

st. bryg. w stanie spocz. prof. dr hab. inż. Zoja BEDNAREK
Zakład Mechaniki Stosowanej, Szkoła Główna Służby Pożarniczej
st. kpt. dr inż. Tomasz DRZYMAŁA
Zakład Podstaw Budownictwa i Materiałów Budowlanych, Szkoła Główna Służby
Pożarniczej

Analiza wpływu wysokiej temperatury na zmianę wybranych parametrów wytrzymałościowych fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych

Omówienie
LEAD

W niniejszym referacie autorzy zaprezentowali wyniki badań wytrzymałościowych, których celem była analiza oddziaływania wysokich temperatur występujących podczas pożaru na wytrzymałość fibrobetonu z włóknami polipropylenowymi oraz oszacowanie wielkości spadku wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z betonem tej samej klasy bez dodatku włókien. Dodatkowo omówiono procedury badawcze oraz wyniki badań modułu sprężystości fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych poddanego oddziaływaniu wysokiej temperatury zbliżonej do temperatury występującej w środowisku pożaru. Podczas badań stwierdzono korzystny wpływ dodatku włókien polipropylenowych w ilości $1,2 \text{ kg/m}^3$ oraz dozowanych do mieszanki betonowej powyżej $1,2 \text{ kg/m}^3$ na właściwości wytrzymałościowe betonu w wysokich temperaturach.

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

1. Wprowadzenie

Pozytywne właściwości dodatku włókien polipropylenowych (PP) do betonu i zapraw są znane i dość szeroko wykorzystywane. Dodatek włókien eliminuje rysy i pęknięcia skurczowe w pierwszym okresie wiązania betonu [25].

W niniejszym opracowaniu zostaną przedstawione wyniki badań betonu z dodatkiem włókien PP. Celem dodatku włókien PP było przeciwdziałanie eksplozywnemu odpryskiwaniu betonu w czasie pożaru (thermal spalling). Zjawisko to występuje w pomieszczeniach wilgotnych o wilgotności przekraczającej 3%.

W związku z rozwojem budownictwa komunikacyjnego, w tym tuneli komunikacyjnych oraz występowaniem wielu groźnych pożarów w tych tunelach, po-

wodujących ogromne straty i wypadki śmiertelne, problem ten nabrał szczególnie ważnego znaczenia. Stwierdzono, że eksplozyjne odpryskiwanie betonu jest niebezpieczne dla użytkowników tuneli oraz ekip ratowniczych. Szczególnie niebezpieczeństwo występuje w przypadku konstrukcji wykonanych z betonu wysokowartościowego BWW [11, 21]. Beton ten charakteryzuje się niską porowatością i przepuszczalnością właściwą. W czasie pożaru w Eurotunelu pod kanałem La Manche, gdzie zastosowano BWW, zaobserwowano ubytki 20–30 cm warstwy na długości około 500 m, a w niektórych miejscach całkowity brak 50 cm warstwy betonu [11, 23, 24]. Zjawisko spallingu podczas działań ratowniczo-gaśniczych miało tak gwałtowny przebieg, że strażacy musieli osłaniać się przed odłamkami betonu lecącymi z dużą prędkością, co bardzo utrudniało przebieg akcji.

W latach 90. ubiegłego stulecia odkryto pozytywny wpływ dodatku włókien polipropylenowych do mieszanki betonowej, powodujący ograniczenie ryzyka występowania spallingu. Udowodnieniu tego pozytywnego wpływu poświęcono szereg prac naukowo-badawczych [3–9, 26, 27], w tym również finansowanych przez Komisję Europejską, dla której bezpieczeństwo w europejskich tunelach komunikacyjnych stało się węzłowym problemem. Ukierunkowano je na wyjaśnienie przyczyn eksplozyjnego odpryskiwania betonu oraz pozytywnego wpływu dodatku włókien PP na ograniczenie tego zjawiska [1, 2, 10, 12–23].

