



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I GEODEZJI
LABORATORIUM TECHNIKI BUDOWLANEJ

ROZPRAWA DOKTORSKA

Janusz Kobaka

Model kompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi

Promotor:

dr hab. inż. Wiesława Głodkowska, prof. PK

KOSZALIN, 2014

SPIS TREŚCI

| | |
|--|----|
| STRESZCZENIE | 4 |
| SUMMARY | 5 |
| WYKAZ PODSTAWOWYCH SYMBOLI I OZNACZEŃ | 6 |
| 1. WPROWADZENIE..... | 8 |
| 2. PRZEDMIOT, CEL I TEZY PRACY..... | 11 |
| 3. PRZEGLĄD STANU WIEDZY W ZAKRESIE PRZEDMIOTU PRACY | 13 |
| 3.1. Włókna stosowane do wzmocnienia fibrokompozytu..... | 13 |
| 3.2. Charakterystyka właściwości kompozytów z włóknami stalowymi | 20 |
| 3.3. Modele rozkładu włókien w przestrzeni kompozytu..... | 28 |
| 3.4. Metody nieniszczące stosowane do oceny właściwości betonu..... | 35 |
| 4. PROGRAM I ZAKRES BADAŃ | 45 |
| 4.1. Program badań..... | 45 |
| 4.2. Charakterystyka użytych materiałów | 47 |
| 4.2.1. Skład fibrokompozytu | 47 |
| 4.2.2. Projekt technologiczny fibrokompozytu | 49 |
| 4.2.3. Wykonanie i pielęgnacja elementów próbnych..... | 52 |
| 5. METODYKA BADAŃ | 55 |
| 5.1. Badania cech mechaniczno-fizycznych i reologicznych fibrokompozytu | 55 |
| 5.2. Badania nieniszczące fibrokompozytu | 57 |
| 5.3. Analizy statystyczne zastosowane do opracowania wyników badań..... | 61 |
| 6. WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI FIBROKOMPOZYTU I ICH ANALIZA | 63 |
| 6.1. Właściwości cementu i kruszywa..... | 63 |
| 6.2. Wytrzymałość na ściskanie i zależność naprężenie-odkształcenie przy ściskaniu | 65 |
| 6.3. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu..... | 73 |
| 6.4. Wytrzymałość na osiowe rozciąganie i zależność naprężenie-odkształcenie przy osiowym rozciąganiu | 77 |
| 6.5. Moduł sprężystości przy ściskaniu | 79 |
| 6.6. Dynamiczny moduł sprężystości | 80 |
| 6.7. Dynamiczny moduł odkształcenia postaciowego..... | 84 |
| 6.8. Gęstość pozorna..... | 86 |
| 6.9. Skurcz..... | 89 |

| | |
|---|-----|
| 6.10. Odporność na ścieranie..... | 96 |
| 6.11. Mrozoodporność..... | 100 |
| 6.12. Podsumowanie..... | 101 |
| 7. MODEL KOMPOZYTU MINERALNEGO Z WŁÓKNAMI ROZPROSZONYMI..... | 102 |
| 7.1. Matematyczny opis właściwości fibrokompozytu | 102 |
| 7.1.1. Wytrzymałość na ściskanie | 102 |
| 7.1.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu..... | 105 |
| 7.1.3. Dynamiczny moduł sprężystości | 106 |
| 7.1.4. Gęstość pozorna..... | 108 |
| 7.1.5. Skurcz | 110 |
| 7.1.6. Odporność na ścieranie..... | 112 |
| 7.1.7. Podsumowanie..... | 114 |
| 7.2. Rozkład włókien w fibrokompozycie | 116 |
| 7.2.1. Przyjęte założenia i zależności | 116 |
| 7.2.2. Wyznaczenie parametrów rozkładu statystycznego i ich ocena..... | 117 |
| 7.2.3. Opis rozkładu włókien w fibrokompozycie | 122 |
| 8. DOŚWIADCZALNA WERYFIKACJA MODELU KOMPOZYTU MINERALNEGO Z WŁÓKNAMI ROZPROSZONYMI | 127 |
| 8.1. Weryfikacja opisu rozkładu włókien w fibrokompozycie..... | 127 |
| 8.2. Weryfikacja matematycznego opisu właściwości fibrokompozytu | 129 |
| 9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI | 135 |
| LITERATURA..... | 137 |

STRESZCZENIE

Model kompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi

Kompozyty mineralne z włóknami rozproszonymi, ogólnie nazwane fibrokompozytami, stają się coraz popularniejsze zarówno w kraju, jak i na świecie. Włókna stalowe pełnią rolę wzmocnienia i w znaczący sposób poprawiają niektóre właściwości mechaniczne kompozytu. Fibrokompozyty stanowią więc pewną alternatywę dla betonu zwykłego, gdyż wykazują większą wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie, wytrzymałość zmęczeniową oraz większą odporność na ścieranie. Dzięki tym właściwościom znajdują zastosowanie w wytwarzaniu różnych elementów konstrukcyjnych. Stosowane są także do produkcji płyt okładzin budynków, elementów cienkich powłok jako przekryć budynków, do budowy nawierzchni mostów, tuneli, wzmacniania wyrobisk kopalnianych, czy też do wznoszenia obiektów obciążonych dynamicznie. Przy tak szerokim spektrum zastosowań fibrokompozytu odczuwa się brak szybkiej, bezinwazyjnej i skutecznej metody oceny jego właściwości po wbudowaniu w konstrukcję. Ponadto stosowane metody oceny jego właściwości na normatywnych próbkach nie pozwalają na dokładną ocenę rozkładu wartości jego cech w elementach i konstrukcji.

Przedmiotem pracy były więc drobnokruszywowe kompozyty mineralne z włóknami rozproszonymi. Celem pracy było opracowanie modelu kompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi poprzez sformułowanie zależności opisujących właściwości mechaniczno-fizyczne takich kompozytów oraz opis rozkładu włókien stalowych w przestrzeni kompozytu w zależności od warunków technologicznych. W dysertacji zaproponowano sposób oznaczania właściwości fibrokompozytu metodami nieniszczącymi: ultradźwiękową oraz indukcji elektromagnetycznej. Ustalono zależności, w których zmiennymi niezależnymi są natężenie indukowanego prądu oraz prędkość propagacji fali ultradźwiękowej. Zmienną zależną była właściwość fibrokompozytu.

W okresie stu czterdziestu lat stosowania tych kompozytów w budownictwie lądowym, wielu autorów podejmowało próby opisu rozkładu włókien w przestrzeni kompozytu. Jest to zagadnienie złożone, ponieważ nieznane jest rzeczywiste ułożenie włókien w przestrzeni kompozytu. Kolejnym zadaniem było więc opracowanie opisu rozkładu włókien stalowych, który umożliwi określenie parametrów ułożenia włókien w przestrzeni kompozytu, takich jak: kąt ułożenia, współrzędne początku i końca włókna, współrzędne przebicia płaszczyzny przekroju elementu, wzajemne odległości między włóknami oraz odległości środków ciężkości włókien od ścian elementu. Opracowany model rozkładu włókien umożliwia uwzględnienie osiadania włókien w kompozycie spowodowanego siłą ciężenia oraz uwzględnienie wpływu konsystencji i czasu wibrowania na osiadanie włókien. Uwzględnia on także warunki technologiczne wykonania kompozytu i ich wpływ na równomierność rozkładu włókien w jego przestrzeni z uwzględnieniem zjawiska sedymentacji włókien.

Model opisujący wybrane właściwości mechaniczno-fizyczne mineralnego kompozytu z włóknami rozproszonymi i rozkład włókien w przestrzeni kompozytu poddano weryfikacji doświadczalnej i praktycznej. Badaniami weryfikującymi objęto płytę fibropiaskobetonową przechowywaną w warunkach naturalnych przez okres ok. 2,5 lat, posadzkę przemysłową, a także próbki sześciennie wykonane przez producenta fibropiaskobetonu, Firmę Dźwigbet. Analiza wyników uzyskanych na drodze doświadczalnej i analitycznej wykazała dobrą ich zgodność, co wskazuje na poprawność opracowanego modelu i przyjętych założeń.

Przeprowadzone badania i analizy pozwoliły na sformułowanie wniosków będących potwierdzeniem tez postawionych w rozprawie

Rozprawa doktorska liczy 152 strony, w tym 103 rysunki i 49 tablic, wykaz literatury obejmuje łącznie 229 pozycji.

SUMMARY

Mineral composite model with randomly distributed fibres

Mineral composites with addition of randomly distributed fibres, called FRC (fibre reinforced composites), gain more and more popularity, both in Poland and around the world. Steel fibres act as strengthening significantly improving some mechanical properties of the composite. Therefore FRC constitute an alternative to a ordinary concrete, because they are characterized by a higher tensile strength and compressive strength, fatigue strength and higher abrasion resistance. These properties make them suitable to manufacture construction elements. They are also applied for the production of cladding of buildings, thin walled elements as roofs of buildings, paving of bridges, tunnels, strengthening mining excavations or in objects exposed to dynamic load. With such a wide range of applications of FRC there is lack of rapid, non-destructive and effective method for the estimation of its properties when embedded in the structure. Besides, the methods used for assessing its properties, using standard test specimens, do not allow for an accurate assessment of the property value distribution in tested elements and the hole tested structure.

The subject of the dissertation was fine aggregate mineral composite with randomly distributed fibres. The aim of the work was to develop a model of mineral composite with randomly distributed fibres. The model was in a form of mathematical formulas description based on physical-mechanical properties of such composite and of steel fibre distribution description in the composite space. In the thesis a method for determining properties of fibre composite by non-destructive methods: ultrasonic method and electromagnetic induction method was proposed. The relationships, in which the independent variables were intensity of induced electric current and ultrasonic wave velocity, were defined. The dependent variable was the property of the composite.

During one hundred and forty years of application of these composites in civil engineering, many authors have tried to describe the distribution of fibres in the composite space. This is a complex issue because the position of fibres in composite volume is unknown. The next task was to develop a description of the distribution of steel fibres. The description would identify the parameters of orientation towards each fibre, including orientation angle, the coordinates of both ends of the fibre, the coordinates of the points of penetration on a cross-section plane, mutual distances between fibres and the distance of fibre centres of gravity from element wall. The model accounts for the settling of steel fibres in a composite mixture which occurs as a result of the gravity forces. It accounts for the influence of composite consistency and vibrating time on the settling of fibres as well. The model takes into account technological conditions under which the composite is produced resulting uniformity of fibre distribution.

The model describing chosen physical-mechanical properties of the mineral composite with randomly distributed fibres and fibre distribution in the composite volume was subjected to experimental and practical verification. The study consisted of verifying the composite plate stored in natural conditions over a period of approximately 2.5 years, industrial floor as well as cubic specimen made by the manufacturer of the floor, the Company Dźwigbet. Analysis of the results obtained through experimental and analytical way demonstrated their good compatibility, which indicates the correctness of the model and the assumptions.

The research tests and analysis made allowed to draw conclusions which confirm the thesis of the dissertation.

The doctoral dissertation comprises of 152 pages, including 103 illustrations and 49 tables, bibliography covers a total of 229 items.

WYKAZ PODSTAWOWYCH SYMBOLI I OZNACZEŃ

Duże litery łacińskie

- A - pole przekroju belki pryzmatycznej, [mm²]
 A^c - pole przekroju próbki, [mm²]
 A_f - pole przekroju pojedynczego włókna, [mm²]
 C - zawartość cementu w mieszance fibrokompozytu, [kg]
 E - moduł sprężystości przy ścisaniu fibrokompozytu, [GPa]
 E_d - dynamiczny moduł sprężystości fibrokompozytu, [GPa]
 E_i - wartość teoretyczna wynikająca z rozkładu statystycznego, [-]
 $F(x; \alpha_K, \beta_K)$ - dystrybuanta rozkładu statystycznego Kumaraswamy, [-]
 G_d - dynamiczny moduł odkształcenia postaciowego, [GPa]
 I - natężenie indukowanego prądu, [mA]
 N - ilość włókien w analizowanym przekroju, [szt/cm²]
 N_f - liczba włókien przecinająca analizowany przekrój elementu, [szt.]
 P - zawartość kruszywa drobnego w mieszance fibrokompozytu, [kg]
 R - współczynnik zależny od wymiarów przekroju poprzecznego belki, [-]
 S - ścieralność fibrokompozytu, [mm]
 V - prędkość propagacji fali ultradźwiękowej w fibrokompozycie, [km/s]
 $V_0 \div V_4$ - konsystencja mieszanki betonowej, [-]
 V_f - objętościowa zawartość włókien w fibrokompozycie, [%]
 W - objętość wody w mieszance fibrokompozytu, [dm³]
 Z_p - zawartość pyłów mineralnych, [%]
 R^2 - współczynnik determinacji, [-]

Małe litery łacińskie

- b - szerokość przekroju poprzecznego belki pryzmatycznej, [mm]
 d - średnica próbki walcowej, [mm]
 d_f - średnica pojedynczego włókna, [mm]
 d_m - ziarno mediana kruszywa, [mm]
 $f_{c, cube}$ - wytrzymałość na ścisanie fibrokompozytu badana na kostkach, [N/mm²]
 $f_{c, cyl}$ - wytrzymałość na ścisanie fibrokompozytu badana na walcach, [N/mm²]
 $f_{ck, cube}$ - wytrzymałość charakterystyczna fibrokompozytu na ścisanie, [N/mm²]
 f_t - wytrzymałość na rozciąganie osiowe fibrokompozytu, [N/mm²]
 $f_{t, spl}$ - wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu fibrokompozytu, [N/mm²]
 f_{tors} - częstotliwość drgań własnych belki, [Hz]
 $f(x; \alpha_K, \beta_K)$ - funkcja gęstości rozkładu statystycznego Kumaraswamy, [-]
 h - wysokość przekroju poprzecznego belki pryzmatycznej, [mm]
 k - współczynnik jednorodności, [-]
 l - długość, [mm]
 l_f - długość pojedynczego włókna, [mm]
 n - ilość włókien, [szt.]
 n_p - liczba rozpatrywanych przedziałów w teście zgodności Pearson'a, [-]

- r - współczynnik korelacji, [-]
- t - czas przepływu fali ultradźwiękowej przez fibrokompozyt, [s]
- t_{Ve-Be} - czas wibrowania mieszanki fibrokompozytu wg metody Ve-Be, [s]
- t_{wib} - czas wibrowania mieszanki fibrokompozytu podczas formowania próbek, [s]

Duże litery greckie

- $\Delta\varepsilon$ - przyrosty odkształceń betonu, [%]
- Δf_c - zmiana wytrzymałości po cyklach mrożenia-rozmrażania, [N/mm²]
- Δt - różnica temperatur w cyklu mrożenia-rozmrażania, [°C]

Małe litery greckie

- α - poziom istotności, [-]
- α_1 - współczynnik rozkładu włókien dla sekcji przekroju bez ograniczeń brzegowych, [-]
- α_2 - współczynnik rozkładu włókien dla sekcji przekroju z jednym ograniczeniem brzegowym, [-]
- α_3 - współczynnik rozkładu włókien dla sekcji przekroju z dwoma ograniczeniami brzegowymi, [-]
- α_f - ogólna postać współczynnika rozkładu włókien dla wszystkich sekcji analizowanego przekroju, [-]
- α_K, β_K - parametry rozkładu statystycznego Kumaraswamy, [-]
- ε_c - odkształcenie przy ściskaniu fibrokompozytu, [‰]
- ε_s - odkształcenie skurczowe fibrokompozytu, [‰]
- ε_t - odkształcenie przy rozciąganiu osiowym fibrokompozytu, [‰]
- η^{iD} - współczynnik efektywności kierunkowej włókna [-],
- θ - kąt obrotu włókna względem osi poziomej, [rad]
- λ - smukłość włókien (stosunek długości włókna do jego średnicy: l_f/d_f), [mm/mm]
- v - wskaźnik zmienności, [-]
- ρ - gęstość pozorna stwardniałego fibrokompozytu, [g/cm³]
- ρ_0 - gęstość nasypowa kruszywa w stanie luźnym, [kg/m³]
- ρ_z - gęstość nasypowa kruszywa w stanie zagęszczonym, [kg/m³]
- σ - naprężenia ściskające, [N/mm²]
- σ_t - naprężenia rozciągające przy rozciąganiu osiowym, [N/mm²]
- v - tolerancja statystyczna, [-]
- v_0 - jamistość kruszywa w stanie luźnym, [%]
- v_z - jamistość kruszywa w stanie zagęszczonym, [%]
- τ_f - przyczepność włókien do matrycy, [N/mm²]
- χ^{iD} - teoretyczna efektywność mechaniczna zbrojenia rozproszonego [-].

1. WPROWADZENIE

Kompozyty mineralne z włóknami rozproszonymi znajdują coraz szersze zastosowanie w przemyśle budowlanym. Zapotrzebowanie na tego typu materiały znajduje odzwierciedlenie w rosnącym zainteresowaniu tematyką tych kompozytów. Przykładem mogą być normy [194÷201, 212÷214, 216, 217] oraz wydania monograficzne [13, 72, 75, 123, 132]. Fibrokompozyty były przedmiotem badań wielu ośrodków krajowych (np. Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Centrum Badań Betonów CEBET, Ośrodek Badań Mostów, Betonów i Kruszyw, uczelnie wyższe) i zagranicznych (np. Thomas Concrete Group AB Sweden, American Concrete Institute, International Concrete Repair Institute, Concrete Materials Research Institute). Poświęcono im także wiele konferencji krajowych (np. Dni Betonu, Matbud, Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, Konferencja Naukowo – Techniczna Jadwisin) i zagranicznych (np. Conference on Recent Development on Fiber Reinforced Cement and Concrete w Cardiff, Conference on Advances in Concrete Technology w Atenach, Conference on Bond in Concrete w Londynie, Conference on Durability of Concrete w Montrealu).

Kompozyty mineralne z włóknami rozproszonymi, nazywane w pracy fibrokompozytami, posiadają szereg zalet. Do najważniejszych z nich można zaliczyć: większą wytrzymałość na ściskanie we wczesnych stadiach dojrzewania niż beton zwykły [27], większą wytrzymałość na rozciąganie [185] oraz rozciąganie przy zginaniu i rozciąganie przy rozłupywaniu, dużą odporność dynamiczną [171, 189], ograniczenie propagacji rys w elementach konstrukcyjnych [174], lepsze zachowanie podczas zniszczenia [180] (zniszczenie nie przebiega gwałtownie), możliwość redukcji tradycyjnego zbrojenia [29], czy też odporność na działanie wysokich temperatur [157]. Kompozyty te mają także dużą odporność na ścieranie i charakteryzują się trwałością nie gorszą niż beton zwykły [72, 87]. Wadami fibrokompozytów jest stosunkowo wysoki koszt włókien, pogorszenie urabialności mieszanki wraz ze wzrostem ich zawartości w mieszance oraz brak wytycznych do projektowania konstrukcyjnych elementów wykonanych z fibrokompozytów [12].

Zakres stosowania fibrokompozytów w budownictwie jest różnorodny. Można tu wymienić szereg przykładów, a mianowicie: do wytwarzania konstrukcyjnych elementów cienkościennych, powłok, przekryć budynków. Stosowane są także do wykonywania elementów żelbetowych zbrojonych tradycyjnie, jako uzupełnienie zbrojenia [61]. Z fibrokompozytów wytwarza się elementy mostów [11, 149, 187], rury [7, 42], płyty [4], kolumny [167] oraz pale [159]. Najczęściej metodą natryskową z fibrokompozytów wykonywane są tunele podziemne [8, 9, 21, 43, 83] i wzmocnienia wyrobisk kopalnianych. Fibrokompozyty stosuje się także w konstrukcjach narażonych na wpływy sejsmiczne [146]

oraz do wykonywania elementów konstrukcji elektrowni nuklearnych [145], kiedy zachodzi konieczność zapewnienia wysokiego stopnia bezpieczeństwa, np. podczas ataku terrorystycznego lub trzęsienia ziemi. W szczególności fibrokompozyty znajdują zastosowanie w elementach poddawanych dużym obciążeniom dynamicznym [145]. Pomimo coraz powszechniejszego stosowania tych kompozytów brakuje bezinwazyjnej metody, która może pozwolić na ocenę ich właściwości. W związku z tym opracowano zależności funkcyjne umożliwiające taką ocenę.

W trakcie 140 lat stosowania fibrokompozytów w budownictwie (od czasu zgłoszenia patentowego A. Bernarda w 1874 r. [108]), wielu autorów podejmowało próby opisu rozkładu włókien w przestrzeni kompozytu [28, 35, 36, 57, 77, 78, 84]. Problem rozkładu włókien w wewnętrznej strukturze kompozytu jest zagadnieniem skomplikowanym, ponieważ cechuje go losowość jako wypadkowa czynników materiałowych i technologicznych. Włókna układają się pod różnymi kątami oraz w różnej odległości między sobą i ścianami formy. Na ich ostateczny rozkład ma wpływ szereg czynników, takich jak: ograniczenia ścian form, zawartość włókien, sposób przygotowania mieszanki (konsystencja, mieszanie, wibrowanie, układanie w formie) oraz skład samej matrycy. Należy zaznaczyć, że rozkład włókien ma istotny wpływ na właściwości mechaniczno-fizyczne kompozytu [138]. Dlatego też w dysertacji podjęto próbę opracowania modelu opisującego wybrane właściwości mechaniczno-fizyczne mineralnego kompozytu z włóknami rozproszonymi i rozkład włókien w przestrzeni kompozytu.

W dysertacji poruszono także aspekt ekologiczny. Zlokalizowanie większości złóż kruszyw grubych w południowej Polsce [93, 186] przy dużym zapotrzebowaniu na to kruszywo, a także duże koszty transportu z regionów południowych Polski, przyczyniły się do opracowania technologii pozyskiwania kruszywa grubego przez jego wypłukiwanie ze złóż. Technologię tę nazwano hydroklasyfikacją. Część kruszywa w postaci płukanego piasku, niewykorzystana przez przemysł, zalega na hałdach będąc odpadem tego procesu (rys. 1.1). Do wytworzenia fibrokompozytu zastosowano piaski będące odpadem w procesie hydroklasyfikacji. Należy wspomnieć, że w latach ubiegłych podejmowano próby zastąpienia betonu zwykłego betonem drobnokruszywowym [88, 127]. Zastąpienie nawet częściowe betonu zwykłego fibrokompozytem na bazie piasków odpadowych może ograniczyć degradację środowiska, jak również może spowodować zmniejszenie hałd piasków i przyczynić się do bardziej zrównoważonego wykorzystania surowców regionalnych [51, 127].



Rys. 1.1. Ogólny widok hałd piasku odpadowego zlokalizowanych w gminie Białogard (woj. zachodniopomorskie)

2. PRZEDMIOT, CEL I TEZY PRACY

Przedmiotem pracy były drobnokruszywowe kompozyty mineralne z włóknami rozproszonymi. Celem pracy było opracowanie modelu kompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi poprzez sformułowanie zależności opisujących właściwości mechaniczno-fizyczne takich kompozytów oraz opis rozkładu włókien stalowych w przestrzeni kompozytu, w zależności od warunków technologicznych. Przy szerokim spektrum zastosowań fibrokompozytów odczuwa się brak szybkiej, bezinwazyjnej i skutecznej metody oceny jego właściwości po wbudowaniu w konstrukcję. Ponadto stosowane metody oceny jego właściwości na normatywnych próbkach nie pozwalają na dokładną ocenę rozkładu wartości jego cech w elementach i konstrukcji. Zaproponowano więc sposób oznaczania właściwości fibrokompozytu metodami nieniszczącymi: ultradźwiękową oraz indukcji elektromagnetycznej. Ustalono zależności, w których zmiennymi niezależnymi są natężenie indukowanego prądu oraz prędkość propagacji fali ultradźwiękowej. Zmienną zależną jest właściwość fibrokompozytu. Pierwsza z metod wykorzystuje indukcję elektromagnetyczną w celu oszacowania stopnia „nasylenia” kompozytu zbrojeniem rozproszonym. Druga metoda opiera się na ustaleniu prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w przestrzeni kompozytu. Prędkość propagacji fali ultradźwiękowej zależna jest od właściwości matrycy, z której wykonany jest kompozyt. Określenie "matryca" rozumiane jest tutaj jako mieszanina składników kompozytu: cementu, piasku, pyłów krzemionkowych oraz wody i superplastyfikatora, nie zawierająca włókien. Cel pracy zrealizowano ustalając korelacje wyników badań przeprowadzonych wymienionymi metodami nieniszczącymi z właściwościami kompozytu ustalonymi na drodze badań niszczących i reologicznych. Ustalone funkcyjne zależności składają się na model kompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi.

W okresie stu czterdziestu lat stosowania fibrokompozytów w budownictwie lądowym, wielu autorów podejmowało próby opisu rozkładu włókien w przestrzeni kompozytu. Jest to zagadnienie złożone, ponieważ nieznane jest rzeczywiste ułożenie włókien w przestrzeni kompozytu. Kolejnym zadaniem było więc opracowanie opisu rozkładu włókien stalowych, który umożliwi określenie parametrów ułożenia włókien w przestrzeni kompozytu, takich jak: kąt ułożenia, współrzędne początku i końca włókna, współrzędne przebicia płaszczyzny przekroju elementu.

Model kompozytu z włóknami rozproszonymi poddano weryfikacji doświadczalnej. Badaniami weryfikującymi objęto płytę fibropiaskobetonową przechowywaną w warunkach naturalnych przez okres ok. 2,5 lat, posadzkę przemysłową zlokalizowaną w Laboratorium Techniki Budowlanej Politechniki Koszalińskiej, a także próbki sześcienne wykonane przez producenta fibropiaskobetonu, Firmę Dźwigbet.

W rozprawie postawiono następujące tezy:

- 1. Możliwa jest kontrola jakości drobnokruszywowego fibrokompozytu poprzez ocenę metodami nieniszczącymi właściwości mechaniczno-fizycznych i identyfikację rozkładu włókien.**
- 2. Właściwa ocena jakości wyrobów wykonanych z drobnokruszywowego fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych umożliwi efektywne zagospodarowanie tych kruszyw.**
- 3. Metoda indukcji elektromagnetycznej wraz z metodą opartą na prędkości propagacji fali ultradźwiękowej mogą być stosowane do identyfikacji cech mechaniczno-fizycznych drobnokruszywowego kompozytu z włóknami rozproszonymi.**

3. PRZEGLĄD STANU WIEDZY W ZAKRESIE PRZEDMIOTU PRACY

3.1. Włókna stosowane do wzmocnienia fibrokompozytu

Jedną z metod poprawy niektórych własności materiałów konstrukcyjnych ze spoiwem mineralnym jest dodatek krótkich włókien rozproszonych. Dodatek włókien ogranicza powstawanie rys skurczowych, zwiększa wytrzymałość na rozciąganie, odporność na ścieranie [162] i obciążenia dynamiczne, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu [111], a w niektórych przypadkach ściskanie, moduł sprężystości i mrozoodporność [117]. Fibrokompozyt z kruchą matrycą zachowuje zdolność do przenoszenia obciążeń po przekroczeniu naprężeń granicznych matrycy [128], ponieważ siły rozciągające przenoszone są przez włókna.

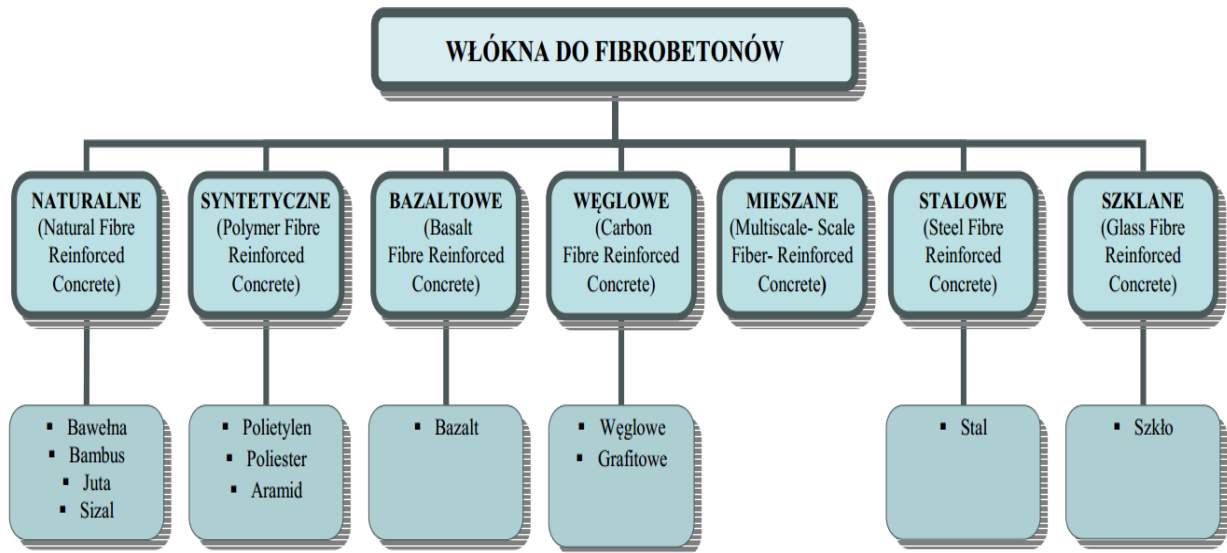
Wzmocnienie rozproszone stosowane w kompozytach mineralnych można podzielić na trzy podstawowe grupy [47]: dyspersyjne, wzmocnienie cząsteczkami, wzmocnienie włóknami. Powyższy podział znajduje odbicie w mikrostrukturze tych materiałów, także mechanizm przenoszenia obciążeń różni się w zależności od zastosowanego typu wzmocnienia. W materiałach wzmocnionych dyspersyjnie całe obciążenie przenosi matryca. W materiałach zbrojonych cząsteczkami obciążenie przenoszone jest przez matrycę, jak i przez cząsteczki. W kompozytach zbrojonych włóknami, zadanie matrycy polega w dużym stopniu na przekazaniu obciążenia włóknom [69].

Matryca kompozytów mineralnych należy do materiałów kruchych i mało odkształcalnych, jest więc podatna na zarysowania i pęknięcia. Dla tego typu matrycy, dodatek włókien w większym stopniu niż w przypadku innych inkluzji wzmacniających, pozwala na uzyskanie struktury oraz właściwości fibrokompozytu o podwyższonej plastyczności i odporności na zarysowania.

Do podstawowych zadań, które włókna pełnią w fibrokompozytach należą [80, 122, 133]: utrudnienie powstawania mikropęknięć, rozprzestrzeniania się mikropęknięć przez przejście na siebie naprężeń, czy też współpraca z matrycą podczas przenoszenia obciążeń. Włókna podwyższają wskaźniki wytrzymałościowe kompozytu, równomiernie rozprowadzają koncentracje lokalnych naprężeń na większy obszar materiału, a także przejmują naprężenia z fragmentu pękającej matrycy. Włókna łagodzą również przebieg procesu pęknięcia matrycy nadając kompozytowi cechy quasi plastyczne. Rolą włókien jest zmniejszenie skurczu kompozytu i ograniczenie tym samym ilości spękań typu skurczowego oraz zmiana charakteru rozkładu naprężeń w obciążonym elemencie. Pracują one dzięki przyczepności do matrycy, a obciążenia wywołują powstanie wzdłuż włókien naprężeń stycznych, gdy w przypadku tylko samego kruszywa większość naprężeń ma charakter normalny [80, 122, 133].

W zależności od mikrostruktury można wyróżnić włókna: amorficzne (np. szklane), monokrystaliczne (metalowe), polikrystaliczne (ceramiczne), wielofazowe (węgliki), makrocząsteczkowe (organiczne).

Włókna stosowane do modyfikacji fibrobetonów można sklasyfikować w zależności od materiału, z którego pochodzą (rys. 3.1):



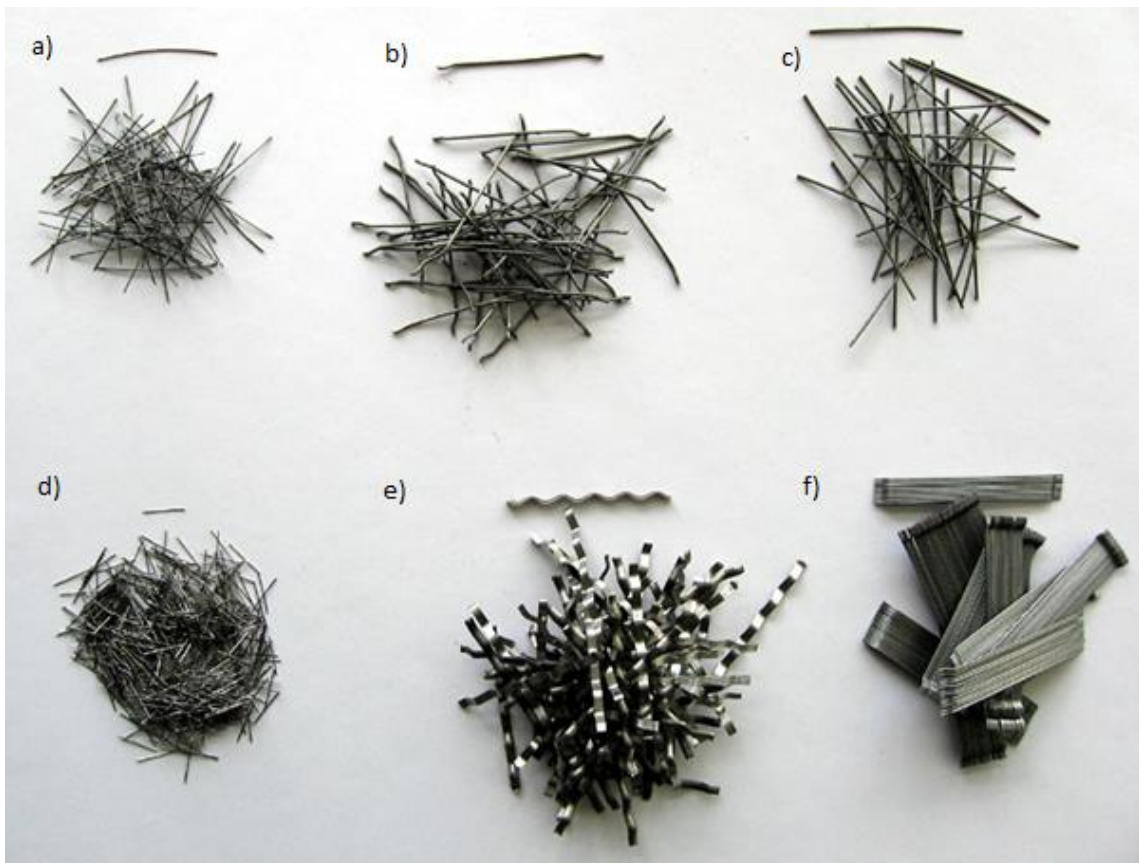
Rys. 3.1. Klasyfikacja włókien stosowanych do betonów kompozytowych [82]

Biorąc pod uwagę rodzaj włókna należy także uwzględnić ich właściwości fizyko-mechaniczne oraz fizyko-chemiczne. Dla przykładu włókna polipropylenowe ulegają stopieniowi w temperaturze 170°C, polialkoholowinyłowe i poliakrylonitryłowe w warunkach wysokiej wilgotności w temperaturze powyżej 180°C znacznie obniżają swoją wytrzymałość. Ponadto wszystkie włókna syntetyczne charakteryzują się obniżeniem wytrzymałości w temperaturze 70–80°C. W środowisku alkalicznym większość włókien (najbardziej szklane) wykazują spadek wytrzymałości na rozciąganie. Niektóre z włókien źle łączą się z matrycą, np. polipropylenowe [133]. Włókna naturalne z kolei nie są odporne na działanie czynników atmosferycznych i ich właściwości ulegają z czasem pogorszeniu. Bazaltowe odznaczają się dużą wytrzymałością mechaniczną i odpornością na korozję (w tym na środowisko kwaśne oraz zasadowe). Dodatkową zaletą włókien bazaltowych jest duża twardość, co wpływa na zwiększenie odporności fibrokompozytu na ścieranie. Charakteryzują się także dużą adhezją do betonu.

Wybór rodzaju włókien powinien być podyktowany nie tylko ich właściwościami mechanicznymi, ale również względami ekonomicznymi, dostępnością i łatwością zastosowania. Włóknami o dużej uniwersalności zastosowań są włókna stalowe. Włókna te są też najdokładniej opisane w literaturze [16, 26, 49, 72, 81, 85, 185]. Mogą one korzystnie współpracować z matrycą cementową, ponieważ moduł sprężystości tych włókien jest wielokrotnie większy od modułu sprężystości matrycy. Ponadto obydwa składniki kompozytu

mają bardzo zbliżony współczynnik rozszerzalności cieplnej. Z punktu widzenia trwałości istotne jest, że włókna stalowe są mniej podatne na korozję w dobrze wykonanym kompozycie niż tradycyjne zbrojenie stalowe [137].

Kształt i rozmiar włókien stalowych stosowanych jako wzmocnienie kompozytów jest zróżnicowany (rys. 3.2). Najczęściej spotykane kształty włókien to [72]: gładkie o przekroju kołowym, gładkie o przekroju kwadratowym, gładkie o przekroju prostokątnym, gładkie o przekroju prostokątnym skręcone na swej długości. Spotykane są także włókna karbowane przez nałożenie innego materiału, karbowane przez nagniatanie, faliste o różnej długości i amplitudzie fali. Włókna mogą być zakończone kotwami na końcach w postaci haczyków, z kotwami na końcach w postaci kulek, z kotwami na końcach w postaci spłaszczeń lub z kotwami na końcach w postaci fal. Powierzchnia włókien może być chropowata poprzez wywołaną „prowokowaną” korozję bądź przez wyżarzanie. Można napotkać włókna o niejednorodnym przekroju i kształcie powierzchni uzyskiwanej bezpośrednio z żeliwa. Włókna można pozyskiwać także przez struganie bloków stalowych i rozdrobnione do długości mniejszej niż 12 mm (tzw. wełna stalowa).



Rys. 3.2. Przykłady włókien stalowych: a), c) i d) gładkie o przekroju kołowym lecz różnej długości i średnicy, b) haczykowane, e) faliste, f) haczykowane sklepane.

W tabelicy 3.1 przedstawiono niektóre właściwości mechaniczne wybranych typów włókien, stosowanych jako wzmocnienie kompozytów mineralnych.

Tablica 3.1. Właściwości mechaniczne wybranych rodzajów włókien

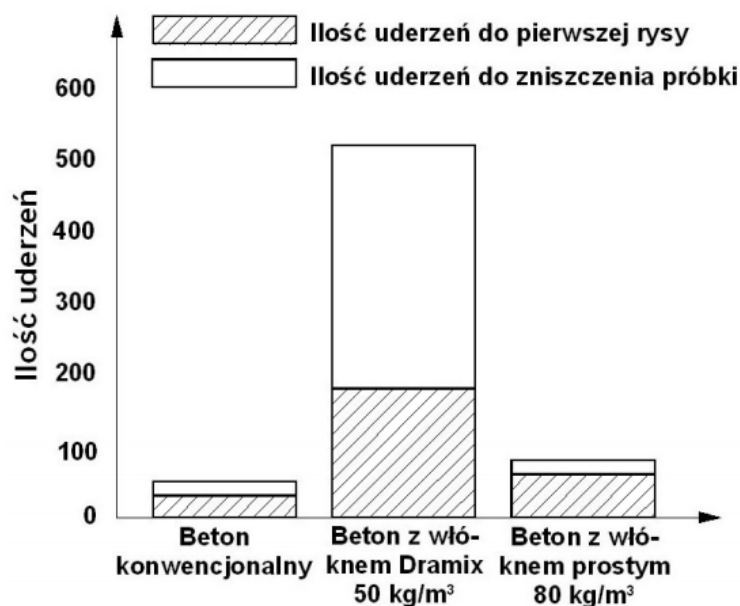
| Rodzaj | Nazwa włókna | Gęstość [g/cm ³] | Wytrzymałość na rozciąganie [GPa] | Wytrzymałość na ściskanie [GPa] | Moduł sprężystości podłużnej [GPa] | Moduł sprężystości poprzecznej [GPa] | Odształcenie graniczne [%] | Współczynnik rozszerzalności cieplnej [1 /K(x 10 ⁻⁶)] | Współczynnik przewodności cieplnej [W/mK] | Oporność właściwa [μΩm] | Oporność termiczna [°C] |
|---------------|--------------|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|---|---|-------------------------|----------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Polimerowe | PBO | 1,58 | 3,5÷ 5,7 | 0,2 | 200÷360 | 1,0 | 1÷2 | (-7) ÷ (-10) | - | - | - |
| | Kevlar 29 | 1,44 | 2,8 | 0,4 | 65 | 1,9 | 4,0 | - | - | - | 40 |
| | Kevlar49 | 1,44÷1,45 | 3,5 | 0,4 | 125 | 1,4 | 2,3 | -4,OL 59R | 0,04 | - | |
| | Kevlar 149 | 1,47 | 3,4 | 0,4 | 185 | 1,1 | - | -1.5L 60R | - | - | |
| | SWM | 1,43 | 3,8÷4,2 | - | 125÷135 | - | 3÷4 | - | - | - | - |
| | Spectra 1000 | 0,97 | 3,0 | 0,17 | 170 | 0,8 | 2,0 | -10 | - | - | - |
| | Vectran HS | 1,41 | 2,8 | - | 65 | 0,6 | 3,3 | - | - | - | - |
| | PBJ | 1,40 | 3,0 | - | 55÷100 | - | 30,0 | - | - | - | - |
| Nieorganiczne | E-szkło | ÷8 | 3,5 | 0,8 | 75 | 28 | 4,0 | 4,9 | 1,04 | 10 ³ | 350 |
| | S-szkło | 2,46 | 4,5 | 1,1 | 86 | - | - | 2,5 | - | - | |
| | WM-1 | 2,58 | 4,2 | - | 95 | - | 4,8 | - | - | - | - |
| | Bor | 2,5÷2,6 | 3,5 | 5,9 | 415 | 139 | 0,74÷1,0 | 4-5-8 | - | 8,3 | 350 utlenianie w powietrzu |
| | Nicalan | 2,8 | 2,8 | 3,1 | 200 | - | - | 3,1 | - | 10 ⁷ | - |
| | Bazalt | 2,7÷3,2 | 1,7 | 0,16÷0,30 | 85÷90 | - | - | - | - | - | - |

c.d. tablicy 3.1.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----------------------|--|--|-----------|------|-----------|------|------|------------|-------|-----------|--|
| Węglowe | T-300 | 1,76 | 3,2 | 2,88 | 235 | 15 | 1,4 | -0,5L 10R | 15 | 15 | 400 utlenianie w powietrzu 2000 utlenianie w atmo- sferze obojętnej |
| | T-1000 | 1,82 | 7,1 | 2,76 | 295 | - | 2,4 | - | - | 14 | |
| | GY-70 | 1,96 | 1,8 | 1,06 | 520 | - | 0,36 | -1,1 | - | 6,5 | |
| | AS-4 | 1,8 | 3,6 | 2,69 | 235 | 17 | 1,6 | - | - | 15 | |
| | JM-6 | 1,94 | 3,8 | 1,67 | 585 | - | 0,7 | -0,9 | 75 | 8 | |
| | Amoco P-25 | 1,9 | 1,4 | 1,15 | 160 | - | 0,9 | - | 22 | 13 | |
| | Amoco P-100 | 2,15 | 2,2 | 0,48 | 725 | 4,7 | 0,32 | -1,5L 9,4R | 500 | 3,0 | |
| | Nippon NT-60 | - | 3,0 | - | 595 | - | - | - | - | - | |
| | Ural-24 | 1,7 + 1,8 | 1,7 + 2,0 | - | 150 + 200 | - | 1,1 | - | - | - | |
| | Carbolon-L | 1,95 | 2,42 | - | 380 | - | 0,6 | - | - | - | |
| | M-30 | 1,72 | 3,92 | - | 300 | - | 1,3 | - | - | - | |
| | Zigrafil-HM | - | - | - | 343 | - | 1,96 | - | - | - | |
| | Madmor-1 | 2,0 | 1,7 + 2,5 | - | 400 + 500 | - | 0,5 | - | - | - | |
| Regilor AG | 2,0 | 1,9 | - | 420 | - | 0,45 | - | - | - | | |
| Metalowe i ceramiczne | Stal 18-8 | 7,8÷8,0 | 1,0 + 1,4 | - | 198 | - | - | 18 | - | - | - |
| | Wolfram | 19,3 | 5,5 | - | 360 | - | - | 4,5 | - | - | - |
| | Beryl | 1,85 | 1,8 | - | 300 | - | - | 11,4 | - | - | - |
| | Korundowe kry- staliczne Al ₂ O ₃ (FP) | 3,7 | 1,7 | 6,9 | 350 + 380 | 122 | - | 6,8 | 10÷20 | - | 1900 |
| | SiC | 2,8 + 3,1 | 3,0 | - | 250 | - | - | 5,7 | - | 3,0 + 4,0 | 500 |
| LITERATURA: | | [13, 18, 33, 118, 119, 125, 166, 172, 178] | | | | | | | | | |

Zbyt duża zawartość objętościowa włókien stalowych oraz ich duża smukłość (stosunek długości do średnicy) w mieszance fibrokompozytu powodują pogarszanie jej urabialności. Z punktu widzenia urabialności korzystne jest więc dodawanie włókien krótszych o większej zawartości w mieszance betonowej, co powinno mieć wpływ na zachowanie jednorodności struktury formowanego elementu [164]. Za maksymalną uważa się taką zawartość włókien, która nie pogarsza urabialności kompozytu: dla wibrowania 3%, dla wirowania 1,2-1,4% [168]. Za optymalną przyjmuje się zawartość, przy której nie następuje zbijanie się włókien w tzw. „jeże” podczas mieszania [168].

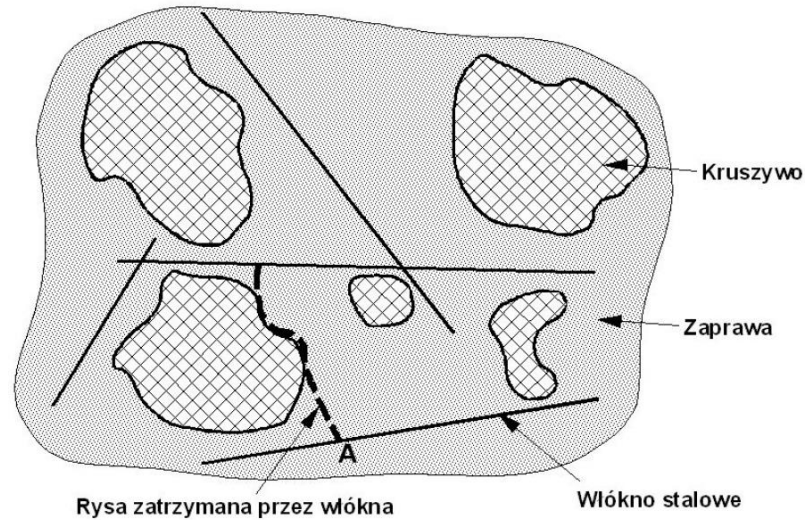
Kształt włókien wpływa na właściwości mechaniczne kompozytu. Włókna o specjalnie przygotowanym kształcie: (haczykowane, z kotwami itp.) w większym stopniu niż włókna o kształcie prostym wpływają na poprawę wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu [113]. Włókna nagniatane i faliste charakteryzujące się dobrą przyczepnością do matrycy kompozytu powodują jednak koncentrację naprężeń w matrycy, z kolei włókna haczykowane mają nieco gorszą przyczepność lecz warunkują najlepszą wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu [74]. Włókna o kształcie prostym (gładkie) poprawiają odporność na obciążenia dynamiczne około dwukrotnie w stosunku do betonu bez włókien. Natomiast włókna o kształcie haczykowanym poprawiają tę właściwość w dużo większym stopniu (rys. 3.3). Kształt spiralny włókien poprawia odporność na obciążenia dynamiczne kompozytu w większym stopniu niż włókna o innym kształcie [184].



Rys. 3.3. Wyniki badań odporności na obciążenia dynamiczne betonu zbrojonego włóknami stalowymi w porównaniu do betonu zwykłego [74, 202]

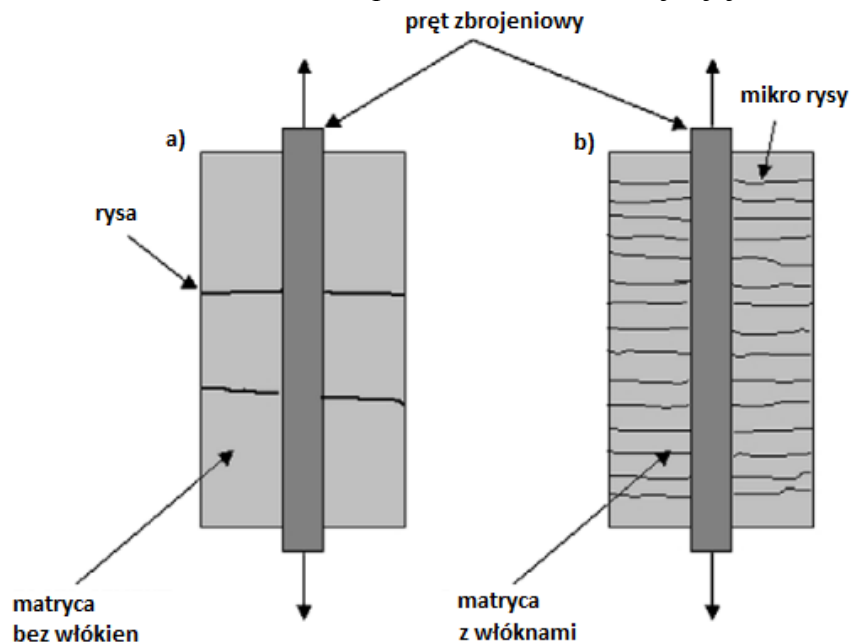
W fibrokompozytach włókna rozproszone przyczyniają się znacząco do powstrzymania propagacji rys oraz przenoszenia części sił wewnętrznych po zarysowaniu [112]. Tam gdzie

rysa została zatrzymana przez włókno, zapewnia ono zachowanie spójności materiału. Zatrzymanie rysy, czyli przejście obciążeń, odbywa się dzięki przyczepności - sile łączącej włókno z otaczającą je matrycą [74]. Wpływ włókien na zarysowanie matrycy cementowej pokazano na rys. 3.4÷3.6.



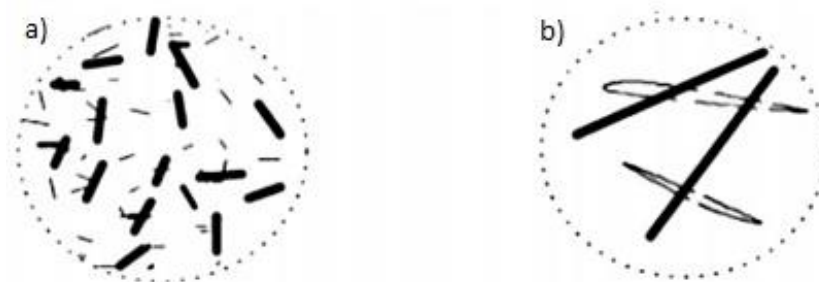
Rys. 3.4. Mechanizm zatrzymywania rys w fibrobetonie [74]

Dzięki włóknom duże pojedyncze rysy zastąpione są gęsto rozłożonym systemem mikrorys, co może mieć znaczenie dla bezpieczeństwa konstrukcji i jej trwałości [15].



Rys. 3.5. Obraz zarysowania betonu zbrojonego: a) bez włókien, b) z włóknami rozproszonymi, poddanemu działaniu sił rozciągających [15]

W fibrokompozytach o dużej zawartości włókien krótkich, włókna te „kontrolują” otwarcie i dalszą propagację mikrorys. Dłuższe włókna do 80 mm kontrolują powstanie większych rys i wpływają na wzrost wytrzymałości fibrokompozytu (rys. 3.6) [15].

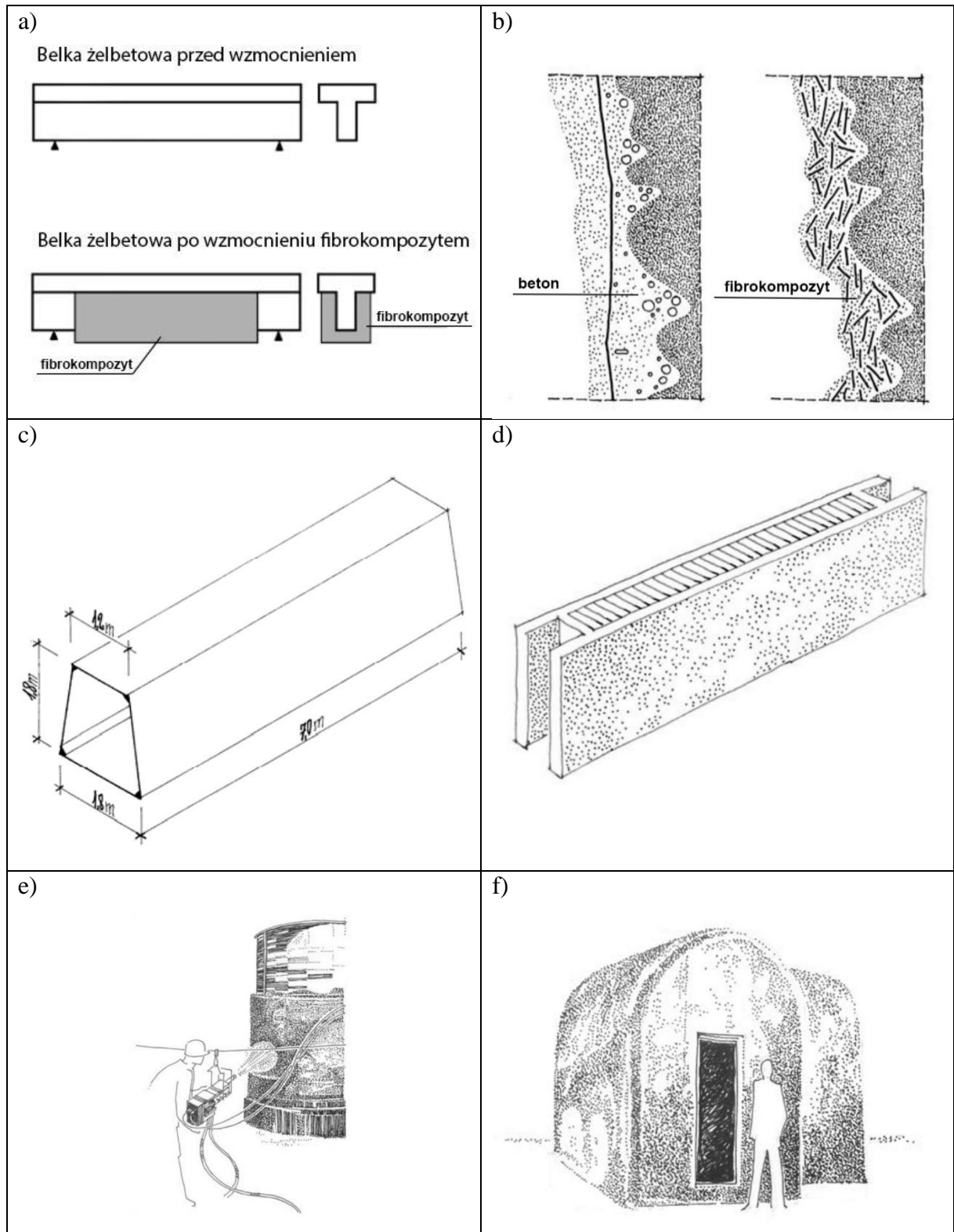


Rys. 3.6. Rola włókien w ograniczaniu rys w kompozycie: a) włókna krótkie, b) włókna długie [15]

Stosowanie długich włókien ma jednak pewne ograniczenia. Włókna o dużej smukłości (stosunku długości do średnicy) produkowane luzem mają większą tendencję do zbijania się w tzw. „jeże” czyli kule zbite z haczykowatych drucików niż włókna krótkie. Zjawisku temu przeciwdziała stosowanie włókien klejonych w pasma [37] (por. rys. 3.2 f).

3.2. Charakterystyka właściwości kompozytów z włóknami stalowymi

Przez określenie kompozyt rozumiany jest materiał o niejednorodnej strukturze, składający się z dwóch lub więcej składników o różnych właściwościach. W przypadku fibrokompozytów mineralnych matrycę stanowi w najprostszej postaci zaczyn cementowy oraz wypełniacz w postaci kruszywa. W celu poprawy właściwości matrycy stosowane są różnego rodzaju dodatki i domieszki. Poprawa stosunku wodno-cementowego (w/c), wpływającego bezpośrednio na wytrzymałość kompozytu, uzyskiwana jest przez redukcję wody w zaczynie za pomocą superplastyfikatorów, których rola polega na chemicznym upłynnieniu mieszanki. Dodatek pyłów krzemionkowych wpływa na poprawę szczelności betonu, co powoduje poprawę mrozoodporności. Natomiast dodatek włókien stalowych wpływa na poprawę szeregu właściwości kompozytu. Włókna stalowe powodują zmianę materiału kruchego, jakim jest beton, w materiał quasi-plastyczny. Materiał ten po osiągnięciu naprężeń niszczących nie pęka dalej, ale odkształca się utrzymując wytrzymałość [85]. Z uwagi na bardzo dobre właściwości mechaniczne, kompozyty z włóknami stalowymi znalazły zastosowanie w budownictwie do wytwarzania elementów konstrukcyjnych oraz ich wzmacniania, gdzie właściwości betonu zwykłego okazały się niewystarczające (rys. 3.7).



Rys. 3.7. Przykłady zastosowania fibrokompozytów: a) do wzmocnienia belki żelbetowej [86, 108], b) do wzmocnienia ściany skalnej [71, 86], c) do wykonania cienkościennego elementu użytego do budowy portu morskiego, d) do wykonania cienkościennego prefabrykatu wypełnionego izolacją termiczną [86, 148], e) do budowy zbiornika wodnego metodą natryskową, f) do budowy magazynu metodą natryskową [86, 148]

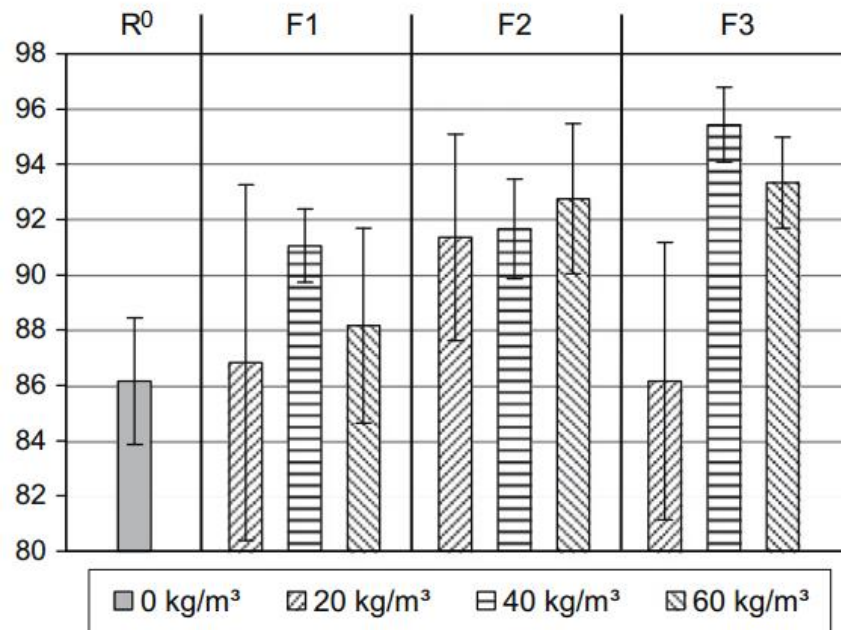
Badaniami właściwości mechaniczno-fizycznych fibrokompozytów zajmowało się wiele ośrodków krajowych (np. Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Centrum Badań Betonów CEBET, Ośrodek Badań Mostów, Betonów i Kruszyw, uczelnie wyższe) i zagranicznych (np. Thomas Concrete Group AB Sweden, American Concrete Institute, International Concrete Repair Institute, Concrete Materials Research Institute). Zagadnienia te były poruszane na wielu konferencjach krajowych (np. Dni Betonu, Matbud, Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN oraz Komitetu Nauki PZITB, Konferencja Naukowo – Techniczna Jadwisin) i zagranicznych (np. Conference on Recent Development on Fiber Reinforced Cement and Concrete w Cardiff, Conference on Advances in Concrete Technology w Atenach, Conference on Bond in Concrete w Londynie, Conference on Durability of Concrete w Montrealu).

