

dr hab. inż. Wiesława Głodkowska, prof. PK*
mgr inż. Joanna Laskowska-Bury*
mgr inż. Janusz Kobaka*

Wpływ włókien stalowych na kształtowanie właściwości kompozytu drobnokruszywowego

Steel fibre effect on the properties of fine aggregate composite

Fibrobetony stają się coraz popularniejsze zarówno w kraju, jak i na świecie, ponieważ wykazują większą wytrzymałość na rozciąganie i ściskanie, wytrzymałość zmęczeniową oraz większą odporność na ścieranie niż beton zwykły [1, 2, 3, 4]. Dzięki tym właściwościom są stosowane do wytwarzania różnych elementów konstrukcyjnych, płyt okładzin budynków, elementów cienkich powłok jako przekryć budynków, do budowy nawierzchni mostów, tuneli, wzmacniania wyrobisk kopalnianych, czy też do wznoszenia obiektów obciążonych dynamicznie [5]. Zastąpienie betonu zwykłego betonem drobnokruszywowym ze zbrojeniem rozproszonym o tych samych bądź lepszych właściwościach jest wspólnym rozwiązaniem w regionach, w których brakuje naturalnych złóż kruszywa grubego. Należy do nich m.in. Pomorze. Szacuje się, że ok. 90% złóż kruszyw grubych znajduje się w regionie południowym Polski, 6% w środkowym i tylko 4% w północnym [6]. Region Pomorza bogaty jest w piaski odpadowe, które są wynikiem hydroklasyfikacji, czyli pozyskiwania kruszywa grubego przez jego wyflukowanie ze złóż. Efektem tego są hałdy piasku pozbawionego frakcji grubych (fotografia). Powstałe wyrobiska powinny być poddane kosztownej rekultywacji. Alternatywą może być wykorzystanie piasku odpadowego jako pełnowartościowego surowca budowlanego.



Hałdy piasków odpadowych na Pomorzu (gmina Białogard)

* Politechnika Koszalińska

go. Częściowe zastąpienie betonu zwykłego kompozytem drobnokruszywowym ze zbrojeniem rozproszonym może znacznie ograniczyć dalszą degradację środowiska. Działania te przyczynią się również do stopniowego zmniejszania hałd piasku.

Celem badań doświadczalnych było określenie wpływu dodatku włókien stalowych na wybrane właściwości kompozytu wykonanego na bazie kruszywa odpadowego, a następnie opracowanie takiego składu kompozytu drobnokruszywowego ze zbrojeniem rozproszonym, który może być alternatywą dla betonu zwykłego.

Materiały i elementy próbne

Do wykonania elementów próbnych użyto piasku pozyskanego po procesie hydroklasyfikacji z Kopalni Surowców Mineralnych w Podwilczu, gmina Białogard (1570 kg/m³), cementu portlandzkiego CEM II/A-V 42,5R (420 kg/m³), pyłu krzemionkowego (21 kg/m³), superplastyfikatora Betocrete 406 (16,8 kg/m³) oraz wody z wodociągu miejskiego (160 kg/m³). Zbrojenie rozproszone stanowiły włókna stalowe EKOMET o kształcie haczykowatym i smukłości $\lambda = l/d = 62,5$ ($l = 50$ mm, $d = 0,8$ mm).

Matrycę kompozytu drobnokruszywowego zaprojektowano metodą analityczno-doświadczalną. Zmodyfikowanie jej składu przez zastosowanie dodatku pyłów krzemionkowych oraz domieszki uplastyczniająco-upłynniającej pozwoliło na uzyskanie stosunku $w/c = 0,38$. Jako zmienną składową kompozytu przyjęto zawartość włókien stalowych, które dozowano co 0,5% w stosunku do objętości kompozytu, do 2,5%. Włókna były rozmieszczone w mieszance kompozytu w sposób przypadkowy.