Na podstawie wyników teoretycznych i eksperymentalnych prac naukowych poświęconych wyjaśnieniu zjawiska eksplozyjnego odpryskiwania betonu stworzono kilka teorii, nie uzyskano jednak jednolitego, spójnego wyjaśnienia jego przyczyny. Aktualnie istnieją dwie podstawowe teorie dotyczące mechanizmu powstawania spallingu. W myśl pierwszej z nich, uznawanej głównie przez naukowców europejskich, podstawową przyczyną eksplozyjnego odpryskiwania zewnętrznej warstwy betonu jest wysokie ciśnienie gazu powstałe w wyniku odparowywania wilgoci w powierzchniowej warstwie konstrukcji betonowych przy równoczesnym spadku wytrzymałości betonu w wysokich temperaturach.

Druga teoria, rozwijana głównie przez naukowców amerykańskich, przyczyny spallingu wyjaśnia występowaniem wysokich naprężeń rozciągających w betonie. Nagromadzona energia potencjalna odkształcenia zostaje uwolniona w gwałtowny sposób, gdy przekroczy wartość energii pęknięcia materiału.

Należy stwierdzić, że obydwie przedstawione teorie zawierają istotne elementy tłumaczące to zjawisko. Według Anderberga [1], badającego zjawisko spallingu, naprężenia termiczne spowodowane wysokim gradientem temperatur mogą działać samodzielnie lub równocześnie ze wzrostem ciśnienia w porach.

Możemy z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że powstawaniu spallingu sprzyja:

- wilgotność większa niż 3%;
- obniżona porowatość;
- stan naprężeń spowodowany obciążeniem mechanicznym, wysokim gradientem temperatur oraz ciśnieniem pary wewnątrz betonu.

Obniżenie lub neutralizacja tych czynników powinna spowodować obniżenie ryzyka powstawania eksplozyjnego odpryskiwania w czasie pożaru.

Jedną z metod budzącą obecnie duże zainteresowanie naukowe i praktyczne jest stosowanie dodatku do betonu w postaci włókien PP, najczęściej ilości 0,1–0,2% objętości betonu. Badania prowadzone na większych fragmentach ścian tuneli potwierdzają skuteczność tej metody. Wyjaśnienie zwiększenia odporności na spalling w przypadku dodatku w postaci włókien PP wyjaśniono w następujący sposób: włókna PP w temperaturze około 160°C zaczynają topić się, co prowadzi do redukcji ich objętości. W temperaturze 360°C włókna ulegają degradacji. Powstałe po włóknach pustki tworzą w betonie kanaliki podwyższające porowatość i przepuszczalność betonu oraz odpływ nadmiaru pary wodnej, i tym samym obniżenie ciśnienia w porach betonu.

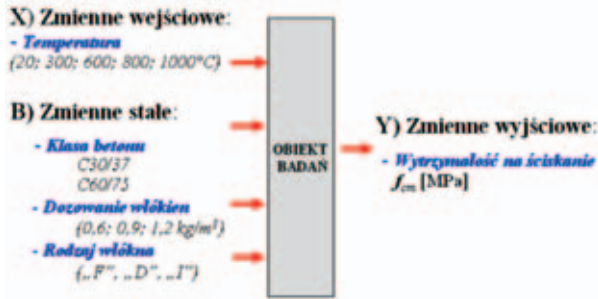
Biorąc pod uwagę niewątpliwie korzystny wpływ na ograniczenie spallingu dodatku włókien PP do betonu, autorzy zbadali, w jaki sposób dodatek ten wpływa na inne właściwości wytrzymałościowe betonu w warunkach wysokich temperatur pożaru. Pod tym kątem zbadano wpływ wysokiej temperatury na wytrzymałość na ściskanie oraz moduł sprężystości. Do wykonania próbek użyto betonu klasy C30/37 oraz C60/75, jako dodatku użyto włókien PP trzech rodzajów różniących się długością i grubością pojedynczych włókien w ilości 0,6 kg/m³, 0,9 kg/m³, 1,2 kg/m³. Włókna te stosowane są jako dodatki do mieszanki betonowej i są dostępne w całej Europie.