Po dodaniu włókien stalowych obserwuje się poprawę wielu właściwości kompozytu. W tablicy 3.2 przedstawiono efektywność zmian właściwości kompozytów mineralnych w wyniku dodania włókien stalowych.

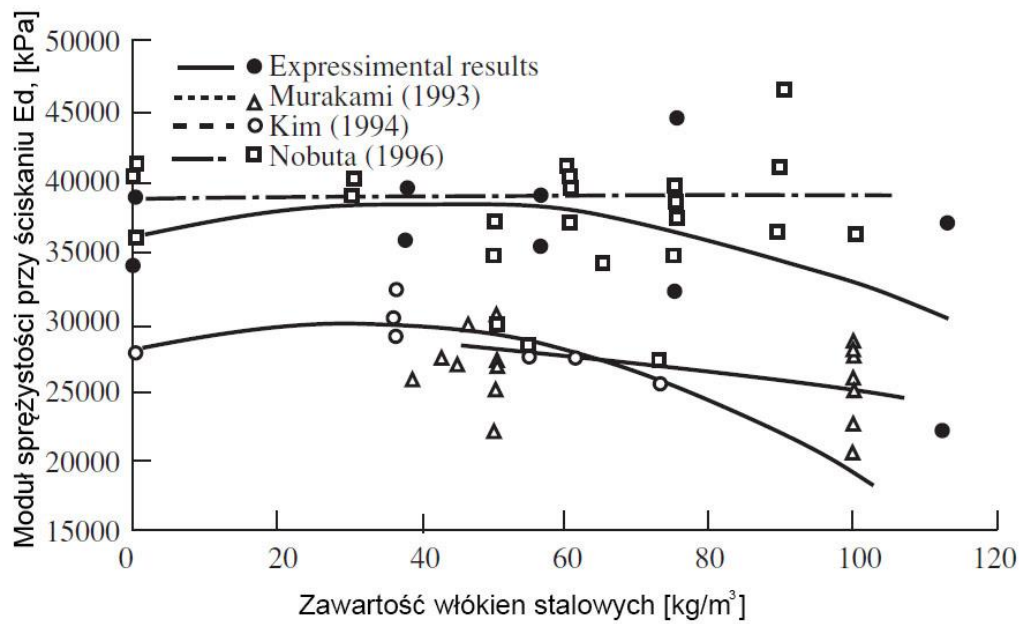
Tablica 3.2. Efektywność zmian właściwości kompozytów mineralnych w wyniku dodania włókien stalowych

| L.p. | Właściwość | Tendencje zmiany | Wartość zmiany [%] |
|---|---|------------------|--------------------|
| 1 | Wytrzymałość na ściskanie | spadek/wzrost | -7÷35 |
| 2 | Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu | wzrost | 17÷71 |
| 3 | Wytrzymałość na rozciąganie | wzrost | 15÷20 |
| 4 | Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu | wzrost | 3÷200 |
| 5 | Moduł sprężystości przy ściskaniu | spadek/wzrost | -10÷10 |
| 6 | Skurcz | spadek | -30÷-20 |
| LITERATURA: [10, 39, 50, 64, 85, 90, 185] | | | |

Autorzy nie są zgodni co do wpływu dodatku włókien stalowych na wzrost wytrzymałości na ściskanie oraz moduł sprężystości przy ściskaniu. W literaturze napotkać można zarówno publikacje wykazujące zwiększenie wytrzymałości na ściskanie oraz modułu sprężystości, jak i obniżenie wartości tych cech wraz ze wzrostem zawartości włókien (por. tabl. 3.2). Wyniki badań własnych wytrzymałości na ściskanie przedstawione w dysertacji wskazują na zwiększenie tej właściwości fibrokompozytu (por. s. 66). Na rys. 3.8 przedstawiono wykres obrazujący wpływ dodatku włókien stalowych na wytrzymałość na ściskanie [64], natomiast na rys. 3.9 wpływ włókien stalowych na zmienność modułu sprężystości przy ściskaniu [19].

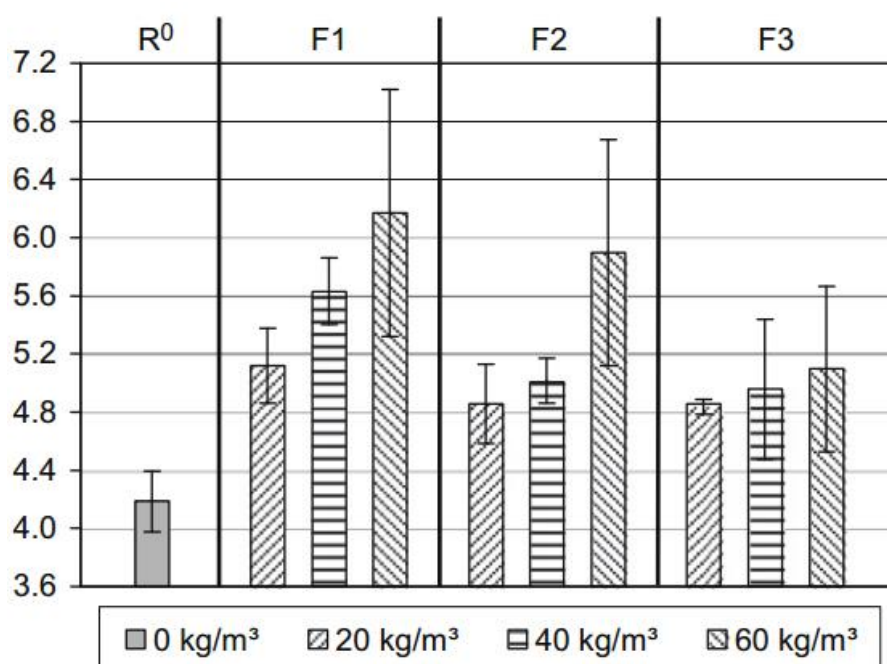


Rys. 3.8. Wpływ włókien stalowych na wytrzymałość na ściskanie fibrokompozytu [64]



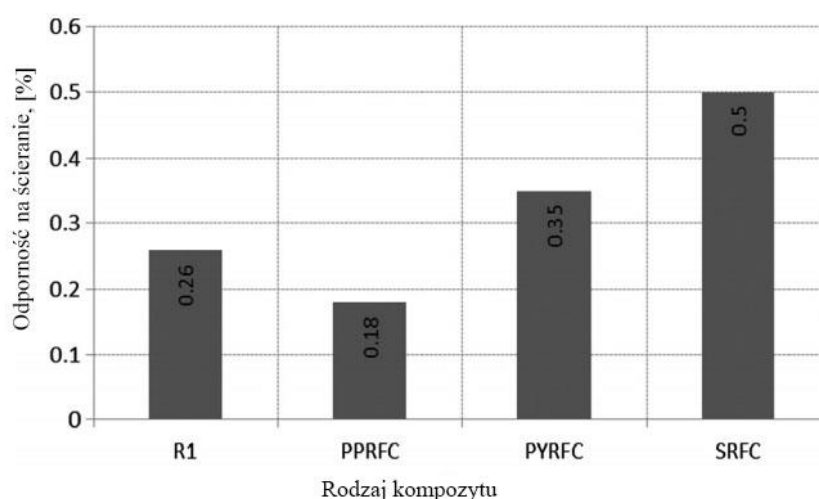
Rys. 3.9. Wpływ włókien stalowych na moduł sprężystości przy ściskaniu fibrokompozytu [19]

Na rys. 3.10 pokazano wpływ dodatku włókien stalowych na wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu fibrokompozytu. Widoczny jest wyraźny wpływ zawartości włókien na tę właściwość [64].



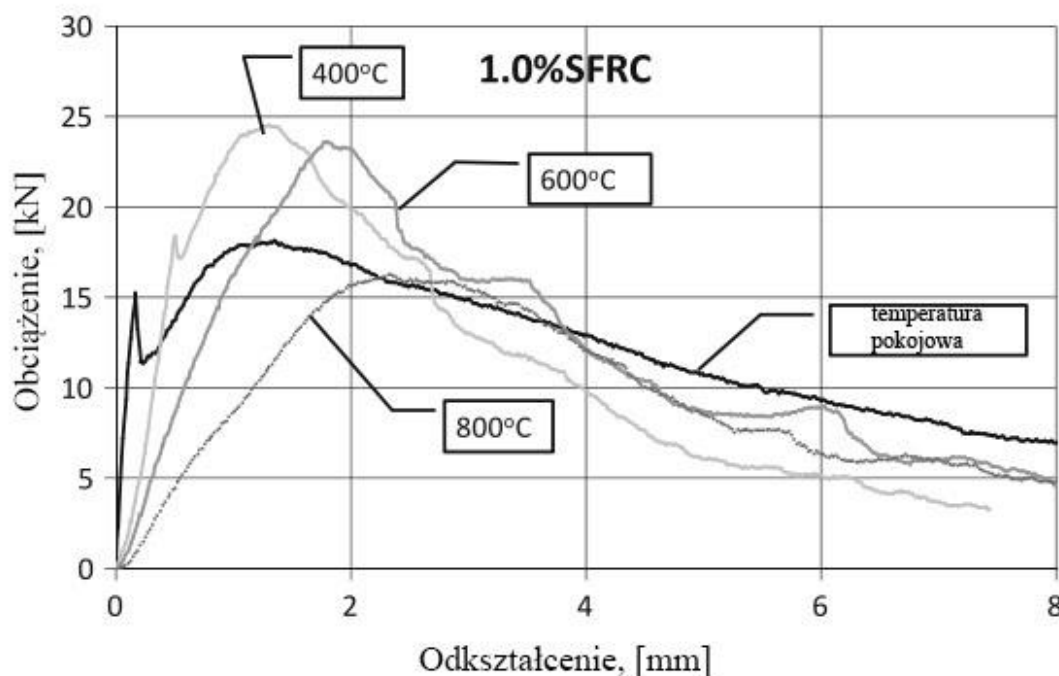
Rys. 3.10. Wpływ włókien stalowych na wytrzymałość fibrokompozytu na rozciąganie przy rozłupywaniu [64]

Rys. 3.11 przedstawia wpływ dodatku włókien na odporność na ścieranie. Kompozyt z dodatkiem włókien stalowych charakteryzuje się tu największą odpornością na ścieranie w stosunku do betonu zwykłego oraz kompozytów zawierających włókna syntetyczne [14].



Rys. 3.11. Wpływ włókien stalowych na odporność fibrokompozytu na ścieranie: R1 – beton zwykły, PPRFC – kompozyt z dodatkiem włókien polipropylenowych, PYRFC – kompozyt z dodatkiem włókien poliestrowych, SRFC – kompozyt z dodatkiem włókien stalowych [14]

Badania wpływu temperatury na fibrokompozyty dowiodły, że temperatura do 800 °C nie wpływa znacząco na nośność elementów konstrukcji wykonanych z tych materiałów. Rys. 3.12 przedstawia wpływ temperatury na nośność belki z zawartością 1% włókien stalowych.

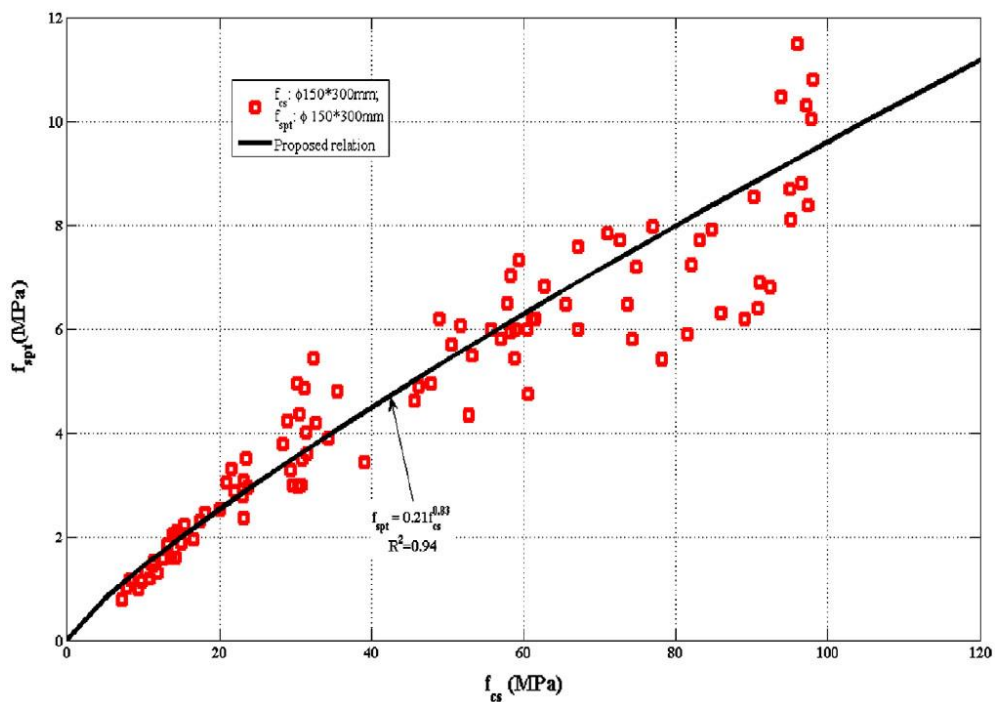


Rys. 3.12. Wpływ wysokich temperatur na nośność belki wykonanej z fibrokompozytu [158]

Badania fibrokompozytów w warunkach skręcania wykazały, że włókna wpływają na zwiększenie odporności na zarysowania w pierwszej fazie obciążenia [136]. Natomiast badania w warunkach ścinania dowiodły, że optymalna zawartość włókien pod względem odporności na siły ścinające wynosi 1,5% [90]. Badania pełzania elementów wykonanych z fibrokompozytu wskazują, że wraz ze wzrostem zawartości włókien obserwuje się zmniejszenie pełzania, jednak włókna o stosunku długości do średnicy poniżej 50 przejawiają niewielki wpływ na pełzanie elementów fibrokompozytowych [188].

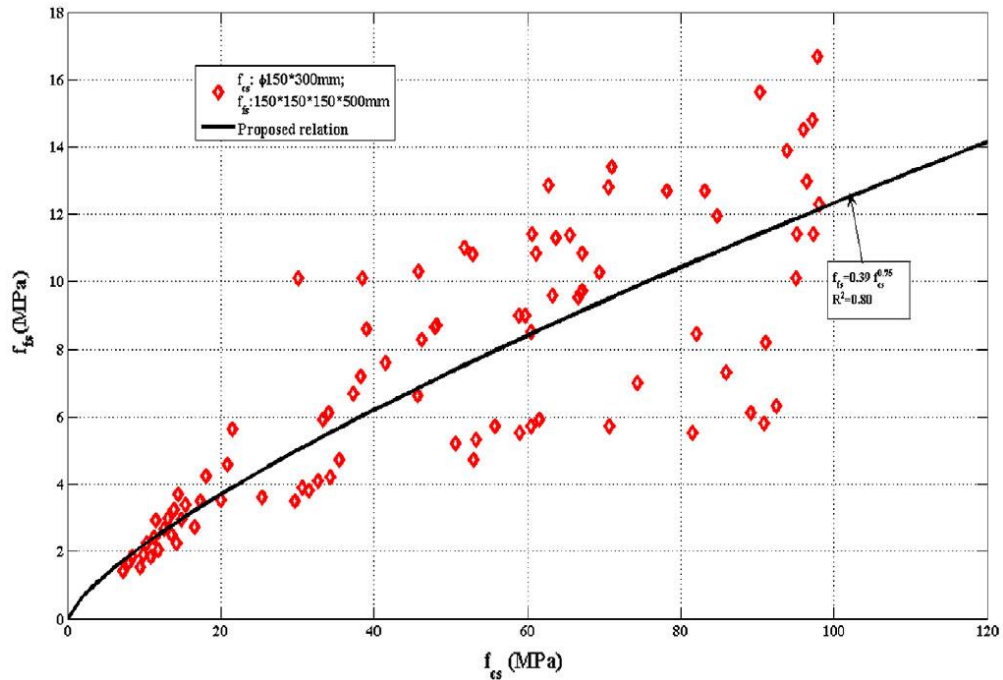
W literaturze można napotkać wiele przykładów modeli fibrokompozytów poddanych różnego rodzaju obciążeniom. W tym celu używano różne metody. Stosowano numeryczną symulację zachowania elementów fibrokompozytowych przy rozciąganiu osiowym oraz rozciąganiu przy zginaniu, która wykazała dobrą zgodność z wynikami uzyskanymi eksperymentalnie [24]. W warunkach rozciągania osiowego uzyskano także dobrą zgodność wyników eksperymentu z symulacją przy użyciu metody Monte Carlo [25]. Jako narzędzie opisu fibrokompozytów wykorzystywane są również sieci neuronowe. Z wykorzystaniem sieci neuronowych opracowano model w warunkach ścinania wsporników wykonanych z kompozytu zawierającego włókna stalowe [99]. Często stosowanym narzędziem, przy użyciu

którego można opisywać odkształcenia na podstawie związków konstytutywnych [170] oraz przewidzieć skutki przyłożenia obciążenia dynamicznego [22, 23, 105, 171, 183], jest metoda elementów skończonych. Badając fibrokompozyty w warunkach obciążeń dynamicznych poprzez obciążenie wybuchem [63] oraz uderzeniem pocisku o dużej prędkości [106] uzyskiwano dobrą zgodność modelu z rzeczywistym zachowaniem fibrokompozytu. Opisywano również zachowanie fibrokompozytu w warunkach obciążenia wieloosiowego [163] uzyskując dobrą zgodność powierzchni zniszczenia płyt z kształtem zniszczenia wyznaczonym teoretycznie. W celu poznania mechanizmu przenoszenia obciążenia przez włókna stalowe przedstawiono model bazujący na siłach występujących pomiędzy włóknem a matrycą [120]. Przeprowadzono także badania polegające na wyciąganiu włókien z matrycy kompozytu. Wyciąganie włókien prostych i o kształcie haczykowatym z matrycy kompozytu wykazało, że siła potrzebna do wysunięcia włókna o haczykowatym kształcie kilkukrotnie przewyższa siłę potrzebną do wyciągnięcia włókna prostego dla różnych kątów nachylenia włókna w stosunku do działającej siły. Symulacja wysuwania włókien stalowych z matrycy w warunkach wysokich temperatur wykazała, że energia potrzebna do wyciągnięcia włókna z matrycy wzrasta wraz z temperaturą [20]. W literaturze napotkać można także na opis związków pomiędzy poszczególnymi mechanicznymi właściwościami kompozytów z dodatkiem włókien stalowych, co jest pomocne do poznania ich wzajemnych zależności. Na rys. 3.13 przedstawiono zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu od wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu z włóknami stalowymi [182].

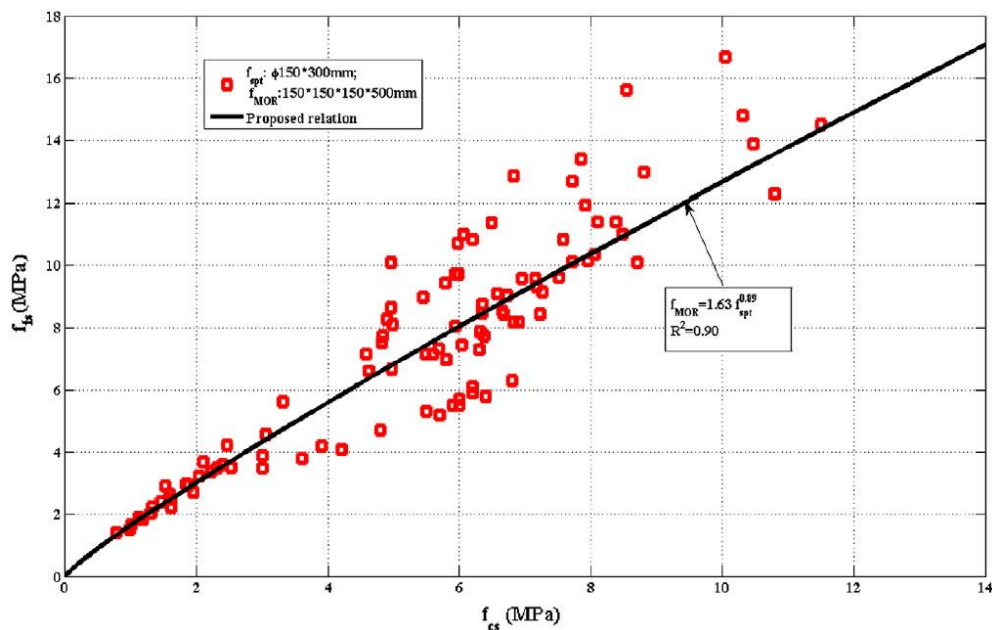


Rys. 3.13. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu od wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu z włóknami stalowymi [182]

Na rys. 3.14 i 3.15 przedstawiono natomiast zależności wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu od wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu fibrokompozytu z włóknami stalowymi [182].



Rys. 3.14. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu od wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu z włóknami stalowymi [182]



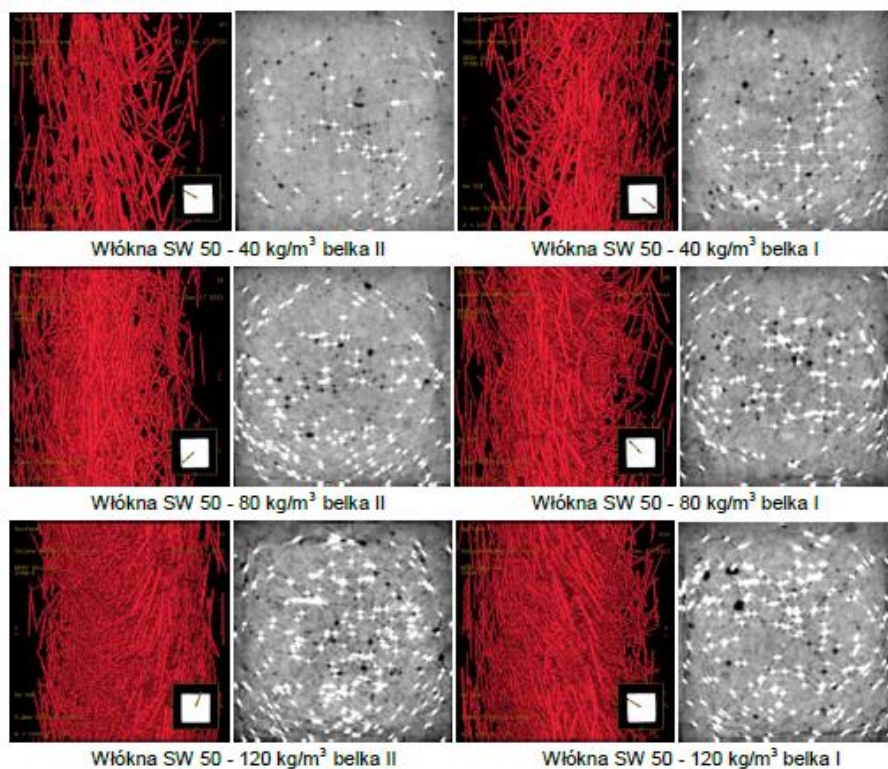
Rys. 3.15. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu od wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu fibrokompozytu z włóknami stalowymi [182]

3.3. Modele rozkładu włókien w przestrzeni kompozytu

W celu poznania rozkładu włókien w przestrzeni kompozytu podejmowano od dawna różnorodne próby zbadania i opisu tego zjawiska. Używano np. metody pomiaru oporności elektrycznej. Lataste wykazał przydatność tej nieniszczącej metody polegającej na sprawdzeniu zmian poziomu oporności elektrycznej wzdłuż osi elementu do określania jednorodności rozkładu włókien w kompozycie [70]. Metoda prześwietlania próbek fibrokompozytu promieniami rentgenowskimi posłużyła do określania, czy i w jakim zakresie w badanym fibrokompozycie występuje zjawisko segregacji włókien [41]. W celu poznania rozkładu włókien w badanym elemencie posługiwano się metodą ich zliczania w przekroju wzdłuż długości belki [77]. Próby matematycznego opisu rozkładu włókien w przestrzeni kompozytu podjęli liczni autorzy. Krenchel [96] rozpatrywał wzajemne odległości pomiędzy włóknami przecinającymi płaszczyznę przekroju oraz powiązał ich liczbę z orientacją włókna w przestrzeni kompozytu formułując współczynnik orientacji włókna. Soroushian i Lee [151] wyznaczyli liczbę włókien przecinających przekrój rozpatrywanego elementu fibrokompozytowego w zależności od zawartości włókien w kompozycie, powierzchni przekroju pojedynczego włókna oraz współczynnika orientacji włókna. Autorzy ci zauważyli ponadto, że pod wpływem wibrowania formowanych elementów zmienia się ułożenie włókien w przestrzeni kompozytu - włókna mają tendencję do osiadania. Ta segregacja była widoczna po przełamaniu próbki i zliczeniu włókien wystających z przełomu. Dupont i Vandewalle [36] określili liczbę włókien przecinających przekrój elementu próbki uwzględniając warunki brzegowe i dzieląc przekrój na trzy sekcje: a) ułożenie włókna nie jest ograniczone ścianami, b) ułożenie włókna ograniczone jest jedną ścianą, c) ułożenie włókna ograniczają dwie ściany. Li, Wang i Backer [107] sformułowali model opierający się na mechanice wyciągania włókien z płaszczyzny zniszczenia kompozytu uwzględniający losowość ich lokalizacji oraz orientację w przestrzeni kompozytu. Stroeven [155, 156] zaproponował model określając tzw. współczynnik efektywności włókien w kompozycie jako funkcję orientację włókna w stosunku do powstałej rysy. Kooiman [94] wykazał, że wymiary przekroju oraz długość włókien wpływają na współczynnik efektywności włókien. Lee i Kim [102] wyznaczyli współczynnik efektywności dla włókien o kształcie pierścieniowym. Współczynnik ten wyznaczono w funkcji geometrii włókna, wymiarów próbki oraz zawartości włókien w kompozycie. Stosowano również metody statystyczne określenia położenia i orientacji włókien w przestrzeni kompozytu. Laranjeira [101], opierając się na wprowadzonym przez Krenchela pojęciu współczynnika orientacji włókna [96], wykazał, że rozkład kątów ułożenia włókien w kompozycie może być opisany z dużą zgodnością rozkładem statystycznym Gaussa. Podejmowano także próby określenia wpływu rodzaju wibrowania mieszanki kompozytu na rozkład włókien. Gettu i współautorzy [48] wykazali, że wibrowanie ręczne wpływa powoduje

niejednorodność rozkładu włókien w kompozycie, natomiast wibrowanie na stoliku wibracyjnym powoduje, że włókna mają tendencję do ułożenia poziomego w formowanym elemencie. Określano także wpływ kierunku ułożenia włókien na właściwości mechaniczne kompozytu. Kang i współautorzy [79] zdefiniowali wpływ rozkładu włókien na wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu belek pryzmatycznych. Autor wykazał, że rozkład normalny nie powinien być stosowany do przewidywania tej wytrzymałości, ponieważ występują duże rozbieżności między obliczeniami analitycznymi i wynikami eksperymentu.

Również w Polsce zagadnienie rozkładu włókien w przestrzeni kompozytu było przedmiotem badań i analiz. Przykładem modelu zbudowanego na podstawach statystycznych jest model sformułowany przez Kamińskiego i współautorów [78]. Model ten opracowany został z wykorzystaniem rozkładu statystycznego beta przy założeniu, że w pobliżu ścian formy następuje koncentracja włókien. Analizę struktury betonu zawierającego włókna stalowe wykonanej przy pomocy tomografii komputerowej przeprowadzali autorzy Ponikiewski i Gołaszewski [130, 131]. Badacze przedstawili wpływ wybranej metody formowania fibrokompozytów samozagęszczalnych na rozmieszczenie włókien stalowych w elementach belkowych. Wykonane badania potwierdziły problemy z nierównomiernym i kierunkowym rozmieszczaniem się zbrojenia rozproszonego w betonie samozagęszczalnym (BSZ) w trakcie zabiegów technologicznych przy zastosowaniu stalowych włókien o długości 50 mm i średnicy 1 mm (SW 50) (rys. 3.16).



Rys. 3.16. Widok 2D i 3D włókien stalowych w badanych BSZ z dodatkiem zmiennej zawartości włókien SW 50 (obrazy 3D: strona lewa - dół belki, strona prawa - góra belki) [131]

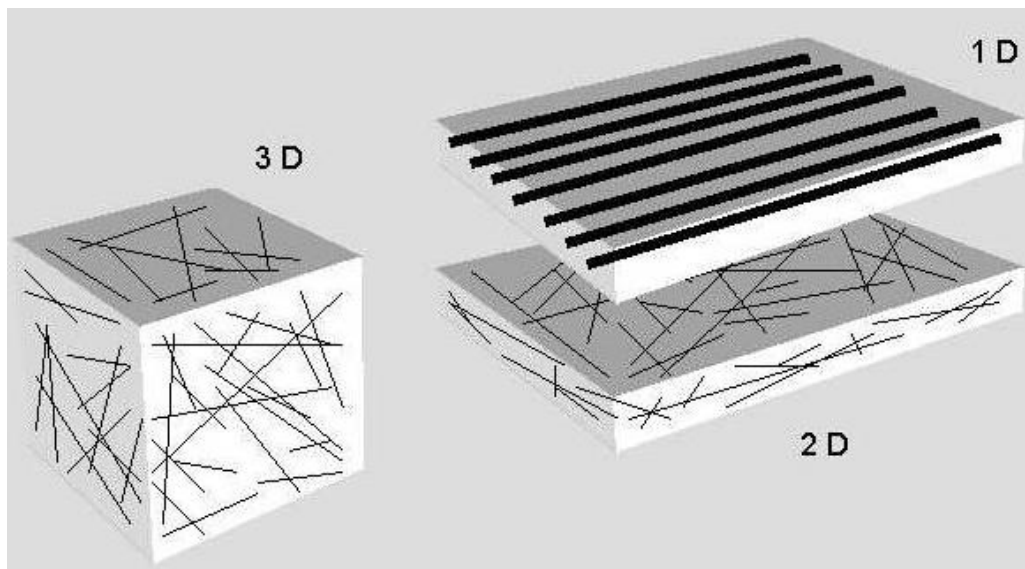
Kasperkiewicz [84] opracował model rozkładu włókien definiując wzory na powierzchnię przekroju poprzecznego elementu fibrokompozytowego przypadającego na jedno włókno [49, 84], a mianowicie:

$$\alpha^{1D} = \frac{\pi d^2}{4V_f}, \quad \alpha^{2D} = \frac{\pi^2 d^2}{8V_f}, \quad \alpha^{3D} = \frac{\pi d^2}{2V_f} \quad (3.1)$$

gdzie: α^{1D} , α^{2D} , α^{3D} oznaczają "idealne struktury zbrojenia", kiedy zbrojenie rozproszone ułożone w sposób zlinearyzowany (1D), przypadkowo w płaszczyźnie (2D) lub przypadkowo w przestrzeni kompozytu (rys. 3.17). Pierwiastek kwadratowy z α^{iD} jest bokiem kwadratowego pola przypadającego na jedno włókno w przekroju (jest to tzw. "rozstaw włókien na płaszczyźnie") [84].

Wyznaczono także tzw. współczynniki efektywności kierunkowej włókien η^{iD} ($i=1,2,3$) określone następującymi zależnościami [49, 84]:

$$\eta^{1D} = 1, \quad \eta^{2D} = \frac{2}{\pi}, \quad \eta^{3D} = \frac{1}{2} \quad (3.2)$$



Rys. 3.17. Schematy wyidealizowanych rozkładów włókien [49]

Po uwzględnieniu przenoszenia obciążeń przez włókno oraz na podstawie parametrów α^{iD} oraz η^{iD} uzyskano współczynnik χ^{iD} , który opisuje "teoretyczną efektywność mechaniczną" zbrojenia rozproszonego dla różnych rozkładów włókien:

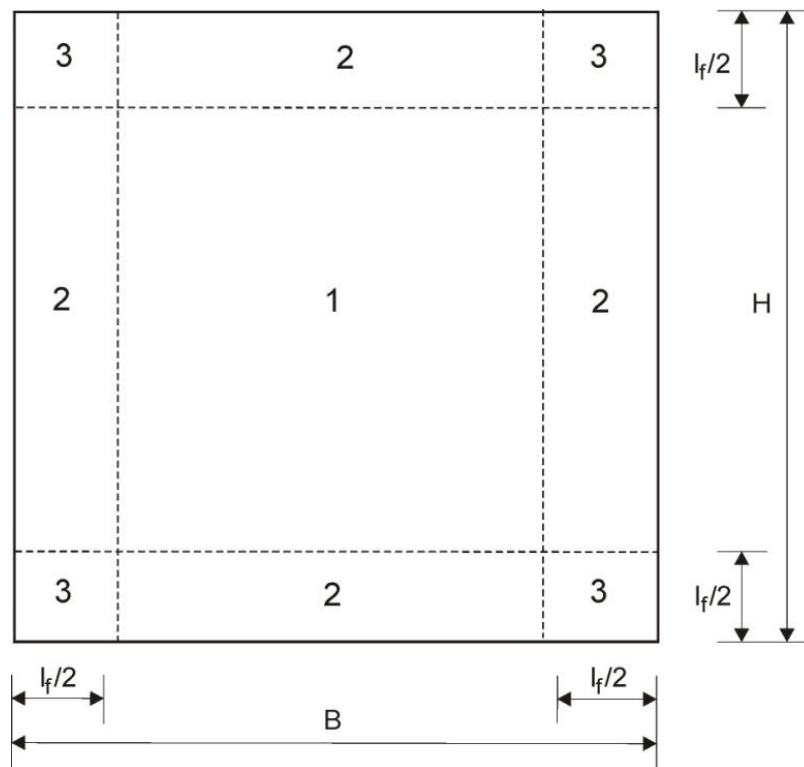
$$\chi^{iD} = \begin{cases} \frac{4}{\pi} V_f \frac{1}{D} & i = 1 \\ \frac{16}{\pi^3} V_f \frac{1}{D} & i = 2 \\ \frac{1}{\pi} V_f \frac{1}{D} & i = 3 \end{cases} \quad (3.3)$$

Efektywność mechaniczna zbrojenia rozproszonego zgodnie przytoczonym modelem rośnie wprost proporcjonalnie do iloczynu $\tau_f V_f l/2$, gdzie τ_f jest oznaczeniem przyczepności włókien do matrycy, co wynika z mechanicznego zakotwienia, adhezji i tarcia [49, 84].

Zagadnieniem rzadko poruszonym w literaturze jest zjawisko sedymentacji włókien. W trakcie wytwarzania kompozytu, w końcowym etapie jego produkcji, podczas mieszania składników dodawane są do matrycy włókna. Włókna rozkładają się w sposób losowy, pod różnymi kątami i w przybliżeniu równomiernie w całej przestrzeni kompozytu. W trakcie wibrowania następuje jednak sedymentacja włókien, które pod wpływem sił grawitacji w większym lub mniejszym stopniu uzależnionym od konsystencji matrycy oraz czasu wibrowania, osiadają w kierunku dna formy. Wynikiem osiadania jest większa zawartość włókien w obszarach dna formy, niż na jej górze. Osiadanie włókien występujące na etapie jego wytwarzania ma wpływ na przenoszenie naprężeń stwardniałego już kompozytu w trakcie jego eksploatacji. Pomimo istnienia różnorodnych opisów rozkładu włókien w przestrzeni kompozytu, przytaczanych przez wielu autorów, w literaturze nie napotyka się próby opisanie rozkładu włókien uwzględniającego ich osiadanie w zależności od konsystencji i czasu wibrowania. Dlatego w dysertacji podjęto próbę opisu rozkładu włókien z uwzględnieniem tych czynników, co również znalazło swój wyraz w publikacjach krajowych [52, 53] i zagranicznych [55, 57].

Przy realizacji niniejszej pracy wykorzystano do celów porównawczych opis rozkładu włókien charakteryzujący ułożenie włókien w przestrzeni kompozytu w ujęciu geometrycznym [35, 36]. Tzw. opis *geometryczny* omówiono szerzej, ponieważ umożliwia on określenie, podobnie jak w przedstawionym w dysertacji opisie, liczby włókien przecinających przekrój elementu. Opis *geometryczny* odwzorowuje rozkład włókien z równoczesnym uwzględnieniem ograniczeń brzegowych odpowiadającym ścianom formowanego elementu. W opisie *geometrycznym*, liczbę włókien przecinających daną powierzchnię przekroju przestrzeni kompozytu definiuje się przez *współczynnik rozkładu włókien* (α_f) [35]. Współczynnik ten określa średni stosunek rzutu długości włókien na oś poziomą do ich długości. *Geometryczny* opis rozkładu włókien umożliwia określenie liczby włókien przecinających przekrój elementu.

W celu obliczenia współczynnika α_f , analizowany przekrój zostaje podzielony na sekcje poddane różnym ograniczeniom (rys. 3.18). W sekcji pierwszej współczynnik α_f obliczany jest przy założeniu, że włókno może obracać się dowolnie we wszystkich kierunkach. W sekcji drugiej obrót włókna ograniczony jest jednym brzegiem, który odpowiada ścianie formowanego elementu. W sekcji trzeciej obrót włókna ograniczony jest dwoma brzegami, które odpowiadają prostopadłym do siebie ściankom elementu.

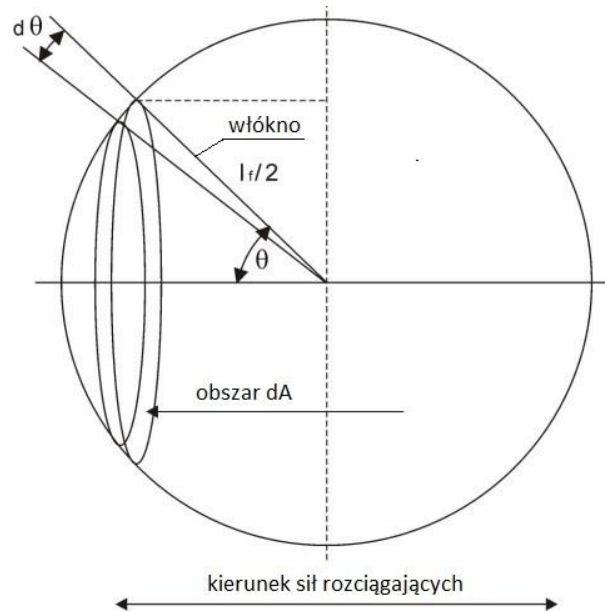


Rys. 3.18. Widok przekroju przestrzeni kompozytu z podziałem na sekcje [35]: l_f - długość włókna, H - wysokość elementu, B - szerokość elementu.

W sekcji pierwszej włókno nie jest ograniczone brzegami formy i może znajdować się pod dowolnym kątem względem osi poziomej. Jeśli takie włókno przyjęłoby wszystkie możliwe położenia obracając się wokół środka ciężkości, jego końce zatoczyłyby powierzchnię sfery. Zakłada się, że włókno, którego środek ciężkości jest nieruchomy może dokonać obrotu pod stałym kątem θ względem osi poziomej (rys. 3.19). Wtedy końce włókna zakreślą okrąg o środku wyznaczonym przez tę oś. Powierzchnia dA (rys. 3.19) będzie zatem obszarem zakreślonym przez końce włókna [35].

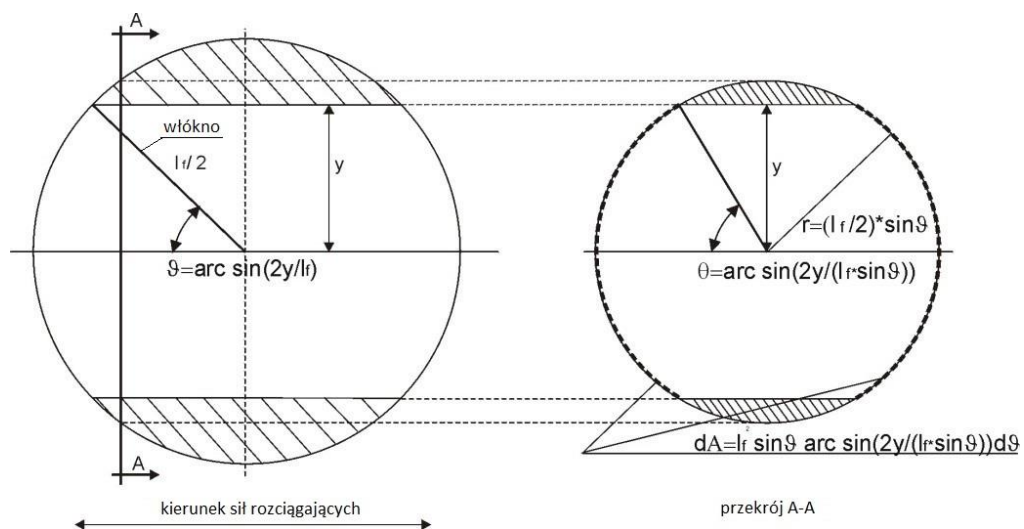
Przykładowo, współczynnik rozkładu włókien dla sekcji pierwszej [35] opisuje zależność:

$$\alpha_1 = \frac{\int_0^{\pi/2} \cos\theta dA}{2\pi(\frac{l_f}{2})^2} = \frac{\int_0^{\pi/2} \frac{\pi \cdot l_f^2}{2} \sin\theta \cdot \cos\theta d\theta}{2\pi(\frac{l_f}{2})^2} = \frac{\frac{\pi \cdot l_f^2}{2} \cdot \frac{\sin^2 \frac{\pi}{2}}{2}}{2\pi(\frac{l_f}{2})^2} = 0.5. \quad (3.4)$$



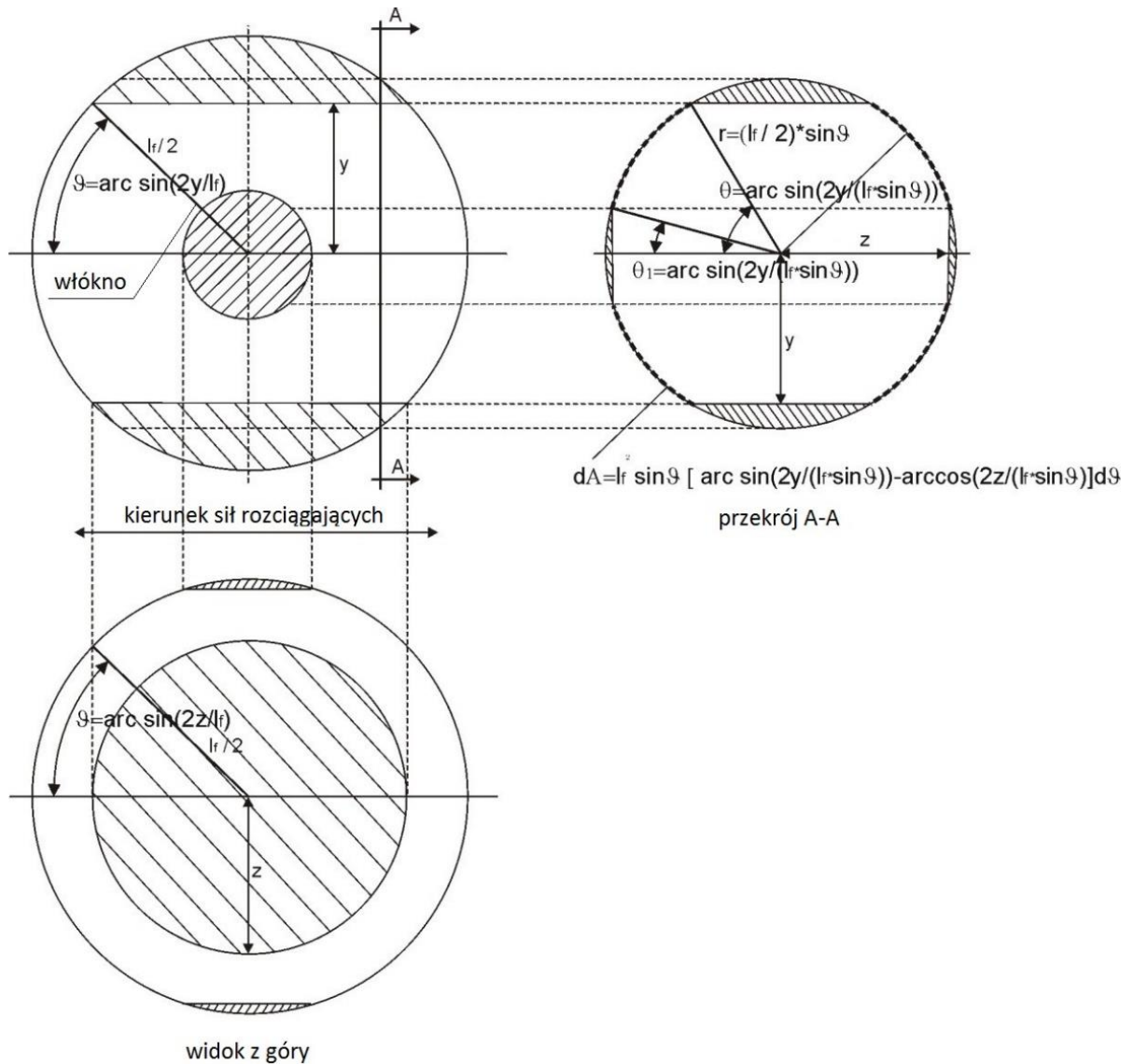
Rys. 3.19. Włókno znajdujące się pod kątem θ do osi poziomej elementu [35]

W pozostałych sekcjach współczynnik rozkładu włókien obliczony jest przy wprowadzeniu założeń dotyczących ograniczeń, na które napotyka włókno w przestrzeni kompozytu. W sekcji drugiej (rys. 3.20) zakłada się, że środek ciężkości włókna znajduje się w odległości y od ścianki formy, przy czym $y < l_f/2$. Zatem włókno nie mogąc obracać się dowolnie względem środka ciężkości może zataczać swoimi końcami fragment sfery przycięty powierzchnią formy.



Rys. 3.20. Włókno znajdujące się w pobliżu jednej powierzchni formy [35]

W sekcji trzeciej zakłada się, że ułożenie włókna ograniczone jest dwoma prostokątami do siebie ścianami formy (rys. 3.21). Punkt ciężkości włókna znajduje się w odległości y mniejszej niż długość włókna od jednej powierzchni formy i odległości z od drugiej, prostopadłej do niej powierzchni.



Rys. 3.21. Włókno znajdujące się w pobliżu dwóch ścian formy [35, 36]

Szczegółowy sposób wyznaczenia współczynników rozkładu włókien dla poszczególnych sekcji omówiono w pracach [35, 36].

Po wyznaczeniu współczynników rozkładu włókien dla poszczególnych sekcji można określić ogólną postać współczynnika rozkładu włókien α_f dla wszystkich sekcji analizowanego przekroju przy użyciu wzoru:

$$\alpha_f = \frac{[\alpha_1 \cdot (B - l_f)(H - l_f) + \alpha_2 \cdot l_f \cdot [(B - l_f) + (H - l_f)] + \alpha_3 \cdot l_f^2]}{BH}, \quad (3.5)$$

w którym: B - szerokość przekroju [mm], H - wysokość przekroju [mm], l_f - długość włókna [mm], α_1 - współczynnik rozkładu włókien w sekcji pierwszej [-], α_2 - współczynnik rozkładu włókien w sekcji drugiej [-], α_3 - współczynnik rozkładu włókien w sekcji trzeciej [-].

Liczbę włókien przecinających analizowany przekrój opisuje zależność [35, 36]:

$$N_f = \alpha_f \frac{V_f}{A_f} A_c \quad (3.6)$$

gdzie: N_f - ilość włókien w analizowanym przekroju [szt.], α_f - ogólny współczynnik rozkładu włókien w przekroju [-], V_f - objętościowa zawartość włókien w przestrzeni kompozytu [%], A_f - pole przekroju pojedynczego włókna [mm²], A_c - pole przekroju próbki [mm²].

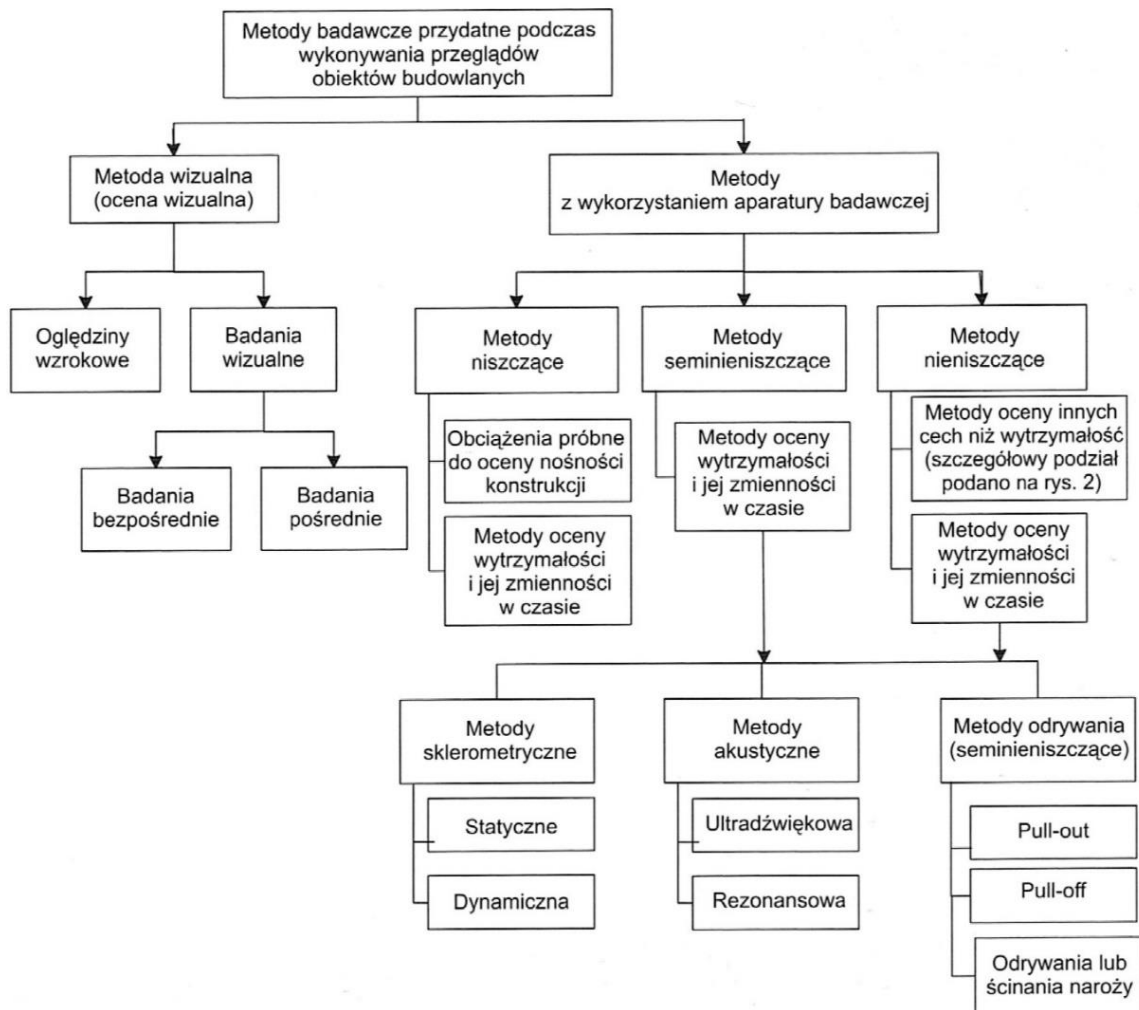
Geometryczny opis rozkładu włókien omówiono szeroko w pracy, ponieważ w dalszych rozważaniach wykorzystano go w celu porównania liczby włókien przecinających analizowany przekrój z liczbą włókien wyznaczoną na podstawie zaproponowanego w dysertacji opisu opartego na rozkładzie statystycznym.

Zaproponowany w niniejszej pracy opis rozkładu włókien stalowych (por. rozdz. 7.2) uwzględnia zjawisko osiadania włókien poprzez doświadczalno-analityczne dobranie parametrów rozkładu statystycznego *Kumaraswamy*. Opis ten nazwano *statystycznym*. Zakłada on na kierunkach poziomych kartezjańskiego układu współrzędnych statystycznie równomierny rozkład włókien. Natomiast na kierunku pionowym zakłada rozkład włókien zgodny z rozkładem statystycznym *Kumaraswamy*, którego parametry dobrane zostały na podstawie badań doświadczalnych kompozytu o różnej konsystencji i różnym czasie wibrowania podczas formowania elementów próbnych.

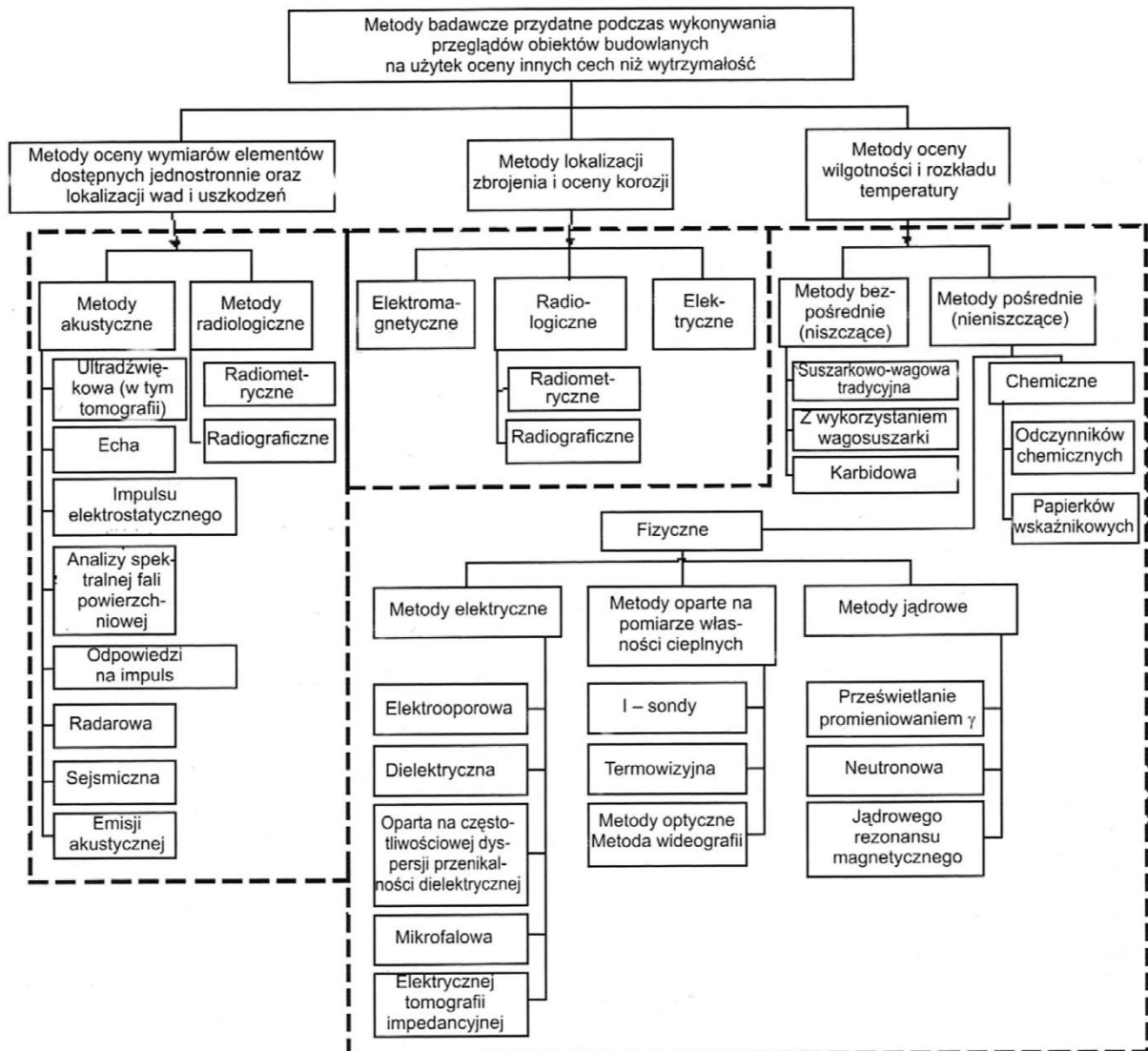
3.4. Metody nieniszczące stosowane do oceny właściwości betonu

Betonowe konstrukcje budowlane, jak i ich elementy, na każdym etapie realizacji i eksploatacji podlegają różnorodnym badaniom mającym na celu zapewnienie bezpieczeństwa. W celu realizacji powyższych zadań opracowano cały szereg metod badawczych, wśród których literatura wyróżnia trzy podstawowe: niszczące, seminiszczące i nieniszczące [34, 44, 65÷68, 103, 109, 129, 142]. Badania niszczące przeprowadzane są na próbkach pobranych z obiektu oraz całych elementach, które po badaniach są tracone. Badaniom seminiszczącym poddawane są zwykle elementy w skali naturalnej, gdzie dopuszczalna jest ingerencja w przypowierzchniową strukturę z zachowaniem użyteczności badanego elementu [44].

W badaniach nieniszczących nie dochodzi tego rodzaju ingerencji, elementy pozostają nienaruszone. Badania te można wykonywać na obiektach w skali naturalnej wielokrotnie oraz w różnym czasie [65]. Metody i techniki badań nieniszczących służą więc do diagnostyki elementów konstrukcji, bez powodowania zmian ich właściwości użytkowych [104]. Na rysunkach 3.22 i 3.23 przedstawiono ogólne schematy metod badawczych stosowanych przy wykonywaniu przeglądów obiektów budowlanych i przy ocenie wbudowanych w nie materiałów.



Rys. 3.22. Ogólny podział metod badawczych stosowanych podczas wykonywania przeglądów obiektów budowlanych i oceny stanu technicznego[65]



Rys. 3.23. Schemat podziału metod badawczych przydatnych podczas wykonywania przeglądów obiektów budowlanych do oceny innych cech niż wytrzymałość [65]

Cele badawcze metod nieniszczących można podzielić na: bezpośrednie, odległe oraz przyszłościowe [124]. Do celów bezpośrednich zaliczana jest ocena stanu makrostruktury i mikrostruktury materiału, tzn. analiza stanu materiału (dokonywana przez: wykrycie, rozpoznanie, opis nieciągłości makrostruktury i opis anomalii mikrostruktury), pomiar wielkości geometrycznych (grubości ścianek, warstw i powłok, przyczepności powłok, odległości, poprawności kształtu), pomiar użytkowych właściwości materiałów (np. twardości, wytrzymałości). Do celów odległych (przyszłościowych) należy prognozowanie dokonywane przez ocenę: ryzyka pęknięcia, trwałości elementu poddanego działaniu obciążeń zmiennych, technologicznej i eksploatacyjnej przydatności materiału [124].

Klasyfikacja i podział nieniszczących metod badawczych dokonywana jest w oparciu o przyjęte kryteria. Runkiewicz [139] proponuje podziały wg kryterium podstaw (wielkości) fizycznych (tablica 3.2).