Badania wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie przy rozłupywaniu, gęstości oraz dynamicznego modułu sprężystości kompozytu drobnokruszywowego wykonano na próbkach sześciennych o boku 150 mm. Wytrzymałość na ściskanie określono wg PN-EN 12390-3, natomiast

na rozciąganie przy rozłupywaniu wg metody przedstawionej w PN-EN 12390-6. Gęstość pozorną oznaczono zgodnie z zaleceniami PN-EN 12390-7, a dynamiczny moduł sprężystości zdefiniowano na podstawie analizy prędkości przebiegu fali ultradźwiękowej [7]. Statyczny moduł sprężystości określono wg ISO 6784:1982 na próbkach cylindrycznych średnicy 150 mm i wysokości 300 mm, odporność na ścieranie kompozytu wg zasad przedstawionych w PN-84/B-04111 na próbkach sześciennych o boku 71 mm, badanie konsystencji mieszanki betonowej przeprowadzono metodą Ve-Be zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 12350-3. Przebieg skurczu kompozytu w czasie wyznaczono zgodnie z instrukcją ITB 194/98 na belkach o wymiarach 100 x 100 x 400 mm.

Elementy próbne przewidziane do badań doraźnych rozformowywano po 2 dniach i do czasu badania, przez okres 28 dni, przechowywano w temperaturze 20 ± 2 °C i wilgotności względnej powietrza 100%. Liczbę próbek niezbędną do określenia średniej wartości statystycznej badanej cechy wyznaczono na podstawie statystycznej analizy wyników badań wstępnych za pomocą rozkładu t-Studenta przy tolerancji $v = 10\%$ i poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Badania dynamicznego modułu sprężystości oraz gęstości pozornej przeprowadzono na 96 próbkach: po 16 próbek każdego kompozytu o różnej zawartości włókien. Wytrzymałość kompozytu w warunkach ściskania i rozciągania przy rozłupywaniu, a także statyczny moduł sprężystości określono na 48 próbkach, po 8 próbek każdego kompozytu, a ścieralność badano na 6 próbkach każdego rodzaju kompozytu. W przypadku każdej badanej cechy betonu drobnokruszywowego wykonano po 8 próbek kontrolnych (bez włókien), które do czasu obciążenia przechowywano w takich samych warunkach cieplno-wilgotnościowych, jak próbki z włóknami.

W przypadku kompozytu drobnokruszywowego o optymalnej zawartości włókien stalowych przeprowadzono badania podstawowych cech charakteryzujących beton zwykły.

Wytrzymałość na ściskanie oraz wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu oznaczono na 20 próbkach sześciennych o boku 150 mm, a statyczny moduł sprężystości na 18 próbkach cylindrycznych.

Wyniki i analiza badań

W opracowaniu wyników badań wykorzystano rozkład t-Studenta i test zgodności Grubbsa. Wyznaczona na podstawie rozkładu t-Studenta liczba próbek potrzebnych do określenia średniej wartości badanych cech statystycznie była wystarczająca. Wartości wskaźników zmienności badanych właściwości, wynoszące 5 – 9%, wskazują na bardzo dobrą jakość zaprojektowanego kompozytu drobnokruszywowego na bazie piasków odpadowych.

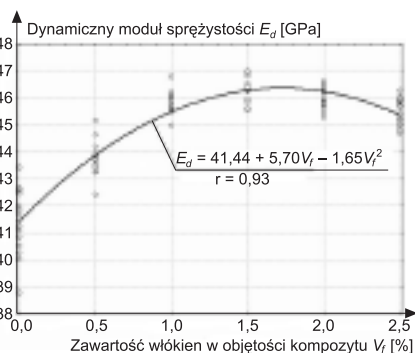
Na rysunkach 1 ÷ 3 przedstawiono wybrane wyniki badań właściwości kompozytu drobnokruszywowego w zależności od zawartości włókien stalowych. Badania wykazały korzystny wpływ dodatku włókien stalowych na właściwości kompozytu drobnokruszywowego na bazie piasków odpadowych (przyrost wartości wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie) (tabela 1).

Z analizy wyników badań **wytrzymałości na ściskanie** wynika, że włókna stalowe dodane do kompozytu w ilości do 1,5% efektywnie zwiększają jego wytrzymałość. Powyżej tego poziomu nie następuje już istotny wzrost wytrzymałości na ściskanie. Dodatek włókien stalowych w ilości 1% zwiększa wytrzymałość na ściskanie ok. 33% w stosunku do materiału bez włókien, natomiast wytrzymałość kompozytu zawierającego 2,5% włókien jest większa jedynie o 2% w porówna-

niu z kompozytem zawierającym 1,5% włókien stalowych.

W przypadku **wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu** kompozytu drobnokruszywowego zaobserwowano, że przebieg tej zależności nie jest prostoliniowy, lecz linia ulega stopniowemu zakrzywieniu. Przy zawartości włókien 2% wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu nie rekompensuje już kosztu wykonania takiego kompozytu, który wzrasta wprost proporcjonalnie do objętości użytego zbrojenia rozproszonego.

