

mgr inż. Artur Kuś*

mgr inż. Mariusz Tomaszewski*

dr inż. Wioletta Jackiewicz-Rek*

st. kpt. dr inż. Tomasz Drzymała**

Wytrzymałość a trwałość betonów wysokowartościowych po ekspozycji na wysoką temperaturę

Strength versus durability of high-grade concretes after exposure to high temperatures

Streszczenie. W artykule przedstawiono, jak zmieniają się właściwości, również te związane ze szczelnością betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien polipropylenowych po oddziaływaniu wysokiej temperatury: 300, 450 i 600 °C. Dojrzwianie betonu odbywało się w temperaturze 20 °C przez 28 dni w warunkach normowych. Program badań obejmował badania wytrzymałościowe betonu oraz oznaczenia nasiąkliwości i głębokości penetracji wody pod ciśnieniem. Przedstawiona analiza wyników badań pozwala na sformułowanie tezy, że w przypadku elementów konstrukcyjnych poddanych oddziaływaniu pożaru, o ich trwałości w danych warunkach środowiskowych niekoniecznie musi decydować ich nośność.

Słowa kluczowe: pożar, beton, fibrobeton, wytrzymałość, trwałość betonów wysokowartościowych.

Abstract. This paper presents how properties of the concrete change, also the one related to high-grade concrete tightness with addition of poly-propylene fibres, after impact of high temperature of 300, 450 and 600 °C. Maturation of concrete was conducted at 20°C for 28 days at standard conditions. Research program included studies of hardened concrete properties, including strength properties, as well as water absorption and depth of penetration of water under pressure. Presented analysis of study results enabled formulation of the daring thesis, that in a case of structural elements exposed to fire, their durability at the specific conditions was not necessarily determined by their bearing capacity.

Keywords: fire, concrete, fibers reinforced concrete (FRC), compressive strength, durability of high-grade concretes.

Beton jest materiałem niepalnym i stanowi naturalną barierę powstrzymującą rozprzestrzenianie się ognia. Wystawiony na ekspozycję wysokiej temperatury zbliżonej do warunków pożaru nie wytwarza gazów toksycznych ani nie wydziela dymu, ale jednak w jego strukturze zachodzi wiele przemian fizycznych oraz reakcji chemicznych. Wpływają one na pogorszenie właściwości oraz prowadzą do nieodwracalnych zmian w strukturze lub do całkowitego zniszczenia materiału.

Trwałość betonu w konstrukcji zależy od wielu czynników. W PN-EN 206-1 [1] uzyskanie trwałego betonu związane jest z projektowaniem go zgodnie z wymaganiami danej klasy ekspozycji, bądź kombinacji klas. Należy przy tym odpowiednio dobrać składniki betonu (ilościowo i jakościowo) oraz właściwie ukształtować jego mikrostrukturę (projektowanie składu, właściwe dozowanie, mieszanie, transport, układanie, zagęszczanie, pielęgnacja). Ważne jest też właściwe użytkowanie konstrukcji (zgodnie z jej pierwotnym przeznaczeniem).

W przypadku projektowania betonu do obiektów narażonych na oddziaływanie warunków pożaru zgodnie z normą PN-EN 1992-1-2 [2] zapewnienie trwałości jest działaniem bardziej złożonym. W [2] są jedynie zapisy dotyczące tego, że

można poprawić odporność betonu na działanie ognia oraz zmniejszyć ryzyko termicznego eksplozyjnego odpryskiwania przez stosowanie:

- w składzie betonu **zbrojenia rozproszonego** w postaci włókien polipropylenowych. W podwyższonej temperaturze włókna ulegają degradacji, pozostawiając w strukturze betonu kanaliki, które umożliwiają transport pary wodnej powstałej w efekcie oddziaływania termicznego na zewnątrz betonu. Skutkuje to znacznym obniżeniem ciśnienia pary wodnej w porach betonu [3] i zapobiega miejscowemu przekroczeniu wytrzymałości na rozciąganie;

- **siatek zbrojeniowych** o oczkach mniejszych lub równych 50 x 50 mm z drutów średnicy większej niż 2 mm, chociaż w [4] stwierdzono, że stosowanie metalowych siatek zbrojeniowych z drutu o średnicy mniejszej niż 2 mm (0,6 i 1,6 mm) przy jednoczesnym dodatku włókien polipropylenowych do mieszanki betonowej pozwala nie tylko efektywnie zapobiegać zjawisku „spallingu”, ale również utrzymać wytrzymałość na ścislenie betonu poddanego oddziaływaniu wysokiej temperatury na poziomie 90% w stosunku do jego wytrzymałości przed ekspozycją na temperaturę zbliżoną do warunków pożaru.

