

prof. dr hab. inż. Wiesława Głodkowska¹⁾

ORCID: 0000-0003-3719-5350

dr inż. Marek Lehmann^{1*)}

ORCID: 0000-0002-1314-3014

dr inż. Joanna Laskowska-Bury¹⁾

ORCID: 0000-0002-0618-1370

Wpływ wysokiej temperatury na wybrane cechy wytrzymałościowe drobnokruszywowego fibrokompozytu

The influence of high temperatures on selected strength properties of fine-aggregate fiber composite

DOI: 10.15199/33.2024.01.01

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę wpływu wysokiej temperatury na wybrane właściwości mechaniczne drobnokruszywowego mineralnego kompozytu ze stalowym zbrojeniem rozproszonym. Zaprojektowany fibrokompozyt charakteryzuje się właściwościami zbliżonymi bądź lepszymi niż beton zwykły i może być z powodzeniem wykorzystany do wykonywania nośnych elementów żelbetonowych. Zmianę wytrzymałości na ściskanie i wytrzymałości resztkowych na rozciąganie przy zginaniu fibrokompozytu określono w temperaturze pokojowej i wyznaczonej wg krzywej pożarowej imitującej narastanie temperatury w trakcie rzeczywistego pożaru. Program badawczy obejmował także ocenę ubytku masy próbek fibrokompozytu wygrzewanych w piecu. Badania wykazały, że dodatek włókien stalowych do mieszanki kompozytu w ilości 1,2% przyczynia się do zachowania jego właściwości mechanicznych po wystawieniu na działanie temperatury do 550°C z powodu pożaru, a tym samym jest w stanie poprawić jego stabilność strukturalną w wysokiej temperaturze. Włókna stalowe znacznie poprawiają ognioodporność drobnokruszywowego kompozytu.

Słowa kluczowe: kompozyt drobnokruszywowo; właściwości mechaniczne; włókno stalowe; wysoka temperatura.

Abstract. The paper presents an analysis of the influence of high temperature on selected mechanical properties of finely aggregated mineral composite with dispersed steel reinforcement. The designed fibrecomposite has properties similar to or better than ordinary concrete and can be successfully used to make load-bearing reinforced concrete elements. The change in compressive strength and residual tensile strength during bending of the fibrecomposite was determined at room temperatures and determined according to the fire curve imitating the temperature build-up during a real fire. The research program also included the assessment of the weight loss of fibrecomposite samples annealed in the furnace. Studies have shown that the addition of steel fibers to the composite mix in the amount of 1.2% contributes to the preservation of its mechanical properties when exposed to temperatures up to 550°C due to fire, and thus is able to improve its structural stability at high temperature. Steel fibers significantly improve the fire-retardant properties of the fine-aggregate composite.

Keywords: fine-aggregate composite; mechanical properties; steel fibers; high temperature.

Jedną z najważniejszych zalet betonu, jako materiału budowlanego, w porównaniu z innymi materiałami konstrukcyjnymi, takimi jak stal lub drewno, jest jego zachowanie pod wpływem ognia i wysokiej temperatury. Czynniki destrukcyjne oddziałujące na konstrukcje betonowe, tj. wpływ obciążeń statycznych i dynamicznych, działanie wody gruntowej oraz warunki atmosferyczne zostały dobrze rozpoznane i można je uwzględnić przy projektowaniu konstrukcji. Do częściowo zbadanych czynników zaliczyć można wpływ tem-

peratury występującej podczas pożaru na parametry wytrzymałościowe materiałów budowlanych [1]. Wpływ podwyższonej i wysokiej temperatury na pracę konstrukcji betonowych przejawia się w zmianie właściwości fizycznych i wytrzymałościowych nagrzanego materiału (betonu i stali) oraz wystąpieniu w nim odkształceń i naprężeń termicznych [1, 2]. To powoduje, że problem bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji jest jednym z sześcioro podstawowych wymagań, jakie muszą spełniać budowle w świetle obowiązujących przepisów. Charakterystycznym zjawiskiem działania wysokiej temperatury na konstrukcje betonowe jest eksplozyjne odpryskiwanie betonu (ang. *spalling*) [2 – 5], co zagraża ży-

ciu ludzi w czasie pożaru. Przyczyną tego jest wystąpienie wysokiego ciśnienia pary wodnej w porach betonu oraz naprężeń termicznych.

W latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku odkryto pozytywny wpływ dodatku zbrojenia rozproszonego w postaci włókien na ograniczenie zjawiska spallingu [6, 7]. Badanie fibrokompozytów poddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury jest nadal aktualnym tematem budownictwa betonowego. Analizy dotyczą przede wszystkim włókien stalowych, a także w połączeniu z polipropylenowymi (zbrojenie hybrydowe), natomiast w mniejszym stopniu zastosowania tylko włókien polipropylenowych [8 – 12]. W wielu ośrodkach naukowo-badawczych prowadzone są

¹⁾ Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

^{*)} Adres do korespondencji: marek.lehmann@tu.koszalin.pl

prace na temat wpływu ognia i wysokiej temperatury na różne właściwości fibrokompozytów, np. Deshpande z zespołem [6] stwierdził, że najkorzystniejsza zawartość włókien, to $1 \div 2\%$ w stosunku do masy kompozytu. Taki też udział włókien stalowych zastosowaliśmy w naszych badaniach. Deshpande badał także wpływ wysokiej temperatury ($100 \div 800^\circ\text{C}$) na zakotwienie konwencjonalnego zbrojenia w fibrobetonie i zmianę jego właściwości mechanicznych [7]. Wykazał m.in., że naprężenia przyczepności zmniejszają się wraz ze wzrostem temperatury. Ruano z zespołem [13] zbadali wpływ wysokiej temperatury na mechanizm wyciągania włókien stalowych z matrycy betonu wysokiej wytrzymałości oraz wpływ na wytrzymałość resztkową. Stwierdzono, że spadek tej wytrzymałości wynika przede wszystkim z osłabienia wytrzymałości włókien stalowych oraz sił tarcia w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury. Zaobserwowano również zmniejszenie wytrzymałości resztkowej i wytrzymałości na rozciąganie materiału. Temperatura ma też wpływ na kształtowanie wytrzymałości na ściskanie i statyczny moduł sprężystości fibrobetonu [14]. Zainteresowania badaczy dotyczyły także wpływu wysokiej temperatury ($400, 600$ i 800°C) na zachowanie zarysowanych elementów fibrobetonowych poddanych zginaniu [4].

Analiza prac badawczych wykazała, że na ogół występuje pogorszenie badanych cech fibrobetonu w temperaturze do 100°C , natomiast od 100°C do 500°C następuje stopniowy wzrost wytrzymałości fibrobetonu, a w temperaturze 500°C jest ona nawet większa od uzyskanej na próbkach nieogrzewanych. Na ogół po przekroczeniu 500°C następuje pogorszenie badanych cech. Zastosowanie włókien, jako zbrojenia rozproszonego, przyczynia się więc do poprawienia odporności fibrobetonu w podwyższonej temperaturze, zapobiega odpryskom, ogranicza różnice wymiarów, a także utrzymuje spójność betonu. Ten korzystny wpływ włókien na właściwości i sposób zniszczenia fibrobetonów skłonił nas do przeanalizowania wpływu wysokiej temperatury na wybrane właściwości drobnokruszywowego fibrokompozytu, w którym zastosowano

włókna stalowe i kruszywo będące odpadem poprodukcyjnym. Dotychczasowe badania wykazały, że opracowany fibrokompozyt, zastrzeżony patentem nr 239641, z powodzeniem może być stosowany do wykonywania posadzek przemysłowych, płyt oraz drobnowymiarowych elementów konstrukcyjnych poddanych obciążeniom doraźnym i długotrwałym, pracującym w umiarkowanych warunkach ciepłno-wilgotnościowych [15 – 17]. Nierozpoznane jest jednak dotąd zachowanie takiego fibrokompozytu w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury zbliżonej do temperatury występującej w środowisku pożaru, co stanowi cel prezentowanych badań. Jest to część większego eksperymentu. Podjęta tematyka jest zgodna z aktualnymi tendencjami badawczymi związanymi z poszukiwaniem materiałów o coraz lepszych właściwościach, produkowanych z zastosowaniem surowców odpadowych. Tym samym wpisuje się w ogólnoswiatową tendencję Zrównoważonego Rozwoju Środowiska.

Materiały użyte w badaniach

Przedmiotem badań jest drobnokruszowy kompozyt cementowy z dodatkiem włókien stalowych w ilości $1,2\%$ (94 kg/m^3) w stosunku do objętości kompozytu. Do wykonania elementów próbnych zastosowano piasek pochodzenia polodowcowego pozyskany po procesie hydroklastyfikacji, o granulacji do 4 mm w ilości 1570 kg/m^3 ,

cement portlandzki CEM II/A-V 42,5R (420 kg/m^3), pył krzemionkowy (21 kg/m^3), superplastyfikator ($16,8 \text{ kg/m}^3$) oraz wodę z wodociągu miejskiego (160 kg/m^3). Zbrojenie rozproszone stanowiły haczykowate włókna stalowe o smukłości $\lambda = l/d = 62,5$ ($l = 50 \text{ mm}$, $d = 0,8 \text{ mm}$). Zawartość włókien została ustalona na podstawie wyników wcześniejszych badań kompozytów i wynosiła $0 - 2,5\%$ [16]. Zaprojektowany fibrokompozyt charakteryzuje się właściwościami zbliżonymi bądź lepszymi niż beton zwykły (tabela 1) i może być z powodzeniem wykorzystany do wykonywania elementów żelbetowych wzmocnionych włóknami stalowymi, pracujących w warunkach zginania i ścinania [15, 17]. Procedurę dozowania składników, warunki wykonania próbek oraz ich pielęgnacji omówiono w [15 ÷ 17].

