

mgr inż. Mariusz Tomaszewski\*  
mgr inż. Artur Kuś\*  
dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek\*  
st. kpt. dr inż. Tomasz Drzymała\*\*

# Konsekwencje oddziaływania warunków pożaru na młody beton wysokowartościowy

## *Consequences of fire impact on the young high-grade concrete*

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości fizykomechanicznych 28-dniowego betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien polipropylenowych poddanego oddziaływaniu wysokiej temperatury 300, 450 i 600 °C, które porównano z cechami betonu w temperaturze 20 °C. Analiza uzyskanych wyników badań pozwoliła na dokonanie oceny zmian właściwości betonów wysokowartościowych narażonych na oddziaływanie wysokiej temperatury oraz przydatności projektowanych betonów do konstrukcji inżynierskich.

**Słowa kluczowe:** pożar, beton, fibrobeton, włókna polipropylenowe (PP), wytrzymałość, moduł sprężystości.

**Abstract.** In this paper the results of studies of physical-mechanical properties of 28-days high-grade concrete with polypropylene addition exposed to high temperatures of 300°C, 450°C and 600°C are shown. The properties have been compared with concrete properties at 20°C. The analysis of the obtained results and studies enabled to evaluate changes in properties of high-grade concrete subject to impact of high temperatures and to assess the suitability of the proposed concrete in engineering structures.

**Keywords:** fire, concrete, fibers reinforced concrete (FRC), polypropylene fibers, compressive strength, elastic modulus.

Badania betonu poddanego działaniu wysokiej temperatury nie są w pełni znormalizowane, dlatego trudno jednoznacznie ocenić jej wpływ na zmiany właściwości betonu. Powodem tego są przede wszystkim różnice w indywidualnych programach oraz metodyce badań w prowadzonych eksperymentach, w tym m.in. dotyczące wilgotności i wieku betonu, czasu ekspozycji na wysoką temperaturę, szybkości przyrostu „obciążenia” termicznego, wielkości i kształtu próbek betonowych, jak również warunków chłodzenia po ekspozycji [1, 2, 3]. Z racji, że jednym z głównych czynników wpływających na cechy betonu po wygrzewaniu (pożarze) – jest jego wiek, wielu naukowców twierdzi, że badania tego typu powinno się wykonywać, gdy wykształci się odpowiednia struktura materiału, np. po 90 [4, 5] lub 60 [6, 7] dniach dojrzewania próbek. Jednak najbardziej powszechne jest poddawanie betonu oddziaływaniu temperatury po okresie 28 dni dojrzewania [8, 9, 10], chociaż badania przeprowadzano także na bardzo młodym betonie, nawet na drugi dzień po zaformowaniu próbek [11]. Beton będący przedmiotem badań w prezentowanej pracy, dojrzewający wcześniej przez 28 dni w warunkach wilgotnych (temperatura powietrza  $20 \pm 2$  °C, wilgotność względna  $> 95\%$ ) uznano więc za **młody beton**.

### Koncepcja realizacji programu badań

**Przedmiot i zakres badań własnych.** Celem badań było sprawdzenie wpływu oddziaływania wysokiej temperatury na beton wysokowartościowy (BWW), a także ocena możliwości poprawy odporności tego rodzaju betonu na działanie podwyższonej temperatury przez dodanie do mieszanki betonowej mikrowłókien polipropylenowych w ilości  $1,5 \text{ kg/m}^3$ . Zaprojektowano fibrobeton o  $w/c = 0,30$ , z kruszywem bazaltowym o  $D_{\max} = 16 \text{ mm}$ . W celu uzyskania założonej klasy konsystencji S3 ( $100 \div 150 \text{ mm}$ ) zastosowano domieszkę upłynniającą. Zakres badań obejmował sprawdzenie właściwości mieszanki betonowej, w tym: konsystencji, gęstości objętościowej, oraz badania właściwości stwardniałego betonu, w tym: wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, współczynnika sprężystości. Badania cech betonu prowadzono zarówno w temperaturze 20°C, jak i w wysokiej temperaturze, wygrzewając próbki do 300, 450 i 600 °C. Obserwowano, czy na powierzchni próbek poddanych działaniu wysokiej temperatury pojawiają się zmiany, w szczególności termiczne eksplozyjne odpryskiwanie betonu (*ang. thermal spalling*), rysy, zmiany barwy lub masy. Zwracano uwagę na wygląd próbek w momencie przed wstawieniem ich do pieca i zaraz po wyjęciu.

