

FIBROBETON

Wybrane wyniki badań



mgr inż. Filip Grzymski
ORCID: 0000-0003-2083-8946
Wydział Budownictwa Lądowego
i Wodnego, Politechnika
Wrocławska

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań dotyczące potencjału wykorzystania odpadów z obróbki skrawaniem jako substytutu włókien stalowych dostępnych na rynku. Podstawowe parametry wytrzymałościowe fibrobetonu uzyskanego z użyciem proponowanych włókien zostały porównane z materiałami referencyjnymi – betonem bez zbrojenia oraz fibrobetonem ze stalowymi włóknami haczykowatymi.

Beton zbrojony włóknami, popularnie nazywany fibrobetonem, jest materiałem coraz częściej stosowanym w posadzkach przemysłowych. Niskie nakłady pracy wykonania elementów fibrobetonowych w porównaniu do klasycznego żelbetu, połączone z ich dobrymi właściwościami mechanicznymi, w określonych przypadkach rekompensują wyższą cenę materiału. Najistotniejszą cechą fibrobetonu jest jego praca pod wpływem naprężeń rozciągających. W przypadku betonu, będącego typowym kruchym materiałem o wysokiej wytrzymałości na ściskanie i ponad dziesięciokrotnie niższej wytrzymałości na rozciąganie, obserwuje się jego całkowite zniszczenie już przy niewielkich wartościach naprężeń rozciągających (rzędu 2–3 MPa dla typowych betonów zwykłych). Fibrobeton charakteryzuje się innym mechanizmem zniszczenia – po pęknięciu matrycy betonowej jest on w stanie przenosić część obciążeń, co spowodowane jest włączaniem się zawartych w nim włókien do współpracy.

Koncepcja wykorzystania włókien w celu poprawy właściwości mechanicznych betonu znana jest już od kilkudziesięciu lat, jednak intensywne badania i rozwój w tym zakresie rozpoczęły się w latach 70. XX wieku [1]. Ponad 40 lat rozwoju technologii fibrobetonów doprowadziło do powstania szerokiego spektrum włókien o różnych kształtach i wymiarach, które wykonane mogą być z wielu materiałów. Poza najpopularniejszymi włóknami stalowymi stosuje się m.in. włókna szklane, węglowe oraz wykonane z materiałów syntetycznych i tekstylnych [2, 3].

Wpływ włókien na fibrobeton

Według literatury fibrobeton zaliczany jest do grupy betonów specjalnych, czyli takich, które mają specjalne przeznaczenie i cechują się odpowiednimi właściwościami [4]. Istotnym mechanizmem, spowodowanym przez dodatek włókien, jest zmniejszenie koncentracji naprężeń – w szczególności rozciągających. Włókna równomiernie rozproszone w betonie mostkują jego nieciągłą strukturę, która wynika z mikropęknięć lub zarysowań matrycy. W przypadku betonu niezbrojonego obserwuje się dużą koncentrację naprężeń w obrębie pęknięcia, co negatywnie wpływa na wytrzymałość tej strefy. Obecność włókien pozwala na przenoszenie sił powstałych w wyniku obciążeń z jednej strony pęknięcia na drugą, co znacznie redukuje spiętrzenie naprężeń na krawędzi zarysowania. Zjawisko to umożliwiło ograniczenie przekształcania mikrozarysowań w większe pęknięcia [5], co pozwala na zachowanie integralności elementu fibrobetonowego po zarysowaniu. Fibrobeton w przeciwieństwie do betonu nie zachowuje się jak materiał kruchy, lecz wykazuje właściwości quasi-plastyczne. Elementy fibrobetonowe po zarysowaniu są w stanie dalej przenosić obciążenia i odkształcać się [5]. W zależności od zastosowanej normy pozasprężysta praca fibrobetonu opisywana jest jako odporność na pęknięcie, wytrzymałość równoważna na zginanie lub wytrzymałość resztkowa na zginanie. Odpowiadające tym parametrom normy i sposoby ich wyznaczania zostały przedstawione m.in. w [3] i [6]. Poza

poprawą właściwości betonu pod wpływem naprężeń rozciągających włókna w określonych warunkach pozwalają na zwiększenie wytrzymałości betonu na ściskanie [1, 3], jednak rozluźnienie i zaburzenie struktury matrycy może w niektórych przypadkach doprowadzić do obniżenia wytrzymałości na ściskanie materiału [7]. Dodatkowym benefitem stosowania włókien do zbrojenia betonu jest poprawa jego odporności na obciążenia o charakterze dynamicznym [5] oraz zwiększenie odporności na uderzenia [3].