Tablica 3.2. Klasyfikacja metod nieniszczących w zależności od stosowanych podstaw fizycznych [139]

| Lp. | Grupa metod badań nieniszczących | Nazwa metody badań nieniszczących | Mierzona wielkość fizyczna |
|-----|----------------------------------|--|---|
| 1 | Metody sklerometryczne | Metoda pomiaru odcisku | Twardość powierzchniowa (statyczna) |
| | | Metoda pomiaru odskoku | Twardość powierzchniowa (dynamiczna) |
| 2 | Metody akustyczne | Metoda ultradźwiękowa | Prędkość fal ultradźwiękowych |
| | | Metoda rezonansowa | Częstotliwość drgań |
| 3 | Metody radiologiczne | Metoda radiograficzna Metoda radiometryczna | Oslabienie promieniowania jonizującego (absorpcja) |
| 4 | Metody elektromagnetyczne | Metoda magnetyczna (elektromagnetyczna) | Strumień magnetyczny |
| | | Metoda dielektryczna | Właściwości dielektryczne |
| 5 | Inne metody specjalne | Metody elektryczne Inne metody badań | Właściwości akustyczne, ciepłne, radioaktywność, korozja itp. |

Podział w zależności od celu i właściwości materiałów, które mogą być określane metodami nieniszczącymi [139] przedstawiono w tablicy 3.3.

Tablica 3.3. Klasyfikacja metod nieniszczących w zależności od celu i właściwości materiałów [139]

| Lp. | Cel stosowania metody (właściwości materiału) | Nazwa metody |
|-----|---|---|
| 1 | Wytrzymałość, jednorodność | Metoda sklerometryczna |
| | | Metoda ultradźwiękowa |
| 2 | Ciężar objętościowy i jednorodność | Metoda radiologiczna |
| | | Metoda ultradźwiękowa |
| 3 | Wilgotność | Metoda radiologiczna |
| | | Metoda dielektryczna |
| 4 | Rozkład zbrojenia | Metoda magnetyczna (elektromagnetyczna) |
| | | Metoda radiologiczna |

Techniki badań nieniszczących wykorzystują określone zakresy widma częstotliwości sygnałów i fal. Przykładowe zestawienie tych wartości podano w tablicy 3.4 [104].

Tablica 3.4. Badania nieniszczące a widmo energetyczne [104]

| Lp. | Metoda badań nieniszczących | Zakres widma częstotliwości | Zakres częstotliwości wg podziału pasma widma Hz |
|-----|--|---|---|
| 1 | Metoda magnetyczna | Poddźwiękowy i zakres akustyczny | pola stałe i pola zmienne najczęściej 50 Hz i 6 kHz |
| 2 | Emisja akustyczna | Zakres akustyczny | 20÷20 kHz |
| 3 | Metoda ultradźwiękowa | Ultradźwięki | powyżej 20 kHz defektoskopia i badanie właściwości materiałów: 20÷100 MHz |
| 4 | Metoda prądów wirowych | Zakres akustyczny i częstotliwości radiowe | $3 \cdot 10^0 \div 120 \cdot 10^6$ |
| 5 | | Wysokie częstotliwości | $54 \cdot 10^6 \div 4,7 \cdot 10^8$ |
| 6 | | Bardzo wysokie częstotliwości | $4,7 \cdot 10^8 \div 1,3 \cdot 10^{10}$ |
| 7 | | Mikrofale | $10^{10} \div 10^{12}$ |
| 8 | Termografia w podczerwieni | Promieniowanie podczerwone | $10^{12} \div 4 \cdot 10^{14}$ |
| 9 | Badania wizualne i metoda penetracyjna | Światło widzialne | $4 \cdot 10^{14} \div 8 \cdot 10^{14}$ |
| 10 | Metoda penetracyjna i metoda magnetyczna | Promieniowanie ultrafioletowe | $8 \cdot 10^{14} \div 5 \cdot 10^{16}$ |
| 11 | | Miękkie promieniowanie X | $5 \cdot 10^{16} \div 3 \cdot 10^{18}$ |
| 12 | Metoda radiologiczna | Przemysłowe zastosowania promieniowania X i promieniowania γ | $10^{17} \div 3 \cdot 10^{21}$ |

Zakres zastosowania głównych metod badań nieniszczących przedstawiono w tablicy 3.5 [104].

Tablica 3.5. Zakres zastosowań głównych metod badań nieniszczących [104]

| Metoda badań | Zasada wykrywania nieciągłości | Zastosowania | Ograniczenia | Zalety | Materiały badane | Rodzaje wykrywanych nieciągłości |
|------------------------|--|---|--|--|--|---|
| Badania wizualne | Obserwacja okiem nieuzbrojonym, za pomocą lup oraz urządzeń do zdalnej obserwacji, endoskopów: boroskopów i fiberoskopów | Wykrywanie nieciągłości na dostępnych i niedostępnych powierzchniach | Wykrywanie jedynie nieciągłości powierzchniowych. Brak możliwości wykrywania nieciągłości zaciśniętych | Prostota i niski koszt prowadzenia badań wizualnych. Możliwość obserwacji powierzchni trudno dostępnych; przy małych średnicach sond endoskopowych | Wszelkie materiały | Wszelkie nieciągłości powierzchniowe, np. pęknięcia i wżery korozyjne, wykrywanie przedmiotów podczas przemytu |
| Metoda penetracyjna | Wnikanie cieczy-penetrantów barwnych i fluorescencyjnych - do nieciągłości. Stosowanie wywoływaczy i ewentualnie emulgatorów | Wykrywanie nieciągłości powierzchniowych | Wykrywanie tylko nieciągłości powierzchniowych otwartych. Powierzchnia obiektów nie może być zbyt chropowata | Prostota i niski koszt prowadzenia badań. Możliwość kontroli, w jednej operacji, obiektów o skomplikowanym kształcie | Wszystkie metale i ich stopy, niemetale | Pęknięcia produkcyjne i pęknięcia eksploatacyjne |
| Metoda prądów wirowych | Indukowanie prądów wirowych pod wpływem zmiennego pola elektromagnetycznego. Pomiar składowych impedancji lub napięcia zespolonego | Zautomatyzowane badania półproduktów i produktów gotowych - podczas procesów wytwarzania, diagnostyka ręczna i zautomatyzowana w procesach eksploatacji | Brak możliwości zastosowania do materiałów nieprzewodzących prądu elektrycznego | Możliwość prowadzenia badań obiektów z dużą prędkością; online i offline | Tylko materiały przewodzące prąd elektryczny: metale i ich stopy oraz niektóre kompozyty | Wykrywanie nieciągłości powierzchniowych: pęknięć i nieciągłości podpowierzchniowych (do głębokości kilku milimetrów). Pomiary wymiarów, przewodności elektrycznej itd. |
| Metoda magnetyczna | Magnesowanie obiektów stałym, przemiennym lub impulsowym polem magnetycznym. Wykrywanie strumienia rozproszenia magnetycznego: proszki magnetyczne i przetworniki indukcyjnościowe | Wykrywanie nieciągłości powierzchniowych i podpowierzchniowych w obiektach z materiałów ferromagnetycznych | Brak możliwości zastosowania do badania metali nieferromagnetycznych i niemetali | Prostota prowadzenia badań metodą magnetyczno-proszkową. Możliwość prowadzenia badań obiektów o czarnej powierzchni | Stale ferromagnetyczne, nikiel, kobalt | Wykrywanie nieciągłości powierzchniowych: pęknięć i nieciągłości podpowierzchniowych, np. pęcherzy, pustek, wtrąceń niemetalicznych (do głębokości kilku milimetrów) |

c.d. tablicy 3.5.

| Metoda badań | Zasada wykrywania nieciągłości | Zastosowania | Ograniczenia | Zalety | Materiały badane | Rodzaje wykrywanych nieciągłości |
|-----------------------|--|---|--|--|---|--|
| Metoda ultradźwiękowa | Wprowadzanie fal ultradźwiękowych. Fale są odbijane przez nieciągłości, uginane i rozpraszane na krawędziach nieciągłości | Wykrywanie, w zależności od rodzaju fal, nieciągłości wewnętrznych i powierzchniowych, pomiary grubości, wykrywanie braku przyczepności w połączeniach klejonych, np. braku przyczepności stopów łożyskowych do panewek łożysk, połączenia nitowane, badanie właściwości materiałów, np. pomiar naprężeń własnych | Możliwość wykrywania nieciągłości korzystnie zorientowanych względem wiązki fal. Czułość badań ograniczona przy chropowatej powierzchni obiektów | Możliwość wykrywania nieciągłości o średnicy porównywalnej lub większej od długości fali. Możliwość pomiaru grubości obiektów, przy dostępie jednostronnym | Wszystkie metale i ich stopy, niemetale (tworzywa sztuczne, ceramika, szkło, guma, beton) | Wykrywanie nieciągłości płaskich oraz przestrzennych. Pęknięcia wewnętrzne i powierzchniowe, wtrącenia i pozostałości jamy usadowej, rozwarstwienia w obiektach walcowanych i ciągnionych, pęknięcia odkuwek, nieciągłości odlewów, niezgodności złączy spawanych: pęknięcia, przyklejenia, braki przetopu, wtrącenia, pęcherze itd. |
| Metoda radiologiczna | Wprowadzanie promieniowania X i γ . Otrzymywanie obrazu w postaci „cienia”; w kierunku rozchodzenia się promieniowania. Rejestracja na błonach radiograficznych i rejestracja komputerowa – w systemach radiografii czasu rzeczywistego | Wykrywanie nieciągłości wprowadzanych w procesach wytwarzania i podczas eksploatacji obiektów. Badania i diagnostyka złączy spawanych oraz odlewów | Możliwość wykrywania nieciągłości wewnętrznych i powierzchniowych korzystnie zorientowanych względem kierunku rozchodzenia się promieniowania. Czułość wykrywania nieciągłości ograniczona do nieciągłości o wielkości zwykle ok. (0,5-2)% grubości obiektów. Ograniczona grubość obiektów. Niebezpieczeństwo narażenia personelu i środowiska na napromieniowanie | Wizualna ocena zobrażeń nieciągłości. Zobrazowania nieciągłości w widoku zgodnym z kierunkiem promieniowania - na radiogramach | Wszystkie metale i ich stopy, niemetale, żywność, wykrywanie obcych obiektów w zapakowanych obiektach, np. prześwietlanie bagażu na lotniskach. Promieniowanie X i γ tym jest silniej tłumione, im większa jest gęstość materiału obiektów | Wykrywanie nieciągłości przestrzennych, pęcherzy, pozostałości jamy skurczowej, oraz nieciągłości płaskich, pęknięć skurczowych, wtrąceń, braków przetopu - w złączach spawanych, wykrywanie nieciągłości odlewów, pęcherzy, pęknięć skurczowych. Wykrywanie i ocena zmian grubości obiektów i grubości powłok |

Spośród wymienionych metod nieniszczących do realizacji badań własnych wytypowano metodę ultradźwiękową i metodę indukcji elektromagnetycznej. W związku z tym metody te szerzej omówiono.

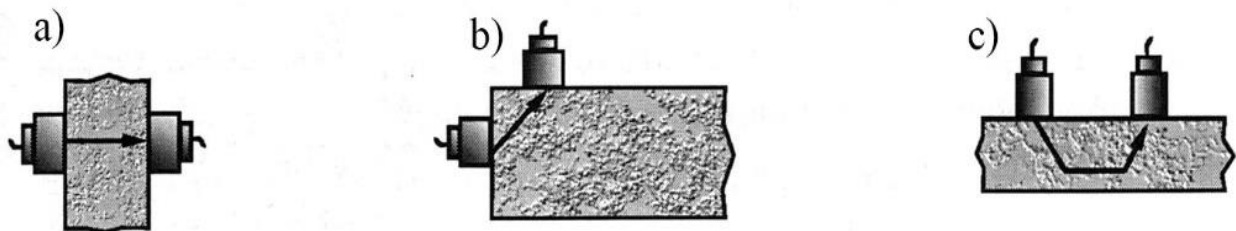
Metoda ultradźwiękowa należy do grupy metod akustycznych znajdując znaczące zastosowanie praktyczne w budownictwie [17, 45, 46, 140]. Jest stosowana głównie do oceny wytrzymałości i jednorodności betonu. Zasada działania oparta jest na związku pomiędzy prędkością fali ultradźwiękowej w betonie i jego właściwościami sprężystymi. W ośrodkach stałych prędkość ultradźwięków jest powiązana ze stałymi sprężystymi [139]:

$$\text{dla fali podłużnej: } V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\sigma(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3.7)$$

$$\text{dla fali poprzecznej: } V_L = \sqrt{\frac{E}{2\sigma(1+\nu)}} \quad (3.8)$$

gdzie: E – współczynnik sprężystości, ν – współczynnik Poissona.

Do badań betonu stosowany jest betonoskop, który wytwarza impulsy powtarzające się okresowo i emitujące fale podłużne w przedziale częstotliwości 40÷500 Hz. Im większa częstotliwość, tym silniejsze jest tłumienie drgań [154]. Test polega na wprowadzeniu do analizowanego ośrodka fali ultradźwiękowej i pomiarze czasu przejścia jej czoła od przetwornika nadawczego do odbiorczego. Prędkość rozchodzenia się fal podłużnych wyznaczana jest przy znanym czasie przejścia impulsu oraz znanej długości drogi, przy czym stosowane są trzy metody przepuszczania fali ultradźwiękowej (rys. 3.24) [44].



Rys. 3.24. Schemat badania impulsową metodą przepuszczania fali ultradźwiękowej wg PN-EN 12504-4: a) metoda bezpośrednia, b) metoda pośrednia, c) metoda powierzchniowa [44]

Metoda bezpośrednia przepuszczania fal ultradźwiękowych (rys. 3.24a) stosowana jest głównie do oszacowania wytrzymałości na ściskanie betonu oraz do oceny jednorodności betonu. Dla badanego rodzaju betonu winien być wyprzedzająco ustalony związek korelacyjny, w formie tzw. krzywej regresji, pomiędzy prędkością przepływu fali ultradźwiękowej w betonie, a poszukiwanymi wartościami, np. wytrzymałością lub modułem sprężystości [139]. Prędkość fali zależy głównie od gęstości ośrodka, modułu sprężystości oraz wad obecnych w mikrostrukturze betonu [44]. Metoda pośrednia powierzchniowa przepuszczania fal jest przydatna do oceny głębokości rys powierzchniowych a także oszacowania grubości powierzchniowej uszkodzonej warstwy betonu [44]. Garbacz [44] opracował ponadto procedurę oceny jakości zespolenia powłoka polimerowa-podkład betonowy wykorzystując pośrednią metodę pomiaru czasu przejścia fali ultradźwiękowej.

Kolejną metodą nieniszczącą, stosowaną przy realizacji prac badawczych, jest metoda wykorzystująca zjawisko indukcji elektromagnetycznej do wykrywania zbrojenia w betonie. Zjawisko indukcji elektromagnetycznej polega na indukowaniu prądu w zamkniętym obwodzie elektrycznym, a także w przewodniku elektrycznym, gdy strumień magnetyczny generowany przez ten obwód zmienia się. Dzięki zjawisku indukcji elektromagnetycznej w przewodnikach elektrycznych powstają prądy wirowe. Prądy wirowe indukowane są tylko wtedy, gdy na obiekt oddziałuje zmienne w czasie pole magnetyczne czyli kiedy pochodna indukcji magnetycznej względem czasu nie jest stała, tj. $dB/dt \neq const.$ [104]. Zmiana strumienia magnetycznego, następuje podczas zasilania cewek indukcyjnych sygnałami zmiennymi, najczęściej przemiennymi. Jeśli zmienne pole magnetyczne obejmuje obiekt wykonany z przewodnika elektrycznego, np. pręt zbrojenia rozproszonego, indukowane jest w nim zmienne, wirowe pole elektryczne. Napięcie tego pola jest nazywane siłą elektromotoryczną indukcji elektromagnetycznej. Jest ona opisana zależnością: $\varepsilon = -d\phi/dt$. Siła elektromotoryczna indukcji elektromagnetycznej jest równa pochodnej strumienia magnetycznego ϕ względem czasu t , ze znakiem minus. Zależność tę opisuje *prawo indukcji elektromagnetycznej*, nazywane prawem Faraday'a [104]. Urządzenia do badań oparte na zasadzie indukcji elektromagnetycznej rejestrują natężenie indukowanego prądu, podając jego wartość w [mA].

W praktyce inżynierskiej znane są różne przyrządy, których zasady funkcjonowania oparte są na zjawisku indukcji elektromagnetycznej. Można tu wymienić np. Ferroskan (rys. 3.25), Covermeter, Pachometr, Profometer, czy Femetr (urządzenie produkcji polskiej). Urządzenie wskazuje największą mierzoną wartość, kiedy jego sonda ułożona jest na powierzchni betonu w miejscu położenia pręta zbrojeniowego. Przy znanej średnicy badanego pręta zbrojeniowego

wskazanie przyrządu pozwala na określenie grubości jego otulenia, natomiast przy znanej grubości otulenia pręta można określić jego średnicę [139].



Rys. 3.25. Przyrząd służący do identyfikacji zbrojenia w betonie metodą indukcji elektromagnetycznej Ferroskan typu PS 200 [192]

Metody nieniszczące w procesie wyznaczania właściwości betonu obarczone są pewnym dopuszczalnym błędem. Użycie więcej niż jednej metody nieniszczącej do oceny właściwości kompozytu daje lepszy stopień przybliżenia niż użycie tylko jednej techniki nieniszczącej. Pomimo istnienia wielu opisów właściwości kompozytów z włóknami rozproszonymi, trudno jest znaleźć w literaturze metody, dedykowanej dla fibrokompozytów, która pozwoliłby na ocenę ich właściwości przy użyciu sprzężonych technik nieniszczących. Brak takiej techniki oceny właściwości fibrokompozytów stał się powodem podjęcia próby jej opracowania i opisu w niniejszej dysertacji, co również znalazło swój wyraz w publikacjach [54, 56, 58, 59, 60].

4. PROGRAM I ZAKRES BADAŃ

4.1. Program badań

Badania właściwości mechaniczno-fizycznych i reologicznych fibrokompozytu wykonano przy użyciu technik niszczących i nieniszczących. Metody nieniszczące obejmowały metodę ultradźwiękową opartą na prędkości przebiegu fali ultradźwiękowej przez fibrokompozyt oraz metodę indukcyjną opartą na pomiarze natężenia prądu indukowanego w zbrojeniu rozproszonym.

Do realizacji badań mających na celu opis rozkładu włókien w przestrzeni kompozytu wykorzystano analizę obrazu przekroju elementów próbnych przy użyciu programów komputerowych Adobe Photoshop Extended oraz GSA Image Analyser [225, 226]. Elementy próbne do tego badania wykonano dla różnych konsystencji i różnego czasu wibrowania podczas formowania (tabl. 7.10 rozdz. 7).

Program badań właściwości kompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi przedstawiono w tablicy 4.1.

Tablica 4.1. Program badań właściwości drobnokruszywowego kompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi

| L.p. | Badana cecha | Termin badania [dni] | Rodzaj i wymiary próbek [cm] | Liczba próbek [szt.] | Zawartość włókien [%] |
|------|---|----------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Wytrzymałość na ściskanie | 28 | kostka 15x15x15 | 48 (po 8 szt. dla każdej serii) | 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 |
| 2 | Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu | 28 | kostka 15x15x15 | 48 (po 8 szt. dla każdej serii) | 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 |
| 3 | Wytrzymałość na rozciąganie osiowe | 28 | beleczka 10x10x40 | 27 (po 9 szt. dla każdej serii) | 0; 1,0; 1,5 |
| 4 | Moduł sprężystości przy ścisnaniu | 28 | walec Ø15x30 | 54 (po 9 szt. dla każdej serii) | 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 |
| 5 | Dynamiczny moduł sprężystości | 28 | kostka 15x15x15 | 96 (po 16 szt. dla każdej serii) | 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 |
| 6 | Dynamiczny moduł odkształcenia postaciowego | 28 | beleczka 10x10x50 | 36 (po 6 szt. dla każdej serii) | 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 |
| 7 | Gęstość pozorna | 28 | kostka 15x15x15 | 96 (po 16 szt. dla każdej serii) | 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 |
| 8 | Skurcz | do 730 | beleczka 10x10x50 | 48 (po 8 szt. dla każdej serii) | 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 |
| 11 | Ścieralność | 28 | kostka 7,1x7,1x7,1 | 42 (po 7 szt. dla każdej serii) | 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 |
| 12 | Mrozoodporność | 53 (25 cykli) | kostka 10x10x10 | 72 (po 12 szt. dla każdej serii) | 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 |
| 13 | Rozkład włókien w kompozycie | 28 | kostka 15x15x15 | 27 (por. str. 119) | 1,5 |

W celu weryfikacji wyników badań zaplanowano wykonanie w terenie trzech elementów płytowych o różnej zawartości włókien stalowych. Płyty te po czasie dojrzewania w warunkach naturalnych (ok. 2,5 lat) pocięto na próbki. Zaplanowano także badania próbek wykonanych przez producenta posadzki przemysłowej w Laboratorium Techniki Budowlanej (LTB) Politechniki Koszalińskiej (LTB), firmę *Dźwigbet Sp. z o.o.* Jako kolejny etap weryfikacji przewidziano badanie próbek wyciętych z istniejącej posadzki przemysłowej LTB. Weryfikację modelu rozkładu włókien w kompozycie przeprowadzono na próbkach sześciennych o boku 15cm o zawartości włókien stalowych w przedziale od 0,5 do 2,5% (tabl. 4.2).

Tablica 4.2. Program badań weryfikujących model kompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi

| L.p. | Badana cecha | Termin badania [dni] | Rodzaj i wymiary próbek [cm] | Liczba próbek [szt.] | Zawartość włókien [%] |
|---|---|----------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>Weryfikacja matematycznego opisu właściwości fibrokompozytu</i> | | | | | |
| <i>próbki wycięte z płyty wykonanej w terenie</i> | | | | | |
| 14 | Wytrzymałość na ściskanie | 730 | kostka 15x15x15 | 27 (po 9 szt. dla każdej serii) | 0; 1,5; 2,5 |
| 15 | Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu | 730 | kostka 15x15x15 | 27 (po 9 szt. dla każdej serii) | 0; 1,5; 2,5 |
| 16 | Dynamiczny moduł sprężystości | 730 | kostka 15x15x15 | 27 (po 9 szt. dla każdej serii) | 0; 1,5; 2,5 |
| 17 | Gęstość pozorna | 730 | kostka 15x15x15 | 27 (po 9 szt. dla każdej serii) | 0; 1,5; 2,5 |
| 18 | Ścieralność | 730 | kostka 7,1x7,1x7,1 | 12 (po 4 szt. dla każdej serii) | 0; 1,5; 2,5 |
| <i>próbki wykonane przez producenta posadzki przemysłowej firmę Dźwigbet Sp. z o.o.</i> | | | | | |
| 19 | Wytrzymałość na ściskanie | 28 | kostka 15x15x15 | 8 | 0,5 |
| 20 | Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu | 28 | kostka 15x15x15 | 8 | 0,5 |
| 21 | Dynamiczny moduł sprężystości | 28 | kostka 15x15x15 | 8 | 0,5 |
| 22 | Gęstość pozorna | 28 | kostka 15x15x15 | 8 | 0,5 |
| <i>próbki wycięte z posadzki przemysłowej</i> | | | | | |
| 23 | Wytrzymałość na ściskanie | 1100 | walec Ø15x15 | 3 | 0,5 |
| <i>Weryfikacja opisu rozkładu włókien w fibrokompozycie</i> | | | | | |
| 13 | Rozkład włókien w kompozycie | 28 | kostka 15x15x15 | 40 (po 8 szt. dla każdej serii) | 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 |

4.2. Charakterystyka użytych materiałów

4.2.1. Skład fibrokompozytu

Kompozyty cementowe na bazie kruszywa drobnoziarnistego wytwarzane są przede wszystkim z udziałem cementów portlandzkich (klasycznych i z dodatkami). Maksymalna zalecana ilość cementu, jaka powinna być użyta w mieszance kompozytu drobnokruszywowego wynosi 500 kg/m^3 , minimalna ilość to 300 kg/m^3 [228]. Stosując się do powyższych zaleceń, przyjęto zawartość cementu w badanym fibrokompozycie równą 420 kg/m^3 . Do wytworzenia użytego w badaniach fibrokompozytu zastosowano cement portlandzki szybkotwardniejący CEMII 42,5R A-V zawierający popioły lotne. Badania wykazały, że popiół lotny korzystnie wpływa na właściwości mieszanek betonowych [5, 165].

Ponadto użyto kruszywa drobnego (piasku płukanego) pochodzenia wodno-lodowcowego z kopalni surowców mineralnych regionu Pomorza Zachodniego. Piasek płukany jest produktem odpadowym procesu hydroklasyfikacji w trakcie pozyskiwania kruszyw grubych z pospółki. Dzięki procesowi hydroklasyfikacji usunięte zostały zanieczyszczenia ilasto-gliniaste w postaci mułków oraz pyłów [62, 110], co przyczyniło się do poprawienia jakości tego surowca. W latach 1954÷1990 na potrzeby przemysłu eksploatowano 644 krajowe złoża piasków. Na terenie wielu z nich prowadzona była hydroklasyfikacja. Tereny byłych wyrobisk wymagają kosztownej rekultywacji. Alternatywą dla rekultywacji byłych wyrobisk może być możliwość wykorzystania zalegających w nich odpadów jako pełnowartościowego surowca budowlanego. Częściowe zastąpienie betonu zwykłego konstrukcyjnym kompozytem drobnoziarnistym ze zbrojeniem rozproszonym może znacznie ograniczyć dalszą degradację środowiska przez zredukowanie hydroklasyfikacji kruszywa, jak również spowodować stopniowe zmniejszanie się hałd piasku (rys. 4.1) [51]. Wykorzystanie kruszyw alternatywnych przyczynia się do bardziej zrównoważonego wykorzystania zasobów naturalnych [144].

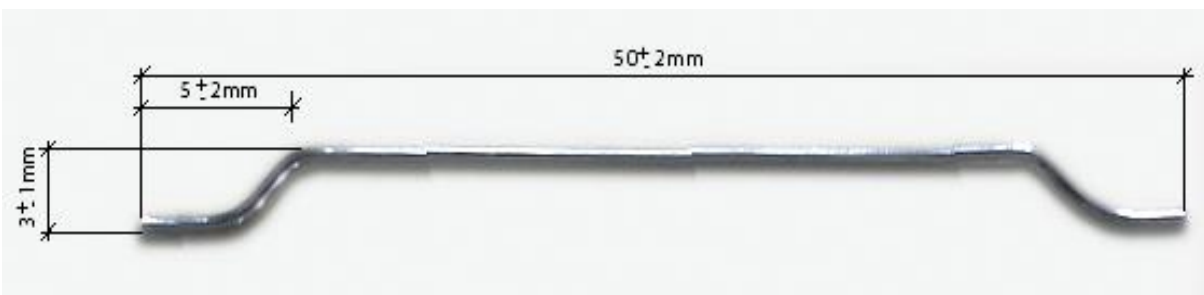
Skład granulometryczny stosu okruchowego kruszywa jest ważnym czynnikiem warunkującym jakość kompozytu. Frakcje 0,125-2 mm mają istotny wpływ na wytrzymałość kompozytu drobnokruszywowego [126]. Użyte kruszywo pochodzące z piasków odpadowych odznaczało się stałością cech fizycznych, jednorodnością uziarnienia i ciągłością krzywej uziarnienia (por. rozdz. 6, rys. 6.1).



Rys. 4.1. Widok hałdy powstałej w wyniku hydroklasyfikacji pospółek w regionie Pomorza Zachodniego

Do wykonania próbek kompozytu użyto wody zarobowej spełniającej wymagania zgodne z normą przedmiotową PN-EN 1008:2004 [205]. W celu poprawy urabialności oraz obniżenia zawartości wody w mieszance [152] zastosowano superplastyfikator Betocrete 406 (FM) zawierający pucolanę. Skład matrycy kompozytu został zmodyfikowany przez dodanie pyłu krzemionkowego w ilości 5% w stosunku do masy cementu. Dodatek ten użyto, ponieważ korzystnie wpływa na niektóre właściwości kompozytów z dodatkiem włókien.

W fibrokompozycie zastosowano włókna stalowe o długości 50 mm i średnicy 0,8 mm, posiadające Aprobata Techniczną ITB nr AT-15-2095/1999 [190] zgodne z normą PN-EN 14889-1 [215] (tabl. 4.3). Włókna charakteryzowały się prostym kształtem o haczykowatym zakończeniu, ułatwiającym przyczepność do matrycy [16] (rys. 4.2).



Rys. 4.2. Kształt i geometria pojedynczego włókna stalowego użytego w badaniach

Tablica 4.3. Charakterystyka techniczna włókien stalowych użytych w badaniach

| L.p. | Cecha | Wartość | Jednostka |
|------|--|---------|----------------------|
| 1 | Grupa konstrukcyjna | I | [-] |
| 2 | Wytrzymałość na rozciąganie | 1160±7 | [N/mm ²] |
| 3 | Moduł Younga | 210000 | [N/mm ²] |
| 4 | Konsystencja przy zawartości włókien 14-15 kg/m ³ mierzona metodą Ve-Be | 4 | [s] |
| 5 | Wpływ na wytrzymałość betonu przy CMOD*=0,5 mm | 1,5 | [N/mm ²] |
| 6 | Wpływ na wytrzymałość betonu przy CMOD*=3,5 mm | 1,5 | [N/mm ²] |

* - rozwarcie naciętej szczeliny wg metody zawartej w PN-EN 14651 [213]

Dane dotyczące zalecanej maksymalnej ilości włókien stalowych wg Maidla [108] w zależności od uziarnienia kruszywa podano w tablicy 4.4.

Tablica 4.4. Graniczna zawartość włókien stalowych w zależności od uziarnienia kruszywa [108]

| Uziarnienie kruszywa [mm] | Maksymalna zalecana zawartość włókien | | Maksymalna zalecana zawartość włókien [kg/m ³] | | | |
|---------------------------|---------------------------------------|-----------------|--|-----------------|-----------------------------------|-----------------|
| | $V_f l/d$ | | $l/d=75$ włókna $l=60, d=0,80$ | | $l/d=60$ włókna $l=60, d=1,00$ | |
| | Przy wylewaniu | Przy pompowaniu | Przy wylewaniu | Przy pompowaniu | Przy wylewaniu | Przy pompowaniu |
| 4 | 120 | 90 | 125 | 95 | 160 | 120 |
| 8 | 95 | 70 | 100 | 75 | 125 | 95 |
| 16 | 65 | 50 | 70 | 55 | 85 | 65 |
| 32 | 40 | 30 | 40 | 30 | 50 | 40 |

W badaniach własnych przyjęto następujące zawartości włókien w kompozycie $V_f = 0\%, 0,5\%, 1\%, 1,5\%, 2\%, 2,5\%$ (objętość włókien w stosunku do objętości kompozytu). Studia literaturowe wykazały, że powyżej $V_f = 2,5\% \div 3\%$ następuje znaczne pogorszenie niektórych właściwości fibrokompozytów [40, 85, 108, 168, 185].

4.2.2. Projekt technologiczny fibrokompozytu

Projektowanie składu kompozytu powinno odpowiadać dwóm podstawowym aspektom: aspektowi technicznemu, czyli takiemu doborowi składników, by materiał odpowiadał założonym warunkom wytrzymałości, urabialności, konsystencji, trwałości i in., oraz aspektowi ekonomicznemu określanemu, jako spełnienie powyższych założeń przy minimalnych kosztach [97]. Projektowanie składu matrycy kompozytu oparto więc na metodzie obliczeniowo-

doświadczalnej opracowanej przez Politechnikę Łódzką [32, 224]. Skład matrycy zmodyfikowano przez dodanie pyłów krzemionkowych a następnie przez dodanie superplastyfikatora Betocrete 406 (FM). Metoda Politechniki Łódzkiej opiera się na doświadczalnie stwierdzonej zależności pomiędzy wartością woda+jamistość (W+J) - rzeczywistej objętości wody i porów (jamistości) w mieszance kompozytu, a własnościami kompozytów projektowanych na bazie kruszywa drobnego. Wartość (W+J) dla kruszywa o danym uziarnieniu, w określonych warunkach zagęszczania jest wartością w przybliżeniu stałą [224, 228]. W tabelicy 4.5 podano parametry przyjęte do zaprojektowania fibrokompozytu.

Tabela 4.5. Parametry przyjęte do zaprojektowania fibrokompozytu

| L.p. | Cecha | Wartość | Jednostka |
|------|---|---------|-------------------|
| 1 | Założona minimalna wytrzymałość na ściskanie matrycy kompozytu drobnokruszywowego | 25 | N/mm ² |
| 2 | Założona klasa konsystencji matrycy | V3 | - |
| 3 | Ziarno mediana | 0,61 | mm |

W tabelicy 4.6 podano obliczony skład mieszanek matrycy kompozytu na 1 m³ zarobu dla różnych konsystencji w [s] wg Ve-Be.

Tabela 4.6. Teoretyczne składy mieszanek zaprojektowane według metody Politechniki Łódzkiej, przed modyfikacją doświadczalną

| L.p. | Konsystencja [s] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | woda, W [l] | 250 | 247 | 244 | 240 | 237 | 234 | 230 | 227 | 224 | 221 |
| 2 | cement, C [kg] | 487 | 484 | 480 | 477 | 474 | 470 | 467 | 464 | 460 | 457 |
| 3 | kruszywo drobne, P [kg] | 1528 | 1539 | 1550 | 1561 | 1572 | 1583 | 1594 | 1605 | 1616 | 1627 |
| 4 | stosunek woda/cement, w/c | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.48 |

| L.p. | Konsystencja [s] | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | woda, W [l] | 217 | 214 | 211 | 207 | 204 | 201 | 198 | 194 | 191 | 188 |
| 2 | cement, C [kg] | 454 | 450 | 447 | 444 | 440 | 437 | 434 | 431 | 427 | 424 |
| 3 | kruszywo drobne, P [kg] | 1638 | 1649 | 1660 | 1671 | 1682 | 1693 | 1704 | 1715 | 1726 | 1737 |
| 4 | stosunek woda/cement, w/c | 0.48 | 0.48 | 0.47 | 0.47 | 0.46 | 0.46 | 0.46 | 0.45 | 0.45 | 0.44 |

Doświadczenia przeprowadzone z mieszankami drobnokruszywowego kompozytu o różnych zawartościach włókien stalowych pozwoliły na określenie optymalnej konsystencji jego matrycy na 4÷5s wg metody Ve-Be, zgodnie z normą PN-EN 12350-3 [208]. Taka konsystencja matrycy pozwala zachować zadowalającą urabialność mieszanki po dodaniu do niej włókien stalowych. Wybrano skład mieszanki odpowiadający konsystencji 12s wg Ve-Be (por. tabl. 4.6) z zamiarem późniejszego zmniejszenia tej wartości do 5s przez dodanie domieszki uplastyczniająco-upłynniającej. Kolejno wykonano mieszanki kontrolne. Rzeczywista konsystencja zmierzona metodą Ve-Be wyniosła 5s. Dokonano korekty receptury poprzez redukcję

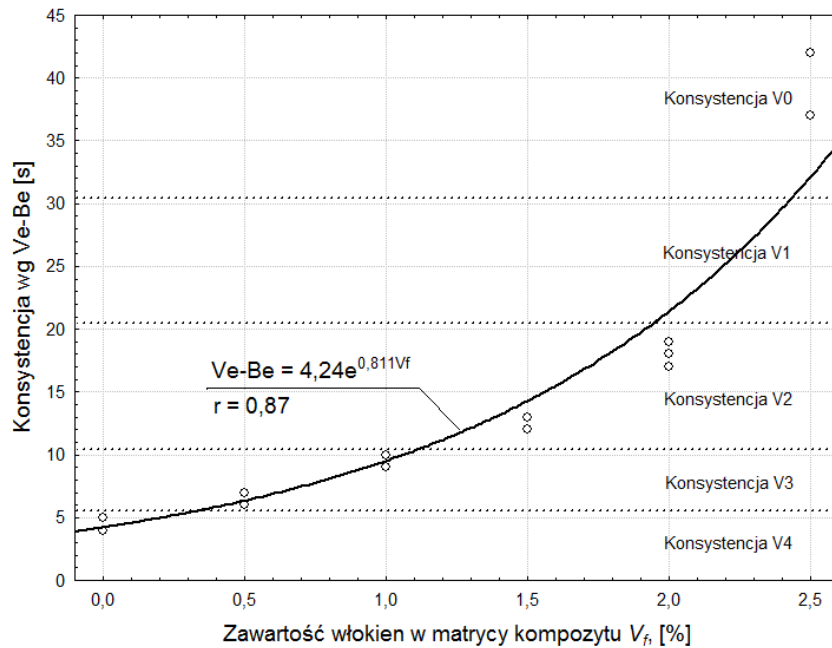
ilości wody o ilość odpowiadającą różnicy ilości wody dla konsystencji 12s i 5s. Ponownie wykonano mieszanki kontrolne mierząc konsystencję metodą Ve-Be, która wyniosła po korekcie 12s. Skład matrycy kompozytu został następnie zmodyfikowany przez zastosowanie domieszki uplastyczniająco-upłynniającej. Wykonano ponownie mieszanki kontrolne w celu oceny wpływu dodania superplastyfikatora na własności kompozytu. Badania konsystencji metodą Ve-Be pozwoliły stwierdzić zmianę konsystencji o 9s (12s przed modyfikacją i 3s po modyfikacji). Dodanie domieszki uplastyczniająco-upłynniającej pozwoliło na dalsze zredukowanie ilości wody w mieszance. Następnie dokonano modyfikacji mieszanki poprzez dodanie pyłu krzemionkowego w ilości 5% masy cementu. Ponieważ zmniejszył się stosunek wodno-cementowy, korzystny z punktu widzenia wytrzymałości kompozytu, pozwoliło to na zredukowanie ilości cementu w mieszance, co powinno w konsekwencji mieć wpływ na zmniejszenie skurczu. Ostatecznie przyjęto skład mieszanki kompozytu drobnokruszywowego, którego konsystencja wyniosła 4÷5s (tabl. 4.7).

Tablica 4.7. Ostateczny skład 1 m³ matrycy użytego w badaniach kompozytu drobnokruszywowego o konsystencji Ve-Be 5s

| L.p. | Składnik matrycy kompozytu | Ilość |
|------|---|-------|
| 1 | Superplastyfikator [kg] | 16,8 |
| 2 | Woda [dm ³ /m ³] | 160 |
| 3 | Cement [kg/m ³] | 420 |
| 4 | Piasek płukany [kg/m ³] | 1570 |
| 5 | Pyły krzemionkowe [kg/m ³] | 21 |

Kolejną matrycę kompozytu drobnokruszywowego modyfikowano przez dodatek włókien stalowych o zawartości objętościowej V_f równej 0,0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 i 2,5%. Włókna stalowe dodawano rozprowadzając je stopniowo w trakcie mieszania, aby uniknąć efektu ich miejscowej koncentracji (ang. *balling*). Efekt taki występuje w szczególności przy stosowaniu włókien o stosunkowo wysokim stosunku długości do średnicy [114]. W przypadku włókien użytych w badaniach stosunek ten wyniósł 62,5. Po zmieszaniu matrycy kompozytu z różną zawartością włókien stalowych, badano konsystencję mieszanki przy użyciu metody Ve-Be. Matryca kompozytu charakteryzowała się konsystencją V4 wg PN-EN 206-1 [220]. Włókna dodane do matrycy powodowały zmianę konsystencji badanej mieszanki (rys. 4.3). Dla zawartości włókien w przedziale $V_f = 0,5\div 1,0\%$ mieszanka charakteryzowała się konsystencją V3, dla zawartości włókien w przedziale $V_f = 1,5\div 2,0\%$ uzyskano konsystencję V2, natomiast przy $V_f = 2,5\%$ konsystencję V0. Można więc wnioskować, że górną granicą zawartości włókien dla zaprojektowanej matrycy kompozytu jest 2,5%. Powyżej tej ilości włókien urabialność mieszanki

znacznie się zmniejsza. Powoduje to trudności z właściwym zawibrowaniem mieszanki i układaniem jej w formach.



Rys. 4.3. Wykres konsystencji objętego badaniami kompozytu z włóknami rozproszonymi wg metody Ve-Be, w zależności od zawartości włókien V_f

4.2.3. Wykonanie i pielęgnacja elementów próbnych

Mieszankę kompozytu wykonywano w betoniarce współbieżnej o pojemności 120 dm³. Zachowywano następującą kolejność dozowania i mieszania składników:

- piasek płukany, cement, pyły krzemionkowe – czas mieszania 3 min,
- piasek płukany, cement, pyły krzemionkowe + woda, superplastyfikator – czas mieszania 10 min,
- piasek płukany, cement, pyły krzemionkowe, woda, superplastyfikator + włókna stalowe – czas mieszania 4 min.

Elementy próbne o kształcie beleczki, sześciangu oraz walca wykonano w formach stalowych. Wibrowano je dwukrotnie z częstotliwością 50 Hz przy użyciu wibratora stołowego w trakcie formowania: 20s po wypełnieniu formy do połowy wysokości oraz 20s po wypełnieniu całej formy. Po rozformowaniu, które następowało 24h od czasu umieszczenia mieszanki w formach, próbki przechowywano w wodzie, gdzie dojrzewały w temperaturze $20 \pm 1^\circ\text{C}$ (rys. 4.4). Po upływie 28 dni próbki wyjęto z wody. Następnego dnia po wyjęciu próbek z wody poddano je badaniom.



Rys. 4.4. Ogólny widok elementów próbnych fibrokompozytu w trakcie dojrzewania

Próbki przeznaczone do badania zależności naprężenie-odkształcenie przy rozciąganiu przygotowano przez zabetonowanie w nich śruby stalowej umożliwiającej zamocowanie próbki w maszynie wytrzymałościowej. Po 28 dniach dojrzewania w wodzie, a następnie przechowywaniu jeden dzień w środowisku powietrzno-suchym, próbki wzmocniono przez przyklejenie poza bazą pomiarową blachy stalowej celem zapobieżenia zniszczenia próbki w pobliżu zakotwienia śruby (rys. 4.5).



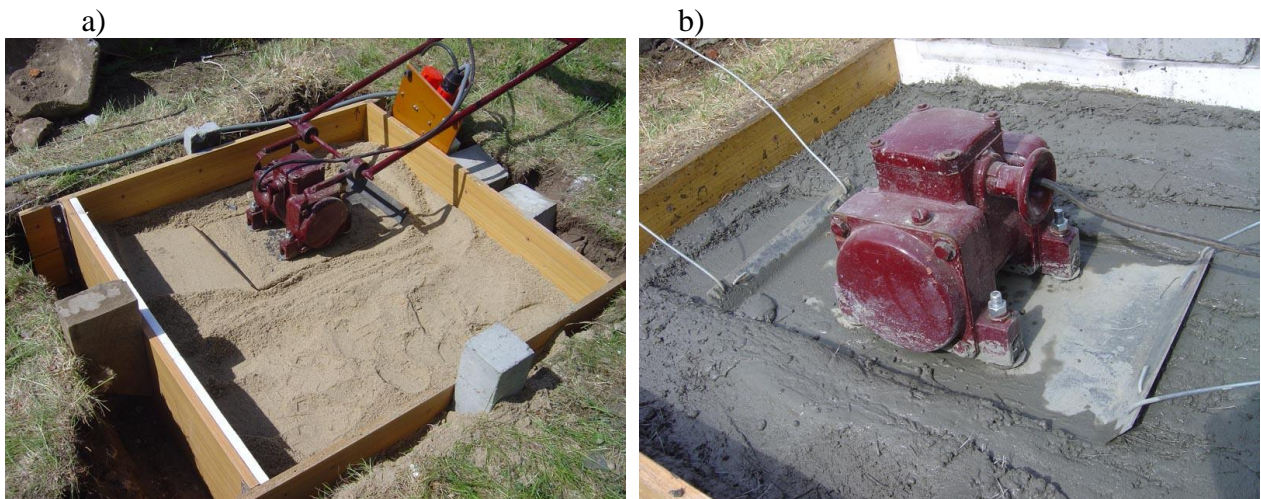
Rys. 4.5. Elementy próbne przeznaczone do badania zależności naprężenie-odkształcenie przy osiowym rozciąganiu

Formy do wykonywania próbek przeznaczonych do badania skurczu wyposażone były w nasadki o kształcie półkuli formujące regularne wgłębienia na powierzchniach czołowych próbek, niezbędne do stabilnego osadzenia punktów pomiarowych. Elementy próbne po rozformowaniu, które nastąpiło po 24 godzinach od zaformowania, przechowywano w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $50 \pm 2\%$ (rys. 4.6), do momentu ustabilizowania się odkształceń wywołanych skurczem.



Rys. 4.6. Widok ogólny próbek przeznaczonych do badania skurczu

Płyty wykonywane w celach weryfikacji modelu formowano na gruncie na podsypce piaskowej o grubości 15 cm, zagęszczanej wibratorem powierzchniowym (rys. 4.7a). Uformowano trzy płyty z zawartością włókien stalowych 0%, 1% oraz 2,5% o wymiarach 100x100x15 cm. Mieszanka kompozytu wibrowana była dwukrotnie: po wypełnieniu szalunku do połowy wysokości (rys. 4.7b) oraz po wypełnieniu całego szalunku. Płyty oddylatowano od siebie styropianem o grubości 2 cm. Próbkami zaformowane przez producenta posadzki Laboratorium Techniki Budowlanej Politechniki Koszalińskiej (LTB) po przywiezieniu do laboratorium przechowywano w tych samych warunkach cieplno-wilgotnościowych jak pozostałe elementy próbne. Natomiast próbki pobrane z posadzki LTB od razu poddano obciążeniu.



Rys. 4.7. Widok miejsca formowania płyt: a) szalunek z ułożoną podsypką piaskową w trakcie wibrowania, b) prace w trakcie wykonywania płyty podczas wibrowania powierzchniowego

5. METODYKA BADAŃ

5.1. Badania cech mechaniczno-fizycznych i reologicznych fibrokompozytu

Badania właściwości fibrokompozytu przeprowadzono zgodnie z obowiązującymi na terenie Unii Europejskiej normami i instrukcjami oraz metodyką podstawową zawartą w literaturze naukowej (tablica 5.1).

Tablica 5.1. Metody badania właściwości fibrokompozytu

| L.p. | Badana cecha | Rodzaj badania | Rodzaj próbki | Aparatura pomiarowa | Metodyka wg |
|------|---|--|-------------------------------|---|-------------------------------|
| 1 | Wytrzymałość na ściskanie (por. rys. 5.1a i rozdz. 6, rys. 6.2) | ściskanie | kostki \square 15cm | maszyna wytrzymałościowa Walter Bei Ag typu D-4000kN | PN-EN 12390-3 [209] |
| 2 | Naprężenie-odkształcenie przy ściskaniu (rys. 5.1a i rozdz. 6, rys. 6.8) | ściskanie | walce cylinder 15 cm | maszyna wytrzymałościowa Walter Bei Ag typu D-4000kN, ekstensometry | Instrukcja ITB 194/98 [193] |
| 3 | Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (por. rys. 5.1a i rozdz. 6, rys. 6.10)) | ściskanie | kostki \square 15cm | maszyna wytrzymałościowa Walter Bei Ag typu D-4000kN | PN-EN 12390-6 [222] |
| 4 | Wytrzymałość na osiowe rozciąganie (por. rys. 5.1b i rozdz. 6, rys. 6.14) | osiowe rozciąganie | belki 10x10x40 cm | maszyna wytrzymałościowa typu EDZ40 | Instrukcja ITB 194/98 [193] |
| 5 | Moduł sprężystości przy ściskaniu (rys. 5.4) | ściskanie | walce cylinder 15 cm | maszyna wytrzymałościowa typu ZD-100 | Instrukcja ITB 194/98 [193] * |
| 6 | Dynamiczny moduł sprężystości (rys. 5.3) | prędkość fali ultradźwiękowej, gęstość | kostki \square 15 cm | betonoskop typu <i>TICO</i> , waga laboratoryjna | [6, 115, 134] |
| 7 | Dynamiczny moduł odkształcenia postaciowego (rys. 5.7) | częstotliwość drgań własnych | belki 10x10x50 cm | analizator dźwięku i drgań typu SVAN 910A | [181] |
| 8 | Gęstość pozorna stwardniałego kompozytu | masa, objętość | kostki \square 15 cm | waga laboratoryjna, suwmiarka | PN-EN 12390-7 [210] |
| 9 | Skurcz (rys. 5.2) | odkształcenie liniowe | belki 10x10x50 cm | aparat Amslera | Instrukcja ITB 194/98 [193] |
| 10 | Odporność na ścieranie (rys. 5.1d i rozdz.6, rys. 6.32) | ubytek wysokości próbki | kostki \square 7,1 cm | tarcza Boehme'go | PN-EN-14157:2005 [223] |
| 11 | Mrozoodporność (rys. 5.1c) | ubytek wytrzymałości po 25 cyklach zamrażania/odmrażania | kostki \square 10 cm | komora do badań mrozoodporności | PN-88/B-6250 [204] |

* Badania przeprowadzono przy warunku, że przyrosty odkształceń $\Delta\epsilon$ nie powinny różnić się od wartości średniej więcej niż 20%

Badania cementu przeprowadzono zgodnie z metodyką przedstawioną w normie przedmiotowej PN-EN 196-1:2006 [218], a zgodność z wymaganiami określono na podstawie normy PN-EN 197-1:2006 [219]. Wybrane cechy kruszywa zbadano przy użyciu norm: PN-EN 933-1 [221] - procentowa zawartość pyłów o średnicy do 63 μm , PN-EN 1097-3 [206] - gęstość nasypowa i jamistość, PN-EN 1097-6 [207] - gęstość ziaren.

a)



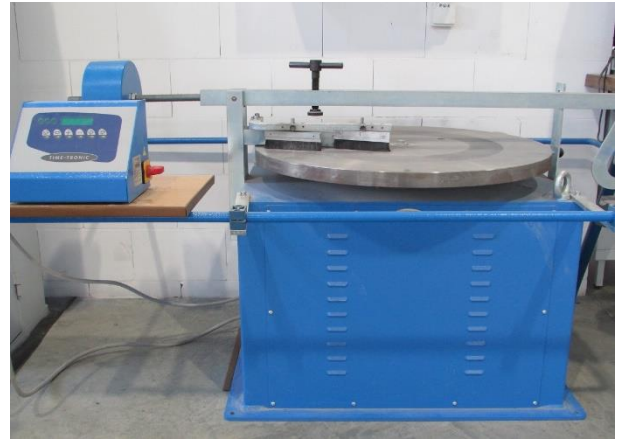
b)



c)



d)



Rys. 5.1. Widok ogólny stanowiska badawczego: a) wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, b) osiowego rozciągania, c) mrozoodporności, d) odporności na ścieranie fibrokompozytu



Rys. 5.2. Stanowisko do badań skurczu fibrokompozytu

5.2. Badania nieniszczące fibrokompozytu

Badaniom przedstawionym w tabelicy 5.1 towarzyszyły badania nieniszczące polegające na pomiarze prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w fibrokompozycie oraz natężenia prądu indukowanego w zbrojeniu rozproszonym. Badania prędkości propagacji fali ultradźwiękowej przeprowadzono przy użyciu betonoskopu typu *Tico* (rys. 5.3), zgodnie z instrukcją obsługi urządzenia [229].



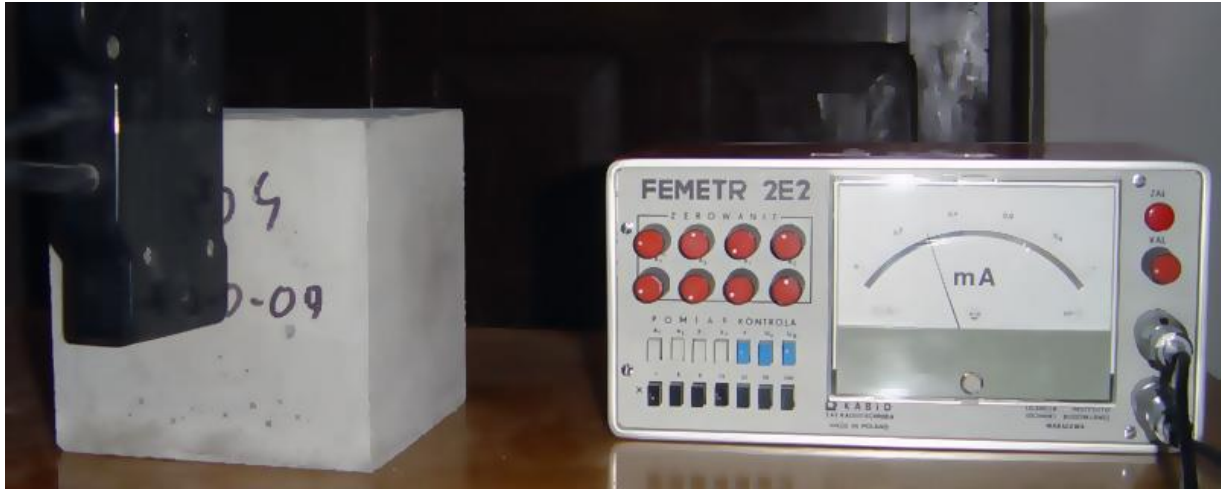
Rys. 5.3. Widok ogólny stanowiska do badań dynamicznego modułu sprężystości w fibrokompozycie przy użyciu betonoskopu typu *TICO*



Rys. 5.4. Stanowisko do badań modułu sprężystości przy ściskaniu

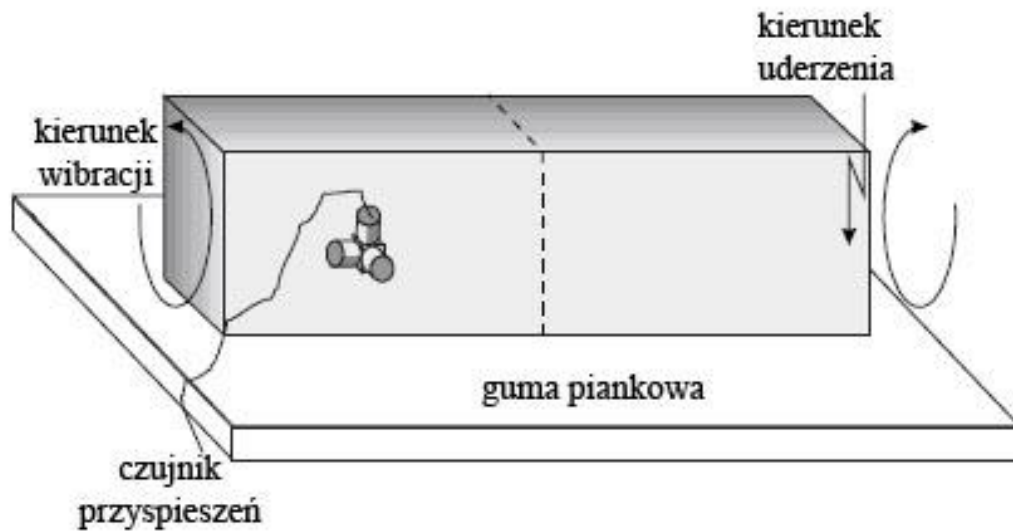
Wynikiem badania metodą ultradźwiękową był czas przepływu fali t podawany w μs . Mierzona była także droga przepływu impulsu przy użyciu elektronicznej suwmiarki z cyfrowym odczytem. Wielkości te posłużyły do obliczenia dynamicznego modułu sprężystości [91].

Badania natężenia prądu indukowanego w zbrojeniu rozproszonym przeprowadzono przy użyciu *Femetru* typu *2E2* (rys. 5.5). Celem badania metodą indukcyjną było oszacowanie zawartości włókien stalowych w badanym fibrokompozycie. Zastosowanie detektora zbrojenia (urządzenia przewidzianego do detekcji średnicy i położenia prętów zbrojeniowych w betonie) do badań stopnia nasycenia kompozytu zbrojeniem rozproszonym została zaproponowana przez autora niniejszej dysertacji. Badania przeprowadzono zgodnie z instrukcją obsługi *Femetru 2E2* [191]. Wartości natężenia prądu I podano w mA.



Rys. 5.5. Widok ogólny stanowiska do badań zawartości zbrojenia rozproszonego w fibrokompozycie przy użyciu detektora zbrojenia *Femetr* typu *E2E*

Badania dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego oznaczano na podstawie skrętnych drgań własnych belki pryzmatycznej o wymiarach 10x10x50 cm. Po wymuszeniu drgań skrętnych poprzez uderzenie stalową kulką (rys. 5.6), sygnał z czujnika przekazywany zostaje do analizatora dźwięku i drgań typu *SVAN 910A* (rys. 5.7). W analizatorze tym w oparciu o analizę Fouriera wyznaczono częstotliwość drgań własnych skrętnych.



Rys. 5.6. Schemat badania częstotliwości drgań własnych [181]



Rys. 5.7. Stanowisko do badań dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego przy użyciu aparatu SVAN 910A

Na podstawie uzyskanych wyników badań częstotliwości drgań własnych obliczono dynamiczny moduł odkształcenia postaciowego fibrokompozytu wg zależności [181]:

$$G_d = \frac{f_{tors}^2}{k_i^2} \cdot \frac{ml}{A} \cdot 4 \cdot R \quad (5.1)$$

w której:

R - współczynnik zależny od wymiarów przekroju poprzecznego belki b i h :

$$R = \frac{\frac{b}{h} + \frac{h}{b}}{4\frac{b}{h} - 2.52(\frac{b}{h})^2 + 0.21(\frac{b}{h})^6} \quad (5.2)$$

k_i - współczynnik zależny od rodzaju drgań (dla podstawowej częstotliwości $k = 1$) [-],

f_{tors} - częstotliwość drgań własnych [Hz],

A - pole przekroju poprzecznego belki [mm²],

b - szerokość przekroju belki [mm],

h - wysokość przekroju belki [mm],

m - masa belki [kg],

l - długość belki [mm].

5.3. Analizy statystyczne zastosowane do opracowania wyników badań

Analizy oraz testy statystyczne wykonano przy użyciu programu *STATISTICA* [227]. Do określenia minimalnej liczby próbek, niezbędnej do oznaczenia średniej wartości statystycznej badanej cechy wykorzystano test t-Studenta przy założonej tolerancji $\theta=10\%$ i poziomie istotności $\alpha=0,05$ [134]. W celu odrzucenia pomiarów skrajnych, nie należących do tej samej populacji, zastosowano test Grubbs'a [98]. W celu ustalenia zależności badanych cech zastosowano analizę korelacyjną. Przy użyciu programu *STATISTICA* [227] wyznaczono także funkcje regresji posługując się m.in. regresją wieloraką. Kryterium przyjmowania funkcji regresji był największy współczynnik korelacji, udział wariancji wyjaśnionej (R^2), istotność statystyczna wszystkich parametrów funkcji na poziomie równym $\alpha=0,05$ oraz istotność modelu regresji przy zachowaniu sensu fizycznego zależności. W celu zweryfikowania istotności modelu regresji posłużono się testem F Fishera–Snedocora. Test ten weryfikuje hipotezę zerową, że żadna j -ta zmienna niezależna w modelu nie ma istotnego wpływu na zmienną zależną [153]:

$$H_0: \beta_j = 0 \text{ dla } j = 0, 1, 2, \dots, k \quad (5.3)$$

Hipoteza alternatywna zakłada, że istnieje co najmniej jedna zmienna istotnie związana ze zmienną Y [153]:

$$H_1: \text{istnieje } j, \text{ że } \beta_j \neq 0 \quad (5.4)$$

Jednorodność wariancji jako warunek zastosowania procedur wnioskowania statystycznego przy jednoczynnikowej *ANOVA* była określana przy użyciu testów: Hartley'a, Cochran'a i Bartlett'a. W celu stwierdzenia istotności różnic pomiędzy średnimi dla kilku grup pomiarów zastosowano testy: najmniejszych istotnych różnic Fishera (NIR), Scheffego i wielokrotny test rozstępu Duncan'a [153].