**Materiały stosowane do badań i ich charakterystyka.** Zaprojektowany skład mieszanki betonowej przedstawiono w tabeli 1.

**Metodyka badawcza.** Wszystkie próbki betonowe objęte w planie eksperymentu wygrzewaniem, po osiągnięciu przez beton 28 dni, zostały na 7 dni przeniesione do suszarek laboratoryjnych, gdzie przebywały w temperaturze 105 °C. W próbkach „świadkach” przewidzianych do kontroli temperatury wewnątrz elementu – wywiercono otwory na termopary. Próbkę wy-

Tabela 1. Skład 1 m<sup>3</sup> mieszanki betonowej

Składniki	Zawartość
Cement CEM I 42,5R [kg]	450
Woda [kg]	135
Piasek 0/2 [kg]	732
Bazalt 2/8 [kg]	568
Bazalt 8/16 [kg]	695
Superplastyfikator [% m.c.]	2,33
Włókna polipropylenowe [kg]	1,5

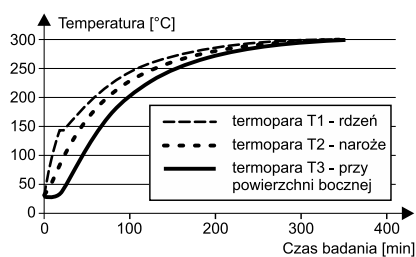
[Źródło: opracowanie własne]

grzewano na stanowisku badawczym w Laboratorium Mechaniki Stosowanej w Szkole Głównej Służby Pożarnej w Warszawie, wyposażonym w średniotemperaturowy elektryczny piec komorowy typu PK 1100/5 i komputer PC z odpowiednim oprogramowaniem do sterowania oraz rejestracji temperatury podczas wygrzewania próbek (rysunek 1). Próbkę ustawiano na dnie pieca, na podkładkach szamotowych, w taki sposób, aby nie stykały się ze sobą oraz nie dotykały elementów grzejnych pieca.

Proces wygrzewania przebiegał wg krzywej „standardowej” ISO 834 [12] oraz PN-EN 1991-1-2 [13] obrazującej narasta-

\* Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

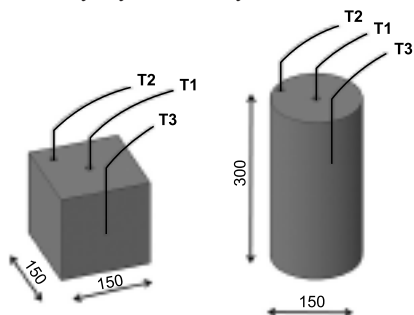
\*\* Szkoła Główna Służby Pożarnej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego



Rys. 1. Przykładowy proces wygrzewania do 300 °C betonowych próbek sześciennych o boku 150 mm

[Źródło: opracowanie własne]

nie temperatury w trakcie standardowego pożaru. Następnie po osiągnięciu założonej temperatury (300, 450, 600 °C) próbki wygrzewano w piecu do momentu wyrównania temperatur na termoparach pomiarowych ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) rozmieszczonych, tak jak na rysunku 2. Po wygrzaniu w piecu i wystudzeniu, próbki poddawano badaniom wytrzymałościowym.



Rys. 2. Rozmieszczenie termopar w próbkach:  $T_1$  – w rdzeniu próbki;  $T_2$  – w narożu (3 cm od każdej z krawędzi w połowie wysokości w przypadku próbki kostki lub 3 cm od bocznej powierzchni na  $\frac{1}{4}$  wysokości w przypadku walca);  $T_3$  – na powierzchni bocznej w połowie wysokości

[Źródło: opracowanie własne]

### Wyniki badań i ich analiza

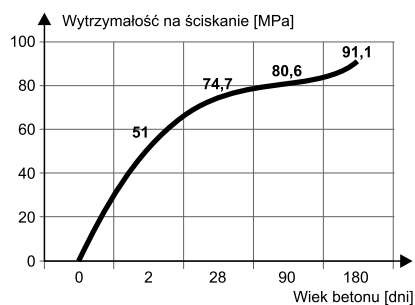
Na rysunku 3 przedstawiono rozwój wytrzymałości na ściskanie badanego betonu wysokowartościowego w okresie do 180 dni, a na rysunku 4 jak zmieniała się wytrzymałość na ściskanie badanego betonu w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury w porównaniu z prognozowanymi spadkami wytrzymałości zapisanymi w Eurokodzie 2 dla tej klasy betonu [15].