Fibrobeton z włóknami z recyklingu

Celem wykonanych badań laboratoryjnych była ocena potencjału wykorzystania stalowych włókien z recyklingu jako zbrojenia rozproszonego do betonu. Proponowane włókna otrzymane zostały jako odpad procesu obróbki skrawaniem. Geometria odpadów otrzymanych podczas obróbki elementów metalowych w tokarce jest bardzo zróżnicowana, dlatego wiele typów odpadów zostało odrzuconych już przy wstępnej selekcji ze względu na ich nieodpowiedni kształt. Wśród pozostałych skrawków wytypowano włókna o geometrii najbardziej zbliżonej do włókien stosowanych powszechnie w budownictwie. Porównanie kształtu proponowanych włókien z typowymi włóknami haczykowatymi przedstawiono na rys. 1.

W celu sprawdzenia efektywności włókien stalowych z recyklingu przeprowadzono badania porównawcze z udziałem trzech serii próbek: I – betonowych, II – fibrobetonowych



Fibrobeton - beton zbrojony w włókna



Rys. 1. Wykorzystane w badaniach włókna z recyklingu (z lewej) oraz włókna haczykowane (z prawej)

	$f_{ct,fl}$ [MPa]	$f_{ct,eq}$ [MPa]	R_{eq} [%]
Brak włókien	3,06	-	-
Włókna referencyjne	3,95	2,83	71,83
Włókna z recyklingu	4,36	0,50	11,36

Tabela 1. Wyznaczone wartości charakteryzujące pracę materiałów przy zginaniu

wykonanych z użyciem włókien haczykowatych ArcelorMittal HE 75/50, III – fibrobetonowych wykonanych z użyciem proponowanych włókien. Receptura mieszanki betonowej nie ulegała zmianom w poszczególnych seriach (ilości na 1 m³ mieszanki betonowej: cement 42,5R – 350 kg, woda – 143 kg, kruszywo 0–2 mm – 640 kg, kruszywo 2–8 mm – 640 kg, kruszywo 8–16 mm – 640 kg, superplastyfikator – 3,15 kg, wskaźnik w/c – 0,41), a jedynym elementem różniącym były zastosowane włókna stalowe. W przypadku serii II i III zastosowano włókna w dawkowaniu 25 kg/m³. W badaniach wyznaczono podstawowe parametry wytrzymałościowe materiałów, takie jak: wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu oraz wartości opisujące pozasprężystą pracę fibrobetonu.

Parametry wytrzymałościowe

Mieszanki betonowe wykorzystane w trzech przebadanych seriach zostały wykonane w różnych partiach, przez co wystąpiły rozbieżności wyników badań podstawo-

wych parametrów wytrzymałościowych. Beton serii I charakteryzował się średnią wytrzymałością na ściskanie 41,6 MPa ze współczynnikiem zmienności 2,6%, n=3. W badaniu wytrzymałości na ściskanie fibrobetonów serii II i III otrzymano średnie wytrzymałości na ściskanie i współczynniki zmienności odpowiednio 53,7 MPa (3,0%, n=3) oraz 69,0 MPa (4,9%, n=3). Tak duże rozbieżności w wytrzymałości na ściskanie najprawdopodobniej nie są spowodowane różnicami w pracy materiałów, lecz wilgotnością kruszywa wykorzystanego przy przygotowaniu poszczególnych serii. W związku z tak dużymi różnicami w wynikach do porównania najważniejszej cechy fibrobetonu, czyli jego pozasprężystej pracy, wykorzystano procentowy wskaźnik wytrzymałości równoważnej wyznaczany przy pomocy wzoru (1) przekształconego na podstawie wytycznych normy ASTM C1609 [8]. Wartości wytrzymałości równoważnej na zginanie i wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu fibrobetonu (przy założeniu zginania 4-punktowego z odległością między siłami L/3) wyznaczone są odpowiednio ze wzorów (2) i (3) [9]. Średnie wartości parametrów wytrzymałościowych wyznaczonych na podstawie 3 próbek każdego rodzaju przedstawiono w tab. 1.

