

DRZYMAŁA Tomasz¹
BEDNAREK Zoja²

„WYBRANE KIERUNKI ZASTOSOWAŃ FIBROBETONU Z DODATKIEM WŁÓKIEN POLIPROPYLENOWYCH PODDANEGO ODDZIAŁYWANIU WYSOKIEJ TEMPERATURY”

W artykule przedstawiono charakterystykę oraz wybrane kierunki zastosowań włókien polipropylenowych stosowanych m.in. jako rozwiązanie technologiczne ograniczające ryzyko termicznego odpryskiwania betonu narażonego na oddziaływanie temperatur występujących w pożarze. Zamieszczono również analizę wybranych właściwości palnych trzech rodzajów włókien polipropylenowych (PP), stosowanych jako dodatek do mieszanek betonowych. Przeprowadzono badania wytrzymałościowe, 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.

„SELECTED FIELDS OF APPLICATION OF FIBRES REINFORCED CONCRETE WITH POLYPROPYLENE FIBRES SUBJECT TO HIGH TEMPERATURE”

This paper presents specification and fields of application of polypropylene fibers, used among the others as a technological solution limiting risk of concrete thermal spalling, subject to high temperatures during the fire. Analysis of the selected combustible properties of three types of polypropylene fibers (PP) applied as an additive for the concrete mix is discussed. Strength studies were conducted in order to analyze the influence of the high temperatures occurring during the fire on the strength of fibers reinforced concrete with polypropylene fibers, and to estimate the decrease in compressive strength compared to the concrete of the same class without the addition of fibers.

¹ The Main School of Fire Service, Faculty of Fire Safety, POLAND, Warsaw 01-629, Słowackiego 52/54.
Phone: +48 22 561-76-13, Fax: +48 22 833-07-24, E-mail: tomekdrzymala@wp.pl

² The Main School of Fire Service, Faculty of Fire Safety, POLAND, Warsaw 01-629, Słowackiego 52/54.
Phone: +48 22 561-73-87, Fax: +48 22 833-07-24, E-mail: zoja.bednarek@gmail.com

1. WPROWADZENIE

W praktyce budowlanej ważnym zagadnieniem jest zachowanie się betonu w trakcie pożaru. Niekorzystnym zjawiskiem związanym z oddziaływaniem wysokiej temperatury na konstrukcję żelbetową są odpryski powierzchniowe dużych fragmentów betonu co ma istotny wpływ na bezpieczeństwo całej konstrukcji budowlanej oraz użytkowników i ekip ratowniczych. Zjawisko to nazwane w języku polskim „termiczne eksplozyjne odpryskiwanie betonu” w literaturze angielskiej nazywane jest jako „spalling”. Jedną z możliwości przeciwdziałania temu niekorzystnemu zjawisku jest zabieg technologiczny polegający na dodatku włókien polipropylenowych do mieszanki betonowej pozwalający na zwiększenie odporności konstrukcji wykonanej z betonu wysokowartościowego (*ang. high strength concrete HSC*) na działanie wysokich temperatur w czasie pożaru, poprzez wpływanie na ograniczenie zjawiska eksplozyjnego odpryskiwania betonu [7 – 9, 11, 13 – 16].

Polipropylen (PP) należy do tworzyw termoplastycznych co oznacza, że pod wpływem podwyższonej temperatury mięknie i topi się, po przekroczeniu temperatury początku rozkładu termicznego ulega destrukcji, której towarzyszy powstawanie niewielkiej ilości monomeru i oligomerów. Produkty rozkładu termicznego składają się głównie z dużej ilości małowcząsteczkowych związków organicznych, w większości węglowodorów [6, 12, 18].

Modyfikacja właściwości mechanicznych materiałów kruchych poprzez dodatek różnego rodzaju i pochodzenia włókien znana jest od bardzo dawna. Większość firm zapewnia o tym, iż włókna polipropylenowe redukują występowanie skurczów i pęknięć, polepszając jednocześnie właściwości powierzchni oraz trwałość stwardniałych elementów betonowych, w niektórych przypadkach można się spotkać, iż włókna polipropylenowe zapewniają pasywną ochronę przed ogniem zwiększając trwałość elementów betonowych w przypadku pożaru.

Włókna z polipropylenu, z polietylenu, z nylonu i innych tworzyw sztucznych ogólnie nazwane w normie PN-EN 14889-2: 2007 [24] włóknami polimerowymi, stosowane są jako „zbrojenie” rozproszone betonu. Dynamiczny rozwój obserwowany jest przede wszystkim dla makrowłókien polimerowych (średnica > 0,30 mm) stosowanych w celu zwiększenia tzw. wytrzymałości resztkowej na zginanie. Włókna te mają zastosowanie konstrukcyjne tzn. wpływają na nośność elementu betonowego z włóknami. Podstawą formalno-prawną stosowania włókien jest zgodność z PN-EN 14889-2:2007 „Włókna do betonu. Część 2: Włókna polimerowe. Definicje, wymagania i zgodność”. Włókna również podlegają oznakowaniu CE.