W rozdziałach dotyczących rozkładu włókien stalowych w przestrzeni kompozytu, do jego opisu, zastosowano rozkład statystyczny Kumaraswamy. Parametry wymienionego rozkładu dobierano w ten sposób, aby kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa odpowiadał rozkładowi włókien w przekrojach elementów próbnym. W tym celu zastosowano test zgodności Pearsona (χ^2). Test χ^2 oparty jest na wyborze pewnej określonej miary rozbieżności pomiędzy rozkładem teoretycznym (hipotetycznym) a rozkładem empirycznym [150]. Im mniejsze jest odchylenie pomiędzy tymi rozkładami, tym wartość χ^2 jest mniejsza, dla braku odchylenia, wartość χ^2 wynosiłaby zero [177]. Wartość χ^2 wyznaczono z następującej zależności:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{n_p} \left(\frac{Q_i - E_i}{\sigma_i} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (5.5)$$

gdzie: n_p – liczba rozpatrywanych przedziałów przy warunku, że liczba pomiarów w każdej sekcji jest większa niż 5, Q_i – wartość mierzona, E_i - odpowiadająca wartość teoretyczna wynikająca z rozkładu statystycznego, σ_i – odchylenie standardowe.

Aby spełnić warunek zgodności rozkładu teoretycznego z rozkładem empirycznym musi być spełniony następujący warunek:

$$\chi^2 \geq \chi_{0,05}^2 \quad (5.6)$$

gdzie: $\chi_{0,05}^2$ jest wartością krytyczną wyznaczoną na podstawie rozkładu χ^2 (będącego szczególnym przypadkiem rozkładu statystycznego γ) dla przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$ oraz liczby stopni swobody k wyznaczonej z zależności:

$$k = r - w - 1 \quad (5.7)$$

gdzie: r jest liczbą klas, na którą podzielono wartości zawarte w próbie, zaś w jest liczbą parametrów, które trzeba wyznaczyć z próby metodą największej wiarygodności [95].

6. WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI FIBROKOMPozyTU I ICH ANALIZA

6.1. Właściwości cementu i kruszywa

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie cementu oraz parametry analizy statystycznej wyników badań przedstawiono w tablicach 6.1÷6.3. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie cementu były zgodne z wymaganiami normowymi PN-EN 197-1:2002 [219].

Tablica 6.1. Wytrzymałość na ściskanie użytego w badaniach cementu po 2 dniach dojrzewania

| L.p. | Wytrzymałość na ściskanie po 2 dniach [N/mm ²] | | |
|----------|--|----------------------|----------------------|
| | Wyniki badań | Wytrzymałość średnia | Wytrzymałość normowa |
| <i>l</i> | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 22,05 | 21,1 | ≥20 |
| 2 | 21,18 | | |
| 3 | 20,41 | | |
| 4 | 19,56 | | |
| 5 | 25,77 | | |
| 6 | 17,39 | | |

Tablica 6.2. Wytrzymałość na ściskanie użytego w badaniach cementu po 28 dniach dojrzewania

| L.p. | Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [N/mm ²] | | | |
|----------|---|----------------------|----------------------|-------|
| | Wyniki badań | Wytrzymałość średnia | Wytrzymałość normowa | |
| <i>l</i> | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 42,59 | 42,9 | ≥42,5 | ≤62,5 |
| 2 | 46,07 | | | |
| 3 | 43,98 | | | |
| 4 | 42,90 | | | |
| 5 | 39,40 | | | |
| 6 | 42,58 | | | |

Po 28 dniach dojrzewania próbek poddano je obciążeniu. Uzyskane wyniki wytrzymałości na ściskanie cementu charakteryzowały się małym wskaźnikiem zmienności na poziomie 5% (po dwóch dniach wskaźnik wynosił 13%) oraz dużym współczynnikiem jednorodności 0,92 (0,83 po dwóch dniach) (tabl. 6.3). Wskazuje to na wysoką jakość użytego w badaniach cementu.

Tablica 6.3. Parametry statystyczne wytrzymałości na ściskanie użytego w badaniach cementu

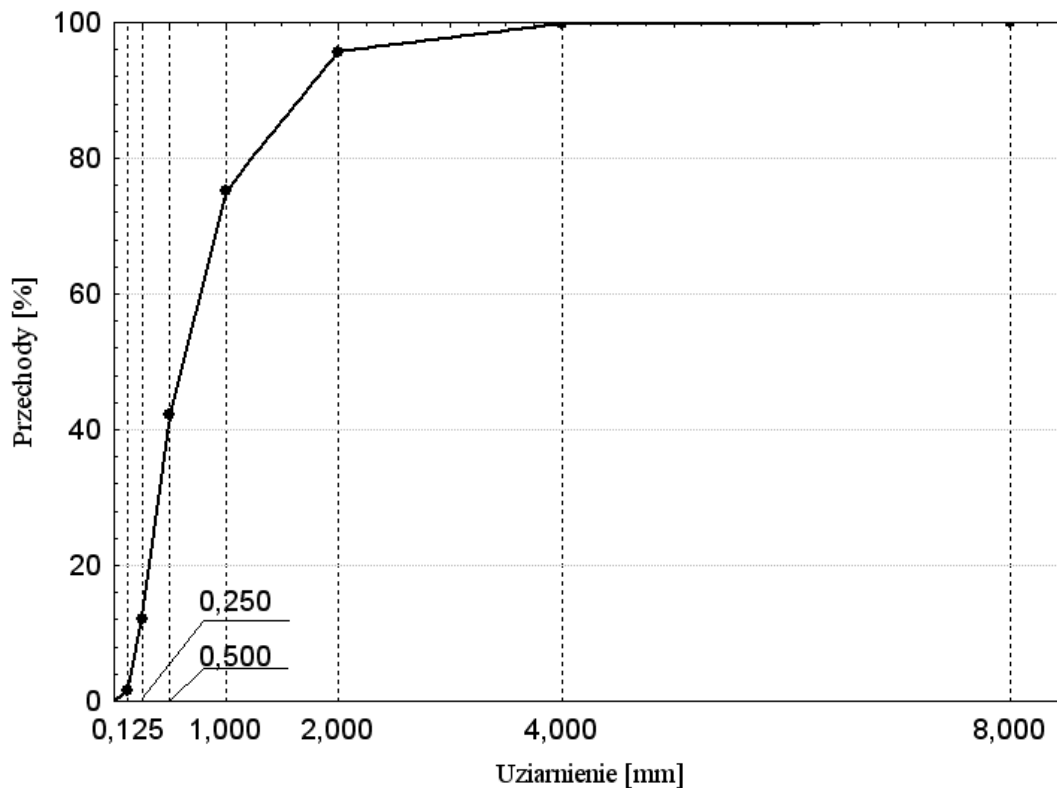
| Parametr analizy statystycznej | Czas dojrzewania [dni] | |
|---|------------------------|-----------|
| | 2 | 28 |
| <i>l</i> | 2 | 3 |
| Wartość średnia f_c [N/mm ²] | 21,1 | 42,9 |
| Odchylenie standardowe σ_{fc} [N/mm ²] | 2,8 | 2,2 |
| Wskaźnik zmienności v_{fc} [%] | 13 | 5 |
| Przedział ufności wartości średniej przy $v=10\%$ oraz $\alpha=0,05$ [N/mm ²] | 18,1÷24,0 | 40,6÷45,2 |
| Wartość minimalna $f_{c,min}$ [N/mm ²] | 17,4 | 39,4 |
| Współczynnik jednorodności k [-] | 0,83 | 0,92 |
| Liczba wyników przyjęta w analizie statystycznej N_w [szt] | 6 | 6 |

Wyniki badań właściwości kruszywa przedstawiono w tabelicy 6.4. Zbadane cechy kruszywa były zgodne z normą przedmiotową PN-EN 12620:2004 [211].

Tablica 6.4. Wybrane cechy kruszywa użytego w badaniach

| L.p. | Cecha | Jednostka | Wartość |
|------|---|-------------------|---------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Zawartość pyłów mineralnych, Z_p | % | 1,3 |
| 2 | Gęstość ziarn, ρ_g | kg/m ³ | 2650 |
| 3 | Gęstość nasypowa w stanie luźnym, ρ_0 | kg/m ³ | 1604 |
| 4 | Gęstość nasypowa w stanie zagęszczonym ρ_z | kg/m ³ | 1806 |
| 5 | Jamistość w stanie luźnym, v_0 | % | 39,5 |
| 6 | Jamistość w stanie zagęszczonym, v_z | % | 31,8 |

Na rys. 6.1 przedstawiono krzywą uziarnienia użytego w badaniach kruszywa. W skład stosu ziarnowego wchodziło kruszywo o frakcji 0-2 mm z ilością nadziarna (frakcja 2-8 mm) równą 4,3%. Kruszywo cechowało się dużą jednorodnością uziarnienia i ciągłością krzywej uziarnienia.



Rys. 6.1. Krzywa uziarnienia kruszywa użytego w badaniach

6.2. Wytrzymałość na ściskanie i zależność naprężenie-odkształcenie przy ściskaniu

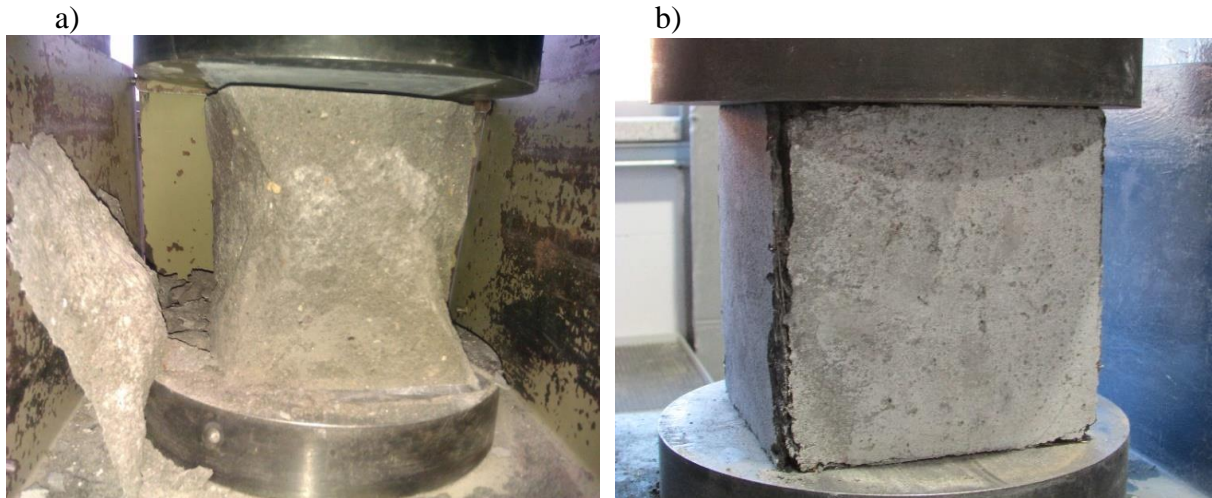
Uzyskane wyniki badań wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu poddano analizie statystycznej. Liczbę próbek, niezbędną do określenia średniej wartości statystycznej wytrzymałości na ściskanie, wyznaczono na podstawie statystycznej analizy wyników badań wstępnych za pomocą rozkładu t-Studenta [134] i założeń podanych w rozdz. 5.3. Najmniejszy wskaźnik zmienności wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu wyniósł 3% dla zawartości włókien 1,5%, największy natomiast 8% dla kompozytu bez włókien (tabl. 6.5). Wskazuje to na dużą jednorodność fibrokompozytu użytego w badaniach.

Tablica 6.5. Parametry statystyczne wytrzymałości na ściskanie badanego fibrokompozytu

| Parametry statystyczne wytrzymałości na ściskanie | Zawartość włókien w kompozycie, V_f [%] | | | | | |
|--|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| l | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Wartość średnia $f_{c,cube}$ [N/mm ²] | 44,0 | 51,8 | 61,4 | 61,6 | 61,3 | 61,9 |
| Odchylenie standardowe S_{fcube} [N/mm ²] | 3,6 | 2,7 | 3,5 | 2,0 | 2,9 | 3,7 |
| Wskaźnik zmienności v_{fcube} [%] | 8 | 5 | 6 | 3 | 5 | 6 |
| Przedział ufności wartości średniej przy $v=10\%$ oraz $\alpha=0,05$ [N/mm ²] | 41,0÷47,0 | 49,3÷54,3 | 58,4÷64,3 | 59,9÷63,3 | 58,8÷63,7 | 58,8-65,0 |
| Wartość minimalna $f_{ccube,min}$ [N/mm ²] | 35,6 | 45,1 | 53,0 | 56,8 | 54,3 | 53,2 |
| Współczynnik jednorodności k [-] | 0,81 | 0,87 | 0,86 | 0,92 | 0,89 | 0,86 |
| Liczba wyników przyjęta w analizie statystycznej N_w [szt] | 8 | 7* | 8 | 8 | 8 | 8 |

* w wyniku przeprowadzonego testu statystycznego Grubbsa odrzucono jeden wynik nie należący do populacji

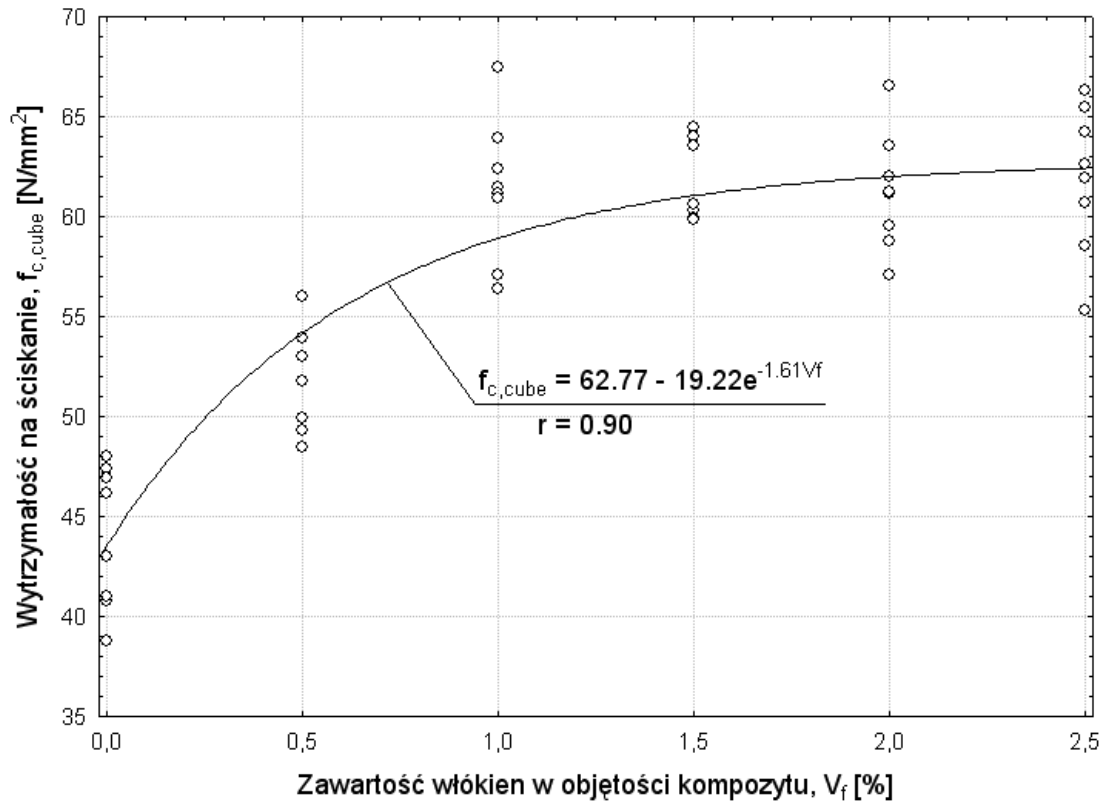
Na rys. 6.2 przedstawiono obraz zniszczenia próbki sześcienniej wykonanej z kompozytu bez włókien i z włóknami stalowymi po badaniu wytrzymałości na ściskanie. Zniszczenie próbki kompozytu bez włókien poddanej ściskaniu wygląda podobnie do zniszczenia próbki wykonanej z betonu zwykłego – zniszczenie przebiega nagle [73, 115]. Kształt próbki po zniszczeniu zbliżony jest do kształtu klepsydry podobnie, jak dla betonu zwykłego. Zniszczenie próbki zawierającej włókna przebiega mniej gwałtownie, widoczne są odspojenia na krawędziach próbki, sama próbka jest podzielona na osobne fragmenty połączone włóknami stalowymi.



Rys. 6.2. Obraz zniszczenia próbki sześcienniej o boku 15 cm wykonanej z kompozytu:
a) bez włókien stalowych, b) z włóknami stalowymi

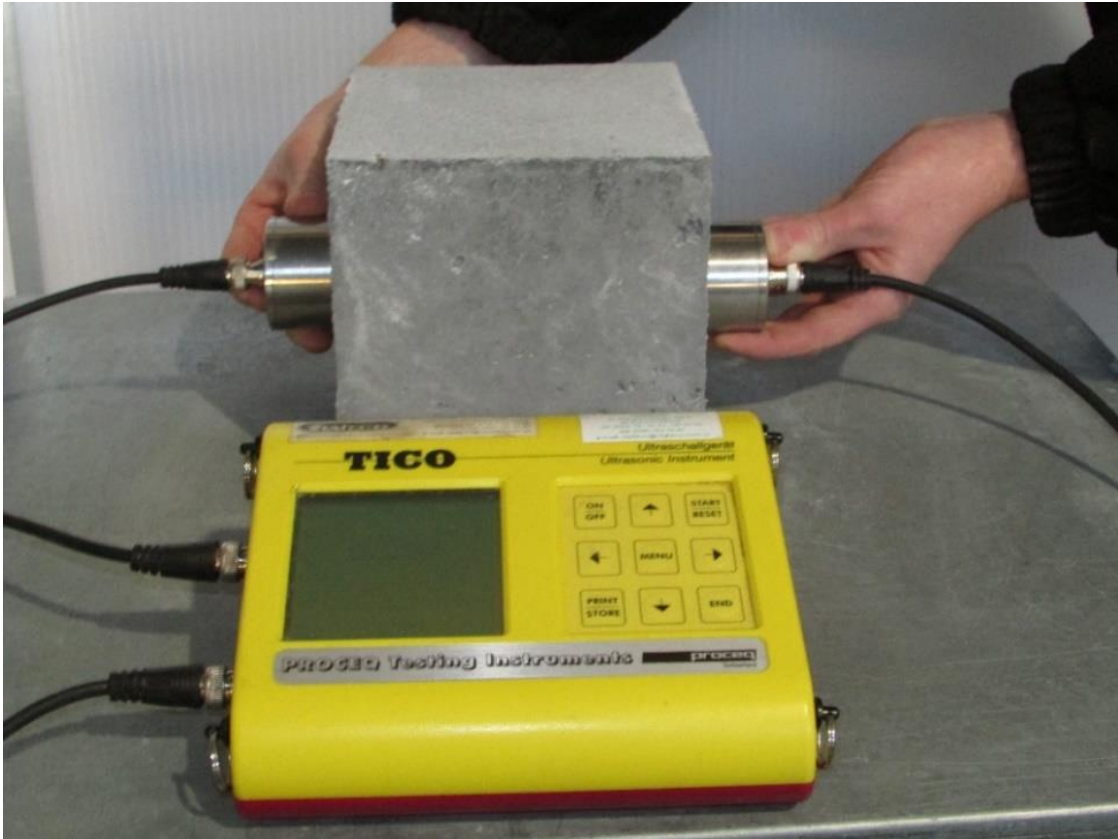
Na podstawie analizy wyników badań wytrzymałości na ściskanie ustalono, że dodatek włókien stalowych do zawartości około $V_f = 1\%$ efektywnie zwiększa wytrzymałość na ściskanie fibrokompozytu (tabl. 6.5). Powyżej tego poziomu nie następuje już istotny wzrost wytrzymałości na ściskanie (por. tabl. 6.5 kolumny 4÷7), różnice pomiędzy wartościami średnimi nie są istotne statystycznie.

Na podstawie krzywej korelacji przedstawionej na rys. 6.3 stwierdzono, że kompozyt nie zawierający włókien charakteryzuje się wytrzymałością na ściskanie o 26% mniejszą niż kompozyt zawierający dodatek włókien stalowych o objętości 1%. Natomiast, jak wynika z krzywej korelacji (rys. 6.3), wytrzymałość fibrokompozytu zawierającego 2,5% włókien jest większa jedynie o 6% w stosunku do materiału zawierającego 1% włókien. Testy statystyczne NIR, Scheffego i Duncana (por. rozdz. 5.3) wykazały, że średnie wytrzymałości na ściskanie badanego kompozytu o zawartościach włókien stalowych 1÷2,5% należą do tej samej populacji. Niewielką zmianę wytrzymałości na ściskanie kompozytu powyżej 1% włókien potwierdzają również inni autorzy [121]. Te powody, a także wysoka cena fibrokompozytu zawierającego dużą zawartość włókien oraz trudności wykonania elementów związane z pogorszoną urabialnością takich mieszanek sprawiają, że użycie dużych zawartości włókien w fibrokompozytach jest nieopłacalne [89]. Włókna zwykle zwiększają wytrzymałość na ściskanie fibrokompozytu, jak wykazali inni autorzy w przedziale od kilku do ponad dwudziestu procent. Przykładowo odnotowano wzrost wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu: 4÷19% dla zawartości włókien $V_f = 1,5\%$ (Yazici z zespołem) [185], 24% dla zawartości włókien $V_f = 0,6\%$ (Wang i współautorzy) [179], 17% dla zawartości włókien $V_f = 1,5\%$ (Prashant i Pawade) [135], 10% dla $V_f = 1,5\%$ (Atis i Karahan) [10].



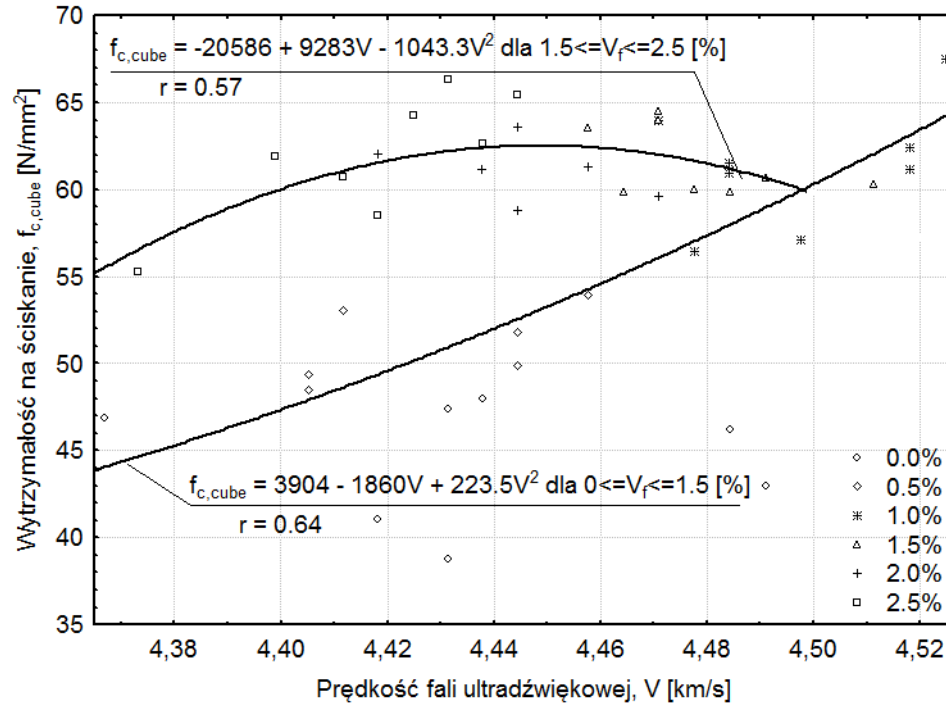
Rys. 6.3. Zależność wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu objętego badaniami od zawartości włókien stalowych

Badania prędkości propagacji fali ultradźwiękowej (rys. 6.4) wykazały, że w przedziale zawartości włókien od 0% do 1,5% prędkość fali ultradźwiękowej zwiększa się wraz z ich zawartością (rys. 6.5). Zwiększa się także wytrzymałość na ściskanie badanego kompozytu. W przedziale od 1,5% do 2,0% zawartości włókien prędkość fali ultradźwiękowej zmniejsza się, natomiast wytrzymałość na ściskanie nieznacznie wzrasta. Wraz z dalszym wzrostem zawartości włókien nie odnotowano już przyrostów wytrzymałości. Powyżej 2% dodatku włókien stalowych obserwuje się dalsze obniżenie prędkości fali ultradźwiękowej.



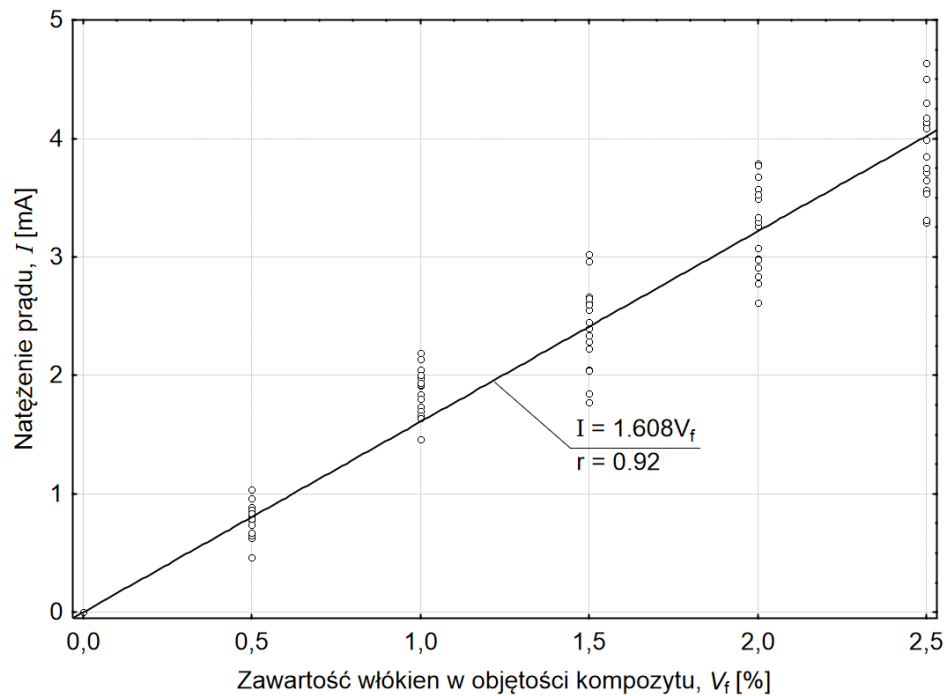
Rys. 6.4. Badania propagacji fali ultradźwiękowej w próbce sześciiennej o boku 15 cm wykonanej z kompozytu zawierającego 1% włókien stalowych

Do opisu korelacji wytrzymałości na ściskanie i prędkości fali ultradźwiękowej użyto dwóch krzywych (rys. 6.5). Analiza statystyczna wykazała, że wyniki badań nie należą do tej samej populacji. Jedna z krzywych opisuje kompozyt o zawartości włókien od 0% do 1,5%, druga kompozyt o zawartości włókien od 1,5% do 2,5%. Taki podział umożliwił opis zmniejszenia prędkości fali ultradźwiękowej w kompozycie po przekroczeniu 1,5% włókien stalowych. Zmniejszenie prędkości fali ultradźwiękowej należy połączyć z zaburzeniem ciągłości struktury związanym z napowietrzeniem mieszanki [185]. Porowatość wpływa na zmniejszenie przyrostu wytrzymałości na ściskanie, ponieważ struktura kompozytu jest bardziej „jamista”. Przy zawartościach włókien do 0,8% nie obserwuje się wzrostu zawartości powietrza w mieszance [31]. Duża zawartość włókien wpływa także na gorszą urabialność fibrokompozytu [173].



Rys. 6.5. Korelacja wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu objętego badaniami i prędkości fali ultradźwiękowej

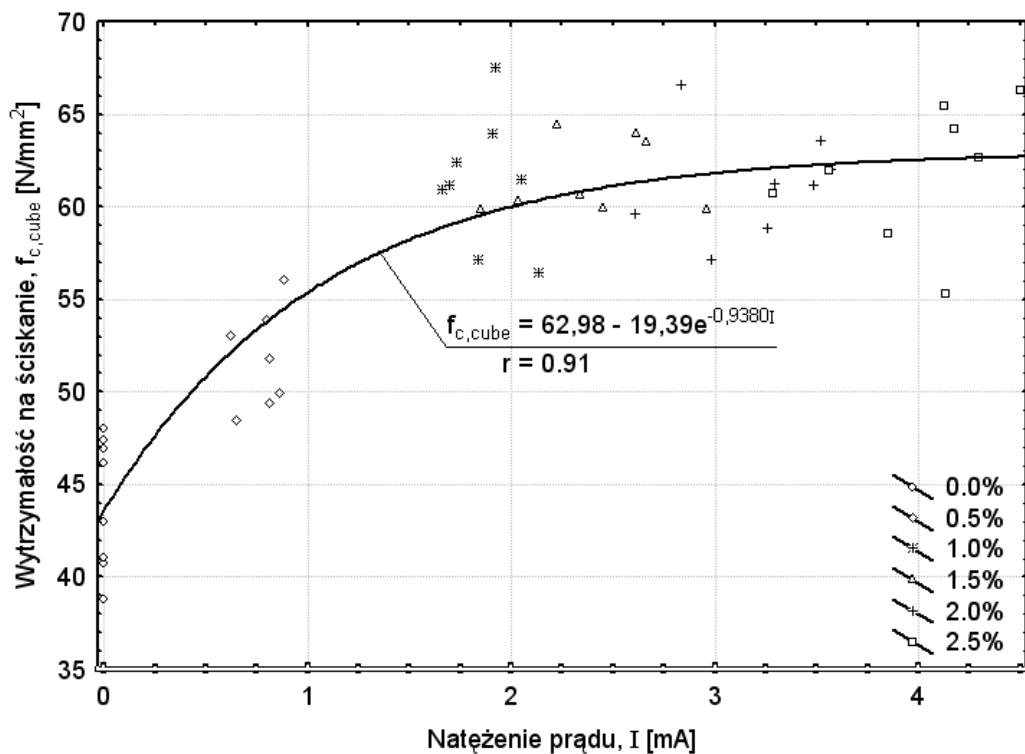
Badania kompozytu przeprowadzone przy użyciu *Femtru* wykazały liniową korelację natężenia prądu i zawartości włókien w fibrokompozycie (rys. 6.6).



Rys. 6.6. Korelacja natężenia indukowanego prądu i zawartości włókien w objętości fibrokompozytu

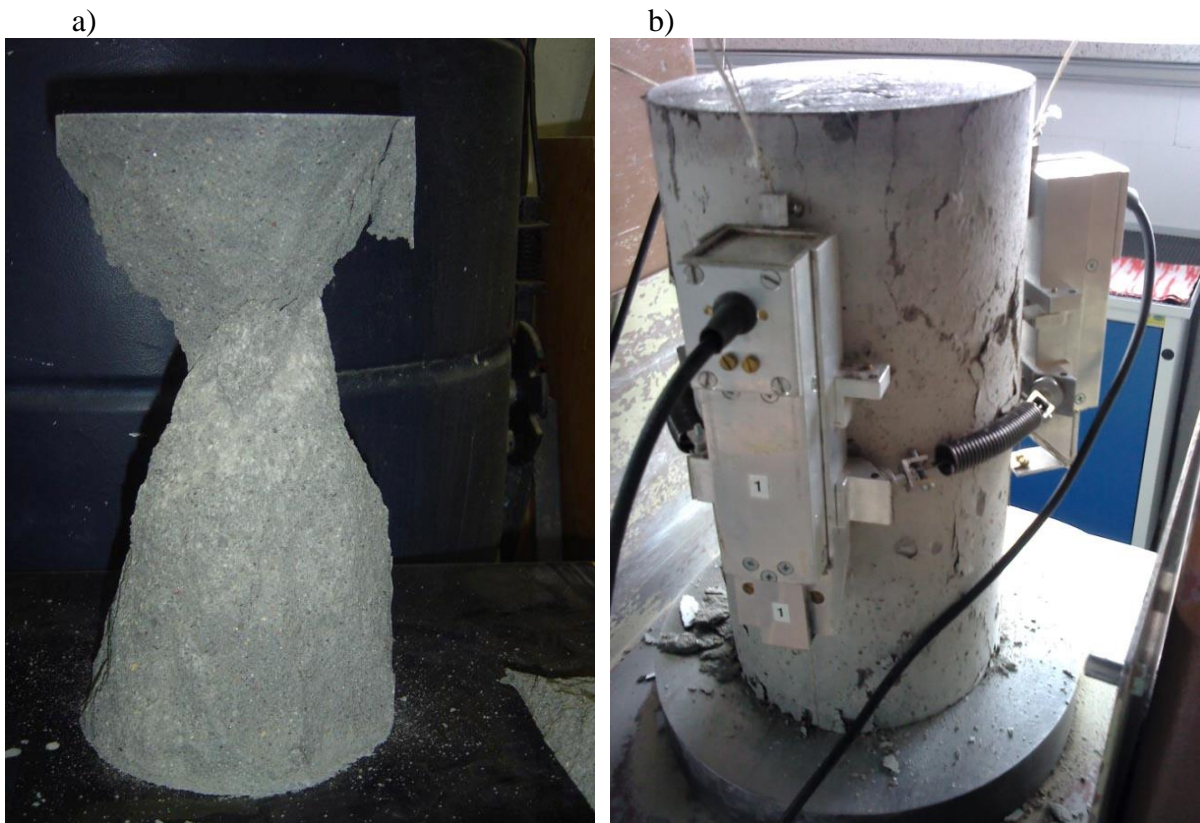
W wyniku analizy korelacyjnej wytrzymałości na ściskanie ($f_{c,cube}$) badanego kompozytu względem natężenia prądu (I), wyznaczono funkcję krzywej regresji (rys. 6.7). Funkcje opisujące korelację wytrzymałości ($f_{c,cube}$) i zawartości włókien (V_f) w kompozycie oraz natężenia prądu (I) (rys. 6.3 i 6.7) mają podobny przebieg. Zgodność przebiegu funkcji pokazanych na rys. 6.3 i 6.7 świadczy o możliwości zastosowania metody indukcji elektromagnetycznej do oceny zawartości zbrojenia rozproszonego w kompozycie. Tym samym udowodniono jedną z postawionych tez, podobną zależność uzyskano także dla pozostałych właściwości fibrokompozytu objętego badaniami (por. rozdz. 6.3, 6.5÷6.8, 6.10).

Badania wykazały, że wytrzymałość na ściskanie zwiększa się wraz ze wzrostem natężenia indukowanego prądu, które jest wprost proporcjonalne do zawartości włókien. Jednak wraz ze wzrostem natężenia prądu obserwowany jest coraz mniejszy przyrost wytrzymałości na ściskanie. Powyżej wartości 3 mA, co odpowiada 1,5-2% zawartości włókien w fibrokompozycie, występuje nieznaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie.



Rys. 6.7. Korelacja wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu objętego badaniami i natężenia prądu

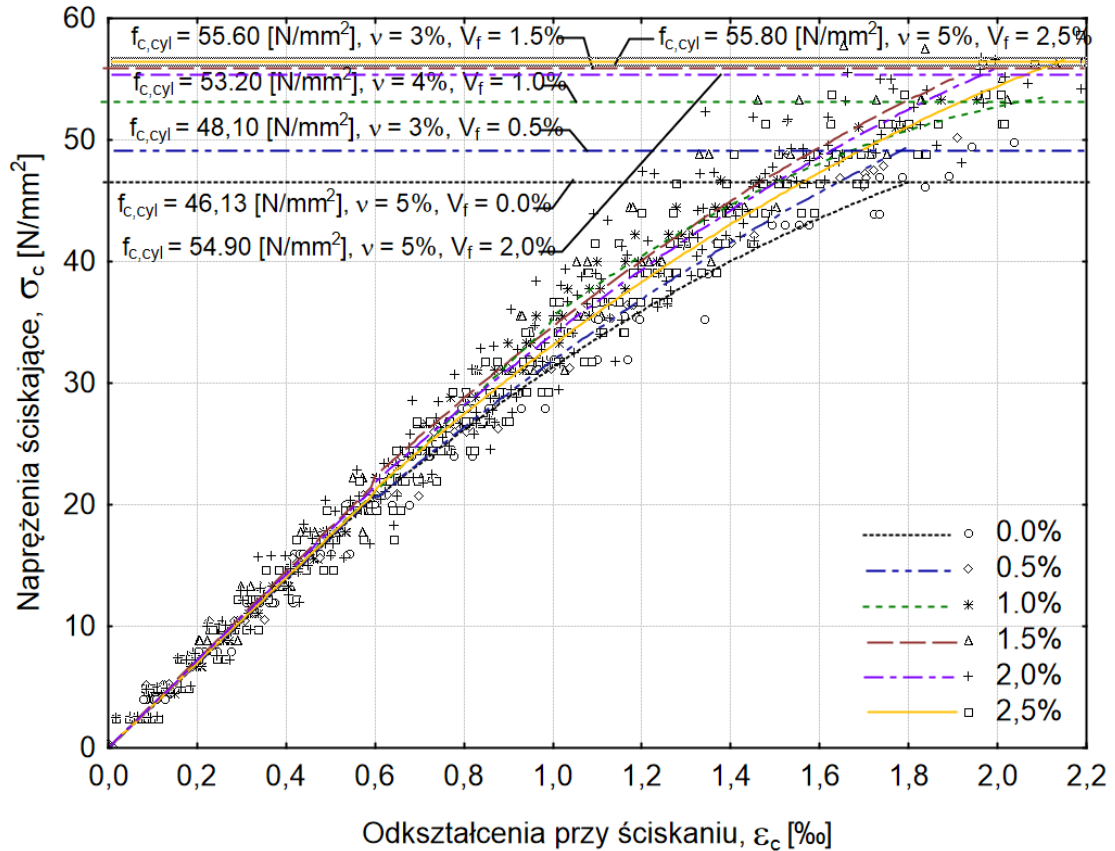
Zależność naprężenie-odkształcenie przy ściskaniu fibrokompozytu badano do momentu zniszczenia próbki. Na rys. 6.8 przedstawiono obrazy przykładowych próbek fibrokompozytu z zawartością włókien stalowych $V_f = 0\%$ i 1,5% po przeprowadzonym badaniu w warunkach ściskania.



Rys. 6.8. Obraz zniszczenia próbki walcowej kompozytu objętego badaniami: a) kompozyt bez włókien, b) kompozyt z zawartością włókien stalowych $V_f = 1,5\%$

Kształt próbki bez włókien po zniszczeniu zbliżony był do kształtu klepsydry podobnie, jak dla betonu zwykłego (rys. 6.8a). Natomiast fragmenty elementów próbnych z włóknami po zniszczeniu połączone były włóknami stalowymi (rys. 6.8b).

Na rys. 6.9 przedstawiono zależność naprężenie-odkształcenie ($\sigma_c - \epsilon_c$) przy ściskaniu drobnokruszywowego kompozytu o różnej zawartości włókien stalowych (V_f). Pokazano także średnią wytrzymałość na ściskanie ($f_{c,cyl}$) kompozytu oraz współczynniki zmienności wytrzymałości na ściskanie ($f_{c,cyl}$). Do opisu zależności ($\sigma_c - \epsilon_c$) przy ściskaniu próbek walcowych zastosowano regresję w postaci „krzywej sklepanej”, co pozwoliło na najlepszy opis zjawiska przy współczynniku korelacji na poziomie 0,99. Duża wartość współczynnika korelacji świadczy o tym, że przyjęte funkcje dobrze opisują zależności $\sigma_c - \epsilon_c$ (tabl. 6.6). Zaproponowane krzywe regresji składają się z części prostoliniowych oraz krzywych w postaci wielomianów drugiego stopnia. Na podstawie korelacji zależności naprężenie-odkształcenie ($\sigma_c - \epsilon_c$) (tabl. 6.6) można stwierdzić, że kompozyt o zawartości włókien 1,5% charakteryzuje się największym tangensem nachylenia prostej korelacyjnej równym 36 w zakresie odkształceń $0 \div 0,6\%$ (co odpowiada 1/3 wartości siły niszczącej).



Rys. 6.9. Zależność naprężenie–odkształcenie przy ściskaniu próbek walcowych fibrokompozytu objętego badaniami

Duża wartość tangensa nachylenia prostej korelacyjnej świadczy o dużej wartości modułu sprężystości fibrokompozytu. Natomiast kompozyt nie zawierający włókien charakteryzuje się najmniejszą wartością tangensa nachylenia tej prostej, moduł sprężystości ma więc wartość najmniejszą. Potwierdziły to badania modułu sprężystości przy ściskaniu opisane w punkcie 6.5.

Tablica 6.6. Zestawienie zależności σ_c - ε_c przy ściskaniu fibrokompozytu o różnej zawartości włókien stawowych

| Funkcja zależności naprężenie-odkształcenie | współczynnik korelacji r [-] | Zawartość włókien V_f [%] |
|---|--------------------------------|-----------------------------|
| $\sigma_c = 34,50\varepsilon_c$, gdy $\varepsilon_c \leq 0,6$ ‰ $\sigma_c = 38,16\varepsilon_c - 6,83\varepsilon_c^2$, gdy $\varepsilon_c > 0,6$ ‰ | 0,99 | 0,0 |
| $\sigma_c = 34,71\varepsilon_c$, gdy $\varepsilon_c \leq 0,6$ ‰ $\sigma_c = 37,40\varepsilon_c - 5,53\varepsilon_c^2$, gdy $\varepsilon_c > 0,6$ ‰ | 0,99 | 0,5 |
| $\sigma_c = 35,10\varepsilon_c$, gdy $\varepsilon_c \leq 1$ ‰ $\sigma_c = 44,75\varepsilon_c - 9,18\varepsilon_c^2$, gdy $\varepsilon_c > 1$ ‰ | 0,99 | 1,0 |
| $\sigma_c = 36,25\varepsilon_c$, gdy $\varepsilon_c \leq 0,6$ ‰ $\sigma_c = 41,03\varepsilon_c - 6,35\varepsilon_c^2$, gdy $\varepsilon_c > 0,6$ ‰ | 0,99 | 1,5 |
| $\sigma_c = 35,84\varepsilon_c$, gdy $\varepsilon_c \leq 0,6$ ‰ $\sigma_c = 40,02\varepsilon_c - 6,03\varepsilon_c^2$, gdy $\varepsilon_c > 0,6$ ‰ | 0,99 | 2,0 |
| $\sigma_c = 34,99\varepsilon_c$, gdy $\varepsilon_c \leq 0,6$ ‰ $\sigma_c = 39,06\varepsilon_c - 5,92\varepsilon_c^2$, gdy $\varepsilon_c > 0,6$ ‰ | 0,99 | 2,5 |

6.3. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu poddano analizie statystycznej. Liczbę próbek, niezbędną do określenia średniej wartości wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, wyznaczono na podstawie rozkładu t-Studenta [134] i założeń podanych w rozdz. 5.3. Najmniejszy wskaźnik zmienności wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu fibrokompozytu wyniósł 4% dla zawartości włókien 1%, największy natomiast 9% dla fibrokompozytu zawierającego 2,5% włókien stalowych (tabl. 6.7). Wskazuje to na dużą jednorodność fibrokompozytu użytego w badaniach.

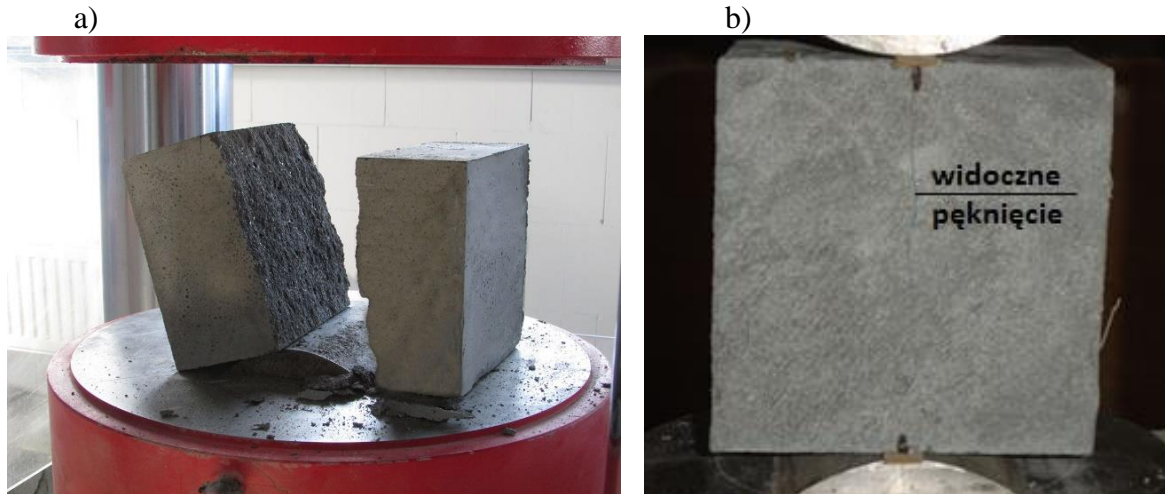
Tablica 6.7. Parametry statystyczne wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu fibrokompozytu objętego badaniami

| Parametry statystyczne wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu | Zawartość włókien w kompozycie V_f [%] | | | | | |
|---|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| l | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Wartość średnia $f_{t,spl}$ [N/mm ²] | 3,3 | 5,5 | 7,7 | 8,3 | 8,8 | 9,2 |
| Odchylenie standardowe $s_{f,t,spl}$ [N/mm ²] | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,8 |
| Wskaźnik zmienności $v_{f,t,spl}$ [%] | 6 | 6 | 4 | 6 | 6 | 9 |
| Przedział ufności wartości średniej przy $v=10\%$ oraz $\alpha=0,05$ [N/mm ²] | 3,1÷3,5 | 5,2÷5,8 | 7,4÷8,0 | 7,8÷8,7 | 8,4÷9,2 | 8,5÷9,9 |
| Wartość minimalna $f_{t,spl,min}$ [N/mm ²] | 2,9 | 4,8 | 6,8 | 7,0 | 7,6 | 7,3 |
| Współczynnik jednorodności k [-] | 0,86 | 0,86 | 0,89 | 0,85 | 0,86 | 0,79 |
| Liczba wyników przyjęta w analizie statystycznej N_w [szt] | 8 | 8 | 7* | 8 | 8 | 8 |

* w wyniku przeprowadzonego testu statystycznego Grubbsa odrzucono jeden wynik nie należący do populacji

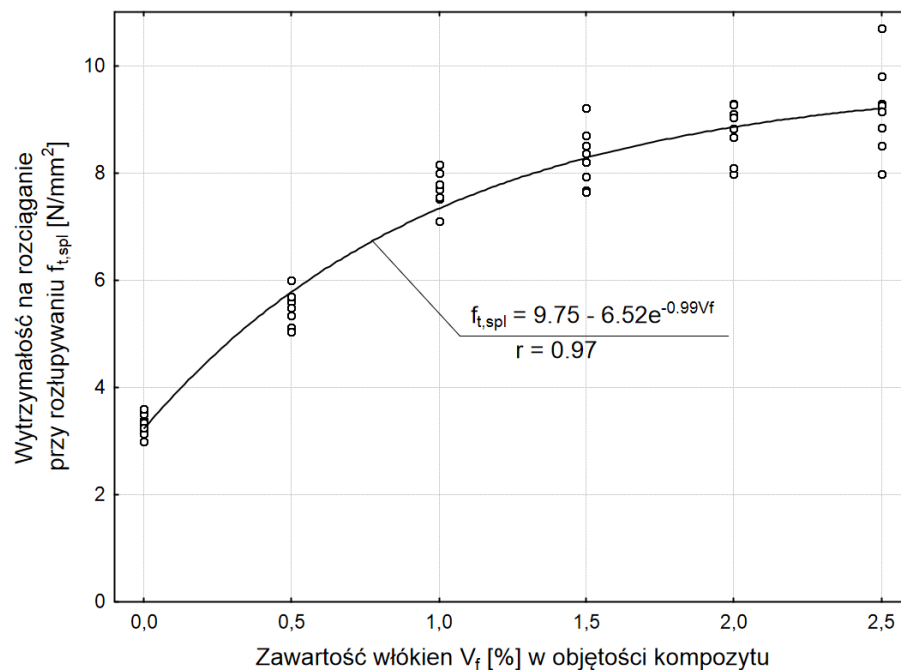
Zniszczenie próbek zawierających włókna przebiegało w inny sposób niż próbek bez włókien stalowych. Próbkę zawierającą włókna nie rozpadały się na części, jak to miało miejsce z próbkami bez włókien – włókna utrzymały fragmenty próbki (por. rys. 6.10 a i b).

Badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu fibrokompozytu wykazały korzystny wpływ dodatku włókien stalowych. Wraz ze wzrostem zawartości włókien zwiększa się wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu (rys. 6.11). Linia trendu pokazująca przebieg tej zależności nie przebiega prostoliniowo, zakrzywia się wraz ze wzrostem zawartości włókien. Świadczy to o tym, że efektywność włókien stalowych zwiększających wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu, pomimo wzrostu tej wytrzymałości, zmniejsza się wraz z zawartością włókien. Zgodnie z przedstawioną na rys. 6.11 krzywą regresji kompozyt nie zawierający włókien miał o 61% mniejszą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu niż kompozyt z zawartością włókien $V_f = 1,5\%$ oraz o 65% mniejszą wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu niż kompozyt z zawartością włókien $V_f = 2,5\%$.



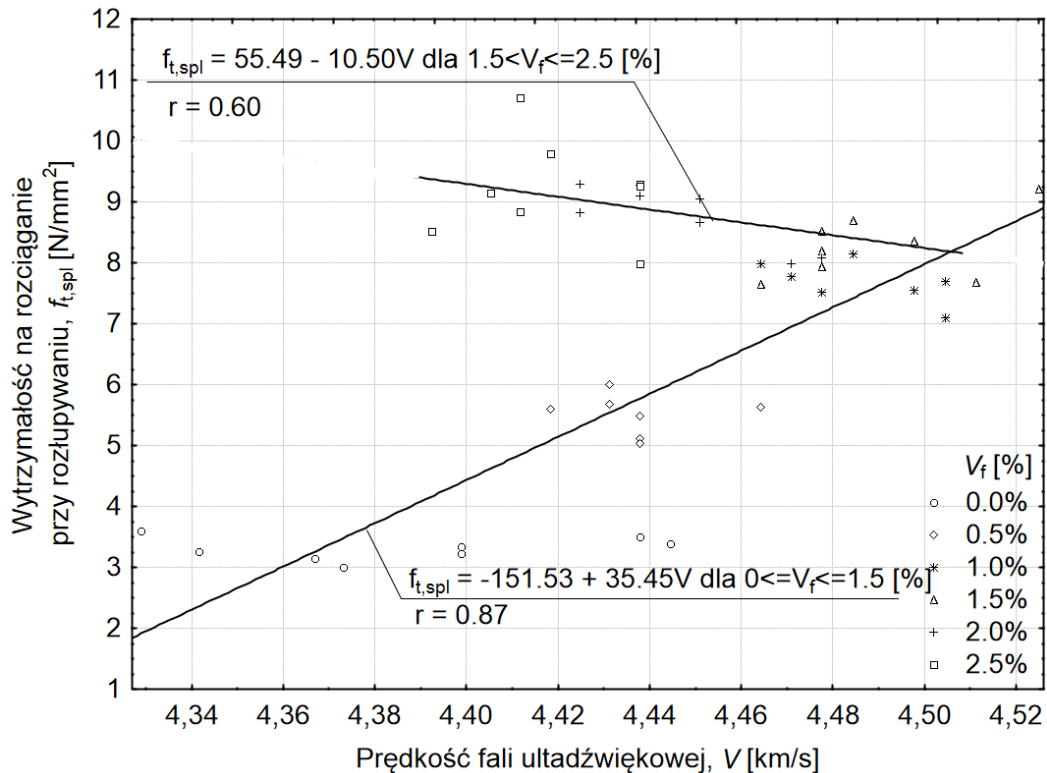
Rys. 6.10. Obraz zniszczenia próbki sześcienniej o boku 15 cm podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wykonanej z kompozytu: a) nie zawierającego włókien, b) zawierającego 1% włókien stalowych

Uzyskane wyniki badań są zgodne z badaniami innych autorów: Yazici [185] opisuje 54% przyrost wytrzymałości przy zastosowaniu zbrojenia rozproszonego dla $V_f = 1,5\%$, Atis 71% $V_f = 1,5\%$ [10]. Test Duncana wykazał, że wartości średnich wytrzymałości dla zawartości włókien 2% i 2,5% nie różnią się od siebie istotnie przy założonym poziomie prawdopodobieństwa 0,05. Jest to potwierdzeniem małej efektywności włókien stalowych w zwiększaniu wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu fibrokompozytu o dużej zawartości włókien.



Rys. 6.11. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu fibrokompozytu objętego badaniami od zawartości włókien stalowych

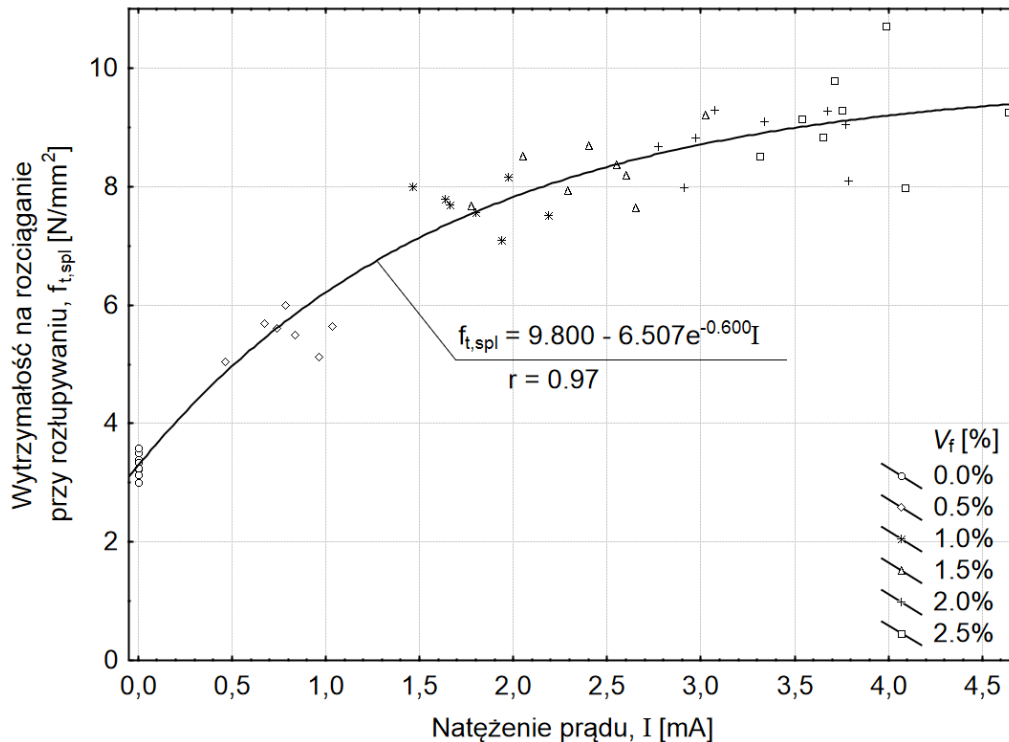
Badania prędkości propagacji fali ultradźwiękowej w kompozycie objętym badaniami wykazały najmniejsze wartości prędkości fali (rzędu $4,32 \div 4,44$ km/s) dla materiału bez dodatku włókien (rys. 6.12). Dla takiego kompozytu wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu była również najmniejsza i kształtowała się na poziomie $3,3$ N/mm² (por. rys. 6.11 i tabl. 6.7). Wraz z dodatkiem włókien stalowych, prędkość przebiegu fali w kompozycie zwiększa się, osiągając największe wartości $4,5$ km/s dla fibrokompozytu o zawartości włókien rzędu $1,5\%$. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu dla takiej zawartości włókien wynosi $8,3$ N/mm². Powyżej $V_f = 1,5\%$ prędkość fali ultradźwiękowej zmniejsza się osiągając wartości $4,40 \div 4,44$ km/s dla fibrokompozytu o zawartości włókien stalowych równej $2,5\%$. Wartość wytrzymałości $f_{t,spl}$ dla materiału o takiej zawartości włókien wynosi $9,2$ N/mm². W celu przedstawienia zjawiska zwiększenia się, a następnie zmniejszenia prędkości fali ultradźwiękowej w kompozycie zaproponowano dwie funkcje regresji: prostą dla kompozytu o zawartości włókien w przedziale 0% do $1,5\%$, której współczynnik korelacji wyniósł $0,87$ i prostą dla kompozytu o zawartości włókien $1,5$ do $2,5\%$ przy współczynniku korelacji równym $0,60$.



Rys. 6.12. Korelacja wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu fibrokompozytu objętego badaniami od prędkości propagacji fali ultradźwiękowej

Zależność funkcyjna wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu ($f_{t,spl}$) i natężenia indukowanego w zbrojeniu rozproszonym prądu (I) charakteryzuje się wysokim współczynnikiem

korelacji równym $r = 0,97$ (rys. 6.13). Świadczy to o tym, że przyjęta funkcja dobrze opisuje wzajemną relację wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu ($f_{t,spl}$) i natężenia prądu (I). Zgodność przebiegu funkcji pokazanych na rys. 6.11 i 6.13 wskazuje na możliwość zastosowania metody indukcji elektromagnetycznej do oceny zawartości zbrojenia rozproszonego w fibrokompozycie. Tym samym udowodniono jedną z postawionych tez rozprawy.



Rys. 6.13. Korelacja wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu fibrokompozytu objętego badaniami i natężenia prądu detektora elektromagnetycznego

Natężenie indukowanego w zbrojeniu rozproszonym prądu jest liniowo proporcjonalne do zawartości włókien w fibrokompozycie (rys. 6.6). Proporcjonalność ta tłumaczy podobieństwo krzywej regresji przedstawionej na rys. 6.11 do krzywej regresji przedstawionej na rys. 6.13. Korelacja wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i natężenia prądu nie przebiega prostoliniowo. Na rys. 6.13 widoczny jest stosunkowo duży przyrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu w zakresie natężenia prądu 0÷2,5 mA. Powyżej tego zakresu następuje niewielki przyrost wytrzymałości. Natężenie prądu 2,5 mA odpowiada zawartości włókien około 1,5 % (por. rys. 6.6). Niewielki przyrost wartości wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, powyżej wymienionego zakresu, stawia pod znakiem zapytania zasadność użycia tak dużej zawartości włókien z powodów ekonomicznych (duży koszt włókien) i technologicznych (gorsza urabialność mieszanki fibrokompozytu).

6.4. Wytrzymałość na osiowe rozciąganie i zależność naprężenie-odkształcenie przy osiowym rozciąganiu

Do analizy wytrzymałości na osiowe rozciąganie przyjęto wyniki uzyskane przy zniszczeniu próbek w obszarze bazy pomiarowej (rys. 6.14). Badania przeprowadzono dla kompozytów o 0%, 1% i 1,5% zawartości włókien, zgodnie z założonym programem badań (por. rozdz. 4.1).



Rys. 6.14. Obraz zniszczenia próbki o wymiarach 10x10x40 cm w badaniu wytrzymałości na osiowe rozciąganie: a) zniszczenie w obszarze bazy pomiarowej, b) poza bazą pomiarową

Wyniki analizy statystycznej przedstawiono w tablicy 6.8. W celu odrzucenia pomiarów nie należących do tej samej populacji zastosowano test Grubbs'a. Najmniejszy wskaźnik zmienności wytrzymałości na osiowe rozciąganie wyniósł 3% dla kompozytu bez włókien, największy 11% dla kompozytu zawierającego 1,5% włókien stalowych (tabl. 6.8). Małe wartości wskaźników zmienności świadczą o dużej jednorodności materiału.