Wykonano badania wstępne w celu określenia wpływu temperatur pożarowych na właściwości palne włókien w atmosferze powietrza oraz w atmosferze azotu. Na podstawie tych badań ustalono, że duży wpływ na otrzymane wyniki w analizie TG oraz DTG ma skład atmosfery, w której postępuje rozkład próbek. Miał on znaczący wpływ na temperaturę początku rozkładu, temperaturę częściowego ubytku masy, temperaturę końca rozkładu, temperaturę maksymalnej szybkości ubytku masy oraz masę pozostałości nieulegającej rozkładowi i pozostałej w betonie. Wyniki tych badań pozwalają przypuszczać, że włókna PP w masie betonu, w warunkach braku dostępu wystarczającej ilości tlenu będą znacznie wolniej ulegać destrukcji. Obserwacje struktury za pomocą mikroskopu skaningowego (SEM) dotyczące stanu włókien wewnątrz próbek betonowych potwierdzają ten wniosek.

2. Wyniki badań wytrzymałościowych

2.1. Badanie wytrzymałości na ściskanie

Przedmiotem badań był beton klasy C30/37 oraz C60/75 z dodatkiem włókien w ilości 0,6 kg/m³, 0,9 kg/m³, 1,2 kg/m³ oraz beton bez dodatku włókien. Celem badań było ustalenie spadku wytrzymałości na ściskanie pod wpływem wysokich temperatur. Na rys. 1 przedstawiono program badań.



Rys. 1. Program badań wytrzymałości na ściskanie

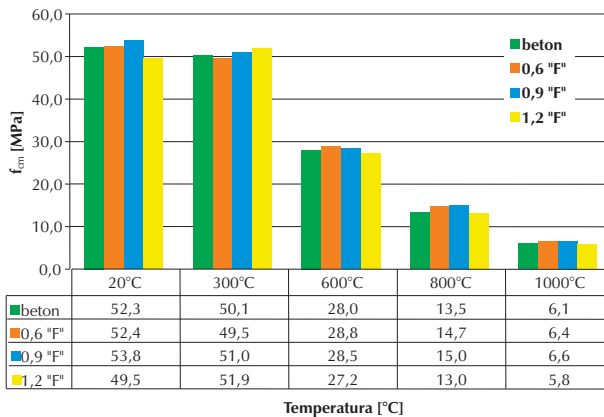
Fig. 1. Compressive strength tests program

Źródło: opracowanie własne.

Próbki do badań wykonano w kształcie walców o średnicy $d = 100$ mm i wysokości $h = 200$ mm. Próbki wygrzewano w piecu w temperaturach 300°C , 600°C , 800°C , 1000°C . Proces wygrzewania przebiegał zgodnie z krzywą „temperatura-czas” odpowiadającą rozkładowi temperatur w płycie betonowej na głębokości 50 mm. Prędkość nagrzewania wynosiła $5\text{--}6^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Po osiągnięciu założonej temperatury, na przyjętym rozkładzie temperatury próbki wygrzewano przez około 2 godziny w stałej temperaturze do wyrównania temperatury w całej próbce (na wszystkich czterech termoparach pomiarowych).

Wyniki badań opracowano w postaci tabelarycznej oraz graficznej. Badania miały charakter porównawczy.

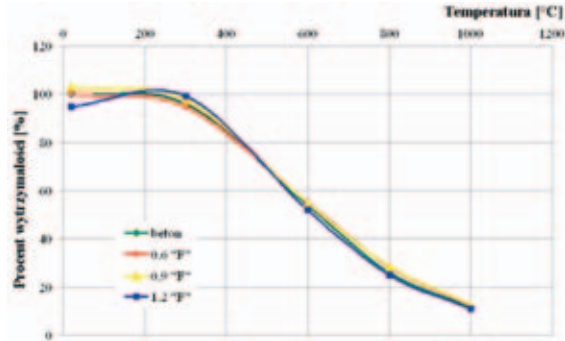
Dokonano porównań spadku wytrzymałości na skutek wzrostu temperatury wszystkich rodzajów próbek z dodatkiem włókien PP z próbkami betonowymi bez dodatku włókien w celu ustalenia metody wyznaczenia wytrzymałości na ściskanie fibrobetonu w temperaturach pożarowych. Przykładowe wykresy wynikowe przedstawiono na rys. 2, 3, 4 oraz 5.