W literaturze spotkać można również inne sposoby poprawy odporności betonu na oddziaływanie wysokiej temperatury, w tym przez:

- **napowietrzenie betonu** (koncepcja napowietrzenia jako sposobu poprawy odporności betonu na oddziaływanie

* Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

** Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Wydział Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego

wysokiej temperatury zaistniała w związku ze znacznie niższymi spadkami wytrzymałości betonów lekkich poddawanych obciążeniu termicznemu niż betonów zwykłych);

• **stosowanie dodatków mineralnych oraz dobór odpowiedniego kruszywa** (stosowanie w składzie betonu dodatków mineralnych w postaci granulowanego żużla wielkopiecowego i popiołu lotnego sprawia, że zachowuje on lepsze właściwości w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury [5]). Zastosowanie pyłu krzemionkowego również skutkuje poprawą właściwości mechanicznych betonu [5, 6], ale stosowanie tego dodatku w ilości większej niż 5% w stosunku do masy cementu powoduje zagrożenie występowaniem zjawiska termicznego eksplozyjnego odpryskiwania betonu [5].

Badania

Celem badań było sprawdzenie wpływu oddziaływania wysokiej temperatury na beton wysokowartościowy (BWW) z dodatkiem włókien polipropylenowych w ilości 1,5 kg/m³. Przyjęty zakres obejmował badania właściwości wytrzymałościowych stwardniałego betonu oraz cech związanych ze szczelnością betonu, w tym nasiąkliwości i głębokości penetracji wody pod ciśnieniem. Badania prowadzono w temperaturze laboratoryjnej (20 °C) oraz wygrzewając próbki do 300, 450 i 600°C.

Materiały stosowane do badań i ich charakterystyka. Do wykonania mieszanek betonowych zastosowano, jako spoiwo, cement portlandzki CEM I 42,5R w ilości 450 kg/m³. Wyniki badań własnych (tabela 1) potwierdziły jego właściwości deklarowane przez producenta zgodne z normą PN-EN 197-1: 2012E [7]. Skład zastosowanego cementu podano w tabeli 2. We wszystkich mieszankach betonowych kruszywo drobne stanowił piasek wiślany (punkt piaskowy 37%), a grube – grys bazaltowy frakcji 2/8 i 8/16 mm. W składzie mieszanki znajdowały się włókna polipropylenowe (fotografia)

Tabela 1. Wyniki badań własnych cementu CEM I 42,5R

Wiek próbki [dni]	Wytrzymałość na zginanie [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
2	6,08	25,5
7	8,62	39,9
28	8,69	51,8
56	8,84	51,5

Tabela 2. Wyniki analizy XRD (dyfrakcja promieniowania rentgenowskiego) cementu CEM I 42,5R użytego do badań

Skład (faza)	Związek chemiczny	Zawartość [%]
Krzemian trójwapniowy	3CaO · SiO ₂	63,21
Krzemian dwuwapniowy	2CaO · SiO ₂	8,22
Glinian trójwapniowy	3CaO · Al ₂ O ₃	3,66
Feryt	Fe ₂ O ₃ (hematyt) Fe ₃ O ₄ (magnetyt)	9,90
Glinian itru	YAlO ₃	2,60
Tlenek wapnia	CaO	0,65
Portlandyt	Ca(OH) ₂	0,14
Peryklaz	MgO	0,40
Arkanit	K ₂ SO	0,98
Gips dwuwodny	CaSO ₄ · 2H ₂ O	3,85
Gips półwodny	CaSO ₄ · 1/2H ₂ O	1,40
Anhydryt	CaSO ₄	0,01
Kalcyt	CaCO ₃	4,75
Kwarc	SiO ₂	0,19

[Tabela 1 i 2 – źródło: opracowanie własne]

w ilości 1,5 kg/m³ oraz do mieszka upłynniająca, w celu uzyskania założonej konsystencji mieszanki betonowej.

Metodyka badawcza.