Elementy próbne i metoda badań

Celem badań była ocena wpływu wysokiej temperatury na podstawowe właściwości (wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość resztkową na rozciąganie przy zginaniu) drobnokruszywowego kompozytu mineralnego zbrojonego włóknami stalowymi. Elementy próbne (próbki sześciennie o boku 150 mm oraz belki o wymiarach $150 \times 150 \times 550 \text{ mm}$) wygrzewano w temperaturze $20, 200, 300, 400, 500, 550, 600$ i 800°C z dokładnością do $\pm 1^\circ\text{C}$, w elektrycznym piecu średniotemperaturowym. Proces

Tabela 1. Właściwości mechaniczno-fizyczne fibrokompozytu i betonu zwykłego

Table 1. Mechano-physical properties of the analysed fiber composite and ordinary concrete

Właściwość	Materiał	
	fibrokompozyt (współczynnik zmienności)	beton zwykły
Gęstość pozorna w stanie suchym ρ [kg/m^3]:	2290 ($v = 0,7\%$)	2000 – 2600
Wytrzymałość na ściskanie $f_{c,cyl}$ [MPa]	64,4 ($v = 6\%$)	12 – 50
Wytrzymałość na ściskanie $f_{c,cube}$ [MPa]	67,6 ($v = 3\%$)	15 – 60
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu $f_{t,sp}$ [MPa]	7,3 ($v = 8\%$)	3,0 – 3,7
Statyczny moduł sprężystości E_{cm} [GPa]	36,7 ($v = 7\%$)	29 – 37
Dynamiczny moduł sprężystości E_d [GPa]	45,9 ($v = 1\%$)	$E_{cm} = 0,83 E_d$
Pełzanie ε_p [%]	0,26 ($v = 4\%$)	0,1 – 1,0
Skurcz ε_{cs} [%]	0,88 ($v = 4\%$)	0,2 – 0,6
Odporność na ścieranie A [$\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$]	9,0 ($v = 7\%$)	1,5 – 22
Wytrzymałość resztkowa f_R [MPa]	$f_{R1} = 9,3$ ($v = 13\%$) $f_{R2} = 8,8$ ($v = 15\%$) $f_{R3} = 7,9$ ($v = 15\%$) $f_{R4} = 7,0$ ($v = 17\%$)	nie dotyczy

wygrzewania próbek przebiegał wg tzw. krzywej pożarowej imitującej narastanie temperatury w trakcie rzeczywistego pożaru [18]. Procedura wygrzewania próbek była zgodna z wytycznymi RILEM [19]. Wzrost temperatury w piecu, do temperatury założonej w projekcie badań, następował z prędkością 1°C/min. Temperaturę końcową (docelową) wygrzewania utrzymywano przez 60 min, aby elementy próbne uzyskały wymaganą temperaturę w całej masie. Proces chłodzenia próbek z prędkością 1°C/min rozpoczynano po upływie 60 min wygrzewania. Próbki po schłodzeniu do temperatury pokojowej, co symuluje warunki po pożarze, ważono w celu określenia ubytku masy, analizowano makroskopowo zmianę ich powierzchni oraz poddawano badaniom wytrzymałości. Część elementów próbnych przed wygrzewaniem suszono w suszarce laboratoryjnej w temperaturze 60°C przez 24 h. Następnie próbki po schłodzeniu do temperatury pokojowej poddano badaniu.

Wpływ wysokiej temperatury na właściwości drobnokruszywowego fibrokompozytu określono na podstawie badania wytrzymałości na ściskanie wyznaczonej na kostkach (po 6 szt.) wg PN-EN 12390-3 [20] oraz wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu na belkach (po 6 szt.) zgodnie z PN-EN 14651 [21], przyjmując je jako podstawowe cechy używane przy projektowaniu przekrojów elementów fibrobetonowych. Procedurę badania wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono przy użyciu uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej. Próbki obciążano w sposób ciągły do zniszczenia z prędkością 0,5 MPa/s.

Wyznaczona w badaniu wytrzymałości resztkowej zależność: „Siła – CMOD” służyła do określenia wytrzymałości $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ i $f_{R,4}$. Belki umieszczono na podporach przegubowych (fotografia 1) w rozstawie 500 mm i obciążano siłą skupioną w połowie rozpiętości elementu wg [21], w sposób ciągły ze zmienną prędkością. Przyrost prędkości obciążenia belek ustalono w zależności od szerokości rozwarcia rysy CMOD. Początkowo, do szerokości CMOD – 0,1 mm, obciążenie przykładano z prędkością 0,5 mm/min. Po prze-