Rys. 2. Zestawienie wytrzymałości na ściskanie betonu C60/75 z dodatkiem włókien „F” o różnej zawartości w betonie

Fig. 2. Compressive strengths of C60/75 class concrete with different content of „F”

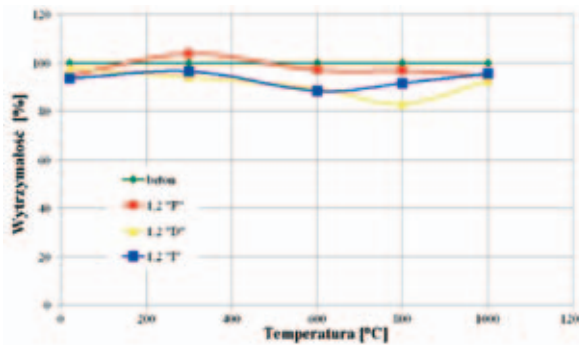
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3. Wytrzymałość na ściskanie betonu klasy C60/75 z włóknami „F” w porównaniu do wytrzymałości betonu bez włókien

Fig. 3. Compressive strength of C60/75 fiber reinforced concrete with addition of 1.2 kg/m³ of PP fibers in comparison with concrete without fibers

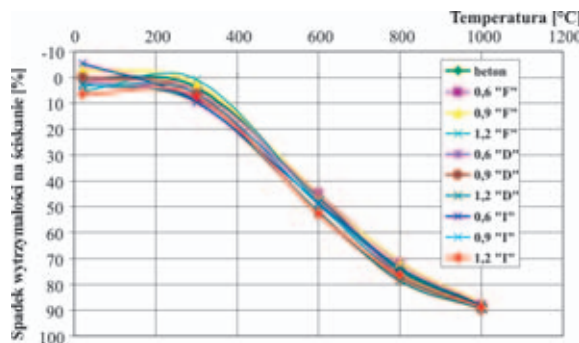
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4. Względny spadek na ściskanie fibrobetonów C60/75 z dodatkiem włókien PP w ilości 1,2 kg/m³ w stosunku do betonu bez dodatku włókien

Fig. 4. Relative decrease of compressive strength of C60/75 fiber reinforced concretes with 1.2 kg/m³ of PP fibers in comparison with concrete without fibers

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5. Zestawienie wytrzymałości na ściskanie wszystkich badanych fibrobetonów oraz betonu klasy C60/75

Fig. 5. Compressive strengths for all studied fiber reinforced concretes and C60/75 concrete

Źródło: opracowanie własne.

2.2. Badanie modułu sprężystości

Oznaczenia modułu sprężystości dokonano na próbkach betonowych klasy C30/37 oraz C60/75 bez dodatku włókien oraz z dodatkiem włókien PP, zgodnie z procedurą przewidzianą w normach [28, 29]. Do wykonania próbek fibrobetonowych wykorzystywano włókna „F” dodane do betonu w ilości $1,2 \text{ kg/m}^3$.

Próbki oraz warunki ich wygrzewania w piecu były identyczne jak w przypadku badania wytrzymałości na ściskanie. Program badań przedstawiono na rys. 6.

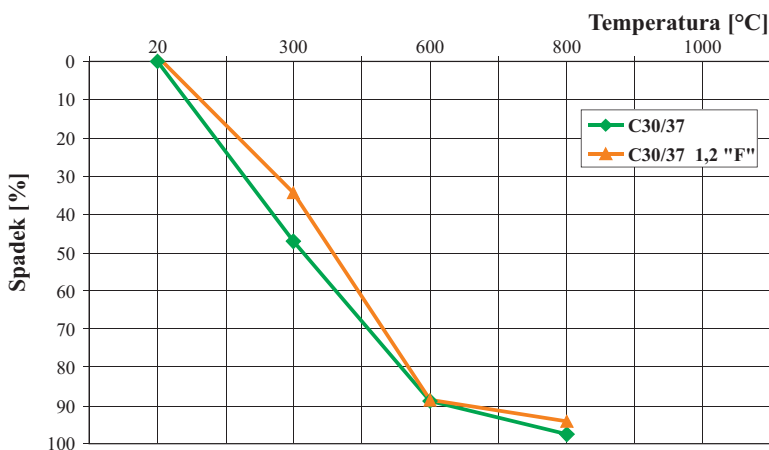


Rys. 6. Program badań przy oznaczeniu modułu sprężystości

Fig. 6. Elasticity modulus tests program

Źródło: opracowanie własne.

