

Analiza wpływu oddziaływania wysokiej temperatury na zmianę wytrzymałości na rozciąganie kompozytu cementowego z dodatkiem włókien polipropylenowych

Streszczenie

W artykule poruszono temat związany z określeniem wpływu wysokiej temperatury na zmianę wytrzymałości na rozciąganie kompozytów cementowych z dodatkiem oraz bez dodatku włókien polipropylenowych. Oddziaływanie wysokiej temperatury na betonowe elementy konstrukcyjne prowadzić może do powstawania termicznego eksplozyjnego odpryskiwania betonu (ang. thermal spalling). Analiza literaturowa wykazała, że opracowania wielu autorów koncentrują się na stosowaniu dodatku w postaci włókien polipropylenowych do betonów poddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury w celu ograniczenia tego zjawiska. Wyniki tych badań wskazują również na to, że obecność włókien polipropylenowych może nie tylko zredukować powstawanie rys skurczowych, ale także poprawić wskaźniki wytrzymałościowe elementów betonowych. W artykule omówiony został cel i zakres badań, zastosowane metody badawcze, plan eksperymentu, poszczególne stanowiska badawcze oraz zamieszczono wyniki badań. W końcowej części artykułu sformułowano wnioski z przeprowadzonych badań.

WSTĘP

Beton jako materiał konstrukcyjny, ze względu na swój ogromny potencjał, wykorzystywany jest masowo przy wznoszeniu różnego rodzaju obiektów budowlanych. Liczne występowanie konstrukcji betonowych bądź żelbetowych zwiększa ryzyko podatności na różnego rodzaju czynniki, w tym także oddziaływania wysokiej temperatury. Rozważając oddziaływanie wysokiej temperatury na beton, należy mieć na uwadze także środowisko w jakim się znajduje. Pożar naraża konstrukcje betonowe na działanie szoku termicznego (ang. „thermal shock”) [16], który może mieć poważniejsze skutki w zależności od miejsca pożaru. Następstwem oddziaływania wysokiej temperatury na beton jest występowanie destrukcyjnych procesów fizykochemicznych [5, 6, 19, 20] które wpływają na parametry wytrzymałościowe konstrukcji w czasie pożaru. Do najważniejszych można zaliczyć chemiczne reakcje rozkładu, przemiany fazowe i zmiany objętościowe [6, 9]. Efektem tych procesów może być obniżenie wartości użytkowej materiału, a finalnie może doprowadzić nawet do awarii obiektu.

Oddziaływanie środowiska pożarowego na beton prowadzi do szeregu zmian w jego strukturze. Podczas oddziaływania wysokiej temperatury może dojść do uszkodzenia konstrukcji wykonanej z betonu (żelbetu) w postaci zarysowań czy odprysków, które powstają w wyniku ogrzewania oraz nierównomiernych zmian objętościowych.

Zjawisko „spallingu” można zdefiniować jako gwałtowne lub umiarkowane odrywanie się warstw lub kawałków betonu od powierzchni elementu konstrukcyjnego, wystawionego na działanie wysokich i szybko rosnących temperatur występujących podczas pożarów [15]. Za niezwykle niebezpieczną uchodzi odmiana w postaci termicznego eksplozyjnego odpryskiwania betonu (ang. thermal explosive spalling) [5]. Na wysoką podatność wystąpienia tego zjawiska narażone są przede wszystkim betony wysokowartościowe HSC (ang. high-strength concrete). Charakteryzują się one bardzo zwartą strukturą matrycy cementowej, wysoką wytrzymałością na ściskanie oraz niskim wskaźnikiem wodno-cementowym (w/c) [6, 12, 13, 18]. Występowanie zjawiska „spallingu” podczas pożaru stanowi zagrożenie dla ratowników, utrudniając prowadzenie

akcji ratowniczej, a także powoduje obniżenie nośności konstrukcji poprzez destrukcję otuliny betonowej i oddziaływanie wysokiej temperatury na zbrojenie elementu, prowadząc do zniszczenia konstrukcji [8, 18].