kroczeniu tej wartości prędkość przykładania obciążenia wynosiła 0,2 mm/min. Koniec badania następował, gdy szerokość rozwarcia rysy CMOD osiągała wartość większą niż 3,5 mm. Szerokość rozwarcia rysy i ugięcie belki monitorowano za pomocą systemu akwizycji danych SAD256, wykorzystując indukcyjne czujniki przemieszczeń (dwa ze sztywnymi i dwa z przegubowymi końcówkami) oraz czujnik do pomiaru ugięcia. Dokładność pomiaru czujników wynosiła 1 mV/V. Graniczna wartość ugięcia belek została ustalona zgodnie z normą PN-EN 14651 [21], tak aby można było osiągnąć wszystkie wartości CMOD. Następnie określono wytrzymałość resztkową ($f_{R,j}$) w przypadku odpowiedniej

wartości CMOD, j , gdzie $j = 1, 2, 3, 4$. Wytrzymałości $f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$, $f_{R,4}$, oznaczają wartość naprężeń rozciągających w przekroju przy danej szerokości rozwarcia rysy CMOD, równej odpowiednio 0,5, 1,5, 2,5 i 3,5 mm.

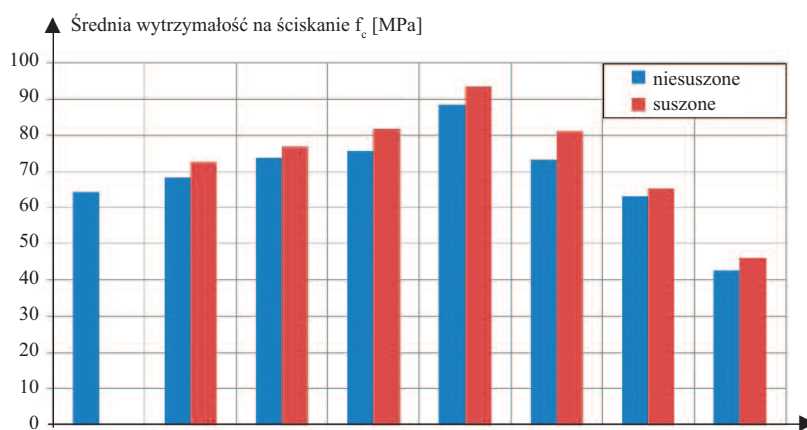
Wyniki badań i ich analiza

Zmianę wytrzymałości na ściskanie drobnokruszywowego fibrokompozytu w funkcji temperatury wygrzewania przedstawiono na rysunku 1. Zaobserwowano zwiększenie wytrzymałości fibrokompozytu do temperatury 500°C, zarówno w przypadku próbek poddanych suszeniu, jak i nieobjętych tym cyklem, a następnie następował spadek wartości tej cechy. Stwierdzono, że kompozyt z dodatkiem włókien stalowych w ilości 1,2% w stosunku do jego objętości zachowuje właściwości mechaniczne po ekspozycji na temperaturę 500°C, a tym samym wykazuje się wysokotemperaturową stabilnością strukturalną. Zastosowanie włókien stalowych zdecydowanie poprawia ognioodporność fibrokompozytu. Zwiększenie wytrzymałości na ściskanie wraz ze wzrostem temperatury, w odniesieniu do wytrzymałości 64,4 MPa po trzydziestu dniach dojrzewania fibrokompozytu, wynosiło odpowiednio 6, 14, 17, 37% (rysunek 1). W przypadku próbek poddanych



Fot. 1. Stanowisko do badania wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu

Photo 1. The stand for testing residual bending tensile strength



T [°C]	20	200	300	400	500	550	600	800
s [MPa]	4,1	3,42 2,91	2,93 3,01	4,27 6,39	1,67 1,68	3,14 3,62	4,88 7,94	7,28 8,82
v [%]	6	5 4	4 4	8 6	2 2	4 4	8 12	17 19

Rys. 1. Wytrzymałość na ściskanie drobnokruszywowego fibrokompozytu w funkcji temperatury wygrzewania

Fig. 1. Compressive strength of fine-aggregate fiber composite as a function of heating temperature

wstępnemu suszeniu odnotowano większe przyrosty wytrzymałości na ściskanie, a mianowicie o 12, 20, 27 i 45%. W temperaturze większej od 550°C obserwowano już zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie, ale tylko w porównaniu z wytrzymałością odpowiadającą temperaturze 500°C. Wytrzymałość ta w porównaniu z wytrzymałością początkową, równą 64,4 MPa, była większa o ok. 14% w przypadku próbek niesuszonych i 26% próbek suszonych. Jednocześnie w temperaturze 550°C zaobserwowano drobne powierzchniowe zarysowania próbek (fotografia 2a). Wraz ze wzrostem temperatury zakres uszkodzeń powiększał się (fotografie 2b i c) i zmniejszała się wytrzymałość na ściskanie. Próbki, które były wygrzewane w temperaturze 600°C, osiągnęły wytrzymałość na ściskanie zbliżoną do wytrzymałości początkowej (trzydziestodniowej). W temperaturze 800°C wystąpił bardzo duży spadek wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z wytrzymałością początkową i osiągnął poziom ok. 28% w przypadku próbek poddanych wstępnemu suszeniu i 33% niesuszonych. **Wzrost temperatury do 550°C można więc uznać za wartość graniczną.**

