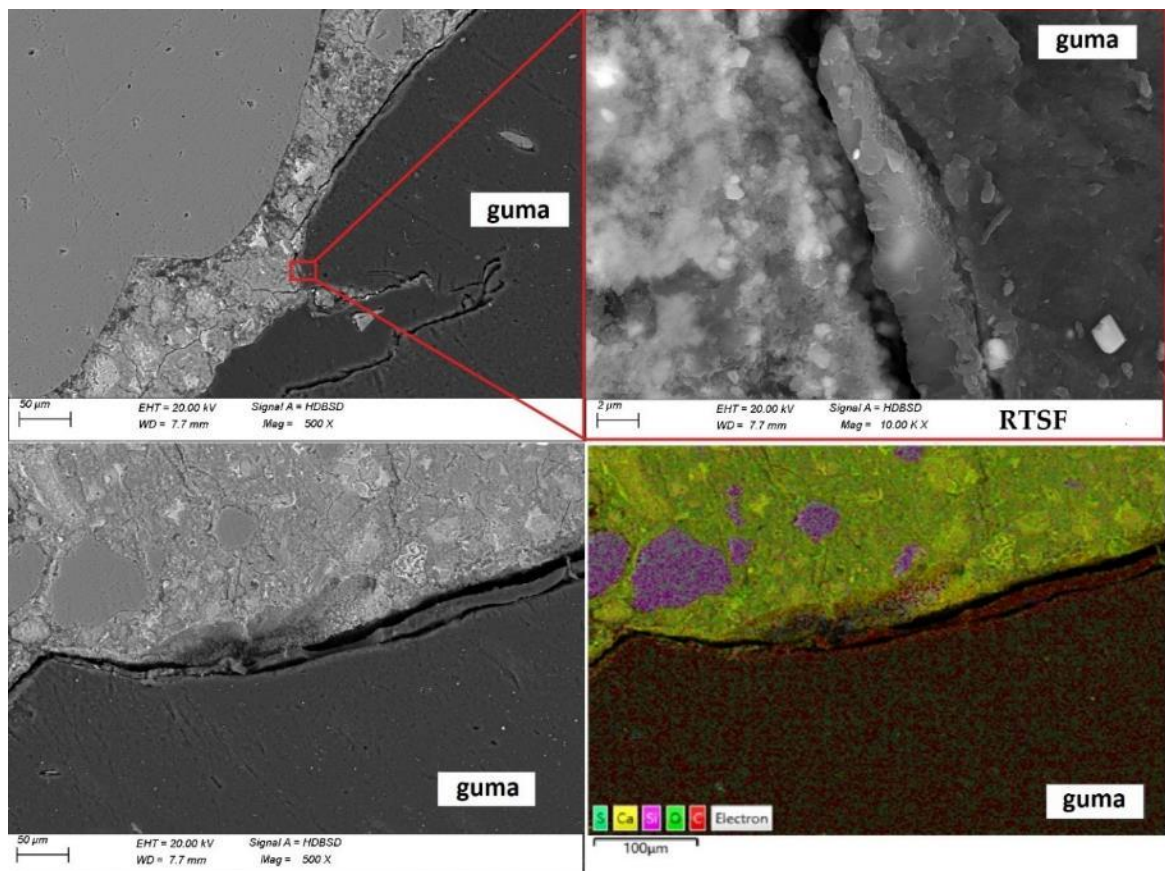
Fot 71. Powierzchnia włókna MSF



Fot 72. Powierzchnia włókna MSF

Analizę mikroskopową wykorzystano również do oceny **strefy kontaktowej zanieczyszczeń z włókien RTSF** jak guma, do zaczynu cementowego w zaprawie cementowej.

Na Fot. 73 przedstawiono ziarno gumy w matrycy cementowej. Guma jest zanieczyszczeniem pochodzącym z odpadowych włókien z opon, które nie zostały w sposób wystarczający oczyszczone.



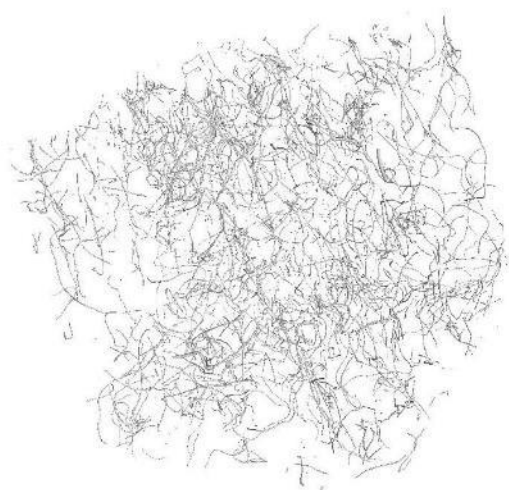
Fot 73. Strefa kontaktowa guma-zaczyn cementowy

Strefa kontaktowa guma zaczyn jest rozluźniona, słabo związana w tym obszarze. Ziarno gumy ma tendencję do odspajania się od zaczynu. Można to wytłumaczyć małą adhezją zaczynu do gumy oraz zupełnie innymi właściwościami mechanicznymi obu ośrodków, co doprowadza do powstawania spękań na granicy faz. Dodatkowo analiza mikroskopowa strefy kontaktowej guma-zaczyn cementowy potwierdza teorię, że w wyniku słabej adhezji zaczynu do gumy pogorszeniu ulegają cechy wytrzymałościowe kompozytu wraz ze wzrostem zawartości tego typu zanieczyszczeń w kompozycie.

10.6 Obrazowanie dystrybucji włókien metodą tomografii rentgenowskiej

Analizę rozmieszczenia włókien w betonie przeprowadzono na betonowych próbkach sześciennych o boku 100×100×100 mm, wyciętych z belek betonowych o wymiarach 100×100×500 mm. Próbki zawierały włókna RTSF oraz MSF w ilości 10, 20, 30 i 40 kg/m³. Badanie wykonano w celu obserwacji dystrybucji włókien z recyklingu opon w stwardniałym betonie, oraz sprawdzenia czy włókna rozkładają się równomiernie w mieszance betonowej podczas mieszania. Badanie wykonano na tomografie komputerowym General Electric (GE V|TOME|X M300), wynikiem badania są obrazy w skali 3D rozmieszczenia włókien w betonowych próbkach sześciennych.

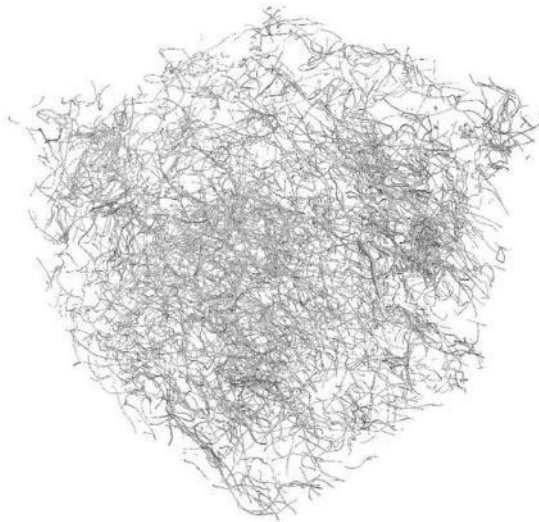
Na Fot. 74-81 przedstawiono porównawczo obrazy 3D dystrybucji włókien RTSF i MSF w betonowych kostkach sześciennych.



Fot 74. Obraz wygenerowany z danych pozyskanych techniką tomografii. Włókna RTSF w ilości 10 kg/m³



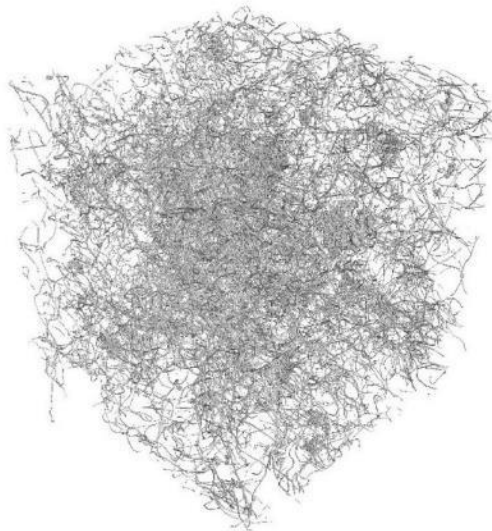
Fot 75. Obraz wygenerowany z danych pozyskanych techniką tomografii. Włókna MSF w ilości 10 kg/m³



Fot 76. Obraz wygenerowany z danych pozyskanych techniką tomografii. Włókna RTSF w ilości 20 kg/m³



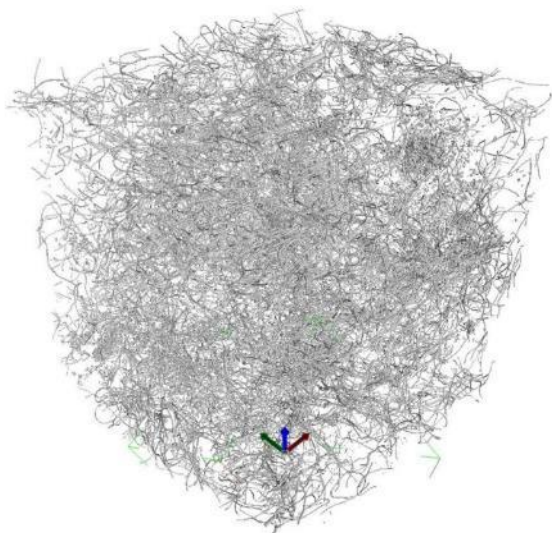
Fot 77. Obraz wygenerowany z danych pozyskanych techniką tomografii. Włókna MSF w ilości 20 kg/m³



Fot 78. Obraz wygenerowany z danych pozyskanych techniką tomografii. Włókna RTSF w ilości 30 kg/m³



Fot 79. Obraz wygenerowany z danych pozyskanych techniką tomografii. Włókna MSF w ilości 30 kg/m³



Fot 80. Obraz wygenerowany z danych pozyskanych techniką tomografii. Włókna RTSF w ilości 40 kg/m³



Fot 81. Obraz wygenerowany z danych pozyskanych techniką tomografii. Włókna MSF w ilości 40 kg/m³

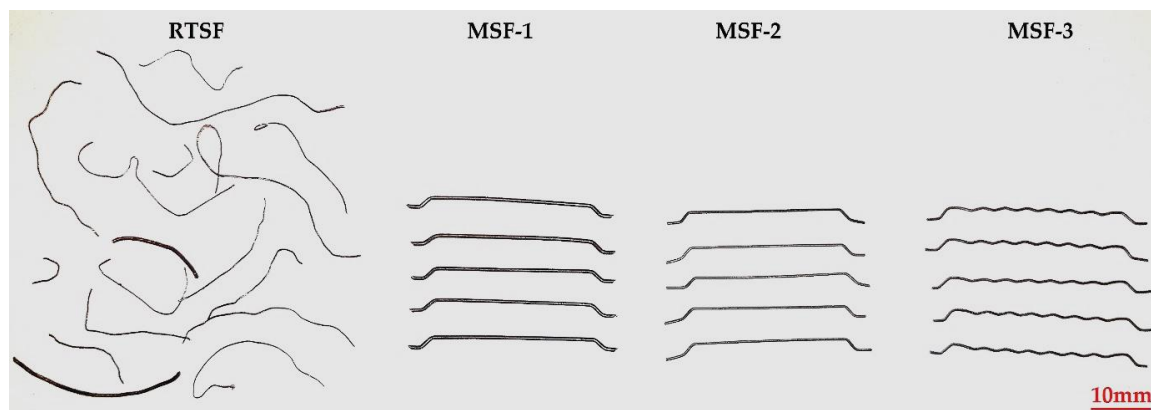
Oczyszczone włókna z recyklingu opon RTSF są rozmieszczone równomiernie w matrycy cementowej zarówno dla małych ilości 10, 20 kg/m³ jak i dla większych 30, 40 kg/m³. Badanie to wykonano z uwagi na charakterystykę betonu wzorcowego według wymagań normy PN-EN 14845-1 [205], który z założenia miał być bez domieszki uplastyczniającej. W takim betonie wzorcowym bez domieszki, włókna wpływają na spadek konsystencji i zachodzi ryzyko nie uzyskania odpowiedniego rozmieszczenia i dobrej homogenizacji włókien w betonie. Obrazy 3D tomografii komputerowej potwierdzają dobrą homogenizację hybrydowych włókien z recyklingu opon w betonie, które charakteryzują się nieregularnym kształtem i wymiarami. Włókna RTSF pomimo niejednorodnych wymiarów i kształtów i skłonności do splątywania, nie utworzyły w mieszance większych skupisk tzw. jeży, co wpływa korzystnie na wzmocnienie całej kruchej matrycy cementowej.

Przedstawione wyniki badań rozmieszczenia 3D włókien także potwierdzają dobrą efektywność zbrojenia betonu przez włókna RTSF i MSF, gdyż od jednorodnego rozmieszczenia zależy skuteczność wzmocnienia kruchej matrycy cementowej.

10.7 Badania porównawcze z innym rodzajem komercyjnych włókien stalowych

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań betonów z dodatkiem oczyszczonych włókien z opon RTSF oraz innymi dwoma rodzajami włókien komercyjnych MSF-2 i MSF-3. Dodatkowe włókna komercyjne MSF-2 i MSF-3 zostały wybrane z powodu mniejszej średnicy niż MSF-1, w celu porównania właściwości betonów z RTSF z włóknami o innej średnicy i innym kształcie niż wybrane do badań zasadniczych włókna MSF-1. Na

rynku funkcjonują włókna stalowe o najmniejszej średnicy ok. 0,65 mm i jakie zostały wybrane do badań dodatkowych. Wygląd włókien RTSF i MSF przedstawiono na Fot. 82, natomiast charakterystykę geometryczną włókien przedstawiono w Tabeli 24, a właściwości wytrzymałościowe włókien w Tabeli 25.



Fot 82. Rodzaje włókien stalowych do badań

Tabela 24. Charakterystyka geometryczna włókien

Rodzaj włókien	Długość [mm]		Średnica [mm]		Charakterystyka
MSF-1	50,5		1,00		haczykowane włókna stalowe, jednorodne, o przekroju okrągłym
MSF-2	50,4		0,65		
MSF-3	50,6		0,65		
RTSF	przedział	mediana	przedział	mediana	Mieszanina włókien o różnych średnicach i długościach, oczyszczone (zawartość zanieczyszczeń gumowych i tekstylnych < 0,2 %)
	7,4 – 81,6	40,2	0,17 – 1,34	0,23	

Tabela 25. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie i moduł sprężystości włókien

Rodzaj włókien	Średnia średnica włókien [mm]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości [GPa]
RTSF	0,30	1418	158,8
	1,34	1653	191,8
MSF-1	1,00	1082	201,6
MSF-2	0,65	1068	186,0
MSF-3	0,65	1214	205,1

Dla włókien MSF-2 i MSF-3 wykonano kluczowe badania pod kątem oceny skuteczności zbrojenia: wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu, praca zniszczenia i wskaźniki odporności na pękanie, a wyniki porównano z wynikami dla

włókien RTSF. Skład betonu wzorcowego był zgodny z tym, dla którego badano włókna RTSF i MSF-1 w głównej części pracy w Rozdziale 9, Tabela 11.

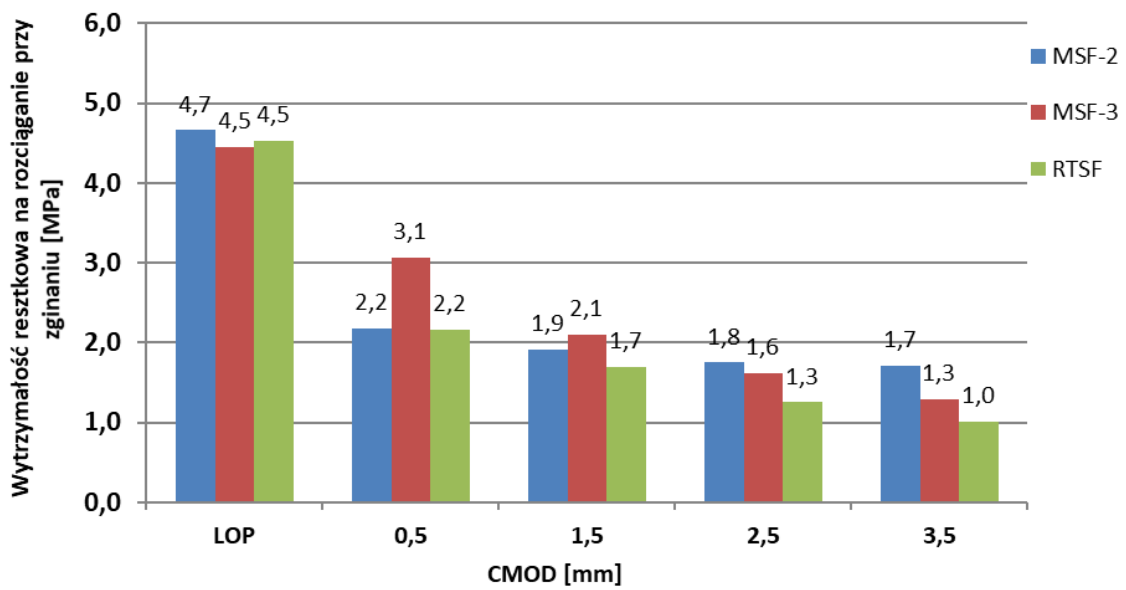
10.7.1 Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności)

W Tabeli 26 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości resztkowej na rozciąganiu przy zginaniu dla włókien MSF-2, MSF-3 i RTSF dozowanych w ilości 20, 30 i 40 kg/m³.