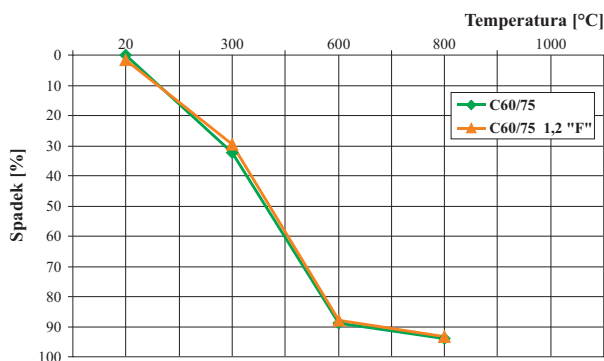
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono uzyskane wyniki.



Rys. 7. Spadek modułu sprężystości betonu i fibrobetonu klasy C30/37 z dodatkiem włókien „F” w temperaturach pożarowych

Fig. 7. Reduction of elasticity modulus of concrete and fiber reinforced concrete of C30/37 class with „F” fibers at fire temperatures

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 8. Spadek modułu sprężystości betonu i fibrobetonu klasy C60/75 z dodatkiem włókien „F” w temperaturach pożarowych

Fig. 8. Reduction of elasticity modulus of concrete and fiber reinforced concrete of C60/75 class with „F” fibers at fire temperatures

Źródło: opracowanie własne.

3. Wnioski z przeprowadzonych badań

Na podstawie uzyskanych wyników sformułowano następujące wnioski:

1. Dodatek włókien PP ma niekorzystny wpływ na wytrzymałość betonu C30/37 na ściskanie głównie w temperaturach normalnych oraz podwyższonych do około 200°C. Powyżej 300°C spadek wytrzymałości betonu tej klasy jest identyczny do spadku wytrzymałości betonu bez dodatku PP.
2. W przypadku fibrobetonu i betonu klasy C60/75 spadek wytrzymałości na ściskanie w pełnym zakresie temperatur można uznać za identyczny.
3. Nie zauważono istotnego wpływu rodzaju zastosowanych włókien PP na spadek wytrzymałości na ściskanie dla obydwu klas fibrobetonu.
4. W przypadku obydwu klas fibrobetonu wytrzymałość na ściskanie ulega obniżeniu w wysokich temperaturach. Spadek wytrzymałości betonu C30/37 następuje szybciej. W temperaturze 800°C wytrzymałość betonu i fibrobetonu klasy C30/37 spada o około 90%, natomiast w przypadku betonu i fibrobetonu klasy C60/75 taki spadek występuje w temperaturze 1000°C.
5. Analizując wyniki badań pod kątem wpływu dodatku włókien PP do betonu w ilości nie przekraczającej 1,2 kg/m³, można stwierdzić, że ten dodatek nie powiększa spadku wytrzymałości betonu w temperaturach pożarowych, oraz że w przypadku fibrobetonu z dodatkiem PP można zastosować identyczną, jak w przypadku betonów bez dodatku włókien, zasadę wyznaczenia wytrzymałości w temperaturach pożarowych. Zatem zredukowana wytrzymałość na ściskanie betonu z dodatkiem włókien PP w temperaturze T może być określone wzorem:

$$f_{ck}(T) = k_c(T) \cdot f_{ck} \quad (1)$$

gdzie:

f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie fibrobetonu w temperaturze normalnej (20°C),

$k_c(T)$ – wartość współczynnika redukcji przyjęta jak dla betonu odpowiedniej klasy bez dodatku włókien.

