

# Analiza wybranych wytrzymałości fibrokompozytów na bazie drobnego kruszywa odpadowego

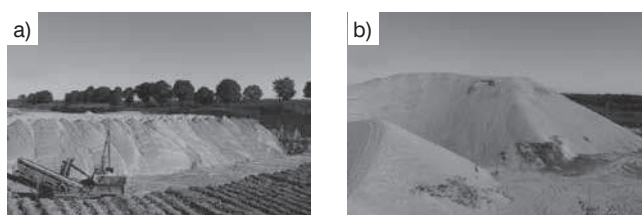
Dr hab. inż. Wiesława Głodkowska, prof. PK, dr hab. inż. Jacek Domski, prof. PK, dr inż. Joanna Laskowska-Bury, dr inż. Janusz Kobaka, dr inż. Marek Ziarkiewicz, mgr inż. Marek Lehmann, WILSiG Politechnika Koszalińska

## 1. Wprowadzenie

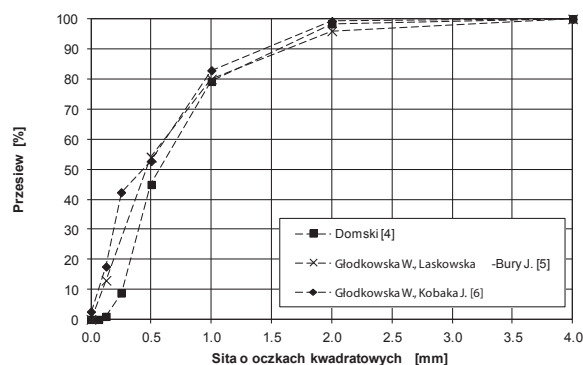
Kompozyty z dodatkiem zbrojenia rozproszonego były stosowane dużo wcześniej niż tradycyjne zbrojenie w postaci prętów. Jeszcze przed narodzeniem Chrystusa ludzie stosowali różnego rodzaju włókna, w postaci sierści zwierząt lub słomy, mieszając je z gliną. Podwaliny pod beton z dodatkiem włókien dał Joseph Lambot w patencie z 1847 r., w którym sugerował dodanie włókien do betonu w postaci drutów lub siatek [1]. Jednak pierwsze zastosowania dodatków stalowych do mieszanki miały miejsce w roku 1874, kiedy to A. Berard z Kalifornii (USA) opatentował wzmacnianie betonu za pomocą opiłków stalowych, zaś w 1910 roku Porter, jako pierwszy na świecie, wspominał o możliwości zastosowania krótkich drutów stalowych w celu poprawy jednorodności betonu zbrojonego tylko grubymi prętami [2]. Następne patenty, dotyczące różnych kształtów włókien i ich zastosowań, zgłosili jako pierwsi: H. Alfsen we Francji (1918), A. Kleinlogel w Niemczech (1920) i N. Zitkewicz w Anglii (1938). Jednak dopiero w 1963 roku (w USA) powstała pierwsza teoria fibrobetonu, opracowana przez J. P. Romualdiego i G. B. Batsona, w której udowodniali oni tezę, że wspomniane włókna hamują powstawanie, propagację i rozwój rys w betonie [2, 3]. Opracowanie tej teorii pozwoliło na wdrożenie nowej technologii fibrobetonu, w której zastosowano włókna o długości 25 mm i tradycyjne kruszywo drobnoziarniste. Kierując się zasadą, że w fibrobetonie udział frakcji drobnych kruszywa powinien być dominujący, postanowiono w niniejszym artykule porównać wyniki badań fibrokompozytów wytworzonych przy użyciu kruszywa odpadowego o uziarnieniu do 4 mm. Analizę ograniczono do kompozytów o objętościowej zawartości włókien stalowych od 0,42 do 2,5%.