Zgodnie z Eurokodem 2 [15], wytrzymałość na ściskanie betonu wysokowartościowego klasy C55/67 spada, począwszy od momentu, gdy temperatura wzrośnie do 100 °C (rysunek 4). Zgodnie z badaniami autorów, wytrzymałość betonu wzrasta po ekspozycji na temperaturę 300 °C. Efekt ten prawdopodobnie spowodowany jest odparowywaniem wolnej wody z materia-

łu. Zwiększenie sił van der Waalsa skutkuje wzajemnym zbliżeniem się do siebie warstw żelu cementowego i wzrostem wytrzymałości zaczynu [11, 16]. Dopiero po przekroczeniu 300 °C wytrzymałość betonu zaczęła spadać, ale aż do 450 °C była na zbliżonym poziomie do wytrzymałości próbek niepoddanych oddziaływaniu wysokiej temperatury. Wynika z tego, że zapisy w normie PN-EN 1992-1-2 [15] dotyczące wytrzymałości na ściskanie betonów wysokowartościowych projektowanych na warunki pożarowe są bezpieczne, a w przypadku betonu przedstawionego w pracy, wydają się „asekuracyjne”.

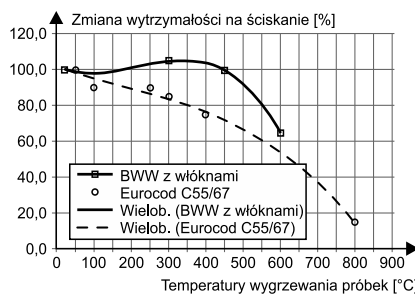
W 20 °C wytrzymałość betonu na rozciąganie przy rozłupywaniu (rysunek 5) wynosiła średnio 4,86 MPa (badanie prowadzono na próbkach sześciennych o boku długości 150 mm). Po poddaniu betonu oddziaływaniu wysokiej temperatury wytrzymałość na rozciąganie systematycznie malała (w przypadku 300 °C – spadek o 7%, 450 °C – spadek o 24%, 600 °C – spadek o 69%).

Procentowe zmiany wytrzymałości na ściskanie oraz współczynnika sprężystości badanego betonu w zależności od temperatury wygrzewania próbek w stosunku do oznaczeń prowadzonych na próbkach niewygrzewanych przedstawiono w tabeli 2.

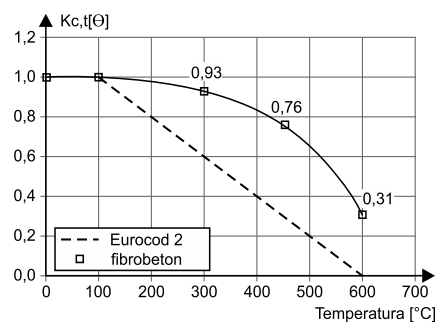


Rys. 3. Rozwój wytrzymałości na ściskanie badanego betonu wysokowartościowego w okresie do 180 dni

[Źródło: opracowanie własne]



Rys. 4. Porównanie zmiany wytrzymałości na ściskanie betonu w zależności od temperatury, na ekspozycję której został wystawiony, wg Eurokodu 2 [5] z wynikami badań własnych

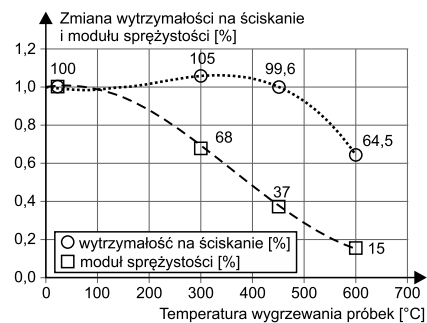


Rys. 5. Porównanie zmian wytrzymałości na rozciąganie betonu w zależności od temperatury, na ekspozycję której został wystawiony wg Eurokodu 2 [15] z wynikami badań własnych fibrobetonu