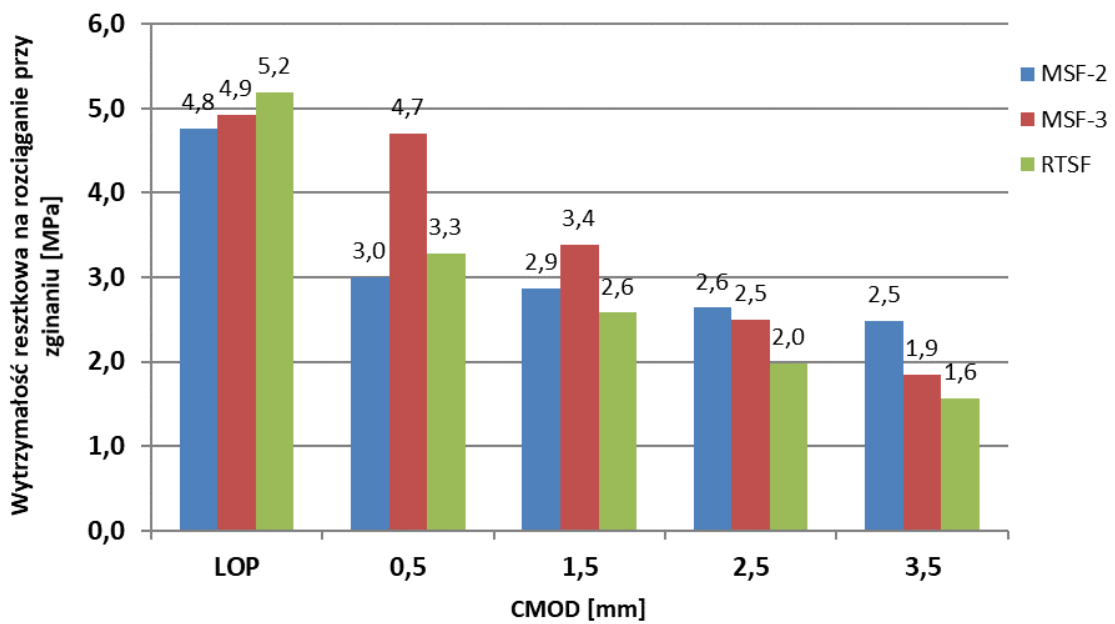
Tabela 26. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu

Oznaczenie betonu	Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [MPa]				
	przy granicy proporcjonalności LOP	resztkowa wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu			
		CMOD ₁ = 0,5 mm	CMOD ₂ = 1,5 mm	CMOD ₃ = 2,5 mm	CMOD ₄ = 3,5 mm
MSF-2-20	4,66	2,18	1,91	1,75	1,71
MSF-2-30	4,76	3,00	2,87	2,64	2,48
MSF-2-40	4,98	4,19	4,02	3,48	3,28
MSF-3-20	4,45	3,06	2,10	1,62	1,29
MSF-3-30	4,92	4,70	3,39	2,50	1,85
MSF-3-40	5,33	5,84	4,49	3,08	2,35
RTSF-20	4,53	2,16	1,69	1,25	1,01
RTSF-30	5,19	3,28	2,58	1,98	1,57
RTSF-40	5,14	4,33	3,65	2,88	2,28
niepewność pomiaru	±0,34	±0,18	±0,15	±0,16	±0,17

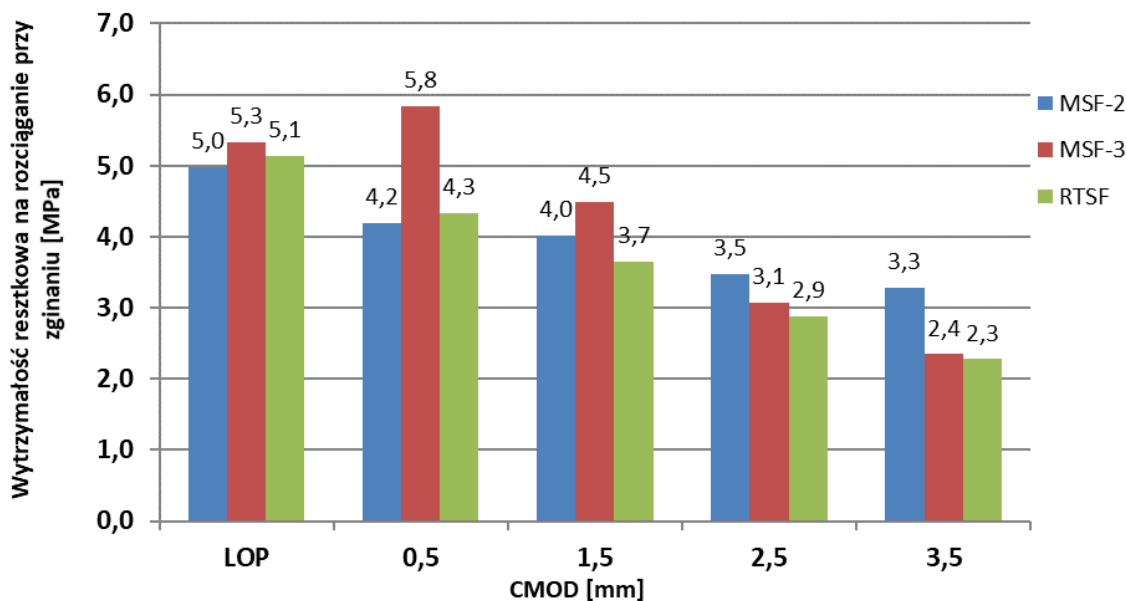
Wyniki badań przedstawiono również na Rysunkach 62-63.



Rysunek 62. Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu dla dozowania 20 kg/m³ włókien



Rysunek 63. Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu dla dozowania 30 kg/m³ włókien



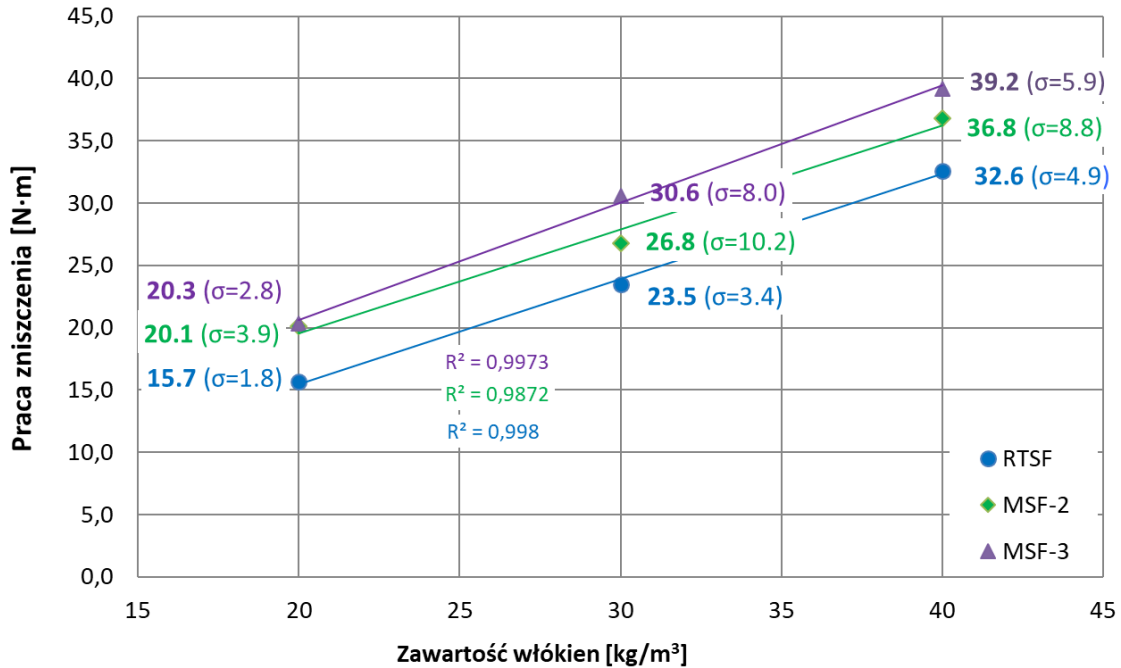
Rysunek 64. Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu dla dozowania 40 kg/m³ włókien

Z powyższych wykresów wynika, że betony z dodatkiem włókien RTSF wykazują równoważną a nawet wyższą (dla dozowania 20 i 30 kg/m³) wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu przy granicy proporcjonalności (LOP), niż betonu z włóknami MSF-2 i MSF-3.

Dla mniejszych wartości rozwarcia rysy (CMOD=0,5 i 1,5 mm) włókna RTSF wykazują równoważne wartości jak włókna MSF-2, natomiast dla większych wartości rozwarcia rysy (CMOD=2,5 i 3,5 mm) włókna RTSF wykazują nieco niższe wartości niż włókna MSF-2. Z kolei włókna MSF-3 wykazują znacznie wyższe wytrzymałości niż włókna MSF-2 i RTSF przy niższych wartościach rozwarcia rysy oraz porównywalne do RTSF przy wyższych wartościach CMOD.

10.7.2 Praca zniszczenia

Na Rysunku 65 przedstawiono wyniki badań pracy zniszczenia dla betonów z włóknami RTSF, MSF-2 i MSF-3 w ilości 20, 30 i 40 kg/m³.



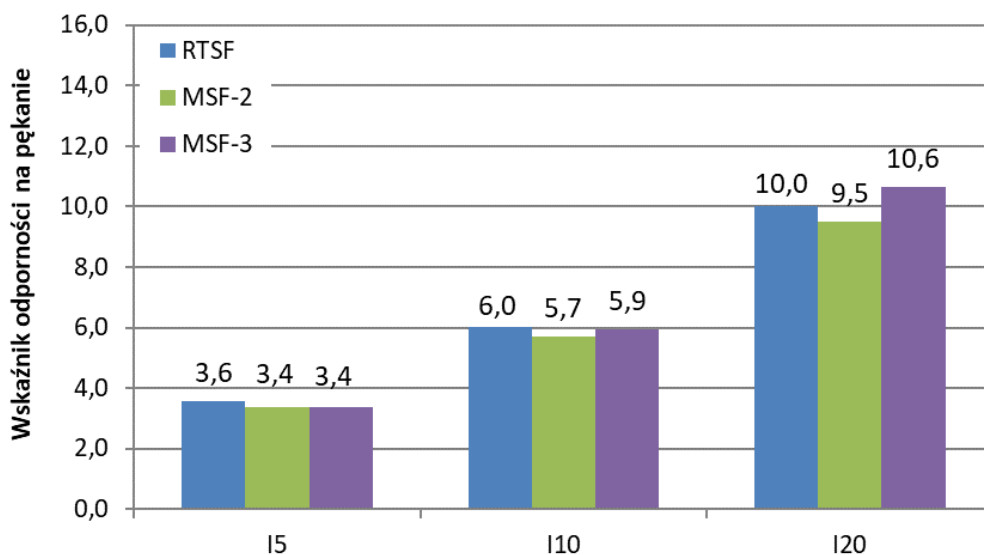
Rysunek 65. Praca zniszczenia betonów z włóknami MSF-2 i MSF-3 (σ – odchylenie standardowe)

Praca zniszczenia ze względu na swój uniwersalny charakter, stanowi metodę oceny efektywności zbrojenia włókien stalowych, dzięki której możemy porównać wiele włókien ze sobą. Rysunek 65 przedstawia wyniki badania pracy zniszczenia betonów z włóknami. Włókna z opon RTSF porównane są dodatkowo z dwoma rodzajami włókien MSF o cieńszych średnicach.

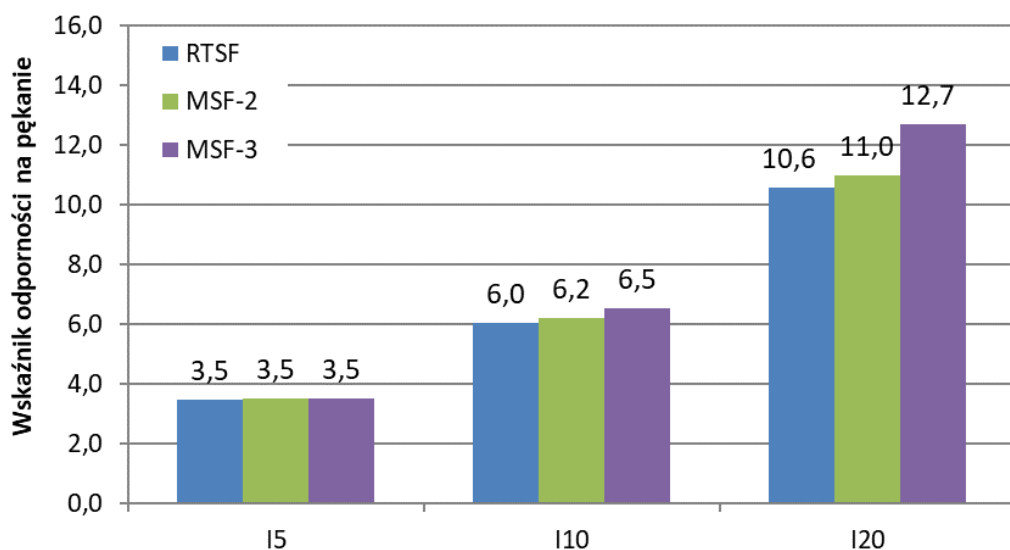
Uzyskane wyniki badań wskazują, że betony z dodatkiem 20 kg/m³ oczyszczonych RTSF wykazują widocznie niższą pracę zniszczenia o ok. 25% w porównaniu z taką samą ilością włókien MSF-2 i MSF-3. Może to być spowodowane zbyt małą ilością włókien RTSF oraz ich niejednorodnej długości, wśród których są również mało efektywne włókna krótkie. Dla dozowania 30 kg/m³ włókien, włókna RTSF wykazują porównywalną pracę zniszczenia jak haczykowane włókna MSF-2, włókna falisto-haczykowane osiągnęły o ok. 23% większą pracę zniszczenia niż włókna RTSF. Podobna zależność wystąpiła dla dozowania 40 kg/m³, gdzie betony z włóknami RTSF osiągnęły równoważną pracę zniszczenia jak haczykowane włókna MSF-2 (biorąc pod uwagę charakterystykę materiału). Również w tej serii największą pracę zniszczenia osiągnęły betony z włóknami MSF-3.

10.7.3 Wskaźniki odporności na pękanie

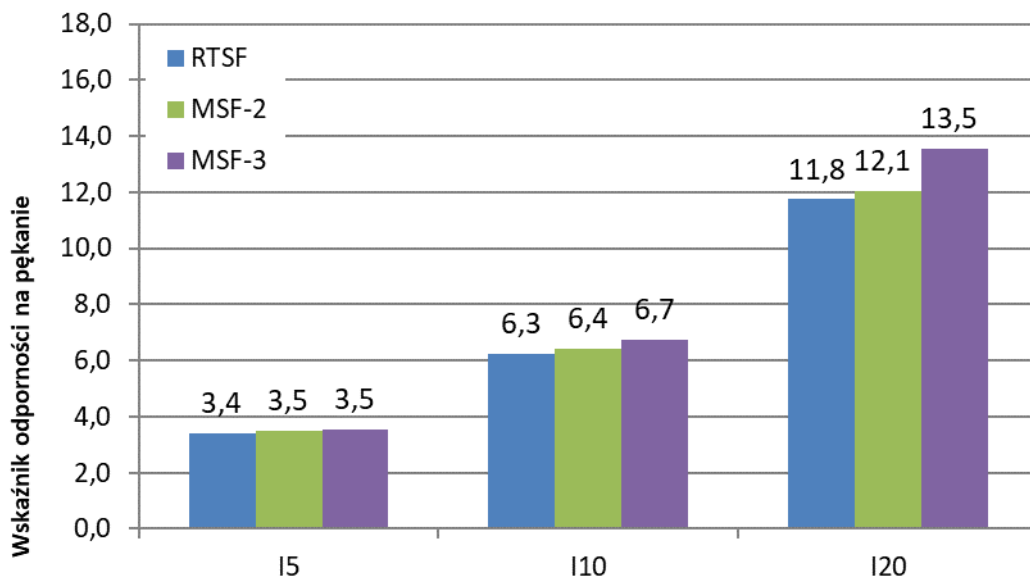
Kolejną miarą efektywności zbrojenia są wskaźniki odporności na pękanie I_5 , I_{10} , I_{20} , które podobnie jak praca zniszczenia wyznaczane są z pola powierzchni pod wykresem obciążenie-ugięcie w początkowym okresie zginania. Na Rysunkach 66-68 przedstawiono porównanie wskaźników I_5 , I_{10} , I_{20} dla dozowania włókien RTSF, MSF-2 i MSF-3 w ilościach 20, 30 i 40 kg/m³.