Tablica 6.8. Parametry statystyczne wytrzymałości na osiowe rozciąganie fibrokompozytu objętego badaniami

| Parametry statystyczne wytrzymałości na osiowe rozciąganie | Zawartość włókien w kompozycie V_f [%] | | |
|---|--|-----------|-----------|
| | 0 | 1,0 | 1,5 |
| l | 2 | 3 | 4 |
| Wartość średnia f_t [N/mm ²] | 1,9 | 3,0 | 3,3 |
| Odchylenie standardowe s_{ft} [N/mm ²] | 0,06 | 0,28 | 0,36 |
| Wskaźnik zmienności v_{ft} [%] | 3 | 9 | 11 |
| Przedział ufności wartości średniej przy $v=10\%$ oraz $\alpha=0,05$ [N/mm ²] | 1,83÷1,92 | 2,70÷3,29 | 3,06÷3,60 |
| Wartość minimalna f_{\min} [N/mm ²] | 1,8 | 2,27 | 2,51 |
| Współczynnik jednorodności k [-] | 0,96 | 0,76 | 0,75 |
| Liczba wyników przyjęta w analizie statystycznej N_w [szt] | 7* | 6** | 9 |

* - odrzucono dwa wyniki nie należące do populacji,

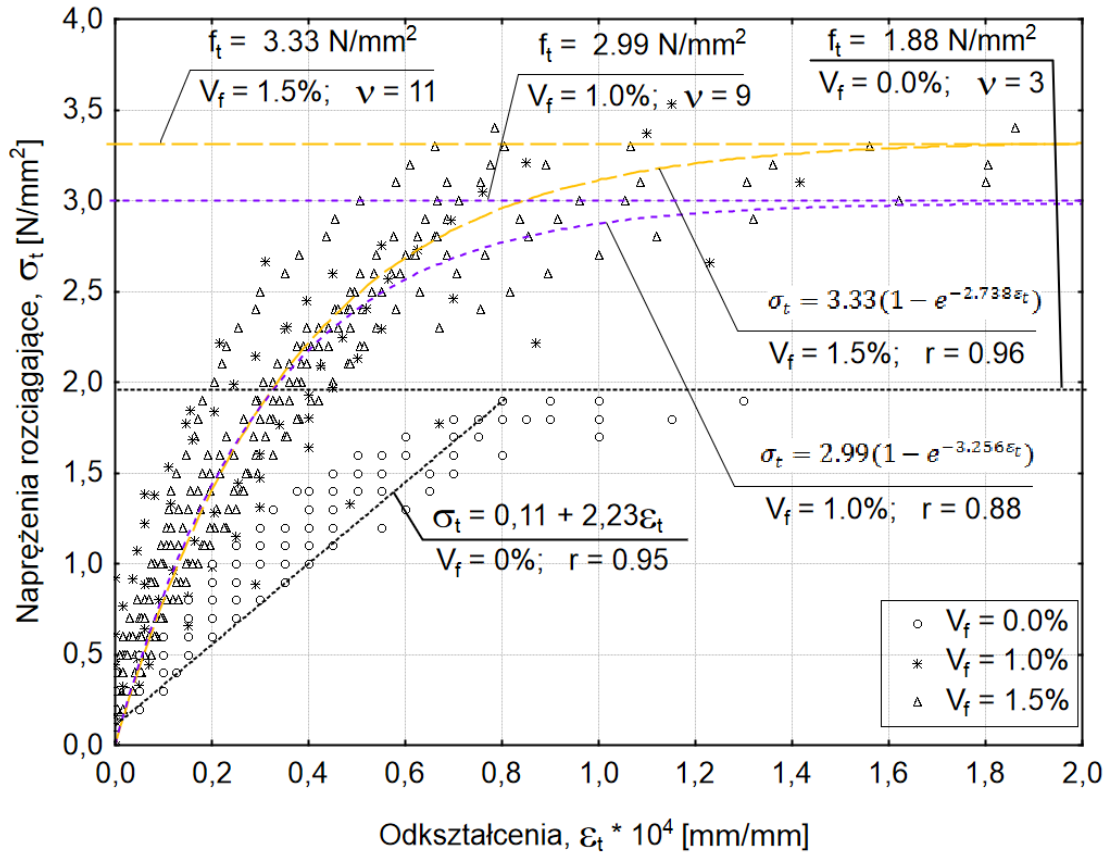
** - odrzucono trzy wyniki nie należące do populacji

Badania wytrzymałości na osiowe rozciąganie wykazały, że fibrokompozyt z zawartością 1,5% włókien charakteryzuje się o 10% większą wytrzymałością niż fibrokompozyt z $V_f = 1\%$. Natomiast w porównaniu z kompozytem bez włókien cechuje go o 65% większa wytrzymałość. Na podstawie wyników badań ustalono związki konstytutywne naprężenie-odkształcenie (σ - ε) kompozytu z 0%, 1,0% i 1,5% zawartością włókien stalowych. Zależność naprężenie-odkształcenie przedstawiona na rys. 6.15 wykazuje, że przy niewielkich naprężeniach nie występują różnice w przyroście odkształceń pomiędzy kompozytem z zawartością włókien stalowych 1% i 1,5%. Po przekroczeniu naprężeń granicznych wytrzymałości na rozciąganie matrycy, siły rozciągające przenoszone zostają stopniowo na włókna stalowe. Nachylenie krzywej naprężenie-odkształcenie jest tym bardziej "strome" im większa jest zawartość włókien. Włókna przenosząc część naprężeń matrycy zmniejszają wartości odkształceń liniowych kompozytu wywołanych siłami rozciągającymi. Odkształcenie liniowe przy osiowym rozciąganiu dla kompozytu z 1,0% oraz 1,5% zawartością włókien wyrażane są zależnościami:

$$\varepsilon_{t,V_f=1,0} = \frac{\ln\left(1 - \frac{\sigma_t}{2,99}\right)}{-3,256} \cdot 10^{-4} \quad (6.1),$$

$$\varepsilon_{t,V_f=1,5} = \frac{\ln\left(1 - \frac{\sigma_t}{3,33}\right)}{-2,738} \cdot 10^{-4} \quad (6.2).$$

Przykładowo, dla naprężeń $2,9 \text{ N/mm}^2$ odkształcenia wynoszą odpowiednio: $1,08 \cdot 10^{-4}$ [mm/mm] dla $V_f = 1\%$ oraz $0,75 \cdot 10^{-4}$ [mm/mm] przy $V_f = 1,5\%$. Zatem fibrokompozyt z większą zawartością włókien wykazuje mniejsze odkształcenia liniowe dla tych samych naprężeń.



Rys. 6.15. Zależność naprężenie-odkształcenie przy osiowym rozciąganiu dla fibrokompozytu użytego w badaniach

6.5. Moduł sprężystości przy ściskaniu

Na rys. 6.16 pokazano próbkę podczas badania modułu sprężystości przy ściskaniu. Wyniki badań modułu sprężystości przy ściskaniu poddano analizie statystycznej, które przedstawiono w tabelicy 6.9. Na podstawie rozkładu t-Studenta [134] i założeń podanych w rozdz. 5.3 stwierdzono, że liczba próbek była wystarczająca dla miarodajnej oceny wartości średniej statycznego modułu sprężystości (E). Wskaźnik zmienności nie przekroczył 4%. Wskazuje to na dużą jednorodność fibrokompozytu. W celu odrzucenia pomiarów nie należących do tej samej populacji zastosowano test Grubbs'a (tabl. 6.9).

Tablica 6.9. Parametry statystyczne modułu sprężystości przy ściskaniu fibrokompozytu użytego w badaniach

| Parametry statystyczne modułu sprężystości | Zawartość włókien w kompozycie V_f [%] | | | | | |
|--|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| l | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Wartość średnia E [GPa] | 32,9 | 33,3 | 34,5 | 34,7 | 34,0 | 33,9 |
| Odchylenie standardowe s_E [GPa] | 0,8 | 1,2 | 0,9 | 1,3 | 1,3 | 1,0 |
| Wskaźnik zmienności v_E [%] | 2 | 4 | 2 | 4 | 4 | 3 |
| Przedział ufności wartości średniej przy $v=10\%$ oraz $\alpha=0,05$ [GPa] | 32,0÷33,7 | 32,4÷34,2 | 33,8÷35,2 | 33,7÷35,7 | 32,9÷35,1 | 33,1÷34,6 |
| Wartość minimalna E_{\min} [GPa] | 31,9 | 31,9 | 33,4 | 33,1 | 32,5 | 32,4 |
| Liczba wyników przyjęta w analizie statystycznej N_w [szt] | 6* | 9 | 8** | 9 | 8** | 9 |

* - odrzucono trzy wyniki nie należące do populacji,

** - odrzucono jeden wynik nie należący do populacji

Na podstawie analizy wyników badań przedstawionych w tablicy 6.9 można stwierdzić, że największą średnią wartość modułu sprężystości przy ściskaniu uzyskano dla fibrokompozytu zawierającego 1,5% włókien stalowych, natomiast najmniejszą tj. 32,9 GPa dla materiału bez włókien. Przeprowadzony test t-Studenta potwierdził, że te średnie wartości modułu sprężystości przy ściskaniu różnią się od siebie istotnie na poziomie prawdopodobieństwa 0,05. Można więc przyjąć, że dodatek włókien stalowych wpływa w istotny sposób na wartość modułu sprężystości przy ściskaniu fibrokompozytu objętego badaniami. Według Nevill'a [116] wartości modułu sprężystości dla betonu o wytrzymałości na ściskanie około $f_{c,cube}=50\div 60$ N/mm² (a więc takiej, jaką charakteryzował się fibrokompozyt objęty badaniami) zawierają się w zakresie 24÷38 GPa. Sahin dla kompozytu o podobnym stosunku wodno-cementowym ($w/c=0,35$) uzyskał wartości statycznego modułu sprężystości przy ściskaniu 36,7 GPa ($V_f=0\%$) oraz 39,5 GPa ($V_f=1\%$) [143].

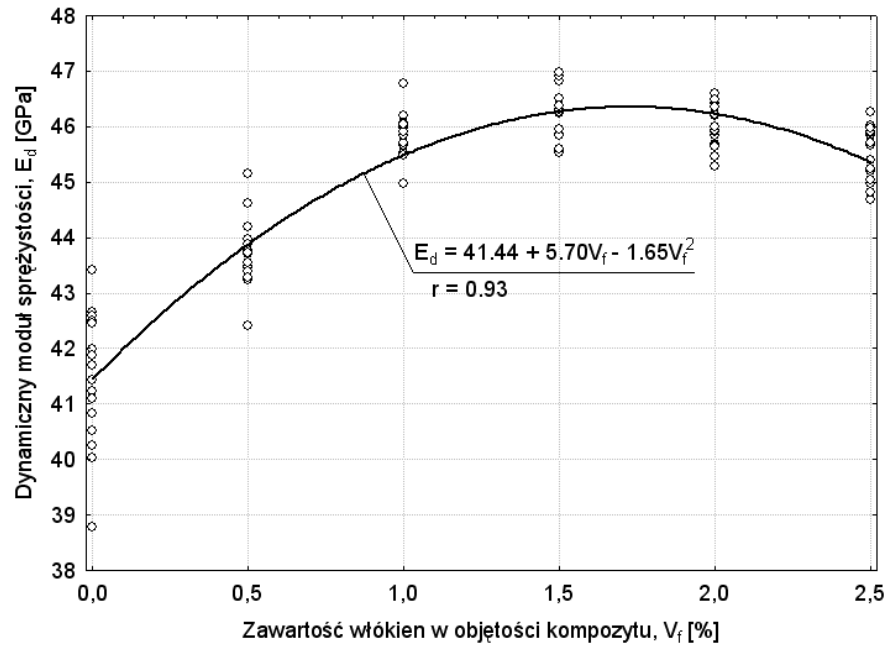
6.6. Dynamiczny moduł sprężystości

Wyniki badań dynamicznego modułu sprężystości (E_d) poddano analizie statystycznej. Na podstawie obliczonej minimalnej liczby próbek potrzebnych do badań przy użyciu rozkładu t-Studenta [134] i założeń podanych w rozdz. 5.3, stwierdzono, że liczba próbek była wystarczająca dla miarodajnej oceny wartości średniej dynamicznego modułu sprężystości (E_d). Wskaźniki zmienności wyników badań dynamicznego modułu sprężystości nie przekroczyły 3% dla kompozytu bez włókien i 1,5% dla materiału zawierającego włókna stalowe. Świadczy to o dużej jednorodności fibrokompozytu. Na podstawie testu Grubbs'a wykazano, że wszystkie wartości modułu E_d należały do badanych populacji. Dane statystyczne przedstawiono w tablicy 6.10.

Tablica 6.10. Parametry statystyczne dynamicznego modułu sprężystości fibrokompozytu objętego badaniami

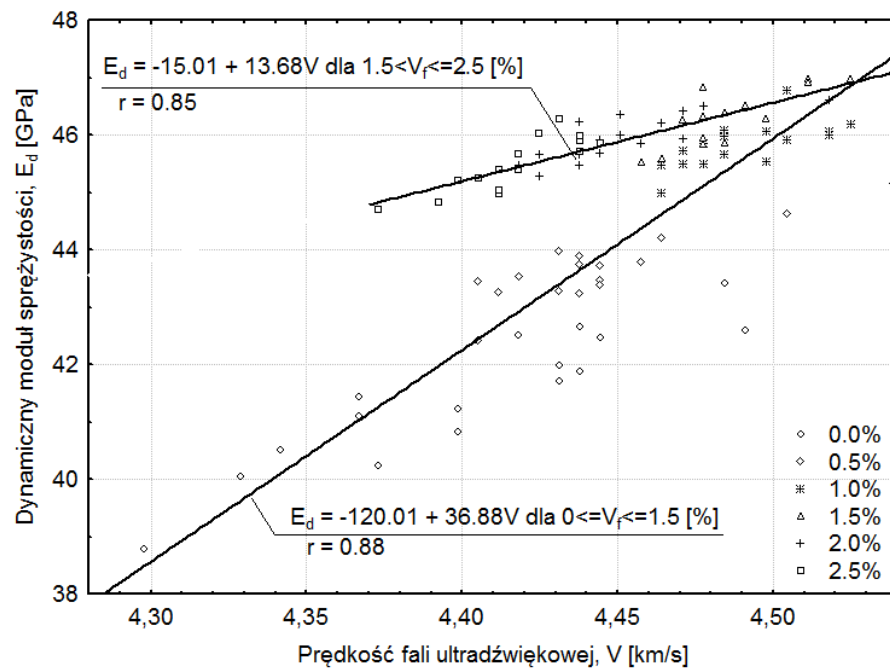
| Parametry statystyczne dynamicznego modułu sprężystości | Zawartość włókien w kompozycie V_f [%] | | | | | |
|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| <i>l</i> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Wartość średnia E_d [GPa] | 41,46 | 43,69 | 45,82 | 46,25 | 45,95 | 45,50 |
| Odchylenie standardowe s_{Ed} [GPa] | 1,19 | 0,62 | 0,41 | 0,50 | 0,40 | 0,47 |
| Wskaźnik zmienności v_{Ed} [%] | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Przedział ufności wartości średniej przy $v=10\%$ oraz $\alpha=0,05$ [GPa] | 40,82÷42,09 | 43,36÷42,09 | 45,61÷42,09 | 45,98÷42,09 | 45,73÷42,09 | 45,25÷42,09 |
| Wartość minimalna E_{dmin} [GPa] | 38,92 | 42,37 | 44,96 | 45,19 | 45,09 | 44,49 |
| Współczynnik jednorodności k [-] | 0,94 | 0,97 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,98 |
| Liczba wyników przyjęta w analizie statystycznej N_w [szt] | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |

Na podstawie danych przedstawionych w tablicy 6.10 można stwierdzić, że największą średnią wartością dynamicznego modułu sprężystości $E_d = 46,3$ GPa charakteryzuje się fibrokompozyt o zawartości włókien stalowych około 1,5%. Powyżej tej granicy następuje pogorszenie badanej wielkości fizycznej. Kompozyt zawierający 2,5% włókien stalowych charakteryzuje się o 2% mniejszą wartością dynamicznego modułu sprężystości niż kompozyt zawierający 1,5% włókien (por. tabl. 6.10). Najmniejszą wartością dynamicznego modułu sprężystości $E_d = 41,5$ [GPa] cechuje się kompozyt bez włókien (tabl. 6.10). Dla kompozytu nie zawierającego włókien odnotowano o 10% mniejszą wartość dynamicznego modułu sprężystości E_d niż dla kompozytu o $V_f = 1,5\%$ (tabl. 6.10). Na podstawie przeprowadzonego testu t-Studenta stwierdzono, że średnie wartości dynamicznego modułu sprężystości dla fibrokompozytu zawierającego 1,5% włókien oraz kompozytu bez włókien różnią się od siebie w sposób statystycznie istotny na poziomie istotności 0,05. Neville oraz Kolas i Williams [115, 92] wykazali, że wartość dynamicznego modułu sprężystości dla betonu zwykłego jest większa niż wartość statycznego modułu sprężystości, co potwierdza przedstawione w rozprawie wyniki badań.



Rys. 6.17. Zależność dynamicznego modułu sprężystości fibrokompozytu objętego badaniami od zawartości włókien stalowych

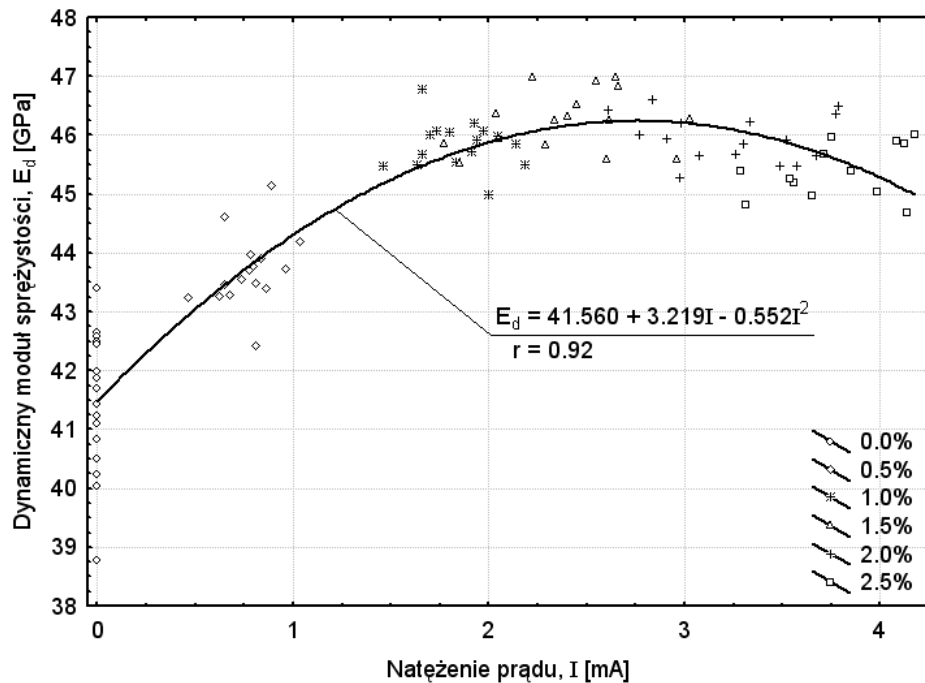
Na rys. 6.18 przedstawiono korelację dynamicznego modułu sprężystości fibrokompozytu objętego badaniami i prędkości fali ultradźwiękowej. Zależność tę opisano dwoma funkcjami regresji: dla kompozytów zawierających 0÷1,5% włókien oraz 1,5÷2,5% włókien.



Rys. 6.18. Korelacja dynamicznego modułu sprężystości fibrokompozytu objętego badaniami i prędkości propagacji fali ultradźwiękowej

W przedziale zawartości włókien stalowych 0÷1,5% prędkość fali ultradźwiękowej wzrasta od wartości 4,30 km/s w kompozycie bez włókien i osiąga maksimum 4,52 km/s w materiale o 1,5% zawartości włókien. Proporcjonalnie do prędkości fali wzrasta również wartość dynamicznego modułu sprężystości, która zawiera się w przedziale 39÷47 GPa. Powyżej 1,5% zawartości włókien stalowych prędkość fali ultradźwiękowej zmniejsza się do wartości 4,37 km/s, natomiast wartość dynamicznego modułu sprężystości zmniejsza się do wartości 45 GPa.

Korelacja dynamicznego modułu sprężystości i natężenia prądu przedstawiona została na rys. 6.19. Ekstremum przedstawionej na wykresie funkcji odpowiada natężeniu prądu równemu 2,9 mA, co odpowiada 1,8% zawartości włókien w badanym fibrokompozycie (rys. 6.6). Pogorszenie dynamicznego modułu sprężystości po przekroczeniu zawartości włókien 1,8% ma związek z większą porowatością fibrokompozytu spowodowaną napowietrzeniem mieszanki, przez zbyt dużą zawartość włókien stalowych, w trakcie procesu mieszania składników. Zgodność przebiegu funkcji pokazanych na rys. 6.17 i 6.19 świadczy o możliwości zastosowania metody indukcji elektromagnetycznej do oceny zawartości zbrojenia rozproszonego w kompozycie. Tym samym udowodniono jedną z postawionych tez rozprawy.



Rys. 6.19. Korelacja dynamicznego modułu sprężystości fibrokompozytu objętego badaniami i natężenia prądu

6.7. Dynamiczny moduł odkształcenia postaciowego

Dynamiczny moduł odkształcenia postaciowego wyznaczono badając częstotliwości drgań własnych belek (por. rys. 5.7). Przebiegi czasowe wywoływanych drgań skrętnych były poddawane transformacji Fourier'a. Dla uzyskanych wyników przeprowadzono analizę statystyczną. Liczbę próbek, niezbędną do określenia średniej wartości dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego G_d , wyznaczono na podstawie statystycznej analizy wyników badań wstępnych za pomocą rozkładu t-Studenta [134] i założeń podanych w rozdz. 5.3. Najmniejszy wskaźnik zmienności dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego fibrokompozytu wyniósł 0,5% dla kompozytu bez włókien, największy 1,4% dla fibrokompozytu o $V_f = 1\%$ włókien stalowych. Świadczy to o dużej jednorodności fibrokompozytu. Z uzyskanych wyników odrzucono pomiary nie należące do tej samej populacji posługując się testem Grubbs'a (tabl. 6.11).

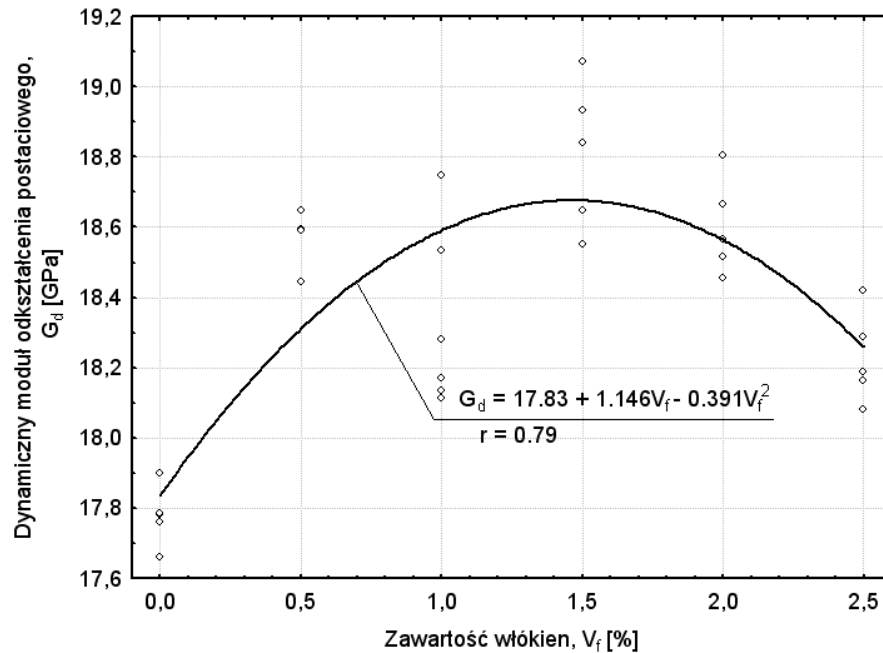
Tablica 6.11. Parametry statystyczne dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego fibrokompozytu objętego badaniami

| Parametry statystyczne dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego | Zawartość włókien w kompozycie V_f [%] | | | | | |
|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| <i>l</i> | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Wartość średnia G_d [GPa] | 17,78 | 18,54 | 18,33 | 18,81 | 18,60 | 18,23 |
| Odchylenie standardowe s_{Gd} [GPa] | 0,09 | 0,09 | 0,26 | 0,21 | 0,14 | 0,13 |
| Wskaźnik zmienności v_{Gd} [%] | 0,5 | 0,5 | 1,4 | 1,1 | 0,7 | 0,7 |
| Przedział ufności wartości średniej przy $v=10\%$ oraz $\alpha=0,05$ [GPa] | 17,67÷17,88 | 18,43÷18,66 | 18,06÷18,60 | 18,55÷19,07 | 18,43÷18,77 | 18,07÷18,39 |
| Wartość minimalna G_{dmin} [GPa] | 17,54 | 18,29 | 17,67 | 18,22 | 18,22 | 17,87 |
| Współczynnik jednorodności k [-] | 0,99 | 0,99 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 0,98 |
| Liczba wyników przyjęta w analizie statystycznej N_w [szt] | 5* | 5* | 6 | 5* | 5* | 5* |

* - odrzucono jeden wynik nie należący do populacji

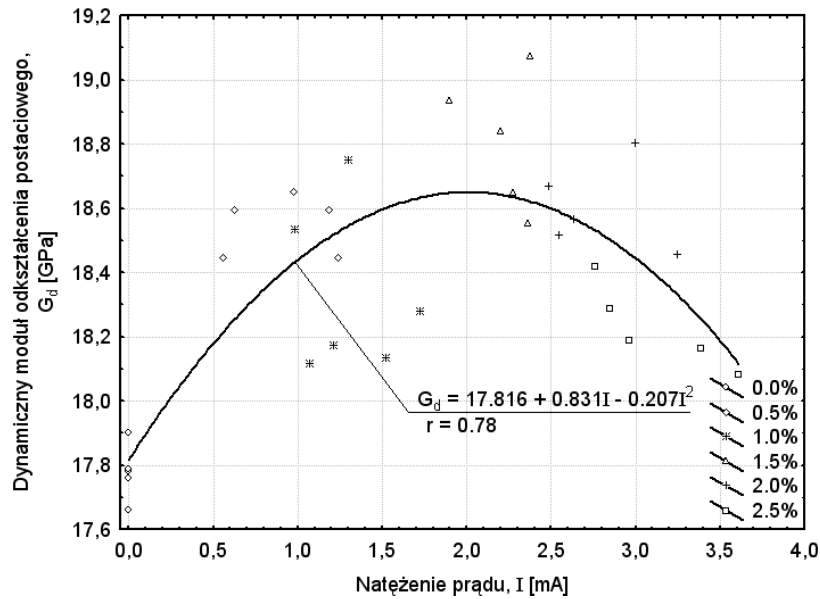
Badania dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego (G_d) fibrokompozytu wykazały korzystny wpływ dodatku włókien stalowych w przedziale $V_f = 0\div 1,5\%$ na jego wartości (rys. 6.20). Do podobnych rezultatów doszli także Teng i współautorzy [169]. Powyżej 1,5% zawartości włókien w fibrokompozycie następuje obniżenie wartości dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego. Fibrokompozyt zawierający 2,5% włókien stalowych charakteryzuje się około 3% mniejszą wartością dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego niż fibrokompozyt

zawierający 1,5% włókien. Kompozyt nie zawierający włókien ma wartość modułu odkształcenia postaciowego (G_d) o około 5% mniejszą niż kompozyt o zawartości włókien $V_f = 1,5\%$ (rys. 6.20). Na podstawie wykonanego testu t-Studenta stwierdzono na poziomie istotności 0,05, że średnie wartości dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego dla fibrokompozytu z 1,5% włókien oraz bez włókien nie należą do tej samej populacji wyników. Stąd wniosek, że zawartość włókien stalowych wpływa na tę właściwość fibrokompozytu.



Rys. 6.20. Zależność dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego fibrokompozytu od zawartości włókien stalowych

Na rys. 6.21 przedstawiono relację dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego (G_d) i natężenia prądu (I). Na wykresie widoczny jest przyrost dynamicznego modułu sprężystości od wartości 17,8 GPa przy natężeniu prądu 0 mA (kompozyt bez włókien) do wartości 18,65 GPa przy natężeniu prądu 2 mA, co odpowiada zawartości włókien stalowych rzędu 1,3% (por. rys. 6.6). Po przekroczeniu wartości 2 mA następuje zmniejszenie dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego do 18,1 GPa. Zgodność przebiegu funkcji pokazanych na rys. 6.20 i 6.21 świadczy o możliwości zastosowania metody indukcji elektromagnetycznej do oceny zawartości zbrojenia rozproszonego w fibrokompozycie drobnokruszywowym. Tym samym udowodniono jedną z postawionych tez w niniejszej dysertacji.



Rys. 6.21. Korelacja dynamicznego modułu odkształcenia postaciowego fibrokompozytu objętego badaniami i natężenia prądu

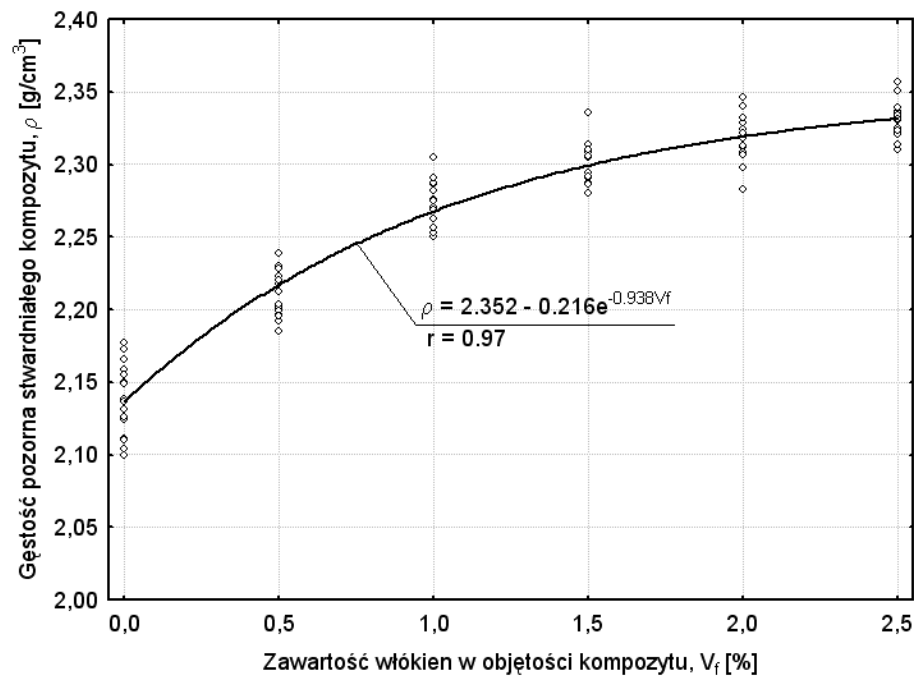
6.8. Gęstość pozorna

Wyniki badań gęstości pozornej (ρ) fibrokompozytu poddano analizie statystycznej. Liczbę próbek, niezbędną do określenia średniej wartości statystycznej gęstości pozornej fibrokompozytu, wyznaczono na podstawie statystycznej analizy wyników badań wstępnych za pomocą rozkładu t-Studenta [134] i założeń podanych w rozdz. 5.3. Analiza statystyczna wyników badań wykazała, że fibrokompozyt charakteryzuje się dużą jednorodnością. Wskaźnik zmienności wyniósł 1,2% w przypadku kompozytu bez włókien oraz nie przekroczył 1% dla kompozytu z dodatkiem włókien w przedziale 0,5÷2,5% (tabl. 6.12). Wszystkie wartości średnie gęstości pozornej należały do badanych populacji.

Tablica 6.12. Parametry statystyczne gęstości pozornej fibrokompozytu objętego badaniami

| Parametry statystyczne gęstości pozornej | Zawartość włókien w kompozycie V_f [%] | | | | | |
|---|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| l | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Wartość średnia ρ [g/cm ³] | 2,14 | 2,21 | 2,27 | 2,30 | 2,32 | 2,33 |
| Odchylenie standardowe s_p [g/cm ³] | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,01 |
| Wskaźnik zmienności v_p [%] | 1,2 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,5 |
| Przedział ufności wartości średniej przy $v=10\%$ oraz $\alpha=0,05$ [g/cm ³] | 2,12÷2,15 | 2,20÷2,22 | 2,26÷2,28 | 2,29÷2,31 | 2,31÷2,33 | 2,32÷2,34 |
| Wartość minimalna ρ_{\min} [g/cm ³] | 2,09 | 2,18 | 2,24 | 2,27 | 2,29 | 2,31 |
| Współczynnik jednorodności k [-] | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 0,99 | 0,99 |
| Liczba wyników przyjęta w analizie statystycznej N_w [szt] | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |

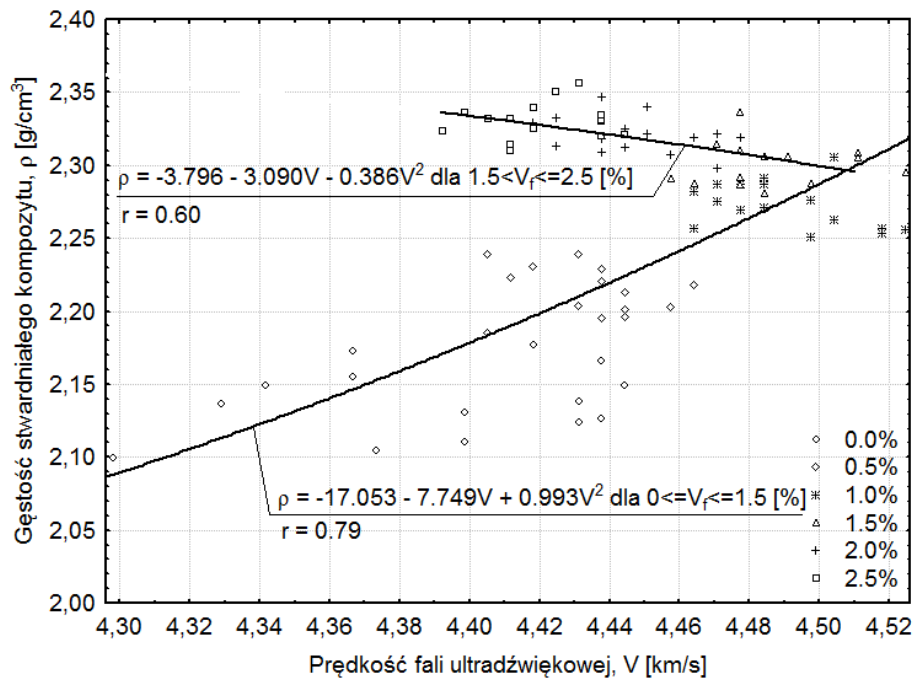
Z analizy wyników badań gęstości pozornej (ρ) fibrokompozytu wynika naturalna zależność przedstawiona na rys. 6.22. Wzrost gęstości wraz z dodatkiem włókien stalowych. Przyczyną zaobserwowanej relacji jest kilkukrotnie większa gęstość stali w stosunku do gęstości matrycy kompozytu. Zależność ta nie przebiega jednak prostoliniowo, jak można byłoby spodziewać się z rachunku zastępowania matrycy włóknami stalowymi. Po przekroczeniu objętości włókien w mieszance kompozytu równej 1,5% obserwuje się bardzo powolny wzrost jego gęstości. Zjawisko to należy tłumaczyć tym, że włókna mają zdolność do napowietrzania mieszanki [108], czego następstwem jest zwiększona porowatość stwardniałej matrycy i w konsekwencji mniejszy przyrost jej gęstości. Powierzchnia zespolenia pojedynczego włókna z matrycą maleje wraz ze wzrostem ilości pustych przestrzeni w postaci porów lub kawern w mieszance, osłabiając tym samym przyczepność włókien do matrycy. Zaobserwowane zjawisko wydaje się być kluczem do wyjaśnienia przyczyn pogarszania się niektórych właściwości mechanicznych fibrokompozytów z dużą zawartością włókien stalowych, mając zasadnicze znaczenie dla jego trwałości oraz mechanizmu niszczenia się ustroju.



Rys. 6.22. Zależność gęstości pozornej fibrokompozytu objętego badaniami od zawartości włókien stalowych

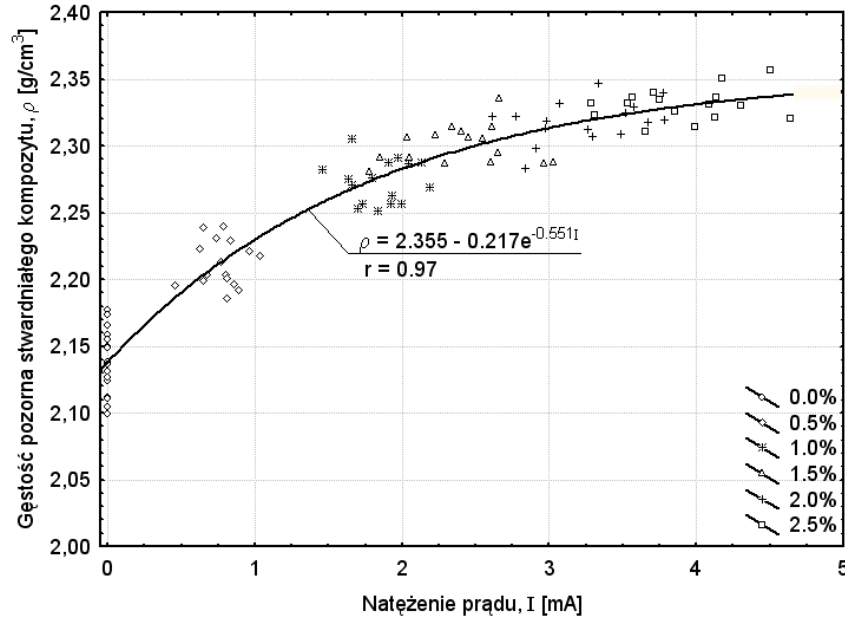
Korelacja gęstości pozornej fibrokompozytu objętego badaniami i prędkości propagacji fali ultradźwiękowej opisana została przez dwie krzywe w postaci wielomianów drugiego stopnia (rys. 6.23). Pierwszy z wielomianów opisuje wzrost prędkości fali ultradźwiękowej obserwowany dla

kompozytu o zawartości włókien w przedziale od 0% do 1,5%. Współczynnik korelacji wynosi 0,8. Drugi z wielomianów przedstawia odwrócenie tendencji wzrostowej w kierunku spadku prędkości fali ultradźwiękowej w badanym fibrokompozycie przy dalszym wzroście zawartości włókien. Tendencja ta obserwowana jest dla kompozytu o zawartości włókien w przedziale 1,5%÷2,5%. Współczynnik korelacji dla krzywej w tym zakresie wynosi 0,6. Wraz ze wzrostem gęstości pozornej w podanym zakresie obserwuje się spadek prędkości fali ultradźwiękowej z wartości około 4,5 km/s do wartości 4,4 km/s. Znajduje to potwierdzenie w spadku przyrostu gęstości badanego fibrokompozytu wraz z przekroczeniem 1,5% zawartości włókien (por. rys. 6.22 i 6.23).



Rys. 6.23. Korelacja gęstości pozornej fibrokompozytu objętego badaniami i prędkości propagacji fali ultradźwiękowej

Na rys. 6.24 przedstawiono korelację gęstości pozornej (ρ) fibrokompozytu objętego badaniami i natężenia prądu (I). Natężenie prądu wskazuje na zawartość zbrojenia w fibrokompozycie, co tłumaczy podobny przebieg zależności funkcyjnych zamieszczonych na rys. 6.22 i 6.24. Zgodność przebiegu funkcji pokazanych na rys. 6.22 i 6.24 wskazuje na możliwość zastosowania metody indukcji elektromagnetycznej do oceny zawartości zbrojenia rozproszonego w kompozycie. Tym samym udowodniono jedną z postawionych tez w rozprawie doktorskiej.



Rys. 6.24. Korelacja gęstości pozornej fibrokompozytu objętego badaniami i natężenia prądu

Korelacja natężenia prądu i gęstości pozornej fibrokompozytu wykazała, że zależność tych wielkości nie przebiega prostoliniowo. Zjawisko to spowodowane jest napowietrzaniem mieszanki przez włókna stalowe [108], czego następstwem jest zwiększona porowatość stwardniałej matrycy oraz mniejszy przyrost jej gęstości.

6.9. Skurcz

Przebieg w czasie skurczu autogenicznego (związanego z zachodzącymi zjawiskami fizykochemicznymi) kompozytu z włóknami stalowymi aproksymowano funkcją w postaci:

$$\varepsilon_s(t) = \varepsilon_{sk} \left(1 - e^{-\alpha t^\beta}\right), \quad (6.2)$$

gdzie: ε_{sk} – końcowa wartość skurczu [%], α , β – parametry doświadczalne, t – czas w dniach.

Na podstawie uzyskanych wyników badań (tabl. 6.13) stwierdzono, że skurcz fibrokompozytu objętego badaniami był około dwukrotnie większy niż skurcz betonu zwykłego. Wynika to z zastosowania w badanym kompozycie drobnego kruszywa jako wypełniacza. Jednak zaletą takiego wypełniacza jest możliwość znacznego polepszenia właściwości mechanicznych fibrokompozytu. Można to osiągnąć przez zastosowanie większej zawartości włókien stalowych niż w przypadku tradycyjnych kompozytów o wypełniaczach żwirowo-piaskowych.

Badania zakończono po ustabilizowaniu się skurczu fibrokompozytu, co nastąpiło po 600 dniach od chwili rozpoczęcia badań. Wskaźnik zmienności skurczu zmniejszał się w miarę upływu czasu zawierając się w przedziale 17÷73 % w pierwszym dniu badania do wartości 6÷12 % po 600

dniach badania. W analizie nie uwzględniono wyników nie należących do tej samej populacji (por. tabl. 6.13).

Tablica 6.13. Parametry statystyczne skurczu fibrokompozytu objętego badaniami

| Zawartość włókien w kompozycie [%] | Termin badania [dni] | Wartość średnia ϵ_s [mm/m] | Odchylenie standardowe S_{ϵ_s} [mm/m] | Wskaźnik zmienności V_{ϵ_s} [%] | Przedział ufności wartości średniej przy $v=10\%$ oraz $\alpha=0,05$ [mm/m] | Wartość minimalna ϵ_{smin} [mm/m] | Współczynnik jednorodności k [-] | Liczba wyników przyjęta w analizie statystycznej [szt] |
|------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|--|--|---|--|------------------------------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 0,0 | 1 | 0,09 | 0,02 | 26 | 0,07-0,11 | 0,03 | 0,36 | 8 |
| | 2 | 0,17 | 0,03 | 20 | 0,14-0,2 | 0,09 | 0,52 | 8 |
| | 7 | 0,37 | 0,04 | 10 | 0,34-0,41 | 0,28 | 0,75 | 7* |
| | 10 | 0,47 | 0,03 | 7 | 0,44-0,5 | 0,39 | 0,83 | 7* |
| | 14 | 0,54 | 0,04 | 6 | 0,50-0,57 | 0,45 | 0,83 | 7* |
| | 30 | 0,66 | 0,04 | 5 | 0,62-0,69 | 0,57 | 0,86 | 7* |
| | 90 | 0,80 | 0,04 | 4 | 0,76-0,83 | 0,70 | 0,88 | 7* |
| | 200 | 0,83 | 0,04 | 5 | 0,79-0,87 | 0,73 | 0,87 | 7* |
| | 300 | 0,90 | 0,04 | 3 | 0,86-0,93 | 0,81 | 0,90 | 7* |
| | 400 | 0,94 | 0,04 | 4 | 0,90-0,97 | 0,84 | 0,90 | 7* |
| | 500 | 0,94 | 0,04 | 4 | 0,90-0,98 | 0,88 | 0,93 | 7* |
| 600 | 0,95 | 0,05 | 6 | 0,92-1,02 | 0,88 | 0,91 | 7* | |
| 0,5 | 1 | 0,10 | 0,05 | 40 | 0,08-0,12 | 0,03 | 0,30 | 8 |
| | 2 | 0,15 | 0,02 | 16 | 0,13-0,17 | 0,10 | 0,63 | 8 |
| | 7 | 0,34 | 0,03 | 10 | 0,31-0,37 | 0,26 | 0,76 | 8 |
| | 10 | 0,43 | 0,03 | 7 | 0,41-0,45 | 0,36 | 0,84 | 8 |
| | 14 | 0,51 | 0,05 | 10 | 0,47-0,55 | 0,39 | 0,76 | 8 |
| | 30 | 0,61 | 0,05 | 7 | 0,58-0,65 | 0,51 | 0,83 | 8 |
| | 90 | 0,75 | 0,06 | 8 | 0,7-0,8 | 0,62 | 0,82 | 8 |
| | 200 | 0,78 | 0,05 | 6 | 0,74-0,82 | 0,67 | 0,85 | 8 |
| | 300 | 0,84 | 0,06 | 7 | 0,79-0,89 | 0,70 | 0,84 | 8 |
| | 400 | 0,87 | 0,05 | 6 | 0,84-0,92 | 0,76 | 0,87 | 8 |
| | 500 | 0,86 | 0,04 | 5 | 0,82-0,90 | 0,81 | 0,94 | 8 |
| 600 | 0,85 | 0,05 | 6 | 0,81-0,89 | 0,78 | 0,92 | 8 | |
| 1,0 | 1 | 0,13 | 0,05 | 40 | 0,09-0,17 | 0,01 | 0,06 | 8 |
| | 2 | 0,20 | 0,07 | 34 | 0,14-0,26 | 0,04 | 0,20 | 8 |
| | 7 | 0,39 | 0,08 | 20 | 0,32-0,45 | 0,20 | 0,53 | 8 |
| | 10 | 0,47 | 0,08 | 17 | 0,4-0,54 | 0,28 | 0,59 | 8 |
| | 14 | 0,55 | 0,08 | 14 | 0,48-0,61 | 0,36 | 0,66 | 8 |
| | 30 | 0,66 | 0,09 | 13 | 0,59-0,73 | 0,46 | 0,69 | 8 |
| | 90 | 0,76 | 0,08 | 11 | 0,69-0,83 | 0,57 | 0,75 | 8 |
| | 200 | 0,78 | 0,09 | 12 | 0,7-0,86 | 0,56 | 0,71 | 8 |
| | 300 | 0,88 | 0,08 | 9 | 0,82-0,95 | 0,69 | 0,78 | 8 |
| | 400 | 0,88 | 0,09 | 9 | 0,81-0,96 | 0,67 | 0,76 | 8 |
| | 500 | 0,89 | 0,08 | 9 | 0,81-0,94 | 0,74 | 0,83 | 8 |
| 600 | 0,89 | 0,11 | 12 | 0,80-0,98 | 0,70 | 0,79 | 8 | |

c.d. tablicy 6.13.

| Zawartość włókien w kompozycie [%] | Termin badania [dni] | Wartość średnia ϵ_s [mm/m] | Odchylenie standardowe S_{ϵ_s} [mm/m] | Wskaźnik zmienności V_{ϵ_s} [%] | Przedział ufności wartości średniej przy $v=10\%$ oraz $\alpha=0,05$ [mm/m] | Wartość minimalna ϵ_{smin} [mm/m] | Współczynnik jednorodności k [-] | Liczba wyników przyjęta w analizie statystycznej [szt] |
|------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|--|--|---|--|------------------------------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1,5 | 1 | 0,10 | 0,02 | 17 | 0,08-0,11 | 0,06 | 0,61 | 8 |
| | 2 | 0,15 | 0,02 | 16 | 0,13-0,17 | 0,10 | 0,63 | 8 |
| | 7 | 0,34 | 0,03 | 10 | 0,31-0,37 | 0,26 | 0,76 | 8 |
| | 10 | 0,43 | 0,03 | 7 | 0,41-0,45 | 0,36 | 0,84 | 8 |
| | 14 | 0,51 | 0,05 | 10 | 0,47-0,55 | 0,39 | 0,76 | 8 |
| | 30 | 0,61 | 0,05 | 7 | 0,58-0,65 | 0,51 | 0,83 | 8 |
| | 90 | 0,75 | 0,06 | 8 | 0,7-0,8 | 0,62 | 0,82 | 8 |
| | 200 | 0,78 | 0,05 | 6 | 0,74-0,82 | 0,67 | 0,85 | 8 |
| | 300 | 0,84 | 0,06 | 7 | 0,79-0,89 | 0,70 | 0,84 | 8 |
| | 400 | 0,87 | 0,05 | 6 | 0,84-0,92 | 0,76 | 0,87 | 8 |
| | 500 | 0,86 | 0,04 | 5 | 0,82-0,90 | 0,81 | 0,94 | 8 |
| 600 | 0,85 | 0,05 | 6 | 0,81-0,89 | 0,78 | 0,92 | 8 | |
| 2,0 | 1 | 0,11 | 0,05 | 42 | 0,07-0,14 | 0,04 | 0,37 | 8 |
| | 2 | 0,20 | 0,05 | 27 | 0,16-0,24 | 0,08 | 0,40 | 8 |
| | 7 | 0,40 | 0,10 | 24 | 0,33-0,48 | 0,23 | 0,57 | 8 |
| | 10 | 0,53 | 0,06 | 12 | 0,48-0,58 | 0,40 | 0,76 | 8 |
| | 14 | 0,55 | 0,07 | 13 | 0,49-0,60 | 0,42 | 0,77 | 8 |
| | 30 | 0,63 | 0,08 | 12 | 0,57-0,69 | 0,48 | 0,76 | 8 |
| | 90 | 0,70 | 0,07 | 11 | 0,64-0,76 | 0,57 | 0,81 | 8 |
| | 200 | 0,76 | 0,08 | 11 | 0,69-0,82 | 0,63 | 0,83 | 8 |
| | 300 | 0,79 | 0,08 | 11 | 0,72-0,86 | 0,67 | 0,85 | 8 |
| | 400 | 0,78 | 0,10 | 12 | 0,70-0,86 | 0,63 | 0,81 | 8 |
| | 500 | 0,82 | 0,09 | 11 | 0,75-0,89 | 0,70 | 0,85 | 8 |
| 600 | 0,82 | 0,09 | 11 | 0,74-0,90 | 0,67 | 0,82 | 8 | |
| 2,5 | 1 | 0,07 | 0,05 | 73 | 0,03-0,11 | 0,01 | 0,14 | 8 |
| | 2 | 0,20 | 0,08 | 42 | 0,13-0,26 | 0,08 | 0,40 | 8 |
| | 7 | 0,34 | 0,07 | 20 | 0,29-0,40 | 0,26 | 0,75 | 8 |
| | 10 | 0,41 | 0,07 | 18 | 0,35-0,46 | 0,32 | 0,79 | 8 |
| | 14 | 0,50 | 0,07 | 14 | 0,45-0,56 | 0,40 | 0,80 | 8 |
| | 30 | 0,59 | 0,08 | 14 | 0,53-0,66 | 0,48 | 0,81 | 8 |
| | 90 | 0,67 | 0,09 | 13 | 0,60-0,73 | 0,55 | 0,83 | 8 |
| | 200 | 0,72 | 0,07 | 10 | 0,66-0,77 | 0,62 | 0,87 | 8 |
| | 300 | 0,80 | 0,09 | 12 | 0,73-0,87 | 0,70 | 0,87 | 8 |
| | 400 | 0,73 | 0,07 | 10 | 0,68-0,79 | 0,64 | 0,87 | 8 |
| | 500 | 0,76 | 0,08 | 11 | 0,70-0,82 | 0,67 | 0,88 | 8 |
| 600 | 0,77 | 0,08 | 10 | 0,72-0,83 | 0,66 | 0,85 | 8 | |

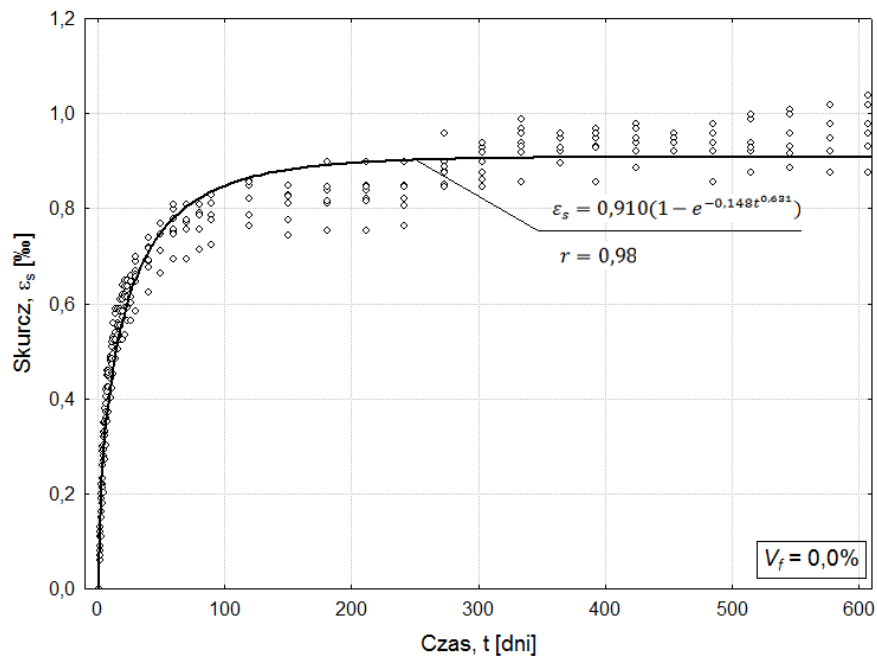
* - odrzucono jeden wynik

Największy skurcz o wartości 0,91% odnotowano dla kompozytu nie zawierającego włókien (por. tabl. 6.14 i rys. 6.25). Wskaźnik zmienności wyznaczony dla ustabilizowanych wartości skurczu nie przekroczył wartości 12% (tabl. 6.13).

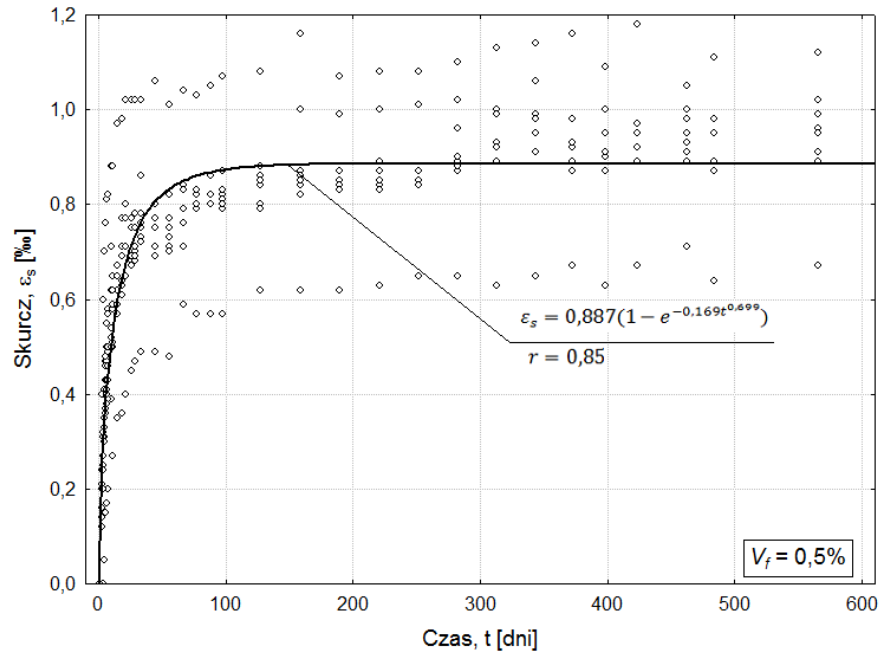
Włókna stalowe ograniczają skurcz, który w fibrokompozycie o zawartości włókien 0÷2,5% wynosi zgodnie z krzywymi regresji odpowiednio: 0,91÷0,75‰ (por. rys. 6.25÷6.30 oraz tabl. 6.14). Tak więc fibrokompozyt o zawartości włókien 2,5% charakteryzuje się skurczem o 18% mniejszym niż kompozyt bez dodatku włókien. Zmniejszenie skurczu przytaczane przez innych badaczy to 21% dla betonu zwykłego modyfikowanego dodatkiem 1,5% włókien stalowych [10], 24% dla betonów lekkich [30].