$$R_{eq} = \frac{f_{ct,eq}}{f_{ct,fl}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$f_{ct,eq} = \frac{T_b \cdot l}{\delta_{1/150} \cdot b \cdot h^2} \quad (2)$$

$$f_{ct,fl} = \frac{P \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (3)$$

gdzie:

R_{eq} – wskaźnik wytrzymałości równoważnej na zginanie fibrobetonu,

$f_{ct,eq}$ – wytrzymałość równoważna na zginanie fibrobetonu,

$f_{ct,fl}$ – wytrzymałość na zginanie fibrobetonu, T_b – praca zginania mierzona na podstawie pola powierzchni pod wykresem $F-\delta$ (siła – ugięcie) do wartości ugięcia $\delta_{1/150}$,

$\delta_{1/150}$ – wartość ugięcia belki odpowiadająca wartości 1/150 rozpiętości między podporami,

P – maksymalne obciążenie belki w chwili pierwszego zarysowania,

b – szerokość belki,

h – wysokość belki,

l – rozpiętość belki w osiach podpór.

Wartość wskaźnika wytrzymałości równoważnej na zginanie wynosząca około 72% w przypadku fibrobetonu z włókna referencyjnymi jest typowa dla zastosowanego typu i zawartości włókien. Pomimo wyższej wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu fibrobeton z włókna z recyklingu charakteryzował się znacznie niższą wytrzymałością równoważną na zginanie niż materiał referencyjny, co spowodowało, że wartość wskaźnika wytrzymałości równoważnej wyniosła około 11%. Sugerować to może około 6-, 7-krotnie gorszą skuteczność proponowanych włókien.