## 2. Charakterystyka składników fibrokompozytu

Podstawowym składnikiem betonu jest kruszywo, które stanowi około  $\frac{3}{4}$  jego objętości. W analizowanych kompozytach [4, 5, 6] jako kruszywo zastosowano piasek o uziarnieniu do 4 mm, który jest odpadem w kopalniach kruszyw



Rys. 1. Widok hałd piasku w kopalniach kruszyw: a) czynnej, b) nieczynnej



Rys. 2. Krzywe przesiewu dla piasku odpadowego z różnych kopalń Pomorza Środkowego

na obszarach Polski Północnej. W tym rejonie znaczna część urobku poddawana jest hydroklasyfikacji, w efekcie czego uzyskuje się około 80% piasku i tylko 20% kruszywa grubego. Taka dysproporcja powoduje, że znaczna część piasku nie zostaje wykorzystana i zalega na licznych przykopalnianych hałdach (rys. 1).

Zastosowanie tegoż piasku wpisuje się w ogólnoswiatową tendencję związaną ze Zrównoważonym Rozwojem Środowiska [7–13]. Podobną sytuację, z nadmiarem frakcji piaskowych, można również zaobserwować w innych rejonach świata, np. na Bliskim Wschodzie czy też w północnej części Afryki [14].

Krzywe przesiewu piasku odpadowego, oznaczone w różnych badaniach przedstawiono na rysunku 2. Wyniki te różnią się nieznacznie, mimo że użyty piasek pochodził z różnych kopalni kruszyw znajdujących się na obszarze północnej Polski. Dowodzi to, że złoża te powstawały w tym samym

**Tabela. 1.** Wybrane właściwości piasku odpadowego

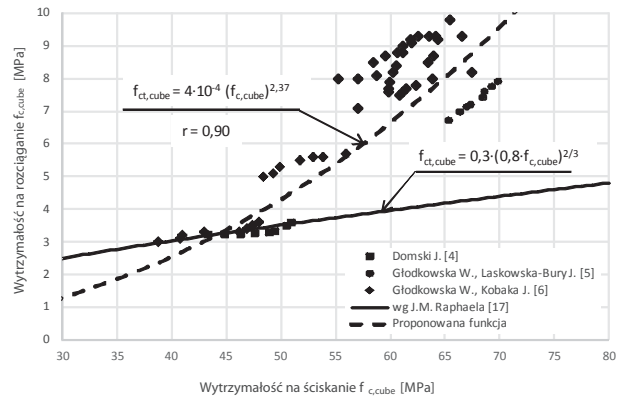
Właściwość kruszywa i jego pochodzenie	Kopalnia Lepino, wg [5]	Kopalnia Sępólno Wielkie, wg [4]
Gęstość nasypowa w stanie luźnym [kg/m <sup>3</sup> ]	1634	1600
Gęstość ziaren [kg/m <sup>3</sup> ]	2632	2600
Zawartość pyłów mineralnych [%]	1,3	1,0
Jamistość [%]	32	30
Ziarno mediana [mm]	0,46	0,28
Zawartość ciał obcych [%]	0,0	0,0

okresie i są to prawdopodobnie osady polodowcowe i wodnolodowcowe. Zastosowane kruszywa poddano dodatkowym badaniom, a wybrane wyniki przedstawiono w tabeli 1. Spoiwem w analizowanych kompozytach były cementy portlandzkie popiołowe CEM II o różnej zawartości popiołów. W przypadku zastosowania cementów serii A-V dodatkowo uszczelniano mieszankę pyłem krzemionkowym [5]. Użyto superplastyfikatora serii FM [15] oraz włókien stalowych o długości 50 mm i średnicy 0,8 mm, których szczegółową analizę przeprowadzono w [16]. Wynika z niej, że średnia wartość wytrzymałości, określona na 30 włóknach, wynosiła 1155,2 MPa, przy odchyleniu standardowym 72,7 MPa. Wytrzymałość ta zawiera się w przedziale deklarowanym przez producenta włókien, tj. od 1153 do 1167 MPa. Włókna poddano również próbie przeginięcia, w której określono liczbę przegięć niezbędną do ich przełamania, zgodnie z EN 10218-1:1994. Średnia wartość przegięć, oznaczona na 30 włóknach, wynosiła 7,3, przy odchyleniu standardowym 0,94. Zgodnie z deklaracją producenta włókna te powinny być odporne na 7 lub więcej przegięć. Na podstawie przeprowadzonych analiz należy uznać, że użyte włókna spełniają deklarowaną przez producenta liczbę przegięć.