Tablica 6.14. Zależność przebiegu skurczu fibrokompozytu objętego badaniami w czasie

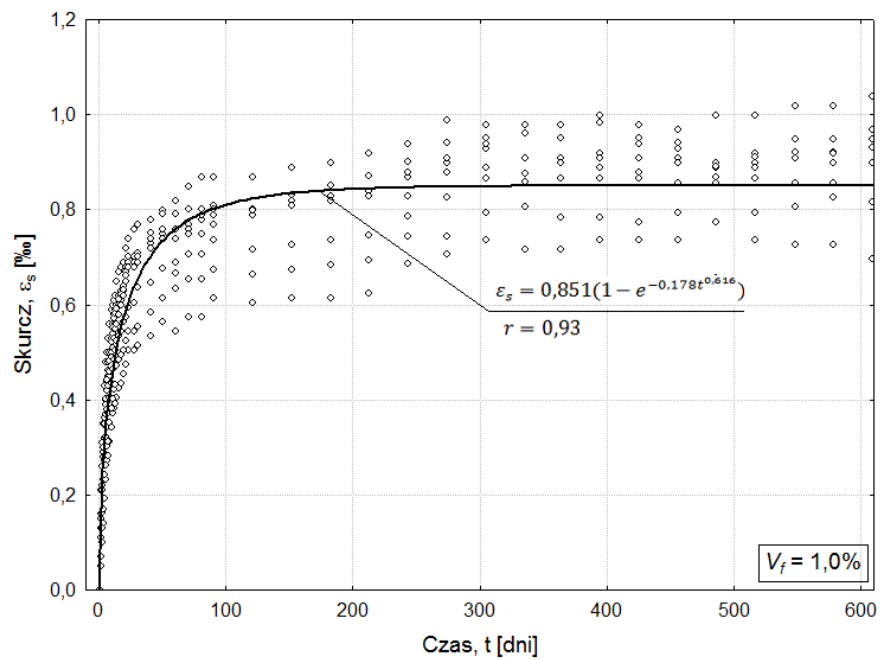
| Zawartość włókien w kompozycie V_f [%] | Średnia wartość skurczu końcowego ε_s [‰] | Współczynnik korelacji $r_{\varepsilon s}$ [‰] | Funkcja opisująca przebieg skurczu w czasie |
|--|---|--|--|
| 0,0 | 0,91 | 0,98 | $\varepsilon_s = 0,910(1 - e^{-0,148t^{0,631}})$ |
| 0,5 | 0,89 | 0,85 | $\varepsilon_s = 0,887(1 - e^{-0,169t^{0,699}})$ |
| 1,0 | 0,85 | 0,93 | $\varepsilon_s = 0,851(1 - e^{-0,178t^{0,616}})$ |
| 1,5 | 0,84 | 0,97 | $\varepsilon_s = 0,842(1 - e^{-0,147t^{0,657}})$ |
| 2,0 | 0,78 | 0,92 | $\varepsilon_s = 0,780(1 - e^{-0,164t^{0,692}})$ |
| 2,5 | 0,75 | 0,92 | $\varepsilon_s = 0,749(1 - e^{-0,167t^{0,635}})$ |



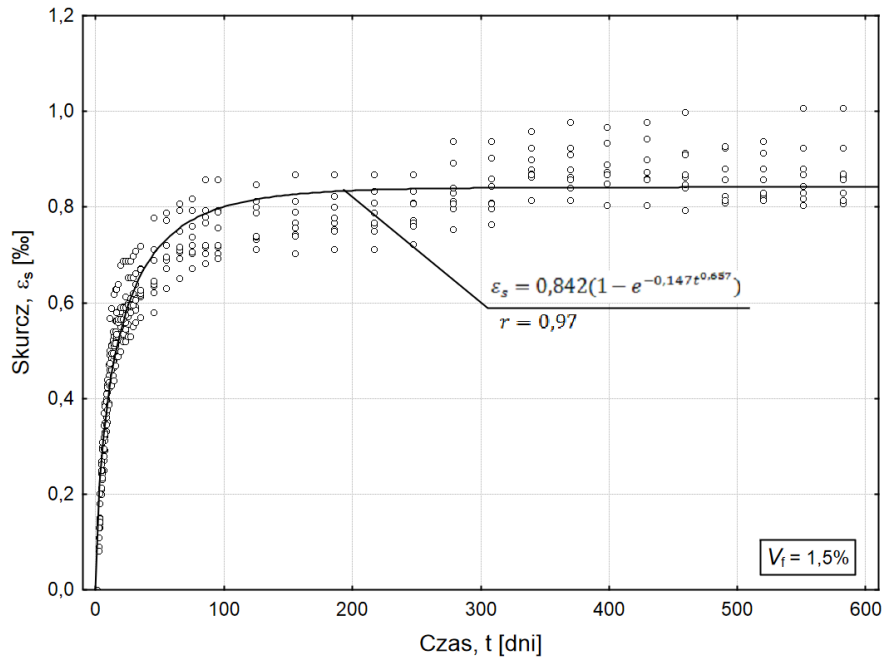
Rys. 6.25. Przebieg w czasie skurczu kompozytu bez włókien stalowych



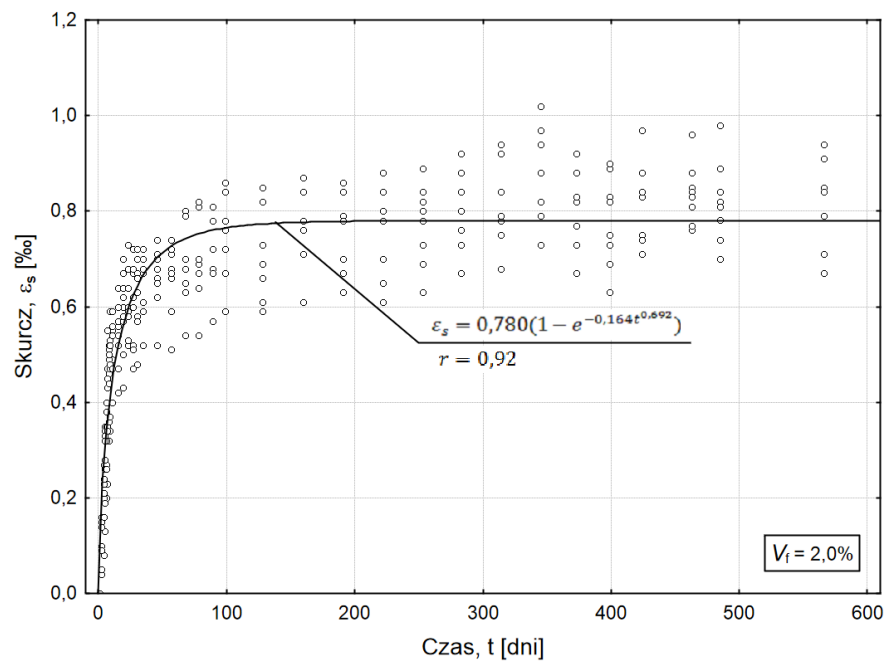
Rys. 6.26. Przebieg w czasie skurczu fibrokompozytu z 0,5% zawartością włókien stalowych



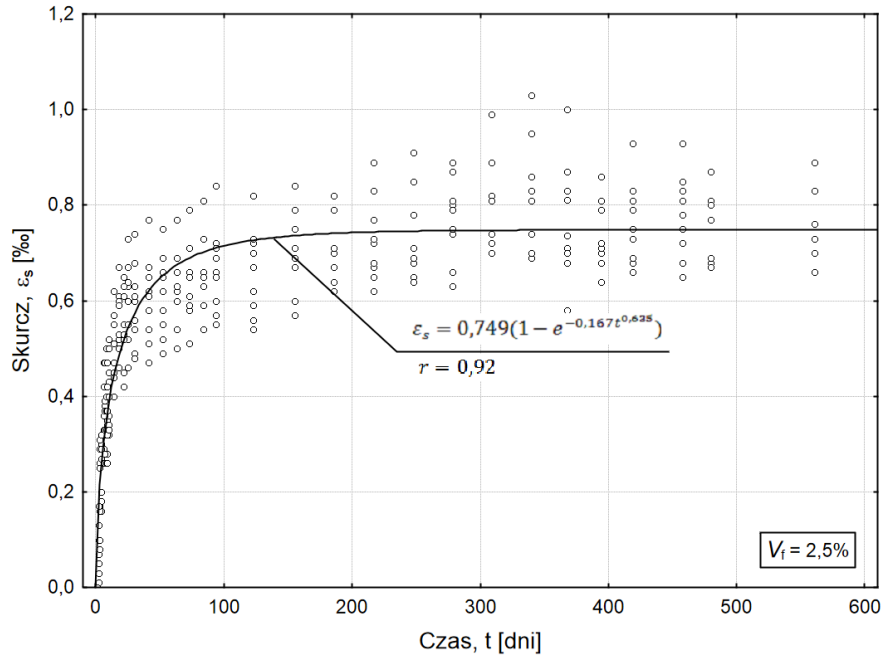
Rys. 6.27. Przebieg w czasie skurczu fibrokompozytu z 1,0% zawartością włókien stalowych



Rys. 6.28. Przebieg w czasie skurczu fibrokompozytu z 1,5% zawartością włókien stalowych

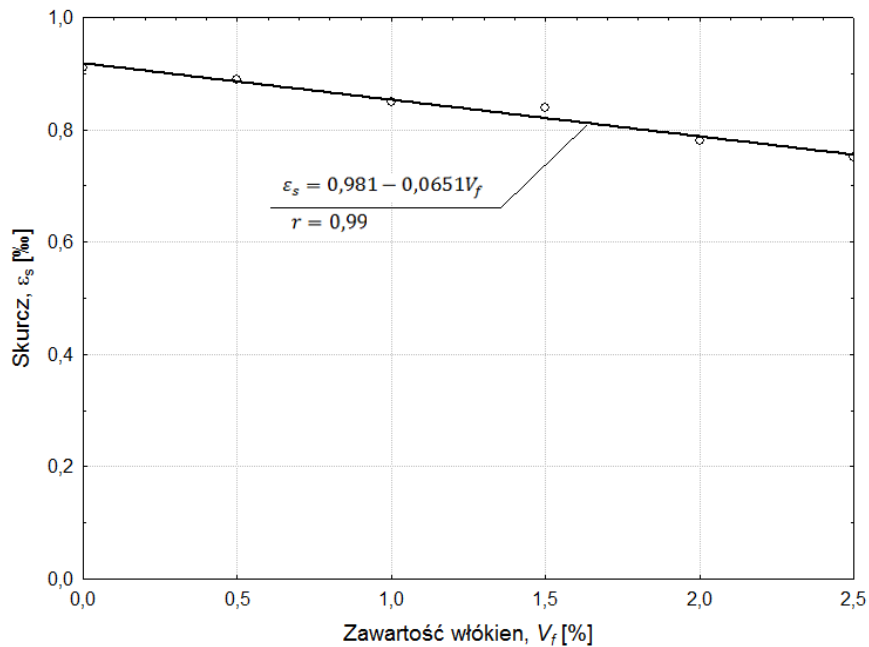


Rys. 6.29. Przebieg w czasie skurczu fibrokompozytu z 2,0% zawartością włókien stalowych



Rys. 6.30. Przebieg w czasie skurczu fibrokompozytu z 2,5% zawartością włókien stalowych

Z analizy wyników badań przedstawionych na rys. 6.31 wynika, że wraz ze wzrostem zawartości włókien następuje zmniejszenie się skurczu. Zależność ta jest liniowa. Tendencję liniową zmniejszania się skurczu fibrokompozytu wraz z dodaniem włókien stalowych potwierdza wysoki współczynnik korelacji wynoszący 0,99 (rys. 6.31).



Rys. 6.31. Zależność średniej wartości skurczu końcowego fibrokompozytu objętego badaniami od zawartości włókien stalowych

6.10. Odporność na ścieranie

Uzyskane wyniki badań odporności na ścieranie (S) fibrokompozytu (rys. 6.32) poddano analizie statystycznej. Liczbę próbek, niezbędną do określenia średniej wartości statystycznej odporności na ścieranie fibrokompozytu wyznaczono na podstawie statystycznej analizy wyników badań wstępnych za pomocą rozkładu t-Studenta [134] i założeń podanych w rozdz. 5.3. Wartości wskaźnika zmienności odporności na ścieranie dla wszystkich rodzajów kompozytów nie przekroczyły 11%, co świadczy o dużej jednorodności materiału (tabl. 6.15). W celu odrzucenia pomiarów nie należących do tej samej populacji zastosowano test Grubbs'a (por. tabl. 6.15).



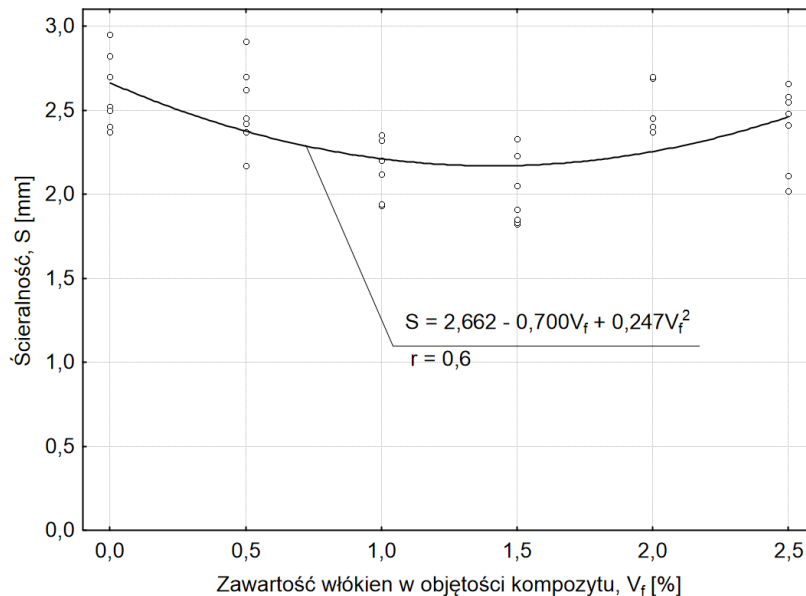
Rys. 6.32. Badanie ścieralności fibrokompozytu zawierającego 1,5% włókien stalowych na tarczy Boehme'go

Tablica 6.15. Parametry statystyczne ścieralności fibrokompozytu objętego badaniami w zależności od zawartości włókien stalowych

| Parametry statystyczne ścieralności | Zawartość włókien w kompozycie V_f [%] | | | | | |
|---|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| l | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Wartość średnia S [mm] | 2,61 | 2,52 | 2,14 | 2,00 | 2,50 | 2,40 |
| Odchylenie standardowe S_s [mm] | 0,22 | 0,24 | 0,18 | 0,21 | 0,16 | 0,24 |
| Wskaźnik zmienności V_s [%] | 8 | 10 | 9 | 10 | 6 | 10 |
| Przedział ufności wartości średniej przy $v=10\%$ oraz $\alpha=0,05$ [mm] | 2,41÷2,81 | 2,30÷2,74 | 1,95÷2,33 | 1,81÷2,19 | 2,32÷2,72 | 2,18÷2,63 |
| Wartość minimalna S_{\min} , [mm] | 2,07 | 1,93 | 1,68 | 1,50 | 2,08 | 1,80 |
| Współczynnik jednorodności k [-] | 0,79 | 0,76 | 0,78 | 0,75 | 0,82 | 0,75 |
| Liczba wyników przyjęta w analizie statystycznej N_w [szt] | 7 | 7 | 6* | 7 | 5** | 7 |

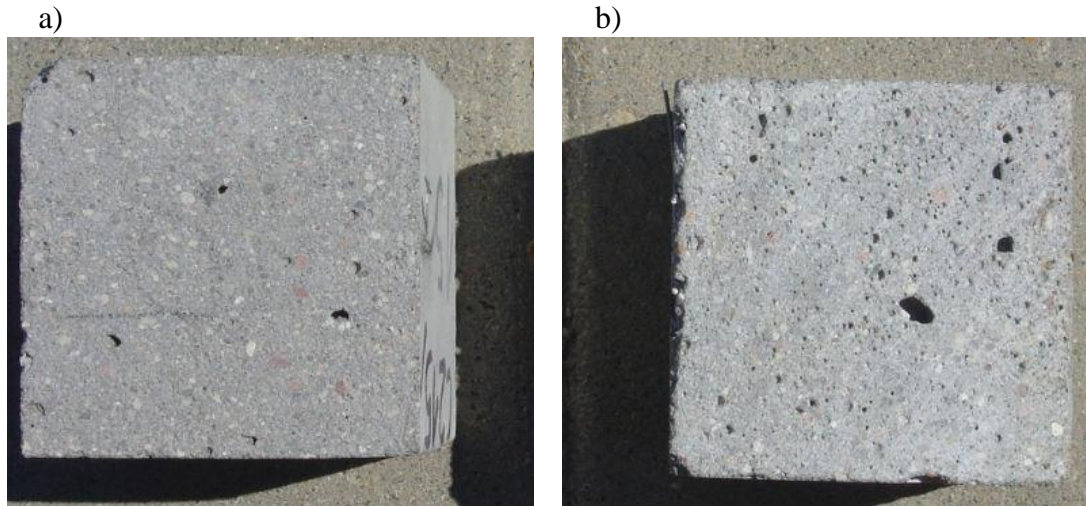
* - odrzucono jeden wynik, ** - odrzucono dwa wyniki

Zależność ścieralności fibrokompozytu objętego badaniami od zawartości włókien stalowych aproksymowano wielomianem drugiego stopnia (rys. 6.33). Wyniki badań odporności na ścieranie fibrokompozytu wykazują pozytywny wpływ włókien stalowych na tę właściwość, co potwierdzają także inni autorzy [147, 160, 161]. Studia literaturowe wykazały, że inne rodzaje włókien, np. PVA (polialkohol winylowy), poprawiają odporność kompozytu na ścieranie [175] (por. rozdz. 3.1). Z analizy krzywej regresji (rys. 6.33) wynika, że przy objętości włókien 1,4%, fibrokompozyt wykazuje najkorzystniejszą odporność na ścieranie wynoszącą 2,2 mm. Natomiast największa (najmniej korzystna) ścieralność wynosząca 2,7 mm występuje dla kompozytu bez włókien. Różnica między największą i najmniejszą ścieralnością wynosi 19%. Powyżej zawartości włókien stalowych równej 1,4% obserwuje się już spadek odporności na ścieranie fibrokompozytu. Fibrokompozyt zawierający 2,5% włókien stalowych charakteryzuje się ścieralnością równą 2,4 mm. Zgodnie z normą [203] ścieralność betonu nie powinna być większa niż 2,5 mm dla betonu użytkowanego w warunkach dużego i ciężkiego obciążenia ruchem. Z rys. 6.33 oraz średnich wartości ścieralności podanych w tabl. 6.15 wynika, że fibrokompozyt z zawartością włókien od 1,0% do 2,5% spełnia te wymagania.



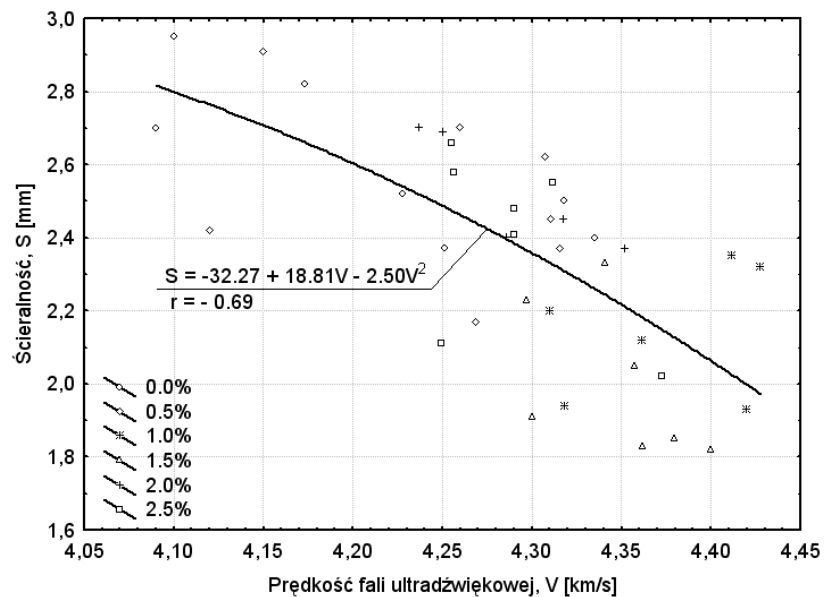
Rys. 6.33. Zależność ścieralności fibrokompozytu objętego badaniami od zawartości włókien stalowych

Obraz przekroju próbki pokazanej na rys. 6.34 wskazuje wyraźnie na większą porowatość materiału z zawartością włókien 2,5% w stosunku do zawartości 1%. Włókna mają tendencję do napowietrzania mieszanki kompozytu na etapie mieszania. Ma to wpływ na pogorszenie ścieralności materiału o dużej zawartości włókien stalowych (por. rys. 6.33).



Rys. 6.34. Widok przekroju próbki fibrokompozytu o zawartości włókien: a) 1%, b) 2,5%

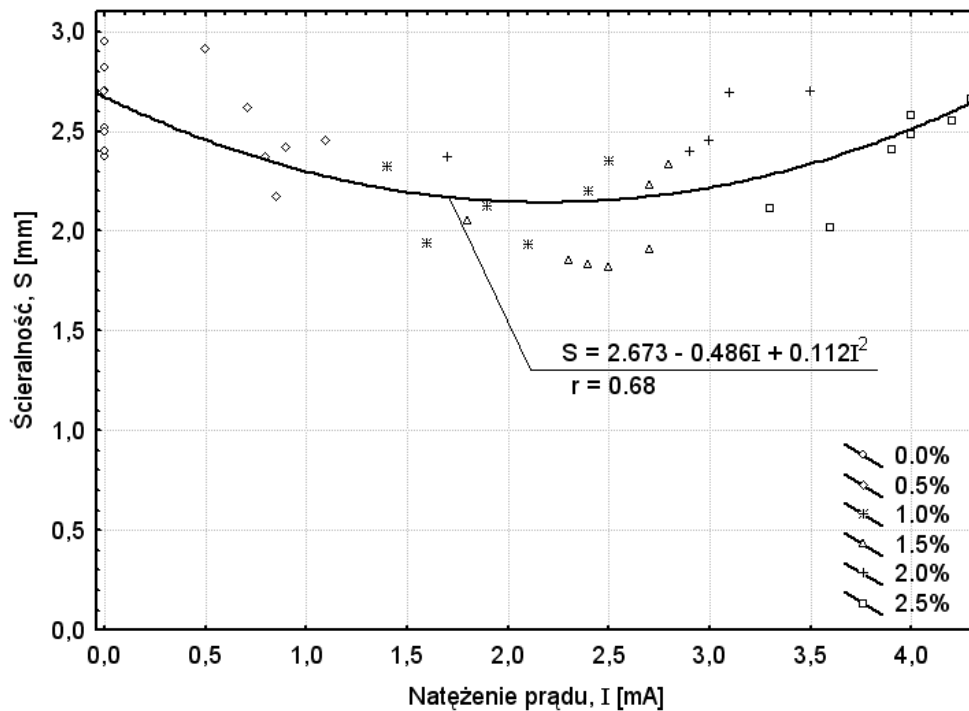
Korelację ścieralności (S) i prędkości propagacji fali ultradźwiękowej (V) przedstawiono na rys. 6.35. Analiza wyników badań wykazała, że wraz ze wzrostem prędkości fali ultradźwiękowej pogarsza się odporność na ścieranie fibrokompozytu. Im bardziej jednorodna jest struktura materiału, tym fala ultradźwiękowa przebiega szybciej, a także osiągnięta jest korzystniejsza odporność na ścieranie. Wpływ porowatości na prędkość przepływu fali ultradźwiękowej opisano w pracach [100, 176]. Wyniki przedstawionych tam badań są zgodne z rezultatami pracy własnej. Zgodnie z przedstawioną krzywą regresji (rys. 6.35), dla prędkości fali ultradźwiękowej $V = 4,42$ km/s najmniejsza ścieralność wynosi 2 mm.



Rys. 6.35. Korelacja ścieralności fibrokompozytu objętego badaniami i prędkości propagacji fali ultradźwiękowej

Tak więc włókna stalowe tylko do pewnego stopnia poprawiają odporność na ścieranie. Powyżej zawartości włókien 1,4% można stwierdzić, że pogarszają one odporność na ścieranie.

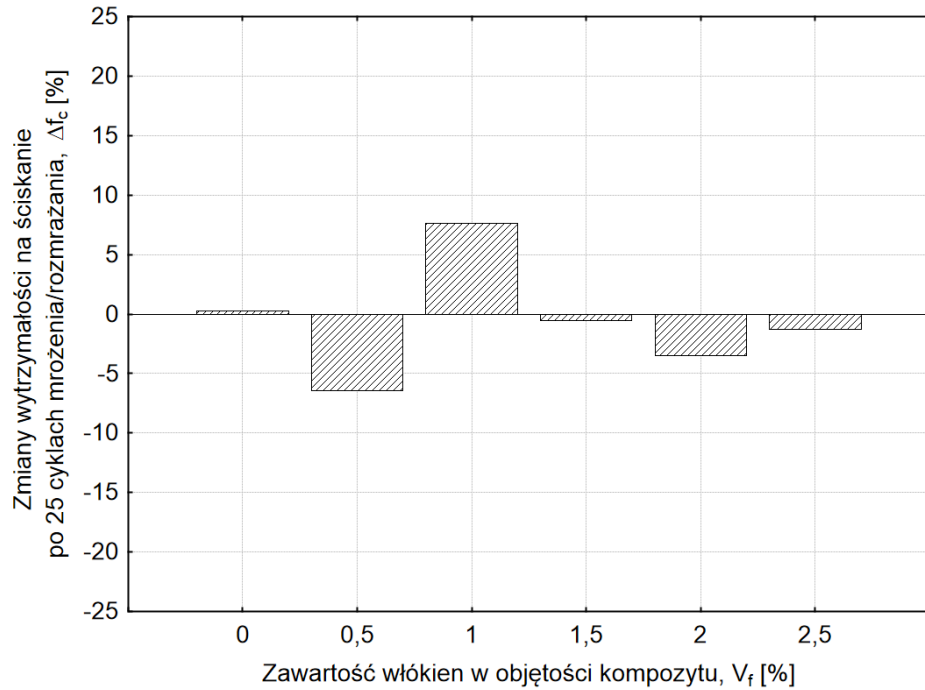
Wyniki badań ścieralności i natężenia prądu dla fibrokompozytów o różnej zawartości włókien stalowych przedstawiono na rys. 6.36. Ekstremum funkcji odpowiadające najmniejszej ścieralności fibrokompozytu odpowiada natężeniu prądu o wartości 2,2mA przy zawartości włókien 1,4%. Minimalna ścieralność dla kompozytu o zawartości włókien 1,4% wykazana badaniami nieniszczącymi (rys. 6.36) jest zgodna z wynikami badań ścieralności przedstawionymi na rys. 6.33. Zgodność przebiegu funkcji pokazanych na rys. 6.33 i 6.36 świadczy o możliwości zastosowania metody indukcji elektromagnetycznej do oceny zawartości zbrojenia rozproszonego w kompozycie. Tym samym udowodniono jedną z postawionych tez.



Rys. 6.36. Korelacja ścieralności fibrokompozytu objętego badaniami i natężenia prądu

6.11. Mrozoodporność

Na rys. 6.37 przedstawiono procentowe zmiany średnich wartości wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu objętego badaniami o różnych zawartościach włókien stalowych.



Rys. 6.37. Zmiany wytrzymałości na ściskanie po cyklach zamrażania-odmrażania fibrokompozytu o różnej zawartości włókien stalowych

Badania mrozoodporności prowadzone w warunkach laboratoryjnych po 25 cyklach zamrażania-odmrażania wykazały, że fibrokompozyt jest mrozoodporny. Dodatek włókien nie wpływa na tę właściwość. Różnica temperatury w pojedynczym cyklu wynosiła $\Delta t = 36^\circ\text{C}$. Największy zaobserwowany ubytek wytrzymałości wyniósł 6% dla zawartości włókien 0,5%. Na podstawie normy PN-88/B-6250 [204] beton zwykły określa się jako mrozoodporny przy dopuszczalnym spadku wytrzymałości poniżej 20%. Nie stwierdzono wpływu włókien stalowych na mrozoodporność objętego badaniami fibrokompozytu.

6.12. Podsumowanie

W podsumowaniu analizy wyników badań cech fizyko-mechanicznych i reologicznych fibrokompozytu użytego w badaniach stwierdza się, że:

1. Fibrokompozyt na bazie piasków odpadowych o zawartości włókien stalowych w przedziale $1 \div 1,5\%$ cechuje się najlepszymi właściwościami fizyko-mechanicznymi. Dodatek włókien powyżej $1,5\%$ z uwagi na właściwości, urabialność i koszt staje się mało przydatny. Porównując właściwości takich fibrokompozytów z właściwościami betonu zwykłego uznano, że można go wykorzystać do produkcji konstrukcyjnych elementów cienkościennych, np. posadzek przemysłowych, powłok, płyt czy też do budowy tuneli.
2. Wytrzymałość na ściskanie kompozytu nie zawierającego włókien jest mniejsza o 26% niż fibrokompozytu zawierającego dodatek włókien stalowych o objętości $V_f = 1\%$, natomiast wytrzymałość kompozytu zawierającego $2,5\%$ włókien jest większa jedynie o 6% w stosunku do kompozytu zawierającego 1% włókien. Dodatek dużej ilości włókien jest nieopłacalny, ponieważ przyrost wytrzymałości na ściskanie jest niewielki, pogarsza się urabialność fibrokompozytu i zwiększa jednostkowy koszt materiału.
3. Największy wpływ dodatku włókien stalowych na właściwości fibrokompozytu zaobserwowano przy badaniach wytrzymałości na rozciąganie osiowe (wytrzymałość przy zawartości włókien $V_f = 0\%$ jest o 40% mniejsza niż przy $V_f = 1,5\%$) oraz rozciąganie przy rozłupywaniu (wytrzymałość przy zawartości włókien $V_f = 0\%$ jest o 60% mniejsza niż przy $V_f = 1,5\%$).
4. Dodatek włókien stalowych w niewielki sposób wpływa na wartość statycznego modułu sprężystości fibrokompozytu - różnica wynosi około 5% pomiędzy kompozytem o zawartości włókien $V_f = 1,5\%$ i 0% .
5. Kompozyt nie zawierający włókien charakteryzuje się o 10% mniejszą wartością dynamicznego modułu sprężystości E_d niż fibrokompozyt zawierający $1,5\%$ włókien stalowych.
6. Kompozyt nie zawierający włókien ma wartość modułu odkształcenia postaciowego (G_d) o około 5% mniejszą niż fibrokompozyt o zawartości włókien $V_f = 1,5\%$.
7. Włókna stalowe zwiększają gęstość pozorną fibrokompozytu, jednak po przekroczeniu zawartości włókien $V_f = 1,5\%$ obserwuje się bardzo niewielkie zwiększenie jego gęstości. Zjawisko to spowodowane jest napowietrzaniem mieszanki kompozytu wraz ze wzrostem zawartości włókien.
8. Włókna stalowe wpływają na ograniczenie skurczu badanego fibrokompozytu.
9. Dodatek włókien stalowych ogranicza ścieralność fibrokompozytu o 19% przy zawartości włókien $V_f = 1,4\%$. Jest to optymalna pod względem ścieralności zawartość włókien stalowych.
10. Badany kompozyt można określić jako mrozoodporny przy dopuszczalnym ubytku wytrzymałości poniżej 20% . Nie stwierdzono korelacji pomiędzy mrozoodpornością a zawartością włókien w kompozycie. Dodatek włókien stalowych nie wpływa na obniżenie mrozoodporności fibrokompozytu.

7. MODEL KOMPOZYTU MINERALNEGO Z WŁÓKNAMI ROZPROSZONYMI

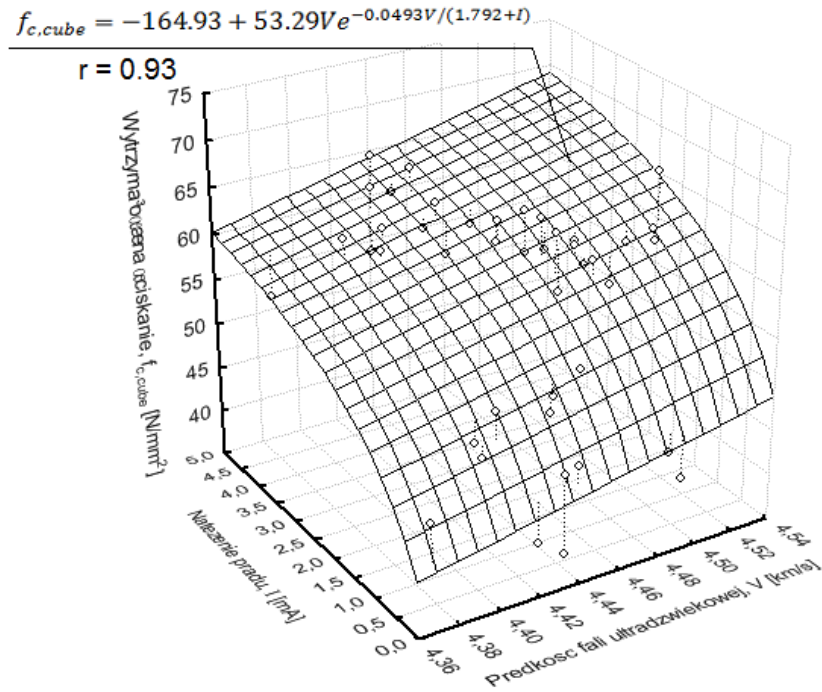
7.1. Matematyczny opis właściwości fibrokompozytu

Matematyczny opis właściwości kompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi oparto na identyfikacji cech doraźnych i długotrwałych przy użyciu dwóch metod nieniszczących. Do jego opracowania posłużyły wyniki badań i ich analiza, przedstawione w rozdziale 6. Matematyczny opis właściwości mechaniczno-fizycznych i reologicznych fibrokompozytu jest zbiorem zależności funkcyjnych badanej cechy od dwóch zmiennych $f(V, I)$, tj. korelacji danej właściwości kompozytu oraz prędkości propagacji fal ultradźwiękowych (V) i natężenia prądu wywołanego przez indukcję elektromagnetyczną (I).

W badaniach nieniszczących wielką rolę odgrywa dobór właściwych zależności korelacyjnych [141]. Ostatecznie przyjęto taką postać funkcji regresji, dla której uzyskano największą wartość współczynnika korelacji oraz największy udział wariancji wyjaśnionej. Po dobraniu postaci funkcji wskazującej na największą korelację oraz największy udział wariancji wyjaśnionej sprawdzono, czy wszystkie współczynniki funkcji regresji wpływają na wyjściową postać funkcji w sposób istotny statystycznie na poziomie prawdopodobieństwa równym 0,05. Istotność współczynników funkcji regresji zweryfikowano przy użyciu programu STATISTICA za pomocą rozkładu t-Studenta. Istotność modelu regresji zweryfikowano przy użyciu analizy wariancji (ANOVA) i testu F (por. rozdz. 5.3). Ogólna postać matematycznego opisu właściwości fibrokompozytu jest zestawieniem zależności funkcyjnych dwóch zmiennych w korelacji z każdą badaną cechą.

7.1.1. Wytrzymałość na ściskanie

W wyniku przeprowadzonej korelacji wyników badań wytrzymałości na ściskanie oraz pomiarów wielkości prędkości fali ultradźwiękowej (V) i natężenia prądu indukcyjnego (I), uzyskano funkcję w postaci wykładniczej (rys. 7.1). Przedstawia ona korelację wytrzymałości na ściskanie badanego fibrokompozytu i prędkości fali ultradźwiękowej (V) oraz natężenia prądu (I). Tak przedstawiona korelacja uwidacznia znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie wraz z zawartością włókien stalowych do poziomu 1,5%, co odpowiada natężeniu prądu indukcyjnego 2,4 mV, a następnie ograniczenie zwiększenia wytrzymałości na ściskanie po przekroczeniu tej wartości. Najmniejszymi wartościami wytrzymałości na ściskanie odpowiada zerowa wartość prądu indukcyjnego oraz najniższe wartości prędkości fali ultradźwiękowej, tj. około 4,4 km/s. Prędkość przebiegu fali ultradźwiękowej w badanym kompozycie drobnokruszywowym zwiększa się wraz z zawartością włókien do $V_f = 1,5\%$ (co odpowiada natężeniu prądu $I = 2,4$ mV), a następnie zmniejsza się (por. rys. 7.1).



Rys. 7.1. Wytrzymałość na ściskanie badanego fibrokompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

Uzyskane z badań wartości wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu oraz prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego, a także odpowiadające im wartości wyznaczone na podstawie funkcji przedstawiono w tabelicy 7.1.

Tabela 7.1. Zestawienie wartości uzyskanych z badań i obliczeń wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu

| V_f [%] | V [km/s] | I [mV] | $f_{c.cube}$ [N/mm ²] | $f_{c.mod}$ [N/mm ²] | $(f_{c.cube}-f_{c.mod})*100/f_{c.cube}$ [%] |
|-----------|------------|----------|-----------------------------------|----------------------------------|---|
| 1 | 3 | 4 | 2 | 6 | 9 |
| 0,0 | 4,43 | 0,00 | 47,38 | 45,76 | 3,42 |
| 0,5 | 4,41 | 0,63 | 53,89 | 51,61 | 4,23 |
| 1,0 | 4,52 | 1,70 | 61,16 | 62,62 | -2,38 |
| 1,5 | 4,49 | 2,34 | 63,51 | 63,56 | -0,08 |
| 2,0 | 4,42 | 3,58 | 62,00 | 62,80 | -1,29 |
| 2,5 | 4,43 | 4,18 | 64,22 | 64,07 | 0,23 |

Oznaczenia: V_f – zawartość włókien, V – prędkość fali ultradźwiękowej, I – natężenie prądu indukcyjnego, $f_{c.cube}$ – średnia wytrzymałość na ściskanie fibrokompozytu, $f_{c.mod}$ – obliczona na podstawie wyników badań nieniszczących wytrzymałość na ściskanie fibrokompozytu

Różnica wyrażona w procentach pomiędzy wartościami rzeczywistymi a wyznaczonymi na podstawie zaproponowanej funkcji zawiera się w przedziale od około 0,1 % dla zawartości włókien 1,5% do 4,2% dla zawartości włókien 0,5%. Małe różnice pomiędzy wartościami

eksperymentalnymi wytrzymałości na ściskanie, a wartościami uzyskanymi na drodze analitycznej świadczą o poprawności przyjętych zależności funkcyjnych.

W celu określenia wpływu zmiennych objaśniających na zmienną objaśnianą wykonano statystyczną ocenę istotności parametrów funkcji. Na podstawie wyników przedstawionych w tablicy 7.2 można stwierdzić, że wszystkie parametry funkcji wytrzymałości na ściskanie badanego kompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej (V) i natężenia prądu indukcyjnego (I) są istotne statystycznie na poziomie istotności 0,05. Najmniejszy wpływ na zmienną objaśnianą na poziomie prawdopodobieństwa 0,03 ma parametr a_3 funkcji, natomiast największy parametry a_1 i a_2 . Wartość współczynnika determinacji wyniosła 0,86 (por. tabl. 7.2), co oznacza, że 86% ogólnej zmienności wytrzymałości na ściskanie wyjaśniana jest przez zaproponowaną zależność funkcyjną.

Tablica 7.2. Statystyczna ocena istotności parametrów funkcji wytrzymałości na ściskanie badanego fibrokompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

| Zależność funkcyjna: $f_{c,cube} = a_1 + a_2 V e^{\frac{a_3 V}{a_4 + I}}$ | | | | | | |
|---|---------|-------------|---|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Poziom ufności: 95.0% ($\alpha=0.05$); Udział wariacji wyjaśnionej $R^2=0,86$ | | | | | | |
| Współczynnik funkcji | Ocena | Błąd stand. | Wartość testu istotności t dla stopni swobody $df=39$ | Poziom prawdopodobieństwa p | Dolna granica ufności | Górna granica ufności |
| a_1 | -164,93 | 60,08 | -2,75 | 0,009 | -286,446 | -43,405 |
| a_2 | 53,29 | 13,96 | 3,82 | 0,0005 | 25,045 | 81,533 |
| a_3 | -0,049 | 0,02 | -2,19 | 0,035 | -0,095 | -0,004 |
| a_4 | 1,79 | 0,73 | 2,45 | 0,019 | 0,311 | 3,275 |

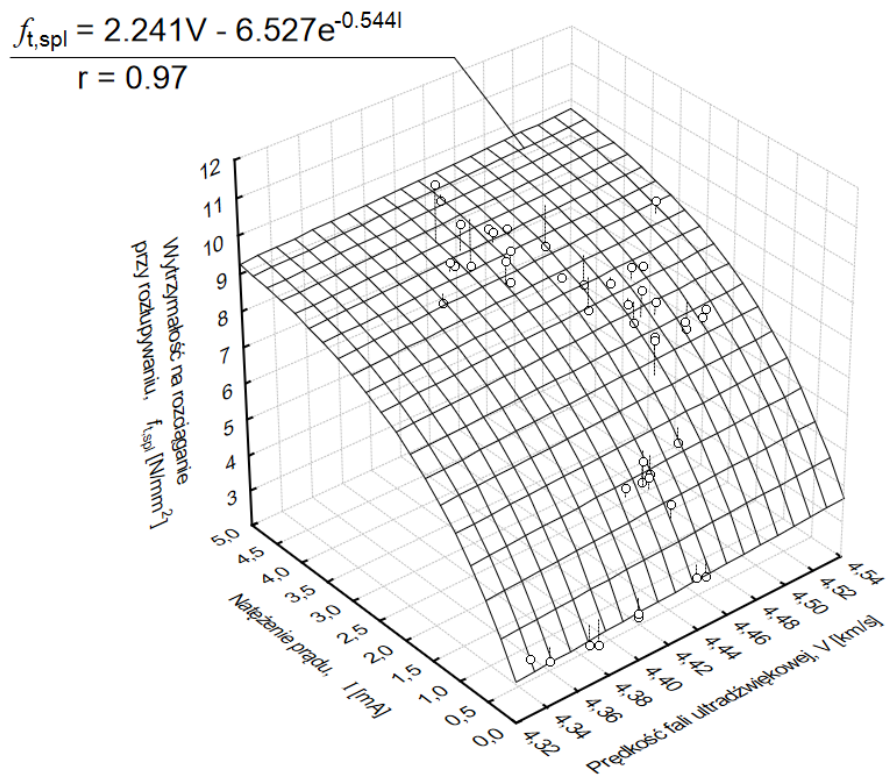
Z wyników analizy wariacji (tabl. 7.3) wynika następujący podział całkowitej zmienności: zmienność regresji 142932,3, zmienna resztowa 317,3. Hipotezę zerową, mówiącą, że żadna zmienna niezależna w modelu nie ma istotnego wpływu na zmienną zależną należy odrzucić na poziomie prawdopodobieństwa bliskiego zeru (por. rozdz. 5.3 i tabl. 7.3).

Tablica 7.3. Zestawienie wyników uzyskanych z analizy funkcji wytrzymałości na ściskanie badanego fibrokompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

| Efekt | Analiza wariacji (ANOVA) | | | | |
|--------------------|--------------------------|-----------------|----------------|--------------|-----------------------------|
| | Suma kwadratów | Stopnie swobody | Średnia kwadr. | Statystyka F | Poziom prawdopodobieństwa p |
| Regresja | 142932,3 | 4 | 35733,1 | 4392, 0 | 0,00 |
| Zmienność resztowa | 317,3 | 39 | 8,1 | | |
| Razem | 143249,6 | 43 | | | |

7.1.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu

Na rys. 7.2 przedstawiono wykres wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej (V) i natężenia indukowanego prądu (I). Po osiągnięciu wytrzymałości na rozciąganie matrycy (na poziomie $3,3 \text{ N/mm}^2$ - por. tabl. 6.7) i pojawieniu się rys w materiale, siły rozciągające przenoszone są na włókna stalowe [35]. Maksymalną wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu o wartości około 9 N/mm^2 kompozyt osiąga dla natężenia prądu indukcyjnego na poziomie $3,5 \div 4,5 \text{ mA}$ (co odpowiada zawartości włókien $2,5\%$) oraz prędkości fali ultradźwiękowej na poziomie $4,42 \text{ km/s}$. Minimalną wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu o wartości około 3 N/mm^2 kompozyt osiąga dla natężenia prądu indukcyjnego na poziomie 0 mA (co odpowiada kompozytowi nie zawierającemu włókien stalowych) oraz prędkości fali ultradźwiękowej na poziomie $4,32 \div 4,40 \text{ km/s}$. Włókna stalowe mają więc znaczny wpływ na wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu.



Rys. 7.2. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu fibrokompozytu użytego w badaniach w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

Wszystkie parametry przedstawionej na rys. 7.2 funkcji są istotne statystycznie na poziomie prawdopodobieństwa $0,05$. Wynik testu istotności przedstawiono w tabelicy 7.4. Wartość współczynnika determinacji wyniosła $0,94$ (por. tabl. 7.4), co oznacza, że 94% ogólnej zmienności

wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wyjaśniona jest przez zaproponowaną zależność funkcyjną (por. tabl. 7.4).

Z wyników analizy wariancji wynika następujący podział całkowitej zmienności: zmienność regresji: 2552,2, zmienna resztowa: 12,5. Hipotezę zerową, mówiącą, że żadna zmienna niezależna nie ma istotnego wpływu na zmienną zależną należy odrzucić na poziomie prawdopodobieństwa bliskiego zero (por. rozdz. 5.3 i tabl. 7.5).

Tablica 7.4. Statystyczna ocena istotności parametrów funkcji wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu badanego fibrokompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

| Zależność funkcyjna: $f_{t,spl} = a_1V + a_2e^{a_3I}$ | | | | | | |
|--|--------|-------------|---|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Poziom ufności: 95.0% ($\alpha=0.05$); Udział wariancji wyjaśnionej $R^2=0,94$ | | | | | | |
| Współczynnik funkcji | Ocena | Błąd stand. | Wartość testu istotności t dla stopni swobody $df=39$ | Poziom prawdopodobieństwa p | Dolna granica ufności | Górna granica ufności |
| a_1 | 2,241 | 0,094 | 23,778 | 0,000 | 2,051 | 2,431 |
| a_2 | -6,527 | 0,401 | -16,283 | 0,000 | -7,336 | -5,719 |
| a_3 | -0,544 | 0,086 | -6,355 | 0,000 | -0,717 | -0,371 |

Tablica 7.5. Zestawienie wyników uzyskanych z analizy wariancji funkcji wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu badanego fibrokompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

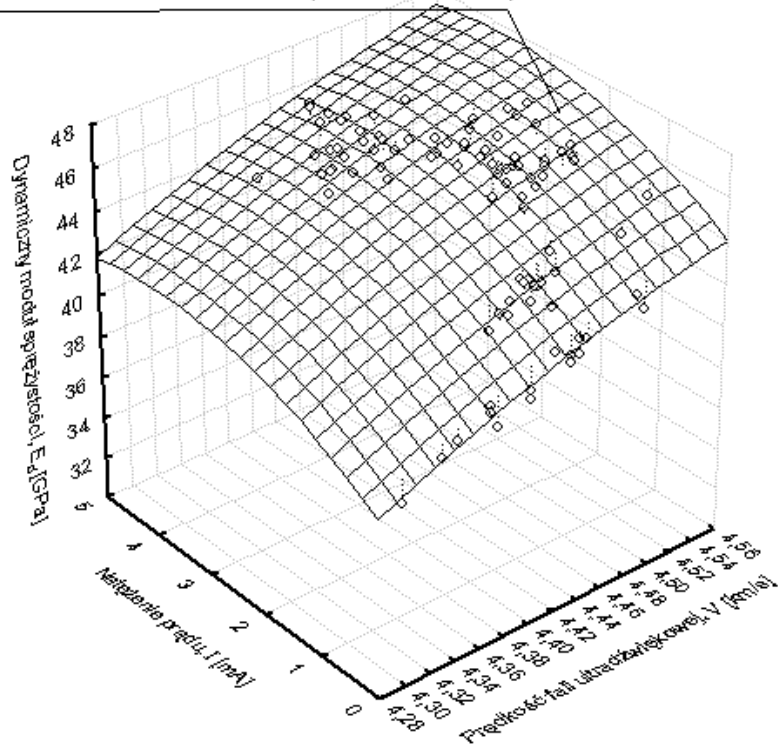
| Efekt | Analiza wariancji (ANOVA) | | | | |
|--------------------|---------------------------|-----------------|----------------|--------------|-----------------------------|
| | Suma kwadratów | Stopnie swobody | Średnia kwadr. | Statystyka F | Poziom prawdopodobieństwa p |
| Regresja | 2552,2 | 3 | 850,7 | 2927,8 | 0,00000 |
| Zmienność resztowa | 12,5 | 43 | 0,2906 | | |
| Razem | 2564,7 | 46 | | | |

7.1.3. Dynamiczny moduł sprężystości

Funkcję dynamicznego modułu sprężystości fibrokompozytu w korelacji prędkości propagacji fali ultradźwiękowej (V) oraz natężenia prądu (I) przedstawiono na rys. 7.3. Dynamiczny moduł sprężystości największą wartość, około 46 GPa, osiąga dla największych prędkości fali ultradźwiękowej 4,50÷4,55 km/s oraz dla natężenia indukowanego prądu na poziomie 2,5÷3,0 mA. Najmniejsza wartość dynamicznego modułu sprężystości występuje przy prędkości fali ultradźwiękowej 4,30÷4,4 km/s oraz natężeniu prądu równym 0 mA.

$$E_d = -664.3 + 300.1V - 31.74V^2 + I(1.936 - 0.259I)$$

$$r = 0.98$$



Rys. 7.3. Dynamiczny moduł sprężystości badanego kompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

Statystyczną ocenę istotności parametrów funkcji dynamicznego modułu sprężystości badanego fibrokompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia indukowanego prądu przedstawiono w tabelicy 7.6.

Tablica 7.6. Statystyczna ocena istotności parametrów funkcji dynamicznego modułu sprężystości badanego fibrokompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

| Zależność funkcyjna: $E_d = a_1 + a_2V + a_3V^2 + I(a_4 + a_5I)$ | | | | | | |
|--|---------|-------------|---|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Poziom ufności: 95.0% ($\alpha=0.05$); Udział wariancji wyjaśnionej $R^2=0,97$ | | | | | | |
| Współczynnik funkcji | Ocena | Błąd stand. | Wartość testu istotności t dla stopni swobody $df=39$ | Poziom prawdopodobieństwa p | Dolna granica ufności | Górna granica ufności |
| a_1 | 664,261 | 239,619 | -2,772 | 0,007 | -1140,235 | -188,288 |
| a_2 | 300,066 | 108,067 | 2,777 | 0,007 | 85,403 | 514,728 |
| a_3 | -31,741 | 12,184 | -2,605 | 0,011 | -55,942 | -7,539 |
| a_4 | 1,936 | 0,113 | 17,061 | 0,000 | 1,711 | 2,162 |
| a_5 | -0,259 | 0,027 | -9,644 | 0,000 | -0,312 | -0,205 |

Na podstawie wyników przedstawionych w tabelicy 7.6 można stwierdzić, że wszystkie parametry funkcji są istotne statystycznie na poziomie prawdopodobieństwa 0,05. Najmniejszy wpływ na zmienną objaśnianą ma parametr a_3 omawianej funkcji. Wartość współczynnika determinacji wyniosła 0,97 (tabl. 7.6), co oznacza, że 97% ogólnej zmienności dynamicznego modułu sprężystości wyjaśniona jest przez zaproponowane równanie. Z wyników analizy wariancji wynika następujący podział: zmienność wyjaśniona zależnością funkcyjną: 192806,2, zmienna resztowa: 10,9. Hipotezę zerową, mówiącą, że żadna zmienna niezależna nie ma istotnego wpływu na zmienną zależną należy odrzucić na poziomie prawdopodobieństwa bliskiego zeru (por. rozdz. 5.3 i tabl. 7.7).

Tablica 7.7. Zestawienie wyników uzyskanych z analizy wariancji funkcji dynamicznego modułu sprężystości badanego fibrokompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

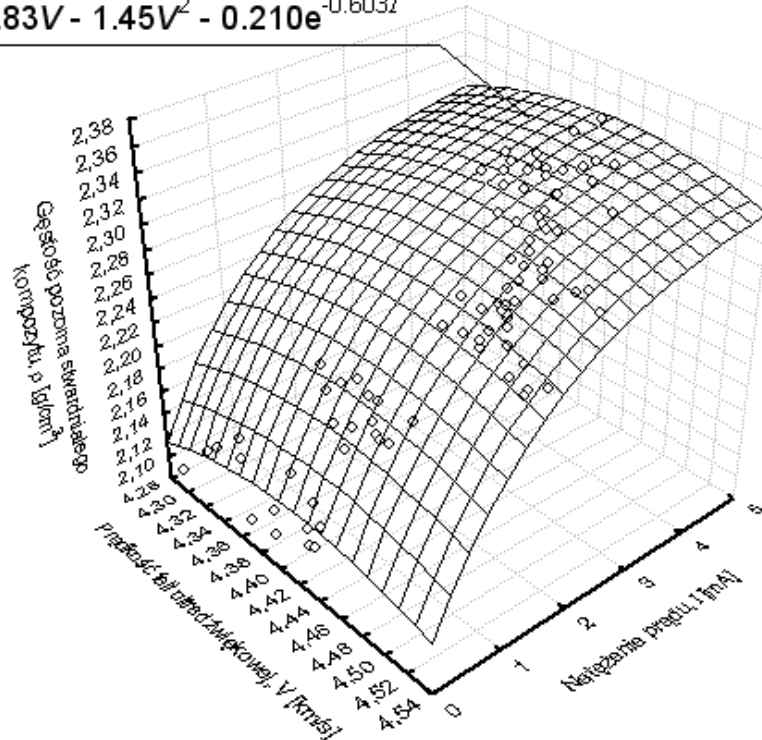
| Efekt | Analiza wariancji (ANOVA) | | | | |
|--------------------|---------------------------|-----------------|----------------|--------------|-----------------------------|
| | Suma kwadratów | Stopnie swobody | Średnia kwadr. | Statystyka F | Poziom prawdopodobieństwa p |
| Regresja | 192796,2 | 5 | 38559,2 | 322283,8 | 0,00 |
| Zmienność resztowa | 10,9 | 91 | 0,12 | | |
| Razem | 192807,0 | 96 | | | |

7.1.4. Gęstość pozorna

W wyniku przeprowadzonych badań gęstości pozornej użytego w badaniach fibrokompozytu stwierdzono wzrost gęstości pozornej wraz z dodatkiem włókien stalowych. Największą gęstość pozorną kompozyt osiąga dla największego natężenia indukowanego prądu $I = 4\div 5$ mA (rys. 7.4), co odpowiada zawartości włókien $V_f = 2,5\%$ (por. rys. 6.6). Prędkość fali ultradźwiękowej dla największej gęstości pozornej wynosi $V = 4,40\div 4,44$ km/s (rys. 7.4). Najmniejsza gęstość pozorna objętego badaniami kompozytu występuje dla natężenia prądu $I = 0$ mA (kompozyt bez włókien) oraz prędkości fali ultradźwiękowej $V = 4,30\div 4,40$ km/s. Przeprowadzona analiza parametrów statystycznych funkcji gęstości pozornej przedstawiona w tabelicy 7.8 potwierdza istotność wszystkich parametrów na poziomie istotności 0,05. Najbliżej progu poziomu istotności α są parametry funkcji a_1 , a_2 i a_3 , co świadczy o tym, że prędkość fali ultradźwiękowej w mniejszym stopniu koreluje z gęstością pozorną niż natężenie indukowanego prądu (tabl. 7.8).

$$\rho = -26.03 + 12.83V - 1.45V^2 - 0.210e^{-0.603I}$$

$$r = 0.97$$



Rys. 7.4. Gęstość pozorna użytego w badaniach kompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

Wartość współczynnika determinacji wyniosła 0,94 (por. tabl. 7.8), co oznacza, że 94% ogólnej zmienności gęstości pozornej wyjaśniona jest przez zaproponowaną zależność funkcyjną. Z wyników analizy wariancji wynika następujący podział (por. rozdz. 5.3 i tabl. 7.9): zmienność wyjaśniona zależnością funkcyjną: 462,2, zmienna resztowa: 0,026. Hipotezę zerową, mówiącą, że żadna zmienna niezależna nie ma istotnego wpływu na zmienną zależną należy odrzucić na poziomie prawdopodobieństwa bliskiego zeru.

Tablica 7.8. Statystyczna ocena istotności parametrów funkcji gęstości pozornej badanego fibrokompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

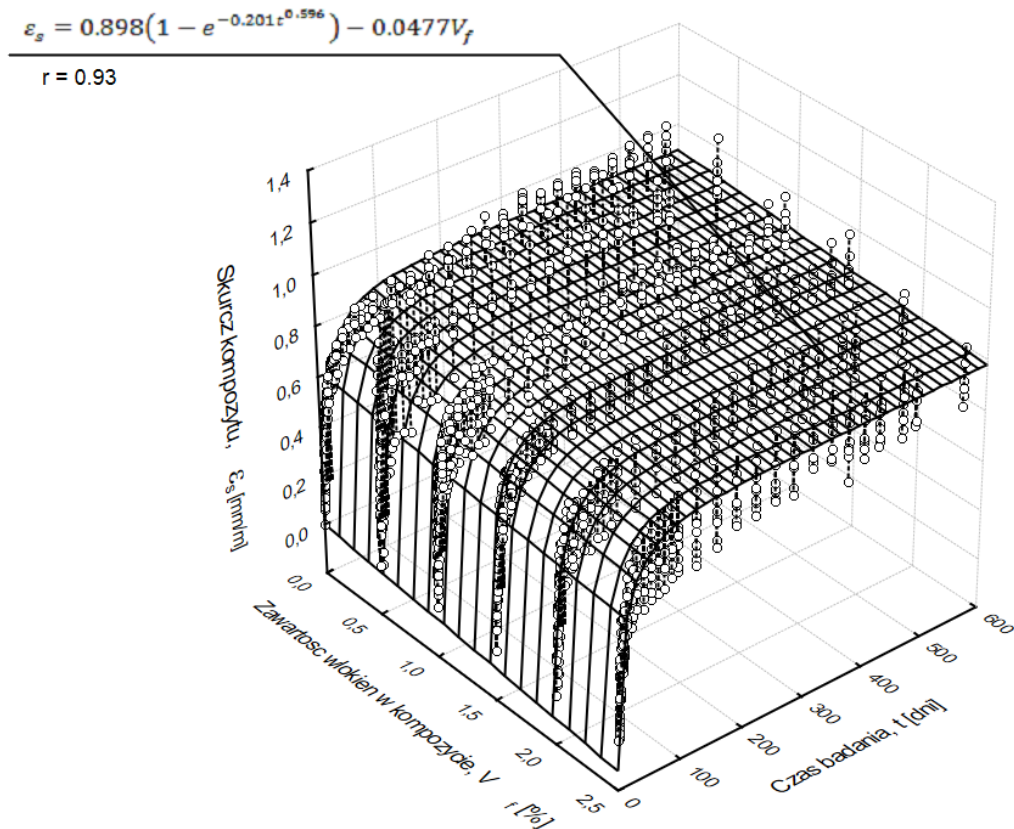
| Zależność funkcyjna: $\rho = a_1 + a_2V + a_3V^2 + a_4e^{a_5I}$ | | | | | | |
|--|---------|-------------|---|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Poziom ufności: 95.0% ($\alpha=0.05$); Udział wariancji wyjaśnionej $R^2=0,94$ | | | | | | |
| Współczynnik funkcji | Ocena | Błąd stand. | Wartość testu istotności t dla stopni swobody $df=39$ | Poziom prawdopodobieństwa p | Dolna granica ufności | Górna granica ufności |
| a_1 | -26,034 | 12,808 | -2,033 | 0,045 | -51,501 | -0,568 |
| a_2 | 12,839 | 5,776 | 2,223 | 0,029 | 1,354 | 24,324 |
| a_3 | -1,452 | 0,651 | -2,229 | 0,028 | -2,747 | -0,157 |
| a_4 | -0,210 | 0,008 | -25,363 | 0,000 | -0,226 | -0,193 |
| a_5 | -0,603 | 0,077 | -7,791 | 0,000 | -0,756 | -0,449 |

Tablica 7.9. Zestawienie wyników uzyskanych z analizy wariancji funkcji gęstości pozornej badanego fibrokompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

| Efekt | Analiza wariancji (ANOVA) | | | | |
|--------------------|---------------------------|-----------------|----------------|--------------|-----------------------------|
| | Suma kwadratów | Stopnie swobody | Średnia kwadr. | Statystyka F | Poziom prawdopodobieństwa p |
| Regresja | 462,2 | 5 | 92,4 | 304741,1 | 0,00 |
| Zmienność resztowa | 0,026 | 85 | 0,0003 | | |
| Razem | 462,2 | 90 | | | |

7.1.5. Skurcz

Na rys. 7.5 przedstawiono korelację wartości skurczu badanego fibrokompozytu i czasu twardnienia (t) oraz natężenia indukowanego prądu (I). Zgodnie z oczekiwaniem skurcz rośnie w miarę upływu czasu stabilizując się. Najmniejszą wartością końcową skurczu (ε_s) (około 0,8 ‰) charakteryzuje się fibrokompozyt zawierający najwięcej włókien stalowych ($V_f = 2,5\%$), natomiast największą (około 0,9 ‰) kompozyt bez włókien (rys. 7.5). Statystyczna ocena parametrów zależności przedstawiona w tablicy 7.10 wykazała istotność wszystkich parametrów funkcji skurczu fibrokompozytu użytego w badaniach na poziomie prawdopodobieństwa 0,05.



Rys. 7.5. Skurcz fibrokompozytu użytego w badaniach w korelacji czasu i natężenia prądu indukcyjnego

Wyznaczona wartość współczynnika determinacji wyniosła 0,86 (por. tabl. 7.10), co oznacza, że 86% ogólnej zmienności skurczu fibrokompozytu wyjaśniona jest przez zaproponowaną zależność funkcyjną. Z wyników analizy wariancji wynika następujący podział (por. rozdz. 5.3 i tabl. 7.11): zmienność wyjaśniona modelem regresji: 853,8, zmienna resztowa: 16,3. Hipotezę zerową, mówiącą że żadna zmienna niezależna w modelu nie ma istotnego wpływu na zmienną zależną należy odrzucić na poziomie prawdopodobieństwa bliskiego zeru. Hipotezę odrzucono.