Rysunek 66. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 20 kg/m³



Rysunek 67. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 30 kg/m³



Rysunek 68. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 40 kg/m³

Wyniki kształtują się porównywalnie jak dla pracy zniszczenia, tj. włókna RTSF wykazują równoważne wskaźniki I₅, I₁₀, I₂₀ jak włókna komercyjne MSF-2. Natomiast włókna MSF-3 wykazują wyraźnie wyższe wskaźniki odporności na pękanie od pozostałych, na co wpłynęły ich falisty kształt i haczykowate końce, co wpłynęło na podwyższenie odporności na kruche pękanie kompozytów cementowych. Niemniej jednak wyniki dla betonów z włóknami z recyklingu opon RTSF świadczą o możliwości w ich zastosowaniu w technologii betonu, jako zbrojenie rozproszone. Dzięki swojej wysokiej przyczepności do zaczynu cementowego, oczyszczonej powierzchni włókna RTSF w odpowiedniej ilości mogą efektywnie wzmacniać kruchą matrycę cementową.

Na efektywność zbrojenia włókien stalowych do betonu ma wpływ wiele czynników, m.in. kształt, wymiary włókien, chropowatość ich powierzchni (wpływająca na przyczepność do matrycy cementowej) oraz ich ilość w betonie. Z powyższych badań wynika, że kształt włókien wpływa w większym stopniu na efektywność zbrojenia niż średnica. Włókna o kształcie falisto-haczykowatym uzyskały lepsze właściwości niż włókna haczykowate.

11. Badania aplikacyjne

11.1 Badania właściwości użytkowych betonów posadzkowych

Wykonano badania betonu posadzkowego na cemencie CEM II/B-S 32,5 R i domieszka uplastyczniającą, wg punktu 8.2, Tabela 10, z dodatkiem włókien RTSF i MSF w ilości 10, 20, 30 i 40 kg/m³, a niektóre badania tylko dla włókien w ilości 30 i 40 kg/m³ gdyż dla tych ilości betonu z włóknami RTSF osiągają najlepsze wyniki. Metody badań do tej części pracy zostały wytypowane w celu przedstawienia praktycznego zastosowania oczyszczonych włókien z recyklingu opon RTSF, w porównaniu z włóknami komercyjnymi MSF-1.

Wykonano następujące badania betonów z włóknami:

- konsystencja mieszanki betonowej wg PN-EN 12350-3 [209],
- zawartość powietrza w mieszance betonowej PN-EN 12350-7 [218],
- gęstość mieszanki betonowej wg PN-EN 12350-6 [219],
- wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach wg PN-EN 12390-3 [211],
- wytrzymałość na zginanie po 28 dniach wg PN-EN 12390-5 [210],
- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach PN-EN 12390-6 [220],
- moduł sprężystości betonu wg PN-EN 12390-13 [221],
- ścieralność betonu metodą tarczy Boehmeo wg PN-EN 13892-3 [222],
- odporność na uderzenia wg PN-EN 13813 oraz PN-EN ISO 6272-1 [223,224].

Wyniki przedstawiono w kolejnych podrozdziałach.

11.1.1 Właściwości mieszanki betonowej

W Tabeli 27 przedstawiono wyniki badań mieszanki betonowej.

Tabela 27. Wyniki badań właściwości mieszanki betonowej z włóknami

Oznaczenie mieszanki	Konsystencja mieszanki metodą opadu stożka	Zawartość powietrza metodą ciśnieniową	Gęstość mieszanki
	[mm]	[%]	[kg/dm ³]
REF	120	6,0	2,27
MSF-1-10	100	6,3	2,27
RTSF-10	110	6,0	2,27
MSF-1-20	90	6,0	2,28
RTSF-20	110	6,4	2,27
MSF-1-30	60	6,0	2,30
RTSF-30	90	6,6	2,28
MSF-1-40	40	6,3	2,33
RTSF-40	70	6,6	2,29
niepewność pomiaru	± 10	± 0,4	± 0,02

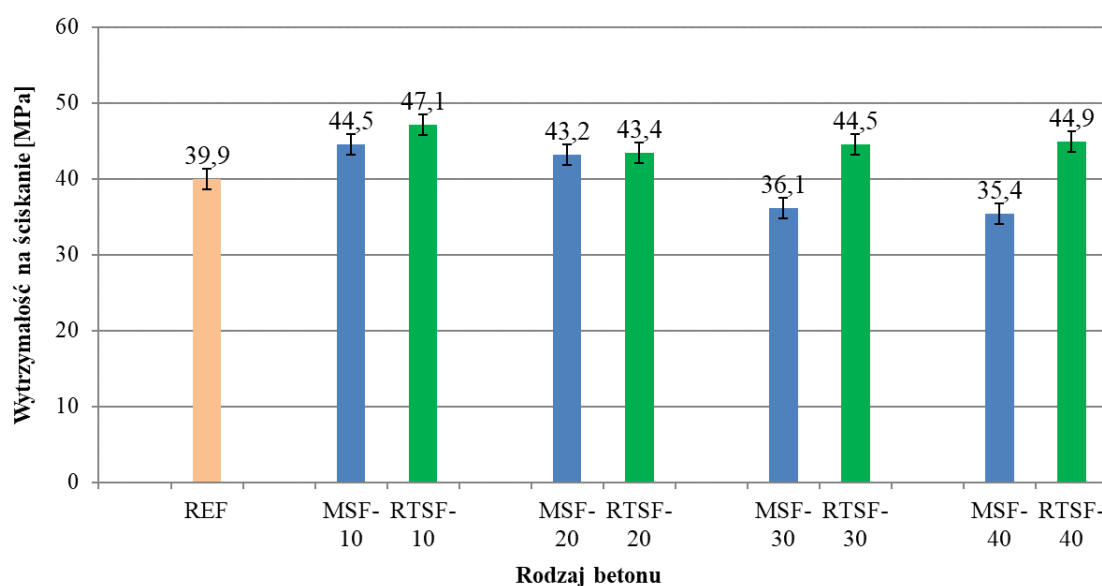
Wyniki badań właściwości mieszanki betonowej wykazały, że konsystencja mieszanki spada wraz ze wzrostem włókien w betonie. Należy zaznaczyć, że zawartość domieszki chemicznej (plastyfikatora) była jednakowa we wszystkich rodzajach betonów. Natomiast zwiększenie domieszki w mieszankach z włóknami spowodowało by wyregulowanie konsystencji do odpowiedniego wymaganego poziomu. Nawet przy największej ilości włókien (40 kg/m^3) mieszanki z włóknami były urabialne a włókna jednorodnie rozmieszczone.

Dodatek włókien MSF-1 i RTSF wpłynął na nieznaczny wzrost zawartości powietrza w mieszance betonowej o ok. 5-10%. Mieszanki z dodatkiem włókien RTSF powodowały niewiele większe napowietrzenie niż z dodatkiem włókien MSF-1, jednak biorąc pod uwagę niepewność pomiaru można stwierdzić, że wyniki są równoważne dla RTSF jak i dla MSF. Nie zaobserwowano istotnych korelacji z analizy wyników gęstości mieszanek betonowych. Mieszanki z dodatkiem włókien MSF-1 wykazały nieco wyższe gęstości niż mieszanki z dodatkiem włókien RTSF.

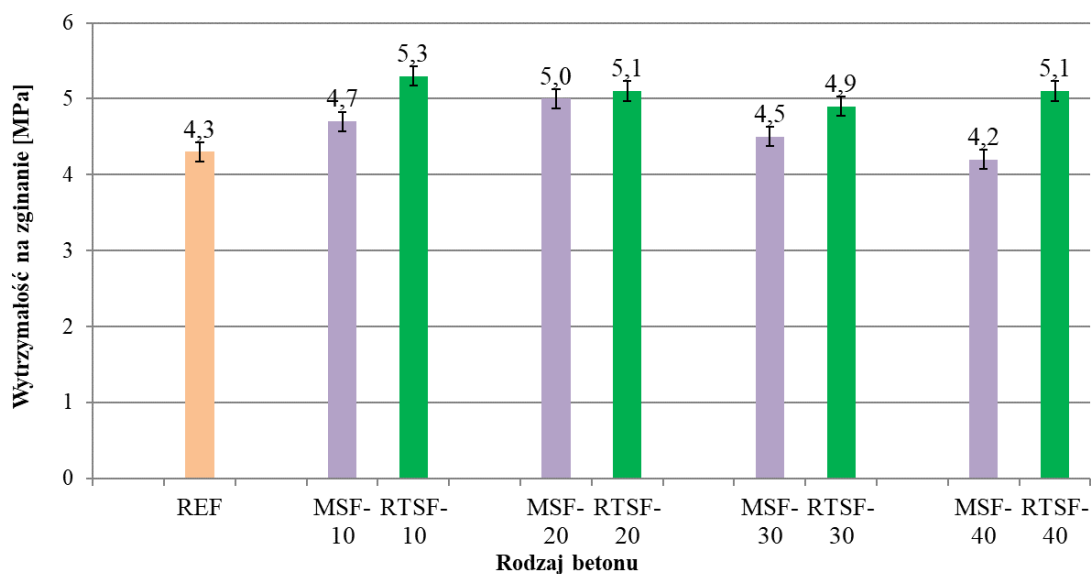
12.1.1 Właściwości wytrzymałościowe

Na Rysunkach 69-71 przedstawiono wyniki badań kolejno: wytrzymałości na ściskanie, zginanie i rozłupywanie, po 28 dniach. Badania wykonano na 3 próbkach o wymiarach:

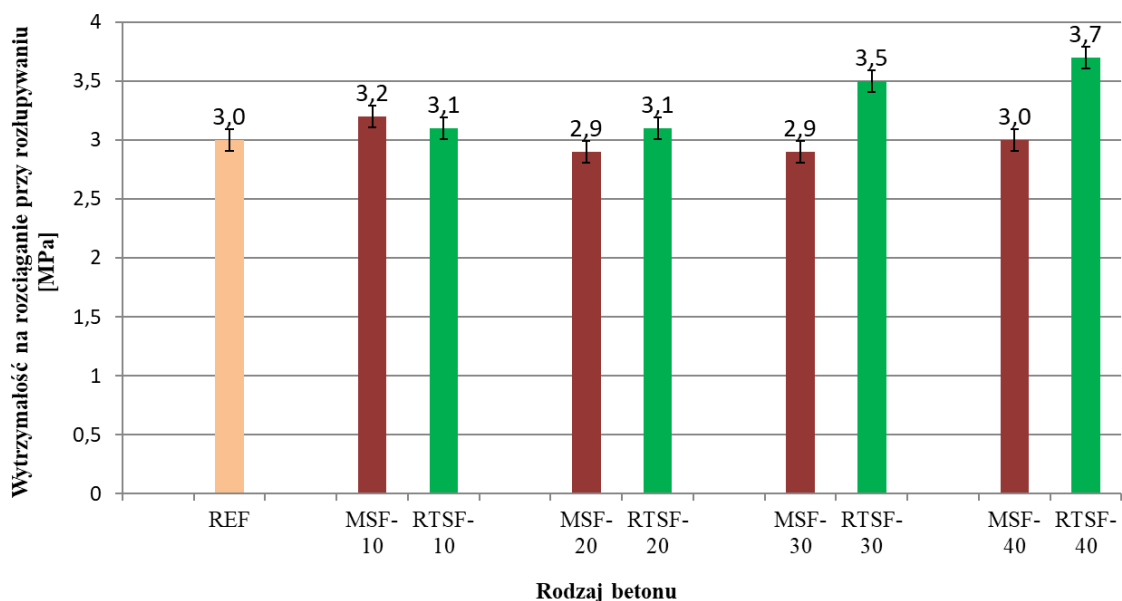
- wytrzymałość na ściskanie na próbkach sześciennych o boku 150 mm
- wytrzymałość na zginanie na próbkach o wymiarach $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}$,
- wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu na próbkach walcowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm.



Rysunek 69. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach



Rysunek 70. Wytrzymałość na zginanie po 28 dniach



Rysunek 71. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach

Wyniki badań wytrzymałościowych wskazują, że betony z dodatkiem włókien z recyklingu opon RTSF w ilości 10 i 20 kg/m³ wykazują równoważne właściwości wytrzymałościowe jak betonu z taką samą ilością włókien MSF. Natomiast dla wyższych ilości włókien 30 i 40 kg/m³, betonu z włóknami z recyklingu opon RTSF wykazują wyższe właściwości jak betony z włóknami komercyjnymi MSF. Badania betonów z dodatkiem 30 i 40 kg/m³ potwierdzają wskazaną w pracy tezę, że włókna z recyklingu opon wykazują lepsze właściwości niż taka sama ilość włókien komercyjnych.

Na tak dobre wyniki wytrzymałościowe betonów RTSF wpływa bardzo dobra przyczepność włókien z recyklingu opon, znacznie większa niż włókien MSF. Również niejednorodny kształt włókien RTSF który wpływał na dobre zakotwienie w matrycy cementowej.

12.1.2 Moduł sprężystości

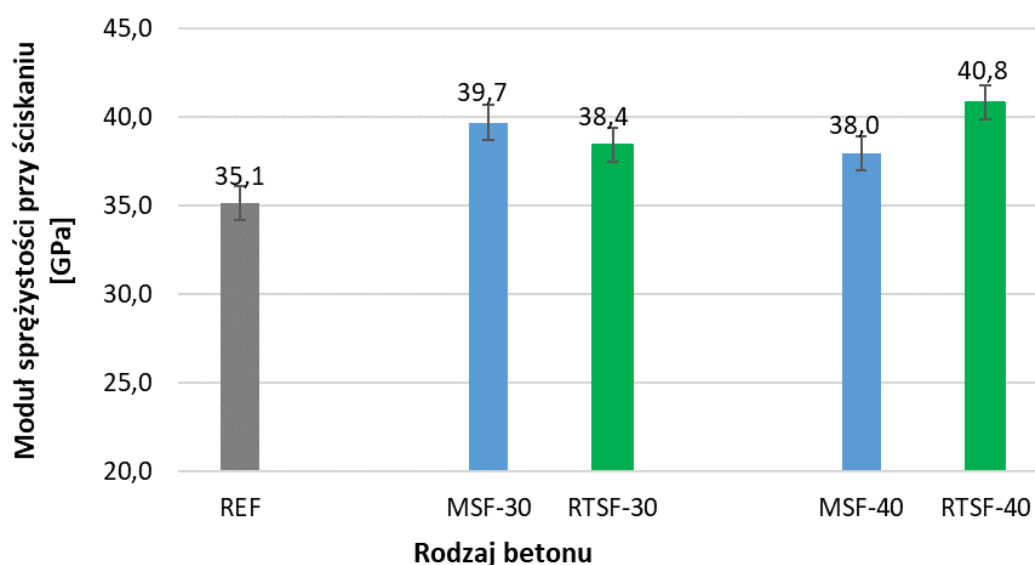
Badanie modułu sprężystości wykonano na 6 próbkach rdzeniowych o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm, z czego dla trzech próbek wykonano badanie wytrzymałości na ściskanie (próbki towarzyszące), a na kolejnych trzech moduł sprężystości przy ściskaniu. Na Fot. 83 przedstawiono próbkę podczas badania modułu sprężystości z zamocowanymi czujnikami tensometrycznymi. Badanie wykonano dla próbek referencyjnych (REF) bez włókien, oraz dla betonów z włóknami RTEF i MSF-1 w ilości 30 i 40 kg/m³. W Tabeli 28 i na Rysunku 72 przedstawiono wyniki badań modułu sprężystości.



Fot 83. Stanowisko do badania modułu sprężystości przy ściskaniu

Tabela 28. Wyniki badań modułu sprężystości

Oznaczenie betonu	Wytrzymałość na ściskanie próbek towarzyszących	Moduł sprężystości przy ściskaniu, metoda B
	[MPa]	[GPa]
REF	33,3	35,1
MSF-1-30	39,3	39,7
RTSF-30	38,9	38,4
MSF-1-40	41,8	38,0
RTSF-40	50,1	40,8
niepewność pomiaru	± 2,0	± 2,5



Rysunek 72. Moduł sprężystości przy ściskaniu po 28 dniach

Wyniki badań wskazują, że włókna stalowe wpływają na wzrost modułu sprężystości betonu w porównaniu do betonu referencyjnego bez włókien od 8 do 16%.

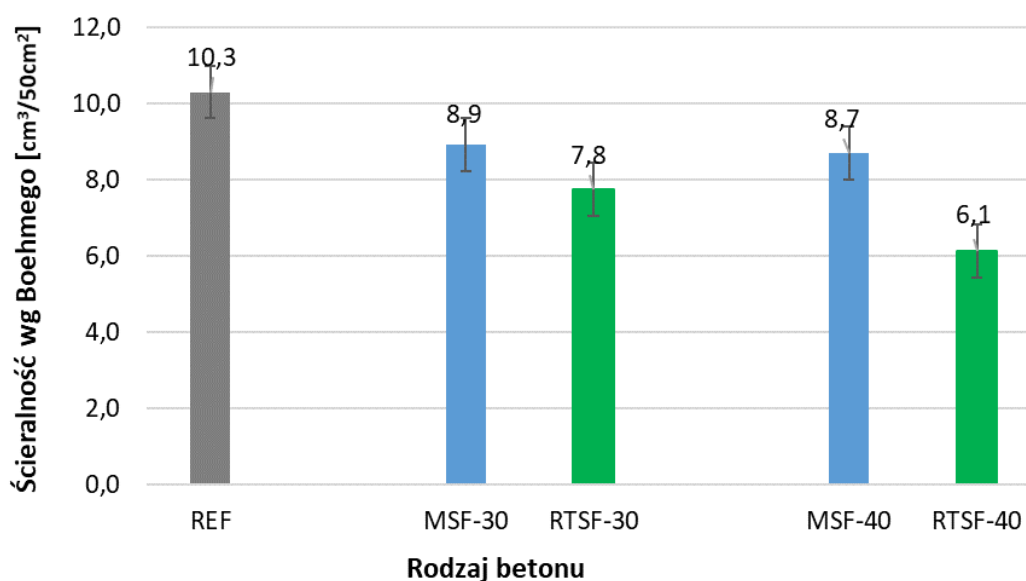
Dla betonów z dodatkiem 30 kg/m³ włókien moduł sprężystości jest równoważny dla betonów z włóknami RTSF i MSF-1 (w granicach błędów pomiarowych). Natomiast dla dozowania 40 kg/m³ betony z dodatkiem włókien RTSF wykazały o ok. 7,4 % większy moduł sprężystości w porównaniu z betonami z dodatkiem włókien MSF-1, co również potwierdza postawioną w pracy tezę.