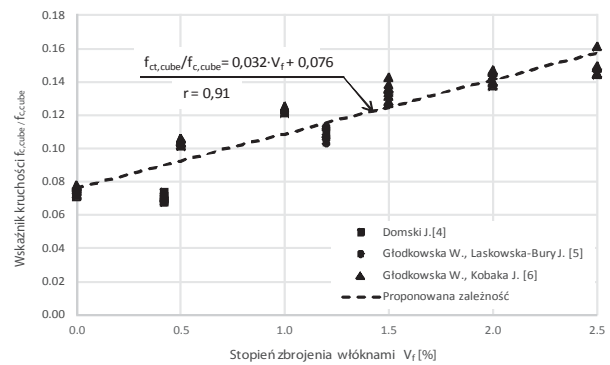
### 3. Wybrane właściwości mechaniczne fibrokompozytów na bazie piasków odpadowych

Zależność pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie przy rozłupywaniu a wytrzymałością na ściskanie, które określono na kostkach o boku 150 mm, przedstawiono na rysunku 3. Na podstawie uzyskanych wyników badań wyznaczono, metodą najmniejszych kwadratów, funkcję potęgową, dla której współczynnik korelacji wynosi 0,90. Dodatkowo przedstawiono zależność pomiędzy analizowanymi wytrzymałościami zaproponowaną przez J. M. Raphaela [17] dla betonu zwykłego. Można zauważyć, że funkcja Raphaela bardzo dobrze opisuje relację między wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie, dla fibrokompozytów z niewielką ilością włókien stalowych.

Na podstawie uzyskanych zależności pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a ilością użytych włókien oraz wytrzymałością



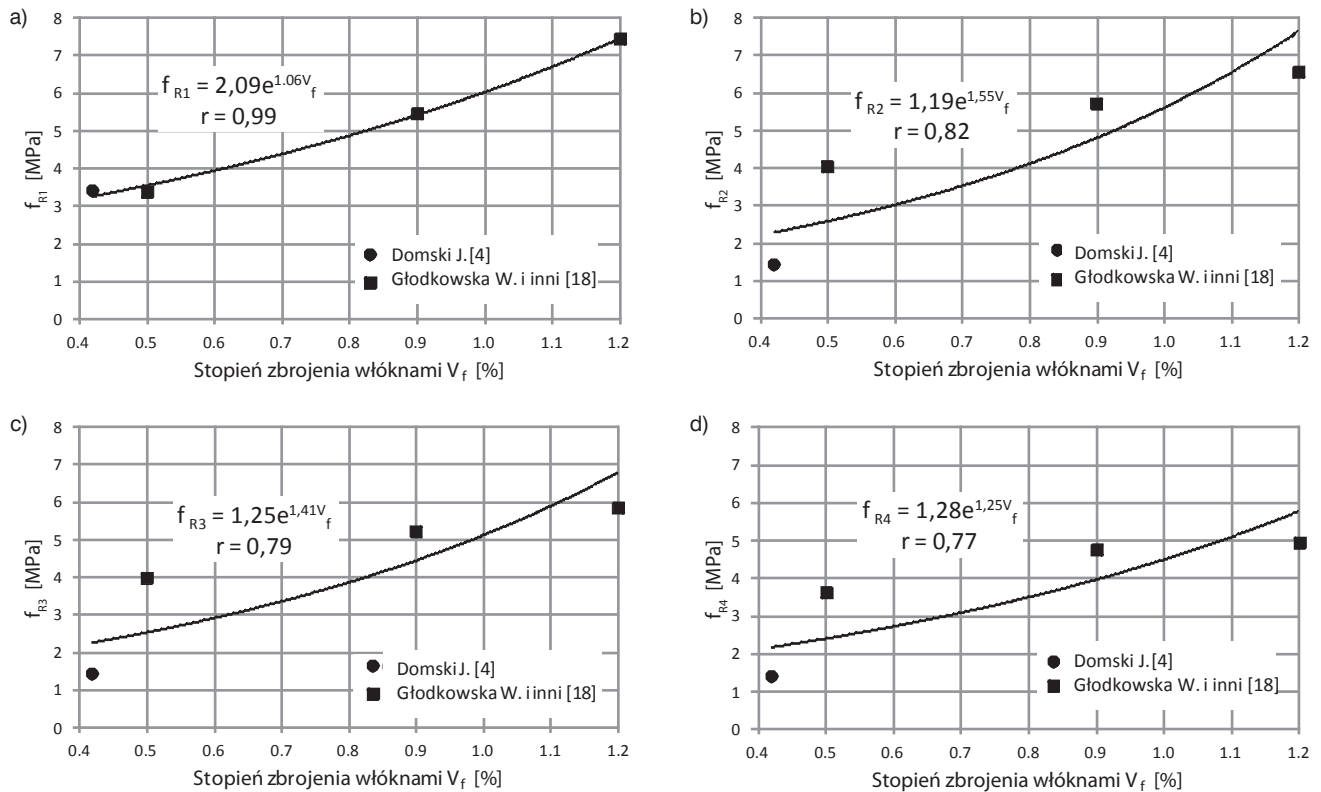
**Rys. 3.** Zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie



**Rys. 4.** Wskaźnik kruchości w funkcji stopnia zbrojenia włóknami

na rozciąganie przy rozłupywaniu a ilością użytych włókien, wg [4–6], określono wskaźnik kruchości (tj.  $f_{ct,cube}/f_{c,cube}$ ) w funkcji ilości zastosowanego zbrojenia rozproszonego ( $V_f$ ). Wartości wskaźnika kruchości w zależności od zastosowanej ilości objętościowej włókien przedstawiono na rysunku 4. Na podstawie zaprezentowanych wyników, metodą najmniejszych kwadratów, określono funkcję liniową, dla której współczynnik korelacji wynosi 0,91.

Analizie poddano również zależność pomiędzy szerokością rozwarcia rysy CMOD a siłą obciążającą  $F$ , określoną zgodnie z normą PN-EN 14651, na próbkach prostokątnych o przekroju 150 x 150 mm (z nacięciem 25 mm) i długości 550 mm. Belki badane były po 28 dniach w schemacie trójpunktowego zginania. Przeprowadzono analizę wszystkich wykresów CMOD-F przedstawionych w [4] i [18]. Stwierdzono, że wybrane kompozyty, o zawartości włókien 0,42 i 1,20%, wykazują cechę pcs, tj. spadek siły niszczącej wraz ze wzrostem wartości CMOD po pojawieniu się rysy, zaś w przypadku kompozytów o zawartości włókien 0,90 i 0,50%, można zaobserwować wzrost siły po pojawieniu się pierwszej rysy. Ostatecznie na podstawie zależności CMOD-F, określono charakterystyczne wytrzymałości resztkowe w funkcji ilości zastosowanego zbrojenia rozproszonego, które przedstawiono na rysunku 5. Na podstawie uzyskanych wytrzymałości resztkowych zaproponowano funkcje wykładnicze, których



Rys. 5. Wytrzymałości resztkowe dla różnych stopni zbrojenia włóknami: a)  $f_{R1}$ , b)  $f_{R2}$ , c)  $f_{R3}$ , d)  $f_{R4}$

Tabela 2. Analiza wytrzymałości resztkowych fibrokompozytów objętych analizą

Cechy fibrokompozytów		$f_{R1}/f_{LOP}$	$f_{R3}/f_{R1}$	Klasyfikacja według MC 2010 [21]
Procent zbrojenia włóknami	1,20%, wg [18]	1,50	0,78	7b
	0,90%, wg [18]	0,94	0,96	5c
	0,50%, wg [18]	0,96	1,18	3d
	0,42%, wg [4]	0,98	0,59	2a