Tablica 7.10. Statystyczna ocena istotności parametrów funkcji skurczu badanego fibrokompozytu w korelacji czasu i natężenia prądu indukcyjnego

| Zależność funkcyjna: $\varepsilon_s = a_1(1 - e^{a_2 t^{a_3}}) + a_4 I$ | | | | | | |
|--|--------|-------------|---|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Poziom ufności: 95% ($\alpha=0,05$); Udział wariancji wyjaśnionej $R^2=0,86$ | | | | | | |
| Współczynnik funkcji | Ocena | Błąd stand. | Wartość testu istotności t dla stopni swobody df=39 | Poziom prawdopodobieństwa p | Dolna granica ufności | Górna granica ufności |
| a_1 | 0,898 | 0,005 | 177,447 | 0,000 | 0,888 | 0,908 |
| a_2 | -0,201 | 0,007 | -30,838 | 0,000 | -0,214 | -0,188 |
| a_3 | 0,597 | 0,012 | 48,687 | 0,000 | 0,573 | 0,621 |
| a_4 | -0,028 | 0,002 | -18,689 | 0,000 | -0,031 | -0,025 |

Tablica 7.11. Zestawienie wyników uzyskanych z analizy wariancji funkcji skurczu badanego kompozytu w korelacji czasu i natężenia prądu indukcyjnego

| Efekt | Analiza wariancji (ANOVA) | | | | |
|--------------------|---------------------------|-----------------|----------------|--------------|-----------------------------|
| | Suma kwadratów | Stopnie swobody | Średnia kwadr. | Statystyka F | Poziom prawdopodobieństwa p |
| Regresja | 853,8 | 4 | 213,5 | 24944,8 | 0,00 |
| Zmienność resztowa | 16,3 | 1903 | 0,0086 | | |
| Razem | 870,1 | 1907 | | | |

Posługując się regresją wieloraką wyznaczono zależność funkcyjną opisującą zmiany skurczu fibrokompozytu w korelacji czasu t , prędkości fali ultradźwiękowej V (z uwzględnieniem zmian tych prędkości w czasie w okresie 600 dni) oraz natężenia prądu I :

$$\varepsilon_s = 9,554(1 - e^{-2,264t^{0,098}}) - 4,171V + 0,510V^2 - 0,029I \quad (7.1)$$

Współczynnik korelacji funkcji regresji wyniósł 0,96. Wszystkie parametry funkcji okazały się statystycznie istotne na poziomie istotności 0,05 (tabl. 7.12). Można więc przyjąć, że zmienne objaśniające funkcji - natężenie indukowanego prądu (I) i prędkość fali ultradźwiękowej (V) mają istotny wpływ na zmienną objaśnianą (skurcz fibrokompozytu). Wartość współczynnika

determinacji wyniosła 0,91 (tabl. 7.12), co oznacza, że 91% ogólnej zmienności skurczu fibrokompozytu wyjaśniana jest przez zaproponowaną zależność funkcyjną. Z wyników analizy wariancji (tabl. 7.13) wynika następujący podział: zmienność wyjaśniona modelem regresji: 315,2, zmienna resztowa: 3,8. Hipotezę zerową, mówiącą, że żadna zmienna niezależna nie ma istotnego wpływu na zmienną zależną należy odrzucić na poziomie prawdopodobieństwa bliskiego zeru (por. rozdz. 5.3 i tabl. 7.13). Hipotezę odrzucono.

Tablica 7.12. Statystyczna ocena istotności parametrów funkcji skurczu badanego fibrokompozytu w korelacji czasu, prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

| Zależność funkcyjna: $\epsilon_s = a_1(1 - e^{a_2 t^{a_3}}) + a_4 V + a_5 V^2 + a_6 I$ | | | | | | |
|--|--------|-------------|---|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Poziom ufności: 95% ($\alpha=0,05$); Udział wariancji wyjaśnionej $R^2=0,91$ | | | | | | |
| Współczynnik funkcji | Ocena | Błąd stand. | Wartość testu istotności t dla stopni swobody $df=39$ | Poziom prawdopodobieństwa p | Dolna granica ufności | Górna granica ufności |
| a_1 | 9,554 | 2,482 | 3,849 | 0,000 | 4,681 | 14,427 |
| a_2 | -2,264 | 0,254 | -8,917 | 0,000 | -2,762 | -1,765 |
| a_3 | 0,098 | 0,010 | 9,871 | 0,000 | 0,078 | 0,117 |
| a_4 | -4,171 | 1,151 | -3,624 | 0,000 | -6,431 | -1,911 |
| a_5 | 0,510 | 0,133 | 3,833 | 0,000 | 0,249 | 0,771 |
| a_6 | -0,029 | 0,002 | -14,655 | 0,000 | -0,033 | -0,025 |

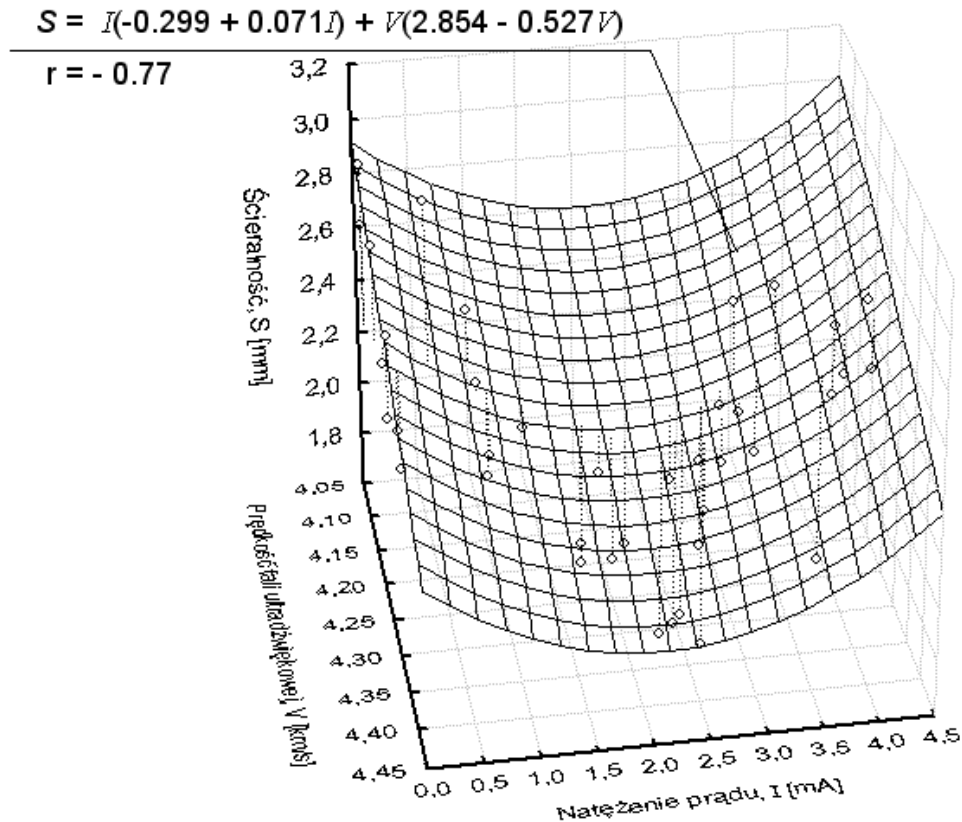
Tablica 7.13. Zestawienie wyników uzyskanych z analizy wariancji funkcji skurczu badanego fibrokompozytu w korelacji czasu, prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

| Efekt | Analiza wariancji (ANOVA) | | | | |
|--------------------|---------------------------|-----------------|----------------|--------------|-----------------------------|
| | Suma kwadratów | Stopnie swobody | Średnia kwadr. | Statystyka F | Poziom prawdopodobieństwa p |
| Regresja | 315,2 | 6 | 52,5 | 9581,6 | 0,00 |
| Zmienność resztowa | 3,8 | 691 | 0,0055 | | |
| Razem | 318,9 | 697 | | | |

7.1.6. Odporność na ścieranie

Na rys. 7.6 przedstawiono korelację odporności na ścieranie (S), prędkości fali ultradźwiękowej (V) oraz natężenia prądu indukcyjnego (I). Wraz ze wzrostem prędkości przebiegu fali ultradźwiękowej w badanym fibrokompozycie zwiększa się jego odporność na ścieranie. Jednak duża zawartość włókien stalowych wpływa niekorzystnie na odporność na ścieranie materiału objętego badaniami. Najmniejszą ścieralność fibrokompozyt osiąga dla

natężenia prądu indukcyjnego na poziomie 2,2 mA, co odpowiada zawartości włókien stalowych $V_f = 1,4\%$ (por. rys. 6.6). Najmniejszej ścieralności towarzyszy również duża prędkość fali ultradźwiękowej, powyżej 4,4 km/s.



Rys. 7.6. Odporność na ścieranie fibrokompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

Odporność na ścieranie wiąże się ze spójnością struktury fibrokompozytu, która przy dużych zawartościach włókien stalowych mieści w sobie nieciągłości w postaci pustek powietrznych. Stal, z której wykonane są włókna charakteryzuje się większą odpornością na ścieranie niż matryca kompozytu. Wraz ze wzrostem zawartości włókien wzrasta więc odporność badanego kompozytu na ścieranie. Jednak przy większych zawartościach włókien, nieciągłości struktury wpływają na obniżenie odporności na ścieranie. Statystyczna ocena parametrów funkcji przedstawionej na rys. 7.6 wykazała istotność wszystkich tych parametrów na poziomie prawdopodobieństwa 0,05 (tabl. 7.14). Wartość współczynnika determinacji wyniosła 0,59 (por. tabl. 7.14), co oznacza, że 59% ogólnej zmienności odporności na ścieranie wyjaśniona jest przez zaproponowaną zależność funkcyjną. Z wyników analizy wariancji wynika następujący podział (por. rozdz. 5.3 i tabl. 7.15): zmienność wyjaśniona modelem regresji: 220,0, zmienna resztowa: 1,4. Hipotezę zerową,

mówiącą, że żadna zmienna niezależna w modelu nie ma istotnego wpływu na zmienną zależną należy odrzucić na poziomie prawdopodobieństwa bliskiego zeru.

Tablica 7.14. Statystyczna ocena istotności parametrów funkcji odporności na ścieranie fibrokompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

| Zależność funkcyjna: $S = a_1I + a_2I^2 + a_3V + a_4V^2$ | | | | | | |
|--|--------------|--------------------|---|------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Poziom ufności: 95.0% ($\alpha=0.05$); Udział wariacji wyjaśnionej $R^2=0,59$ | | | | | | |
| Współczynnik funkcji | Ocena | Błąd stand. | Wartość testu istotności t dla stopni swobody $df=39$ | Poziom prawdopodobieństwa p | Dolna granica ufności | Górna granica ufności |
| a ₁ | -0,299 | 0,096 | -3,129 | 0,004 | -0,493 | -0,105 |
| a ₂ | 0,071 | 0,023 | 3,155 | 0,003 | 0,025 | 0,117 |
| a ₃ | 2,854 | 0,483 | 5,904 | 0,000 | 1,873 | 3,836 |
| a ₄ | -0,527 | 0,115 | -4,597 | 0,000 | -0,760 | -0,294 |

Tablica 7.15. Zestawienie wyników uzyskanych z analizy wariacji funkcji odporności na ścieranie badanego kompozytu w korelacji prędkości fali ultradźwiękowej i natężenia prądu indukcyjnego

| Efekt | Analiza wariacji (ANOVA) | | | | |
|--------------------|---------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------------|
| | Suma kwadratów | Stopnie swobody | Średnia kwadr. | Statystyka F | Poziom prawdopodobieństwa p |
| Regresja | 220,0 | 4 | 55,0 | 1370,7 | 0,00 |
| Zmienność resztowa | 1,4 | 35 | 0,0401 | | |
| Razem | 221,4 | 39 | | | |

7.1.7. Podsumowanie

Mając zdefiniowane zależności wybranych cech kompozytu od parametrów badań nieniszczących, prędkości fali (V) i natężenia prądu (I), w wyniku analizy korelacyjnej wyznaczono równania regresji y (cecha kompozytu) względem x i z (prędkość fali V oraz natężenie prądu I). Opisem objęto te właściwości fibrokompozytu, dla których zależności funkcyjne charakteryzowały się wysokim współczynnikiem korelacji. Poprawność opisu została zweryfikowana metodami statystycznymi wykazując istotność wszystkich parametrów zależności funkcyjnych. Utworzono zbiór funkcyjnych zależności, który stanowi matematyczny opis właściwości kompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi oparty na wynikach badań empirycznych (tabl. 7.16). Znając parametry uzyskane z badań nieniszczących (tzn. prędkość V i natężenie I) na podstawie funkcyjnych zależności można określić właściwości wykonanego już fibrokompozytu.

Tablica 7.16. Matematyczny opis właściwości fibrokompozytu z włóknami rozproszonymi

| L.p. | Zależność funkcyjna | Współczynnik korelacji |
|----------|---|------------------------|
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> |
| 1 | $f_{c,cube} = -164.93 + 53.29e^{-0.0493V / (1.792 + I)}$ | 0,93 |
| 2 | $f_{t,spl} = 2.241V - 6.527e^{-0.544I}$ | 0,97 |
| 3 | $E_d = -664.3 + 300.1V - 31.74V^2 + I(1.936 - 0.259I)$ | 0,98 |
| 4 | $S = -0.299I + 0.071I^2 + 2.854V - 0.0527V^2$ | 0,77 |
| 5 | $\varepsilon_s = 9,554(1 - e^{-2,264t^{0,098}}) - 4,171V + 0,510V^2 - 0,029I$ | 0,96 |
| 6 | $\rho = -26.03 + 12.83V - 1.45V^2 - 0.210e^{-0.603I}$ | 0,97 |

Zaproponowane zależności funkcyjne umożliwiają nieniszczącą identyfikację cech fibrokompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi, co pozwala na szybką ocenę oraz kontrolę jakości tego materiału.

7.2. Rozkład włókien w fibrokompozycie

Rozkład włókien stalowych w przestrzeni fibrokompozytu kształtowany jest przez szereg czynników, takich jak: właściwości matrycy (np. konsystencja mieszanki, wielkość ziaren kruszywa), a zwłaszcza procesów mieszania, formowania i zagęszczania. Na etapie mieszania i formowania następuje wymuszone rozproszenie włókien w kompozycie z jednoczesnym nadaniem im przestrzennej orientacji. Podczas zagęszczania mieszanki kompozytu następuje sedymentacja włókien. Procesy mieszania, formowania a następnie zagęszczania kształtują właściwości stwardniałego kompozytu [115]. Rzeczywisty rozkład włókien w elementach z fibrokompozytu, jak też rzeczywistą zawartość włókien, można sprawdzić na podstawie zdjęć rentgenowskich, tomografii lub przekrojów tych elementów. Rozkład włókien stalowych jest na ogół mniej lub więcej niejednorodny. Nowym pojęciem jest struktura zbrojenia rozproszonego, która istotnie wpływa na właściwości kompozytu i powinna być kontrolowana [49]. Do opisu struktury zbrojenia rozproszonego stosuje się określenie średniej zawartości włókien w jednostce objętości oraz uśrednionej orientacji włókien i tzw. rozstawu włókien. Na podstawie rozstawu włókien można ocenić współdziałanie pojedynczych włókien i ich wpływ na szereg właściwości fibrokompozytu [49].

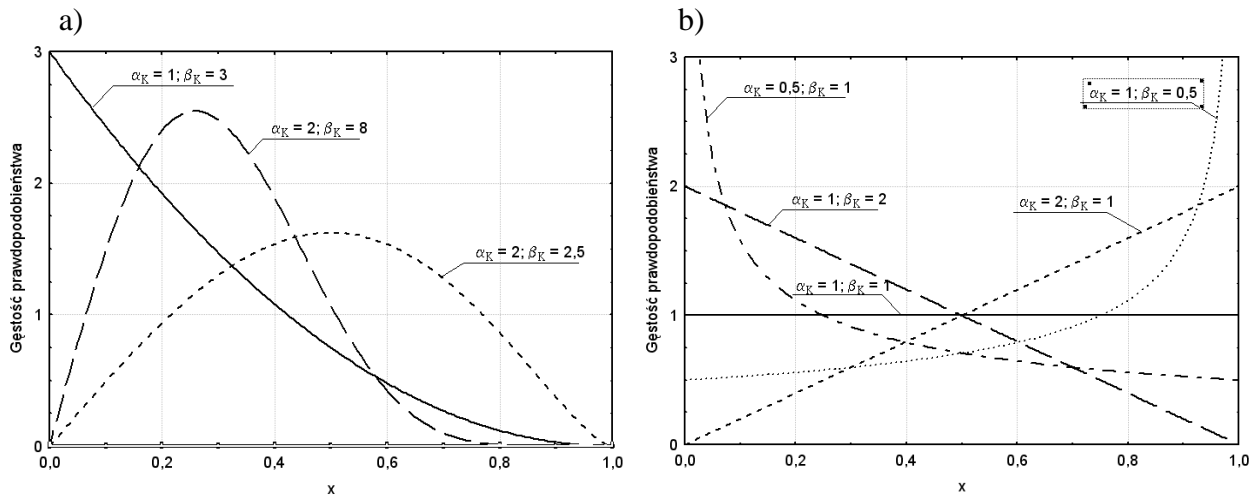
7.2.1. Przyjęte założenia i zależności

Założono, że włókna stalowe w przestrzeni kompozytu rozłożone są w sposób losowy. Prawdopodobieństwo występowania włókien określono rozkładem statystycznym Kumaraswamy, zwanym także rozkładem Minimax [76]. Jego zaletą jest łatwość modelowania postaci gęstości prawdopodobieństwa przy zmianie parametrów rozkładu α_K i β_K . Przykłady funkcji gęstości prawdopodobieństwa rozkładu Kumaraswamy dla różnych parametrów rozkładu α_K i β_K przedstawiono na rys. 7.8.

Rozkład Kumaraswamy jest rozkładem statystycznym określonym w przedziale $\langle 0, 1 \rangle$. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa określona jest następującą zależnością :

$$f(x; \alpha_K, \beta_K) = \alpha_K \beta_K x^{\alpha_K - 1} (1 - x^{\alpha_K})^{\beta_K - 1} \quad \text{dla} \quad 0 \leq x \leq 1. \quad (7.8)$$

Dla wartości $\alpha_K = \beta_K = 1$ rozkład Kumaraswamy przyjmuje postać prostokątnego rozkładu statystycznego (rys. 7.8 b). Właściwość tę wykorzystano do opisu rozkładu włókien w przestrzeni kompozytu wzdłuż osi X i Z.



Rys. 7.8. Gęstość prawdopodobieństwa rozkładu statystycznego Kumaraswamy dla różnych wartości parametrów α_K i β_K , odpowiednio: a) 1 i 3, 2 i 8, 2 i 2,5, b) 1 i 1, 0,5 i 1, 1 i 2, 2 i 1, 1 i 0,5

Założono, że przestrzeń kompozytu jest sześcianem o wymiarach 150x150x150mm, o nieodkształcalnych bokach. Długość włókien w rozpatrywanym kompozycie wynosi 50mm.

Ponadto w modelu przyjęto następujące uproszczenia:

- włókno opisuje się linią prostą,
- średnica włókien jest bliska zeru,
- włókna są sztywne i nieodkształcalne.

7.2.2. Wyznaczenie parametrów rozkładu statystycznego i ich ocena

W celu wyznaczenia parametrów rozkładu włókien α_K i β_K przy uwzględnieniu ich osiadania spowodowanego wibrowaniem, wykonano 27 elementów próbnych o wymiarach 150x150x150mm z fibrokompozytu o różnej konsystencji. Zawartość włókien w kompozycie wynosiła 1,5% w stosunku do objętości matrycy kompozytu. Zdecydowano się na badania kompozytu z zawartością 1,5% włókien, ponieważ przy takiej zawartości włókien stalowych materiał charakteryzuje się korzystnymi właściwościami mechaniczno-fizycznymi [51÷53, 55, 57]. Badaniom poddano próbki stwardniałego kompozytu, które w czasie formowania charakteryzowały się różną konsystencją, kształtowaną stosunkiem c/w, zawierającą się od 2s do 7s wg metody Ve-Be. Różny był także czas ich wibrowania ($t_{wib} = 20\div 240s$) (tabl. 7.17).

Tablica 7.17. Czasy wibrowania i konsystencje mieszanek fibrokompozytu użytego w badaniach

| L.p. | Ilość próbek [szt.] | Czas wibrowania t_{wib} [s] | Konsystencja t_{ve-Be} [s] |
|------|---------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1 | 3 | 20 | 7 |
| 2 | 3 | 20 | 4 |
| 3 | 3 | 20 | 2 |
| 4 | 3 | 60 | 7 |
| 5 | 3 | 60 | 4 |
| 6 | 3 | 60 | 2 |
| 7 | 3 | 240 | 7 |
| 8 | 3 | 240 | 4 |
| 9 | 3 | 240 | 2 |

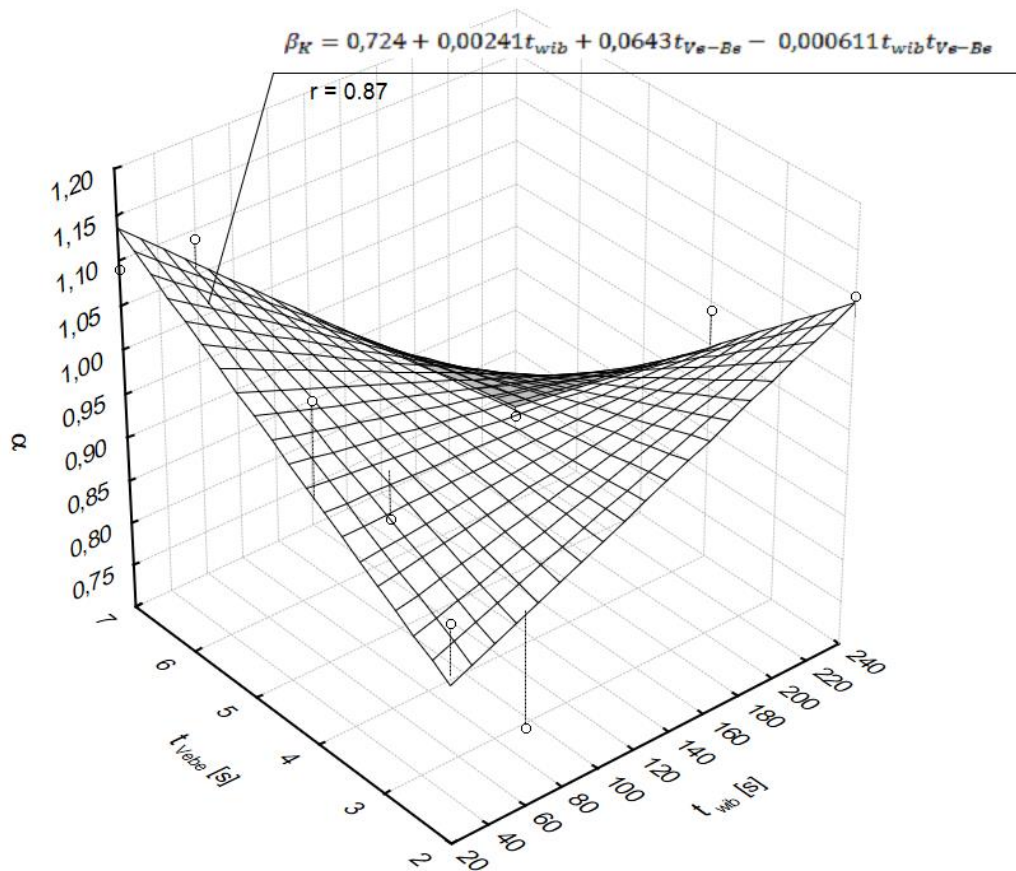
Po stwardnieniu próbki zostały przecięte w połowie szerokości. Powierzchnię przecięcia podzielono na 10 równych poziomych sekcji, następnie policzono ilość włókien w każdej z sekcji przekroju posługując się programem komputerowym Adobe Photoshop [225]. Przykładowy przekrój próbki fibrokompozytu z podziałem na sekcje przedstawiono na rys. 7.9.



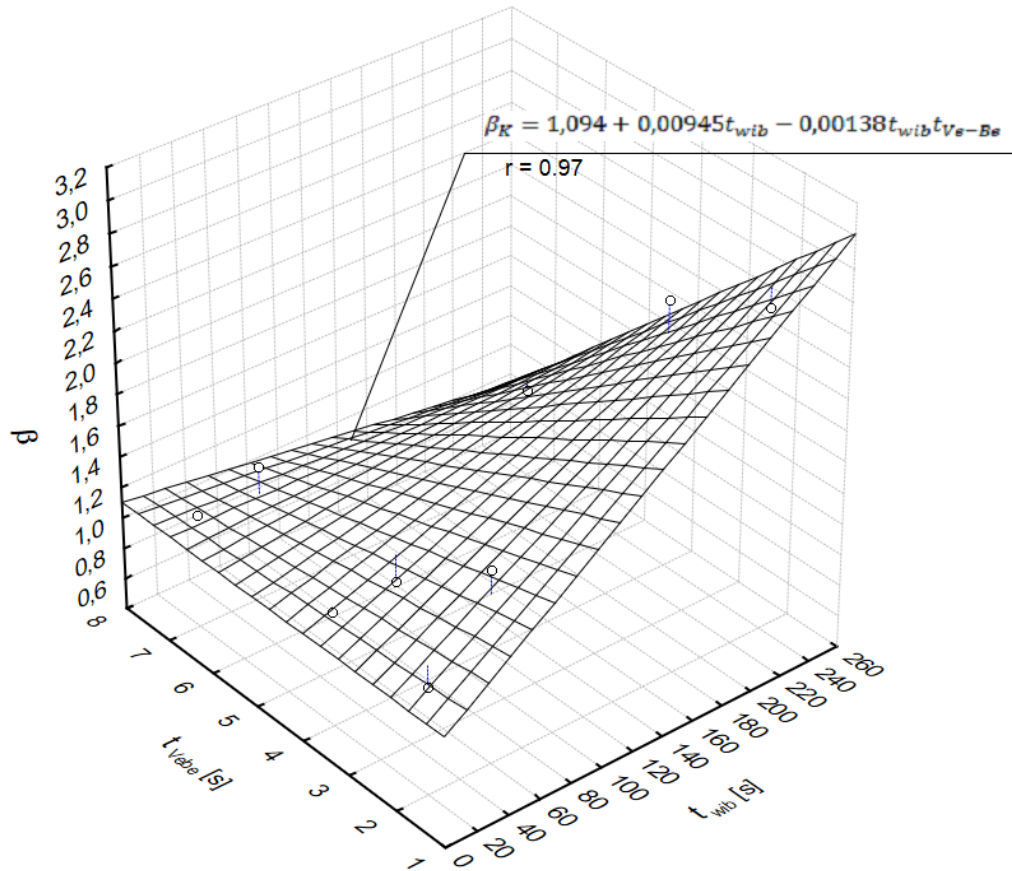
Rys. 7.9. Przekrój próbki fibrokompozytu z naniesionymi polami podziału i numeracją przekroju włókien

Posługując się testem zgodności rozkładu statystycznego χ^2 , dla każdej grupy próbek różniącej się konsystencją i czasem wibrowania, dobrano parametry rozkładu statystycznego Kumaraswamy α_K i β_K tak, aby rozkład ten był jak najbardziej zgodny z rzeczywistym rozkładem włókien. Parametry rozkładu statystycznego Kumaraswamy α_K i β_K dobierano w ten sposób, aby spełnione były warunki testu F Fishera–Snedocora zawarte w funkcjach (5.3÷5.5, rozdz. 5.3) przy założeniu, że wartość n_p zawarta w funkcji 5.3 jest liczbą rozpatrywanych przedziałów odpowiadającą liczbie sekcji przekroju (por. rys. 7.9).

Łącznie przeprowadzono 9 testów χ^2 dla różnych czasów wibrowania i konsystencji (por. tabl. 7.17), które potwierdziły zgodność rozkładu statystycznego z rzeczywistym rozkładem włókien. Po wyznaczeniu parametrów rozkładu Kumaraswamy, stosując regresję wieloraką [95] wyznaczono funkcję parametrów α_K i β_K od czasu wibrowania i konsystencji mieszanki kompozytu. Zależność tę opisano wielomianem algebraicznym liniowym z interakcją. Taka postać funkcji pozwoliła uzyskać duży współczynnik korelacji (rys. 7.10 i 7.11).



Rys. 7.10. Zależność parametru α_K od czasu wibrowania i konsystencji Ve-Be



Rys. 7.11. Zależność parametru β_K od czasu wibrowania i konsystencji Ve-Be

Parametry α_K i β_K rozkładu statystycznego Kumaraswamy potrzebne do wyznaczenia prawdopodobieństwa wystąpienia włókna wzdłuż osi pionowej próbki przedstawiono funkcjami (7.9 i 7.10), gdzie zmiennymi są czas wibrowania (t_{wib}) oraz konsystencja kompozytu (t_{Ve-Be}):

$$\alpha_K = 0,724 + 0,00241t_{wib} + 0,0643t_{Ve-Be} - 0,000611t_{wib}t_{Ve-Be}, \quad (7.9)$$

$$\beta_K = 1,094 + 0,00945t_{wib} - 0,00138t_{wib}t_{Ve-Be}. \quad (7.10)$$

Przeprowadzono statystyczną ocenę parametrów funkcji regresji dla przyjętego poziomu istotności 0,05. Ocena wykazała istotność wszystkich parametrów α_K i β_K (tabl. 7.18 i 7.19).

Tablica 7.18. Ocena istotności parametrów funkcji regresji parametru α_K rozkładu Kumaraswamy zależnego od czasu wibrowania (t_{wib}) i konsystencji (t_{Ve-Be})

| Zależność funkcyjna: $\alpha_K = a + bt_{wib} + ct_{Ve-Be} + dt_{wib}t_{Ve-Be}$ | | | | | | |
|---|-----------|----------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Ocena | Błąd | Wart. statystyki t | poziom prawdopodobieństwa p | Dolna granica ufności | Górna granica ufności |
| a | 0,724 | 0,108 | 6,73 | 0,00110 | 0,448 | 1,00 |
| b | 0,00241 | 0,000751 | 3,21 | 0,0236 | 0,000484 | 0,00434 |
| c | 0,0643 | 0,0224 | 2,87 | 0,0352 | 0,00662 | 0,122 |
| d | -0,000611 | 0,000157 | -3,90 | 0,0114 | -0,00101 | -0,000208 |

Tablica 7.19. Ocena istotności parametrów funkcji regresji parametru β_K rozkładu Kumaraswamy zależnego od czasu wibrowania t_{wib} i konsystencji t_{Ve-Be}

| Zależność funkcyjna: $\beta_K = a + bt_{wib} + dt_{wib}t_{Ve-Be}$ | | | | | | |
|---|----------|----------|--------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Ocena | Błąd | Wart. statystyki t | poziom prawdopodobieństwa p | Dolna granica ufności | Górna granica ufności |
| a | 1,094 | 0,0738 | 14,82409 | 0,000006 | 0,913 | 1,27 |
| b | 0,00945 | 0,000889 | 10,62243 | 0,000041 | 0,00727 | 0,0116 |
| c | -0,00138 | 0,000167 | -8,24756 | 0,000172 | -0,00179 | -0,000970 |

Na podstawie wyznaczonych zależności parametrów α_K i β_K od czasu wibrowania i konsystencji mieszanki kompozytu wyznaczono wartości modelowe parametrów rozkładu $\alpha_{K,mod}$ i $\beta_{K,mod}$. Parametry rozkładu statystycznego Kumaraswamy przedstawiono w tablicy 7.20.

Tablica 7.20. Parametry α_K i β_K rzeczywiste i modelowe rozkładu statystycznego Kumaraswamy w zależności od czasu wibrowania (t_{wib}) i konsystencji (t_{Ve-Be})

| L.p. | t_{wib} [s] | t_{Ve-Be} [s] | α_K | β_K | $\alpha_{K,mod}$ | $\beta_{K,mod}$ |
|------|---------------|-----------------|------------|-----------|------------------|-----------------|
| 1 | 20 | 7 | 1,09 | 1,13 | 1,14 | 1,09 |
| 2 | 20 | 4 | 1,09 | 1,14 | 0,98 | 1,17 |
| 3 | 20 | 2 | 0,95 | 1,1 | 0,88 | 1,23 |
| 4 | 60 | 7 | 1,09 | 1,27 | 1,06 | 1,08 |
| 5 | 60 | 4 | 0,92 | 1,14 | 0,98 | 1,33 |
| 6 | 60 | 2 | 0,79 | 1,64 | 0,92 | 1,50 |
| 7 | 240 | 7 | 0,72 | 0,97 | 0,73 | 1,04 |
| 8 | 240 | 4 | 0,99 | 2,14 | 0,97 | 2,04 |
| 9 | 240 | 2 | 1,16 | 2,64 | 1,14 | 2,70 |

7.2.3. Opis rozkładu włókien w fibrokompozycie

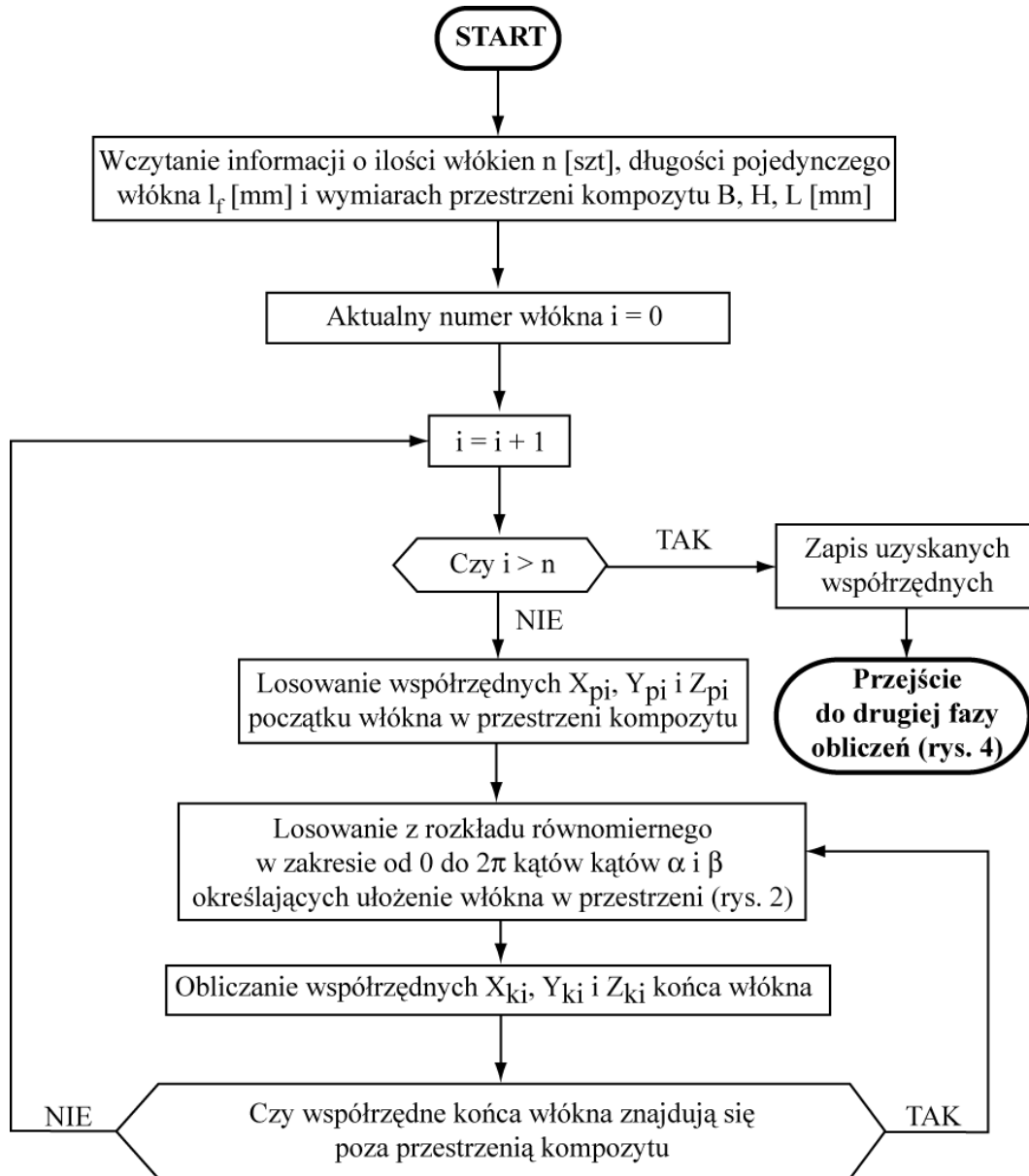
Ostatecznie, posługując się metodami statystycznymi, wyznaczono prawdopodobieństwo wystąpienia włókien w przestrzeni fibrokompozytu uwzględniające czas wibrowania mieszanki i konsystencję. Prawdopodobieństwo to stanowiące statystyczny opis rozkładu włókien daje odpowiedź o rozkładzie włókien w przestrzeni fibrokompozytu wzdłuż trzech osi układu kartezyjskiego. Funkcje gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia włókna wzdłuż osi X , Y i Z przedstawiono w zależnościach 7.11, 7.14 i 7.18, natomiast dystrybuanty rozkładu statystycznego w zależnościach 7.12, 7.15 i 7.19 (tabl. 7.21). Parametry statystyczne α_K i β_K przedstawiono w zależnościach 7.13, 7.16, 7.17 i 7.20. Zmiennymi parametrów rozkładu statystycznego α_K i β_K są czas wibrowania (t_{wib}) oraz konsystencja fibrokompozytu (t_{Ve-Be}).

Tablica 7.21. Opis rozkładu włókien w fibrokompozycie. Funkcje gęstości i dystrybuanty oraz wartości parametrów rozkładu statystycznego włókien w przestrzeni fibrokompozytu

| L.p. | Funkcja gęstości prawdopodobieństwa f / dystrybuanta rozkładu statystycznego F / parametry rozkładu statystycznego α_K, β_K | Numeracja funkcji |
|------|--|----------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | <i>Oś pozioma X, $0 \leq x \leq 1$</i> | |
| | $f(x; \alpha_K, \beta_K) = \alpha_K \beta_K x^{\alpha_K - 1} (1 - x^{\alpha_K})^{\beta_K - 1}$ | (7.11) |
| | $F(x; \alpha_K, \beta_K) = 1 - (1 - x^{\alpha_K})^{\beta_K}$ | (7.12) |
| | $\alpha_K = \beta_K = 1$ | (7.13) |
| 2 | <i>Oś pionowa Y, $0 \leq y \leq 1$</i> | |
| | $f(y; \alpha_K, \beta_K) = \alpha_K \beta_K y^{\alpha_K - 1} (1 - y^{\alpha_K})^{\beta_K - 1}$ | (7.14) |
| | $F(y; \alpha_K, \beta_K) = 1 - (1 - y^{\alpha_K})^{\beta_K}$ | (7.15) |
| | $\alpha_K = 0,724 + 0,00241t_{wib} + 0,0643t_{Ve-Be} - 0,000611t_{wib}t_{Ve-Be}$ | (7.16) |
| | $\beta_K = 1,094 + 0,00945t_{wib} - 0,00138t_{wib}t_{Ve-Be}$ | (7.17) |
| 3 | <i>Oś pozioma Z, $0 \leq z \leq 1$</i> | |
| | $f(z; \alpha_K, \beta_K) = \alpha_K \beta_K z^{\alpha_K - 1} (1 - z^{\alpha_K})^{\beta_K - 1}$ | (7.18) |
| | $F(z; \alpha_K, \beta_K) = 1 - (1 - z^{\alpha_K})^{\beta_K}$ | (7.19) |
| | $\alpha_K = \beta_K = 1$ | (7.20) |

W celu wykonania symulacji rozkładu włókien w przestrzeni fibrokompozytu, posługując się językiem programowania *STATISTICA VISUAL BASIC*, opracowano program komputerowy działający w środowisku programu *STATISTICA* [227], któremu nadano nazwę **FIBERDIST**.

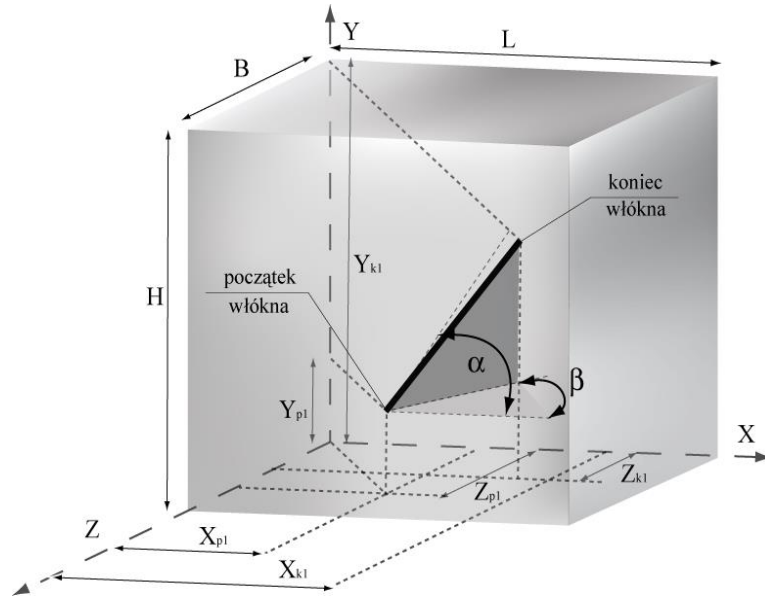
Program *FIBERDIST* generuje współrzędne położenia włókien w zadanej przestrzeni zgodnie z rozkładem statystycznym Kumaraswamy, na podstawie wyznaczonych parametrów α_K i β_K , podanych w tabelicy 7.21. Algorytm programu *FIBERDIST* definiujący ułożenie włókien stalowych w przestrzeni fibrokompozytu pokazano na rys. 7.12.



Rys. 7.12. Algorytm programu *FIBERDIST* wyznaczający ułożenie włókien w przestrzeni kompozytu – faza pierwsza obliczeń

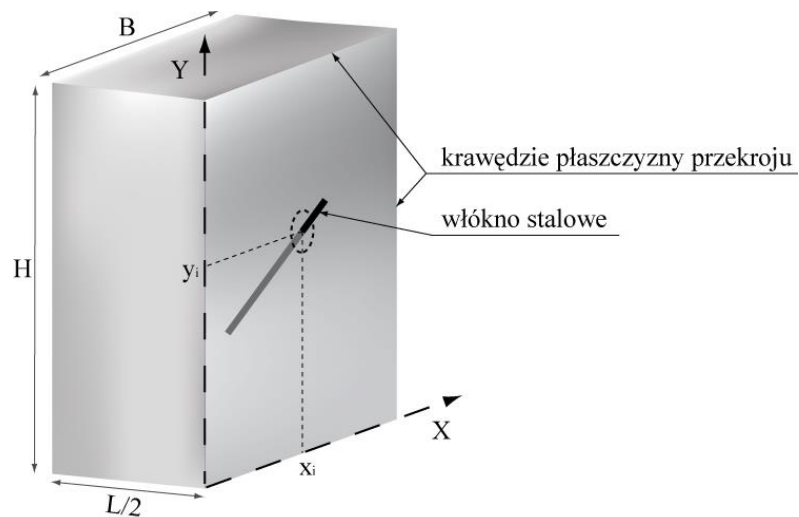
Ilość wszystkich włókien stalowych „ n ” zawartych w przestrzeni fibrokompozytu (rys. 7.13) określana jest na podstawie założonej objętościowej zawartości włókien w danym

fibrokompozycie, wymiarów włókien oraz gęstości stali. Efektem końcowym procesu obliczeniowego są dane o współrzędnych początku i końca włókien w przestrzeni fibrokompozytu (rys. 7.13).

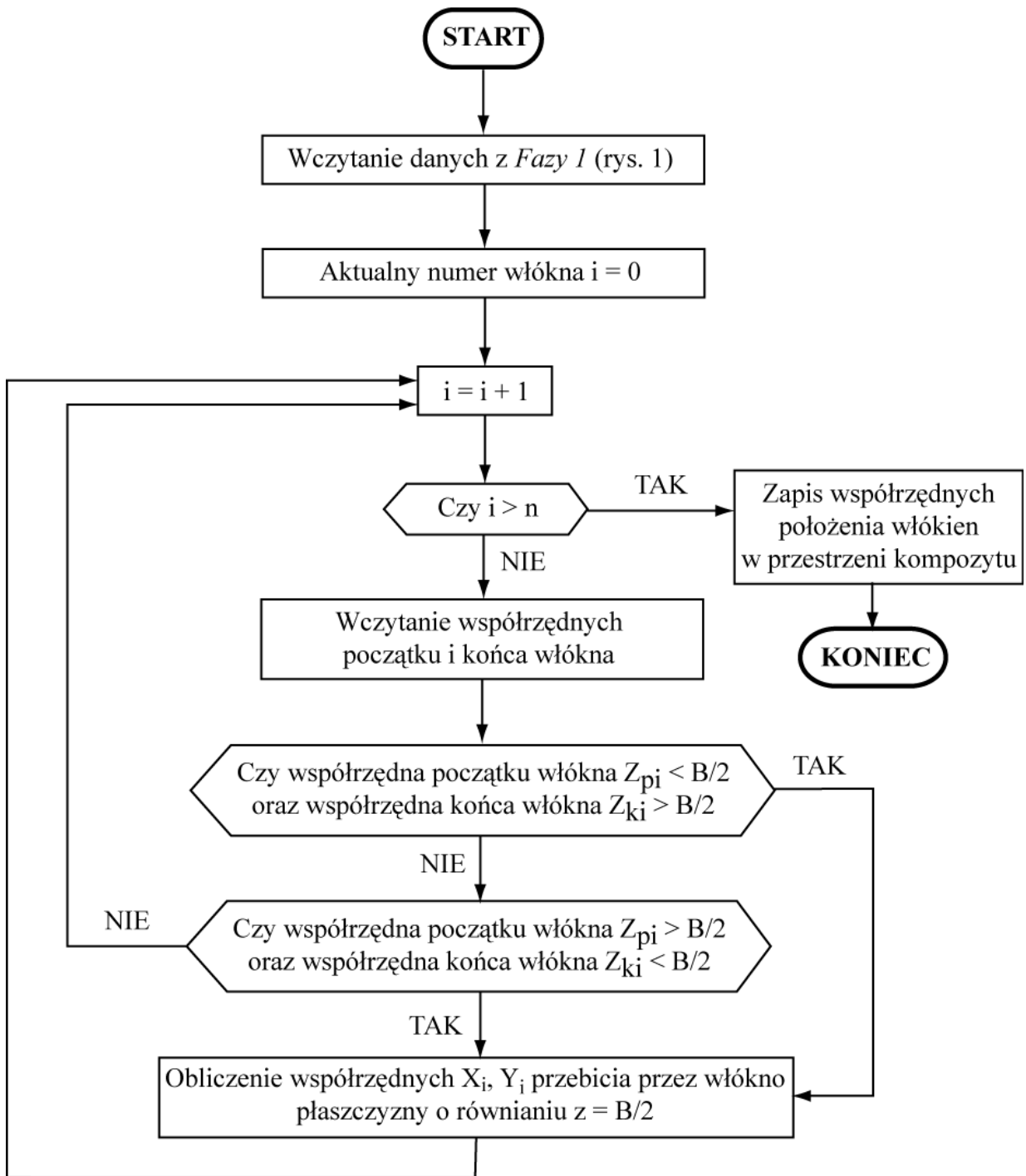


Rys. 7.13. Ułożenie pojedynczego włókna względem osi układu kartezjańskiego

W dalszej części obliczeń informacje o położeniu włókien w przestrzeni kompozytu służą do ustalenia liczby włókien i ich rozkładu w przekroju zniszczenia fibrokompozytu. Założono, że przez przestrzeń fibrokompozytu (sześcian o boku 150mm) przechodzi pionowa powierzchnia prostopadła do osi X. Powierzchnia ta przecina przestrzeń fibrokompozytu w $L/2$ (rys. 7.14). Sposób obliczenia współrzędnych punktów przebicia powierzchni przekroju przestrzeni fibrokompozytu przez włókna przedstawiono na rys. 7.15.



Rys. 7.14. Punkt przebicia powierzchni przekroju przestrzeni fibrokompozytu przez włókno stalowe



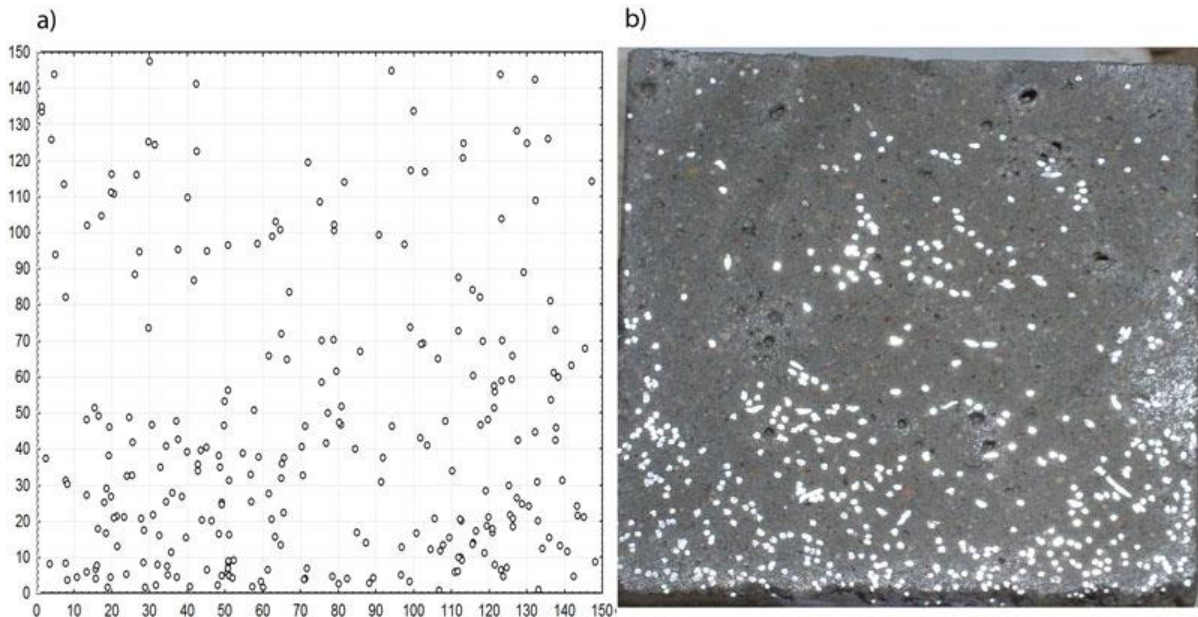
Rys. 7.15. Algorytm obliczeniowy programu *FIBERDIST* wyznaczający współrzędne punktów przebiecia powierzchni przekroju przestrzeni fibrikompozytu przez włókna – faza druga obliczeń

W dysertacji zaproponowano opis rozkładu włókien stalowych w przestrzeni fibrokompozytu oparty na podstawach statystycznych. Zakłada on losowość rozkładu włókien w przestrzeni fibrokompozytu zgodnie z przyjętym rozkładem prawdopodobieństwa. W opisie uwzględniono osiadanie włókien stalowych pod wpływem siły ciężenia. Osiadanie włókien stalowych uzależnione jest od długości czasu wibrowania mieszanki kompozytu oraz jej konsystencji. Wykonane badania pozwoliły na określenie wpływu czasu wibrowania i konsystencji mieszanki fibrokompozytu na osiadanie włókien w jego przestrzeni. W dalszej części pracy (rozdz. 8.1) wykonano analizę porównawczą zaproponowanego opisu statystycznego z innym opisem opartym na podstawach geometrycznych [35, 36]. Dzięki zaproponowanemu opisowi możliwe jest przeciwdziałanie zjawisku sedymentacji przez właściwe dobranie parametrów wytwarzania fibrokompozytu: ustalenie konsystencji mieszanki oraz czasu jej wibrowania tak, aby zjawisko sedymentacji włókien zminimalizować.

8. DOŚWIADCZALNA WERYFIKACJA MODELU KOMPOZYTU MINERALNEGO Z WŁÓKNAMI ROZPROSZONYMI

8.1. Weryfikacja opisu rozkładu włókien w fibrokompozycie

W celu identyfikacji rozkładu włókien stalowych w przestrzeni fibrokompozytu fotografie przekrojów próbek, otrzymane w trakcie badań (rys. 8.1b), poddano komputerowej analizie obrazu przy użyciu programu GSA Image Analyser [226]. Uzyskano rzeczywiste ilości włókien stalowych w analizowanym przekroju. Analiza obrazów rozkładu włókien stalowych w przestrzeni kompozytu zaobserwowanych w badaniach (rys. 8.1b), jak i będących odpowiedzią zaproponowanego statystycznego opisu rozkładu włókien (rys. 8.1a) wykazała duże ich podobieństwo.

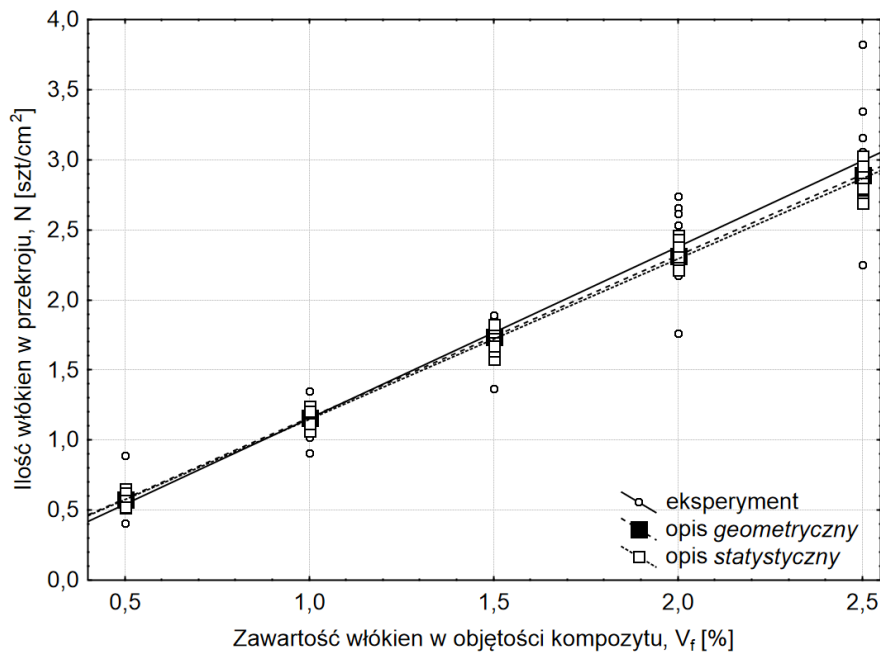


Rys. 8.1. Rozkład włókien stalowych w przekroju próbki z fibrokompozytu ($t_{vebe}=2s$, $t_{wib}=240s$): a) obraz teoretyczny wygenerowany przez program *FIBERDIST* uruchomiony w środowisku programu *STATISTICA*, b) obraz rzeczywisty

W celach porównawczych wykorzystano opis rozkładu włókien definiujący ułożenie włókien w przestrzeni fibrokompozytu w ujęciu geometrycznym (por. rozdz. 3.3), tzw. opis *geometryczny* [52, 53, 55, 57]. Dla *geometrycznego* opisu rozkładu włókien obliczono współczynnik rozkładu włókien stalowych (α_f). Dla włókien o długości $l_f = 50$ mm i powierzchni rozpatrywanego przekroju 150×150 mm wartość współczynnika α_f wynosi 0,58. Następnie obliczono dla różnej zawartości włókien w kompozycie ilości włókien przecinających rozpatrywany przekrój.

Na rys. 8.2 przedstawiono zależność ilości włókien stalowych przypadającą na 1 cm^2 przekroju elementu o boku 150 mm od procentowej ich zawartości w objętości kompozytu. Porównane

zostały wartości obliczone dla opisu rozkładu włókien *statystycznego*, *geometrycznego* i eksperymentalne wyznaczone na podstawie analizy fotografii przekrojów elementów próbnych.



Rys. 8.2. Zależność ilości włókien stalowych N przypadający na 1 cm² przekroju elementu od ich procentowej zawartości w objętości kompozytu V_f

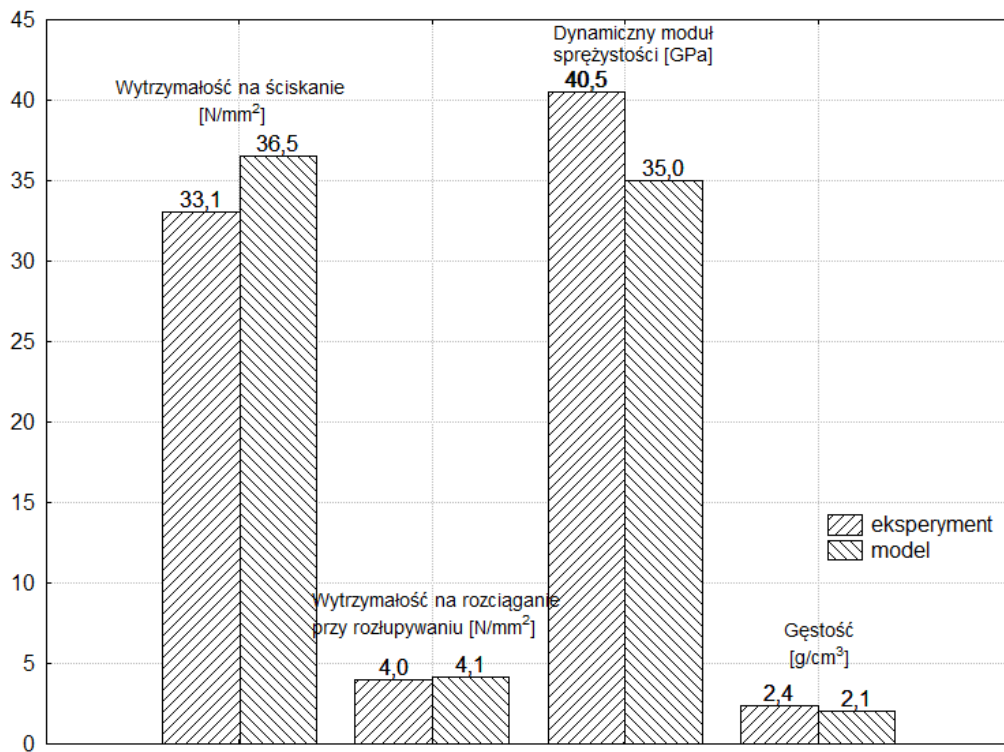
Analiza wyników przedstawionych na rys. 8.2 wskazuje na dużą zgodność opisu *statystycznego* i *geometrycznego* z wynikami badań. Różnice w wartościach obliczeń ilości włókien w rozpatrywanych przekrojach są statystycznie nieistotne. Ponadto wyznaczone wartości odchylenia standardowego ilości włókien w przekroju wykazują, że wraz ze wzrostem zawartości włókien stalowych w przestrzeni kompozytu odchylenie standardowe wyników badań wzrasta. Tendencja ta może być związana ze wzrostem zaburzeń wywołanych wpływem jednych włókien na drugie podczas przygotowywania mieszanki kompozytu na etapie mieszania składników. Wskazuje na to odchylenie standardowe równe 0,42 dla największej zbadanej objętościowej zawartości włókien w kompozycie, tj. 2,5%. Odchylenie standardowe dla tej ilości włókien według opisu *statystycznego* jest około trzykrotnie mniejsze niż odchylenie standardowe wykazane na podstawie badań eksperymentalnych. Zgodność wyników obliczeń rozkładu włókien z eksperymentem oraz przytoczonym w celach porównawczych opisem opartym na podstawach geometrycznych wskazuje na poprawność opracowanego opisu *statystycznego* i przyjętych założeń.