12.1.3 Ścieralność

Badanie ścieralności wykonano na trzech betonowych próbkach sześciennych o wymiarach ok. 70×70×70 mm, które wycięto ze środka próbek betonowych o wymiarach 100×100×500 mm. W Tabeli 29 i na Rysunku 73 przedstawiono wyniki badania ścieralności.

Tabela 29. Wyniki badań ścieralności metodą tarczy Boehmego

Oznaczenie betonu	Ścieralność metodą tarczy Boehmego [cm ³ /50cm ²]
REF	10,31
MSF-1-30	8,93
RTSF-30	7,76
MSF-1-40	8,71
RTSF-40	6,14
niepewność pomiaru	± 1,00



Rysunek 73. Ścieralność betonu we Boehmego

Wyniki badań wskazują, że włókna stalowe wpływają na obniżenie ścieralności betonu. Niska ścieralność oznacza, że mniej materiału zostało startego podczas badania co jest korzystne dla betonów, zwłaszcza posadzkowych, podatnych na czynniki ścierne takie jak pojazdy, wózki widłowe i inne. Betony z dodatkiem włókien z recyklingu opon RTSF wykazują niższą ścieralność niż betony z dodatkiem włókien komercyjnych. Dla dozowania

40 kg/m³ beton z RTSF wykazuje niższą o 30% ścieralność niż dla betonu z MSF. Na obniżenie ścieralności betonów z RTSF ma wpływ bardzo dobra przyczepność włókien RTSF do matrycy cementowej i skuteczne zbrojenie (spinanie) zaczynu cementowego. Niższa ścieralność dla betonów z włóknami RTSF stanowi potwierdzenie postawionej w pracy tezy, że oczyszczone włókna z recyklingu opon RTSF mogą pełnić rolę efektywnego zbrojenia do betonu a wyniki badania ścieralności są lepsze niż dla włókien MSF.

12.1.4 Odporność na uderzenia

Badanie odporności na uderzenie jest często wykonywane dla betonów posadzkowych, z powodu ryzyka uszkodzeń i zarysowań posadzek betonowych przez upadające ciężkie przedmioty. Badanie zostało przeprowadzone na dwóch próbkach o wymiarach 30x30x5 cm na powierzchni zatartej (nie odbitej od formy). Badanie polega na upadku ciężarka o masie 1 kg i określonych wymiarach, na powierzchnię betonu, z coraz większej odległości i obserwacji powierzchni betonu za pomocą lupy. Badanie wykonuje się do momentu obserwacji zniszczenia próbki. Miejsce uderzenia można uważać za zniszczone, jeśli wystąpiło spękanie (pęknięcie, rysa) lub złuszczenie (odspojenie) warstwy wierzchniej. Natomiast widoczne zagłębienie nie stanowi zniszczenia.

Widoczne ślady po uderzeniu można scharakteryzować następująco:

- uderzenie 1kg z wysokości ≤ 400 mm: brak pęknięć lub odspojień betonu po uderzeniu, widoczne zagłębienie (śląd po uderzeniu).
- uderzenie 1kg z wysokości > 400 mm: wystąpiły zniszczenia w postaci odspojenia i spękań betonu po uderzeniu.

W Tabeli 30 przedstawiono wyniki badania odporności na uderzenie betonów: referencyjnego bez włókien oraz z dodatkiem 30 i 40 kg/m³ włókien REF i MSF-1. Klasyfikacje wyników jako wskaźniki odporności na uderzenie IR wykonano w oparciu o normę PN-EN 13813 [223].

Tabela 30. Wyniki badań odporności na uderzenia

Oznaczenie betonu	Odporność na uderzenie	IR
REF	4,0 Nm	4,0
MSF-1-30	2,5 Nm	2,5
RTSF-30	4,0 Nm	4,0
MSF-1-40	3,0 Nm	3,0
RTSF-40	8,0 Nm	8,0

Wyniki badań wskazują, że włókna z recyklingu opon RTSF wpływają na wzrost odporności na uderzenia betonu bardziej niż włókna komercyjne MSF. Im wyższa wartość włókien RTSF tym wyższa odporność na uderzenie, dla dozowania 40 kg/m³ włókna RTSF wykazały o 100% wyższą odporność na uderzenie niż beton referencyjny i ok. 160% wyższą niż beton z taką samą ilością włókien MSF-1. Wyższe wyniki odporności na uderzenie betonów z włóknami RTSF niż z włóknami MSF potwierdziły postawioną w pracy tezę.

12.2 Badania na zgodność z normą PN-EN 14889-1:2007 Włókna do betonu - Część 1: Włókna stalowe - Definicje, wymagania i zgodność

Włókna stalowe do betonu wprowadzane są na rynek na podstawie zgodności z normą zharmonizowaną PN-EN 14889-1:2007 [11]. Zakres tej normy obejmuje wymagania dotyczące włókien stalowych przeznaczonych do konstrukcyjnego i niekonstrukcyjnego stosowania w betonie, zaprawie i zaczynie. Włókna stalowe można wprowadzić do obrotu według systemu oceny zgodności 1 (do stosowania konstrukcyjnego w betonie, zaprawie lub zaczynie) lub 3 (do innych zastosowań w betonie, zaprawie lub zaczynie).

Niezależnie od systemu oceny zgodności, producent włókien stalowych musi wykonać badania wymienione w Tabeli 31.

Tabela 31. Wymagania normy PN-EN 14889-1:2007

L.p.	Badana cecha	Wymaganie normy PN-EN 14889-1:2007
1	Wymiary: średnica, długość, długość rozwinięta	wartość deklarowana
2	Wytrzymałość na rozciąganie	wartość deklarowana
3	Moduł sprężystości	wartość deklarowana
4	Wpływ na konsystencję	wartość deklarowana
5	Wpływ na wytrzymałość	Producent powinien deklarować zawartość włókien w kg/m ³ przy których osiąga się wytrzymałość resztkową na rozciąganie przy zginaniu równą: 1,5 MPa przy rozwarciu rysy CMOD = 0,5 mm, oraz 1,0 MPa przy rozwarciu rysy CMOD = 3,5 mm

W niniejszym rozdziale oceniono możliwość wprowadzenia włókien z recyklingu opon RTSF na podstawie zgodności z normą PN-EN 14889-1 [11]. Wyniki badań włókien RTSF porównano z wynikami badań włókien MSF-1.

Badania 1-4 w Tabeli 31 są to wartości deklarowane przez producenta. Badania 1-3 zostały przedstawione w rozdziale 9.1 Badania identyfikacyjne włókien, w Tabeli 12 podano wymiary, a w Tabeli 13 wytrzymałość na rozciąganie i moduł sprężystości betonu. Badania 4 (wpływ na konsystencję) i 5 (wpływ na wytrzymałość) wykonuje się na betonie wzorcowym według normy PN-EN 14845-1:2008 [205], który został opisany w rozdziale 8.3 Beton wzorcowy, a skład podano w Tabeli 11. W Tabeli 32 podano wyniki wpływu włókien RTSF i MSF-1 na konsystencję betonu wzorcowego, w porównaniu z betonem referencyjnym (REF) bez włókien.

Tabela 32. Wpływ włókien RTSF i MSF-1 na konsystencję betonu

Oznakowanie betonu	Zawartość włókien [kg/m ³]	Opad stożka		Konsystencja Czas Vebe [s]
		rodzaj	wartość [mm]	
REF	-	właściwy	30	5 ± 1
MSF-1-10	10	właściwy	30	5 ± 1
MSF-1-20	20	właściwy	20	6 ± 1
MSF-1-30	30	właściwy	20	6 ± 1
RTSF-10	10	właściwy	20	6 ± 1
RTSF-20	20	właściwy	10	7 ± 1
RTSF-30	30	właściwy	10	9 ± 1

Wpływ na konsystencję jest wartością deklarowaną. Wyniki badań wskazują, że włókna, zarówno RTSF jak i MSF-1, wpływają na spadek konsystencji mieszanki wzorcowej (referencyjnej). Większy spadek konsystencji wykazały włókna recyklingowe z opon niż włókna stalowe normowe, jednak nie stanowi to ograniczenia w zastosowaniu włókien z opon (konsystencja mieszanki betonowej regulowana jest za pomocą domieszek chemicznych).

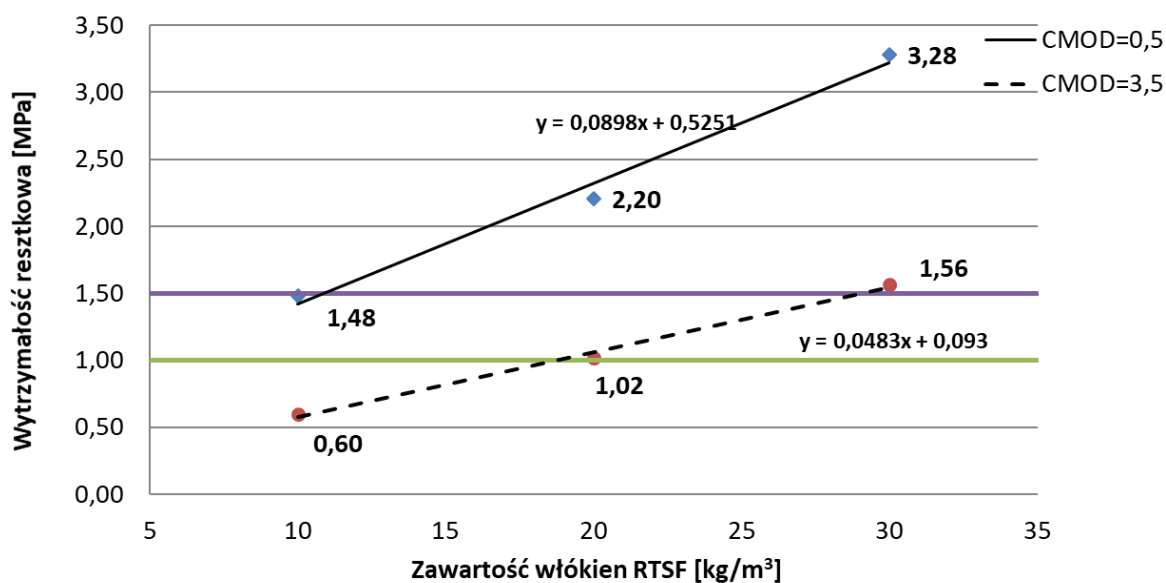
Kluczowym badaniem oceny włókien stalowych pod kątem zgodności z wymaganiami normy [11] jest badanie wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu wg PN-EN 14845-2 [225] oraz PN-EN 14651 [165]. Producent powinien deklarować zawartość włókien w kg/m³ przy których osiąga się:

- wytrzymałość resztkową na rozciąganie przy zginaniu równą 1,5 MPa przy rozwarciu rysy CMOD równym 0,5 mm, oraz
- wytrzymałość resztkową na rozciąganie przy zginaniu równą 1,0 MPa przy rozwarciu rysy CMOD równym 3,5 mm.

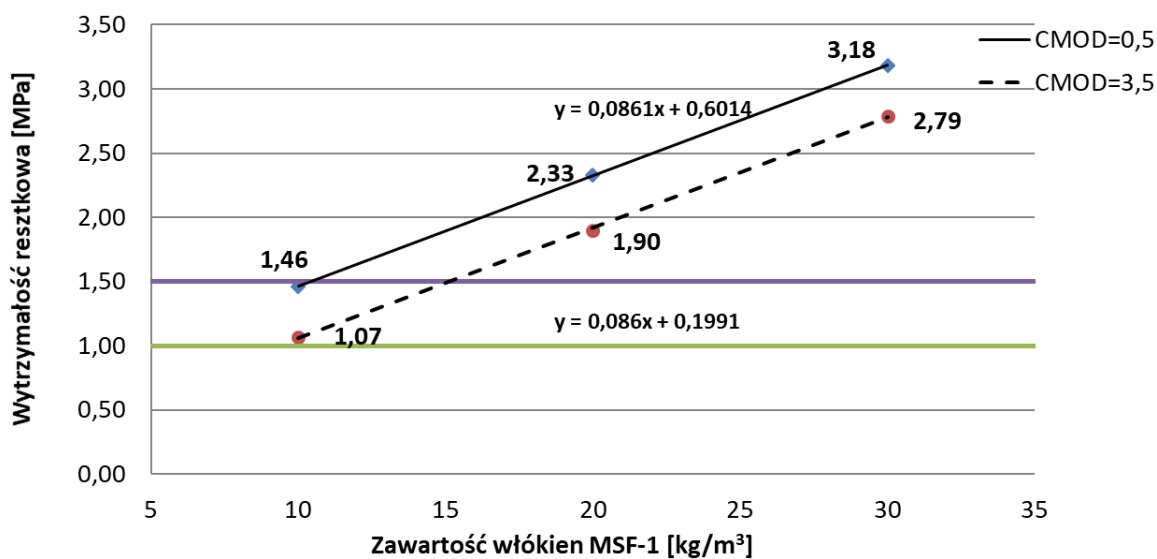
Badanie wykonuje się po 28 dniach, jako trójpunktowe zginanie belek z nacięciem. Badanie zostało opisane w punkcie 9.1, z tym że według normy [225] badania wstępne typu dla włókien należy wykonać na 12 próbkach.

W celu oszacowania ilości włókien w betonie, przy której będą spełnione dwa kryteria wytrzymałościowe, dla włókien RTSF i włókien MSF-1 przygotowano po 12 próbek w ilości 10, 20 i 30 kg/m³. Na rysunkach 74 i 54 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości resztkowych na rozciąganie przy zginaniu dla betonów z włóknami MSF-1 i

RTSF, przy rozwarciu rysy CMOD=0,5 i 3,5. Linią fioletową i zieloną na wykresach zaznaczono wymagania normy PN-EN 14889-1 [11].



Rysunek 74. Wyniki wytrzymałości resztkowych na rozciąganie przy zginaniu dla włókien MSF-1 przy rozwarciu rysy CMOD=0,5 i 3,5 mm



Rysunek 75. Wyniki wytrzymałości resztkowych na rozciąganie przy zginaniu dla włókien RTSF przy rozwarciu rysy CMOD=0,5 i 3,5 mm

Na podstawie równań funkcji liniowej z rysunków 74 i 75 można wyznaczyć niezbędną zawartość zbrojenia rozproszonego dla osiągnięcia wytrzymałości resztkowej 1,5 MPa przy rozwarciu rysy CMOD = 0,5 mm i oraz wytrzymałości resztkowej 1,0 MPa przy rozwarciu rysy CMOD = 3,5 mm.

Szacuje się z równań, że minimalna ilość włókien MSF-1 w betonie przy której można osiągnąć jednocześnie wytrzymałość resztkową równą 1,5 MPa przy rozwarciu rysy CMOD równym 0,5 mm oraz wytrzymałość resztkową 1,0 MPa przy rozwarciu rysy CMOD równym 3,5 mm wynosi **10,5 kg/m³**. Natomiast z równań funkcji liniowej na rysunku 33 szacowana minimalna ilość włókien RTSF, która pozwoli na spełnienie ww. wymagań, wynosi **18,8 kg/m³**.

Większa ilość włókien z opon RTSF, w porównaniu do normowych włókien stalowych MSF-1 wydaje się być uzasadniona biorąc pod uwagę, że włókna A1 są włóknami pochodzącymi z recyklingu: są mieszaniną włókien o różnych wymiarach, średnica jest znacznie cieńsza niż włókien MSF-1. Istotne w tym badaniu jest rozmieszczenie włókien w przekroju belki, ich długość a przede wszystkim ich przyczepność do matrycy cementowej. Bardzo dobra przyczepność włókien z recyklingu opon została opisana w rozdziale 10.4, natomiast równomierne ich rozmieszczenie w rozdziale 10.6. Biorąc pod uwagę długość, im dłuższe włókna, tym większa szansa, że przeniosą one większe obciążenia przy coraz większym rozwarciu rysy. Niemniej jednak spełniły one wymagania wytrzymałościowe normy PN-EN 14889-1 [11] i, z punktu widzenia wytrzymałości betonu, mogą być traktowane jako wyrób budowlany oznakowany znakiem budowlanym B lub CE.