Początki stosowania włókien polipropylenowych miały miejsce już ponad 40 lat temu [5, 10]. Zasadniczo najczęściej stosuje się włókna o długości od 12 do 19 mm i średnicy około 20 μm , a niekiedy nawet 50 – 100 μm . Niektórzy badacze twierdzą [4, 10], iż użycie takich włókien polipropylenowych w mieszance betonowej w ilości 0,6 – 1 kg/m^3 poprawia właściwości betonu na etapie wiązania i wczesnego twardnienia, redukując skutki osiadania plastycznego i skurczu termicznego, a także hamując skutki skurczu wskutek wysychania. Udowodnione eksperymentalnie pozytywne oddziaływanie włókien polipropylenowych na mieszankę betonową i niedojrzały beton jest dostatecznym uzasadnieniem ich stosowania w betonach towarowych przeznaczonych na podłogi przemysłowe.

Wyniki wielu prób dowodzą, że dodatek włókien polipropylenowych (PP) może mieć pozytywny wpływ na zachowanie się konstrukcji betonowych w wysokich temperaturach i przyczynić się do ograniczenia „spallingu”. Potwierdza to również raport z badań prowadzonych przez Channel Tunnel Rail Link (CTRL) oraz wyniki projektu UPTUN [9, 15]. Dodanie mikrowłókien polipropylenowych (średnica < 0,30 mm) w niewielkim stopniu wpływa na zmianę własności wytrzymałościowych betonu w normalnych, jak i w wysokich temperaturach [1 – 3, 19, 20].

W sprzedaży dostępne są różne typy włókien (PP) produkcji zarówno krajowej jak i zagranicznej. Badaniami prowadzonymi przez autorów w Zakładzie Mechaniki Stosowanej w Szkole Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie objęto trzy rodzaje włókien polipropylenowych (PP). Zbadano cechy użytkowe tych włókien i ich wpływ na zmianę parametrów wytrzymałościowych betonu zwykłego i wysokowartościowego (BWW).

W artykule skoncentrowano się na opisie charakterystyki włókien podanych oddziaływaniu wysokich temperatur oraz badano spadek wytrzymałości betonu na ściskanie w temperaturach normalnych i podwyższonych występujących w pożarze na modelowych próbkach z dodatkiem i bez dodatku włókien polipropylenowych klasy C30/37 oraz C60/75.

Z technicznego punktu widzenia, zastosowanie włókien polipropylenowych w ilości 0,1 – 0,2 % objętości betonu, stanowi skuteczne rozwiązanie ograniczające wystąpienie eksplozyjnego odpryskiwania w betonach wysokowartościowych, gdyż prawdopodobnie zwiększenie porowatości betonu w wyniku dodania włókien (PP) w wysokich temperaturach prowadzi do złagodzenia tego zjawiska. Jednak brak jest doniesień jednoznacznie wskazujących jakiej długości włókna są najefektywniejsze. Badania prowadzone na większych fragmentach ścian tuneli potwierdzają, że dodatek włókien polipropylenowych (PP) do betonu ogranicza zjawisko eksplozyjnego odpryskiwania. Badania wpływu wysokich temperatur występujących podczas pożaru na podstawowe parametry wytrzymałościowe betonu z dodatkiem włókien polipropylenowych prowadzono w Polsce m.in. na Politechnice Krakowskiej oraz w Szkole Głównej Służby Pożarniczej. Autorami badań w SGSP byli Z. Bednarek i T. Drzymała [1 – 3, 19, 20]. Stwierdzono korzystny wpływ na właściwości wytrzymałościowe betonu w wysokich temperaturach dodatku włókien polipropylenowych w ilości 1,8 kg/m³, szczególnie na wytrzymałość na rozciąganie, odgrywającą istotną rolę w termicznym odpryskiwaniu betonu, gdyż oderwanie elementów betonu następuje w momencie przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie. Zagadnienia dotyczące wytrzymałości na rozciąganie fibrobetonu nie są przedmiotem niniejszego opracowania i stanowią materiał przygotowany do następnych publikacji autorów.

2. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW I PRÓBEK DO BADAŃ

2.1. Włókna polipropylenowe

Do badań użyto trzy rodzaje włókien polipropylenowych stosowanych jako dodatek do betonu, oznaczonych dla potrzeb badawczych odpowiednio „F”, „D” oraz „I”. Różniły się one między sobą głównie długością i grubością pojedynczych włókien. Dwa z nich „F” i „D” są włóknami multifilamentowymi, to znaczy utworzonymi poprzez splecenie kilku pojedynczych nitek, a jedno „I” włóknem monofilamentowym, to znaczy, utworzonym

z jednej nitki. Włókna polipropylenowe „F”, „D” oraz „I” stanowią mikrozbrojenie rozproszone w postaci włókienek o długości 12 - 20 mm i średnicy 16 - 40 mikronów. Dodawano je do tworzyw cementowych w trakcie procesu mieszania, przy przedłużonym czasie mieszania w celu równomiernego rozproszenia włókien. Włókna te mają niski współczynnik sprężystości (ok. 4000 MPa). Włókna są odporne na alkaliczne środowisko betonu (zaczynu), mają także wysoką odporność na działanie kwasów.

W tabelicy 1 podano charakterystykę włókien na podstawie danych producentów.

Tab. 1. Charakterystyka włókien polipropylenowych wykorzystanych do badań (wg danych producentów) [19, 20]

Właściwość	Nazwa włókna		
	„F”	„D”	„I”
Barwa	Beżowa	Biała przezroczysta	Biała przezroczysta
Charakterystyka	Multifilamentowe	Multifilamentowe	Monofilamentowe
Długość, [mm]	19	20	12
Średnica, [μm]	35-40	16	18
Gęstość, [kg/dm ³]	0,91	0,91	0,91
Wytrzymałość na rozciąganie, [MPa]	ok. 400	ok. 400	Brak informacji
Moduł sprężystości, [MPa]	ok. 4900	3500-3900	Brak informacji
Temperatura mięknięcia, [°C]	ok. 150	max. 145	ok. 165
dtex ^{*)}	ok. 10	3,4	Brak informacji

*) dtex – ciężar 10000 m włókna wyrażony w gramach

2.2. Próbkki do badań wytrzymałościowych oraz skład mieszanki

Próbki do badań wykonano w formie walca o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm. Do wykonania betonu klasy C30/37 użyto cement CEM I 32,5 R z cementowni Ożarów, natomiast do betonu klasy C60/75 użyto cement CEM I 42,5 R z cementowni Małogoszcz. Cement zastosowany do badań spełniał wg deklaracji producenta wymagania normy PN – EN 197 – 1:2002 „Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku” [28]. Do wykonania betonu klasy C30/37 wykorzystano następujące kruszywa składowe: piasek wiślany 0/2 mm oraz żwir „Jeziorki” 2/16 mm. Do betonu klasy C60/75 wykorzystano następujące kruszywa składowe: piasek wiślany 0/2 mm, grys granitowy „Graniczna” 2/8 mm oraz grys granitowy 8/16 mm. Wskaźnik w/c dla betonu klasy C30/37 wynosił 0,358, natomiast dla betonu klasy C60/75 był równy 0,318. Wykonanie próbek było zgodne z wymaganiami norm PN-EN 12390-2:2001 „Badania betonu. Część 2. Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych” oraz PN-EN 12390-3:2002 „Badania betonu. Część 3 Wytrzymałość na ścislenie próbek do badania” [25, 29, 30]. Próbkki przeznaczone do badań zostały przygotowane na zamówienie Zakładu Mechaniki Stosowanej Szkoły Głównej Służby Pożarnej w „Ośrodku Rzecznawstwa i Inżynierii Procesów Budowlanych Oddziału

Warszawskiego PZLiTB” przy udziale pracowników Laboratorium Instytutu Konstrukcji Budowlanych Politechniki Warszawskiej. Próbkę wykonano zostały w specjalnych formach walcowych, wykonanych w Zakładzie Mechaniki Stosowanej SGSP.

3. PROCEDURY BADAWCZE

3.1. Badanie właściwości palnych włókien polipropylenowych (PP)

Do badań eksperymentalnych właściwości palnych badanych włókien PP wykorzystano 3 metody badawcze. Badanie dotyczące oznaczenia temperatury zapalenia fazy gazowej uzyskanej z włókien polipropylenowych przeprowadzono zgodnie z PN-69/C-89022 „Tworzywa sztuczne: Oznaczenie temperatury zapalenia” [21]. Oznaczenie wykonano podgrzewając blok do temperatury o 10°C niższej od spodziewanej temperatury zapalenia, następnie umieszczono w nim przygotowane próbki z badanym włóknem. Jeśli gazy nie uległy zapaleniu to podnoszono temperaturę o 10°C. Za temperaturę zapalenia uznano najniższą temperaturę, w której udało się zapalić wydobywające się gazy na minimum 5 sekund. Za wynik badania przyjęto średnią arytmetyczną trzech oznaczeń różniących się o nie więcej niż 10°C.