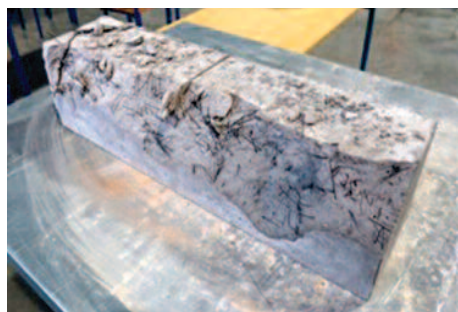
Zwiększenie wytrzymałości na ściskanie w temperaturze 200 – 500°C należy przypisać uwodnieniu nieuwodnionego cementu w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury [22]. Wzrost sił powierzchniowych między warstwami żeluz cementowego jest kolejnym czynnikiem odpowiedzialnym za wzrost wytrzymałości [23]. Przez zwiększenie temperatury

z 550°C do 800°C nasilają się reakcje chemiczne i degradacja mikrostruktury, co skutkuje znacznym zmniejszeniem wytrzymałości w temperaturze 800°C

Badania nad mikrostrukturą zapraw cementowych, opisane w [24, 25] wykazały, że intensywność szczytu fazy C-S-H jest prawie stała do 400°C i znacznie spadła w temperaturze 800°C. Zastosowanie włókien stalowych umożliwia łatwe przenoszenie ciepła wewnątrz betonu, co zmniejsza naprężenia termiczne i ogranicza powstawanie zarysowań. Tempo poprawy wytrzymałości na ściskanie zmniejsza się jednak w temperaturze 550 – 800°C. Można to przypisać wpływowi wysokiej temperatury na utratę właściwości wiążących. Co więcej, znaczne wydłużenie włókien stalowych pod wpływem temperatury powoduje promieniowe pęknięcia otaczające włókna [13], co jest kolejną przyczyną utraty wytrzymałości. Podobną zależność zaobserwowano w badaniu wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu (rysunek 2). Nie określono wytrzymałości resztkowej fibrokompozytu poddanego oddziaływaniu temperatury 800°C ze względu na zniszczenie próbek (fotografia 3).

Uzyskane wyniki badań wytrzymałości resztkowych w temperaturze 20°C (rysunek 2) wyraźnie wskazywały na ciągliwy charakter badanego materiału. Kształt wykresów przedstawiony na rysunku 2 wskazuje, że w przypadku kompozytu drobnokruszywowego obserwuje się powolny spadek siły niszczącej wraz ze wzrostem wartości

CMOD po pojawieniu się rysy. Zastosowanie zbrojenia rozproszonego powoduje, że kompozyt nie ulega nagłemu zniszczeniu, jak w przypadku betonu zwykłego czy kompozytu bez włókien. Wygrzewanie elementów próbnych ma istotny wpływ na poziom siły obciążającej, a tym samym na wytrzymałości resztkowe w porównaniu z próbkami badanymi w 20°C. Większa temperatu-



Fot. 3. Przykładowy obraz próbki belkowej po wygrzewaniu w temperaturze 800°C
 Photo 3. The sample image of beam specimen after heating at a temperature of 800°C

ra wygrzewania nie zawsze wiązała się z większym spadkiem wytrzymałości resztkowej (tabela 2). W przypadku próbek niesuszonych (rysunek 2a) zaobserwowano poziom siły obciążającej ok. 7 kN przy każdej szerokości rysy CMOD, a w przypadku próbek suszonych (rysunek 2b) siła obciążająca w początkowych fazach zarysowania osiąga wartości zbliżone, jak dla belek badanych w temperaturze 20°C, co stanowi wyraźną różnicę w porównaniu z próbkami niesuszonymi. Efekt suszenia zanikał po przekroczeniu szerokości rysy 2,5 mm, gdzie spadek siły był podobny, jak w przypadku próbek niesuszonych.



T = 500°C

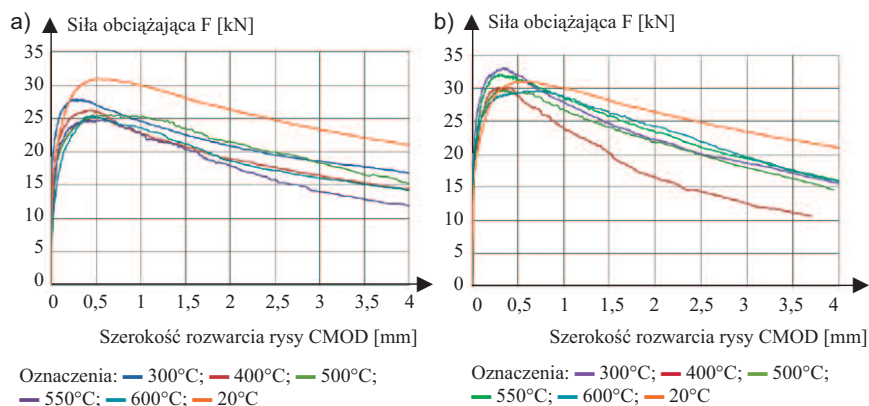


T = 600°C



T = 800°C

Fot. 2. Przykładowy obraz próbek sześciennych po wygrzewaniu
 Photo 2. The sample image of cubes specimens after heating