Głównym czynnikiem, który utrudnia wprowadzenie włókien z recyklingu opon do obrotu na zgodność z normą PN-EN 14889-1 [11] są niejednorodne wymiary oraz ryzyko zapewnienia jednorodności produkcji. Norma na włókna stalowe do betonu wymaga deklarowania konkretnych, jednorodnych i powtarzalnych kształtów oraz wymiarów (przy określonych poziomach tolerancji). Natomiast włókna RTSF stanowią mieszaninę włókien o różnych kształtach, długości i średnicy. Należy zaznaczyć, że w niniejszej pracy badane były wybrane włókna RTSF, oczyszczone i najbardziej jednorodne. Lecz nawet one nie spełniły by wymagań i tolerancji narzuconych w PN-EN 14889-1 [11] pod względem wymiarów: długości, średnicy i ich tolerancji. Dlatego najbardziej prawdopodobną ścieżką wprowadzenia oczyszczonych włókien stalowych z opon na rynek budowlany jest Krajowa lub Europejska Ocena Techniczna, w której można potraktować włókna z opon jako mieszaninę włókien o różnych długościach i średnicach, o odpowiednich tolerancjach w przypadku kontroli wymiarów. Dodatkową cechą, według której można identyfikować włókna może być np. gęstość nasypowa włókien.

12.3 Badania w skali rzeczywistej

W ostatnim rozdziale przedstawiono wyniki przeprowadzonych prób dozowania włókien z recyklingu opon w skali rzeczywistej na wytwórni betonu towarowego.

Wszystkie dotychczasowe badania w niniejszej rozprawie doktorskiej prowadzone były w warunkach laboratoryjnych. Betony z dodatkiem włókien RTSF i MSF wykonywane

były w mieszarkach laboratoryjnych, gdzie włókna dozowane były ręcznie do mieszarki betonowej. Włókna RTSF stanowią mieszaninę włókien o różnych długościach i średnicach oraz niejednorodnym kształcie, co powoduje ich zbitcie i splątanie. Wygląd mieszaniny włókien RTSF przedstawiony na Fot. 84.



Fot 84. *Mieszanina włókien RTSF*

Ręczne dozowanie włókien RTSF do mieszalnika laboratoryjnego spowodowało ich jednorodne rozmieszczenie w mieszance betonowej i betonie stwardniałym, co zostało potwierdzone w badaniach obrazowania dystrybucji włókien metodą tomografii komputerowej (rozdział 10.3). O ile w warunkach laboratoryjnych ręczne rozdzielanie i dozowanie włókien do mieszarki nie powodowało problemów, to w warunkach komercyjnych dozowanie zbitej mieszaniny włókien RTSF mogło stanowić problem technologiczny. Sposób dozowania włókien stanowi jedną z głównych obaw producentów betonu i włókien przed wdrożeniem RTSF do obrotu.

Przy współpracy z wytwórnią betonu towarowego w Warszawie wykonano mieszanki betonowe z dodatkiem włókien MSF oraz RTSF w skali technicznej, rzeczywistej. Włókna RTSF dozowano do betonu posadzkowego w ilości 25 kg/m³.

Komercyjne włókna stalowe dozowane są do betonowozu na wytwórni betonu towarowego za pomocą specjalnego systemu dozowania, tzw. wstrzeliwarki, której drgania zapewniają rozdzielanie włókien i stopniowe dozowanie do mieszanki betonowej. Widok sposobu dozowania włókien MSF do betonowozu za pomocą specjalnego systemu dozowania przedstawiono na Fot. 85-87.



Fot 85. System dozowania włókien stalowych do betonowozu



Fot 86. Dozowanie włókien MSF do betonowozu



Fot 87. System dozujący włókna stalowe do betonowozu

W przypadku włókien z recyklingu opon, które zawierają też bardzo krótkie włókna, powszechnie stosowany system dozowania, pokazany na Fot. 86-88 mógł nie być odpowiedni, gdyż przez szerokie szczeliny mogły przedostawać się zlepione skupiska włókien RTSF które tworzyły by tzw. jeże w mieszance betonowej. Dlatego aby równomiernie zadozować włókna z recyklingu opon na powszechnie stosowaną wstrzeliwarkę ułożono gęstszą kratkę, której wstrząsy podczas pracy rozbijały skupiska włókien RTSF, co pozwoliło na odpowiednie zadozowanie włókien RTSF do betonowozu. Na Fot 88-89 pokazano sposób dozowania włókien RTSF do betonowozu.



Fot 88. Sposób dozowania włókien RTSF za pomocą dostosowanej wstrzeliwarki.



Fot 89. Sposób dozowania włókien RTSF za pomocą dostosowanego systemu dozowania

Wytworzona na wytwórni betonu mieszanka betonowa, zarówno z włóknami RTSF jak i MSF była jednorodna, włókna z recyklingu opon oraz włókna komercyjne

haczykowane były równomiernie rozłożone w mieszance, bez widocznych skupisk, tzw. jeży. Na Fot. 90



a) b)
Fot 90. Mieszanka betonowa z włóknami, a) MSF, b) RTSF

13. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy doktorskiej przedstawiono ocenę efektywności oczyszczonych włókien z recyklingu opon samochodowych, w porównaniu do włókien stalowych produkowanych przemysłowo.

Badania wstępne miały na celu wybór spośród pięciu zgromadzonych włókien z recyklingu opon, pozyskanych różnymi metodami, jednego rodzaju włókien do badań głównych. Wytypowano włókna dłuższe oczyszczone oraz do porównania standardowe włókna stalowe haczykowane, stosowane jako zbrojenie rozproszone do betonu. W części wstępnej wykonano również badania właściwości identyfikacyjnych włókien (wymiarów, wytrzymałość na rozciąganie, moduł sprężystości drutów pozyskanych z opon i drutów komercyjnych, zawartość zanieczyszczeń we włóknach, skład pierwiastkowy, gęstość właściwą).

Część główna pracy miała na celu ocenę efektywności włókien z recyklingu opon. Efektywność włókien sformułowano jako skuteczne zbrojenie betonu przez włókna, tj. wzmocnienie kruchej matrycy cementowej i wzrost właściwości związanych z rozciąganiem betonu i wzrost pracy zniszczenia. Efektywność włókien została oceniona

wieloma metodami. W części głównej badano m.in. wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu belek z karbem, pracę zniszczenia, wskaźniki odporności na pękanie, przyczepność włókien do matrycy cementowej, analizę strefy kontaktowej włókno-zaczyn, dystrybucję włókien w mieszance betonowej. Innowacyjny zakres badań, m.in. praca zniszczenia określona metoda całkowania numerycznego (metodą prostokątów), jako całkowite pole powierzchni pod wykresem, oraz przyczepność drutów do matrycy cementowej badane metodą pull-off stanowią nowość niniejszej pracy. W analizowanej literaturze brak jest badań na drutach pozyskanych z opon.

Należy dodać, że kluczowe badania, które posłużyły do oceny efektywności zbrojenia betonu przez włókna, tj. wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu, praca zniszczenia i wskaźniki odporności na pękanie zostały wykonane dla trzech różnych włókien stalowych komercyjnych (różniących się kształtem i średnicą) po to, aby mieć większy pogląd na porównywane właściwości betonu i aby ocena efektywności była przeprowadzona w szerszym zakresie.

W części trzeciej wykonano badania aplikacyjne tj. badania właściwości użytkowych betonów posadzkowych z włóknami, badania na zgodność z normą wyrobu dla włókien z recyklingu opon oraz badania w skali technicznej na wytwórni betonu towarowego.

Badania wykazały, że oczyszczone włókna stalowe z recyklingu opon mogą pełnić rolę efektywnego zbrojenia do betonu. Oczyszczone włókna z opon o odpowiedniej długości wzmacniają kruchą matrycę cementową, mostkują pęknięcia powodując ich rozprzestrzenianie się oraz ograniczają powstawanie nowych pęknięć. Niektóre właściwości betonów z odpowiednio wysoką zawartością włókien z recyklingu opon, to jest: wytrzymałość resztkowa, wskaźniki odporności na pękanie, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu, na ściskanie, na rozłupywanie, moduł sprężystości, ścieralność, odporność na uderzenia są nawet wyższe niż betonów z taką samą ilością włókien stalowych komercyjnych. W związku z powyższym teza niniejszej rozprawy doktorskiej: **Oczyszczone włókna stalowe z recyklingu opon samochodowych mogą pełnić rolę efektywnego zbrojenia rozproszonego do betonu, a niektóre właściwości betonów z ich dodatkiem są równoważne a nawet lepsze niż właściwości betonów z dodatkiem komercyjnych włókien stalowych**, została potwierdzona.

Aby włókna z recyklingu opon mogły pełnić rolę zbrojenia do betonu muszą być spełnione następujące warunki:

- włókna muszą być oczyszczone, tj. poddane specjalnej obróbce technologicznej, po której poziom zanieczyszczeń gumowych i tekstylnych wyniesie do 0,2%,
- włókna muszą być pozbawione włókien znacznie odstających długościami i średnicami, mieszanina musi być jednorodna,
- należy tak dozować włókna do mieszanki, aby zapewnić ich jednorodne rozmieszczenie, bez tworzenia miejscowych skupisk włókien,

- oczyszczone włókna muszą być dozowane w odpowiedniej ilości do betonu (> 30 kg/m³).

Technologia oczyszczania pierwotnie pozyskanych włókien z opon przyczynia się do ich lepszej przyczepności i skuteczności wzmocnienia betonu. Dobra skuteczność zbrojenia oczyszczonych włókien z opon spowodowana jest bardzo dobrą przyczepnością do matrycy cementowej. Badania mikroskopowe wykazały, że powierzchnia włókien jest chropowata, niejednorodna przez co uzyskuje się dobrą przyczepność z matrycą cementową. Powierzchnia włókien z opon pokryta jest produktami hydratacji cementu co dobrze zespala włókna z zaczynem cementowym. Strefa kontaktowa włókno z recyklingu opon – zaczyn jest zwarta, nieporowata, widoczne jest dobre zespolenie włókna z matrycą.

Również właściwości geometryczne włókien wpływają na efektywność zbrojenia. Nieregularny, powyginany i pofalowany kształt włókien oraz mieszanina długości i średnic powodują dobrą przyczepność i ograniczają powstawanie i rozprzestrzenianie pęknięć w różnych płaszczyznach matrycy cementowej, dzięki czemu efekt mostkowania pęknięć jest skuteczniejszy niż w przypadku jednorodnych włókien. Wysokie właściwości wytrzymałościowe drutów w oponie sprawiają, że nawet po procesie recyklingu opon włókna nie tracą swych właściwości mechanicznych.

Aspektem innowacyjnym w niniejszej pracy jest określenie pracy zniszczenia jako miarę odporności na kruche pękanie i efektywności zbrojenia betonu przez włókna z recyklingu opon. Analizując literaturę nie znaleziono wcześniejszych prac, prezentujących takie podejście. Również badanie przyczepności drutów z opon przedstawione w niniejszej pracy stanowią nowość. W dotychczas opublikowanych pracach badano kompozyty cementowe z dodatkiem jedynie krótkich włókien RTSF, a nie drutów pozyskanych z opon.

Efektywność zbrojenia betonu przez włókna zależy od ich ilości, geometrii (długości, średnicy i kształtu) oraz przyczepności włókien do matrycy cementowej (powierzchni włókien). Włókna RTSF stanowią mieszaninę włókien hybrydowych o różnej długości, średnicy i kształcie, przez co efekt mostkujący mikropęknięcia przez włókna oddziałuje na różnych płaszczyznach struktury zaczynu cementowego. Włókna RTSF mają również chropowatą powierzchnię, spowodowana procesem recyklingu, przez co osiągają bardzo dobrą przyczepność do zaczynu cementowego. Uzyskanie wysokiej przyczepności możliwe jest dzięki dodatkowemu procesowi oczyszczania RTSF z zanieczyszczeń gumy, tekstyliów i pyłu stalowego.

Podsumowując, należy podkreślić trzy główne aspekty i korzyści wynikające ze stosowania oczyszczonych włókien stalowych z recyklingu opon samochodowych jako zbrojenie rozproszone do betonu:

- 1) wytrzymałość betonu z dodatkiem włókien z recyklingu – oczyszczone włókna RTSF mogą pełnić rolę efektywnego zbrojenia rozproszonego do betonu i skutecznie wzmocniać kruchą matrycę cementową,

- 2) wpływ na środowisko proponowanego rozwiązania – zmniejszenie śladu węglowego poprzez zastąpienie wysokoemisyjnej produkcji stali włóknami z recyklingu, oszczędność zasobów naturalnych, zagospodarowanie odpadów,
- 3) korzyści ekonomiczne - koszt włókien z recyklingu opon jest niższy niż włókien stalowych komercyjnych.

Badania aplikacyjne przedstawione w ostatnim rozdziale stanowią aspekt wdrożeniowy niniejszej pracy doktorskiej. Właściwości użytkowe betonów posadzkowych z dodatkiem włókien RTSF potwierdzają możliwość ich stosowania do zbrojenia betonu. Na podstawie analizy wymagań normy PN-EN 14889-1 [11] stwierdzono, że włókna RTSF spełniają wymagania wytrzymałościowej tej specyfikacji, natomiast nie spełniają jej pod względem jednorodności wymiarów geometrycznych. Dlatego drogą wprowadzenia RTSF do obrotu jest Krajowa Ocena Techniczna. Badania w skali rzeczywistej na wytwórni betonu towarowego potwierdzają możliwość dozowania włókien RTSF do betonowozu i stosowanie ich do betonu w produkcji przemysłowej betonów towarowych.

Dalsze kierunki pracy

Uzyskane wyniki badań stanowią podstawę do prac mających na celu wdrożenie włókien z recyklingu opon do obrotu. Planuje się kontynuację prac w następującym zakresie:

- upowszechnianie wyników badań na konferencjach krajowych, zagranicznych oraz publikacjach naukowych w celu zwiększenia świadomości nad możliwością stosowania włókien RTSF w budownictwie,
- prace mające na celu wprowadzenie włókien z recyklingu opon do obrotu drogą Krajowej Oceny Technicznej,
- badania właściwości betonów wyprodukowanych w skali rzeczywistej na wytwórni betonu towarowego.

Praca doktorska zrealizowana została na podstawie projektu naukowego Instytutu Techniki Budowlanej numer NZK-099 pt. **”Ocena wpływu dodatku włókien stalowych z recyklingu opon na właściwości użytkowe betonu”**, realizowanego w latach 2019-2023 w Zakładzie Konstrukcji Budowlanych, Geotechniki i Betonu ITB z subwencji Ministerstwa Edukacji i Nauki.

14. Bibliografia

- [1] W. Pichór, Beton. Technologie i metody badań. Praca zbiorowa, redakcja naukowa prof. Jan Deja. Rozdział 18. Betony z dodatkiem włókien., in: Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2020: pp. 815–871.
- [2] A.M. Neville, Właściwości Betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2000.
- [3] T. Ponikiewski, Reologiczne i mechaniczne właściwości betonów samozagęszczalnych z włóknami stalowymi, *Cem. Wapno Bet.* 5 (2012) 301--309.
- [4] Reported by ACI Committee 544, Report on Fiber Reinforced Concrete ACI 544.1R-96, 2002.
- [5] S.P. Shah, J.I. Daniel, Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete. ACI 544.2R-89, Rep. by ACI Comm. 544. (1999) 1–11.
- [6] Reported by ACI Committee 544, Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete ACI 544.4R-18, (2018).
- [7] A. Bentur, S. Mindess, Fibre Reinforced Cementitious Composites, 2006.
- [8] A.E. Naaman, H.W. Reinhardt, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2, London, 1996. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781482271676>.
- [9] H. Singh, Steel Fiber Reinforced Concrete. Behavior. Modeling and Design., Springer, Singapore, 2017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-10-2507-5>.
- [10] T. Ponikiewski, M. Pająk, M. Zagała, Porównanie wpływu stalowych włókien haczykowatych i falisto-haczykowatych na właściwości mechaniczne betonu i betonu zwykłego samozagęszczalnego, *Konf. Dni Betonu 2018, Monogr. Technol. Betonu. Tom 1* 303–314. https://www.dnibetonu.com/wp-content/pdfs/2018/ponikiewski_pajak_zagala.pdf.
- [11] PN-EN 14889-1:2007 Włókna do betonu – Część 1:Włókna stalowe – Definicje, wymagania i zgodność, 2007.
- [12] J.S. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, E.L. P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, and T.W. (eds. . T. Maycock, M. Tignor, IPCC, Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate c, (2018).
- [13] Official Journal of the European Union, P9_TA(2020)0382 EU strategy on adaptation to climate change European Parliament resolution of 17 December 2020 on the EU strategy on adaptation to climate change (2020/2532(RSP)) (2021/C 445/19) 29.10.2021, (2021). Official Journal of the European Union.
- [14] L. Czarnecki, Zrównoważone wyroby budowlane – piękna idea, konieczność cywilizacyjna czy też imperatyw termodynamiczny., *Mater. Bud.* 1 (2022) 64–67. <https://doi.org/10.15199/33.2022.01.09>.
- [15] L. Czarnecki, Moje poszukiwania prawdy w inżynierii materiałów budowlanych, *Mater.*