Oznaczanie ciepła spalania wykonano zgodnie z PN-EN ISO 1716:2010 „Badanie reakcji na ogień wyrobów budowlanych – Określenie ciepła spalania” [22]. Pomiar ciepła spalania w bombie kalorymetrycznej poległ na całkowitym spaleniu próbki, w atmosferze tlenu pod ciśnieniem, przy czym zapłon uzyskuje się za pomocą rozżarzonej spiralki elektrycznej

i pomiarze wzrostu temperatury wody w naczyniu kalorymetrycznym. Przed przystąpieniem do badania oznaczono równoważnik wodny kalorymetru, czyli określono ilość ciepła potrzebną do ogrzania układu o jeden stopień. Dla kalorymetru znajdującego się

w laboratorium Zakładu Spalania i Teorii Pożarów wynosi $E=0,013$ [MJ/K].

Badania termogravimetryczne przeprowadzono zgodnie z PN-EN ISO 11358:2004 „Tworzywa sztuczne. Termogravimetria (TG) polimerów. Zasady ogólne” [23]. Badanie polega na analizie ubytku masy próbki w funkcji temperatury lub czasu, gdy próbka badana podlega kontrolowanemu programowi zmiany temperatury.

Analizy termogravimetryczne (TG) badanych włókien polipropylenowych przeprowadzono przy szybkości ogrzewania próbek wynoszącej 10°C/min do temperatury 900°C, na analizatorze termogravimetrycznym TA Instruments Q500.

Każde włókno badano w dwóch gazach otaczających próbę, mianowicie powietrzu i azocie, gdzie:

- badanie w atmosferze „powietrza” 70 ml/min azot (nośnik gazowy) + 30 ml/min tlen,
- badanie w atmosferze „azotu” 100 ml/min azot.

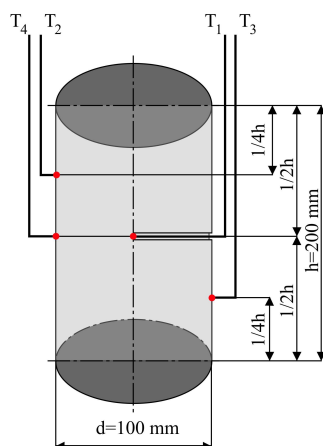
3.2. Badanie właściwości wytrzymałościowych fibrobetonu

Celem badań wytrzymałościowych była analiza oddziaływania wysokich temperatur występujących podczas pożaru na wytrzymałość fibrobetonu z włóknami polipropylenowymi oraz oszacowanie wielkości spadku wytrzymałości na ścislenie.

Badania wytrzymałościowe dotyczyły betonów klasy C30/37 oraz C60/75 modyfikowanych dodatkiem włókien polipropylenowych (fibrobeton) oraz betonów klasy C30/37 oraz C60/75 bez dodatku włókien (beton kontrolny). Do badań użyto trzy rodzaje włókien polipropylenowych o długościach 12, 19 i 20 mm, oznaczonych dla potrzeb badawczych odpowiednio „F”, „D” oraz „I”, obecnie stosowanych i dostępnych w Europie. Powyższe rodzaje włókien polipropylenowych stanowiły dodatek do betonów w ilości 0,6 kg/m³; 0,9 kg/m³; 1,2 kg/m³. Próbkę wykonano w kształcie walców o średnicy $d = 100$ mm i wysokości $h = 200$ mm. Proces wygrzewania próbek przebiegał według krzywej „standardowej” ISO 834 [26] oraz PN-EN 1991-1-2: 2006 [31], obrazującej narastanie temperatury w trakcie standardowego pożaru. Temperatury wygrzewania zawierały się w granicach od 20°C do 1000°C. Próbkę wygrzewano w piecu w czterech temperaturach badawczych (300°C, 600°C, 800°C, 1000°C) do momentu wyrównania temperatur na termoparach pomiarowych (T_1 , T_2 , T_3 , T_4). Podczas wygrzewania próbek betonowych C30/37 w temperaturze 1000°C

w konsekwencji otrzymano poważne zniszczenia próbek [1]. Graniczną temperaturę wygrzewania dla betonu klasy C30/37 bez dodatku oraz modyfikowanego dodatkiem włókien polipropylenowych ustalono na 800°C. Podczas wygrzewania próbek do badań każdorazowo dokonywano pomiaru temperatur na dodatkowej próbce za pomocą trzech termopar zewnętrznych (T_2 , T_3 , T_4) oraz termopary wewnętrznej (T_1), rozmieszczonych tak jak na rys. 1. Termoparę wewnętrzną (T_1) umieszczono w nawierconym kanaliku na głębokości 50 mm, w $\frac{1}{2}$ wysokości próbki h . Prędkość nagrzewania wynosiła około 5 – 6 °C/min. Założony rozkład „temperatura-czas” odpowiadał rozkładowi temperatury w płycie betonowej na głębokości 50 mm.