6. Na podstawie analizy uzyskanych wyników należy stwierdzić korzystny wpływ dodatku włókien PP na moduł sprężystości betonu klas C30/37 oraz C60/75 w wysokich temperaturach pożaru.
7. W obydwu przypadkach obserwujemy tendencje wzrostowe większe w przypadku C30/37. W temperaturze normalnej nie obserwujemy zmian modułu sprężystości na skutek dodatku włókien PP.
8. W temperaturach podwyższonych i wysokich obserwujemy nieco mniejszy spadek modułu sprężystości betonu w przypadku fibrobetonu z dodatkiem PP. Szczególnie zauważalne jest to w temperaturze 300°C.

Reasumując, dodatek włókien polipropylenowych w ilości 1,2 kg/m³ do betonu w celu uodpornienia betonu na występowanie w czasie pożaru niebezpiecznych eksplozyjnych odprysków (spalling) jest korzystny również z punktu widzenia wytrzymałości betonu w temperaturach pożarowych.

Literatura

- [1] Anderberg Y.: Spalling Phenomena of HPC and OC. NIST Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete, February 13–14, Gaithersburg 1997.
- [2] Bazant Z.P., Kaplan M.F.: Concrete at High Temperatures. Material Properties and Mathematical Models, Longman, Harlow, 1996.
- [3] Bednarek Z., Drzymała T.: Wpływ temperatur występujących podczas pożaru na wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu. *Zeszyty Naukowe SGSP* 2008, nr 36.
- [4] Bednarek Z., Drzymała T.: Wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych w warunkach termicznych pożarów. VI Międzynarodowa Konferencja Bezpieczeństwo Pożarowe Budowli, Warszawa 18–19 listopada 2008.
- [5] Bednarek Z., Krzywobłocka-Laurów R., Drzymała T.: Effect of high temperature on the structure phase composition and strength of concrete. *Zeszyty Naukowe SGSP* 2009, nr 37.
- [6] Bednarek Z., Drzymała T.: Influence of high temperature and type of polypropylene fibres on compressive strength of reinforced concrete. International Conference Fire Protection, Ostrava 2009.
- [7] Drzymała T., Półka M.: Analiza zachowania się włókien polipropylenowych stosowanych do fibrobetonu w temperaturach pożarowych. *Zeszyty Naukowe SGSP* 2011, nr 42.
- [8] Drzymała T., Bednarek Z.: Wybrane kierunki zastosowań fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych poddanego oddziaływaniu wysokiej temperatury. *Logistyka* 2011, nr 6.
- [9] Drzymała T., Bednarek Z.: Analiza wyników badań modułu sprężystości fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych poddanego oddziaływaniu wysokiej temperatury. *Logistyka* 2011, nr 6.