Tabela 2. Zmiana wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości betonu w zależności od temperatury wygrzewania próbek w stosunku do próbek niewygrzewanych

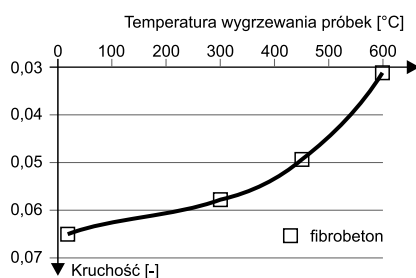
Temperatura wygrzewania próbek [°C]	Zmiana	
	wytrzymałości na ściskanie [%]	modułu sprężystości [%]
20	100	100
300	105,0	68
450	99,6	37
600	64,5	15

Istnieje wyraźna rozbieżność pomiędzy charakterem zmian wytrzymałości na ściskanie i współczynnika sprężystości w zależności od temperatury wygrzewania próbek betonowych (rysunek 6). Podczas gdy w 300 °C zaobserwować można tendencję wzrostową w przypadku wytrzymałości na ściskanie, to wartość modułu sprężystości wyraźnie spadła. Po poddaniu betonu ekspozycji w 450 °C zauważono redukcję wytrzymałości na ściskanie w stosunku do próbek wygrzewanych w 300 °C oraz dalszy spadek wartości współczynnika sprężystości.



Rys. 6. Zmiana wytrzymałości na ściskanie oraz modułu sprężystości betonów w zależności od temperatury wygrzewania próbek w stosunku do próbek niewygrzewanych [Źródło: opracowanie własne]

Zarówno po oznaczeniu wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu, jak również modułu sprężystości betonu poddanego oddziaływaniu wysokiej temperatury oraz zestawieniu tych cech z jego wytrzymałością na ściskanie można stwierdzić, że beton wystawiony na ekspozycję temperatury zbliżonej do warunków pożaru wykazuje znaczny wzrost kruchości (rysunek 7).

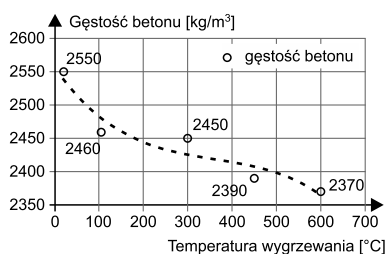


Rys. 7. Kruchość badanego betonu  
[Źródło: opracowanie własne]

Z naszych badań wynika, że beton po oddziaływaniu temperatury  $\geq 600$  °C traci praktycznie właściwości sprężyste.

W trakcie prowadzonych badań nie odnotowano zjawiska spallingu na żadnej z próbek, niezależnie od zadanej temperatury. Na próbkach nie pojawiły się również widoczne złuszczenia struktury oraz nie odnotowano wzrostu propagacji rys w porównaniu z próbkami niewygrzewanymi. Zauważalna była zmiana barwy próbek poddanych działaniu wysokiej temperatury w porównaniu z próbkami niewystawionymi na ekspozycję termiczną. Barwa próbek poddanych oddziaływaniu termicznemu zmieniła się z jasnoszarej (charakterystyczna dla betonu z cementem CEM I) na odcień beżowy. Po ekspozycji betonu na wysoką temperaturę nie stwierdzono kruszenia się narożników lub uszkodzenia krawędzi spowodowanego działaniem temperatury do 600 °C.

Wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania zaobserwowano systematyczne zmniejszanie się gęstości betonu (rysunek 8). Powyżej 600 °C w betonie z dodat-



Rys. 8. Zmiana gęstości badanego betonu w zależności od temperatury wygrzewania próbek  
[Źródło: opracowanie własne]

kiem włókien polipropylenowych odnotowano spadek gęstości o 7% w porównaniu z gęstością, jaką miał w 20 °C. Wszystkie próbki poddane były suszeniu do stałej masy w temperaturze 105 °C (przez co najmniej 7 dni); zakładano, że w efekcie w próbkach nie będzie już wody wolnej. Gęstość betonu po działaniu temperatury 300, 450 i 600 °C nadal się obniżała (rysunek 8). Oznacza to, że ze wszystkich badanych próbek betonowych zaczęła uwalniać się woda chemicznie związana w żelu C-S-H.