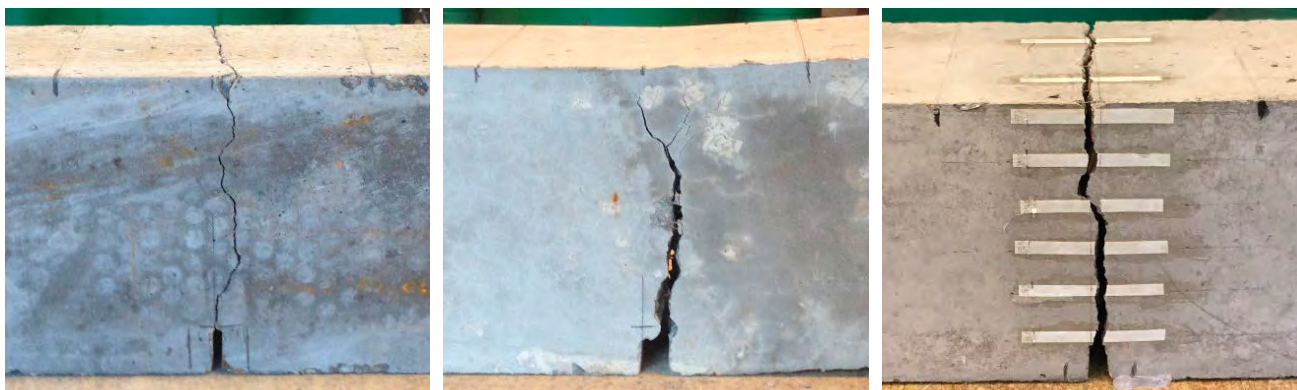
Obrazy zniszczenia próbek

Podczas badań zauważono, że charakter pracy materiału w każdej z trzech serii jest inny. Zniszczenie fibrobetonu, niezależnie od typu próby, przebiega w sposób znacznie mniej gwałtowny niż ma to miejsce w przypadku betonu zwykłego. Już przy badaniu wytrzymałości na ściskanie zaobserwowano znacznie wolniejsze zniszczenie próbek fibrobetonowych II i III serii. Włókna stalowe w matrycy utrzymywały zniszczone kawałki betonu przy rdzeniu próbki. W przypadku serii z włókna haczykowatymi fragmenty próbki, pomimo wielu pęknięć, trzymały się razem stosunkowo mocno. Elementy wykonane z wykorzystaniem włókien z recyklingu można było łatwo rozdzielić na części bez użycia dużej siły i narzędzi, ponieważ włókna łatwo wywlekały się ze zniszczonej matrycy lub zrywały się. Przykładowe obrazy zniszczenia elementów ściskanych przedstawiono na rys. 2.

Przy badaniu belek betonowych zgodnie z oczekiwaniami zaobserwowano kruche pęknięcie przechodzące przez cały przekrój środkowy próbki. Belki fibrobetonowe z włókna haczykowatymi początkowo zachowywały się identycznie jak belki betonowe, lecz po zarysowaniu powoli przechodziły



Rys. 2. Porównanie obrazów zniszczenia próbek ściskanych w seriach (od lewej) I, II i III



Rys. 3. Porównanie obrazów zniszczenia próbek zginanych w seriach (od lewej) I, II i III

w fazę plastyczną i nie traciły swojej integralności, również po wyjęciu z prasy. W przypadku próbek wykonanych z fibrobetonu z włóknami z recyklingu praca przed zarysowaniem nie różniła się od dwóch pozostałych serii. Po zarysowaniu zanotowano nagły duży przyrost ugięć belek, który ograniczany był przez włókna dopiero po powstaniu rysy o dużej rozwarości. W następnej fazie belka zachowała się podobnie do fibrobetonu serii II, lecz po wyjęciu z prasy możliwe było jej przełamanie bez użycia dużej siły. Przykłady środkowych części zniszczonych w badaniach belek przedstawiono na rys. 3.

Czynniki technologiczne

Już na etapie wykonania próbek zauważono problemy technologiczne proponowanych włókien. W porównaniu z włóknami haczykowatymi charakteryzowały się one znacznie większą skłonnością do łączenia w grupy, co utrudniało ich dozowanie i odpowiednio rozprowadzenie w matrycy betonowej. Dodatkowo, wskutek ich mniejszej sztywności, ulegały one częściowej deformacji, co zwiększało ich skłonność do agregacji. Ze względu na odpadowy charakter materiału, z którego wykonane zostały włókna, nie było możliwe wykonanie ich z jednego gatunku stali. Dostarczony do badań materiał składał się z mieszaniny odpadów o zróżnicowanej geometrii, które uzyskano w wyniku obróbki elementów stalowych o różnych właściwościach. Dodatkowo odpady z obróbki skrawaniem mają naturalną tendencję do zwijania się, dlatego w przypadku planowania wytworzenia tego typu włókien na większą skalę konieczne byłoby rozwiązanie tego problemu.

Podsumowanie

Proponowane włókna spełniły częściowo swoją rolę jako zbrojenie rozproszone do betonu, jednak ich praca nie jest tak efektywna, jak włókien dostępnych na rynku. Próbkę wykonaną z fibrobetonu z włóknami z recyklingu, zależnie od typu badania, wykazywały cechy zarówno betonu, jak i typowego fibrobetonu. Wzmocnienie materiału