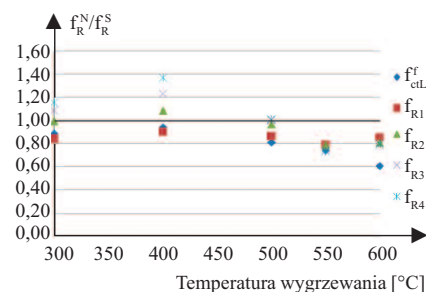


Rys. 2. Zależność średniej siły obciążającej F od szerokości rozwarcia rysy CMOD w funkcji temperatury wygrzewania próbek: a) niesuszonych; b) suszonych
 Fig. 2. The relationship between the average loading force F and the crack opening width CMOD as a function of the heating temperature for samples: a) non-dried; b) dried

Zgodnie z wytycznymi normy Model Code 2010 [26] klasę fibrokompozytu badanego w temperaturze 20°C można oznaczyć jako 7b (litera „b” określona na podstawie zależności f_{R3}/F_{R1}). Oznacza to, że materiał charakteryzuje duża wartość f_{R1} (zakres 1 – 8) oraz cecha *post crack softening*. Wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania zmieniała się ciągliwość materiału. W temperaturze do 300°C badany fibrokompozyt charakteryzuje się nadal klasą „b”, a w temperaturze wyższej zakwalifikowano go do klasy „a”. Wskazuje to na mniejszą zdolność przenoszenia naprężeń rozciągających po zarysowaniu w porównaniu z belkami badanymi w temperaturze 20°C. Należy jednak zaznaczyć, że w temperaturze 400 – 600°C ciągliwość ta pozostaje na podobnym poziomie

(podobne nachylenie krzywych F – CMOD na wykresach oraz podobne wartości f_{R3}/F_{R1} oscylujących na poziomie ok. 0,65).

Na rysunku 3 przedstawiono zależność wytrzymałości resztkowej, określonej na próbkach suszonych i niesuszonych, w funkcji temperatury. Suszenie próbek miało wpływ na wartość wytrzymałości resztkowej w przypadku rys niewielkiej szerokości CMOD. Z analizy rysunku 3 wynika, że granice proporcjonalności, podobnie jak wytrzymałości resztkowej f_{R1} , są mniejsze w przypadku próbek niesuszonych o 10 – 20%. W wysokiej temperaturze wygrzewania (550 i 600°C) różnica granic proporcjonalności jest znaczna i przy temperaturze 600°C wynosi 40%. Wynika to z faktu pojawienia się du-

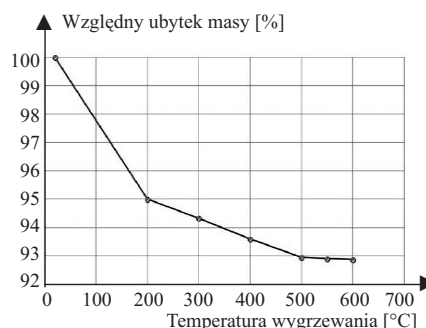


Rys. 3. Wytrzymałość resztkowa na rozciąganie przy zginaniu, określona na próbkach niesuszonych f_R^N i poddanych suszeniu f_R^S , w funkcji temperatury wygrzewania

Fig. 3. Residual flexural tensile strengths determined on non-dried f_R^N and dried f_R^S samples, as a function of heating temperature

żych spękań na etapie wygrzewania próbek niesuszonych. Inny trend zaobserwowano przy wytrzymałości resztkowej w przypadku dużej szerokości rys (f_{R3} i f_{R4}). Była ona większa w przypadku próbek niesuszonych przy niskiej temperaturze wygrzewania (300 i 400°C o ok. 15 i 30%), ale mniejsza w przypadku wysokiej temperatury (550 i 600°C o ok. 20%). Naszym zdaniem efekt suszenia ma znikomy wpływ na wytrzymałość resztkową f_{R3} i f_{R4} . Opisany trend wynika raczej z losowego ułożenia włókien i ich zakotwienia w kompozycie (co jest decydujące przy dużej szerokości rys CMOD) niż z wstępnego zarysowania będącego wynikiem wygrzewania.