Aktualnie przyjmuje się dwie teorie, dotyczące powstawania termicznego odpryskiwania betonu [10, 21]. Pierwsza (identyfikowana ze środowiskiem naukowców europejskich), za podstawową przyczynę uznaje wysokie ciśnienie gazu powstałe w wyniku odparowywania wilgoci w przypowierzchniowej warstwie konstrukcji. Para gromadząca się w porach betonu, w połączeniu ze spadkiem wytrzymałości betonu, działa na element, powodując „złuszczenie się” kolejnych warstw materiału, które czasem ma charakter eksplozyjny. Druga teoria (rozwijana głównie przez naukowców amerykańskich), sugeruje, że podstawowej przyczyny „spallingu” należy doszukiwać się w wysokich naprężeniach rozciągających (efekt termomechaniczny). Mogą one przekroczyć wytrzymałość na rozciąganie betonu, obniżoną wskutek oddziaływania wysokiej temperatury, a nagromadzona wewnątrz energia, przekraczając wartość pęknięcia materiału, może zostać uwolniona w gwałtowny sposób prowadząc do eksplozji [3].

Obecnie za najbardziej efektywne metody zapobiegania wystąpieniu zjawiska „spallingu” uznaje się dodawanie drobnych włókien polipropylenowych do projektowanej mieszanki betonowej. Włókna polipropylenowe są powszechnie stosowane jako środek zapobiegający i redukujący powstawanie naprężeń skurczowych w materiale, co potwierdza chociażby Brandt [4]. Włókna te mogą również wpływać na zachowanie elementu konstrukcyjnego podczas trwania pożaru. Potwierdzenie tych właściwości można znaleźć w raporcie z badań prowadzonych w ramach projektu UPTUN [11, 17]. Aby zwiększyć odporność betonu na wysoką temperaturę i ograniczyć zjawisko „spallingu”, zaleca się dodawanie włókien najczęściej w ilości

$0,1 \div 0,2$ % objętości betonu. W wyniku oddziaływania strumienia ciepła włókna polipropylenowe mięknią i topią się w temperaturze około 160°C - 170°C . Po stopieniu, w strukturze kompozytu pojawiają się wolne przestrzenie po włóknach, a sam polipropylen wchłaniany jest przez matrycę cementową. Dalsze ogrzewanie powoduje pirolizę włókien, aż do ich degradacji w temperaturze około 380°C [14]. Puste przestrzenie po włóknach, pozwalają na

uwolnienie pary, powstałej pod wysokim ciśnieniem, redukując zjawisko wystąpienia naprężeń krytycznych, prowadzących do odpryskiwania fragmentów betonu z jego struktury. Zastosowanie dodatku w postaci włókien polipropylenowych wpływa korzystnie na zmianę właściwości wytrzymałościowych betonów niewygrzewanych, jak i poddanych działaniu wysokich temperatur [1-3, 7-9].

Badania prowadzone od wielu lat przez pracowników Szkoły Głównej Służby Pożarniczej koncentrują się na analizie wpływu wysokiej temperatury na zmiany parametrów wytrzymałościowych zarówno betonów zwykłych NSC (normal-strength concrete), jak i betonów wysokowartościowych HSC (high-strength concrete) oraz kompozytów cementowych z dodatkiem włókien polipropylenowych PFRC (polypropylene fibre-reinforced concrete) [23, 24]. Obecnie w SGSP prowadzone są również liczne prace nad optymalizacją dodatku różnego rodzaju włókien polipropylenowych do kompozytów cementowych w celu redukcji występowania zjawiska „spallingu” [22].

1. PROGRAM I METODYKA BADAŃ

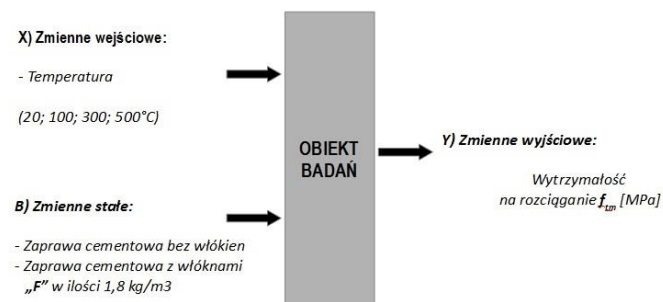
1.1. Cel oraz zakres badań

Celem badań doświadczalnych była analiza wpływu wysokiej temperatury na zmianę wytrzymałości na rozciąganie próbek zaprawowych bez dodatku i z dodatkiem włókien polipropylenowych. Oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie wykonano na próbkach w kształcie „ósemek” z wydłużoną strefą środkową według normy PN-85 B-04500: Zaprawy budowlane - Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych [25]. W celu wyeliminowania wpływu kruśzywa grubego na parametry wytrzymałościowe kompozytu, zrezygnowano z jego dodatku do zaprawy. Badania zostały przeprowadzone w Szkole Głównej Służby Pożarniczej oraz na Politechnice Warszawskiej.

