

praktyczne. Jest to widoczne m.in. w przypadku stosowanych metod projektowania betonu o z góry założonych cechach. Brakuje bowiem dostatecznie prostych i uniwersalnych metod analityczno-doświadczalnych, szczególnie w przypadku kompozytów wykonywanych z wykorzystaniem zaczynów z ekstremalnie niską zawartością fazy ciekłej.

Biorąc pod uwagę znaczną liczbę parametrów (zmiennych) decydujących o właściwościach mieszanki betonowej, a zatem i betonu, sugerujemy przydatność sztucznych sieci neuronowych do projektowania składu mieszanki betonowej oraz predykcji cech m.in. mechanicznych, takich jak wytrzymałość betonu na ściskanie. Wykorzystanie tego narzędzia matematycznego może stanowić np. bazę do opracowania tzw. wirtualnego laboratorium betonu, w którym będą identyfikowane i opisywane zależności pomiędzy składem ilościowym i jakościowym a właściwościami mieszanki i stwardniałego kompozytu.

dr hab. inż. Wiesława Głodkowska, prof. PK<sup>1)</sup>

mgr inż. Marek Lehmann<sup>1)\*</sup>

mgr inż. Marek Ziarkiewicz<sup>1)</sup>

# Wytrzymałości resztkowe fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych

*Residual strength of fibre composite based on waste sand*

DOI: 10.15199/33.2015.05.30

(Oryginalny artykuł naukowy)

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałości resztkowych fibrokompozytu wykonywanego przy użyciu piasków odpadowych o różnym stopniu zbrojenia rozproszonego. Omówiono metodę wyznaczania tych wytrzymałości oraz sposoby interpretacji wyników. Ostatecznie pokazano wpływ zawartości włókien stalowych na wytrzymałości resztkowe oraz wyznaczono średnie i charakterystyczne wartości wytrzymałości, niezbędne do wymiarowania elementów konstrukcyjnych z fibrokompozytu.  
**Słowa kluczowe:** fibrokompozyt, wytrzymałość resztkowa, nośność.

**Abstract.** The article presents the results of the residual strength fiber composite performed using waste sands with varying degrees of dispersed reinforcement. Discusses the method of determining the strength and how to interpret the results. Finally, the effect of steel fiber content on the residual strength, and determination of the mean and characteristic strength values necessary for dimensioning of components of fiber composite.

**Keywords:** fiber composite, residual strength, resistance.

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 znaczny sposób poprawiają niektóre właściwości kompozytu [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Materiały te stanowią więc alternatywę dla betonu zwykłego, gdyż cechuje je m.in. większa wytrzymałość na rozciąganie i ścinanie, wytrzymałość zmęczeniowa i udamność oraz od-

porność na ścieranie. Mówiąc o fibrokompozytowych elementach konstrukcyjnych, należy mieć przede wszystkim na uwadze sposób ich projektowania. W Europie metody obliczania nośności elementów z fibrokompozytów przedstawione zostały w RILEM TC 162-TDF [7] i fib Model Code 2010 [8]. Bazują one na znajomości wytrzymałości resztkowych, jako podstawowych wielkości, które klasyfikują mineralne kompozyty ze zbrojeniem rozproszonym. Znając wartości wytrzymałości resztkowych, można określić nośność na zginanie oraz na ścinanie elementu wykonanego z fibrokompozytu.

Celem artykułu jest omówienie metody wyznaczania wytrzymałości resztkowych oraz zaprezentowanie wyników badań fibrokompozytu o różnej zawartości włókien stalowych, wykonanego na bazie piasków odpadowych.

## Metodyka badań i elementy próbnie

Charakterystykę materiałów użytych do wykonania fibrokompozytu objętego badaniami przedstawiono w pracy [2]. Wytrzymałości resztkowe określono na 47 belkach wg PN-EN 14651:2007. Sześć belek wykonano bez zbrojenia rozproszonego,

<sup>1)</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej Środowiska i Geodezji

<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji:

e-mail: lehmann@wilsig.tu.koszalin.pl

natomiast pozostałe zawierały włókna stalowe w ilości  $V_f = 0,5\%$  (8 belek) oraz  $V_f = 0,9\%$  (8 belek). Badania przedstawione w pracy [2] wykazały, że pod względem najkorzystniejszych właściwości oraz ekonomicznym maksymalna zawartość włókien stalowych w drobnokruszywowym kompozycie na bazie piasków odpadowych wynosi 1,2%. W tym przypadku wytrzymałości resztkowe określono na 31 belkach.