### Wnioski

Analiza wyników oraz dokonane obserwacje pozwalają na stwierdzenie, że:

- ekspozycja betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien polipropylenowych na temperaturę 300 °C spowodowała wzrost jego wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wytrzymałości oznaczanej w temperaturze 20 °C. Po poddaniu betonu oddziaływaniu temperatury 450 °C wytrzymałość spadła w stosunku do wytrzymałości oznaczanej na próbkach niewygrzewanymi, natomiast po wygrzaniu betonu do temperatury 600 °C osiągnęła wartość równą 64% wytrzymałości oznaczanej na próbkach niewygrzewanymi;
- oddziaływanie wysokiej temperatury powoduje systematyczny spadek wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu BWW z dodatkiem włókien polipropylenowych;
- ekspozycja betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien polipropylenowych na temperaturę zbliżoną do warunków pożaru skutkuje redukcją modułu sprężystości. Moduł sprężystości betonu z dodatkiem włókien polipropylenowych w wysokiej temperaturze ma tendencję niewielkiego wzrostu w porównaniu z betonami bez udziału włókien;
- po ekspozycji betonu na temperaturę zbliżoną do warunków pożaru standardowa zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a jego wytrzymałością na rozciąganie zmienia się. Wzrostowi wytrzymałości betonu na ściskanie nie towarzyszył wzrost jego wytrzymałości na rozciąganie;
- oddziaływanie wysokiej temperatury powoduje znaczny wzrost kruchości betonu, spadek jego gęstości, zmianę barwy, a w temperaturze  $\geq 450$  °C – powstawanie na jego powierzchni drobnych rys.

### Literatura

[1] Kuś A., Tomaszewski M., Jackiewicz-Rek W., Drzymała T., Wpływ oddziaływania wysokiej temperatury na właściwości napowietrzonych betonów wysokowartościowych, Dni Betonu, Wisła, 2014, artykuł po recenzji, przewidziany do druku.

[2] Kowalski R., Obliczeniowa ocena nośności zginanych elementów żelbetonowych w sytuacji pożaru, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2008.

[3] Abramowicz M., Drzymała T., Kowalski R., Praktyczne aspekty wpływu wysokiej temperatury na beton oraz fibrobeton z dodatkiem włókien polipropylenowych, Dni Betonu, Wisła, 2012.

[4] Hager I., Tracz T., Wpływ wysokiej temperatury na wybrane właściwości betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien polipropylenowych, Dni Betonu, Wisła, 2008.

[5] Pliya P., Beaucour A-L., Noumowé A., Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature, Construction and Building Materials, 25/2011.

[6] Poon C-S., Azhar S., Anson M., Wong Y-L., Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, Cement and Concrete Research 31/2001.

[7] Ling T-C., Poon C-S., Kou S-C., Influence of recycled glass content and curing conditions on the properties of self-compacting concrete after exposure to elevated temperatures, Cement and Concrete Composites, 34/2012.

[8] Husem M., The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete, Fire Safety Journal, 41/2006.

[9] Biolzi L., Cattaneo S., Rosati G., Evaluating residual properties of thermally damaged concrete, Cement & Concrete Composites, 30/2008.

[10] Saad A., Abo-El-Enain S. A., Hanna G. B., Kotkata M. F., Effect of temperature on physical and mechanical properties of concrete containing silica fume, Cement. and Concrete Research, Vol. 26, No. 5, 1996.

[11] Chen B., Li C., Chen L., Experimental study of mechanical properties of normal-strength concrete exposed to high temperatures at an early age, Fire Safety Journal 44/2009.

[12] ISO 834, Fire resistance test elements of building construction. International Standard, Geneva, 1985.

[13] PN-EN 1991-1-2:2006/NA:2010P, Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.

[14] PN-EN 206-1:2003P Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

[15] PN-EN 1992-1-2:2008/NA:2010P, Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.

[16] Behnood A., Ghandehari M., Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures, Fire Safety Journal, 44/2009.