Do badań użyto włókna polipropylenowe Fibrofor High Grade typ 190 produkcji firmy Brugg Contec AG. Plan eksperymentu zakładał stworzenie dwóch partii próbek kompozytów cementowych bez dodatku i z dodatkiem włókien polipropylenowych w ilości 1,8 kg/m³. Optymalna zawartość włókien ustalona została na podstawie wcześniejszych badań [22]. Temperatury badawcze zawierały się w zakresie od 20°C do 600°C. Próbkę wygrzewano w piecu w trzech temperaturach badawczych (100°C, 300°C, 500°C).

W czasie badań dążono do tego, aby rozkład temperatury w czasie był zbliżony do warunków termicznych standardowego pożaru. Po wygrzewaniu w piecu i wystudzeniu, próbki każdorazowo poddawano badaniom oznaczenia wytrzymałości na zginanie. W każdym punkcie pomiarowym zbadano po 3 próbki.

Na rys.1 przedstawiono program badań przy oznaczaniu wytrzymałości na rozciąganie dla „ósemek” z wydłużoną strefą środkową z dodatkiem i bez dodatku włókien polipropylenowych.



Rys. 1. Program badań przy oznaczaniu wytrzymałości na rozciąganie

Źródło: Opracowanie własne.

1.2. Charakterystyka użytej zaprawy cementowej

Do wykonania zaprawy użyto cement CEM I 42,5 R Lafarge o wysokiej wytrzymałości wczesnej, spełniający wg deklaracji producenta wymagania normy PN-EN 197 1:2002 „Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku” [26].

Do zaprawy wykorzystano piasek wiślany 0/2 mm oraz pył krzemianowy Silimic. Do zaprawy użyto wodę wodociagową zgodną z wymaganiami PN-EN 1008:2004 „Woda zarobowa do betonu. Specyfikacja pobierania próbek, badania i oceny wody zarobowej do betonu” [28]. Jako domieszkę do zapraw zastosowano Chryso Fluid Optima, wytwarzaną na bazie modyfikowanych polikarboksylatów i fosfonianów dla silnych reduktorów wody zarobowej, zgodną z wymaganiami normy PN-EN 934-2 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Część 2: Domieszki do betonu. Definicje, wymagania, zgodność, znakowanie i etykietowanie” [27], umożliwiającą produkcję spójnej mieszanki betonowej o niskiej lepkości, z bardzo długim efektem utrzymania konsystencji [29]. Wskaźnik w/c dla próbek zaprawowych wynosił poniżej 0,26. Zestawienie składów do wykonania próbek zaprawowych potrzebnych do zrealizowania przyjętego planu eksperymentu zamieszczono w tablicy 1.

Tab.1. Zestawienie składu zapraw cementowych do zrealizowania przyjętego planu eksperymentu

Składniki	Oznaczenie składu	
	Z0F (skład bez dodatku włókien)	Z1,8F (skład z dodatkiem włókien „F”)
Cement CEM I 42,5 R [kg/m ³]	846	846
Mikrokrzemionka [kg/m ³]	84,6	84,6
Piasek [kg/m ³]	1249	1249
Plastyfikator Optima 190 [% m.c.]	2	2
Woda [dm ³ /m ³]	215	215
Włókna FIBROFOR High Grade 190 [kg/m ³]	-	1,8

Źródło: Praca badawcza statutowa, Optymalizacja ilości dodatku włókien polipropylenowych do betonu w celu przeciwdziałania eksplozywnemu odpryskiwaniu betonu w tunelach komunikacyjnych w trakcie pożarów, S/E-422/18/14/15/16 (kierownik naukowy: Drzymała T.) SGSP, Warszawa 2014–2016 [22].