wskazniki korelacji zawierają się w przedziale od 0,99 do 0,77. Wyniki badań resztkowej wytrzymałości na zginanie wyraźnie wskazują na ciągły charakter tego typu materiałów. Spowodowane jest to tym, że włókna w dużym stopniu hamują powstawanie i rozwój zarysowań w fibrokompozycie. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego powoduje, że kompozyty nie ulegają nagłemu zniszczeniu, jak ma to miejsce w przypadku betonu zwykłego [19, 20]. Nawet niewielka ilość włókien na poziomie 0,42% spełnia minimalne wartości wytrzymałości resztkowych, określone w normie EN 14889-1 (1,5 MPa dla  $COMD = 0,5$  oraz 1,0 dla  $CMOD = 3,5$ ), które producent włókien deklaruje przy odpowiedniej ilości zastosowanych włókien. Spełnienie tych wartości minimalnych ( $f_{R1,min}$  i  $f_{R4,min}$ ) jest konieczne dla każdego

rodzaju włókien stalowych stosowanych w budownictwie, aby pełniły one założoną funkcję. Na podstawie wytrzymałości resztkowych dokonano również klasyfikacji kompozytów ze względu na propozycję zawartą w Model Code 2010 [21] (tab. 2). Dodatkowo sprawdzono, czy kompozyty objęte analizą mogą stanowić zamiennik tradycyjnego zbrojenia. W tym celu muszą być spełnione dwa warunki:  $f_{R3}/f_{R1} > 0,5$  i  $f_{R1}/f_{LOP} > 0,4$  (tab. 2). W przypadku kompozytu o zawartości włókien na poziomie 0,42% uzyskano klasyfikację 2a. Należy pamiętać, że uzyskane wytrzymałości resztkowe są wartościami charakterystycznymi i powinny być one dodatkowo pomniejszone w przypadku projektowania elementów konstrukcyjnych.

#### 4. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych analiz dowodzą, że właściwości mechaniczne drobnokruszywowych kompozytów, wykonanych na bazie piasków odpadowych ze zbrojeniem rozproszonym w ilości od 0,42 do 2,5%, odpowiadają wymaganiom stawianym materiałom konstrukcyjnym [21, 22]. Jak wynika z [5], optymalna ilość włókien stalowych to 1,2% objętościowo. W zależności od wyężenia elementów konstrukcji można wybrać najbardziej odpowiedni z analizowanych kompozytów. Reasumując, proponowane fibrokompozyty, dzięki swoim właściwościom, mogą w niektórych przypadkach stanowić alternatywę dla betonu zwykłego, również jako materiał do wykonywania elementów konstrukcyjnych, takich

jak powłoki, płyty fundamentowe i stropowe, czy belki [23]. Możliwość wykorzystania piasków odpadowych, jako pełnowartościowego kruszywa do wytwarzania materiału konstrukcyjnego w skali przemysłowej, rozwiązałaby w dużej mierze problem zagospodarowania hałd zalegających w rejonie Polski Północnej. Duże zasoby kruszyw drobnych, występujące w postaci odpadów poprodukcyjnych, mogłyby stać się bogactwem dla tego regionu, a tym samym podstawowym składnikiem materiałów przeznaczonych do wytwarzania elementów konstrukcyjnych [18], [24], [25].