- [10] Diederichs U., Schneider U.: High temperature properties and spalling behaviour of high strength concrete. *Proceedings of Fourth Weimar Workshop on High Performance Concrete*, HAB Weimar, Germany, s. 219–235.
- [11] Gawin D., Pasavento F., Majorana C.E., Schrefler B.A.: Modelling of degradation process of concrete structures at high temperature with application to tunnel fires. *XXI Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane”*, Szczecin-Międzyzdroje 20–23 maja 2003.
- [12] Hertz K.: Heat – induced explosion of dense concretes. *Technical University of Denmark, Institute of Building Design, Report No 166*, 1998.
- [13] Hertz K.: Limits of Spalling of Fire Exposed Concrete. *Fire Safety Journal* 2003, vol. 38, s. 103–116.
- [14] Hertz K.D.: Concrete strength for fire safety design. *Magazine of Concrete Research* 2005, nr 8.
- [15] Kalifa P., Menneteau F.D., Ouenard D.: Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. *Cem. and Conc. Res.* 2000 (30) s. 1915–1927.
- [16] Kalifa P., Chene G., Galle C.: High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructure. *Cem. Concr. Res.* 2001 (31), s. 1487–1499.
- [17] Khoury G.A.: Design of concrete for better performance in fire. *IMechE* 1992, C438/042, s. 121–127.
- [18] Khoury G.A.: Effect of Heat on Concrete – spalling. *Materiały kursu „Effect of Heat on Concrete” C1SM*, Roma, June 9–13, 2003.
- [19] Khoury G.A.: Polypropylene fibers in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modelling criteria. *Magazine of Concrete Research* 2008, 60, No. 3, April, s. 189–204.
- [20] Phan L.T., Carino N.J., Duthinh D., Garboczi E.: *Proceedings of International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete*. NIST. Gaithersburg, February 13–14, 1997.
- [21] Phan L.T., Carino N.J.: *Mechanical Properties of High-Strength Concrete at Elevated Temperatures*. NISTIR 6725, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, March 2001.
- [22] Phan L.T.: High – Strength Concrete at High Temperature – An Overview, *Utilization of High Strength Performance Concrete”*. 6th International Symposium Proceedings, vol. 1, June 2002.
- [23] Uim F.J., Coussy O., Bazant Z.T.: The Chunnel Fire I: Chemoplastic Softening in Rapidly Heated Concrete. *Journal of Eng. Mech. ASCE* 125, March 1999, s. 272–282.
- [24] Uim F.J., Acker P., Levy M.: The Chunnel Fire. II: Analysis of Concrete Damage. *Journal of Eng. Mech. ASCE* 3 25, March 1999, s. 283–289.
- [25] Woyciechowski P.: *Analiza zjawisk skurczowych w pierwszej dobie dojrzewania tworzyw cementowych modyfikowanych domieszkami i dodatkami*. Praca doktorska, Politechnika Warszawska WIL, 1999.
- [26] *Praca naukowo-badawcza: „Wpływ temperatur występujących podczas pożaru na wybrane parametry wytrzymałościowe fibrobetonu”*. S/E 422/8/2007, I i II Etap, kierownik naukowy Bednarek Z., SGSP Warszawa 2008/2009.

- [27] Praca naukowo-badawcza: „Badanie wpływu temperatur występujących podczas pożaru na wytrzymałość fibrobetonu”. BW/E-422/8/2008, kierownik pracy Drzymała T., SGSP Warszawa 2008.
- [28] PN-EN 13286-43: 2005. „Mieszanki niezwiązane i związane spoiwem hydraulicznym. Część 43: Metoda oznaczania modułu sprężystości mieszanek związanych spoiwem hydraulicznym”.
- [29] ISO 6784: 1982. „Concrete – Determination of static modulus of elasticity in compression”.

Zoja BEDNAREK
Tomasz DRZYMAŁA

Analysis of Influence of High Temperature on Changes of the Selected Strength Parameters of Fiber Reinforced Concrete with Polypropylene Fibers

In construction engineering practice impact of high temperatures occurring during fire on the concrete structures is an important issue. An unfavorable phenomenon associated with high temperature is surface spalling of large concrete parts, which has a significant impact on the safety of the whole building structure, users and rescue teams. “Concrete thermal spalling” phenomenon in the foreign literature is called “spalling”. One of the possibilities of preventing this negative phenomenon is a technological method consisting in addition of polypropylene fibers to concrete mix. The method results in the increase of resistance of the concrete structure to the explosive spalling in the conditions of increased humidity. In the road tunnels and other non-heated compartments, concrete is characterized by the relatively high water content. The results of many tests prove that the addition of polypropylene fibers (PP) can have a positive impact on the concrete structures subjected to high temperatures and can reflect to the reduction of “spalling” effect.

Investigations of high temperatures impact occurring during the fire, on the basic strength parameters of the concrete with addition of polypropylene fibers, were carried out in Poland, at Cracow University of Technology and Main School of Fire Services, among the others. Zoja Bednarek and Tomasz Drzymała conducted investigations at the Main School of Fire Services. During the studies advantageous effect of the addition of 1.2 kg/m³ and above of polypropylene fibers to the concrete mix on the concrete strength properties at high temperatures have been demonstrated.