1.3. Charakterystyka użytych włókien

Do badań użyto włókna polipropylenowe Fibrofor High Grade typ 190 produkcji firmy Brugg Contec AG. Są to uszlachetnione, wiązowane, fibrylowane włókna wysokiej jakości, przeznaczone do konstrukcyjnego mikrobrojenia betonu. Znajdują zastosowanie przy wznoszeniu konstrukcji betonowych odpornych na ogień. Stosuje się je także przy wykonywaniu posadzek przemysłowych, elementów prefabrykacji, produkcji betonu pompowego, natryskowego czy w budownictwie mostowym. Wybrane właściwości włókien zawarto w tablicy 2. Specjalna chropowata powierzchnia umożliwia włóknom skuteczne zakotwienie w betonie oraz powoduje ich szybkie i dokładne rozprowadzenie podczas procesu mieszania. Ze względu na swoje właściwości włókna „F” mają zastosowanie jako mikrobrojenie konstrukcyjne, podwyższają wytrzymałość betonu na uderzenia, ognioodporność, zapobiegają osiadaniu świeżej mieszanki betonowej oraz podnoszą odporność konstrukcji betonowej narażonej na działanie wód agresywnych [30]. Na rys. 2 przedstawiono włókna polipropylenowe zastosowane do wykonania próbek zaprawowych.



Rys. 2. Włókna polipropylenowe Fibrofor®
Źródło: Opracowanie własne.

W tabelicy 2 podano charakterystykę włókien Fibrofor na podstawie danych producenta [30].

Tab.2. Charakterystyka włókien polipropylenowych wykorzystanych do badań

Badana cecha	Wynik oznaczenia
Barwa	Beżowa
Charakterystyka	Włókno skręcane, fibrylowane
Długość, [mm]	19 ±5%
Średnica, [μm]	80
Gęstość, [kg/dm ³]	0,90
Temperatura mięknięcia, [°C]	ok. 150

Źródło: Karta techniczna włókien Fibrofor®.

2. BUDOWA STANOWISK BADAWCZYCH

2.1. Stanowisko do wygrzewania próbek

Przygotowane próbki wygrzewano w Laboratorium Mechaniki i Wytrzymałości Materiałów w Szkole Głównej Służby Pożarnej. Do tego celu wykorzystano specjalne stanowisko badawcze, którego centralnym punktem jest średnotemperaturowy elektryczny piec komorowy typu PK 1100/5. Dodatkowym elementem stanowiska pomiarowego jest komputer z odpowiednim oprogramowaniem służącym do sterowania pracą pieca oraz rejestracji temperatury podczas wygrzewania próbek. Stanowisko do wygrzewania próbek wraz z rejestratorem temperatury przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Stanowisko do wygrzewania próbek
Źródło: Opracowanie własne.

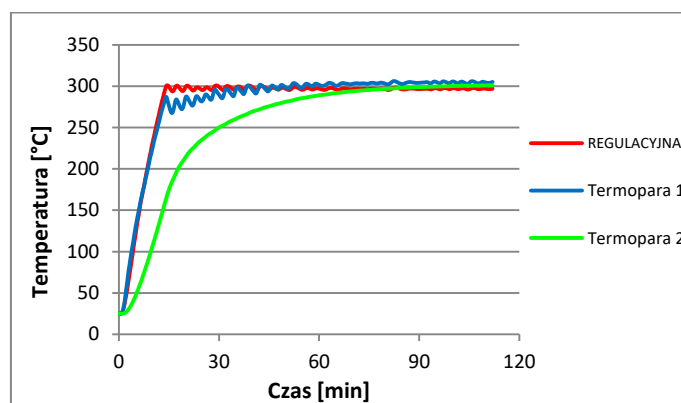
W celu pomiaru temperatury podczas procesu wygrzewania poszczególnych próbek, zastosowano dwie termopary (T1, T2).

Termopara T1 została przytwierdzona do zewnętrznej ścianki próbki, zaś termopara T2 została umieszczona w nawierconym kanaliku tak, aby jej koniec znajdował się w połowie grubości próbki. Na rysunku 4 pokazano zamocowanie termopar do wygrzewanej próbki.

Na każdorazowo wygrzewaną partię próbek składało się 7 próbek (3 próbki bez dodatku włókien, 3 próbki z dodatkiem włókien oraz 1 dodatkowa próbka, na której odczytywano temperaturę z termopar T1 i T2). Każda z próbek posiadała indywidualne oznaczenie ze względu na temperaturę wygrzewania i zawartość włókien. Każdorazowo po wygrzewaniu piec wyłączano i studzono do temperatury bezpiecznej (około 100°C), następnie otwierano go, aby próbki schłodziły się przez około 24 godzin do osiągnięcia temperatury pokojowej, (około 20°C). Na rys. 5 przedstawiono przykładową krzywą obrazującą rzeczywisty rozkład temperatur występujących w miejscach rozmieszczenia termopar pomiarowych.