Badanie wytrzymałości resztkowych fibrokompozytu (fotografia 1) przeprze-



Fot. 1. Sposób podparcia, przyłożenia obciążenia i rozmieszczenia czujników pomiarowych w elementach próbnych

Photo 1. Support, load and measurement sensors placement in test elements

wadzono wg PN-EN 14651. Belki obciążano jedną siłą przyłożoną w połowie rozpiętości z równoczesnym pomiarem siły, ugięcia i szerokości rozwarcia rysy. Przyrost obciążenia ustalano w zależności od szerokości rozwarcia rysy CMOD. W przypadku belek bez włókien koniec badania następował przez zniszczenie belki z uwagi na zginanie, a w przypadku belek fibrokompozytowych w chwili osiągnięcia ugięcia równego 5 mm. Graniczna wartość ugięcia belek została ustalona zgodnie z normą PN-EN 14651, tak aby można było osiągnąć wszystkie wartości CMOD, a następnie określić wytrzymałości resztkowe ( $f_{R,j}$ ) dla odpowiedniej wartości CMOD<sub>j</sub>, gdzie  $j = 1, 2, 3, 4$ . Wielkości  $f_{R,1}$ ,  $f_{R,2}$ ,  $f_{R,3}$  i  $f_{R,4}$  oznaczają wartości naprężeń rozciągających w przekroju dla danych szerokości rozwarcia rysy CMOD, równych odpowiednio: 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 mm.

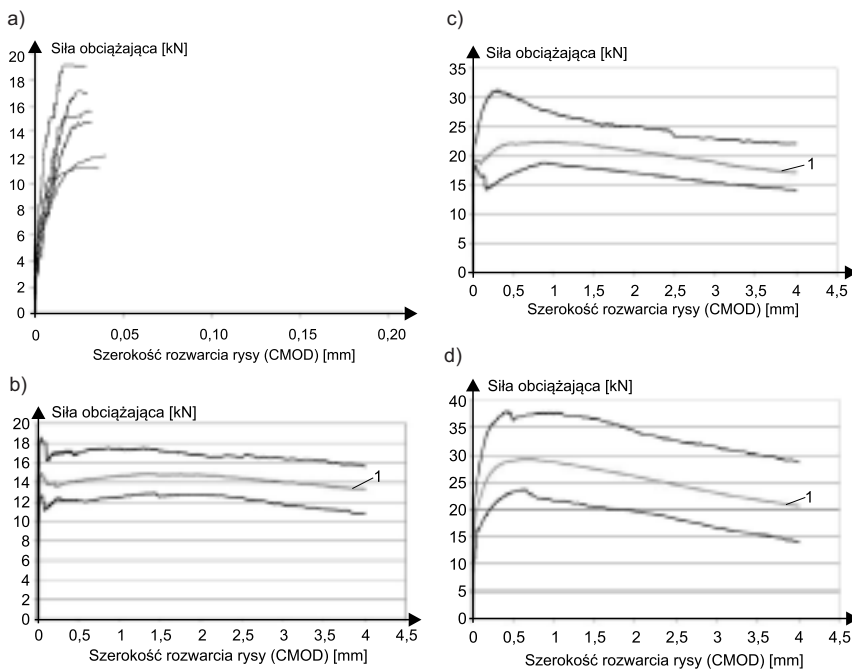
Ważnym parametrem, pozwalającym sklasyfikować dany fibrokompozyt, jest kształt wykresu „siła – CMOD” od momentu osiągnięcia cechy sprężystej do granicznego ugięcia. Definiowane są dwa kształty wykresu: pierwszy charakteryzuje się spadkiem siły niszczonej wraz ze wzrostem wartości CMOD po pojawieniu się pierwszej rysy (ang. *post crack softening* – pcs), dru-

gi natomiast wzrostem siły wraz ze wzrostem CMOD (ang. *post crack hardening* – pch).