Po wygrzewaniu w piecu i wystudzeniu, próbki każdorazowo poddawano badaniom wytrzymałości na ściskanie, na rozciąganie oraz wyznaczano moduł sprężystości na maszynie wytrzymałościowej. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ściskanie. W każdym punkcie pomiarowym zbadano po 10 próbek. Wygrzewanie próbek fibrobetonowych oraz betonowych przeprowadzono na stanowisku badawczym, którego zasadniczy trzon stanowi średnotemperaturowy elektryczny piec komorowy typu PK 1100/5 oraz komputer PC, z odpowiednim oprogramowaniem do sterowania oraz rejestracji temperatury podczas wygrzewania próbek.



Rys. 1. Widok próbki betonowej z rozmieszczonymi termoparami pomiarowymi
 T_1 – termopara wewnętrzna umieszczona w $1/2$ wysokości na głębokości 50 mm,
 T_2, T_3 – termopary zewnętrzne umieszczone w $1/4$ wysokości od podstawy, T_4 – termopara zewnętrzna umieszczona w $1/2$ wysokości od podstawy
[źródło: opracowanie własne]

Badania wytrzymałości na ściskanie próbek betonowych i fibrobetonowych wykonano w Laboratorium Mechaniki Stosowanej SGSP, gdzie znajduje się odpowiednie stanowisko badawcze. W skład stanowiska wchodzi maszyna hydrauliczna EDZ – 100 przystosowana do badania wytrzymałości betonu na ściskanie, spełniająca wymagania normowe [27]. Prędkość narastania obciążenia była we wszystkich badaniach jednakowa i wynosiła $0,6\text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$.

4. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

4.1. Wyniki badań właściwości palnych włókien polipropylenowych (PP)

Poniżej zamieszczono wyniki badań właściwości palnych włókien polipropylenowych, których procedury badawcze opisano w punkcie 3.1. Wyniki oznaczeń temperatury zapalenia badanych włókien polipropylenowych zgodnie z PN-69/C-89022 przedstawiono w tablicy 2.

Tab. 2. Wyniki oznaczenia temperatury zapalenia [6, 17]

Oznaczona temperatura	Rodzaj materiału		
	„F”	„D”	„I”
T ₁ [°C]	405	402	374
T ₂ [°C]	396	398	381
T ₃ [°C]	399	400	379
Wartość średnia temperatury zapalenia (T ₁ +T ₂ +T ₃)/3 [°C]	400	400	378

Ustalenie ciepła spalania zgodnie z PN-EN ISO 1716:2010 dla badanych materiałów przedstawiono w tablicy 3.

Tab. 3. Wartości ciepła spalania dla badanych materiałów [6, 17]

Ciepło spalania	Rodzaj materiału		
	„F”	„D”	„I”
C [kJ/g]	52,05	49,66	49,23

Najwięcej danych dotyczących rozkładu termicznego bądź pirolizy badanych włókien dostarczyła analiza termogravimetryczna TG (tablica 4) [6, 17]. Badania TG w atmosferze azotu pozwalają na analizę procesu ubytku masy włókien (PP) jaki może mieć miejsce dla głębiej rozmieszczonych w betonie włókien polipropylenowych poddanych działaniu wysokich temperatur w czasie pożaru gdzie dostępność utleniacza do rozpadu wiązań PP jest ograniczona.

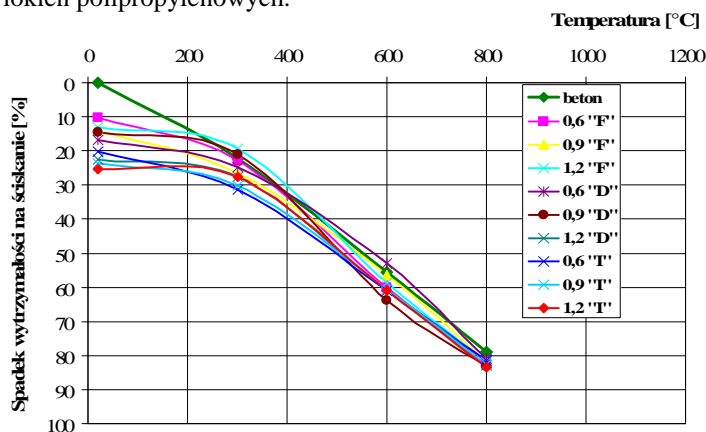
Biorąc pod uwagę analizę termogravimetryczną można zauważyć istotne różnice pomiędzy zachowaniem się włókien PP w atmosferze powietrza oraz w atmosferze azotu zachodzące podczas pirolizy i rozkładu termicznego dla badanych materiałów. Oznacza to, że badane włókna w atmosferze nie utleniającej trudniej wytwarzają produkty pirolizy i w konsekwencji również palną fazę gazową. Należy również przypuszczać, że trudniej będzie zachodził ubytek masy włókiem PP zatopionych w betonie i szczelnie otoczonych zaczynem. Badania termogravimetryczne zgodnie z PN-EN ISO 11358:2004 „Tworzywa sztuczne. Termogravimetria (TG) polimerów przedstawiono w tablicy 4.