Rys. 4. Próbkę przygotowane do wygrzewania w piecu
Źródło: Opracowanie własne.

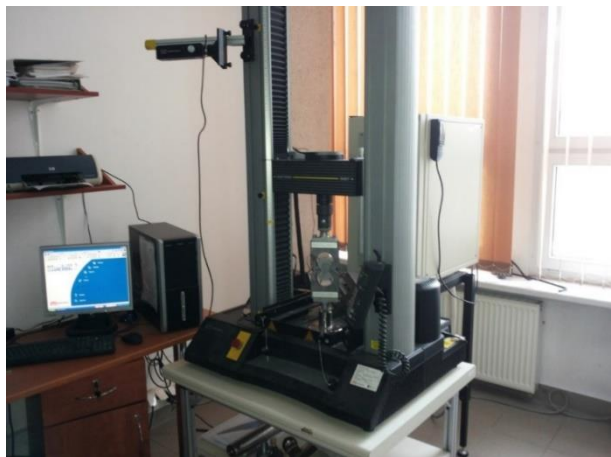


Rys. 5. Przebieg procesu wygrzewania – temperatura 300°C
Źródło: Opracowanie własne.

2.2. Stanowisko do badania wytrzymałości na rozciąganie

W celu przeprowadzenia badań wytrzymałościowych zgodnie z założoną procedurą badawczą, ostudzone próbki przewieziono do Zakładu Inżynierii Materiałów Budowlanych na Politechnice Warszawskiej, gdzie następnie oznaczono wytrzymałość na rozciąganie. Oznaczenie wytrzymałości na rozciąganie wykonywano dla próbek w kształcie „ósemek” z wydłużoną strefą środkową zgodnie z normą PN-85 B-04500 [25]. Wszystkie pomiary wykonano przy użyciu maszyny wytrzymałościowej INSTRON Model 5567 o zakresie pomiarowym 0 – 30 kN. Maszyna zaopatrzona została w oprzyrządowanie do badania wytrzymałości na rozciąganie (łukowe uchwyty do mocowania próbek „ósemkowych”) oraz komputer PC

wraz z odpowiednim programem do rejestracji wyników. Stanowisko pomiarowe przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Widok próbki podczas próby zginania

Źródło: Drzymała T., Wpływ oddziaływania wysokiej temperatury na zmianę wytrzymałości na rozciąganie kompozytów cementowych modyfikowanych za pomocą dodatku włókien polipropylenowych, XXV Międzynarodowa Konferencja „Fire Protection 2016”, Ostrava 2016 [6].

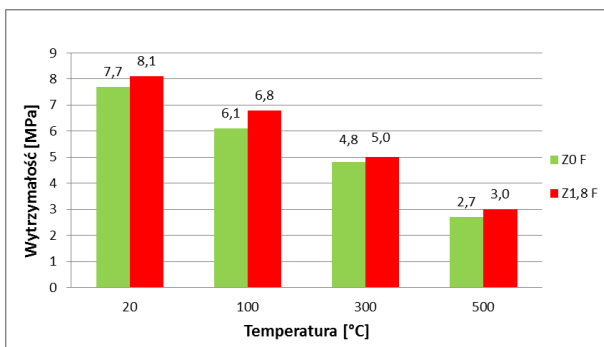
2.3. Wyniki badań

Aparatura do oznaczania wytrzymałości na rozciąganie umożliwiła dokładny pomiar każdej partii próbek. Otrzymane wyniki zaprezentowano w tabeli 3 i przedstawiono w postaci wykresów zmiany wytrzymałości na rozciąganie dla próbek niewygrzewanych (20°C) oraz tych, które zostały wygrzane w założonych temperaturach 100°C, 300°C i 500°C. Na rys. 7 przedstawiono zestawienie średnich wartości $f_{m,fl}$ dla badanych kompozytów cementowych bez i z dodatkiem włókien polipropylenowych („F”) w poszczególnych temperaturach.