SUMMARY

In the presented paper the results of strength tests are shown, which aimed at analyzing the impact of high temperatures occurring during the fire on the strength of fiber reinforced concrete with polypropylene fibers, as well as estimating reduction of compressive strength compared to the concrete of the same class but without addition of fibers. Additionally, the applied research methods are discussed and elasticity modulus test results of fiber reinforced concrete subjected to high temperatures close to fire temperatures are presented.

Taking into account the undoubtedly positive influence of PP fibers addition on the reduction of concrete "spalling", the authors investigated the manner in which such addition influences different strength properties of the concrete at high temperatures conditions. From this point of view the impact of high temperatures on the compressive strength and elasticity modulus were investigated. Samples were prepared with the use of normal C30/37 class concrete and high strength C60/75 class concrete. For the concrete mix three different types of polypropylene fibers were used, differing in length and thickness of single fibers, in the following amount: 0.6 kg/m³, 0.9 kg/m³, and 1.2 kg/m³. The selected fibers used as the additives to concrete mix are easily available on the European market. Preliminary studies were carried out to determine the influence of fire temperatures on the flammable properties of fibers in oxygen and nitrogen atmosphere. The conducted studies have demonstrated a significant impact of the atmosphere, in which degradation of samples take place, on the results of TG and DTC analysis. The atmosphere had a crucial effect on the initial temperature of degradation, temperature of the partial mass loss, temperature of termination of degradation, temperature of maximum mass loss rate and non-degradable residues mass remaining in the concrete. The results of the studies allow assuming that in the conditions of oxygen depletion, degradation of PP fibers in the concrete would occur much slower. The above assumption has been confirmed by the observations of the concrete structure, by means of scanning microscope (SEM), with regards to the fibers condition inside the concrete samples. Based on the obtained results the following conclusions have been formulated:

1. The addition of PP fibers has a negative impact on the compressive strength of C30/37 class concrete, especially in normal temperatures and temperatures raised to about 200°C. Above 300°C a reduction of strength of this concrete is identical to the strength reduction of the concrete without PP fiber addition.
2. In case of fiber reinforced concrete and C60/75 class concrete, compressive strength reduction in the whole temperature range can be considered as identical.
3. No significant influence of the type of the applied PP fibers on the reduction of compressive strength for both classes of fiber reinforced concrete has been demonstrated.
4. In case of both classes of fiber reinforced concrete the compressive strength is reduced in high temperatures. Moreover, the strength reduction of C30/37 concrete proceeds faster. At 800°C the strength of normal concrete and fiber reinforced concrete of C30/37 class decreases of about 90%, whereas in case of concrete and fiber reinforced concrete of C60/75 class such reduction occurs at 1000°C.

5. Analyzing the results with regards to the impact of PP fibers addition to the concrete in the quantities above 1.2 kg/m^3 , it can be concluded that such addition does not enhance strength reduction of the concrete in fire temperatures. Therefore, in case of fiber reinforced concrete the identical principles can be applied for strength determination, as in case of the concrete without PP fibers in fire temperatures. The reduced compressive strength of the concrete with addition of PP fibers in temperature T can be described by the following formula:

$$f_{ck}(T) = k_c(T) \cdot f_{ck} \quad (1)$$

where:

f_{ck} – specific compressive strength of fiber reinforced concrete at normal temperature (20°C)

$k_c(T)$ – assumed reduction coefficient as for the corresponding class concrete without addition of fibers.

6. Based on the results analysis a positive impact of PP addition on the elasticity modulus of C30/37 and C60/75 class concrete in high fire temperatures can be concluded.
7. In both cases higher growing tendencies have been observed for C30/37. In normal temperature no impact of PP fibers addition on the elasticity modulus values can be noticed.
8. At the elevated and high temperatures a slightly lower elasticity modulus reduction in case of fiber reinforced concrete with PP fibers can be observed. It is especially evident at 300°C .

Summing up: addition of 1.2 kg/m^3 of polypropylene fibers to the concrete, in order to reinforce the concrete against dangerous explosive spalling during the fire, is advantageous also from the point of view of the concrete strength at fire temperatures.

Keywords: fire, fi bers reinorced concreete (FRC), polypropylene fibers, elastic modulu.