- Bud. 8 (2020) 4–11. <https://www.materialybudowlane.info.pl/pl/436-wydanie/mb-8-2020/12898-moje-poszukiwania-prawdy-w-inzynierii-materialow-budowlanych.html>.
- [16] L. Czarnecki, J. Deja, Zrównoważone budownictwo; w poszukiwaniu przemiany prometejskiej, *Inżynieria i Bud.* 7 (2021) 300–308. <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-70d0a46b-2af1-4d25-a61e-dd40a4cb793b>.
- [17] L. Czarnecki, J. Deja, K. Furtak, A. Halicka, O. Kapliński, M. Kaszyńska, M. Kruk, K. Kuczyński, E. Szczechowiak, J. Śliwiński, Idee kształtujące innowacyjne wyzwania techniki budowlanej. W poszukiwaniu paradygmatu rozwoju budownictwa., *Mater. Bud.* 7 (2017) 28–33. <https://doi.org/10.15199/33.2017.07.09>.
- [18] L. Czarnecki, J. Deja, K. Furtak, A. Halicka, O. Kapliński, M. Kaszyńska, M. Kruk, K. Kuczyński, E. Szczechowiak, J. Śliwiński, Idee kształtujące innowacyjne wyzwania techniki budowlanej. *Kierunki rozwoju, Mater. Bud.* 7 (2017) 34–39. <https://doi.org/10.15199/33.2017.07.10>.
- [19] L. Czarnecki, H. Justnes, Zrównoważony, trwały beton, *Cem. Wapno Bet.* (2012) 341–362.
- [20] L. Czarnecki, M. Kaproń, Definiowanie zrównoważonego budownictwa. Cz.1, *Mater. Bud.* 1 (2010) 69–71. <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BTB2-0058-0097>.
- [21] S. Senesavath, A. Salem, S. Kashkash, The effect of recycled tyre steel fibres on the properties of concrete, *Pollack Period.* 2021 (2021) 1–7. <https://doi.org/10.1556/606.2021.00388>.
- [22] M. Chen, H. Si, X. Fan, Y. Xuan, M. Zhang, Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.* 316 (2022) 125896. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125896>.
- [23] ETRA - The European Tyre Recycling Association, Belgium, n.d. <https://www.etra-eu.org/>.
- [24] ECOLANES project, Economical and sustainable pavement infrastructure for surface transport, Final Report Summary, FP6-SUSTDEV, Belgium, 2009. <https://cordis.europa.eu/project/id/31530/reporting/pl>.
- [25] EnCoRe: Environmentally-friendly solutions for Concrete with Recycled and natural components, FP7-PEOPLE-2011-IRSES, Università Degli Studi Di Salerno, 2014. <https://www.encore-fp7.unisa.it/project>.
- [26] B.S. Thomas, R.C. Gupta, A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54 (2016) 1323–1333. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092>.
- [27] J. Wang, Q. Dai, R. Si, S. Guo, Mechanical, durability, and microstructural properties of macro synthetic polypropylene (PP) fiber-reinforced rubber concrete, *J. Clean. Prod.* 234 (2019) 1351–1364. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.272>.
- [28] C. Sathiskumar, S. Karthikeyan, Recycling of waste tires and its energy storage application of by-products –a review, *Sustain. Mater. Technol.* 22 (2019) e00125. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00125>.
- [29] A. Michalik, F. Chyliński, J. Bobrowicz, W. Pichór, Effectiveness of Concrete Reinforcement

- with Recycled Tyre Steel Fibres, *Materials* (Basel). 15 (2022).
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma15072444>.
- [30] A. Michalik, F. Chyliński, A. Piekarczyk, W. Pichór, Evaluation of recycled tyre steel fibres adhesion to cement matrix, *J. Build. Eng.* 68 (2023) 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106146>.
- [31] A. Michalik, F. Chyliński, P. Kupisz, Ł. Zacharski, W. Pichór, Wpływ włókien stalowych z recyklingu opon na cechy wytrzymałościowe betonu., *Inżynieria i Bud.* 9–10 (2022) 397–399.
- [32] A. Michalik, P. Kupisz, A. Piekarczyk, Ocena możliwości zastosowania odpadowych włókien z opon jako zbrojenie betonu w aspekcie wymagań normy PN-EN 14889-1, in: XI Konf. Dni Betonu 2021. Monogr. Technologii Betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2021: pp. 223–238.
- [33] H. Hu, P. Papastergiou, H. Angelakopoulos, M. Guadagnini, K. Pilakoutas, Mechanical properties of SFRC using blended manufactured and recycled tyre steel fibres, *Constr. Build. Mater.* 163 (2018) 376–389. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.116>.
- [34] H. Tlemat, *Steel Fibres from Waste Tyres to Concrete: Testing, Modelling and Design* (PhD thesis), The University of Sheffield, 2004.
<https://doi.org/https://etheses.whiterose.ac.uk/12863/>.
- [35] A.G. Graeff, *Rozprawa doktorska: Long-term performance of recycled steel fibre reinforced concrete for pavement applications* (PhD thesis)., Sheffield, 2011.
- [36] H. Hu, *Mechanical Properties of Blended Steel Fibre Reinforced Concrete Using Manufactured and Recycled Fibres from Tyres* (PhD thesis), The University of Sheffield, 2018. <https://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.749516>.
- [37] H. Al-musawi, F.P. Figueiredo, S.A. Bernal, M. Guadagnini, K. Pilakoutas, Performance of rapid hardening recycled clean steel fibre materials, *Constr. Build. Mater.* 195 (2019) 483–496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.026>.
- [38] M.A. Aiello, F. Leuzzi, G. Centonze, A. Maffezzoli, Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength, *Waste Manag.* 29 (2009) 1960–1970.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.12.002>.
- [39] G. Centonze, M. Leone, M.A. Aiello, Steel fibres from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 46–57.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.088>.
- [40] C. Frazão, B. Díaz, J. Barros, J.A. Bogas, F. Toptan, An experimental study on the corrosion susceptibility of Recycled Steel Fiber Reinforced Concrete, *Cem. Concr. Compos.* 96 (2019) 138–153. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.011>.
- [41] F. Grzymski, M. Musiał, T. Trapko, Mechanical properties of fibre reinforced concrete with recycled fibres, *Constr. Build. Mater.* 198 (2019) 323–331.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.183>.
- [42] M. Leone, G. Centonze, D. Colonna, F. Micelli, M.A. Aiello, Fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber: Shear behaviour, *Constr. Build. Mater.* 161 (2018) 141–155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.101>.

- [43] Ł. Skarżyński, J. Suchorzewski, Mechanical and fracture properties of concrete reinforced with recycled and industrial steel fibres using Digital Image Correlation technique and X-ray micro computed tomography, *Constr. Build. Mater.* 183 (2018) 283–299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.182>.
- [44] Z. Zamanzadeh, L. Lourenço, J. Barros, Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete failing in bending and in shear, *Constr. Build. Mater.* 85 (2015) 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.070>.
- [45] H. Al-musawi, F.P. Figueiredo, M. Guadagnini, K. Pilakoutas, Shrinkage properties of plain and recycled steel–fibre-reinforced rapid hardening mortars for repairs, *Constr. Build. Mater.* 197 (2019) 369–384. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.099>.
- [46] A. Caggiano, P. Folino, C. Lima, E. Martinelli, M. Pepe, On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibres, *Constr. Build. Mater.* 147 (2017) 286–295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.160>.
- [47] A. Caggiano, S. Gambarelli, E. Martinelli, N. Nisticò, M. Pepe, Experimental characterization of the post-cracking response in Hybrid Steel/Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete, *Constr. Build. Mater.* 125 (2016) 1035–1043. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.068>.
- [48] M. Mastali, A. Dalvand, A.R. Sattarifard, M. Illikainen, Development of eco-efficient and cost-effective reinforced self-consolidation concretes with hybrid industrial/recycled steel fibres, *Constr. Build. Mater.* 166 (2018) 214–226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.147>.
- [49] D. Bjugovic, A. Baricevic, S. Lakusic, D. Damjanovic, I. Duvnjak, Positive interaction of industrial and recycled steel fibres in fibre reinforced concrete, *J. Civ. Eng. Manag.* 19 (2013). <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.802710>.
- [50] A. Baričević, D. Bjugović, M. Skazlić, Hybrid Fiber–Reinforced Concrete with Unsorted Recycled-Tire Steel Fibres, *J. Mater. Civ. Eng.* 29 (2017) 0899–1561. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001906](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001906).
- [51] M.N. Isa, K. Pilakoutas, M. Guadagnini, H. Angelakopoulos, Mechanical performance of affordable and eco-efficient ultra-high performance concrete (UHPC) containing recycled tyre steel fibres, *Constr. Build. Mater.* 255 (2020) 119272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119272>.
- [52] Our Common Future. The World Commission on Environment and Development. Brundtland Report., United Nations, 1987.
- [53] Zrównoważony Rozwój. Międzyszkona Internetowa Platforma Ekologiczna. <http://www.mipe.oswiata.org.pl/>.
- [54] Millenium Declaration. Millennium Development Goals. A/RES/55/2, United Nations, 2000. https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_55_2.pdf.
- [55] UNIC WARSAW. Ośrodek informacji ONZ w Warszawie. Zrównoważony Rozwój i Cele Zrównoważonego Rozwoju. <https://www.unic.un.org.pl/>.
- [56] Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Developmen. A/RES/70/1,

- 2015.
- [57] O.W.G. i Rozwoju, Agenda na rzecz Zrównoważonego Rozwoju 2030: W kierunku pomyślnego wdrożenia w Polsce. Seria "Lepsza Polityka Państwa," Paryż, 2017. <https://www.oecd.org/poland/Better-Policy-Series-Poland-Nov-2017-PL.pdf>.
- [58] Zrównoważone budownictwo. Wiedza normalizacyjna., Pol. Kom. Norm. <https://wiedza.pkn.pl/web/wiedza-normalizacyjna/zrownowazone-budownictwo>.
- [59] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, ROZPORZĄDZENIE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) NR 305/2011 (CPR) z dnia 9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzania do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające dyrektywę Rady 89/106/EWG, n.d.
- [60] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, Dyrektywa Rady z dnia 21 grudnia 1988 r. w sprawie zbliżenia przepisów ustawowych, wykonawczych i administracyjnych Państw Członkowskich odnoszących się do wyrobów budowlanych (89/106/EWG), 1989. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:31989L0106&from=PL>.
- [61] Komisja Europejska, Komunikat Komisji Europejskiej do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów w sprawie możliwości efektywnego gospodarowania zasobami w sektorze budowlanym. COM(2014) 445 final., (2014). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0445&from=en>.
- [62] Zrównoważone Budownictwo. Instytut Techniki Budowlanej., <https://www.itb.pl/zrownowazone-budownictwo1>.
- [63] Kryzys ekologiczny. Wiedza. <https://www.ekologia.pl/wiedza/slowniki/leksykon-ekologii-i-ochrony-srodowiska/kryzys-ekologiczny>.
- [64] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, P9_TA(2019)0078 Alarmująca sytuacja klimatyczna i środowiskowa Rezolucja Parlamentu Europejskiego z dnia 28 listopada 2019 r. w sprawie alarmującej sytuacji klimatycznej i środowiskowej (2019/2930(RSP)) (2021/C 232/06), (2021) 28–29.
- [65] R. Latawiec, P. Woyciechowski, K. Kowalski, Użyteczność betonu zrównoważonego - emisja CO₂, in: Mater. Konferencyjne Dni Betonu 2016, 2016.
- [66] K. Załęgowski, W. Jackiewicz-Rek, A. Garbacz, C. Luc, Carbon footprint of concrete (in Polish), Mater. Budowla. 12 (2013) 34–36.
- [67] PN-EN ISO 14067:2018-10 Gazy cieplarniane -- Ślad węglowy wyrobów -- Wymagania i wytyczne dotyczące kwantyfikacji, 2018.
- [68] M. Kundak, L. Lazić, J. Črnko, CO₂ emissions in the steel industry, Metalurgija. 48 (2009) 193–197.
- [69] Performing a life cycle analysis (LCA) to determine the carbon footprint for medium cements from the CEM I, CEM II and CEM III groups produced in Poland, in accordance with PN-EN 15804: 2012. ITB internal report, work number: 01929/12/Z00NF (in Polish), Warsaw, 2013.
- [70] Komisja Europejska, Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. EUROPEJSKI ZIELONY

- ŁAD. COM(2019) 640 final. Bruksela 11.12.2019, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640>.
- [71] Komisja Europejska, Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. "Gotowi na 55": osiągnięcie unijnego celu klimatycznego na 2030 r. w drodze doneutralności klimatycznej. COM(2021) 550 final. Bruksela, (2021). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0550>.
- [72] Historia opony: ogumienie wczoraj i dziś. Jak to się zaczęło?, (2021). <https://mojafirma.infor.pl/moto/opony/opony-a-z/5314434,Historia-opony-ogumienie-wczoraj-i-dzis-Jak-to-sie-zaczelo.html>.
- [73] Historia opony, (2018). <https://www.oponeo.pl/artukul/historia-opony>.
- [74] Jak zbudowane są opony?, (2016). <https://www.swiatopon.info/artykuly/jak-zbudowane-sa-opony,50310/1>.
- [75] Budowa opon - funkcje poszczególnych elementów, (2019). <https://www.oponeo.pl/artukul/budowa-opon-funkcje-poszczegolnych-elementow>.
- [76] R.K. Singh, B. Ruj, A. Jana, S. Mondal, B. Jana, A.K. Sadhukhan, P. Gupta, Pyrolysis of three different categories of automotive tyre wastes: Product yield analysis and characterization, J. Anal. Appl. Pyrolysis. 135 (2018) 379–389. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.08.011>.
- [77] Produkcja opon - krok po kroku, (2021). <https://www.oponeo.pl/artukul/produkcja-opon>.
- [78] Polyester Tyre Cord Fabric Buyer, (2022). <https://www.fibre2fashion.com/fabrics/polyester-tire-cord-fabric-buyers-19163796>.
- [79] Nylon Dipped Nylon6 Tyre Cord Fabric, (2022). https://www.alibaba.com/product-detail/Nylon-Dipped-Nylon6-Tyre-Cord-Fabric_245029900.html.
- [80] Nylon 1260/2 Cord, (2022). <https://www.indiamart.com/proddetail/nylon-1260-2-cord-7553848130.html>.
- [81] Steel cord for tire reinforcement, (2022). <https://www.bekaert.com/en/products/automotive/corner/steel-cord-for-tire-reinforcement>.
- [82] Steel Cord, (2022). <http://www.tokusen.co.jp/en/product/product251.html>.
- [83] Component and Types Of Steel Cord, (2022). https://hengxingsteelwire.com/product/Steel-Cord-for-Radial-Tire.html?gclid=EAlaIqobChMI4dHJ35G__AIVQuqyCh121AlhEAYASAAEgJTS_D_BwE.
- [84] International Organization for Standardization, ISO/TS 16949:2009 Quality management systems - Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organizations, 2009.
- [85] ISO 9002:2016 Quality management systems. Guidelines for the application of ISO 9001:2015, (2016).
- [86] Arcelor Mittal. Steel cord, hose wire, bead wire, (2022). <https://barsandrods.arcelormittal.com/productsapplications/2755/steellcord>.

- [87] Burlytex. Steel Cord, (2022). <http://www.burlytex.com/steel-cord/>.
- [88] B. N.V. BEKAERT S.A., Zwevegem, Tytuł wynalazku: Stalowy kord o otwartych warstwach o wysokim obciążeniu zrywającym. PL/EP 1646749, 2003.
- [89] Recykling i drugie życie opon, (2022). <https://www.oponeo.pl/arttykul/recykling-opon>.
- [90] S. Ramarad, M. Khalid, C.T. Ratnam, A.L. Chuah, W. Rashmi, Waste tire rubber in polymer blends: A review on the evolution, properties and future, *Prog. Mater. Sci.* 72 (2015) 100–140. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.02.004>.
- [91] Rocznik Statystyczny Przemysłu 2022, Warszawa, 2022.
- [92] S. Gigli, D. Landi, M. Germani, Cost-benefit analysis of a circular economy project: a study on a recycling system for end-of-life tyres, *J. Clean. Prod.* 229 (2019) 680–694. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.223>.
- [93] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, DYREKTYWA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2018/851 z dnia 30 maja 2018 r. zmieniająca dyrektywę 2008/98/WE w sprawie odpadów. L 150/109, Bruksela, 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/pl/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0851&from=EN>.
- [94] D. Ustaw, USTAWA z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach. Dz.U.2022.699, Polska, 2022. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20220000699/U/D20220699Lj.pdf>.
- [95] UCHWAŁA NR 96 RADY MINISTRÓW z dnia 12 czerwca 2023 r. w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2028. Monitor Polski, Poz. 702, Polska, 2023. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WMP20230000702/O/M20230702.pdf>.
- [96] T. Sowa, Utylizacja opon – gdzie je oddać i co się z nimi potem dzieje?, (2022). <https://mubi.pl/poradniki/utyliczacja-opon/>.
- [97] J. Gronowicz, T. Kubiak, Recykling zużytych opon samochodowych, *Probl. Eksploat.* 2 (2007) 5–18.
- [98] A. Smejda-Krzewicka, A. Olejnik, P. Dmowska-Jasek, Przegląd metod recyklingu opon, *Eliksir. Czas. Nauk. Wydz. Chem. Politech. Łódzkiej.* 2 (2015) 12–15.
- [99] E. Trzaska, Zagospodarowanie zużytych opon w budownictwie drogowym, *Nafta-Gaz.* 10 (2010) 947–951.
- [100] A.J. Bowles, G.D. Fowler, C. O’Sullivan, K. Parker, Sustainable rubber recycling from waste tyres by waterjet: A novel mechanistic and practical analysis, *Sustain. Mater. Technol.* 25 (2020) e00173. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00173>.
- [101] K. Strukar, T. Kalman Šipoš, I. Miličević, R. Bušić, Potential use of rubber as aggregate in structural reinforced concrete element – A review, *Eng. Struct.* 188 (2019) 452–468. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.031>.
- [102] E. Ganjian, M. Khorami, A.A. Maghsoudi, Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 1828–1836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020>.
- [103] Y.C. Guo, J.H. Zhang, G. Chen, G.M. Chen, Z.H. Xie, Fracture behaviors of a new steel fiber reinforced recycled aggregate concrete with crumb rubber, *Constr. Build. Mater.* 53 (2014) 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.075>.