Wyniki względnego ubytku masy próbek fibrokompozytu w zależności od przyjętej temperatury wygrzewania przedstawiono na rysunku 4. Po wygrzaniu próbek w temperaturze 200°C odnotowano największy ubytek masy rów-



Rys. 4. Względny ubytek masy drobnokruzywowego fibrokompozytu w funkcji temperatury wygrzewania

Fig. 4. Relative mass loss of fine-aggregate fiber composite as a function of heating temperature

Tabela 2. Zestawienie średniej wartości wytrzymałości resztkowej na rozciąganie przy zginaniu fibrokompozytu $f_{R,j}$ określonej na próbkach suszonych S i niepoddanych suszeniu N oraz wartości odchylenia standardowego s

Table 2. Summary of the mean values of the residual strength of the fiber composite $f_{R,j}$ determined on dried S and non-dried samples N and the standard deviation values s

Temperatura wygrzewania	Rodzaj próbki	f_{ctL} [MPa]	s [MPa]	CMOD = 0,5 mm		CMOD = 1,5 mm		CMOD = 2,5 mm		CMOD = 3,5 mm		Kategoria wg [26]	
				f_{R1} [MPa]	s [MPa]	f_{R2} [MPa]	s [MPa]	f_{R3} [MPa]	s [MPa]	f_{R4} [MPa]	s [MPa]	f_{R3}/f_{R1}	
300°C	S	8,25	1,19	10,22	1,81	7,24	0,64	6,18	0,20	4,92	0,37	0,75	kat. b
	N	7,35	0,88	8,61	1,22	7,21	1,24	6,25	1,17	5,68	0,99	0,73	kat. b
400°C	S	6,70	1,73	9,21	1,91	6,43	1,12	4,59	1,15	3,59	1,19	0,50	kat. a
	N	6,31	1,31	8,30	1,10	7,00	0,43	5,65	1,02	4,91	1,02	0,68	kat. a
500°C	S	6,90	1,26	9,39	1,69	7,72	2,30	6,37	2,12	5,23	2,00	0,68	kat. a
	N	5,60	0,30	8,15	2,36	7,50	2,06	5,54	1,78	5,29	1,67	0,68	kat. a
550°C	S	7,29	1,69	9,99	1,92	8,26	1,87	6,74	1,43	5,59	1,42	0,67	kat. a
	N	5,44	2,12	7,88	0,54	6,53	0,27	5,07	0,23	4,12	0,74	0,64	kat. a
600°C	S	7,40	2,50	9,37	1,63	8,37	1,59	5,62	1,75	5,63	1,63	0,60	kat. a
	N	4,50	0,74	8,05	1,17	6,79	1,24	5,51	0,24	4,85	0,31	0,68	kat. a

ny 5%, a od temperatury 500°C obserwowano już stabilizację. Ubytek masy w temperaturze niższej niż 500°C jest spowodowany utratą fizycznie adsorbowanej i chemicznie związanej wody. Badania publikowane przez innych autorów [27, 28] są w tej kwestii zbieżne.

Wnioski

Badania koncentrowały się na wpływie wysokiej temperatury na wytrzymałość na ściskanie i wytrzymałość resztkową na rozciąganie przy zginaniu drobnokruszywowego fibrokompozytu zbrojonego włóknem stalowym w ilości 1,2%. Na podstawie wyników przedstawionych w artykule wyciągnięto następujące wnioski:

1) dodatek włókien stalowych zapewnia dobrą wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie kompozytu betonowego przed oddziaływaniem wysokiej temperatury, ale również poprawia jego ciągliwość, plastyczność po ogrzaniu i odporność na odpryskiwanie (eliminuje skłonność do odpryskiwania);

2) drobnokruszywowy fibrokompozyt z zawartością włókien 1,2% zachowuje właściwości mechaniczne po wystawieniu na działanie temperatury do 550°C z powodu pożaru, a tym samym jest w stanie poprawić jego stabilność strukturalną w wysokiej temperaturze. Zastosowanie włókien stalowych w materiałach mineralnych znacznie poprawia ich właściwości ognioodporne. Drobnokruszywowy kompozyt ze stalowym zbrojeniem rozproszonym ma zdolność do przenoszenia obciążeń mechanicznych w warunkach pożaru i przyczynia się w ten sposób do bezpieczeństwa konstrukcji;

3) dodatek włókien stalowych do drobnokruszywowego kompozytu zmienia jego zachowanie z kruchego na pseudoplastyczny, a tym samym zapewnia niewielkie pogorszenie właściwości mechanicznych w wysokiej temperaturze;

4) wytrzymałość betonu na rozciąganie ma duży wpływ na właściwości konstrukcyjne, a szczególnie konstrukcji narażonych na działanie wysokiej temperatury; dodanie włókien stalowych do betonu jest jednym ze sposobów mających na celu odzyskanie utraty wytrzymałości na rozciąganie.