Tab. 4. Parametry analizy TG dla włókien badanych w powietrzu i w azocie [6, 17]

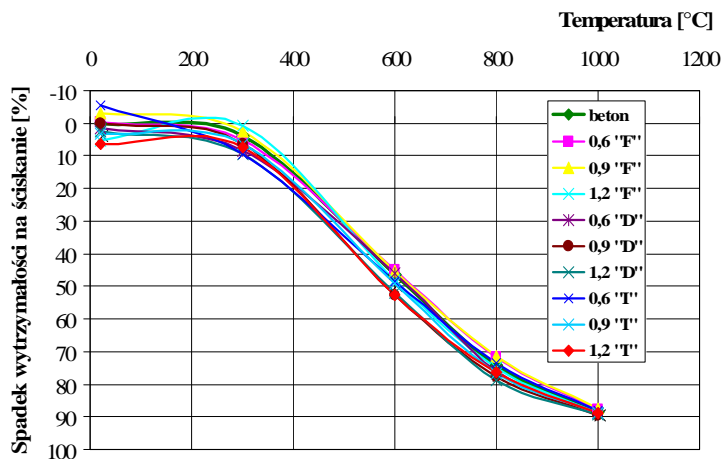
Parametry analizy TG dla włókien badanych w powietrzu	„F”	„D”	„I”
Temperatura początku rozkładu [°C]	279	271	268
Temperatura 5% ubytku masy [°C]	260	245	241
Temperatura 50% ubytku masy [°C]	318	296	304
Temperatura końca rozkładu [°C]	355	322	338
Temperatura maks. szybkości ubytku masy [°C]	332	304	315
Masa pozostałości nie ulegającej rozkładowi [%]	0,84	0,62	0,61
Parametry analizy TG dla włókien badanych w azocie	„F”	„D”	„I”
Temperatura początku rozkładu [°C]	385	399	415
Temperatura 5% ubytku masy [°C]	369	337	369
Temperatura 50% ubytku masy [°C]	405	425	438
Temperatura końca rozkładu [°C]	425	450	461
Temperatura maks. szybkości ubytku masy [°C]	409	438	448
Masa pozostałości nie ulegającej rozkładowi [%]	1,95	1,84	1,71

4.2. Wyniki badań wytrzymałościowych fibrobetonu

Na rys. 2 – 3 przedstawiono wyniki badań spadku wytrzymałości na ściskanie dla badanych betonów C30/37 oraz C60/75 bez i z dodatkiem włókien polipropylenowych („F”, „D”, „I”) ze wzrostem temperatury, których procedury badawcze opisano w punkcie 3.2. W zestawieniu przyjęto za 100 % wytrzymałość na ściskanie f_{cm} dla betonu bez dodatku włókien polipropylenowych.



Rys. 2. Spadek wytrzymałości na ściskanie różnych fibrobetonów z dodatkiem włókien polipropylenowych w stosunku do betonu klasy C30/37, w zależności od temperatury (założenie: beton C30/37 bez dodatku włókien w temperaturze 20°C - 100%)
[źródło: opracowanie własne]



Rys. 3. Spadek wytrzymałości na ściskanie różnych fibrobetonów z dodatkiem włókien polipropylenowych w stosunku do betonu klasy C60/75, w zależności od temperatury (założenie: beton C60/75 bez dodatku włókien w temperaturze 20°C - 100%) [źródło: opracowanie własne]