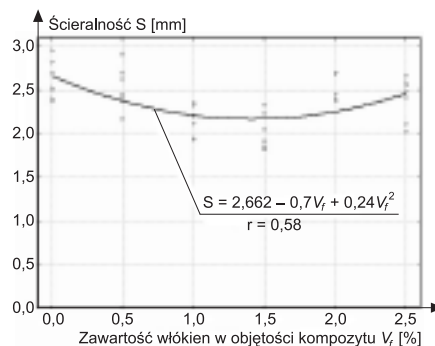
Włókna stalowe powodują także zwiększenie wartości dynamicznego modułu sprężystości (rysunek 1). Z analizy krzywej regresji wynika, że korzystny wpływ włókien stalowych ma miejsce przy ich zawartości w kompozycie drobnokruszywowym do 1,7%, a po przekroczeniu tej ilości wartość dynamicznego modułu sprężystości ulega pogorszeniu. Przyczyną zaobserwowanych zmian jest, naszym zdaniem, powiększająca



Rys. 1. Zależność dynamicznego modułu sprężystości kompozytu drobnokruszywowego od zawartości włókien stalowych

wierzchnia zespolenia pojedynczego włókna z matrycą maleje wraz ze wzrostem liczby 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 takich kompozytów.

Zbyt duża ilość włókien stalowych w kompozycie powoduje także pogorszenie jego odporności na ścieranie (rysunek 2). Badania dowodzą, że przy zawartości włókien 1 – 1,5% kompozyt wykazuje najmniejszą ścieralność, przy czym maksimum osiąga przy zawartości włókien 1,3%. Różnica między największą ścieralnością kompozytu, odpowiadającą zerowej objętości włókien stalowych, a ścieralnością najmniejszą, przekracza 20%. Pogorszenie tej właściwości ma związek ze zwiększającą się wraz ze wzrostem zawartości włókien stalowych porowatością matrycy. Ponadto zgodnie z PN-83/B-06256 *Beton odporny na ścieranie*, ścieralność materiału nie powinna być większa



Rys. 2. Zależność ścieralności kompozytu drobnokruszywowego od zawartości włókien stalowych

Tabela 1. Właściwości kompozytu przy różnej zawartości włókien stalowych

Właściwość/postać funkcji, współczynnik korelacji	Zawartość włókien w kompozycie [%]					
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Gęstość pozorna [g/cm ³] $\rho = 2352 - 215,8e^{-0,93V_f}$, $r = 0,97$	2,1	2,2	2,3	2,3	2,3	2,3
Wytrzymałość na ściskanie [MPa] $f_{c,cube} = 63 - 19e^{-1,61V_f}$, $r = 0,90$	44	51,8	61,4	61,6	61,3	61,9
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa] $f_{ct} = 9,75 - 6,5e^{-0,99V_f}$, $r = 0,97$	3,3	5,5	7,7	8,3	8,8	9,2
Ścieralność [mm] $S = 2,6 - 0,7V_f + 0,25V_f^2$, $r = 0,58$	2,6	2,5	2,1	2,0	2,5	2,4
Dynamiczny moduł sprężystości [GPa] $E_d = 41,5 + 5,7V_f - 1,65V_f^2$, $r = 0,93$	41,5	43,7	45,8	46,3	46	45,5
Stacyjny moduł sprężystości [GPa] $E_s = 32,7 + 2,35V_f - 0,76V_f$	32,9	33,3	34,5	34,7	34,0	33,9
Skurcz [mm/m] $\epsilon_s = 0,9(1 - e^{-0,26V_f}) - 0,048V_f$, $r = 0,93$	0,9	0,87	0,85	0,83	0,8	0,78
Konsystencja Ve-Be [s] $K = 4,24e^{0,8V_f}$, $r = 0,87$	4,2	6,4	9,5	14,3	21,5	32,2

się napowietrzenie mieszanki wraz z zawartością włókien stalowych. Podobne rezultaty uzyskano w badaniu gęstości pozornej. Zależność tego parametru od zawartości włókien stalowych nie przebiega prostoliniowo, jak można by się spodziewać z rachunku zastępowania matrycy włóknami stalowymi. Po przekroczeniu objętości włókien stalowych w mieszance kompozytu równej 1,5% obserwuje się bardzo powolny wzrost jego gęstości.