8.2. Weryfikacja matematycznego opisu właściwości fibrokompozytu

Fibrobeton towarowy

Badaniom poddano elementy próbne pochodzące od wykonawcy posadzki przemysłowej znajdującej się w hali Laboratorium Techniki Budowlanej Politechniki Koszalińskiej. Zakładana klasa betonu C20/25.

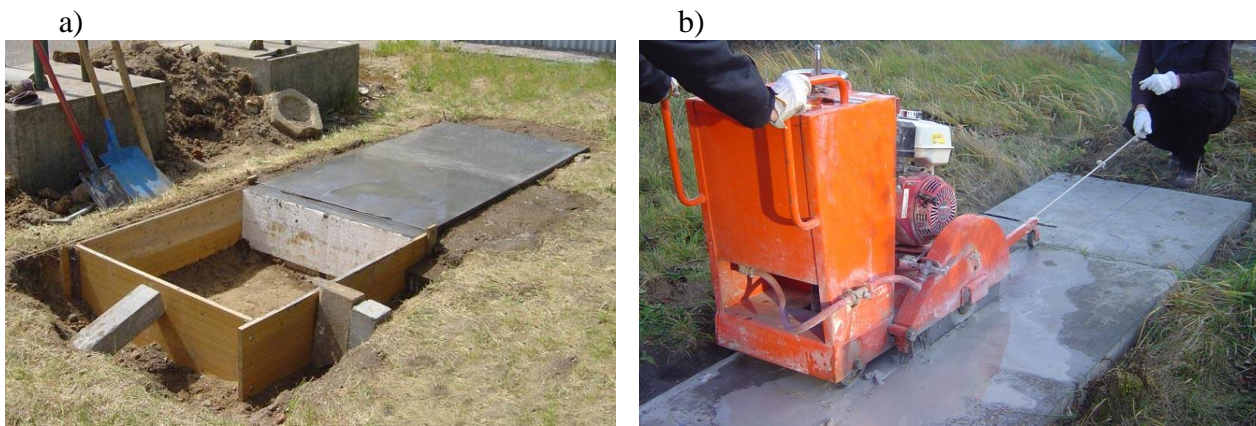
Po 28 dniach dojrzewania wykonano badania elementów próbnych (kostki sześciennie o boku 15cm). Wartości średniej wytrzymałości na ściskanie uzyskane z funkcyjnej zależności (por. rozdz. 7.1.7) na podstawie badań nieniszczących i uzyskanej w badaniach niszczących różnią się średnio o 9%. W przypadku wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu o 11%, dla dynamicznego modułu sprężystości 14%, natomiast dla gęstości o 13% (por. rys. 8.3). Różnice pomiędzy wartościami właściwości uzyskanymi z badań i obliczonymi są statystycznie nieistotne i wskazują na poprawność opracowanych zależności funkcyjnych. Obliczone na podstawie opisu matematycznego wartości skurczu oraz ścieralności fibrokompozytu wyniosły odpowiednio: $\varepsilon_s=0,60\%$ (po 28 dniach), $S=2,7\text{mm}$.



Rys. 8.3. Zestawienie eksperymentalnych i obliczeniowych wartości wybranych właściwości betonu towarowego

Płyty z fibrokompozytu przechowywane w warunkach naturalnych

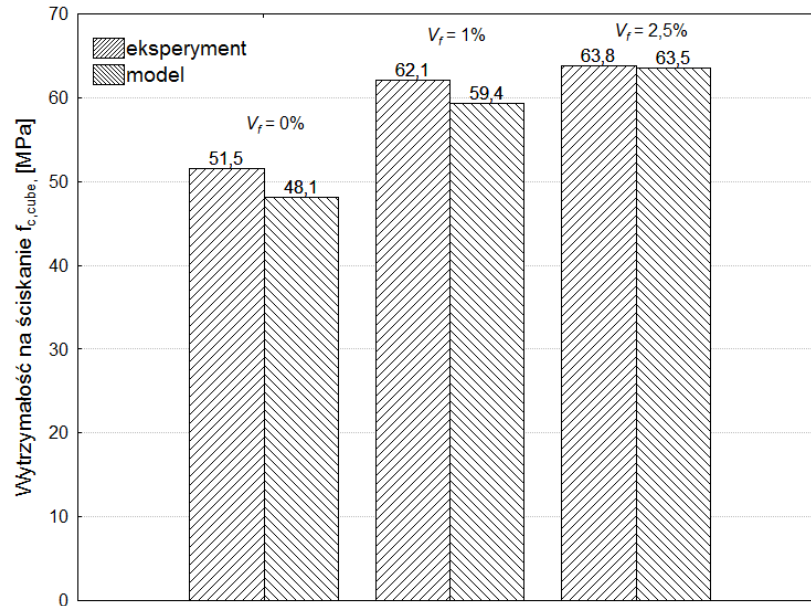
W celu zweryfikowania matematycznego opisu właściwości fibrokompozytu przeprowadzono badania na płycie, która dojrzewała w warunkach naturalnych. W terenie wykonano trzy płyty (rys. 8.4a) o różnej zawartości włókien stalowych tj. 0%, 1% i 2,5%. Po 2,5 roku płyty pocięto w celu wykonania elementów próbnych (rys. 8.4b). Następnie przeprowadzono badania nieniszczące oraz niszczące.



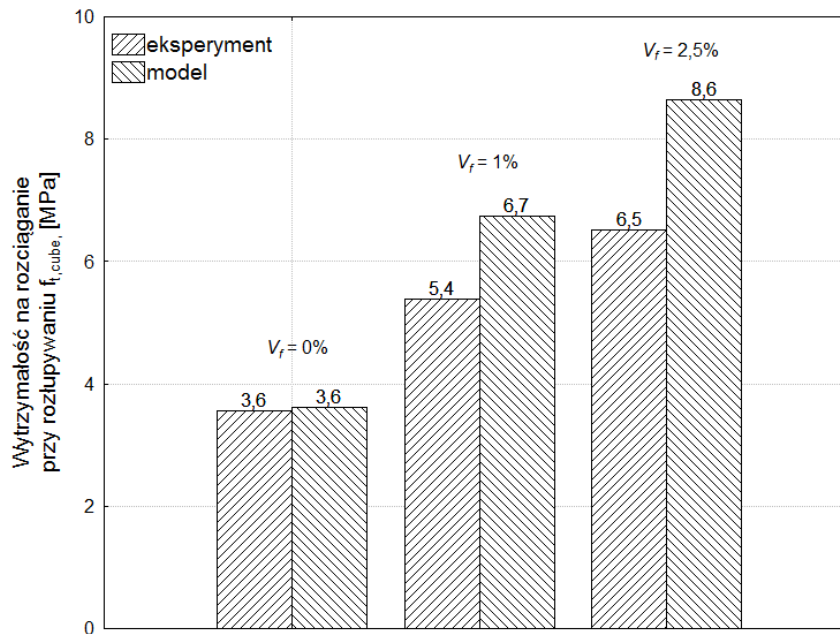
Rys. 8.4. Ogólny widok: a) wykonywania, b) cięcia płyt fibrokompozytu z włóknami rozproszonymi

Badania wytrzymałości na ściskanie elementów próbnych wyciętych z płyt potwierdziły korzystny wpływ dodatku włókien stalowych na tę właściwość fibrokompozytu (por. rys. 6.2 i 8.5). Największe różnice (rys. 8.5) pomiędzy wartościami wytrzymałości na ściskanie uzyskanymi z badań i obliczeniowymi wystąpiły dla kompozytu bez włókien i wyniosły 7%, natomiast najmniejsze dla kompozytu zawierającego 2,5% włókien stalowych (różnica 0,4%) (rys. 8.5). Wartości wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu uzyskane z badań i obliczeniowe różniły się najbardziej dla kompozytu zawierającego 2,5% włókien stalowych i wyniosły 24%, natomiast najmniej dla kompozytu bez włókien poniżej 1% (rys. 8.6). Największe różnice pomiędzy wartościami wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu uzyskanymi z badań i obliczeniowymi wystąpiły dla kompozytu zawierającego 2,5% włókien stalowych i wyniosły 24%. Najmniejsze uzyskano dla materiału bez włókien, poniżej 1% (rys. 8.6). Wartości dynamicznego modułu sprężystości uzyskane z badań i obliczone różniły się najbardziej dla kompozytu zawierającego 1% włókien. Różnice te wyniosły 2%. W pozostałych przypadkach odnotowano różnice po 1% (rys. 8.7).

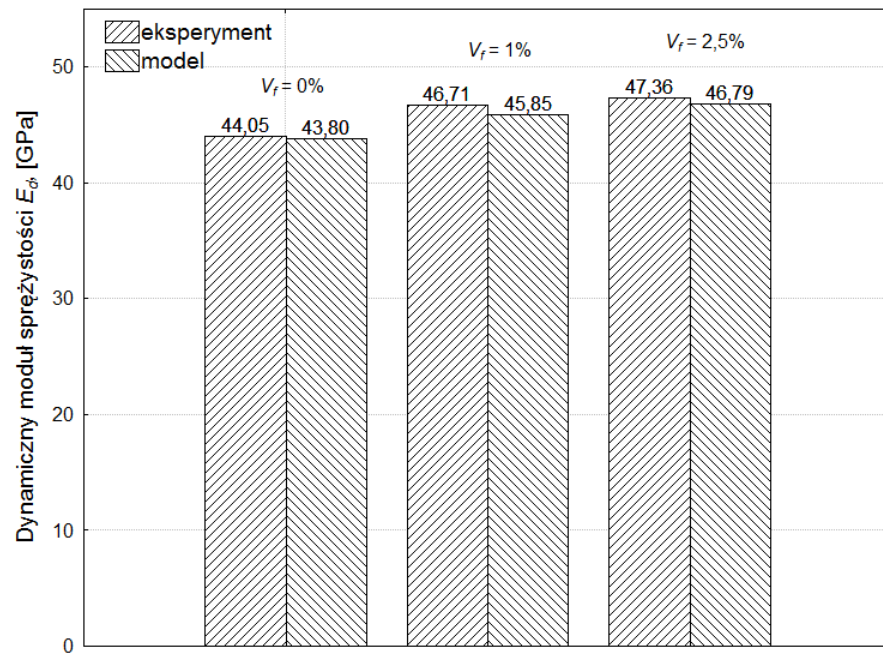
Z przeprowadzonej analizy wyników badań i obliczeń gęstości pozornej wynika, że największe różnice pomiędzy wartościami uzyskanymi z badań i obliczeń wystąpiły dla kompozytu zawierającego 1% i 2,5% włókien i wyniosły 2%, natomiast dla kompozytu bez włókien wyniosły 1% (rys. 8.8).



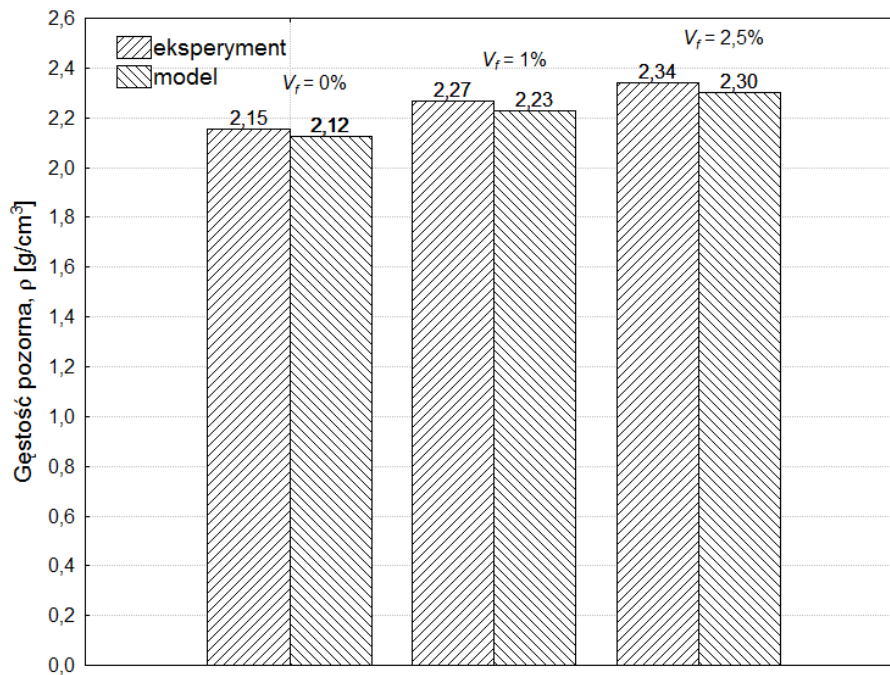
Rys. 8.5. Zestawienie eksperymentalnych i obliczeniowych wartości wytrzymałości na ściskanie



Rys. 8.6. Zestawienie eksperymentalnych i obliczeniowych wartości wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

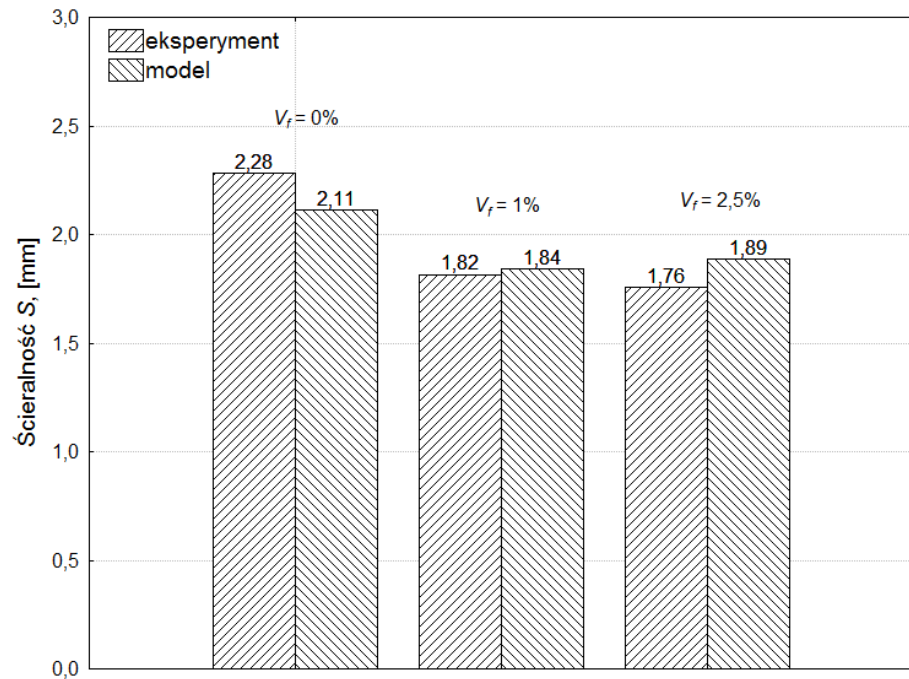


Rys. 8.7. Zestawienie eksperymentalnych i obliczeniowych wartości dynamicznego modułu sprężystości



Rys. 8.8. Zestawienie eksperymentalnych i obliczeniowych wartości gęstości pozornej

W przypadku odporności na ścieranie największe różnice pomiędzy wartościami uzyskanymi z badań i obliczeń wystąpiły dla kompozytu bez włókien oraz zawierającego 2,5% włókien stalowych i wyniosły 7%, natomiast dla kompozytu zawierającego 1% włókien wyniosły 1% (rys. 8.9).



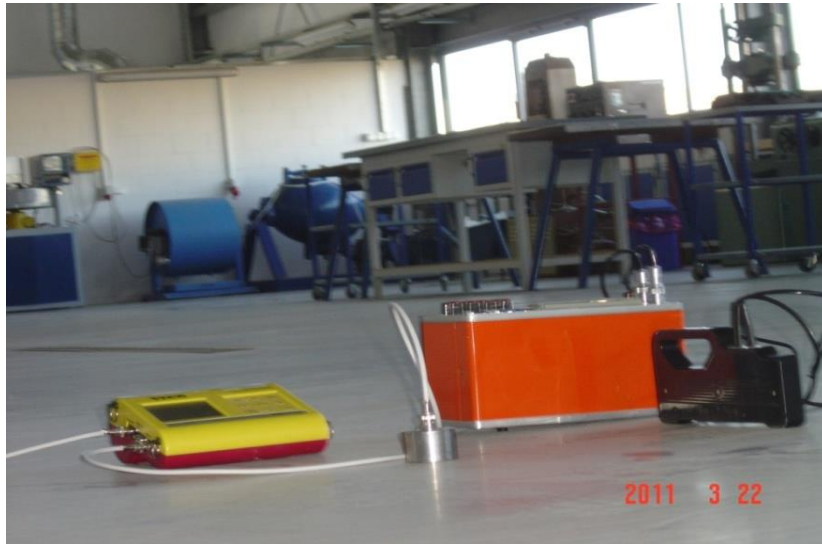
Rys. 8.9. Zestawienie eksperymentalnych i obliczeniowych wartości ścieralności

Podsumowując, największą zgodność wyników eksperymentu z obliczeniami analitycznymi (różnica ok. 1%) uzyskano dla gęstości pozornej i dynamicznego modułu sprężystości (tabl. 8.1). Wartości wytrzymałości na ściskanie i ścieralności uzyskane z badań wykazywały zgodność z opisem matematycznym na poziomie ok. 4%. Największą różnicą wyników eksperymentu w porównaniu z wartościami uzyskanymi na drodze obliczeń charakteryzowała się wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu – średnio około 11%. Badanie to cechuje się zwykle dużym rozrzutem wyników.

Badania posadzki w Laboratorium Techniki Budowlanej Politechniki Koszalińskiej

Poddana badaniom posadzka znajdująca się w hali Laboratorium Techniki Budowlanej Politechniki Koszalińskiej (rys. 8.11) została wykonana z drobnokruszywowego kompozytu mineralnego o deklarowanej przez wykonawcę zawartości włókien stalowych $V_f = 0,5\%$. Grubość posadzki wynosi 15 cm. Badania wykonano po 2 latach od momentu wykonania posadzki. Wykonano trzy odwierty o średnicy 150mm. Pobrane próbki przebadano metodami nieniszczącymi, określając prędkość przebiegu fali ultradźwiękowej (V) oraz natężenie indukowanego prądu (I), a następnie zbadano ich wytrzymałość na ściskanie (f_c). Średnia prędkość fali ultradźwiękowej w kompozycie wyniosła 4,32 km/s, natomiast średnie natężenie indukowanego prądu było równe 0,48 mA.

Dobra zgodność wyników obliczeń z wartościami ustalonymi na drodze doświadczalnej wskazuje na poprawność sformułowanych zależności funkcyjnych.



Rys. 8.11. Ogólny widok posadzki w Laboratorium Techniki Budowlanej Politechniki Koszalińskiej

Wartość wytrzymałości $f_{c,cube} = 49,0 \text{ N/mm}^2$ uzyskana z opisu matematycznego na podstawie badań nieniszczących i uzyskana na podstawie badań niszczących różnią się o ok. 9%. Pozostałe obliczone na podstawie zależności funkcyjnych właściwości posadzki kształtują się następująco: $f_{t,spl} = 4,7 \text{ N/mm}^2$, $\varepsilon_s = 0,91\%$, $E_d = 40,1 \text{ GPa}$, $S = 2,4 \text{ mm}$. Dobra zgodność wyników obliczeń posadzki z wartością ustaloną na drodze doświadczalnej wskazuje na poprawność sformułowanych funkcji opisujących właściwości kompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi.

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Kompozyty mineralne z włóknami rozproszonymi charakteryzują się szeregiem korzystnych właściwości, w związku z tym zakres ich stosowania w budownictwie jest różnorodny. Stosowane są między innymi do wytwarzania konstrukcyjnych elementów cienkościennych, elementów cienkich powłok, przekryć budynków. Z fibrokompozytów wytwarza się m.in. elementy mostów, rury, płyty, kolumny, pale, tunele podziemne i wzmocnienia wyrobisk kopalnianych.

Biorąc pod uwagę szereg kryteriów wytrzymałościowych i użytkowych stawianych materiałom konstrukcyjnym oraz aspekt ekologiczny, do przeprowadzenia badań laboratoryjnych zaprojektowano fibrokompozyt na bazie piasków odpadowych. Do jego wytworzenia użyto drobne kruszywo mineralne pochodzenia polodowcowego będące odpadem procesu hydroklasyfikacji pospółek w regionie Pomorza Zachodniego. Pomimo coraz powszechniejszego stosowania tych materiałów w budownictwie brak jest szybkiej i bezinwazyjnej metody oceny ich właściwości. W związku z tym w dysertacji zaproponowano sposób oznaczania właściwości takiego fibrokompozytu metodami nieniszczącymi: ultradźwiękową oraz indukcji elektromagnetycznej. Ustalono zależności, w których zmiennymi niezależnymi są natężenie indukowanego prądu oraz prędkość propagacji fali ultradźwiękowej. Zmienną zależną była właściwość fibrokompozytu. Kolejnym zadaniem było opracowanie opisu rozkładu włókien stalowych, który umożliwi określenie parametrów ułożenia włókien w przestrzeni kompozytu, takich jak: kąt ułożenia, współrzędne początku i końca włókna, współrzędne przebicia płaszczyzny przekroju elementu. Opracowany opis rozkładu włókien umożliwia także uwzględnienie osiadania włókien w kompozycie spowodowanego siłą ciężenia oraz uwzględnienie wpływu konsystencji i czasu wibrowania na osiadanie włókien. Uwzględnia on również warunki technologiczne wykonania kompozytu i ich wpływ na równomierność rozkładu włókien w jego przestrzeni z uwzględnieniem zjawiska sedymentacji włókien. Matematyczny opis w postaci zależności funkcyjnych cech badanego kompozytu przy zastosowaniu badań nieniszczących, jak również statystyczny opis rozkładu włókien w przestrzeni kompozytu stanowią zaproponowany w pracy model kompozytu mineralnego z włóknami rozproszonymi.

Model kompozytu z włóknami rozproszonymi poddano doświadczalnej weryfikacji, którą objęto płytę wykonaną z fibrokompozytu przechowywaną w warunkach naturalnych przez okres ok. 2,5 lat, posadzkę przemysłową oraz próbki sześciennie wykonane przez producenta fibropiaskobetonu, firmę Dźwigbet. Analiza wyników uzyskanych na drodze doświadczalnej i analitycznej wykazała ich dobrą zgodność. Wskazuje to na poprawność opracowanego modelu oraz przyjętych założeń.

Przeprowadzone badania i analizy wyników badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków będących potwierdzeniem tez rozprawy:

1. Możliwa jest kontrola jakości drobnokruszywowego fibrokompozytu poprzez ocenę metodami nieniszczącymi właściwości mechaniczno-fizycznych i identyfikację rozkładu włókien.
2. Właściwa ocena jakości wyrobów wykonanych z drobnokruszywowego fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych umożliwi efektywne zagospodarowanie tych kruszyw.
3. Metoda indukcji elektromagnetycznej wraz z metodą opartą na prędkości propagacji fali ultradźwiękowej mogą być stosowane do identyfikacji cech mechaniczno-fizycznych drobnokruszywowego kompozytu z włóknami rozproszonymi.

Na podstawie analizy wyników badań właściwości mechaniczno-fizycznych fibrokompozytu stwierdzono, że drobnokruszowy kompozyt na bazie piasków odpadowych z włóknami rozproszonymi o zawartości $1 \div 1,5\%$ odpowiada wymaganiom stawianym materiałom konstrukcyjnym.

Zaproponowane zależności funkcyjne umożliwią nieniszczącą identyfikację cech drobnokruszywowego betonu z włóknami rozproszonymi. Zależności te mogą być także przydatne do określenia cech innych materiałów podobnych do badanych pod względem składu mieszanki i rodzaju włókna.

Zdaniem autora poruszona w pracy problematyka nie wyczerpuje całej złożoności zagadnienia. Dalszym kierunkiem badań może być określenie wpływu rozkładu włókien na właściwości fibrokompozytu. Kierunkiem badań dotyczącym opisu właściwości na podstawie badań nieniszczących może być rozszerzenie badań o kompozyty wykonane z udziałem grubszych frakcji oraz uwzględnienie poprzez wprowadzenie odpowiednich współczynników wpływu wilgotności, temperatury i wieku badanego fibrokompozytu.

Szczegółowe wnioski wynikające z przeprowadzonych badań przedstawiono w rozdziałach 6 i 7 niniejszej dysertacji.

LITERATURA

- 1 10th International Symposium on Brittle Matrix Composites, October 15-17, 2012, Staszic Palace, Warsaw.
- 2 13th Congress of the International Glassfibre Reinforced Concrete Association, October 6-8, 2003, Barcelona.
- 3 6th International Conference on Fibre Concrete, September 8-9, 2011, Prague.
- 4 Abas F.M. et al., "Strength and serviceability of continuous composite slabs with deep, trapezoidal steel decking and steel fibre reinforced concrete", *Engineering Structures*, 49 (2013), 866–875.
- 5 Ahmaruzzaman M., "A review on the utilization of fly ash", *Progress in Energy and Combustion Science*, 36 (2010), 327-363.
- 6 Akkaya Y. et al., "Nondestructive measurement of concrete strength gain by an ultrasonic wave reflection method", *Materials and Structures*, 36 (2003), 507-514.
- 7 An C. et al., "Ultimate strength behaviour of sandwich pipes filled with steel fiber reinforced concrete", *Ocean Engineering*, 55 (2012), 125–135.
- 8 Arnau O., Molins C., "Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 1: Test configuration and execution", *Tunneling and Underground Space Technology*, 26 (2011), 764-777.
- 9 Arnau O., Molins C., "Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 2: Numerical simulation", *Tunneling and Underground Space Technology*, 26 (2011), 778-788.
- 10 Atis C.D., Karahan O., „Properties of steel fiber reinforced fly ash concrete”, *Construction and Building Materials*, 23 (2009), 392-399.
- 11 Bank L.C., "A model specification for fiber reinforced non-participating permanent formwork panels for concrete bridge deck construction", *Construction and Building Materials*, 23 (2009), 2664–2677.
- 12 Beñoa J., Hilara M., “Steel fibre reinforced concrete for tunnel lining – verification by extensive laboratory testing and numerical modelling”, *Acta Polytechnica*, 53(4) (2013), 329–337.
- 13 Bentur A., Midness S., „Fibre reinforced cementitious composites”, SPON PRESS, Taylor and Francis Group, London 2002, pp. 601.

- 14 Bolat H. et al., „The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete”, *Composites: Part B*, 61 (2014), 191–198.
- 15 Brandt A., „Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering”, *Composite Structures*, 86 (2008), 3–9.
- 16 Brandt A.M., Kasperkiewicz J., Glinicki M.A., Marks M., „Copmarison of Two Types of Steel Fibers for SFRC”, IPPT, Warszawa 1995.
- 17 Brunarski L., Runkiewicz L., „Podstawy i przykłady stosowania metod nieniszczących w badaniu konstrukcji z betonu”, ITB, Warszawa 1983.
- 18 Bunsell A.R., Renard J., “Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials”, IOP Publishing Ltd., Cornwall 2005.
- 19 Byung-Wan J., Young-Hyun S., Young-Jin K., “The evalution of elastic modulus for steel fiber reinforced concrete”, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 37 (2) (2001), 152-161.
- 20 Cailleux E., Cutard T., Bernhart, G. , “Pullout of steel fibres from a refractory castable: experiment and modelling”, *Mechanics of Materials*, 37 (4) (2005), 427-445.
- 21 Chiaia B. et al., "Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings, *Engineering Structures* 31 (2009), 1600-1606.
- 22 Cichocki K., Ruchwa M., “Numerical analysis of fibre reinforced slabs under impact loads”, 20th International Conference on Computer Methods in Mechanics, CMM-2013, Short Papers, Poznań, 379-380.
- 23 Cichocki K., Ruchwa M., „Badania eksperymentalne i analiza numeryczna niekonwencjonalnie zbrojonych elementów betonowych”, XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna Techniki Komputerowe w Inżynierii, Licheń Stary 2014.
- 24 Cunha M.C.F., Barros J.A.O., Sena-Cruz J.M., “A finite element model with discrete embedded elements for fibre reinforced composites”, *Computers and Structures*, 94-95 (2012), 22-33.
- 25 Cunha V.M.C.F., Barros J.A.O., Sena-Cruz J.M., “An integrated approach for modelling the tensile behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete”, *Cement and Concrete Research*, 41 (1) (2011), 64-76.
- 26 Czarnecki L., Kurdowski W., „Tendencje kształtujące przyszłość betonu”, *Dni Betonu*, 2006, Wisła.
- 27 Ding Y., Kusterle W., “Compressive stress-strain relationship of steel fibre-reinforced concrete at early age”, *Cement and Concrete Research* 30 (2000), 1573-1579.

- 28 Ding, Y., Barros, J.A.O., “Untersuchung der Stahlfaserverteilung im Versagensquerschnitt and Betonen mit unterschiedlichem Fasergehalt” (“Investigation of steel fibre distribution in the failure section of concretes with different fibre contents”), 7th International Conference on Shotcrete Technology Austria 2002, 175-184.
- 29 Dobashi H. et al., “Development of Steel Fiber Reinforced Highly Flowable Concrete Segments and Application to Construction”, Proceedings of the World Tunnel Congress and 32nd ITA Assembly, April 22–27, 2006, Seoul.
- 30 Domagała L., “Modification of properties of structural lightweight concrete with steel fibres”, Journal of Civil Engineering and Management, 17(1) (2011), 36:44.
- 31 Domański T., Czkwianianc A., „Wpływ zbrojenia rozproszonego na parametry mechaniczne betonu”, Przegląd Budowlany, 6 (2006), 32-37.
- 32 Dondelewski H., Januszewski M., „Betony cementowe. Zagadnienia wybrane.”, WNT 2008.
- 33 Donnet J.-B., “Carbon fibers”, Third Edition, CRC Press, 1998.
- 34 Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A., „Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali.”, t. 1, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- 35 Dupont D., "Modelling and experimental validation of the constitutive law and cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete". Ph.D. thesis, Katholieke University Leuven, Belgium 2003.
- 36 Dupont D., Vandewalle L., “Distribution of steel fibers in rectangular sections”, Cement & Concrete Composites, 27 (2004), 391-398.
- 37 Dymdziuk B., “”Jeże” w fibrobetonie”, Inżynier Budownictwa, 11 (2008).
- 38 Eight RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concretes (BEFIB 2012), 19-21 September 2012, Guimarães, Portugal.
- 39 El-Baden A., Barr B., „Shrincage properties of steel fibre reinforced high strength concrete”, Brittle Matrix Composites 6 (2000), Warsaw.
- 40 Felekoğlu et al., “Effects of steel fiber reinforcement on surface wear resistance of self-compacting repair mortars”, Cement and Concrete Composites, Vol. 29 (5) (2007), 391–396.
- 41 Ferrara ·L., Meda A., “Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements”, Materials and Structures, 39 (2006), 411–420.

- 42 Fuente A. et al., "A new design method for steel fibre reinforced concrete pipes", *Construction and Building Materials*, 30 (2012), 547–555.
- 43 Fuente A., et al., "Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings", *Tunneling and Underground Space Technology*, 27 (2012), 60-71.
- 44 Garbacz A., „Nieniszczące badania betonopodobnych kompozytów polimerowych za pomocą fal sprężystych – ocena skuteczności napraw”, *Prace naukowe. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*, Warszawa 2007.
- 45 Garbacz A., Garboczi E.J., „Ultrasonic evaluation methods applicable to polymer concrete composites”, NIST Report nr NISTIR 6975, National Institute of Standards and Technology, (2003) Gaithersburg.
- 46 Garbacz A., Łuciuk M., Czarnecki L., „Przydatność metody ultradźwiękowej do oceny cech technicznych betonów żywicznych”, *Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących*, (1997), 193-198, Szczyrk.
- 47 German J., „Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych”, *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, Kraków 2001.
- 48 Gettu R., Gardner D.R., Saldivar H., Barragfin B.E., “Study of the distribution :and orientation of fibers in SFRC specimens”, *Materials and Structures*, 38 (2005), 31-37.
- 49 Glinicki A., "Beton ze zbrojeniem strukturalnym", *XXV Ogólnopolskie Warsztaty Projektanta Konstrukcji*, Szczyrk 2010.
- 50 Glinicki M.A., „Badania właściwości fibrobetonu z makrowłóknami syntetycznymi, przeznaczonego na podłogi przemysłowe”, *Cement-Wapno-Beton*, 4 (2008).
- 51 Głodkowska W., Kobaka J., "Zastosowanie piasków odpadowych do wykonywania posadzek przemysłowych", *Rocznik Ochrony Środowiska*, 11 (2009), 193-206.
- 52 Głodkowska W., Kobaka J., “Statystyczny opis rozkładu włókien w drobnokruszywowym kompozycie mineralnym”, *Materiały Budowlane*, 12 (2011), 64-66.
- 53 Głodkowska W., Kobaka J., “Statystyczny opis rozkładu włókien w drobnokruszywowym kompozycie mineralnym”, *VII Sympozjum Budownictwo Ogólne*, Bydgoszcz-Fojutowo 2011.
- 54 Głodkowska W., Kobaka J., “Zastosowanie metod nieniszczących do oceny właściwości fibropiaskobetonu”, *Materiały Budowlane*, 11 (2013), 6-8.
- 55 Głodkowska W., Kobaka J., „Modelling of properties and distribution of steel fibres within a fine aggregate concrete”, *Construction and Building Materials*, 44 (2013), 645-653.

- 56 Głodkowska W., Kobaka J., „Nieniszcząca ocena wybranych cech drobnokruszywowego betonu zbrojonego włóknami stalowymi”, *Matbud*, (2011), Kraków, 108-116.
- 57 Głodkowska W., Kobaka J., „The model of brittle matrix composite for distribution of steel fibres”, *Journal of Civil Engineering and Management*, 01 (2012), 145-150.
- 58 Głodkowska W., Kobaka J., „Ocena przydatności metod ultradźwiękowej i indukcji elektromagnetycznej do identyfikacji właściwości fibropiaskobetonu”, *Przegląd Spawalnictwa*, 12 (2013), 70-74.
- 59 Głodkowska W., Laskowska-Bury J., Kobaka J., „Wpływ włókien stalowych na kształtowanie właściwości kompozytu drobnokruszywowego”, *Materiały Budowlane*, 09 (2013), 28-30.
- 60 Głodkowska W., Laskowska-Bury J., Kobaka J., „Wpływ włókien stalowych na kształtowanie właściwości kompozytu drobnokruszywowego”, *VIII Sympozjum Zagadnienia Konstrukcyjne, Materiałowe i Ciepłno-Wilgotnościowe w Budownictwie*, (2013), Bydgoszcz-Fojutowo, 118-123.
- 61 Gribniak V. et al., "Deriving stress–strain relationships for steel fibre concrete in tension from tests of beams with ordinary reinforcement", *Engineering Structures*, 42 (2012), 387–395.
- 62 Grzelak E., „Technologia kruszyw mineralnych”, Arkady, Warszawa 1973.
- 63 Haido J. et al., “Simulation of dynamic response for steel fibrous concrete members using new material modeling”, *Construction and Building Materials*, 25 (3) (2011), 1407-1418.
- 64 Holschemacher K., Mueller T., Ribakov Y., “Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete”, *Materials and Design*, 31 (2010), 2604–2615.
- 65 Hoła J., Schabowicz K., „Metody diagnostyczne przydatne podczas wykonywania przeglądów obiektów budowlanych”, *Materiały Budowlane 2* (2013).
- 66 Hoła J., Schabowicz K., „Nieniszcząca diagnostyka obiektów budowlanych: przegląd wybranych najnowszych metod z przykładami zastosowań”, *56 Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki ZPITB, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej*, (2010), Krynica.
- 67 Hoła J., Schabowicz K., „Nondestructive elastic-wave tests of foundation slab in office building”, *Material Transactions*, 53 (2) (2012).

- 68 Hoła J., Schabowicz K., „State-of-the-art non-destructive methods for diagnostic testing of building structures – anticipated development trends”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 10 (3) (2010).
- 69 Hyla I., „Wybrane zagadnienia z inżynierii materiałów kompozytowych”, PWN, Warszawa 1978.
- 70 J.F. Lataste, J.F., Behoul M., Breysse D., “Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements”, *NDT & E International*, 41 (8) (2008), 638–647.
- 71 Jamróży Z., „Betony ze zbrojeniem rozproszonym”, XVII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, (2002), Ustroń.
- 72 Jamróży Z., „Drutobeton”, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki, Kraków 1985.
- 73 Jamróży Z., „Beton i jego technologie”. PWN, Warszawa 2005.
- 74 Jasiczak J., Mikołajczak P., „Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami”, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003.
- 75 Johnston, C.D., “Fiber-Reinforced Cements and Concretes”, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam 2001.
- 76 Jones M.C., "Kumaraswamy's distribution: A beta-type distribution with some tractability advantages. *Statistical Methodology*", 6 (1) (2009), 70-81.
- 77 Kamiński M., Bywalski C., „Analysis of long steel fibre distribution in fibre reinforced concrete beams”, *Modern building materials, structures and techniques: The 10th International Conference: selected paper, Lithuania, Vilnius*, 1 (2010), 117–124.
- 78 Kamiński M. et al., „Model rozkładu włókien na długości elementu fibrobetonowego. *Materiały Budowlane*”, 9 (2006).
- 79 Kang S.T. et al., “The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete”, *Construction and Building Materials*, 25 (5) (2011), 2450–2457.
- 80 Kapuściński J., Puciłowski K., Wojciechowski S., „Projektowanie i technologia materiałów kompozytowych”, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1983.
- 81 Karwacki J., “Beton zbrojony włóknem stalowym”, Bautech, Warszawa 1996.
- 82 Karwowska J., Łapko A., "Przydatność stosowania nowoczesnych kompozytów fibrobetonowych w konstrukcjach budowlanych”, *Civil and Environmental Engineering*, 2 (2011), 41-46.

- 83 Kasper T., Edvardson C., Wittenben G, Neumann D., "Lining design for the district heating tunnel in Copenhagen with steel fibre reinforced concrete segments", *Tunneling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 23 (5) (2008), 574-587.
- 84 Kasperkiewicz J., "Struktura uzbrojenia w kompozytach z włóknami rozproszonymi, *Mechanika kompozytów betonopodobnych*", Konferencja naukowa - Jabłonna 1979. Ossolineum, Wrocław 1982.
- 85 Katzer J., „Kształtowanie właściwości wybranych kompozytów cementowych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2010.
- 86 Katzer J., „Steel Fibers and Steel Fiber Reinforced Concrete in Civil Engineering”, *Pacific Journal of Science and Technology*, 7 (1) (2006), 53-58.
- 87 Katzer J., Kobaka J., "Dynamic serviceability of steel fiber reinforced concrete after freezing and thawing test”, *European Symposium on Service Life and Serviceability of Concrete Structures*, (2006), Espoo.
- 88 Katzer J., Kobaka J., “Abfallsand Mittelpommerns als Rohstoff für die Herstellung von Betonfertigteilen.“ *BetonWerk International*, 02 (2005), 44-47.
- 89 Katzer J., Waldron P., “Dynamic properties of cement-based composites containing high volume fractions of steel fibres”, *Proceedings, 6th International Conference Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures*, June 9-11, (2008), 313-314, Łódź.
- 90 Kim K.S. et al., “Shear behavior model for steel fiber-reinforced concrete members without transverse reinforcements”, *Composites Part B*, 43 (5) (2012), 2324-2334.
- 91 Kobaka J.: “Chosen methods used for estimation of modulus of elasticity”, *Universitaria Simpro 2(K)6, International Multidisciplinary Scientific Symposium*, 13-14 October (2006), Petrosani, Romania.
- 92 Koliass S., Williams R.I.T., “Relationships between the static and the dynamic moduli of elasticity in cement stabilized materials”, *Materials and Structures*, 13 (1980), 90-107.
- 93 Kondratowicz W., „Jednorodność udziału piasku w krajowych kruszywach naturalnych przeznaczonych do betonu. Stan i znaczenie.”, *Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 1978.
- 94 Kooiman A.G., "Modelling steel fibre reinforced concrete for structural design", Ph.D. thesis *Technical University of Delft*, (2000), Netherlands.

- 95 Kot S.M, Jakubowski J., Sokołowski A., "Statystyka", Wydawnictwo Difin, Warszawa 2007.
- 96 Krenchel H., "Fibre spacing and specific fibre surface", In: Neville A (ed) Fibre reinforced cement and concrete, The Construction Press, UK, 1975.
- 97 Kuczyński W., „Betony konstrukcyjne. Projektowanie metodą kolejnych przybliżeń. Budownictwo i Architektura, Warszawa 1956.”
- 98 Kukielka L., "Podstawy badań inżynierskich", Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
- 99 Kumar S., Barai S.V., "Neural networks modeling of shear strength of SFRC corbels without stirrups", Applied Soft Computing Journal, 10 (1) (2010), 135-148.
- 100 Lafhaj Z., "Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content", Cement and Concrete Research, 36 (4) (2006), 625-633.
- 101 Laranjeira F. et al., "Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete", Materials and Structures, 44 (2011), 1093–1111.
- 102 Lee C., Kim H., "Orientation factor and number of fibers at failure in ring-type steel fiber reinforced concrete", Cement and Concrete Research, 40 (2010), 810-819.
- 103 Lewińska-Romicka A., „Badania nieniszczące”, WNT, Warszawa 2001.
- 104 Lewińska-Romicka A., „Podstawy defektoskopii”, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
- 105 Li J., Zhang Y.X., „Evolution and calibration of a numerical model for modelling of hybrid-fibre ECC panels under high-velocity impact”, Composite Structures, 93 (11) (2011), 2714-2722.
- 106 Li J., Zhang Y.X., "Evaluation of constitutive models of hybrid-fibre engineered cementitious composites under dynamic loadings", Construction and Building Materials, 30 (2012), 149-160.
- 107 Li V.C., Wang Y. & Backer S., "A micromechanical model of tension softening and bridging toughening of short random fiber reinforced brittle matrix composites", Journal of Mechanics and Physics of Solids, 39 (5) (1991).
- 108 Maidl B.R., "Steel Fibre Reinforced Concrete", Ernst & Sohn, (1995), Berlin.
- 109 Malhotr V.M, Carino N.J., Handbook on nondestructive testing of concrete”, CRC Press 2004.

- 110 Marcinkowski S., Kobaka J. (Józef), Rajewski S., „Zagadnienie wdrażania betonów drobnokruszywowych do produkcji prefabrykatów w budownictwie uprzemysłowionym”, Prace Instytutu Budownictwa, Wyższa Szkoła Inżynierska w Koszalinie, Koszalin 1978.
- 111 Mello E., Ribellato C., Mohamedelhassan E., “Improving concrete properties with fibers addition”, *International Journal of Civil, Architectural Science and Engineering*, 8 (3) (2014).
- 112 Mianowski K.M., „Zarysowanie rozciąganych elementów betonowych ze zbrojeniem rozproszonym”, PWN, Warszawa 1976.
- 113 Minelli F., „Plain and fiber reinforced concrete under shear loading: structural behavior and design aspects”, Brescia 2005.
- 114 Mohammadi Y., Singh S.P., Kaushik S.K., „Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state”, *Construction and Building Materials*, 22 (2008), 956-965.
- 115 Neville A.M., "Właściwości betonu", Polski Cement, Kraków 2000.
- 116 Neville A.M., Brooks J.J., "Concrete technology", second edition, Pearson Education Limited, (2010), Harlow.
- 117 Niu D., “Study of the performance of steel fiber reinforced concrete to water and salt freezing condition”, *Materials and Design*, 44 (2013), 267–273.
- 118 Ochelski S., „Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych”, WNT, Warszawa 2004.
- 119 Oczóś K.E., „Kompozyty włókniste –właściwości, zastosowanie, obróbka ubytkowa”, *Mechanik, Miesięcznik Naukowo-Techniczny*, 7 (2008).
- 120 Oliver J., Mora D.F., Huespe A.E., Weyler, R., “A micromorphic model for steel fiber reinforced concrete”, *International Journal of Solids and Structures*, 49 (21) (2012), 2990-3007.
- 121 Olivito R.S., F.A. Zuccarello, „An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete”, *Composites: Part B*, 41 (2010), 246-255.
- 122 Owsiak Z., “Materiały kompozytowe. Wybrane zagadnienia.”, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce 2006.
- 123 Parra-Montesinos G.J., Reinhardt H.W., Naaman A.E. (editors), “High performance fiber reinforced cement composites”, RILEM, Springer, Dordrecht, London, New York 2012.

- 124 Pawłowski Z., „Badania nieniszczące. Poradnik.”, Wydawnictwo SIMP, Warszawa 1998.
- 125 Peijs A.A.J.M., “High performance polyethylene fibres in structural composites”, Ph.D., Technische Universiteit Eindhoven, (1993).
- 126 Petrażycki B., „Betony drobnokruszywowe”, Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Przemysłu Kruszyw Budowlanych, Warszawa 1977.
- 127 Petrażycki B., Kobaka J. (Józef), „Zastosowanie betonu drobnokruszywowego do produkcji elementów prefabrykowanych”, Konferencja Techniczna Przemysłu Betonów Kruszywo-Cement-Beton, (1978), Jadwisin.
- 128 Pichór W., Dyczek J., „Przyczepność włókien polimerowych do zaczynu cementowego”, II Konferencja Naukowo-Techniczna Zagadnienia Materiałowe w Inżynierii Lądowej, MATBUD, (1998), Kraków.
- 129 Piekarczyk A., Drobiec Ł., „Wykrywanie wad wewnętrznych w konstrukcjach żelbetowych”, Inżynier Budownictwa, 4 (2010), s. 48-52.
- 130 Ponikiewski T., Gołaszewski J., „Zastosowanie cyfrowej analizy obrazu w badaniach fibrobetonów samozagęszczalnych”, Materiały Budowlane 3 (2013).
- 131 Ponikiewski T., Gołaszewski J., „Wpływ zawartości włókien stalowych na ich rozkład w elementach z fibrobetonu samozagęszczalnego”, Dni Betonu, (2012), Wisła.
- 132 Praca zbiorowa (red. Brandt A.M.), „Własności mechaniczne i struktura kompozytów betonowych”, Zakład Narodowy Imienia Ossolińskich, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk 1974.
- 133 Praca zbiorowa (red. Klemm P.), „Fizyka materiałów i konstrukcji budowlanych. Tom 3. Materiały kompozytowe.”, Drukarnia Wydawnictw Naukowych S.A., Łódź 1995.
- 134 Praca zbiorowa (red. Piliszek E., Serafin S.), "Budownictwo betonowe. Badanie materiałów, elementów i konstrukcji", Tom VIII, Arkady, Warszawa 1970.
- 135 Prashant E., Pawade Y., “Effect of steel fibers on modulus of elasticity of concrete”, International Journal of Advanced Engineering Sciences and Technologies, 7 (2) (2010), 169-177.
- 136 Rao T.D.G., Rama S.D., ”Analytical model for the torsional response of steel fiber reinforced concrete members under pure torsion”, Cement and Concrete Composites, 27 (4) (2005), 493-501.
- 137 Rivaz B., “Steel fiber reinforced concrete (SFRC): The use of SFRC in precast segment for tunnel lining”, World Tunnel Congress - Underground Facilities for Better Environment and Safety , (2008), India.

- 138 Robbins P.J. et al., "Spatial distribution of steel fibres in sprayed and cast concrete", *Magazine of Concrete Research*, Volume 55 (3) (2003), 225–235.
- 139 Runkiewicz L., „Badania konstrukcji żelbetowych”, Biuro Gamma, Warszawa 2002.
- 140 Runkiewicz L., „Nowe tendencje stosowania metod nieniszczących do badań konstrukcji żelbetowych”, *Materiały konferencji „Badania nieniszczące w budownictwie”*, (1996), Szczyrk.
- 141 Runkiewicz L., „Stosowanie metod nieniszczących do oceny bezpieczeństwa, trwałości i niezawodności konstrukcji budowlanych”, 35 KKBN, (2006), Szczyrk.
- 142 Runkiewicz L., „Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych”, ITB, Warszawa 2011.
- 143 Sahin Y., Koksall F., "The influences of matrix and steel fibre tensile strengths on the fracture energy of high-strength concrete", *Construction and Building Materials*, 25(2011), 1801-1806.
- 144 Sakai K., "Environmental design for concrete structures", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3 (1) (2005).
- 145 Schimmelpfennig K., Borgerhoff M., "Development and application of a material law for steel-fibre-reinforced concrete with regard to its use for pre-stressed concrete reactor vessels", *Nuclear Engineering and Design*, 156 (1995), 181- 188.
- 146 Sevil T., Baran M., Bilir T., Canbay E., "Use of steel fiber reinforced mortar for seismic strengthening", *Construction and Building Materials*, 25 (2) (2011), 892-899.
- 147 Shah A.A., Ribakov Y., "Recent trends in steel fibered high-strength concrete", *Materials and Design*, 32 (2011), 4122-4151.
- 148 Shah, S. P., Skarendahl, A., "Steel Fiber Concrete", Elsevier Applied Science Publishers, London 1985.
- 149 Shakya K. et al., "Application of steel fibers in beam–column joints of rigid-framed railway bridges to reduce longitudinal and shear rebars", *Construction and Building Materials* 27 (2012), 482–489.
- 150 Smirnow N.W., Dunin-Barkowski I.W., *Krótki kurs statystyki matematycznej dla zastosowań praktycznych*, PWN, Warszawa 1966.
- 151 Soroushian P., Lee C., "Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete", *American Concrete Institute Material Journal*, 87 (5) (1990).
- 152 Spiratos N., Page M., Mailvaganam N.P., Malhorta V.M., Jolicoeur C., "Superplasticizers for Concrete: Fundamentals, Technology and Practice.", Ottawa 2006.

- 153 Stanisz A., „Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny”, StatSoft Polska Sp. z o.o., Kraków 2007.
- 154 Stawiski B., „Ultradźwiękowe badania betonów i zapraw głowicami punktowymi”, Oficyna Wydawnicza Polityki Wrocławskiej, Wrocław 2009.
- 155 Stroeven P., "Effectiveness near boundaries of fibre reinforcement in concrete", *Materials and Structures*, 39 (2006), 1001-1013.
- 156 Stroeven P., "Effectiveness of steel wire reinforcement in a boundary layer of concrete", *Acta Stereologica*, 10 (1991), 1-113.
- 157 Sukontasukkul P. et al., " Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature", *Construction and Building Materials* 24 (2010), 1967–1974.
- 158 Sukontasukkul P. et al., „Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature”, *Construction and Building Materials* 24 (2010), 1967–1974.
- 159 Sukontasukkul P., Jamsawang P., "Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil–cement column", *Construction and Building Materials* 29 (2012), 201–205.
- 160 Šušterišič J., “Resistance of over 1-year-old SFRC exposed to long-term erosion-abrasion loading”, *Fibre Reinforced Cement and Concrete. Proceedings of the Fourth International Symposium held by RILEM, University of Sheffield* 1992.
- 161 Šušterišič J., Zajc A., Ercegovič R., “Achievement of special properties of concrete with waste materials”, *International Conference "Waste Management, Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development"*, Ljubljana 2007.
- 162 Sustersic J., Mali E., Urvancic S., “Erosion-abrasion resistance of steel fiber-reinforced concrete”, *Proceedings of the Second International Conference*, 2 (1991) , 729–43, Montreal.
- 163 Swaddiwudhipong S., Seow P.E.C., “Modelling of steel fiber-reinforced concrete under multi-axial loads”, *Cement and Concrete Research*, 36 (7) (2006), 1354-1361.
- 164 Szwabowski J., Ponikiewski T., „Wpływ geometrii włókien stalowych na wybrane charakterystyki fibrobetonów samozagęszczalnych”, *Cement-Wapno-Beton* 1 (2008).
- 165 Śliwiński J. et al., „Wykorzystanie popiołów fluidalnych jako dodatku mineralnego do betonów”, *Dni Betonu* 2008.
- 166 Świć A., Toranenko W. (red.), “Innowacyjne procesy wytwórcze”, *Politechnika Lubelska*, Lublin 2013.

- 167 Tao Z. et al., "Strength and ductility of stiffened thin-walled hollow steel structural stub columns filled with concrete", *Thin-Walled Structures* 46 (2008), 1113–1128.
- 168 Teichman J., Małasiewicz A., "Posadzki przemysłowe", Wyd. PG, Gdańsk 2006.
- 169 Teng T.L., Chu Y.A., Chang F.A., Hin H.S., "Calculating the elastic moduli of steel-fiber reinforced concrete using a dedicated empirical formula", *Computational Materials Science*, 31 (2004), 337-346.
- 170 Tlemat H., Pilakoutas K., Neocleous K., „Modelling of SFRC using inverse finite element analysis”, *Materials and Structures*, 39 (2) (2006), 221 – 233.
- 171 Tso-Liang T. et al., "Development and validation of numerical model of steel fiber reinforced concrete for high-velocity impact", *Computational Materials Science* 42 (2008), 90–99.
- 172 Urbańczyk G., „Fizyka włókna. Własności mechaniczne włókien.”, WNT, Warszawa 1974.
- 173 Uygunoglu T., "Effect of fiber type and content on bleeding of steel fiber reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, 25 (2011), 766-772.
- 174 Uygunoğlu T., "Investigation of microstructure and flexural behavior of steel-fiber reinforced concrete", *Materials and Structures* 41(2008), 1441–1449.
- 175 Van Zijl G., "Advances in Cement-Based Materials", *Proceedings International Conference "Advanced Concrete Materials"*, Stellenbosch 2009.
- 176 Vergara L. et al., "NDE ultrasonic methods to characterise the porosity of mortars", *NDT% E International*, 34 (2001), 557-562.
- 177 Volk W., „Statystyka stosowana dla inżynierów”, WNT, Warszawa 1965.
- 178 Wang R., Zheng S., Zheng Y.G., "Polymer matrix composites and Technology", Woodhead Publishing 2011.
- 179 Wang Z.L., Wu J., Wang J.G., "Experimental and numerical analysis on effect of aspect ratio on mechanical properties of SFRC", *Construction and Building Materials* 24 (2010), 559-565.
- 180 Wang Z.L., Wu L.P., Wang J.G., "A study of constitutive relation and dynamic failure for SFRC in compression", *Construction and Building Materials* 24 (2010), 1358–1363.
- 181 Weiler B., Grosse C.U., "Elastic constants – their dynamic measurement and calculation", *Otto Graf Journal* 1995.
- 182 Xu B.W. , Shi H.S., „Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete”, *Construction and Building Materials*, 23 (2009), 3468–3474.

- 183 Xu Z., Hao, H., Li H.N., “Mesoscale modelling of fibre reinforced concrete material under compressive impact loading”, *Construction and Building Materials*, 26 (1) (2012), 274-288.
- 184 Xua Z., Haoa H., Li H.N., “Experimental study of dynamic compressive properties of fibre reinforced concrete material with different fibres”, *Materials and Design*, 33 (2012), 42-55.
- 185 Yazıcı S., Inan G., Tabak V., “Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC”, *Construction and Building Materials* 21 (2007), 1250-1253.
- 186 Zalewska B., “Katalog złóż piasków czwartorzędowych Polski”, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1990.
- 187 Zhang et al., "Experimental and numerical investigation of the seismic performance of hollow rectangular bridge piers constructed with and without steel fiber reinforced concrete", *Engineering Structures*, 48 (2013), 255–265.
- 188 Zhang J., “Modeling of the influence of fibers on creep of fiber reinforced cementitious composite”, *Composites Science and Technology*, 63 (13) (2003), 1877-1884.
- 189 Zhi-Liang Wang et al., “Stress–strain relationship of steel fiber-reinforced concrete under dynamic compression”, *Construction and Building Materials* 22 (2008), 811–819.

Normy, instrukcje, wytyczne, programy komputerowe, strony internetowe

- 190 Aprobata Techniczna Instytutu Techniki Budowlanej nr AT-15-2095/1999, „Włókna stalowe typu: 50x1,0mm, 50x08mm, 50x0,65mm, 60x0,80mm oraz 30x0,65mm do zbrojenia betonu”.
- 191 Femetr typ 2E2. "Instrukcja obsługi", KABiD, Wrocław.
- 192 <https://www.hilti.pl/laserowe-systemy-pomiarowe/systemy-lokalizowania-i-detekcji/r3094#gallery>
- 193 Instrukcja 194/98, "Badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach", Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1998.
- 194 JCI-SF 1, “Method of Making Fiber Reinforced Concrete in the Laboratory”.
- 195 JCI-SF 2, “Method of Making Specimens for Strength and Toughness Tests of Fiber Reinforced Concrete”.
- 196 JCI-SF 3, “Method of Making Specimens for Strength and Toughness Tests of Shotcreted Fiber Reinforced Concrete”.

- 197 JCI-SF 4, "Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete".
- 198 JCI-SF 5, "Method of Tests of Compressive Strength and Compressive Toughness of Fiber Reinforced Concrete".
- 199 JCI-SF 6, "Method of Tests of Shear Strength of Fiber Reinforced Concrete".
- 200 JCI-SF 7, "Method of Tests for Bond of Fibers".
- 201 JCI-SF 7, "Method of Tests of Fiber Content of Fiber Reinforced Concrete".
- 202 Karwacki J.M., „Beton zbrojony włóknem stalowym „Dramix”, Opracowanie dla „Bautech” sp. z.o.o.– przedstawiciela NV Bekaert S.A. w Polsce.
- 203 PN-83/B-06256, „Beton odporny na ścieranie”.
- 204 PN-88/B-6250, "Beton zwykły."
- 205 PN-EN 1008:2004, „Woda zarobowa do betonu.”
- 206 PN-EN 1097-3, „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie gęstości nasypowej i jamistości.”
- 207 PN-EN 1097-6, „Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw. Część 6: Oznaczanie gęstości ziarn i nasiąkliwości.”
- 208 PN-EN 12350-3, "Badania mieszanki betonowej - Część 3: Badanie konsystencji metodą Vebe".
- 209 PN-EN 12390-3, "Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania."
- 210 PN-EN 12390-7, "Badania betonu. Część 7: Gęstość betonu."
- 211 PN-EN 12620:2004, „Kruszywa do betonu”.
- 212 PN-EN 14650:2005, "Prefabrykaty z betonu - Ogólne wymagania dla zakładowej kontroli produkcji betonu zbrojonego włóknem stalowym”.
- 213 PN-EN 14651+A1:2007, "Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym. Pomiary wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP)”.
- 214 PN-EN 14721+A1:2007, "Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym - Pomiary zawartości zbrojenia w świeżym i stwardniałym betonie”.
- 215 PN-EN 14889-1, „Włókna stalowe. Definicje, wymagania i zgodność”.
- 216 PN-EN 1916:2005. "Rury i kształtki z betonu niezbrojonego, betonu zbrojonego włóknem stalowym i żelbetowe”.
- 217 PN-EN 1917:2004, "Studzienki włączowe i niewłączowe z betonu niezbrojonego, z betonu zbrojonego włóknem stalowym i żelbetowe”.

- 218 PN-EN 196-1:2006, „Metody badania cementu. Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.”
- 219 PN-EN 197-1:2002, “Cement – Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.”
- 220 PN-EN 206-1, „Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.”
- 221 PN-EN 933-1, „Badania granulometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie składu ziarnowego. Metoda przesiewania.”
- 222 PN-EN-12390-6, "Badania betonu. Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badania."
- 223 PN-EN-14157:2005, "Kamień naturalny. Oznaczanie odporności na ścieranie."
- 224 Praca zbiorowa, „Metody projektowania betonów piaskowych, opracowane w ramach problemu B-219 pt. Zastosowanie piaskobetonów do prefabrykatów budowlanych produkowanych konwencjonalnie.”, Warszawa 1981.
- 225 Program komputerowy *Adobe Photoshop Extended*, wersja CS4.
- 226 Program komputerowy *GSA Image Analyser*, wersja 3.1.0.
- 227 Program komputerowy *STATISTICA PL*, wersja 10.
- 228 Świadectwo dopuszczenia do stosowania w budownictwie ITB 466/83 „Piaskobeton”.
- 229 TICO. "Betonoskop ultradźwiękowy. Proceq – Szwajcaria. Instrukcja obsługi", Viateco.