Wszystkie próbki, po osiągnięciu przez beton wieku 28 dni, były suszone w temperaturze 105 °C przez 7 dni. W próbkach „świadkach” umieszczono termopary do kontroli temperatury podczas wygrzewania próbek. Wygrzewanie prowadzono w średnotemperaturowym elektrycznym piecu komorowym typu PK 1100/5 wg krzywej „standardowej” ISO 834 [8] oraz PN-EN 1991-1-2 [9]. Próbki wygrzewano w piecu do momentu wyrównania temperatury na wszystkich termoparach pomiarowych (w rdzeniu, w narożach próbek i przy powierzchni bocznej). Po wygrzaniu w piecu i wystudzeniu, próbki poddawano dalszym badaniom zgodnie z planem eksperymentu. Badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem przeprowadzono zgodnie z PN-EN 12390-8:2011P [10], a oznaczenia nasiąkliwości – PN-88/B-06250 [11].



Mikrowłókna polipropylenowe użyte do betonu wysokowartościowego

[Źródło: opracowanie własne]

Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań właściwości stwardniałego betonu w zależności od temperatury, na ekspozycję której został on wystawiony, zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Właściwości betonu po ekspozycji w różnej temperaturze

Badana cecha	Temperatura wygrzewania* próbek [°C]			
	20	300	450	600
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	74,7	78,4	74,4	48,2
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]	4,86	4,54	3,68	1,50
Moduł sprężystości [MPa]	47742	32246	17791	7224
Nasiąkliwość [%]	4,21	4,34	4,54	5,10
Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem [mm]	3	71	88	150**

* wszystkie badania przeprowadzono na próbkach wystudzonych w powietrzu, w warunkach laboratoryjnych (temperatura powietrza 20 ± 2 °C, wilgotność względna powietrza 50 ± 60%)

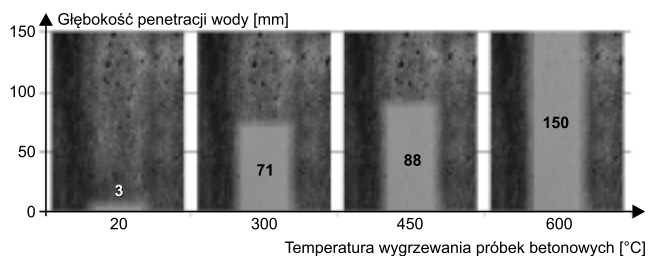
** badanie przerwano po 45 min, próbka przesiąkła

[Źródło: opracowanie własne]

Nasiąkliwość badanego betonu w 20 °C wynosiła 4,21%. Po poddaniu betonu działaniu temperatury 300 °C nasiąkliwość wzrastała, osiągając wynik 4,34%. Dalszy wzrost temperatury wygrzewania próbek skutkowało wzrostem nasiąkliwości betonu do wartości 5,1% przy temperaturze ponad 600 °C.

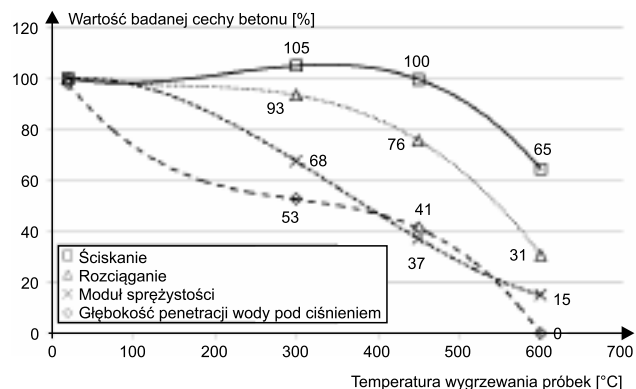
Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem badanego betonu w 20 °C wyniosła jedynie 3 mm; po poddaniu betonu działaniu temperatury 300°C zaobserwowano radykalny wzrost zawilgocenia (zmiana z 3 na 71 mm), co przypuszczalnie spowodowane było tym, że włókna polipropylenowe, które dodano do mieszanki betonowej po ekspozycji betonu na temperaturę 300 °C, uległy częściowej degradacji, otwierając drogę dla wody wciskanej pod ciśnieniem. Wzro-

stowi temperatury towarzyszył wzrost zawilgocenia. Po oddziaływaniu temperatury 450 °C zawilgocenie wyniosło 88 mm, zaś temperatury 600 °C, nie można mówić o jakimkolwiek stawianym oporze betonów wysokowartościowych napływającej pod ciśnieniem wodzie. O przesiąknięciu próbek w badaniu decydowały minuty (badanie przerwano po 45 min; próbki przesiąkły, rysunek 1).