- [104] B.S. Thomas, R.C. Gupta, Long term behaviour of cement concrete containing discarded tire rubber, *J. Clean. Prod.* 102 (2015) 78–87.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.072>.
- [105] D. Sybilski, Zastosowanie odpadów gumowych w budownictwie drogowym, *Przegląd Bud.* 5 (2009) 37–44.
- [106] G. Yong-Chang, Z. Jian-Hong, C. Guang-Ming, X. Zhi-Hong, Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures, *J. Clean. Prod.* 72 (2014) 193–203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.036>.
- [107] A. Duda, D. Sobala, D. Siwowski, D. Kaleta, Wykorzystanie materiału z recyklingu opon samochodowych w budownictwie komunikacyjnym, *Arch. Inst. Inżynierii Lądowej*. nr 21 (2016) 97–111.
- [108] A. Duda, Wybrane sposoby wykorzystania zużytych opon samochodowych w budownictwie komunikacyjnym, *J. Civ. Eng. Environ. Archit.* 64 (2017) 381–396.
<https://doi.org/10.7862/rb.2017.221>.
- [109] A. Duda, D. Sobala, Badania zużytych opon do wykorzystania w budownictwie, *Builder.* (2017).
- [110] Zagospodarowanie i utylizacja opon, CUO Cent. Utylizacji Opon Organ. Odzysku S.A. (2023).
- [111] Kord tekstylny, (2022). <https://orzelsa.com/pl/project/kord-tekstylny/>.
- [112] I. Szypuła, B. Zdonek, Recykling złomu kordu drutu z zużytych opon samochodowych w produkcji stali, *Pr. Inst. Metal. Żelaza.* 3 (2015) 34–41.
- [113] Recykling opon - wszystko, co musisz wiedzieć.
<https://ekologistyka24.pl/recykling,ac282/recykling-opon-wszystko-co-musisz-wiedziec,842>.
- [114] J. Jakóbiec, W. Żmuda, S. Budzyń, G. Wysopal, Recykling energetyczny zużytych opon, *Autobusy Tech. Eksploatacja, Syst. Transp.* 10 (2011) 205–2011.
- [115] K. Reschner, Scrap Tire Recycling, *Waste Manag. World.* (2003) 1–16. http://www.entire-engineering.de/Scrap_Tire_Recycling.pdf.
- [116] ETRMA European Tyre & Rubber Manufacturers Association, End of Life Tyres Management - Europe 2018 Status, (2020) <https://www.etrma.org/library/europe-91-of-all-end>.
- [117] M. Skrzyniarz, Cykl życia odpadów gumowych na przykładzie zużytych opon samochodowych, *Gospod. Mater. i Logistyka.* 9 (2020) 44–52. <https://doi.org/DOI:10.33226/1231-2037.2020.9.5>.
- [118] K.M. Liew, A. Akbar, The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete, *Constr. Build. Mater.* 232 (2020) 117232.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117232>.
- [119] M. Mastali, A. Dalvand, A.R. Sattarifard, Z. Abdollahnejad, M. Illikainen, Characterization and optimization of hardened properties of self-consolidating concrete incorporating

- recycled steel, industrial steel, polypropylene and hybrid fibres, *Compos. Part B Eng.* 151 (2018) 186–200. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.021>.
- [120] O. Onuaguluchi, N. Banthia, Scrap tire steel fiber as a substitute for commercial steel fiber in cement mortar: Engineering properties and cost-benefit analyses, *Resour. Conserv. Recycl.* 134 (2018) 248–256. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.03.014>.
- [121] M. Pawelska-Mazur, M. Kaszynska, Mechanical performance and environmental assessment of sustainable concrete reinforced with recycled end-of-life tyre fibres, *Materials (Basel)*. 14 (2021) 1–20. <https://doi.org/10.3390/ma14020256>.
- [122] M. Pawelska-Mazur, *Rozprawa doktorska: Analiza właściwości betonu z włóknami stalowymi z recyklingu opon samochodowych.*, Szczecin, 2019.
- [123] G. Girskas, D. Nagrockienė, The Use of Steel Cord Scrap in Concrete, *Constr. Sci.* 18 (2016) 22–26. <https://doi.org/doi:10.1515/cons-2016-0004>.
- [124] S.M.S.M.K. Samarakoon, P. Ruben, J. Wie Pedersen, L. Evangelista, Mechanical performance of concrete made of steel fibres from tire waste, *Case Stud. Constr. Mater.* 11 (2019) e00259. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00259>.
- [125] G.B. Golpasand, M. Farzam, S.S. Shishvan, Behavior of recycled steel fiber reinforced concrete under uniaxial cyclic compression and biaxial tests, *Constr. Build. Mater.* 263 (2020) 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120664>.
- [126] M. Pajak, M. Krystek, M. Zakrzewski, J. Domski, Laboratory investigation and numerical modelling of concrete reinforced with recycled steel fibres, *Materials (Basel)*. 14 (2021) 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma14081828>.
- [127] Y. Zhang, L. Gao, Influence of Tire-Recycled Steel Fibres on Strength and Flexural Behavior of Reinforced Concrete, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2020 (2020). <https://doi.org/10.1155/2020/6363105>.
- [128] H. Zhong, M. Zhang, Experimental study on engineering properties of concrete reinforced with hybrid recycled tyre steel and polypropylene fibres, *J. Clean. Prod.* 259 (2020) 120914. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120914>.
- [129] T. Akhtar, B. Ali, N. Ben Kahla, R. Kurda, M. Rizwan, M. Mohsin Javed, A. Raza, Experimental investigation of eco-friendly high strength fiber-reinforced concrete developed with combined incorporation of tyre-steel fiber and fly ash, *Constr. Build. Mater.* 314 (2022) 125626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125626>.
- [130] K. Pilakoutas, K. Neocleous, H. Tlemat, Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement, *Proc. Inst. Civ. Eng. Eng. Sustain.* 157 (2004) 131–138. <https://doi.org/10.1680/ensu.2004.157.3.131>.
- [131] M. Colombo, M. Di Prisco, L. Mazzoleni, Sprayed tunnel linings: A comparison between several reinforcement solutions, *Mater. Struct. Constr.* 42 (2009) 1295–1311. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9528-5>.
- [132] A.E. Naaman, Engineered Steel Fibres with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites, *J. Adv. Concr. Technol.* 1 (2003) 241–252. <https://doi.org/10.3151/jact.1.241>.
- [133] D.Y. Yoo, S.W. Kim, J.J. Park, Comparative flexural behavior of ultra-high-performance

- concrete reinforced with hybrid straight steel fibres, *Constr. Build. Mater.* 132 (2017) 219–229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.104>.
- [134] N. Banthia, S.M. Soleimani, Flexural response of hybrid fiber-reinforced cementitious composites, *ACI Mater. J.* 102 (2005) 382–389. <https://doi.org/10.14359/14800>.
- [135] N. Banthia, M. Sappakittipakorn, Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) 1366–1372. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.05.005>.
- [136] P. Rashiddadash, A.A. Ramezaniapour, M. Mahdikhani, Experimental investigation on flexural toughness of hybrid fiber reinforced concrete (HFRC) containing metakaolin and pumice, *Constr. Build. Mater.* 51 (2014) 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.087>.
- [137] J.S. Lawler, T. Wilhelm, D. Zampini, S.P. Shah, *Fracture processes of hybrid fiber-reinforced mortar*, 2003.
- [138] Y. Mohammadi, S.P. Singh, S.K. Kaushik, Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 956–965. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.004>.
- [139] E. Martinelli, A. Caggiano, H. Xargay, An experimental study on the post-cracking behaviour of Hybrid Industrial/Recycled Steel Fibre-Reinforced Concrete, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.007>.
- [140] M. Pająk, Application of Fibres From End-of-Life Tires As a Self-Compacting Concrete Reinforcement – an Experimental Study, *Archit. Civ. Eng. Environ.* 11 (2018) 105–113. <https://doi.org/10.21307/acee-2018-011>.
- [141] M. Pawelska-Mazur, M. Kaszyńska, Properties of concrete with fibres from recycled tyres, in: *Int. Multidiscip. Sci. GeoConference Sect. Green Build. Technol. Mater.*, Bułgaria, 2018: pp. 303–310. <https://doi.org/DOI:10.5593/sgem2018/6.3/S26.040>.
- [142] K. Łuszczuk, *Rozprawa doktorska: Analiza możliwości wykorzystania stalowych włókien z recyklingu opon jako półproduktu do produkcji fibrobetonów*, Wrocław, 2019.
- [143] J.C. Ndayambaje, *Rozprawa doktorska: Effect of recycled tyre steel fibres on structural performance and impact resistance of rubberized concrete.*, Africa, 2018.
- [144] G. Prokopski, *Mechanika pękania betonów cementowych*, Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2008.
- [145] Z.L. Kowalewski, T. Szymczak, J. Kraskowski, A. Chojnacki, *Mechanika pękania na tropach awarii konstrukcji i defektów materiałowych*, in: *XXIII Semin. Nieniszcz. Badania Mater.*, 2017: pp. 39–74.
- [146] S. Kłysz, *Podstawy Mechaniki pękania - mechanika pękania. Rozdział 1.1*, in: *Pod. Mech. Pękania i Wytrzymałości Zmęczeniowej*, 2015: pp. 1–11.
- [147] A. Bernatowicz, A. Kazberuk, *Analiza parametrów mechaniki pękania w warunkach I modelu obciążenia betonu*, *Zesz. Nauk. Politech. Częstochowskiej. Bud.* 24 (2018) 19–23. <https://doi.org/DOI: 10.17512/znb.2018.1.03>.
- [148] A.A. Griffith, The phenomena of rupture and flow in solis, *Philos. Trans. R. Soc. London. A*

- (1921) 163–198.
- [149] G.R. Irwin, Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate., J. Appl. Mech. 24 (1957) 361–364.
- [150] E. Orowan, Energy criteria of fracture., Weld. J. Res. 34 (1955).
- [151] G.L. Golewski, Analiza wpływu D_{max} na parametry mechaniki pęknięcia betonów wapiennych określane przy trójpunktowym zginaniu, Bud. i Archit. (2007) 5–16.
- [152] J. German, Wprowadzenie do mechaniki pęknięcia, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2018.
- [153] G.L. Golewski, T. Sadowski, Analiza kruchych uszkodzeń w kompozytach betonowych, Czas. Tech. Wydaw. Politech. Krak. 1-B (2007) 55–62.
- [154] R. Pampuch, Zarys nauki o materiałach. Materiały ceramiczne., Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1977.
- [155] R. Pampuch, Budowa i właściwości materiałów ceramicznych., Wydawnictwo AGH, Kraków, 1995.
- [156] J. Lis, Skrypt AGH. Laboratorium Nauki o Materiałach. Pod redakcją Jerzego Lisa., Wydawnictwo AGH, Kraków, 2000.
- [157] PN-EN 14889-2:2007 Włókna do betonu – Część 1:Włókna polimerowe – Definicje, wymagania i zgodność, 2007.
- [158] J. Liu, C. Gao, G. Feng, T. Xiao, C. Shuai, S. Peng, A bioactive glass nanocomposite scaffold toughened by multi-wall carbon nanotubes for tissue engineering, J. Ceram. Soc. Japan. 123 (2015) 485–491.
- [159] F. Grzymiski, M. Musiał, Fibrobeton, metodyka badań właściwości wytrzymałościowych., Builder. (2017).
- [160] B. Ali, L.A. Qureshi, R. Kurda, Environmental and economic benefits of steel, glass, and polypropylene fiber reinforced cement composite application in jointed plain concrete pavement, Compos. Commun. 22 (2020) 100437.
<https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100437>.
- [161] J. Katzer, Włókna stalowe stosowane do modyfikacji betonu, Budownictwo, Technol. Archit. 3 (2003) 46–47.
- [162] T. Zych, Współczesny fibrobeton - możliwość kształtowania elementów konstrukcyjnych i form architektonicznych, Czas. Tech. Archit. R. 107, z (2010) 371–386.
file:///C:/Users/A7115~1.MIC/AppData/Local/Temp/ZychT_WspolczesneFibrobeton.pdf.
- [163] Z. Jamroży, Drutobeton, Kraków, 1985.
- [164] D.J. Hannant, Fibre-reinforced concrete, in: Adv. Concr. Technol. Process., Elsevier Ltd, 2003: pp. 6/1-6/17.
- [165] PN-EN 14651:2005+A1:2007 Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym - Pomiary wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP), 2007.

- [166] M.A. Glinicki, Ocena i projektowanie fibrobetonów na podstawie wytrzymałości równoważnej, *Drog. i Most.* 3 (2002) 5–36.
- [167] M.A. Glinicki, Beton ze zbrojeniem strukturalnym, in: XX Ogólnopolskie Warsztaty Pr. Projektanta Konstr., PZITB Gliwice, 2010: pp. 279-308 Tom I.
- [168] Włókna stalowe do zbrojenia betonu, (2023) www.wikipedia.org.
https://pl.wikipedia.org/wiki/Włókna_stalowe_do_zbrojenia_betonu.
- [169] Z. Jamróży, *Beton i jego technologie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2015.
- [170] Astra-Polska produkty włókna, (2023). <https://astra-polska.com/category/produkt/wlokna/>.
- [171] MAPEFIBRE ST42, (2023). <https://www.mapei.com/pl/pl/produkty-i-rozwiazania/lista-produktow/informacje-o-produktach/mapefibre-st42>.
- [172] itFIBER GLASS 12 mm, (2023). <https://www.itbud.com.pl/produkt/itfiber-glass-12-mm/>.
- [173] PN-EN 15191:2010 Prefabrykaty z betonu -- Klasyfikacja właściwości użytkowych betonu z dodatkiem włókien szklanych, 2010.
- [174] Włókna bazaltowe FiberBas, (2023). <http://basalttech.pl/produkty/>.
- [175] Włókna bazaltowe do zbrojenia betonu, (2023).
https://pl.wikipedia.org/wiki/Włókna_bazaltowe_do_zbrojenia_betonu.
- [176] G. Chen, D. Gao, H. Zhu, J. Song Yuan, X. Xiao, W. Wang, Effects of novel multiple hooked-end steel fibres on flexural tensile behaviour of notched concrete beams with various strength grades, *Structures.* 33 (2021) 3644–3654.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.016>.
- [177] W. Pichór, *Beton. Technologie i metody badań. Praca zbiorowa, redakcja naukowa prof. Jan Deja. Rozdział 12. Strefa kontaktowa kruszywo-zaczyn w betonie.*, in: 2020: pp. 563–568.
- [178] A.M. Brandt, Zastosowanie włókien jako uzbrojenie w elementach betonowych, in: P. Cement (Ed.), *Konf. "bet. Na Progu Nowego Milen.*, Kraków, 2000: pp. 433–444.
- [179] Z. Jamróży, *Betony ze zbrojeniem rozproszonym /co projektant konstrukcji wiedzieć powinien/*, in: XVII Ogólnopolska Konf. Warsztat Pr. Proj. Konstr., 2002: pp. 241–281.
- [180] A.E. Naaman, Development and evolution of tensile strain-hardening FRC composites, in: BEFIB-2008 Seventh Int. Symp. Fibre Reinf. Concr. Des. Appl., 2008: pp. 1–28.
- [181] J.A.O. Barros, F. Soltanzadeh, M. Taheri, Steel fibre reinforced concrete for elements failing in bending and in shear, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 18 (2014) 33–65.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/19648189.2013.842937>.
- [182] J.A.O. Barros, J.A. Figueiras, Flexural behaviour of SFRC: testing and modeling, *J. Mater. Civ. Eng.* 11 (1999) 331–339. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:4\(331\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:4(331)).
- [183] A. Caggiano, M. Cremona, C. Lima, E. Martinelli, C. Faella, Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibres, *Constr. Build. Mater.* 37 (2012) 832–840. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.060>.

