



Piaski odpadowe jako wartościowe kruszywo do wytwarzania fibrokompozytów

Wiesława Głodkowska, Joanna Laskowska-Bury
Politechnika Koszalińska

1. Wstęp

Stawiane obecnie wymagania dotyczące spełnienia stanu granicznego nośności i użytkowalności nowoczesnych konstrukcji z betonu spowodowały konieczność poszukiwania rozwiązań dotyczących polepszenia właściwości mechaniczno-fizycznych betonu zwykłego. Jednym ze sposobów jest stosowanie dodatku w postaci włókien. Kompozyty mineralne z włóknami rozproszonymi, ogólnie nazywane fibrokompozytami, stają się coraz popularniejsze zarówno w kraju, jak i na świecie. Włókna stalowe pełnią rolę wzmocnienia i w znaczący sposób poprawiają niektóre właściwości kompozytu [1,12,18]. Fibrokompozyty stanowią więc pewną alternatywę dla betonu zwykłego, gdyż cechuje je, między innymi, większa wytrzymałość na rozciąganie i ścinanie, wytrzymałość zmęczeniowa i uderzalność oraz większa odporność na ścieranie. Włókna zapobiegają propagacji rys i sprawiają, że materiał staje się bardziej jednorodny [3,4,19]. Zanika kruchy charakter betonu zwykłego, co bezpośrednio wpływa na bezpieczeństwo użytkowania konstrukcji [24]. Dzięki tym właściwościom fibrokompozyty znajdują zastosowanie w wytwarzaniu różnych elementów konstrukcyjnych, takich jak: płyty stropowe, belki, powłoki, posadzki przemysłowe, a nawet nawierzchnie mostów, tunele, czy też elementy do wzmocnień wyrobisk kopalnianych [5,6,21].

Prowadzone w Katedrze Konstrukcji Betonowych i Technologii Betonu badania [8,9,12–17] związane z drobnokruszywowym kompozytem, wykonanym na bazie piasków odpadowych, z dodatkiem włókien stalowych dowodzą, że istnieje możliwość częściowego zastąpienia be-

tonu zwykłego i wykonywania niektórych elementów konstrukcyjnych z fibrokompozytu. Kompozyt drobnokruszywowy, charakteryzujący się lepszymi właściwościami niż beton zwykły (np. większą wytrzymałością na rozciąganie, ściskanie, ścinanie, większą odpornością na ścieranie i obciążenia dynamiczne), jest doskonałym rozwiązaniem dla regionów, w których brakuje naturalnych złóż kruszywa grubego, niezbędnego do produkcji betonu zwykłego.

Takim regionem bez wątpienia jest Pomorze. Szacuje się, że około 90% złóż kruszyw grubych znajduje się w regionie południowym Polski, 6% w regionie środkowym i tylko 4% w regionie północnym [20]. W związku z powyższym region Pomorza bogaty jest w piaski odpadowe, które są wynikiem hydroklasyfikacji, technologii pozyskiwania kruszywa grubego opartej na jego wyflukiwaniu ze złóż.



Rys. 1. Widok hałd piasków odpadowych na Pomorzu (gm. Białogard)

Fig. 1. Waste sand heaps in Pomerania (Białogard)

Powstałe w ten sposób wyrobiska (rysunek 1) powinny być poddane kosztownej rekultywacji. Alternatywnym rozwiązaniem tego problemu może być możliwość wykorzystania piasku odpadowego, jako pełnowartościowego surowca budowlanego [16, 25]. Częściowe zastąpienie betonu zwykłego kompozytem drobnopiękistym ze zbrojeniem rozproszonym może przyczynić się do znacznego ograniczenia dalszej

degradacji środowiska. Pozwoli to na zrównoważone wykorzystanie regionalnych surowców. Działania te przyczynią się również do stopniowego zmniejszania hałd piasku.

2. Cel i znaczenie badań doświadczalnych

Celem przeprowadzonych badań doświadczalnych było określenie wpływu dodatku włókien stalowych na wybrane właściwości mechaniczno-fizyczne kompozytu wykonanego na bazie lokalnego kruszywa odpadowego. Kolejnym zadaniem było wskazanie takiej zawartości włókien stalowych, przy której kompozyt drobnokruszywowy wykazuje najlepsze właściwości użytkowe.

Opracowanie fibrokompozytu drobnokruszywowego, którego właściwości spełniają wymagania stawiane materiałom konstrukcyjnym oraz który byłby w wybranych zastosowaniach alternatywą dla betonu zwykłego, daje możliwość zagospodarowania zalegających w rejonie Pomorza hałd. Możliwość wykorzystania piasku odpadowego jest korzystnym, przede wszystkim pod względem ekonomicznym oraz ekologicznym, rozwiązaniem problemu rekultywacji wyrobisk.

3. Wykonanie i pielęgnacja elementów próbnych

Do badań użyto mieszankę kompozytu wykonaną na bazie piasku odpadowego z Kopalni Kruszyw Naturalnych w Lepinie, cementu portlandzkiego CEM II/AV 42,5R, wody z wodociągu miejskiego, plastyfikatora BETONCRETE 406 FM, pyłów krzemionkowych oraz włókien stalowych EKOMET 50x0,8 mm, o kształcie haczykowatym i smukłości równej $\lambda = 62,5$.