Rys. 1. Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem badanego betonu
[Źródło: opracowanie własne]

Na podstawie wyników badań własnych (rysunek 2) można stwierdzić, że podstawowa cecha betonu, jaką jest wytrzymałość na ściskanie, po wygrzewaniu betonu, aż do temperatury 450 °C stanowiła 100% wytrzymałości oznaczanej na próbkach niepoddanych obciążeniu termicznemu, dopiero po przekroczeniu tej temperatury osłabienie betonu następowało w znaczący sposób. Jeżeli oceny możliwości dalszego użytkowania konstrukcji po pożarze dokonamy tylko na podstawie wytrzymałości na ściskanie, to możemy utrzymać niemiarodajne wnioski. Po poddaniu betonu działaniu temperatury 300 i 450 °C, oprócz wytrzymałości na ściskanie, wszystkie inne cechy badanego betonu ulegają pogorszeniu (wytrzymałość na rozciąganie) lub znacznemu pogorszeniu (moduł sprężystości i głębokość penetracji wody pod ciśnieniem). Temperatura 600 °C powoduje drastyczny spadek modułu sprężystości oraz całkowitą utratę szczelności kompozytu, co może mieć ogromne znaczenie np. w przypadku konstrukcji tunelowych.



Rys. 2. Redukcja właściwości betonu w zależności od temperatury
[Źródło: opracowanie własne]

Nasiąkliwość betonu poddanego działaniu wysokiej temperatury jest stosunkowo niewielka, podczas gdy w tych samych warunkach – prowadząc badanie z wodą pod ciśnieniem – beton nie posiada już szczelności. Stosując modele obliczeniowe do analizy konstrukcji po pożarze (używając np. metody izotermy 500) przy założeniu standardowego przebiegu pożaru, również można wyciągnąć nieprawdziwe

wnioski. Po odrzuceniu przekroju zaznaczonego na elemencie izotermą 500, założono, że jego reszta nadaje się do dalszego użytkowania (parametry betonu pozostają bez zmian). Z założeń metody izotermy 500 wynika, że pozostawiamy beton, w którym mogła wystąpić temperatura rzędu 300, 400, 450 °C – jednak z badań własnych wynika, że w takim przypadku parametry mechaniczne betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien polipropylenowych są na zadowalającym poziomie, ale głębokość penetracji wody pod ciśnieniem ulega znacznemu zwiększeniu (beton traci połowę swojej pierwotnej szczelności). W efekcie może to doprowadzić do znacznego ułatwienia wnikania różnych mediów wewnątrz elementu, powodując jego korozję (np. mrozową) i zniszczenie. W dalszym użytkowaniu konstrukcji decydującą rolę odgrywać będą cechy betonu związane z trwałością, takie jak jego szczelność, a nie cechy wytrzymałościowe. Znaczna utrata szczelności betonu prowadzi do przyspieszenia korozji wewnętrznej betonu, a w efekcie utraty trwałości.

Wnioski końcowe

Analiza wyników przeprowadzonych oznaczeń oraz obserwacje dokonane podczas ich realizacji pozwalają na stwierdzenie, że podczas oceny stanu betonowej/żelbetonowej konstrukcji po pożarze niezwykle istotne są nie tylko cechy wytrzymałościowe betonu (szczególnie betonu z włóknami polipropylenowymi), ale również cechy związane z jego trwałością. Znaczne pogorszenie szczelności betonu (oznaczane np. jako głębokość penetracji wody pod ciśnieniem) w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury może mieć niejednokrotnie decydujący wpływ na ocenę przydatności konstrukcji do dalszej eksploatacji.

Literatura

- [1] PN-EN 206-1:2003/A2: 2006P, Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [2] PN-EN 1992-1-2:2008/NA: 2010, Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.
- [3] Jansson R., Boström L., The influence of Pressure in the Pore System on Fire Spalling of Concrete, Fire Technology, 46/2010.
- [4] Han C-G., Hwang Y-S., Yang S-H., Gowripalan N.: Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement, Cement and Concrete Research 35/2005.
- [5] Poon C-S., Azhar S., Anson M., Wong Y-L.: Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozolanic concretes at elevated temperatures, Cement and Concrete Research 31/2001.
- [6] Saad A., Abo-El-Enein 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.
- [7] PN-EN 197-1:2012P, Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [8] ISO 834, Fire resistance test elements of building construction. International Standard, Geneva, 1985.
- [9] PN-EN 1991-1-2: 2006/NA:2010P, Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne. Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.
- [10] PN-EN 12390-8:2011P, Badania betonu. Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem.
- [11] PN-88/B-06250, Beton zwykły.