Tab.3. Zestawienie średnich wytrzymałości na rozciąganie próbek w kształcie „ósemek” bez dodatku i z dodatkiem włókien polipropylenowych

Próbki	Wytrzymałość na rozciąganie f_m [MPa]				
	20°C	100°C	300°C	500°C	
Z0F	f_m [MPa]	7,7	6,1	4,8	2,7
	$f_{mT}/f_{m20°C, Z0F}$ [%]	100,00	79,22	62,34	35,06
	Zmiana wytrzymałości [%]	0,00	-20,78	-37,66	-64,94
Z1,8F	f_m [MPa]	8,1	6,8	5,0	3,0
	$f_{mT}/f_{m20°C, Z1,8F}$ [%]	105,19	88,31	64,94	38,96
	Zmiana wytrzymałości [%]	5,19	-11,69	-35,06	-61,04

Źródło: Opracowanie własne.

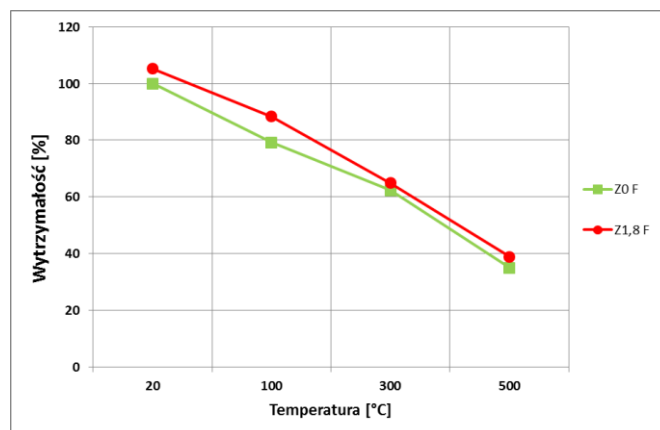


Rys. 7. Zestawienie wyników wytrzymałości na rozciąganie dla zapraw z włóknami „F” i bez dodatku włókien w poszczególnych temperaturach badawczych

Źródło: Opracowanie własne.

Uzyskane wyniki wykazują korzystny wpływ włókien polipropylenowych na parametry wytrzymałościowe. Poprawa wartości dla próbek z dodatkiem włókien zachodzi w każdej temperaturze badawczej. Największa różnica parametrów wytrzymałościowych na korzyść kompozytu z włóknami wyniosła 0,7 MPa i została odnotowana w temperaturze 100°C. Z kolei najmniejszą różnicę wytrzymałości na rozciąganie między próbką z włóknami polipropylenowymi, a bez włókien (0,2 MPa) zaobserwowano przy temperaturze wygrzewania 300°C. Podczas całej procedury badawczej, widoczny spadek wytrzymałości na rozciąganie dla obu serii próbek badawczych nastąpił w temperaturze 300°C. Wartość ta dla kompozytów bez włókien polipropylenowych wyniosła 2,9 MPa, zaś dla próbek z ich dodatkiem odnotowano spadek rzędu 3,1 MPa. Zmiana ta może mieć związek z degradacją i pirolizą włókien polipropylenowych w materiale pod wpływem wysokiej temperatury.

Na rys. 8 przedstawiono zestawienie wytrzymałości na rozciąganie w procentach, gdzie wartość 100% stanowi wytrzymałość dla próbek kompozytu cementowego bez dodatku włókien polipropylenowych. Wyniki zmian względnej wytrzymałości na rozciąganie dla badanych zapraw otrzymano jako stosunek wytrzymałości na rozciąganie próbek wygrzewanych do wytrzymałości próbek niewygrzewanych $f_{mT}/f_{m20°C, Z0F}$.



Rys. 8. Wykres procentowego spadku wytrzymałości na rozciąganie próbek w kształcie ósemek bez dodatku i z dodatkiem włókien polipropylenowych

Źródło: Opracowanie własne.

Na podstawie wyników badań zamieszczonych na rys. 8 można odczytać, iż dodatek włókien polipropylenowych, skutkuje mniejszym spadkiem wytrzymałości na rozciąganie, co wykazano dla wszystkich badanych temperatur. Ponadto w temperaturze 20°C dla kompozytu cementowego z dodatkiem włókien odnotowano przyrost wytrzymałości na rozciąganie o ponad 5% w stosunku do niewygrzewanych próbek bez dodatku włókien.