Matrycę kompozytu zaprojektowano metodą doświadczalno-analityczną. Zastosowanie domieszki uplastyczniającej oraz dodatku pyłu krzemionkowego pozwoliło na uzyskanie stosunku $w/c=0,38$.

Jako zmienną składową fibrokompozytu przyjęto zawartość włókien stalowych, które dozowano co 0,5%, do 2,5% w stosunku do objętości kompozytu. Włókna w mieszance rozmieszczone były w sposób przypadkowy.

Tabela 1. Charakterystyka techniczna włókien stalowych użytych w badaniach [7]
Table 1. Technical characteristics of steel fibre and fibre-composite [7]

Cecha	Wartość
Grupa konstrukcyjna [-]	I
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	1200
Kształt włókien: odkształcone haczykowate	–
Konsystencja (Ve-Be) przy zawartości włókien 12-14 kg/m ³ [s]	4
Wpływ na wytrzymałość betonu (12-14 kg/m ³) przy CMOD*= 0,5 mm [MPa]	1,5
Wpływ na wytrzymałość betonu (12-14 kg/m ³) przy CMOD*= 3,5 mm [MPa]	1,0
*- rozwarcie naciętej szczeliny wg metody przedstawionej w PN-EN 14651	

W badaniach wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, mrozoodporności, gęstości oraz dynamicznego modułu sprężystości wykorzystano próbki sześciennie o boku 150 mm. Próbki cylindryczne o wymiarach 150x300 mm użyto przy określaniu statycznego modułu sprężystości. Badanie odporności na ścieranie wykonano na próbkach sześciennych o boku 71 mm, a badanie resztkowej (rezydualnej) wytrzymałości na zginanie na belkach o wymiarach 150x150x700 mm, których połówki, uzyskane po badaniu wytrzymałości, wykorzystano do określenia wytrzymałości na ścinanie. Skurcz określono na próbkach o wymiarach 40x40x500 mm. Wszystkie elementy próbne wykonano zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 12390-2. Każdorazowo, przed rozpoczęciem formowania próbek, określano gęstość oraz konsystencję mieszanki betonowej metodą Ve-be.

Po zaformowaniu, próbki przez 24 godziny przechowywano w formach w warunkach laboratoryjnych przy średniej dobowej temperaturze (20±2)°C i wilgotności względnej powietrza (50±5)%. Po upływie doby rozformowane próbki przez kolejne 27 dni poddawano pielęgnacji w temperaturze (20±2)°C i wilgotności względnej ok. 100%. Następnie elementy próbne pozostawiono przez 2 dni w pomieszczeniu o średniej dobowej temperaturze (20±2)°C i wilgotności względnej (50±5)%. Badania wykonywano po 30 dniach od momentu zaformowania próbek.

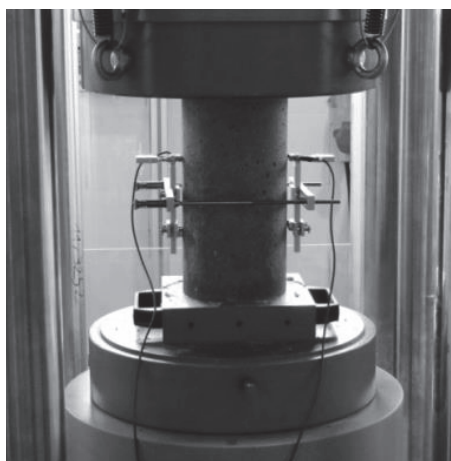
Niezbędną liczbę próbek do określenia średniej wartości statycznej badanej cechy wyznaczono na podstawie analizy statystycznej

wyników badań wstępnych za pomocą rozkładu t-Studenta, przy tolerancji $v=10\%$ i poziomie istotności $\alpha=0,05$. Liczba próbek zawierała się w przedziale od 6 przy określaniu ścieralności do 16 przy badaniu gęstości i dynamicznego modułu sprężystości, dla każdego rodzaju kompozytu. Dla fibrokompozytu o wybranej, z uwagi na najlepsze właściwości mechaniczno-fizyczne i konsystencję, zawartości włókien stalowych przeprowadzono badania każdej z cech na 20 próbkach.

4. Metodyka badań

Badanie gęstości nasypowej oraz jamistości kruszywa odpadowego przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN 1097-3. Skład ziarnowy określono według PN-EN 933-1. Badania cementu przeprowadzono po 2, 14 i 28 dniach dojrzewania zgodnie z PN-EN 196-1.