- [184] R. De Montaignac, B. Massicotte, J.-P. Charron, Design of SFRC structural elements: Flexural behaviour prediction, *Mater. Struct.* 45 (2012) 623–636. <https://doi.org/DOI:10.1617/s11527-011-9785-y>.
- [185] V. Oettel, M. Schulz, M. Haist, Empirical approach for the residual flexural tensile strength of steel fiber-reinforced concrete based on notched three-point bending tests, *Struct. Concr.* (2022) 1–12. <https://doi.org/10.1002/suco.202100565>.
- [186] H. Aoude, M. Belghiti, W.D. Cook, D. Mitchell, Response of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams with and without Stirrups, *ACI Struct. J.* 109 (2012) 359–367. <https://doi.org/DOI:10.14359/51683749>.
- [187] J. Susetyo, P. Gauvreau, F.J. Vecchio, Effectiveness of Steel Fiber as Minimum Shear Reinforcement, *ACI Struct. J.* 108 (2011) 488–496.
- [188] S. Abbas, A.M. Soliman, M.L. Nehdi, Experimental study on settlement and punching behavior of full-scale RC and SFRC precast tunnel lining segments, *Eng. Struct.* 72 (2014) 1–10. <https://doi.org/DOI:10.1016/j.engstruct.2014.04.024>.
- [189] A. Ventura-Gouveia, J.A.O. Barros, A.F.M. Azevedo, Crack constitutive model for the prediction of punching failure modes of fiber reinforced concrete laminar structures, *Comput. Concr.* 8 (2011) 735–755. <https://doi.org/DOI:https://doi.org/10.12989/cac.2011.8.6.735>.
- [190] N. Banthia, N. Krstulovic-Opara, M.A. Galinat, Report on the physical properties and durability of fiber-reinforced concrete, Rep. by ACI Comm. 544. ACI 544.5R (2010).
- [191] J.-L. Granju, S.U. Balouch, Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 572–577.
- [192] J.A.O. Barros, L. Lourenço, A. Alves, Fiber Reinforced Concrete of Enhanced Fire Resistance for Tunnel Segments, in: *Engineering*, 2011. <https://doi.org/DOI:10.14359/51682362>.
- [193] M.A. Glinicki, Wytrzymałość równoważna betonu na zginanie, *Inżynier Budownictwa*. (2008).
- [194] RILEM Draft Recommendation, TC 50-FMC Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, *Mater. Struct.* 18(4). 18 (1985) 287–290.
- [195] J. Planas, G. V. Guinea, J.C. Gálvez, B. Sanz, RILEM TC 187-SOC: Experimental Determination of the Stress-Crack Opening Curve for Concrete in Tension. Final report of RILEM Technical Committee TC 187-SOC. Chapter 3. Indirect tests for stress-crack opening curve, (2007).
- [196] N.P. Uday, Experimental Determination of Fracture Energy by RILEM Method, *Int. J. Eng. Sci.* 6 (2017) 106–115. <https://doi.org/DOI:10.9790/1813-060301106115>.
- [197] M. Aral, O. Sengul, C. Tasdemir, M.A. Tasdemir, Fracture studies on concrete with hybrid steel fibres, in: *BEFIB2012 - Fibre Reinf. Concr.*, 2012.
- [198] M. Kozłowski, M. Kadela, A. Kukielka, Fracture energy of foamed concrete based on three-point bending test on notched beams., in: *Procedia Eng. 7th Sci. Conf. Mater. Probl. Civ. Eng. (MATBUD'2015)*., 2015: pp. 349–354. <https://doi.org/doi:>

- 10.1016/j.proeng.2015.06.157.
- [199] M.O. Kim, A. Bordelon, Determination of total fracture energy for fiber-reinforced concrete, Am. Concr. Institute, ACI Spec. Publ. 2015-Janua (2015) 55–69.
https://www.researchgate.net/publication/282953394_Determination_of_total_fracture_energy_for_fiber-reinforced_concrete.
- [200] JSCE-SF4 Method of test for flexural strength and flexural toughness of fiber reinforced concrete, Japan, 1984. <https://barchip.com/wp-content/uploads/2016/08/JSCE-SF4-Method-of-Test-For-Flexural-Strength-and-Flexural-Toughness.pdf>.
- [201] T. Zych, M. Najduchowska, B. Rewera, Wpływ rodzaju włókien na właściwości wytrzymałościowe oraz trwałościowe betonu posadzkowego, in: Konf. Dni Betonu 2021, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2021: pp. 419–439.
- [202] ASTM C1018-97 Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), (1997).
<https://doi.org/10.1520/C1018-97>.
- [203] W. Pichór, J. Dyczek, Budowa strefy kontaktowej włókno- zacyzn w kompozytach cementowych z włóknami polimerowymi. Materiały konferencyjne, Materiały budowlane - nowe kierunki w chemii i technologii, in: AGH Kraków, 1999: pp. 268–283.
- [204] A. Bentur, S. Diamond, S. Mindess, Cracking processes in steel fiber reinforced cement paste, Cem. Concr. Res. 15 (1985) 331–342.
- [205] PN-EN 14845-1:2008 Metody badania włókien w betonie. Część 1: Betony wzorcowe, 2008.
- [206] PN-EN ISO 6892-1:2016-09 Metale - Próba rozciągania - Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej (Metoda B), 2016.
- [207] PN-EN 1097-7:2008 Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw - Część 7: Oznaczanie gęstości wypełniacza - Metoda piknometryczna, 2008.
- [208] PN-EN 206+A1:2016-12 Beton - wymagania, właściwości, produkcja i zgodność, 2016.
- [209] PN-EN 12350-2:2019-07 Badania mieszanki betonowej -- Część 2: Badanie konsystencji metodą opadu stożka, 2019.
- [210] PN-EN 12390-5:2019-08 Badania betonu - Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań, 2019.
- [211] PN-EN 12390-3:2019-07 Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań, 2019.
- [212] PN-EN 12350-3:2019-07 Badania mieszanki betonowej -- Część 3: Badania konsystencji metodą Vebe, 2019.
- [213] EN 14651:2005+A1:2007 Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), 2007.
- [214] MATLAB Całkowanie numeryczne. Metoda prostokątów., (2023).
<http://matlablog.ont.com.pl/matlab-calkowanie-numeryczne/>.
- [215] P. Żak, Całkowanie numeryczne. Laboratoria z przedmiotu: Wybrane zagadnienia z

- matematyki, Akad. Górniczo-Hutnicza. (2023).
<http://www.kipo.agh.edu.pl/data/NumInt.pdf>.
- [216] N. Banthia, N. Nandakumar, Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites, *Cem. Concr. Compos.* 25 (2003) 3–9. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00043-9).
- [217] PN-EN 196-1:2016-07 Metody badania cementu -- Część 1: Oznaczanie wytrzymałości, 2016.
- [218] PN-EN 12350-7:2019-08 Badania mieszanki betonowej -- Część 7: Badanie zawartości powietrza -- Metody ciśnieniowe, 2019.
- [219] PN-EN 12350-6:2019-08 Badania mieszanki betonowej -- Część 6: Gęstość, 2019.
- [220] PN-EN 12390-6:2011 Badania betonu -- Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań, 2011.
- [221] PN-EN 12390-13:2021-12 Badania betonu -- Część 13: Wyznaczanie siecznego modułu sprężystości przy ściskaniu, 2021.
- [222] PN-EN 13892-3:2015-02 Metody badania materiałów na podkłady podłogowe -- Część 3: Oznaczanie odporności na ścieranie według Bohmego, 2015.
- [223] PN-EN 13813:2003 Podkłady podłogowe oraz materiały do ich wykonania -- Materiały -- Właściwości i wymagania, (2003).
- [224] PN-EN ISO 6272-1:2011 Farby i lakiery -- Badania nagłego odkształcenia (odporność na uderzenie) -- Część 1: Badanie za pomocą spadającego ciężarka, wgłębnik o dużej powierzchni, (2011).
- [225] PN-EN 14845-2:2007 Metody badania włókien w betonie - Część 2: Efekt oddziaływania na beton, 2007.

15. Spis rysunków

Rysunek 1. Schemat programu badawczego	13
Rysunek 2. Osiem Milenijnych Celów Rozwoju ONZ [55]	15
Rysunek 3. Cele Zrównoważonego Rozwoju OZN [55]	16
Rysunek 4. Europejski Zielony Ład [70]	20
Rysunek 5. Schemat działań: Gotowi na 55 [71]	21
Rysunek 6. Budowa opony [74]	24
Rysunek 7. Budowa kordu stalowego w oponie [83] (opis w tekście poniżej)	27
Rysunek 8. Schemat przedstawiający powstawanie naprężeń u wierzchołka defektu, a) model bez defektów, b) model z porem, trajektoria naprężeń przenoszonych przez wiązania atomowe, c) wielkość naprężeń w pobliżu czubka pęknięcia [154]	41
Rysunek 9. Modele pęknięcia [144,146,152,153,155]	42
Rysunek 10. Rozkład naprężeń przy eliptycznym pęknięciu, szczelina Griffitha [148]	43
Rysunek 11. Model rozkładu naprężeń u wierzchołka szczeliny krytycznej [152]	43
Rysunek 12. Mechanizm Cooka-Gordona hamowania rozprzestrzeniania się pęknięć na granicach międzyziarnowych, a)-c) kolejne etapy procesu [154]	46
Rysunek 13. Kolejne etapy dekohezji kompozytu o osnowie wzmocnionej włóknami [155]	47
Rysunek 14. Schemat mechanizmów podnoszenia odporności na kruche pęknięcie kompozytów cementowych c) mostkowanie pęknięć przez włókna, (d) wyciąganie włókien, (e) zmiana kierunku pęknięcia [158]	48
Rysunek 15. Mechanizm podwyższania odporności na pęknięcie kompozytu cementowego przez włókna (źródło: W.Pichór, prace niepublikowane)	49
Rysunek 16. Przykładowe kształty włókien stalowych [159], (1) włókna proste, (2) włókna haczykowane, (3) włókna falisto-haczykowane, (4) włókna z uformowanymi zakotwieniami	51
Rysunek 17. Modele rozmieszczenia włókien w kompozycie 1D, 2D, 3D [1,166]	53
Rysunek 18. Krzywa obciążenie-ugięcie podczas rozciągania betonów niezbrojonych i fibrobetonów [1,4]59	
Rysunek 19. Schemat układu trójpunktowego zginania belki z karbem: A-próbka betonowa o wymiarach 150×150×(550-700)mm, B- nacięcie, C-czujnik ugięcia, D-czujnik rozwarcia rysy (CMOD), E- obciążenie, F-ramy stalowe [195]	61
Rysunek 20. Schemat czujnika CMOD [195]	61
Rysunek 21. Sposób wyznaczania granicy proporcjonalności betonu LOP [165]	62
Rysunek 22. Zależność obciążenie-rozwarcie rysy CMOD [165]	62
Rysunek 23. Sposób wyznaczania pracy zniszczenia [194,195]	64
Rysunek 24. Schemat układu badania wytrzymałości równoważnej [193,200,201]	65
Rysunek 25. Sposób wyznaczania pracy zniszczenia do ugięcia równego 1/150 rozpiętości belki [200]	66
Rysunek 26. Sposób wyznaczania wskaźników odporności na pęknięcie [202]	67
Rysunek 27. Efekt ściany przy włóknie stalowym (lub przy deskowaniu) [169]. 1-ziarna cementu (lub kruszywa), 2-zaczyn cementowy, 3-ściana (włókno lub deskowanie), 4-krzywa obrazująca zmiany zawartości zaczynu, 5-krzywa obrazująca szczelność	68
Rysunek 28. Model strefy kontaktowej włókno stalowe-zaczyn [177,203,204]	69
Rysunek 29. Guma z próbki RTSF-B	79
Rysunek 30. Tekstylia z próbki RTSF-B	79
Rysunek 31. Włókno RTSF-B	80
Rysunek 32. Włókno RTSF-C	80
Rysunek 33. Zestawienie termogramów	81
Rysunek 34. Zawartość zanieczyszczeń w badanych włóknach	82
Rysunek 35. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF	88
Rysunek 36. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF	88
Rysunek 37. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF	89

Rysunek 38. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF	89
Rysunek 39. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF	90
Rysunek 40. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF	90
Rysunek 41. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF	91
Rysunek 42. Analiza EDS włókna z recyklingu opon RTSF	91
Rysunek 43. Analiza EDS włókna MSF	91
Rysunek 44. Analiza EDS włókna MSF	92
Rysunek 45. Wytrzymałość na zginanie i ściskanie betonów z włóknami	93
Rysunek 46. Konsystencja betonów wzorcowych z włóknami, a) metodą czasu VeBe, b) metodą opadu stożka	95
Rysunek 47. Zestawienie przykładowych wykresów obciążenie-rozwarcie rysy CMOD dla dozowania 20 kg/m ³ włókien	98
Rysunek 48. Zestawienie przykładowych wykresów obciążenie-rozwarcie rysy CMOD dla dozowania 30 kg/m ³ włókien.	98
Rysunek 49. Zestawienie przykładowych wykresów obciążenie-rozwarcie rysy CMOD dla dozowania 40 kg/m ³ włókien	99
Rysunek 50. Krzywe obciążenie-rozwarcie rysy dla dozowania 40 kg/m ³ włókien. Grube linie w środku przedstawiają najbardziej charakterystyczne kształty krzywych po pęknięciu, cienkie linie oznaczają wartości skrajne dla ośmiu badanych próbek	99
Rysunek 51. Schemat wyznaczania pracy zniszczenia jako pole powierzchni pod wykresem obciążenie-ugięcie	102
Rysunek 52. Schemat wyznaczania pola powierzchni pod wykresem metodą prostokątów [214]	102
Rysunek 53. Zależność pracy zniszczenia od ilości i rodzaju włókien (σ – odchylenie standardowe)	104
Rysunek 54. Schemat wyznaczania wskaźników odporności na pękanie zgodnie z ASTM C1018-97 [202]	105
Rysunek 55. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 10 kg/m ³	108
Rysunek 56. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 20 kg/m ³	108
Rysunek 57. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 30 kg/m ³	108
Rysunek 58. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 40 kg/m ³	109
Rysunek 59. Przykładowe próbki do badania przyczepności przy wyciąganiu, (a) RTSF druty, (b) druty MSF	112
Rysunek 60. Badanie przyczepności – próba wyciągania: a) podpora stała, b) głowica zaciskowa, c) próbka zaprawy, d) drut RTSF	113
Rysunek 61. Przyczepność drutów MSF i RTSF o różnych średnicach (σ – odchylenie standardowe)	114
Rysunek 62. Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu dla dozowania 20 kg/m ³ włókien	131
Rysunek 63. Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu dla dozowania 30 kg/m ³ włókien	131
Rysunek 64. Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu dla dozowania 40 kg/m ³ włókien	132
Rysunek 65. Praca zniszczenia betonów z włóknami MSF-2 i MSF-3 (σ – odchylenie standardowe)	133
Rysunek 66. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 20 kg/m ³	134
Rysunek 67. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 30 kg/m ³	134
Rysunek 68. Wskaźniki odporności na pękanie dla dozowania 40 kg/m ³	135
Rysunek 69. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach	137
Rysunek 70. Wytrzymałość na zginanie po 28 dniach	138
Rysunek 71. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu po 28 dniach	138
Rysunek 72. Moduł sprężystości przy ścisaniu po 28 dniach	140
Rysunek 73. Ścieralność betonu we Boehmego	141
Rysunek 74. Wyniki wytrzymałości resztkowych na rozciąganie przy zginaniu dla włókien MSF-1 przy rozwarcu rysy CMOD=0,5 i 3,5 mm	145
Rysunek 75. Wyniki wytrzymałości resztkowych na rozciąganie przy zginaniu dla włókien RTSF przy rozwarcu rysy CMOD=0,5 i 3,5 mm	145

16. Spis tabel

Tabela 1. Ślad węglowy wytworzenia przykładowych produktów [68], [66,69]	19
Tabela 2. Procentowy udział składników i wartość opałowa w zależności od rodzaju opony [76].	24
Tabela 3. Skład stali do wytwarzania kordu stalowego [86,87]	28
Tabela 4. Zawartość miedzi w drutach do produkcji opon [83]	28
Tabela 5. Poziom odzysku i recyklingu opon w latach 2017-2018 [95]	29
Tabela 6. Recykling zużytych opon w wybranych krajach europejskich [89]	33
Tabela 7. Wskaźniki GWP składników betonu [48,51]	35
Tabela 8. Wskaźniki GWP dla betonów [48]	35
Tabela 9. Właściwości włókien do betonu i zaprawy oraz zaczynu cementowego [1,162,167]	58
Tabela 10. Receptura betonu posadzkowego, współczynnik W/C=0,53	74
Tabela 11. Receptura betonu wzorcowego wg PN-EN 14845-1 [205]	75
Tabela 12. Wyniki badań długości i średnicy włókien z opon	76
Tabela 13. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie i moduł sprężystości włókien	77
Tabela 14. Wyniki badania zawartości zanieczyszczeń	82
Tabela 15. Wyniki badania składu chemicznego włókien	83
Tabela 16. Wyniki badania gęstości włókien	84
Tabela 17. Konsystencja mieszanek betonowych z włóknami w ilości 20 kg/m ³	93
Tabela 18. Wyniki wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu, średnie z 8 próbek	97
Tabela 19. Wyniki badań pracy zniszczenia dla próbek z włóknami MSF i RTSF	103
Tabela 20. Wskaźniki odporności na pękanie I ₅ , I ₁₀ , I ₂₀ dla 10 kg/m ³ włókiem MSF i RTSF	106
Tabela 21. Wskaźniki odporności na pękanie I ₅ , I ₁₀ , I ₂₀ dla 20 kg/m ³ włókiem MSF i RTSF	107
Tabela 22. Wskaźniki odporności na pękanie I ₅ , I ₁₀ , I ₂₀ dla 30 kg/m ³ włókiem MSF i RTSF	107
Tabela 23. Wskaźniki odporności na pękanie I ₅ , I ₁₀ , I ₂₀ dla 40 kg/m ³ włókiem MSF i RTSF	107
Tabela 24. Charakterystyka geometryczna włókien	129
Tabela 25. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie i moduł sprężystości włókien	129
Tabela 26. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu	130
Tabela 27. Wyniki badań właściwości mieszanki betonowej z włóknami	136
Tabela 28. Wyniki badań modułu sprężystości	140
Tabela 29. Wyniki badań ścieralności metodą tarczy Boehmego	141
Tabela 30. Wyniki badań odporności na uderzenia	142
Tabela 31. Wymagania normy PN-EN 14889-1:2007	143
Tabela 32. Wpływ włókien RTSF i MSF-1 na konsystencję betonu	144

KONIEC