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Naaman A. E., Fiber reinforcement for concrete, *Concrete International: Design and Construction*, str. 21–25, 1985
- [2] Maidl B. R., *Steel Fibre reinforced Concrete*, Berlin: Ernst & Sohn, 1995
- [3] Brandt A. M., Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, *Composite Structures*, tom 86, 1–3/2008, str. 3–9
- [4] Domski J., A blurred border between ordinary concrete and SFRC, *Construction and Building Materials*, tom 112, 2016, str. 247–252
- [5] Głodkowska W., Laskowska-Bury J., Waste Sands as a Valuable Aggregates to Produce Fibre-composites, *Annual Set The Environmental Protection (Rocznik Ochrona Środowiska)*, str. 507–525, 2015
- [6] Głodkowska W., Kobaka J., Modelling of properties and distribution of steel fibres within a fine aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, tom 44, 2013, str. 645–653
- [7] Sadowska-Buraczewska B., Rutkowski P., Concrete with Recycled HSC/HPC Aggregates in Sustainable Development, *Annual Set The Environmental Protection (Rocznik Ochrona Środowiska)*, tom 15, 2013, str. 2175–2184
- [8] Błaszczyński T., Król M., Usage of Green Concrete Technology in Civil Engineering, *Procedia Engineering*, 122/2015, str. 296–301
- [9] Meyer C., The greening of the concrete industry, *Cement & Concrete composites*, tom 31, 2009, str. 601–605
- [10] Hendriks C., Janssen G., Use of recycled materials in construction, *Materials and Structures*, tom 36, 2003, str. 604–608
- [11] Siddique R., *Waste Materials and By-Products in Concrete*, Berlin, Springer, 2008
- [12] Soares D., de Brito J., Ferreira J., Pacheco J., In situ materials characterization of full-scale recycled aggregates concrete structures, *Construction and Building Materials*, tom 71, 2014, str. 237–245
- [13] Ulsen C., Kahn H., Hawlitschek G., Masini E. A., Angulo S. C., Separability studies of construction and demolition waste recycled sand, *Waste Management*, tom 33, 2013, str. 656–662
- [14] Al-Harthy A. S., Abdel Halim M., Taha R., Al-Jabri K. S., The properties of concrete made with fine dune sand, *Construction and Building Materials*, 21/2007, str. 1803–1808
- [15] Cartuxo F., de Brito J., Evangelista L., Jiménez J. R., Ledesma E. F., Rheological behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates – Influence of the superplasticizer, *Construction and Building Materials*, tom 89, 2015, str. 36–47
- [16] Domski J., Głodkowska W., Selected Mechanical Properties Analysis of Fibrous Composites Made on the Basis of Fine Waste Aggregate, *Annual Set The Environment Protection (Rocznik Ochrona Środowiska)*, tom 19, 2017, str. 81–95
- [17] Neville A. M., *Properties of Concrete*, 4 red., Harlow, Essex: Addison Wesley Longman, 1995
- [18] Głodkowska W., Lehmann M., Ziarkiewicz M., Wytrzymałości resztkowe fibrokompozytu na bazie piasku odpadowego, *Materiały budowlane*, 5/2015, str. 75–77
- [19] Głodkowska W., Kobaka J., The Model of Brittle Matrix Composites for Distribution of Steel Fibres, *Journal of Civil Engineering and Management*, tom 18, 1/2012, str. 145–150
- [20] Błaszczyński T., Przybylska-Fałek M., Steel Fibre Reinforced Concrete as a Structural Material, *Procedia Engineering* 122/2015, str. 282–289
- [21] fib Bulletin 55, Model Code, First complete draft red., Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2010
- [22] di Prisco M., Plizzari G., Vandewalle L., Fibre reinforced concrete: new design perspectives, *Materials and Structures*, tom 42, 9/2009, str. 1261–1281
- [23] Domski J., Long-term Study on Fibre Reinforced Fine Aggregate Concrete Beams Based on Waste Sand, *Annual Set The Environmental Protection (Rocznik Ochrona Środowiska)*, str. 188–199, 2015
- [24] Domski J., Ugięcie belek fibropiaskobetonowych wykonanych na bazie piasku odpadowego, *Przegląd Budowlany*, 3/2012, str. 32–37
- [25] Głodkowska W., Ziarkiewicz M., Cracking behavior of steel fiber reinforced waste sand concrete beams in flexure – Experimental investigation and theoretical analysis, *Engineering Structures*, tom 176, 2018, str. 1–10

**65. Konferencja Naukowa  
Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN  
oraz Komitetu Nauki PZITB  
Krynica Zdrój, 15-20.09.2019 r.**

**Część problemowa**

- Obsługa baz danych, Big Data
- Grafika komputerowa, wizualizacje 3D
- BIM - oprogramowanie
- Automatyzacja w budownictwie
- Druk 3D, skanery przestrzenne
- Projektowanie parametryczne
- GIS w budownictwie
- i planowaniu przestrzennym
- IoT - Internet rzeczy

**Część ogólna**

- Konstrukcje betonowe
- Konstrukcje metalowe
- Mechanika konstrukcji i materiałów
- Sesja posterowa
- Budownictwo hydrotechniczne
- Budownictwo ogólne
- Fizyka budowli
- Geotechnika
- Inżynieria materiałów budowlanych
- Inżynieria przedsięwzięć budowlanych
- Inżynieria komunikacyjna:  
mostowa i kolejowa