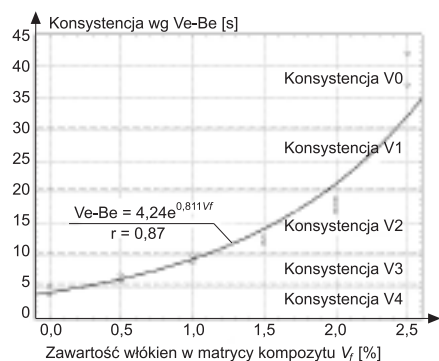
W związku z tym, że włókna stalowe mają zdolność do napowietrzania mieszanki [8], następstwem jest zwiększona porowatość stwardniałej matrycy i w konsekwencji mniejszy przyrost jej gęstości. Po-

niż 2,5 mm w przypadku betonu użytkowanego w warunkach dużego i ciężkiego obciążenia ruchem. Kompozyt drobnokruszywowo na bazie piasków odpadowych z zawartością włókien 0,5 – 2% spełnia te wymagania.

Zależność skurczu (skurcz swobodny) kompozytu drobnokruszywowego ze zbrojeniem rozproszonym od czasu może być aproksymowana funkcją wykładniczą. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że skurcz kompozytu drobnokruszywowego przy różnej zawartości włókien (0,5 – 2,5%) jest porównywalny ze skurczem betonu zwykłego.

Z analizy wyników przeprowadzonych badań wynika, że zwiększenie ilości zbrojenia rozproszonego w kompozycie ponad 1,5% może mieć negatywny wpływ na niektóre jego właściwości. Należy więc określić taką zawartość włókien w kompozycie, która pozwoli na uzyskanie materiału o właściwościach mechaniczno-fizycznych jak w

przypadku betonu zwykłego przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej konsystencji mieszanki (rysunek 3).



Rys. 3. Zależność konsystencji kompozytu drobnokruszywowego od zawartości włókien stalowych

Analizując krzywe regresji (tabela 1) wyznaczono optymalną zawartość włókien stalowych w kompozycie drobnokruszywowym, przy której spełnione są wymagania stawiane betonowi zwykłemu. Funkcje opisujące wytrzymałość na ściskanie oraz na rozciąganie przy rozłupywaniu nie dały konkretnej odpowiedzi na stawiane pytanie. Wartości tych parametrów mają bowiem tendencję wzrostową w zakresie przyjętej w badaniach procentowej zawartości włókien stalowych. Posłużono się więc funkcjami regresji tych cech, które ulegały pogorszeniu wraz ze wzrostem ilości włókien stalowych w kompozycie drobnokruszywowym, a mianowicie: ścieralność, dynamiczny moduł sprężystości i konsystencja. Wyznaczono maksymalną zawartość dodatku włókien stalowych (ekstremum funkcji regresji przedstawionych w tabeli 1), po przekroczeniu których nastąpił spadek wartości rozważanych cech. Ostatecznie ustalono, że **pod względem najkorzystniejszych właściwości oraz ekonomicznym maksymalną zawartość włókien stalowych w drobnokruszywowym kompozycie na bazie piasków odpadowych wynosi 1,2%**. Przy tej ilości wytrzymałość na ściskanie kompozytu drobnokruszywowego zwiększa się o ok. 37% w stosunku do kompozytu bez włókien. Dozowanie większej ilości włókien nie powoduje już znacznego wzrostu wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie. Ponadto zwiększenie zawartości włókien do 2% bardzo niekorzystnie wpływa na konsystencję i urabialność mieszanki. **Jako optymalną ilość włókien stalowych przyjęto zatem wartość 1,2% i wykonano elementy próbne do kolejnych badań.** Uzyskane wyniki zamieszczono w tabeli 2.

Badania wstępne wykazały, że kompozyt drobnokruszywowy na bazie piasków odpa-

Tabela 2. Właściwości kompozytu drobnokruszywowego przy zawartości włókien stalowych 1,2%

Badana cecha	f_c/f_{ctm}	Parametry analizy statystycznej				
		\bar{x} [MPa]	x_{min} [MPa]	s [MPa]	v [%]	k [-]
Wytrzymałość na ściskanie	9,2 (14,2)*	67 (20+58)*	63,1	2,2	3,3	0,94
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu		7,3 (1,6+4,1)*	5,9	0,6	8,2	0,81
Statyczny moduł sprężystości		36,7 (27+37)*	32,7	2,8	7,6	0,90

* Właściwości betonu zwykłego wg PN-EN 1992-1-1:2008

adowych z zawartością włókien stalowych w ilości 1,2% charakteryzuje się właściwościami korzystniejszymi niż beton zwykły. Dotyczy to przede wszystkim wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu. Na podstawie wyznaczonych wskaźników zmienności (v) stwierdzono bardzo dobrą jakość kompozytu objętego badaniami.

Podsumowanie

Możliwość wykorzystania piasków odpadowych do wytwarzania kompozytu drobnokruszywowego ze zbrojeniem rozproszonym w skali przemysłowej rozwiąże w dużej mierze problem zagospodarowania hałd zalegających w rejonie Pomorza. Duże zasoby kruszywa drobnych występujące w postaci odpadów poprodukcyjnych mogą stać się bogactwem dla tego regionu, a tym samym podstawowym składnikiem materiałów przeznaczonych do wytwarzania przede wszystkim cienkościennych elementów konstrukcyjnych. Pozyskiwane w ten sposób kruszywo obniża koszty wykonania takich elementów.

Właściwości mechaniczno-fizyczne drobnokruszywowych kompozytów na bazie piasków odpadowych ze zbrojeniem rozproszonym o zawartości 1,2% odpowiadają wymaganiom stawianym materiałom konstrukcyjnym. Z przeprowadzanych badań wstępnych oraz studiów literaturowych wynikają następujące zalety oraz wady drobnokruszywowych kompozytów wykonanych na bazie piasków odpadowych ze zbrojeniem rozproszonym:

- **zalety** – korzystniejsze właściwości mechaniczne niż w przypadku betonu zwykłego; możliwość redukcji lub w niektórych przypadkach (np. płyty) całkowitego wyeliminowania zbrojenia konwencjonalnego; wykorzystanie kruszywa odpadowego;

- **wady** – gorsza urabialność w stosunku do betonu bez włókien oraz brak dopracowanych metod wymiarowania elementów konstrukcyjnych wykonanych z takiego kompozytu. Wynika z tego konieczność dalszych badań i analiz teoretycznych.

Streszczenie

W artykule poruszono problem zagospodarowania piasków na terenie Pomorza powstają-

cych jako odpad przy pozyskiwaniu kruszywa mineralnych do betonu. Jednym ze sposobów na jego rozwiązanie jest zastosowanie piasków odpadowych do produkcji konstrukcyjnych kompozytów mineralnych ze zbrojeniem rozproszonym. Autorzy zaprezentowali wyniki badań wybranych właściwości kompozytów drobnokruszywowych o różnej zawartości włókien stalowych. Określono skład materiałowy takiego kompozytu. Przedstawione badania są niewielkim fragmentem realizowanego szerokiego programu badań.

Abstract

In the paper an issue of waste sand utilization was raised. The heaps of waste sand located in Polish region Pomerania are by-product obtained during the process called hydroclassification of all-in-aggregate for concrete production. One of examples how to resolve the waste sand utilization problem could be its application for the production of steel fiber reinforced mineral composites. The authors introduced their tests results based on selected properties of fine aggregate fibrous composites with different amounts of steel fibers. The study is a small part of a broad research program.

Liatura

- [1] Bentur A., Mindess S.: Fibre reinforced cementitious composites. Taylor & Francis 2006.
- [2] Yazici 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).
- [3] Khaloo A. R., Afshari M.: Flexural behaviour of small steel fibre reinforced concrete slabs. Cement and Concrete Composites, Vol. 27, Issue 1, January 2005, pp. 141 – 149.
- [4] Śliwiński J.: Beton zwykły. Projektowanie i podstawowe właściwości. Cement Polski, Kraków 1999.
- [5] Chiaia B. et al.: Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings. Engineering Structures 2009 (1600 – 1606).
- [6] Kondratowicz W.: Jednorodność udziału piasku w krajowych kruszywach naturalnych przeznaczonych do betonu. Stan i znaczenie. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1978.
- [7] Neville A.: Właściwości betonu. Polski Cement, Kraków 2012.
- [8] Aruntas H. Y. et al: Effect of super plasticizer and curing conditions on properties of concrete with and without fiber. Materials Letters, 62 (2008), s. 3441 – 3443.