## Wyniki badań i ich analiza

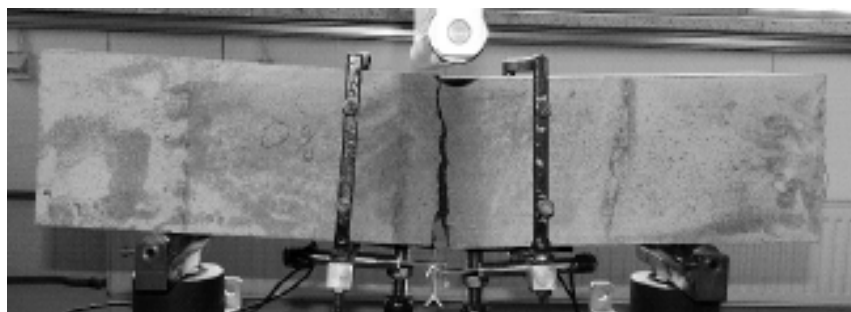
Zależność szerokości rozwarcia rysy od siły obciążającej belki przedstawiono na rysunku. W celu łatwiejszej interpretacji wyników badań, pokazane zostały obwiednie wykresów (linie czarne) oraz średnia zależność siły od CMOD (linia szara – 1). Belki bez włókien uległy zniszczeniu (fotografia 2) w chwili, gdy beton osiągnął wytrzymałość na rozciąganie. Należy podkreślić, że trzypunktowe zginanie wg PN-EN 14651 nie obejmuje elementów bez włókien i odnosi się tylko do fibrokompozytów. Badania takich elementów przeprowadzono w celu pokazania

dużego wpływu zbrojenia rozproszonego na naprężenia rozciągające w badanym fibrokompozycie na bazie piasków odpadowych. Z analizy wyników badań wynika, że już przy niewielkiej zawartości włókien stalowych, rzędu 0,5%, materiał znacznie zmienia swoje właściwości pod działaniem obciążenia. Główna cecha, którą można zaobserwować, to brak zniszczenia próbki w sposób nagły, taki jaki występował w przypadku belek betonowych. W belkach z włóknami powstawała rysa (fotografia 3), zwiększająca swoją szerokość do momentu osiągnięcia granicznego ugięcia, w którym następował koniec badania. Widać istotny wpływ zawartości włókien stalowych na wytrzymałości resztkowe na zginanie. Porównując kształt wykresów pokazanych na rysunku, można stwier-



Zależność siły obciążającej do szerokości rozwarcia rysy dla: a)  $V_f = 0\%$ ; b)  $V_f = 0,5\%$ ; c)  $V_f = 0,9\%$ ; d)  $V_f = 1,2\%$

Load – CMOD relations for a)  $V_f = 0\%$ ; b)  $V_f = 0,5\%$ ; c)  $V_f = 0,9\%$ ; d)  $V_f = 1,2\%$



Fot. 2. Przykładowy sposób zniszczenia belki bez włókien stalowych

Photo 2. An exemplary way of destruction beams without steel fibers



Fot. 3. Przykładowy sposób zniszczenia belki z włóknami stalowymi  
Photo 3. An exemplary way of destruction beams with steel fibers

dzić, że belki o zawartości włókien 0,9% i 1,2% wykazują cechę *pcs*. Natomiast belki ze zbrojeniem rozproszonym w ilości  $V_f = 0,5\%$  charakteryzują się zachowaniem pośrednim pomiędzy cechami *pcs* i *pch* – siła utrzymywała się na tym samym poziomie wraz ze wzrostem wartości CMOD. Ponadto zaobserwowano, że zawartość włókien wpływa na szerokość rozwarcia rysy (oczywista zależność: mniejsza szerokość rysy przy większej zawartości włókien  $V_f$ ). Osiągnięcie tych samych wartości CMOD dla belek z różnym procentem zbrojenia ( $V_f$ ), wiąże się z przyłożeniem innych wartości sił. Większa zawartość włókien w belkach wymaga przyłożenia większej siły w celu uzyskania danego CMOD.

Analizując wyniki badań przedstawione w tabeli 1 stwierdzono, że wraz ze wzrostem zawartości włókien stalowych w mieszance kompozytu zwiększają się jego wytrzymałości resztkowe. Z uwagi na fakt, że w przypadku badanego fibrokompozytu optymalna była zawartość włókien stalowych 1,2% [2] oraz że przy tej zawartości

włókien stalowych wykonano 31 próbek, wyznaczone zostały wartości charakterystyczne  $f_{ct,L}^f$  i  $f_R$  (tabela 2).

Klasyfikacja 7b (tabela 2) definiuje badany materiał jako kompozyt o bardzo wysokiej wartości  $f_{R1}$  (zakres od 1-8) oraz że charakteryzuje się cechą *pcs*, którą wyznaczono z zależności  $f_{R3}/f_{R1}$ . Wielkości podane w tabeli 1 i 2 mogą posłużyć do projektowania elementów konstrukcyjnych na zginanie i ścinanie, wykonanych z fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych.