5. WNIOSKI Z PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

1. Wszystkie badane włókna mają zbliżoną temperaturę zapalenia. Najniższą temperaturę zapalenia posiadało włókno „I”, mianowicie 378°C. Pozostałe dwa włókna posiadały temperaturę zapalenia równą 400°C. Najprawdopodobniej było to spowodowane rodzajem włókna, gdyż tylko włókno „I” było włóknem monofilamentowym.
2. Wartości ciepła spalania są zbliżone dla badanych włókien (wyniki ciepła spalania wynosiły odpowiednio: dla włókien „I” i „D” 49,23 kJ/g i 49,66 kJ/g. Nieco więcej ciepła wydzielano się z włókna „F” mianowicie 52,05 kJ/g).
3. Badania wykazały, że długość, grubość, oraz rodzaj badanych włókien (PP) miały niewielki wpływ na badane parametry palności. Świadczą o tym wyniki temperatury zapalenia i ciepła spalania.
4. Duży wpływ na otrzymane wyniki, w analizie TG i DTG (analiza termogravimetrii różniczkowej), miał skład atmosfery, w której postępował rozkład próbek. W atmosferze powietrza wartości temperatury początku rozkładu termicznego i czas tworzenia palnej fazy gazowej były niższe w porównaniu do wartości ww. parametrów w atmosferze azotu. Różnice te dla temperatury początku rozkładu termicznego, dla badanych włókien wynoszą odpowiednio: 106°C dla włókien „F”, 128°C dla włókien „D” oraz 147°C dla włókien „I”.
5. Znaczący wpływ na masę nie ulegającą rozkładowi termicznemu ma skład atmosfery. Masa włókien PP nie ulegająca rozkładowi w przypadku atmosfery azotu jest od 2,3 do 3 razy większa w porównaniu z atmosferą powietrza.

6. Badania TG i DTG przeprowadzone w atmosferze azotu pozwalają przypuszczać, że włókna PP rozmieszczone w głębi betonu przy braku dostępu wystarczającej ilości tlenu, w warunkach wysokiej temperatury będą znacznie wolniej ulegać destrukcji.
7. W temperaturze zbliżonej do 20°C widoczny jest największy procentowy spadek wytrzymałości fibrobetonu na ściskanie w stosunku do „czystego” betonu klasy C30/37, niezależnie od rodzaju zastosowanych włókien polipropylenowych oraz przyjętego składu wagowego tych włókien. W przypadku fibrobetonu z zastosowaniem betonu klasy C60/75 z dodatkiem włókien „F”, „D” oraz „I”, istotny spadek wytrzymałości, w porównaniu do wytrzymałości „czystego” betonu nie występuje, niezależnie od rodzaju zastosowanych włókien polipropylenowych oraz przyjętego w badaniach składu wagowego tych włókien.
8. W temperaturach powyżej 300°C spadek wytrzymałości na ściskanie fibrobetonu klasy C30/37, w stosunku do jego wytrzymałości w temperaturze 20°C jest zbliżony do „czystego” betonu klasy C30/37, bez dodatku włókien. Ta prawidłowość ma również miejsce w przypadku betonu wysokowartościowego klasy C60/75.
9. Nie zauważono istotnego wpływu rodzaju zastosowanych włókien na spadek wytrzymałości na ściskanie fibrobetonu w temperaturach wysokich dla betonu klasy C30/37 oraz dla betonu klasy C60/75, przy dodatku tych włókien nie przekraczającym 1,2 kg/m³.
10. Właściwości wytrzymałościowe fibrobetonu, tak samo jak betonu ulegają nieodwracalnemu obniżeniu w wysokiej temperaturze. W temperaturze 800°C wytrzymałość betonu oraz fibrobetonu klasy C30/37 spada o około 90%. Dla betonu oraz fibrobetonu wysokowartościowego klasy C60/75 wytrzymałość spada o około 90%, dopiero po wygrzaniu próbek w temperaturze 1000°C.
11. Należy stwierdzić, że spadek wytrzymałości na ściskanie fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych w ilości do 1,2 kg/m³ w temperaturach pożarowych nie jest większy od spadku wytrzymałości betonu bez dodatku włókien, co daje podstawę do wyznaczenia wytrzymałości fibrobetonu w temperaturach pożarowych według zasad i wzorów przyjętych dla betonu bez dodatku włókien. Zatem redukcję wytrzymałości na ściskanie betonu z dodatkiem włókna można określić wzorem $f_{ck}(T) = k_c(T) \cdot f_{ck}$, gdzie: f_{ck} – wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie fibrobetonu w temperaturze normalnej (ok. 20°C), a wartość współczynnika redukcji $k_c(T)$ przyjmować jak dla betonu odpowiedniej klasy bez dodatku włókien.

6. LITERATURA

- [1] Bednarek Z., Drzymała T.: „Wpływ temperatur występujących podczas pożaru na wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu”, Zeszyty Naukowe SGSP nr 36, Warszawa 2008.
- [2] Bednarek Z., Drzymała T.: „Wytrzymałość na ściskanie fibrobetonu z dodatkiem włókien polipropylenowych w warunkach termicznych pożarów”, Bezpieczeństwo Pożarowe Budowli, Warszawa 18 – 19 listopada 2008.