Literatura

- [1] Drzymała T. Wpływ temperatur występujących w czasie pożaru na podstawowe parametry wytrzymałościowe wibrobetonu. *Zeszyty Naukowe SGSP*. 2006.
- [2] Kim MO, Bordelon AC, Lee NK. Early-age crack widths of thin fiber reinforced concrete overlays subjected to temperature gradients. *Construction and Building Materials*. 2017; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.099>.
- [3] Jameran A, Ibrahim IS, Yazan SHS, Rahim SNAA. Mechanical properties of steel-polypropylene fibre reinforced concrete under elevated temperature. *Procedia Engineering*. 2015; <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.146>.
- [4] Sukontasukkul P, Pomchiengpin W, Songpiyajakij S. Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature. *Construction and Building Materials*. 2010; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.003>.
- [5] Erdakov P, Khokhryachkin D. Impact of fire on the stability of tunnels. Master's Thesis. Lulea University of Technology; 2005.
- [6] Deshpande AA, Kumar D, Ranade R. Influence of high temperatures on the residual mechanical properties of a hybrid fiber-reinforced strain-hardening cementitious composite. *Construction and Building Materials*. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.129>.
- [7] Deshpande AA, Kumar D, Ranade R. Temperature effects on the bond behavior between deformed steel reinforcing bars and hybrid fiber-reinforced strain-hardening cementitious composite. *Construction and Building Materials*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117337>.
- [8] Alberti MG, Galvez JC, Enfedaque A, Castellanos R. Influence of High Temperature on the Fracture Properties of Polyolefin Fibre Reinforced Concrete. *Materials*. 2021; <https://doi.org/10.3390/ma14030601>.
- [9] Müller P, Novák J, Holan J. Destructive and non-destructive experimental investigation of polypropylene fibre reinforced concrete subjected to high temperature. *Journal of Building Engineering*. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100906>.
- [10] Bezerra ACS, Maciel PS, Correa ECS, Paulo R. R. Soares Junior PRR, AguilarMTP. Effect of High Temperature on the Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete, *Fibers*. 2019; <https://doi.org/10.3390/fib7120100>.
- [11] Choumanidis D, Badogiannis E, Nomikos P, Sofianos A. Barcelona test for the evaluation of the mechanical properties of single and hybrid FRC, exposed to elevated temperature. *Construction and Building Materials*. 2017; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.115>.
- [12] Choumanidis D, Badogiannis E, Nomikos P, Sofianos A. The effect of different fibres on the flexural behaviour of concrete exposed to normal and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2016; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.089>.
- [13] Ruano G, Isla F, Luccioni B, Zerbino R, Giaccio G. Steel fibers pull-out after exposure to high temperatures and its contribution to the residual mechanical behavior of high strength concrete.

Construction and Building Materials. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.129>.

[14] Akca AH, Özyurt N. Deterioration and recovery of FRC after high temperature exposure. *Cement and Concrete Composites*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.07.020>.

[16] Głodkowska W, Ziarkiewicz M. Cracking behavior of steel fiber reinforced waste sand concrete beams in flexure – Experimental investigation and theoretical analysis. *Engineering Structures*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.097>.

[16] Głodkowska W. Waste Sand Fiber Composite: Models of Description of Properties and Application. *Annu. Set The Environ Prot*; 2018.

[17] Lehmann M, Głodkowska W. Shear Capacity and Behaviour of Bending Reinforced Concrete Beams Made of Steel Fibre-Reinforced Waste Sand Concrete. *Materials*. 2021; <https://doi.org/10.3390/ma14112996>.

[18] Bednarek Z, Drzymała T. Wpływ temperatur występujących podczas pożaru na wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu. *Zeszyty Naukowe SGSP*. 2008; 36: 62 – 84.

[19] RILEM Technical Committees 129-MHT. Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Part 1: Introduction, Part 2: Stress-strain relation, Part 3: Compressive strength for service and accident conditions. *Mater. Struct*. 1995; 28.

[20] PN-EN 12390-3:2019-7 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

[21] PN-EN 14651+A1:2007 Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym – Pomiary wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP).

[22] Xiao J, Xie Q, Xie W. Study on high-performance concrete at high temperatures in China (2004–2016) – An updated overview. *Fire Safety Journal*. 2018; <https://doi.org/10.1016/j.fire-saf.2017.10.007>.

[23] Castillo C. Effect of transient high temperature on high-strength concrete. Doctoral dissertation. Rice University. 1987.

[24] Moghadam MA, Izadifard RA. Effects of zeolite and silica fume substitution on the microstructure and mechanical properties of mortar at high temperatures. *Construction and Building Materials*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119206>.

[25] Moghadam MA, Izadifard RA. Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire Safety Journal*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102978>.

[26] Ajdukiewicz A. *Prenorma konstrukcji betonowych – fib Model Code 2010*. Polski Cement, Kraków 2014.

[27] Xiao J, Falkner H. On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures. *Fire Saf. J*. 2006; <https://doi.org/10.1016/j.fire-saf.2005.11.004>.

[28] Sahmaran M, Lachemi M, Li VC. Evaluation of mechanical properties and microstructure of fire-damaged cement composites, *ACI Mater. J*. 2010; 107 (3): 297 – 304.

Przyjęto do druku: 03.01.2024 r.