Tabela 2. Wartości charakterystyczne, odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności wytrzymałości rezydualnych fibrokompozytu o zawartości włókien  $V_f = 1,2\%$

Table 2. The characteristic values, standard deviation and coefficient of variation of fiber composite residual strength for  $V_f = 1,2\%$  fiber content

Cecha badana	Jednostka [MPa]	Odchylenie standardowe s [MPa]	Współczynnik zmienności v [%]	Klasyfikacja fibrokompozytu wg fib Model Code [8]
$f_{ct,k}^f$	5,24	0,67	11	7b
$f_{R,1,k}$	7,30	1,20	13	
$f_{R,2,k}$	6,68	1,29	15	
$f_{R,3,k}$	5,82	1,25	15	
$f_{R,4,k}$	5,07	1,16	17	

### Podsumowanie

Resztkowe wytrzymałości na zginanie są głównymi cechami wytrzymałościowymi materiału, które mogą posłużyć jako podstawowe wielkości do wymiarowania elementów konstrukcyjnych ze zbrojeniem rozpro-

szonym. Fibrokompozyt na bazie piasków odpadowych o zawartości włókien 1,2% odpowiada wymaganiom stawianym materiałom konstrukcyjnym, a w niektórych przypadkach może stanowić alternatywę dla betonu zwykłego. Zbrojenie konwencjonalne w elementach konstrukcyjnych wykonanych z tego fibrokompozytu może ulec redukcji z uwagi na wysokie wartości wytrzymałości resztkowych. Należy również podkreślić, że składnikiem fibrokompozytu są piaski odpadowe, co stanowi dodatkowo ważny aspekt ekologiczny. Możliwość wykorzystania piasków odpadowych, jako pełnowartościowego kruszywa do wytwarzania materiału konstrukcyjnego w skali przemysłowej, rozwiązałaby w dużej mierze problem zagospodarowania hałd zalegających w rejonie Pomorza Zachodniego.

Wszystkie fotografie – Autorzy

### Literatura

- [1] Glinicki M. A., Beton ze zbrojeniem strukturalnym, XXV Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji, Szczyrk 2010.
- [2] Głodkowska W., Laskowska-Bury J., Kobaka J. Wpływ włókien stalowych na kształtowanie właściwości kompozytu drobnokruszowego. Materiały Budowlane. 9/2013, 28 – 30.
- [3] Głodkowska W., Kobaka J.: Modelling of properties and distribution of steel fibres within a fine aggregate concrete. Construction and Building Materials. 44, 2013, pp. 646 – 653.
- [4] Domski J.: Bending moments in steel fibre reinforced concrete beams based on waste sand. Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary and The 1st Congress of Word Engineers and Riga Polytechnical Institute/RTU Alumini, 11-12 October 2012, Riga, Latvija.
- [5] 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.
- [6] Zhi-Liang Wang et al., „Stress-strain relationship of steel fiber-reinforced concrete under dynamic compression”, Construction and Building Materials 22 (2008), 811 – 819.
- [7] RILEM TC 162-TDF, 2003, Test and design methods for steel fibre reinforced concrete,  $\sigma$ - $\epsilon$  design method, Material and Structures, vol. 36, pp. 560-567.
- [8] Model Code 2010. First complete draft. Bulletin 55. International Federation for Structural Concrete (fib). Lausanne, Switzerland.

Otrzymano 07.01.2015 r.

Tabela 1. Wartości granicy proporcjonalności ( $f_{ct,L}^f$ ) oraz wytrzymałości resztkowych ( $f_{R,i}$ ) przy różnej zawartości włókien stalowych ( $V_f$ )

Table 1. The values of limit of proportionality ( $f_{ct,L}^f$ ) and residual strength ( $f_{R,i}$ ) for different steel fiber content ( $V_f$ )

Cecha badana	Procentowa zawartość włókien ( $V_f$ )								
	$V_f = 0,5\%$			$V_f = 0,9\%$			$V_f = 1,2\%$		
	min.	śr.	max.	min.	śr.	max.	min.	śr.	max.
$f_{ct,L}^f$ [MPa]	4,07	4,82	5,95	5,94	6,24	7,31	4,96	6,34	7,84
$f_{R,1}$ [MPa]	3,88	4,51	5,46	5,45	7,08	9,69	7,45	9,27	11,61
$f_{R,2}$ [MPa]	4,04	4,72	5,51	5,72	6,96	8,26	6,55	8,80	11,72
$f_{R,3}$ [MPa]	3,99	4,61	5,33	5,23	6,37	7,50	5,85	7,87	10,44
$f_{R,4}$ [MPa]	3,62	4,38	5,20	4,75	5,72	7,18	4,95	6,98	9,62