- [3] Bednarek Z., Krzywobłocka – Laurów R., Drzymała T.: „Wpływ wysokiej temperatury na strukturę, skład fazowy i wytrzymałość betonu”, Zeszyty Naukowe SGSP nr 38, Warszawa 2009.
- [4] Berke N. S., Dallaire M. P.: „The effect of low addition rate of polypropylene fibers on plastic shrinkage cracking and mechanical properties of concrete, in „Fiber Reinforced Concrete: Developments and Innovations”, edited by Daniels J. I. and Shah S. P., ACI SP-142, str. 19 – 42, 1994.
- [5] Brandt A. M.: „Cement based composites: materials, mechanical properties and performance”, E & FN SPON, London 1995.
- [6] Drzymała T., Półka M.: „Analiza zachowania się włókien polipropylenowych stosowanych do fibrobetonu w temperaturach pożarowych”, Zeszyty Naukowe SGSP nr 42, Warszawa 2011 (artykuł po recenzji, przyjęty do druku w 2011 r.).
- [7] 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 „Awaryjne Budowlane”, Szczecin – Międzyzdroje 20 – 23 maja 2003.
- [8] Gawin D., Witek A., Pasavento F., Schrefler B.A.: „Efficacy of various methods used for protection of concrete structures against thermal spalling in fire conditions”, V Międzynarodowa Konferencja „Bezpieczeństwo Pożarowe Budowli”, Warszawa Miedzeszyn, 14 – 16 listopada 2005.
- [9] Gawin D., Witek A., Pasavento F.: „O ochronie betonowej obudowy tunelu przed zniszczeniem w warunkach pożarowych – wyniki projektu UPTUN”, Inżynieria i Budownictwo 11/2006.
- [10] Glinicki M.: „Badania właściwości fibrobetonu z makrowłóknami syntetycznymi, przeznaczonego na podłogi przemysłowe”, Cement-Wapno-Beton, nr 4/2008.
- [11] Hertz K.: „Limits of Spalling of Fire Exposed Concrete”, Fire Safety Journal, vol. 38, str. 103 – 116, 2003.
- [12] Janowska G., Przygocki W., Łochowicz A.: „Palność polimerów i materiałów polimerowych”, Warszawa 2007.
- [13] Kalifa P., Menneteau F. D., Ouenard D.: „Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures”, Cem. and Conc. Res., 30 (2000) str. 1915 – 1927.
- [14] Kalifa P., Chene G., Galle C.: „High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructure”, Cem. Concr. Res. 31 (2001) str. 1487 – 1499.
- [15] Kitchen A.: „Fibres for passive fire protection in tunnels”, Tunneling & Trenchless Construction, 2004.
- [16] Nishida A., Yamazaki N., Inoue H., Schneider U., Diederichs U.: „Study on the properties of high strength concrete with short polypropylene fibre for spalling resistance”, Concrete Under Severe Conditions Environment and Loading, vol. 2, 1995.
- [17] Półka M., Drzymała T.: „Analysis of behaviour of polypropylene fibers applied for reinforcing of fiber reinforced concrete in fire temperatures”, International Conference „Fire Protection”, Ostrava 2009, str. 468 – 476.
- [18] Półka M.: „Tworzywa sztuczne w pożarze”, Przegląd Pożarniczy nr 11/2003, str. 12 – 13.

- [19] Praca naukowo – badawcza: „Wpływ temperatur występujących podczas pożaru na wybrane parametry wytrzymałościowe fibrobetonu”, S/E 422/8/2007/2008, I i II Etap, kierownik naukowy Z. Bednarek, Główny wykonawca pracy T. Drzymała, SGSP Warszawa 2008.
- [20] Praca naukowo – badawcza: „Badanie wpływu temperatur występujących podczas pożaru na wytrzymałość fibrobetonu”, BW/E-422/8/2008, kierownik pracy T. Drzymała, SGSP Warszawa 2008.
- [21] PN-69/C-89022 „Tworzywa sztuczne: Oznaczenie temperatury zapalenia”.
- [22] PN-EN ISO 1716: 2010. „Badanie reakcji na ogień wyrobów budowlanych – Określenie ciepła spalania”.
- [23] PN-EN ISO 11358: 2004 „Tworzywa sztuczne. Termograwimetria (TG) polimerów. Zasady ogólne”.
- [24] Norma PN-EN 14889-2: 2007 „Włókna do betonu. Część 2: Włókna polimerowe. Definicje, wymagania i zgodność”.
- [25] PN-EN 206-1: 2003. „Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”.
- [26] ISO 834. „Fire resistance tests elements of building construction”, International Standard, Geneva 1985.
- [27] PN-EN 12390-4: 2001. „Badania betonu. Część 4: „Wytrzymałość na ścislenie. Wymagania dla maszyn wytrzymałościowych”.
- [28] PN-EN 197-1: 2002. „Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku”.
- [29] PN-EN 12390-2: 2001. „Badania betonu. Część 2. Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych”.
- [30] PN-EN 12390-3: 2002. „Badania betonu. Część 3 Wytrzymałość na ścislenie próbek do badania”.
- [31] PN-EN 1991-1-2: 2006. „Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru”.