oraz włączenie efektów pozaspęrzystej pracy za pomocą badanych włókien utrzymuje się na stosunkowo niskim poziomie (około 6-, 7-krotnie niższa efektywność w porównaniu do materiału referencyjnego) i nie jest wystarczająco duże, żeby móc uwzględnić je w obliczeniach. Dodatkowo problemy technologiczne przy otrzymywaniu samych włókien obniżają ich wartość w wielkoskalowym zastosowaniu. Ponadto stal jest materiałem, który można łatwo poddać recyklingowi w tradycyjny sposób, dzięki czemu uzyskuje się pełnowartościowy materiał do produkcji klasycznych włókien do betonu. Warto jednak zaznaczyć, że nie odnotowano pogorszenia pracy betonu po dodaniu włókien z recyklingu, więc ich niekonstrukcyjne zastosowanie jest możliwe. Może to pozwolić na ograniczenie wpływów zarysowania od skurczu lub od niewielkich obciążeń. Ostatecznie na podstawie wyników badań stwierdzono, że badany sposób wykorzystania odpadów z obróbki skrawaniem nie ma perspektywy do szerszego zastosowania w przemyśle budowlanym. ■

DOI: 10.5604/01.3001.0013.3419

Bibliografia

- [1] Holschemacher K., Mueller T., Ribakov Y., Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete, "Materials and Design", 2010, Vol. 31, No. 5, s. 2604-2615.
- [2] Shah A. A., Ribakov Y., Recent trends in steel fibered high-strength concrete, "Materials and Design", 2011, Vol. 32, No. 8-9, s. 4122-4151.
- [3] Glinicki M., Beton ze zbrojeniem strukturalnym, Materiały XXV Ogólnopolskiej Konferencji „Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji”, Szczyrk 2010, s. 279-308.
- [4] Jamroz Z., Beton i jego technologie. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2008.
- [5] Jasiczak J., Mikołajczak P., Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami – przegląd tendencji krajowych i zagranicznych. Poznań, Oficyna Wydawnicza Politechniki Poznańskiej, 2003.
- [6] Grzymalski F., Musiał M., Fibrobeton. Metodyka badań właściwości wytrzymałościowych, „Builder”, 2017, No. 6, s. 90-93.
- [7] Neves R.D., Fernandes de Almeida J. C. O., Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete, "Structural Concrete", Vol. 6, No. 1, s. 1-8.
- [8] ASTM C1609 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), 2012.
- [9] JSCE-SF4, Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete, Japan Society of Civil Engineers, 1984.

Streszczenie: Zbrojenie betonu włóknami stalowymi jest coraz częściej wykorzystywaną metodą zwiększania jego odporności na zarysowanie i pękanie. Najszersze zastosowanie w praktyce znalazło ono w przypadku posadzek przemysłowych. Różnorodność dostępnych na rynku włókien pozwala na spełnienie zróżnicowanych kryteriów projektowych, a włókna stalowe najnowszej generacji umożliwiają niekiedy całkowitą rezygnację z klasycznego zbrojenia prętami, nawet w przypadku silnie obciążonych posadzek. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań dotyczących potencjału wykorzystania odpadów z obróbki skrawaniem jako substytutu włókien stalowych dostępnych na rynku. Podstawowe parametry wytrzymałościowe fibrobetonu uzyskanego z użyciem proponowanych włókien zostały porównane z materiałami referencyjnymi – betonem bez zbrojenia oraz fibrobetonem ze stalowymi włóknami haczykowatymi. Dodatkowo przedstawiono analizę czynników technologicznych, które mają duży wpływ na zasadność stosowania badanego materiału.

Słowa kluczowe: fibrobeton, właściwości mechaniczne, włókna stalowe, włókna z recyklingu

Abstract: Fiber-reinforced concrete. Selected test results. Reinforcing concrete with steel fibers is an increasingly used method of improving its cracking resistance. The most common application of such kind of reinforcement is associated with industrial floors. The variety of the fibers available on the market allows to meet different project criteria. The newest generation of steel fibers makes it possible to omit classical steel rebars in some cases despite high load levels. In this paper selected research results regarding the potential of using machining wastes as a substitute to steel fibers available on the market are presented. The most important mechanical properties of proposed fiber reinforced concrete and two reference materials – concrete and typical fiber reinforced concrete are compared. Additionally, the analysis of key technological factors was carried out.

Keywords: fiber reinforced concrete, mechanical properties, steel fibers, recycled fibers