PODSUMOWANIE

W rezultacie przeprowadzonych badań i analizy wyników wpływu wysokiej temperatury na zmianę wytrzymałości na rozciąganie dla badanych kompozytów cementowych z dodatkiem oraz bez dodatku włókien polipropylenowych sformułowano następujące wnioski:

- Badanie oznaczenia wytrzymałości wykonane na niewygrzewanych próbkach (20°C) wykazało, że średnie wartości wytrzymałości na rozciąganie uzyskiwane dla kompozytów z dodatkiem włókien są większe o 0,4 MPa od próbek bez ich dodatku.
- Poddanie kompozytów cementowych bez dodatku oraz z dodatkiem włókien polipropylenowych oddziaływaniu wysokiej temperatury, wpłynęło znacząco na zmianę ich parametrów wytrzyma-

- łościowych. Wyrzwanie próbek spowodowało wyraźne obniżenie wytrzymałości na rozciąganie wraz ze wzrostem temperatury. Spadki odnotowano w każdej temperaturze wygrzewania, lecz nie były one względem siebie regularne.
- Największe spadki wytrzymałości na rozciąganie próbek odnotowano w temperaturze 500°C. Wartości dla kompozytów bez dodatku włókien wyniosły 64,94%. W przypadku próbek zawierających włókna wytrzymałość spadła o 61,04%.
 - Największa różnica wytrzymałości na rozciąganie w zależności od temperatury wygrzewania została odnotowana dla kompozytów w temperaturze 500°C (11,1%). Najmniejszą wartość wyznaczono dla próbek w temperaturze 300°C i wyniosła ona 4,2%.
 - Po przeprowadzeniu badań literaturowych oraz doświadczalnych, zasadne wydaje się kontynuowanie dalszych badań poświęconych resztkowej wytrzymałości na rozciąganie dla kompozytów cementowych.
 - Poszerzenie zakresu badań mogłoby opierać się o pewne modyfikacje planu eksperymentu, np. dodatkowe temperatury wygrzewania oraz inne cechy wytrzymałościowe, w celu precyzyjnego ustalenia wpływu wysokiej temperatury na zmianę badanej cechy wytrzymałościowej.