Z uwagi na brak szczegółowych wytycznych dotyczących badań kompozytów ze zbrojeniem rozproszonym, metodyka większości badań oparta została o normy dotyczące badań betonu zwykłego. Wytrzymałość na ściskanie (f_c) określono według PN-EN 12390-3, natomiast na rozciąganie przy rozłupywaniu (f_{ct}) przy wykorzystaniu metodyki przedstawionej w PN-EN 12390-6. Statyczny moduł sprężystości (E_c) wyznaczono (rysunek 2) zgodnie z PN-EN 12390-13 oraz instrukcją ITB 194/98, według której wykonano również pomiar skurczu fibrokompozytu.

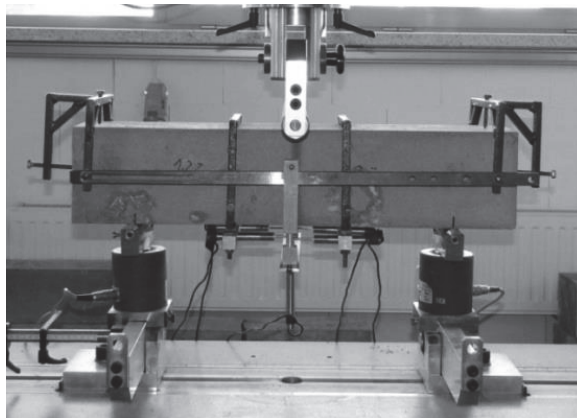


Rys. 2. Ogólny widok stanowiska do badania modułu sprężystości

Fig. 2. Overall view of the position to study the elasticity module

Gęstość pozorną (ρ) oznaczono według zaleceń PN-EN 12390-7, a dynamiczny moduł sprężystości (E_d) zdefiniowany został na podstawie analizy prędkości przebiegu fali ultradźwiękowej [23]. Badanie resztkowej wytrzymałości na zginanie (f_{Rj}) wykonano w badaniu trzy punktowego zginania wg PN-EN 14651 (rysunek 3).

Po określeniu resztkowej wytrzymałości na zginanie połówki belek wykorzystano do określenia wytrzymałości na ścinanie (τ) według normy JCI Standards for Test Methods of Fiber Reinforced Concrete.



Rys. 3. Ogólny widok stanowiska do badania wytrzymałości resztkowej
Fig. 3. Overall view of the position of the residual strength test

Mrozoodporność fibrokompozytu oznaczono zgodnie z PN-88/06250, przyjmując w badaniu 50 cykli zamrażania-odmrażania. Badanie przeprowadzono wg zasad metody zwykłej, która stwarza możliwość określenia jednocześnie wewnętrznego zniszczenia materiału, charakteryzowanego poprzez wytrzymałość na ściskanie, jak i zewnętrznego, określonego wizualnie oraz ubytkiem masy. Do określenia odporności na ścieranie (A) fibrokompozytu wykorzystano zasady przedstawione w PN-EN 13892-3.

5. Wyniki badań i ich analiza

W celu sprawdzenia czy wyniki poszczególnych serii próbek należą do jednej populacji wykorzystano rozkład t-Studenta. Do odrzucenia wyników obciążonych systematycznym błędem grubym posłużono się

testem Dixona [26]. Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała, że przyjęta liczba próbek, użytych w badaniach, była wystarczająca. Wartości wskaźników zmienności badanych właściwości, zawierające się w przedziale od 3% w przypadku badania wytrzymałości na ściskanie do 8% dla wytrzymałości na rozciąganie, wskazują na bardzo dobrą jakość zaprojektowanego kompozytu drobnokruszywowego na bazie piasków odpadowych. Użyte kruszywo odpadowe, jak wykazała analiza wyników badań, spełnia wymagania stawiane kruszywom mineralnym do betonu zwykłego (tabela 2).

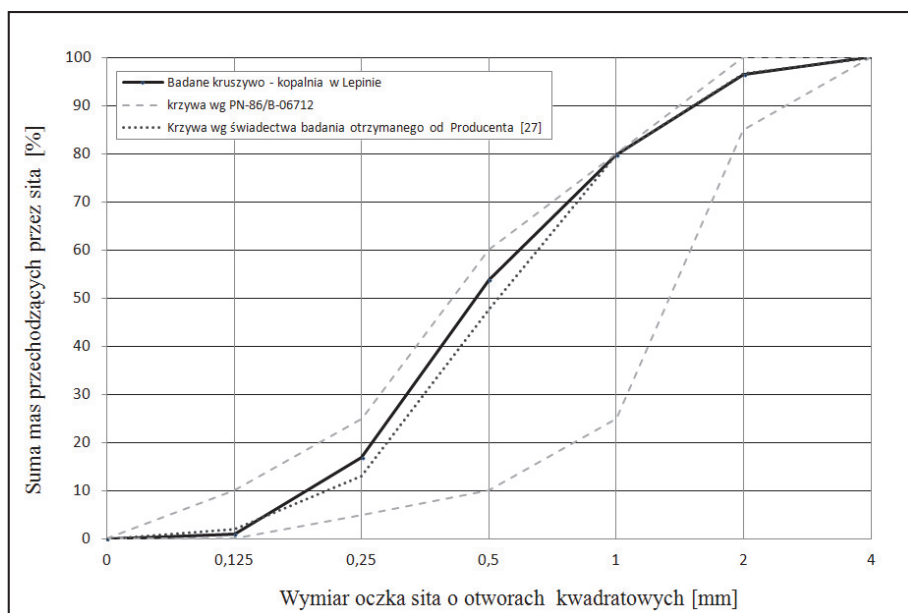
Tabela 2. Podstawowe właściwości kruszywa użytego do badań

Table 2. The basic properties of aggregates used for the test

Właściwość	Wartości uzyskane z badań	Wartości zalecane
Gęstość nasypowa w stanie luźnym, [kg/m ³]	1634	–
Gęstość nasypowa w stanie zagęszczonym, [kg/m ³]	1802	≤ 1850
Gęstość ziarn, [kg/m ³]	2632	1800–3000
Zawartość pyłów mineralnych, [%]	1,3	–
Jamistość w stanie luźnym, [%]	38	–
Jamistość w stanie zagęszczonym, [%]	32	20–28
Ziarno mediana, [mm]	0,46	0,4–0,7
Wskaźnik uziarnienia wg Kuczyńskiego	5,55	–
Zawartość ciał obcych, [%]	brak	0,5

Krzywa uziarnienia kruszywa odpadowego zawiera się w przedziale krzywych dla piasku uszlachetnionego wg PN-86/B-06712 (rysunek 4).

Użyty w badaniach cement portlandzki popiołowy o wysokiej wczesnej wytrzymałości CEM II/A-V 42,5R spełnia wymagania normy PN-EN 197-1. Uzyskane wytrzymałości na ściskanie cementu charakteryzowały się małym wskaźnikiem zmienności oraz dużym współczynnikiem jednorodności, co wskazuje na wysoką jakość użytego materiału.



Rys. 4. Krzywa uziarnienia kruszywa użytego w badaniach

Fig. 4. Aggregate grading curve used in the study

Przeprowadzone badania fibrokompozytu wykazały korzystny wpływ dodatku włókien stalowych na jego właściwości mechaniczno-fizyczne (tabela 3).

Na rysunku 5 przedstawiono wybrane wyniki badań.

Tabela 3. Właściwości fibrokompozytu przy różnej zawartości włókien stalowych

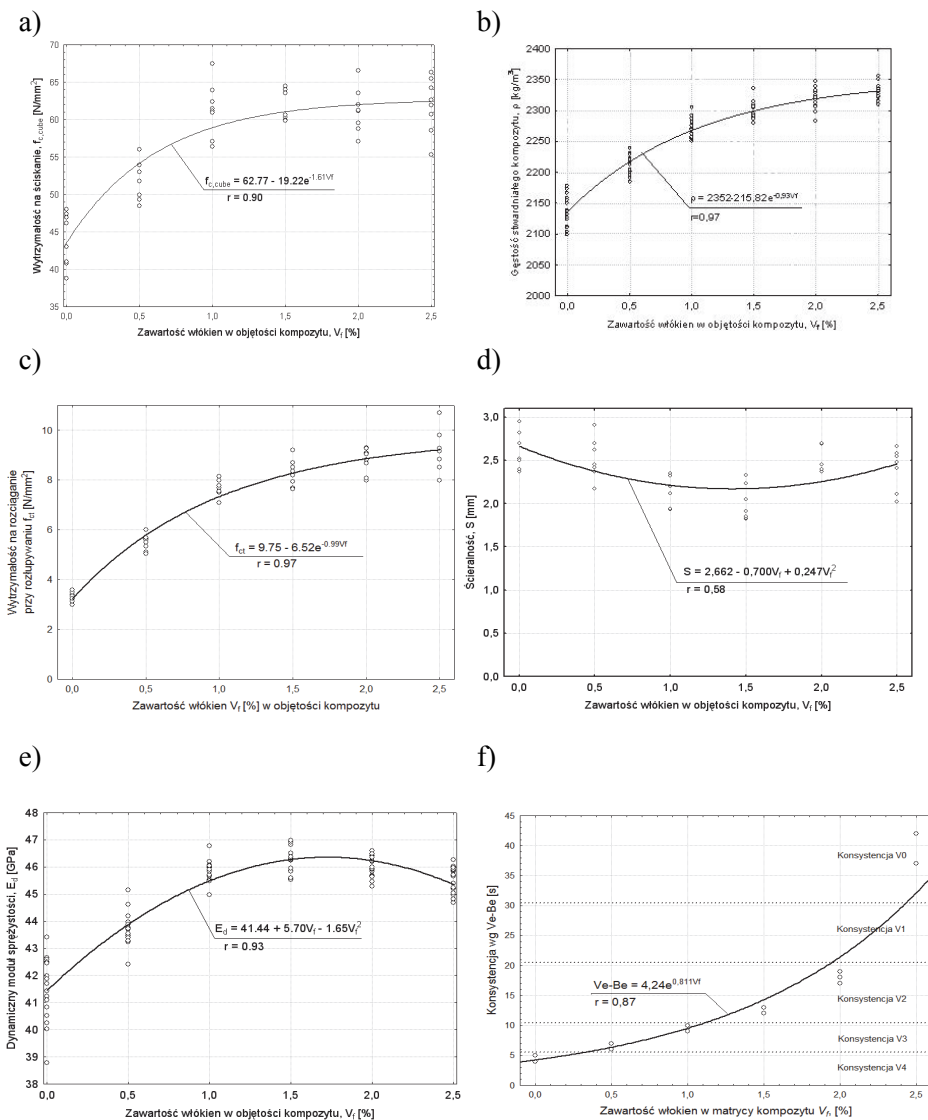
Table 3. The properties of fine aggregate composite with a different content of the steel fibers

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] $f_c = 63 - 19e^{-1,61V_f}$ $r = 0,90$	44	51,8	61,4	61,6	61,3	61,9

Tabela 3. cd.

Table 3. cont.

Właściwość / postać funkcji, współczynnik korelacji	Zawartość włókien w kompozycie [%]					
	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
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
Statyczny moduł sprężystości [GPa] $E_s = 32,7 + 2,35V_f - 0,76V_f^2$, $r = 0,88$	32,9	33,3	34,5	34,7	34,0	33,9
Skurcz [mm/m] $\varepsilon_s = 0,89(1 - e^{-0,2t^{0,6}}) - 0,048V_f$, $r = 0,93$	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



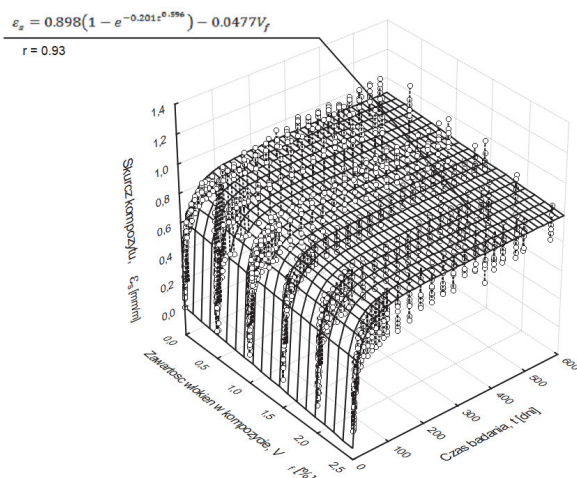
Rys. 5. Zależności wybranych cech kompozytu drobnokruszywowego od zawartości włókien stalowych

Fig. 5. Depending on the specific characteristics of fine aggregate composite of content of steel fibres

Przeprowadzona analiza uzyskanych wyników badań wykazała, że wraz ze wzrostem ilości włókien w kompozycie następuje ciągły przyrost wartości wytrzymałości na ściskanie (rysunek 5a) i rozciąganie (rysunek 5c). Wzrost ten nie jest jednak proporcjonalny do objętości użytego zbrojenia rozproszonego. Analiza wyników badań wykazała, że zawartość włókien w kompozycie powyżej 1,5% dla ściskania i 2% dla rozciągania przy rozłupywaniu nie powoduje już znaczącego przyrostu wartości tych wytrzymałości. Ponadto wraz ze wzrostem ilości włókien w kompozycie znacznie pogarsza się urabialność mieszanki. Zbyt duża ilość włókien stalowych powoduje także pogorszenie jego odporności na ścieranie (rysunek 5d). Badania dowodzą, że fibrokompozyt na bazie piasków odpadowych wykazuje najmniejszą ścieralność przy zawartości włókien stalowych w przedziale od 1% do 1,5%, przy czym maksimum osiąga przy zawartości włókien równej 1,3%. Pogorszenie tej właściwości ma związek ze zwiększającą się wraz ze wzrostem zawartości włókien porowatością matrycy, wynikającą ze zdolności włókien do jej napowietrzania [2]. Wpływa to również na gęstość pozorną fibrokompozytu (rysunek 5b). Wzrasta ona wraz z dodatkiem włókien stalowych, jednak po przekroczeniu objętości włókien w mieszanke kompozytu równej 1,5%, obserwuje się bardzo powolny wzrost jego gęstości.

Z analizy krzywej regresji dynamicznego modułu sprężystości (rysunek 5e) wynika, że korzystny wpływ dodatku włókien stalowych ma miejsce przy ich zawartości w kompozycie drobnokruszywowym do 1,7%. Po przekroczeniu tej wartości następuje znaczne napowietrzenie mieszanki spowodowane zawartością włókien i wartość dynamicznego modułu sprężystości ulega pogorszeniu.

Ponadto stwierdzono, że skurcz kompozytu drobnokruszywowego o zawartości włókien od 0,5% do 2,5% (rysunek 6) określony w warunkach stałej wilgotności względnej powietrza (50 ± 5)% i temperaturze (20 ± 2)°C jest prawie dwukrotnie większy niż skurcz betonu zwykłego [23]. Stabilizacja odkształceń skurczowych fibrokompozytu nastąpiła po 600 dniach od chwili rozpoczęcia badań. Większy w porównaniu do betonu zwykłego skurcz fibrokompozytu wynika z zastosowania, jako wypełniacza, kruszywa drobnego [10,23].



Rys. 6. Zależność skurczu kompozytu drobnokruszywowego od zawartości włókien stalowych

Fig. 6. Shrinkage dependence of fine aggregate composite of content of steel fibres

Przeprowadzone badania dowodzą, że zwiększenie ilości zbrojenia rozproszonego w kompozycie ponad wartość 1,5% może mieć negatywny wpływ na niektóre jego właściwości (dynamiczny moduł sprężystości, ścieralność, konsystencja). Właściwym jest więc określenie takiej zawartości włókien stalowych w kompozycie, która pozwoli na uzyskanie materiału o właściwościach mechaniczno-fizycznych odpowiadających właściwościom betonu zwykłego, przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej konsystencji mieszanki (por. rysunek 5f).

Analizując krzywe regresji (por. tabela 3) wyznaczono taką zawartość włókien stalowych w kompozycie drobnokruszywowym, przy której spełnione są wymagania stawiane betonowi zwykłemu.

W związku z tym, iż wartości wytrzymałości na ściskanie oraz rozciąganie przy rozłupywaniu utrzymują ciągłą tendencję wzrostową w zakresie przyjętych procentowych zawartości włókien stalowych, do wyznaczenia poszukiwanej wielkości posłużono się funkcjami regresji cech, które ulegały pogorszeniu wraz ze wzrostem ilości włókien. Takimi cechami są: ścieralność, dynamiczny moduł sprężystości i konsystencja. Wyznaczono więc maksymalną zawartość dodatku włókien stalowych (ekstrema funkcji regresji przedstawionych w tabeli 3), po przekroczeniu

których następował spadek wartości rozważanych cech. Ustalono, że pod względem najkorzystniejszych właściwości oraz ekonomicznym, maksymalna zawartość włókien stalowych w drobnokruszywowym kompozycie na bazie piasków odpadowych wynosi 1,2%. Dla fibrokompozytu o zawartości włókien 1,2% wykonano serię kolejnych badań (tabela 4).

Tabela 4. Właściwości kompozytu drobnokruszywowego przy zawartości włókien stalowych 1,2%.

Table 4. Features of fine aggregate composite with a 1,2% content of the steel fibers

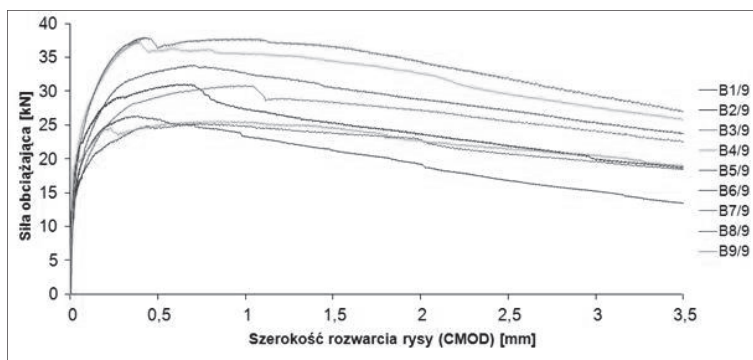
Parametry analizy statystycznej	Badana cecha					
	f_c [MPa]	f_{ct} [MPa]	E_c [GPa]	$f_c^{50cykli}$ [MPa]	τ [MPa]	A [cm ³ /50 cm ²]
Wartość średnia	67 (20÷58)	7,3 (1,6÷4,1)	36,7 (27÷37)	65,9	12,9	9,0 (≤12,2)
Wartość minimalna	63,1	5,9	32,7	56,1	10,9	7,1
Odchylenie standardowe	2,2	0,6	2,8	4,5	1,1	0,6
Wskaźnik zmienności [%]	3	8	8	7	8	7
Współczynnik jednorodności [-]	0,94	0,81	0,90	0,85	0,85	0,84
Przedział ufności	65,9 68,0	7,0 7,6	35,3 38,1	63,9 67,8	12,3 13,5	8,7 9,3
W nawiasach podano właściwości betonu zwykłego wg: PN-EN 1992-1-1:2008 oraz PN-83/B06256. Oznaczenia cech wyjaśniono w tekście (por. pkt. 4).						

Przeprowadzone badania (tabela 4), wykazały wzrost wytrzymałości na ściskanie fibrokompozytu o zawartości włókien 1,2% o ok. 50% oraz wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu o ok. 120% w stosunku do kompozytu bez włókien.

Wyniki badania odporności na działanie mrozu pozwalają określić stopień mrozoodporności kompozytu drobnokruszywowego na poziomie F50. Próbkę nie wykazywały pęknięć, a średni ubytek masy próbek wyniósł 0,22%. Nie nastąpił również spadek wytrzymałości na ściskanie w stosunku do próbek niezamrażanych. Analizy dowodzą, że przy

zawartości włókien w ilości 1,2% badany fibrokompozyt wykazuje również większą, w porównaniu do betonu zwykłego, odporność na ścieranie, spełniając wymagania normy PN-83/B-06256 „Beton odporny na ścieranie”.

Wyniki badań resztkowej wytrzymałości na zginanie wyraźnie wskazują na ciągły charakter materiału. Ponieważ włókna w dużym stopniu hamują powstawanie i rozwój zarysowań w betonie ich dodatek pozwala uzyskać duży wzrost wytrzymałości na rozciąganie. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego powoduje, że kompozyt nie ulega nagłemu zniszczeniu, jak ma to miejsce w przypadku betonu zwykłego. Wykresy zależności siły obciążającej od szerokości rozwarcia rysy CMOD przedstawiono na rysunku 7, na którym B1/9 do B9/9 oznaczają numery badanych belek. Analizując kształt wykresu pokazanego na rysunku 7 można stwierdzić, że belki o zawartości włókien 1,2% wykazują cechę *pcs* [22], tj. powolny spadek siły niszczącej wraz ze wzrostem wartości CMOD po pojawieniu się rysy.



Rys. 7. Zależność siły obciążającej od szerokości rozwarcia rysy

Fig. 7. Depending of the loading force of CMOD

Po pojawieniu się pierwszej rysy obserwowano spadek siły niszczącej, a następnie jej wzrost. Można zauważyć, że po osiągnięciu maksymalnej siły rozciągającej i powstaniu rys badana próbka zachowuje zdolność przenoszenia obciążenia rozciągającego. Zdolność ta zmniejsza się wraz ze wzrostem szerokości rozwarcia rys. Średnie wartości resztkowej wytrzymałości przy zginaniu i towarzyszące im szerokości rozwarcia rysy przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Średnie wartości wytrzymałości resztkowej w zależności od szerokości rozwarcia rysy

Table 5. Average values of residual strength depending on the width of the opening cracks

Szerokość rozwarcia rysy CMOD [mm]	0,5	1,5	2,5	3,5	f_{R3k} / f_{R1k}	Klasyfikacja według Model Code 2010 [22]
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	f_{R1k}	f_{R2k}	f_{R3k}	f_{R4k}	0,8	8b
	8,38	8,18	7,36	6,37		
Wytrzymałości resztkowe $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ 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.						

Klasyfikacja 8b wg [22] definiuje badany materiał, jako fibrokompozyt o bardzo wysokiej wartości f_{R1} (zakres od 1–8), litera „b” oznacza, że badany fibrokompozyt wykonany na bazie piasków odpadowych charakteryzuje cechą *pcs*, którą wyznaczono z zależności f_{R3}/f_{R1} (wg [22] „a” i „b” – *pcs*, „d” i „e” – *psh*). Wartości wytrzymałości podane w tabeli mogą posłużyć do projektowania elementów konstrukcyjnych na zginanie oraz ścinanie, wykonanych z fibrokompozytu na bazie piasków odpadowych.

Dodatek włókien stalowych nieznacznie, co potwierdza literatura [11], wpływa jedynie na przyrost statycznego modułu sprężystości, jego wartość wzrasta o ok. 2 MPa w stosunku do kompozytu bez włókien. Brak znaczącego wpływu dodatku włókien na tę cechę może być spowodowany dobrą wytrzymałością na ściskanie betonu, przypadkowym ułożeniem włókien stalowych oraz stosunkowo małą powierzchnią włókien w porównaniu z przekrojem betonowym.

W celu dalszej identyfikacji właściwości fibrokompozytu wykonanego na bazie piasków odpadowych, jako materiału konstrukcyjnego, prowadzone są badania właściwości reologicznych: pełzanie. Zaplanowano także wykonanie badań pełnowymiarowych elementów konstrukcyjnych, płyty i belki (w trakcie badań).

6. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań dowodzą, że właściwości mechaniczno-fizyczne drobnokruszywowego kompozytu wykonanego na bazie piasków odpadowych ze zbrojeniem rozproszonym w ilości 1,2% odpowiadają wymaganiom stawianym materiałom konstrukcyjnym. Proponowany fibrokompozyt dzięki swoim właściwościom może, w niektórych przypadkach, stanowić alternatywę dla betonu zwykłego. Przeprowadzone studia literaturowe i otrzymane wyniki badań pozwalają stwierdzić, że istnieje możliwość użycia tego materiału do wykonywania elementów konstrukcyjnych takich, jak: płyty stropowe, belki, posadzki przemysłowe czy powłoki, a tym samym stwarza perspektywę na wykorzystanie kruszywa odpadowego.

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.

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.

Literatura

1. **Altun F., Haktanir T., Ari K.:** *Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams*. Construction and Building Materials, 21, 654–661 (2007).
2. **Aruntas H.Y. et al.:** *Effect of super plasticizer and curing conditions on properties of concrete with and without fiber*. Materials Letters, 62, 3441–3444 (2008).
3. **Błaszczyński T., Przybylska-Falek M.:** *Fibrobeton jako materiał konstrukcyjny*, Izolacje, 11–12, 44–50 (2012).
4. **Błaszczyński T., Przybylska-Falek M.:** *Durability of SFRC material*, 10th International Conference on Durability of Composite Systems, DURACOSYS 2012, Brussels, 17–20 September 2012.
5. **Bonaszewska-Wyszomirska T.:** *Beton (nie)zwykły*. Inżynier Budownictwa, 10, 79–82 (2007).
6. **Brandt A.M.:** *Cement based composites: materials, mechanical properties and performance*, Taylor&Francis, 2009.

7. **Deklaracja własności użytkowych** nr 2/2013/E
8. **Domski J.:** *Long-term Study on Fibre Reinforced Fine Aggregate Concrete Beams Based on Waste Sand*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection) 17, 2015 – w druku.
9. **Domski J.:** *Ugięcie belek fibropiaskobetonowych wykonanych na bazie piasku odpadowego*. Przegląd Budowlany, 3, 32–37 (2012).
10. **Dondelewski H., Marcinkowski S.:** *Badanie sprężystości, skurczu i pęcznienia betonów drobnokruszywowych*. Archiwum Inżynierii Lądowej, PWN, Warszawa 1980.
11. **Glinicki M. A.:** *Beton ze zbrojeniem strukturalnym*. XXV Ogólnopolskie warsztaty pracy projektanta konstrukcji, Szczyrk 2010.
12. **Głodkowska W., Kobaka J.:** *Zastosowanie piasków odpadowych do wykonania posadzek przemysłowych*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection) 11, 193–206 (2009).
13. **Głodkowska W., Kobaka J.:** *Statystyczny model opisu rozkładu włókien w drobnokruszywowym kompozycie mineralnym*. Materiały Budowlane, 9, 6–8 (2011).
14. **Głodkowska W., Kobaka J.:** *The Model of Brittle Matrix Composites for Distribution of Steel Fibers*. Journal of Civil Engineering and Management. 145–150 (2012).
15. **Głodkowska W., Kobaka J.:** *Nieniszcząca ocena wybranych cech drobnokruszywowego betonu zbrojonego włóknami stalowymi. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej”*. MATDUB. Wyd. Politechniki Krakowskiej, 108–116 (2011).
16. **Głodkowska W., Kobaka J., Laskowska-Bury J.:** *Wpływ włókien stalowych na kształtowanie właściwości kompozytu drobnokruszywowego*. Materiały Budowlane, 10, 28–30 (2013).
17. **Głodkowska W., Kobaka J.:** *Modelling of properties and distribution of steel fibres with in a fine aggregate concrete*. Construction and Building Materials. 44, 646–653 (2013).
18. **Jamroży Z.:** *Drutobeton*. Politechnika Krakowska, Kraków 1985
19. **Jasiczak J., Mikołajczak P.:** *Technologia betonu modyfikowanego domieszkami i dodatkami*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
20. **Kondratowicz W.:** *Jednorodność udziału piasku w krajowych kruszywach naturalnych przeznaczonych do betonu. Stan i znaczenie*. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1978.
21. **Mehmet Özcan D., Bayraktar A., Sahin A., Haktanir T., Türker T.:** *Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior*. Construction and Building Materials, 23, 1064–1077 (2009).

22. **Model Code 2010**, first complete draft, bulletin 55, 1.
23. **Neville A.:** *Właściwości betonu*. Polski Cement, Kraków 2000.
24. **Parra-Montesinos G.:** *Shear Streinght of Beams with Deformed Steel Fibres*. Concrete International, 11, 57–67 (2006).
25. **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.
26. **Strzałkowski A., Śliżyński A.:** *Matematyczne metody opracowania wyników pomiarów*. Wyd. 3, PWN, Warszawa 1978.
27. **Świadectwo badania kruszywa F-08-P-14/25**. Laboratorium Budowlane BETOTEST POLSKA sp. z o.o.

Waste Sands as a Valuable Aggregates to Produce Fibre-composites

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 physical-mechanical properties of fibrous composites made on the basis of waste sands with different amounts of steel fibers. Steel fiber content is from 0 to 2.5% relative to the volume of the composite. The fibers in the mixture were arranged at random. Based on these results proposed composite of the best properties, which meets the requirements for construction materials. It was specified the exact composition of the material of this composite. For the selected composite steel fibre content of 1.2% of tests taken basic properties: compressive strength, tensile strength, residual strength, modulus of elasticity, shear strength, resistance to frost, resistance to abrasion. Tests were performed on samples having a side of 150 cubic mm and cylindrical with the dimensions 150x300 mm.

Carried out research, literature studies and analysis of the obtained results allow to conclude that this material can be used for the performance of structural elements and thus creates a perspective on the use of waste aggregates.

In view of the above, the large resources of small aggregates present in the form of waste could become a wealth for the region of Pomerania. Sands

waste could become a basic component of materials intended for the manufacture of certain structural elements.

The use of waste to produce aggregate composites constructional on a wider scale, and partial replacement of concrete simple-it such material can significantly reduce further degradation of the environment.

Słowa kluczowe:

ekologia, piaski odpadowe, fibrokompozyt, włókna stalowe, właściwości

Keywords:

ecology, waste sands, fiber composite, steel fibers, properties