BIBLIOGRAFIA

1. Bednarek Z., Drzymała T., Analiza wpływu wysokiej temperatury na zmianę wybranych parametrów wytrzymałościowych fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych, „Zeszyty Naukowe SGSP” 2013, nr 3, s.127-138.
2. Bednarek Z., Drzymała T., Analiza wyników badań modułu sprężystości fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych w warunkach termicznych pożaru, „Logistyka” 2011, nr 6, s. 41-54.
3. Bednarek Z., Drzymała T., Zagrożenie występowania eksplozywnego odpryskiwania betonu w czasie pożaru w tunelach komunikacyjnych, „Logistyka” 2010, nr 6.
4. Brandt A. M., Zastosowanie włókien, jako uzbrojenia w elementach betonowych, Konferencja „Beton, na progu nowego Millennium”, Kraków 2000, s. 433-444.
5. Chudyba K., Bezpieczeństwo pożarowe konstrukcji z betonu według eurokodów, „Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza” 2016, nr 1, s. 85-96.
6. Drzymała T., Wpływ oddziaływania wysokiej temperatury na zmianę wytrzymałości na rozciąganie kompozytów cementowych modyfikowanych za pomocą dodatku włókien polipropylenowych, XXV Międzynarodowa Konferencja „Fire Protection 2016”, 21-22 września, Ostrava 2016, s. 50-54.
7. Drzymała T., Bednarek Z., Wybrane kierunki zastosowań fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych poddanego oddziaływaniu wysokiej temperatury, „Logistyka” 2011, nr 6.
8. Drzymała T., Ogrodnik P., Zegardło B., Wpływ oddziaływania wysokiej temperatury na zmianę wytrzymałości na zginanie kompozytów cementowych z dodatkiem włókien polipropylenowych, „Technika Transportu Szynowego”, TTS nr 12/2016, s. 82-86.
9. Drzymała T., Reszka M., Analiza wpływu oddziaływania wysokiej temperatury na zmianę wytrzymałości na rozciąganie zapraw cementowych z dodatkiem i bez dodatku włókien polipropylenowych, III Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Bezpieczeństwo Techniczne 2016”, Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych, 28-29 listopada, Wrocław 2016.
10. Gawin D., Pasavento F., Majorana C. E., Schrefler B. A., Modelowanie procesu degradacji betonu w wysokich temperaturach, „Inżynieria i Budownictwo” 2003, nr 4.
11. Gawin D., Witek A., Pasavento F., O ochronie betonowej obudowy tunelu przed zniszczeniem w warunkach pożarowych – wyniki projektu UPTUN, „Inżynieria i Budownictwo” 2006, nr 11, s. 622-625
12. Hager I., Tracz T., Wpływ wysokiej temperatury na wybrane właściwości betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien polipropylenowych, „Cement, Wapno, Beton” nr 1/2009, s. 3-10.
13. Jamróży Z., Beton i jego technologie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
14. Jansson R., Fire Spalling of Concrete. Theoretical and Experimental Studies, Doctoral thesis in Concrete structures, Stockholm 2013.
15. Khoury G, Effect of fire on concrete and concrete structures, „Progress in Structural Engineering and Materials” 2000, Vol. 2, pp. 429-447.
16. Khoury G, Fire and Concrete, Encontro Nacional Betão Estrutural, Guimarães 5-7 de Novembro de 2008.
17. Kitchen A., Fibres for passive fire protection in tunnels, „Tunneling & Trenchless Construction” 2004, No. 4.
18. Kodur V., Properties of Concrete at Elevated Temperatures, „ISRN Civil Engineering” 2014, vol. 2014, Article ID 468510.
19. Kosiorek M., A. Pogorzelski J. A., Laskowska Z., Pilich K., Odporność ogniowa konstrukcji budowlanych, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1988.
20. Neville A. M., Właściwości Betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków 2012.
21. Phan L. T., Carino N. J., Mechanical properties of high-strength concrete at elevated temperatures, NISTIR 6725, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, (Maryland) 2001.
22. Praca badawcza statutowa, Optymalizacja ilości dodatku włókien polipropylenowych do betonu w celu przeciwdziałania eksplozywnemu odpryskiwaniu betonu w tunelach komunikacyjnych w trakcie pożarów, S/E-422/18/14/15/16 (kierownik naukowy: Drzymała T.) SGSP, Warszawa 2014-2016.
23. Praca zbiorowa, Badanie wpływu temperatur występujących podczas pożaru na wytrzymałość fibrobetonu, BW/E-422/8/2008, (kierownik pracy Drzymała T.) SGSP, Warszawa 2008.
24. Praca zbiorowa, Wpływ temperatur występujących podczas pożaru na wybrane parametry wytrzymałościowe fibrobetonu, S/E-422/8/2007, I Etap, (kierownik naukowy Bednarek Z.) SGSP, Warszawa 2008.
25. PN-85 B-04500: Zaprawy budowlane – Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych.
26. PN-EN 197-1:2002: Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
27. PN-EN 934-2: Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu – Część 2: Domieszki do betonu. Definicje, wymagania, zgodność, znakowanie i etykietowanie.
28. PN-EN 1008:2004: Woda zarobowa do betonu. Specyfikacja pobierania próbek, badania i oceny wody zarobowej do betonu.
29. Karta techniczna domieszki do betonów Chryso Fluid Optima 185.
30. Karta techniczna włókien Fibrofor.

Analysis of influence of high temperature on changes of the tensile strength of cement composite modified by addition of polypropylene fibers

Abstract

The scientific purpose of this article was to analyze the effect of high temperature on change of tensile strength of cement composites with and without addition of polypropylene fibers (PP). Influence of high temperature on concrete elements can lead to formation of thermal explosive spalling phenomenon. Literature analysis, has shown that studies of many authors concentrate on use of addition fiber to concrete exposed to

high temperatures. These studies confirm that the addition of PP fibers can significantly affect to composites by strengthening their strength characteristics and reduce thermal spalling phenomenon. This article includes the aim and scope of studies, research methods, tests schedule and research stands description, as well as study results. In a final part of this paper the conclusions are formulated.

Autorzy:

mł. bryg. dr inż. **Tomasz Drzymala** – Szkoła Główna Służby Pożarnej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego, Katedra Bezpieczeństwa Budowli i Rozpoznawania Zagrożeń, Zakład Podstaw Budownictwa i Materiałów Budowlanych, ul. Słowackiego 52/54, 01-629 Warszawa, Telefon: +48 22 561-76-13, Fax: +48 22 833-07-24, E-mail: t.drzymala@sgsp.edu.pl

inż. **Aleksander Serafin** – absolwent Szkoły Głównej Służby Pożarnej w Warszawie, którą ukończył w 2017 roku na Wydziale Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego.