

Wpływ wysokiej temperatury na charakterystykę pęknięcia zaczynu, zaprawy i betonu

Dr inż. Stanisław Plechawski, Biuro Projektowo-Budowlane Planex,
dr hab. inż. Stanisław B. Fic, prof. PL, Politechnika Lubelska



1. Wprowadzenie

Na podstawie literatury krajowej i zagranicznej można stwierdzić, że opracowań dotyczących wpływu wysokich temperatur na pęknięcie betonu, zaczynu i zaprawy, zwłaszcza w języku polskim, jest niewiele [1]. Zajmowano się głównie problemem wpływu wysokich temperatur na wytrzymałość betonu [2] w kontekście zmian jego cech fizycznych, chemicznych, mechanicznych, strukturalnych i składu fazowego. Natomiast nieliczne są wyniki badań, zwłaszcza krajowych, dotyczących wpływu wysokich temperatur na współczynnik intensywności naprężeń betonu K_{IC} , zaczynu i zaprawy. Badania własne wykazały, że destrukcje powstałe w fazie początkowego twardnienia zaczynu, zaprawy i betonu, przed i w trakcie okresu eksploatacji, takie jak pory, rysy technologiczne oraz inne uszkodzenia rozwijają się pod wpływem temperatury pożarowej i decydują o właściwościach fizyko-mechanicznych zaczynu, zaprawy i betonu, a ich wielkość może być oceniana za pomocą krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} .

2. Przemiany kompozytów cementowych pod wpływem wysokich temperatur

Przemiany, które zachodzą w betonie podczas nagrzewania opisane między innymi w [3], [4], [5], [6] można określić w poszczególnych zakresach temperatur:

- 105°C–300°C – odparowanie wody wolnej. Dehydratacja ettringitu i uwodnionych krzemianów wapnia CSH, rozkład gipsu, całkowita redukcja wody, spalling, początek spadku wytrzymałości,
- 350–900°C – przemiany w kruszywie,
- od 500–700°C – dehydroksylacja portlandytu i powtórne wiązanie wolnego wapna – $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$, redukcja wody i ponowne nawodnienie (np. w czasie gaszenia wodą) [7] – skutek tej reakcji i rozkładu CaCO_3 – duży przyrost objętości związków wapnia (około 40%) – wzmożone pęknięcie betonu i spadek wytrzymałości. Rozwój rys: osłabienie więzi kruszywa i zaczynu, początki degradacji. Przyrost porowatości zaczynu.
- 573°C – przemiana kwarcu z niskotemperaturowej odmiany β w wysokotemperaturową α ; wzrost kubatury betonu na kruszywie krzemionkowym,
- do 800°C – dehydratacja CSH,
- 700–800°C – rozkład kruszyw wapiennych CaCO_3 ,
- 1200–1350°C – topnienie betonu.

Wpływ wysokich temperatur pożarowych na podstawowe cechy betonu jest bardzo istotny. Zmniejsza się jego wytrzymałość

na ściskanie i rozciąganie, (która determinuje zarysowanie i pęknięcie), moduł sprężystości (również moduł dynamiczny), a wzrastają odkształcenia, niejednokrotnie aż do zniszczenia konstrukcji.

Główną przyczyną spadku wytrzymałości betonu w wysokich temperaturach są przeciwne kierunki odkształceń zaczynu i kruszywa [8], powodujące osłabienie przyczepności między nimi.

3. Badania własne

W warunkach pożarowych ciepło powoli przenika w głąb kompozytów cementowych, ale w następstwie wolnego tempa jego przebiegu występują znaczne różnice temperatur w betonie, zaczynie i zaprawie między powierzchnią elementu a jego wnętrzem. W efekcie następuje degradacja materiału, definiowana głównie zmniejszeniem wytrzymałości na ściskanie f_c i rozciąganie $f_{ct,sp}$, ale też, jak wskazują badania własne [9], obniżeniem odporności na pęknięcie wyrażonej krytycznym współczynnikiem intensywności naprężeń K_{IC} .

W badaniach własnych pominięto temperatury pośrednie między 20 a 500°C. Uczyniono tak świadomie, ponieważ w literaturze można znaleźć opisy badań betonu w zakresie temperatur do 450°C. W związku z tym w badaniach własnych pozostaje pewna „pusta przestrzeń”, o której trzeba pamiętać, gdyż wytrzymałość betonu może w niej wzrastać do pewnej wartości, a następnie spadać przy dalszym wzroście temperatury [10]. Jednak nie wszyscy badacze potwierdzają ten chwilowy wzrost wytrzymałości w podwyższonych temperaturach i notują spadek wytrzymałości betonu na ściskanie od początku wzrostu temperatur w przypadku betonów zwykłych [11]. W związku z tym w badaniach własnych przyjęto, w celach poznawczych, jako temperaturę pożarową minimum 500°C, również jako odniesienie do normowej metody izotermi 500. Zakres temperatur betonu od 20°C do 1200°C podaje norma [12] w punkcie 3.2.2, w tabelicy 3.1. Ponadto wiele badań publikowanych w literaturze przedmiotu dotyczy wyższego zakresu temperatur. Podczas pożaru temperatura może dochodzić do 1100°C w budynkach, a nawet do 1350°C w tunelach, jak podano w [13], prowadząc do poważnych uszkodzeń konstrukcji betonowych.

3.1. Opis badanych próbek

Próbki do badań wykonane z betonu zawierały taką samą ilość kruszywa grubego przy zmiennych wskaźnikach w/c , przez co możliwe było ustalenie wpływu w/c i utworzonej struktury na współczynnik K_{IC} i innych parametrów wytrzymałościowych

materiałów. Wykonano betony o wskaźnikach $w/c = 0,40$; $0,50$ i $0,60$. Nie stosowano żadnych dodatków ani domieszek. Proporcje wymiarów oraz liczbę próbek ustalono zgodnie z zaleceniami RILEM [14], które mówią, że „co najmniej trzy identyczne próbki powinny być przetestowane dla każdego rozmiaru próbki”. Wykonano łącznie 135 próbek – po 3 próbki dla każdego w/c i dla każdej temperatury badanych kompozytów [9]. W uzupełnieniu należy dodać, że taka liczba próbek umożliwiła wytworzenie kompozytów dla odpowiedniego w/c i temperatury z jednego zarobu betoniarki, co ma bardzo istotny wpływ na wyeliminowanie błędów technologicznych, jakie mogą powstać podczas realizacji mieszanek o teoretycznie założonych identycznych parametrach, ale wykonywanych w trakcie kilku zarobów z powodu zbyt małej pojemności mieszarki. Miało to również istotne znaczenie z uwagi na ograniczone gabaryty pieca, w którym wygrzewano próbki, ponieważ dawało pewność, że badany jest rzeczywiście ten sam kompozyt (beton, zaczyn lub zaprawa).

Współczynnik intensywności naprężeń badano na – zaleconych przez RILEM [15] – próbkach-beleczkach o wymiarach $L \times b \times W = 700 \times 80 \times 150$ mm, o rozpiętości (rozstaw podpór) $S = 600$ mm, ze szczeliną pierwotną o długości $a = 50$ mm i szerokości 3 mm zakończoną skosem $1,5/2,6 = 0,577$. Proporcje wymiarów próbek wynosiły: $S = 4W$, $b = \text{około } 0,5hW$, $a = 0,333W$.

Wytrzymałość betonu na ściskanie w temperaturze normalnej określono na próbkach sześciennych o boku 150 mm, natomiast po aplikacji temperatur wysokich badano na próbkach kostkowych $8 \times 8 \times 8$ cm. Wycięto po 6 kostek z każdej z beleczek złamanych podczas badania odporności na pękanie, po 3 kostki badano na ściskanie i na rozciąganie. Ponieważ próbki-beleczki, na których badano odporność na pękanie, miały grubość 8 cm, jednakowe były izotermy temperatur przenikających do wnętrza próbek. Natomiast próbki o boku 15 cm, około dwukrotnie większe, nie wygrzałyby się odpowiednio, tzn. temperatury wewnątrz większych próbek byłyby niższe niż wewnątrz mniejszych. W związku z tym i wyniki badań wytrzymałości byłyby zawyżone w porównaniu do wytrzymałości betonu w beleczkach. Drugim, równie ważnym powodem był fakt, że na ściskanie badano dokładnie ten sam beton, który testowano na pękanie.

W przeciwieństwie do betonu nie stwierdzono istnienia żadnych wytycznych ani norm określających wymiary próbek zaczynu cementowego do badań odporności na pękanie. W literaturze występuje wielka różnorodność gabarytów próbek zaczynu cementowego, od bardzo małych, odpowiednich może dla metali np.: $9 \times 2,5 \times 1,4$ cm jak u Higginsa i Baileya [16] do około $5 \times 5 \times 36$ cm u Nausa i Lotta [17] i $4 \times 8 \times 36$ cm u Prokopskiego [18]. W związku z tym zdecydowano się na typowe próbki $L \times b \times W = 160 \times 40 \times 40$ mm stosowane w badaniach zaczynu i zaprawy na zginanie i ściskanie, ponieważ badano i te parametry. Rozstaw podpór $S = 100$ mm przyjęto zgodnie z zasadami badań wytrzymałości beleczek na zginanie [19]. W beleczkach przeznaczonych do badania współczynnika intensywności naprężeń wykonano szczeliny poprzez nacięcia diamentową piłą tarczową z uwagi na brak możliwości wykonania karbu tak, jak w próbkach betonowych. Długość

Tabela 1. Skład mieszanek betonowych

Wskaźnik w/c	Jedn.	0,4	0,5	0,6
Cement CEM I 42,5 R	kg/m ³	320	320	320
Piasek (0–2 mm)	kg/m ³	652	625	598
Kruszywo grube żwir (2–8 mm)	kg/m ³	531	531	531
Kruszywo grube żwir (8–16 mm)	kg/m ³	797	797	797
Woda	dm ³ /m ³	128	160	192

Tabela 2. Skład zaczynów cementowych

Wskaźnik w/c	0,4	0,5	0,6
Cement CEM I 42,5 R kg/m ³	1734	1622	1524
Woda dm ³ /m ³	694	811	914

Tabela 3. Skład zapraw cementowych

Wskaźnik w/c	0,4	0,5	0,6
Cement CEM I 42,5 R kg/m ³	706	705	703
Piasek (0–2 mm) kg/m ³	1439	1376	1313
Woda dm ³ /m ³	283	352	422

szczeliny pierwotnej $a = 13,3$ mm, a szerokość – 3 mm. Różnice obserwowane w odporności na pękanie próbek z karbami naciętymi piłą, a wyprofilowanymi w trakcie ich betonowania są nieistotne [20].

Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu i ściskanie zaczynu oraz zaprawy cementowej badano na beleczkach bez nacięć. Próbki badano [21] po 28 dniach przechowywania w warunkach normowych w wodzie w temperaturze $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Próbki-beleczki przeznaczone do badań współczynnika intensywności naprężeń w temperaturach normalnych i wysokich również przechowywano w takich warunkach.

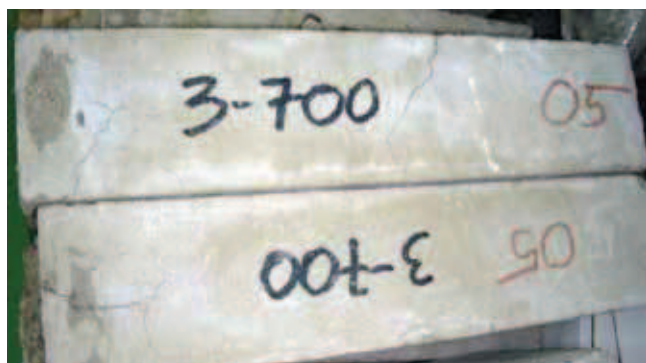
3.2. Składniki betonów, zaczynów i zapraw

Próbki wykonano z betonu cementowego stosując cement portlandzki o wysokiej wytrzymałości wczesnej CEM I 42,5R, z kruszywem żwirowym o frakcjach 2–8 i 8–16 mm oraz piaskiem (0–2 mm). Skład mieszanek betonowych przedstawiono w tabeli 1.

Obliczając skład zaczynu cementowego i zaprawy, przyjęto zasadę zachowania proporcji składników zawartych w mieszance betonowej. Takie kryterium daje możliwości porównywania wyników badań próbek z betonu, zaczynu i zaprawy, gdyż zawartość zaczynu i zaprawy jest jakby pochodną składu betonu. Zawartość zaczynu i zaprawy cementowej, obliczoną na podstawie procentowej zawartości ich składników w mieszance betonowej, przedstawiono w tabeli 2 i 3.

3.3. Przebieg badań

Próbki beleczki przeznaczone do badań w temperaturach wysokich, zarówno betonowe, jak i z zaczynu i zaprawy, nagrzewano w piecu komorowym w temperaturach 500, 600 i 700°C. Szybkość nagrzewania próbek do zadanej temperatury wynosiła 4–6°C/min. Tempo ogrzewania próbek porównywalne było do wielkości podawanych w literaturze przedmiotu [10], [22]. Z tego powodu, a także opisów wystąpienia zjawisk



Rys. 1. Próbkę betonową dla $w/c = 0,5$ po aplikacji temperatury pożarowej 700°C



Rys. 2. Przełomy próbki z rysunku 1

eksplozyjnych nagrzewanych próbek betonowych [23], nie zdecydowano się na ich wygrzewanie zgodnie z normową, standardową krzywą nagrzewania „czas-temperatura” [24], według której początkowe tempo przyrostu temperatury jest zbyt duże ($115^{\circ}\text{C}/\text{min}$) i może grozić eksplozją próbek oraz zniszczeniem pieca. Wolniejsze tempo nagrzewania jest uzasadnione również tym, że w wielu praktycznych przypadkach projektowania (np. hal widowiskowych, sportowych lub innych obiektów o niskim obciążeniu ogniowym) nie jest ekonomicznie uzasadnione stosowanie krzywej nominalnej [25]. W tym miejscu wypada jeszcze dodać, że zalecenia RILEM [26] „Metody badań właściwości mechanicznych betonu w wysokich temperaturach” określają prędkość ogrzewania i chłodzenia próbek w temperaturach $20\text{--}200^{\circ}\text{C}$ w tempie tylko $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$., a w warunkach awaryjnych w zakresie temperatur $200^{\circ}\text{C}\text{--}750^{\circ}\text{C}$ od $0,5$ do $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$., zależnie od ich średnicy. Zamieszczają też ostrzeżenia dotyczące możliwości eksplozyjnego odpryskiwania betonu podczas ogrzewania. Odnosnie czasu wygrzewania próbek podano, że podczas symulacji warunków awaryjnych (pożaru) maksymalna osiągnięta temperatura powierzchni powinna być utrzymywana przez 60 ± 5 minut. W badaniach własnych wzorowano się jednak na, wspomnianych już, pozycjach literaturowych z uwagi na bardziej wyważony charakter zawartych tam zaleceń.

Przyjęty czas ekspozycji próbek w trakcie badań własnych, tj. $1,5$ godz. w danej temperaturze, również wzorowano na literaturze technicznej, między innymi [22], aby umożliwić ewentualne porównywanie wyników. Studzenie próbek do temperatury otoczenia przebiegało przy otwartych drzwiach pieca, można powiedzieć, że „próbki studzono wraz z piecem”. Po ostygnięciu pieca do temperatury około 50°C i ich wyjęciu, stygły w pomieszczeniu na zewnątrz pieca w temperaturze około 30°C . Docelowo próbki stygły w warunkach laboratoryjnych i w takich warunkach były badane (zginane) aż do zniszczenia. Wszystkie próbki zważono przed badaniami, z powodu konieczności uwzględnienia ich masy we wzorach na obliczanie współczynnika intensywności naprężeń.

W badaniach własnych zastosowano powszechnie znaną procedurę: dwuparametrowy model pęknięcia Jenqą i Shaha opisany w [15]. Podczas testów badawczych sporządzany był wykres obciążenie – szerokość rozwarcia krawędzi szczeliny pierwotnej CMOD. Maksymalne obciążenie było osiągnięte w czasie 5 minut, dalej obciążenie zmniejszono do 95%

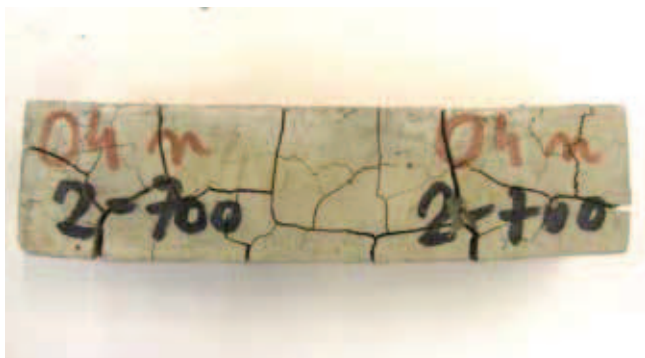
maksymalnego i następnie obniżano do zera. Powtórnie regularnie obciążano i odciążano próbki według tej zasady, aż do złamania. Parametry pęknięcia ustalono z relacji: obciążenie – rozwarcie wylotu szczeliny ($P\text{--}CMOD$) oraz obciążenie – przemieszczenie punktu przyłożenia siły ($P\text{--}f$). Próbkę betonową po aplikacji temperatury 700°C i po badaniu (złamaniu) pokazano na rysunku 1. Widoczne są złuszczenia i spękania powierzchni, a także *spalling*. Przełomy tej próbki pokazano na rysunku 2. Prócz wymienionych uszkodzeń, zauważalne są również spękania podłużne. W przełomach, uszkodzenia w betonie pod działaniem temperatury pożarowej powstały głównie na granicy ziaren kruszywa grubego i zaczynu.

Jest to dowód spadku wytrzymałości pod wpływem wysokich temperatur, zwłaszcza strefy przejściowej pomiędzy matrycą a kruszywem, ale także spadku wytrzymałości zaczynu i zaprawy cementowej zawartych w betonie.

Podczas i po ogrzewaniu w temperaturach 600 i 700°C próbki zaczynu cementowego o $w/c = 0,5$ i $0,6$ uległy uszkodzeniu. Niektóre bezpośrednio w piecu, inne w trakcie studzenia poza piecem. Z kolei próbki zaczynu o wskaźniku $w/c = 0,4$ teoretycznie wytrzymały temperatury 600 i 700°C , ale były tak spękane, że nie nadawały się do umieszczania ich w maszynie wytrzymałościowej, po prostu rozsypywały się i nie można było wykonać badań. Przykład tak uszkodzonej próbki zaczynu obrazuje rysunek 3.

Zjawisko uszkodzeń próbek zaczynu w wysokich temperaturach znajduje potwierdzenie w literaturze [27]. Stwierdzono w niej między innymi, że temperatura 400°C jest krytyczną dla zaczynu cementowego, który całkowicie traci w niej swą wytrzymałość z powodu odwodnienia $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i nawodnienia CaO . Obraz uszkodzeń próbki zaczynu cementowego (wprawdzie walcowej) po działaniu temperatury 800°C jest w gruncie rzeczy identyczny z widokiem uszkodzeń na rysunku 3, pokazany w [27].

Próbki zaprawy po ogrzewaniu do wysokich temperatur w większości przetrwały to nagrzewanie, zwłaszcza o $w/c = 0,4$. Próbki o wskaźniku $w/c = 0,5$, podobnie jak w przypadku zaczynu, nie były odporne na nagrzewanie w temperaturze 700°C , a próbki o wskaźniku $w/c = 0,6$ nie wytrzymały nagrzewania w temperaturach 600 i 700°C . W dostępnym piśmiennictwie [28] stwierdzono, że w temperaturze 900°C nie można było testować próbek zaprawy z powodu ich niewystarczającej wytrzymałości, natomiast wygrzewanie tych próbek



Rys. 3. Próbką zaczynu $w/c = 0,4$ po wygrzewaniu w piecu w temperaturze 700°C

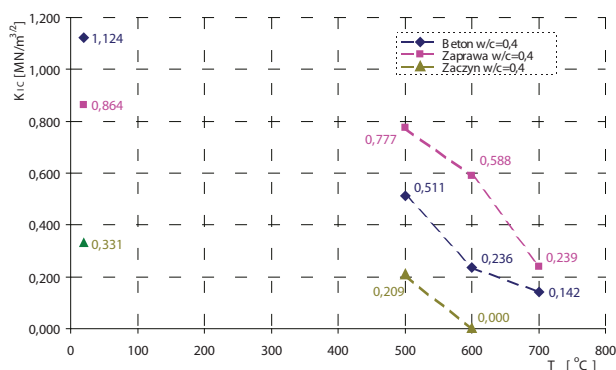
w temperaturach niższych (od 900°C), rzędu 500°C i 700°C kończyło się często ich uszkodzeniem.

4. Wyniki wybranych badań

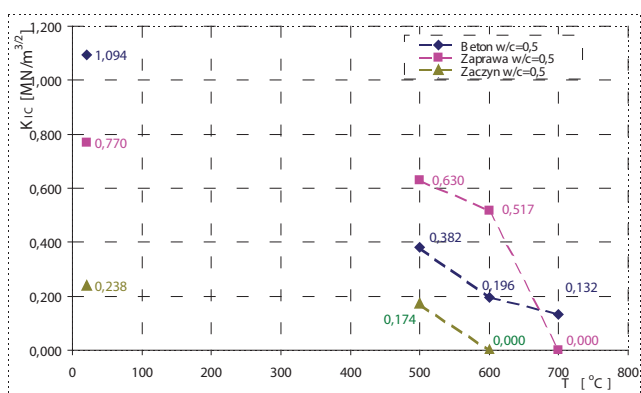
Z wieloaspektowej pracy [9] w niniejszym artykule przytoczono i porównano jedynie wyniki zależności krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} od temperatury dla betonu, zaczynu i zaprawy. Wykresy „zbiorcze”, na których zaprezentowano te zależności pokazują rysunki 4, 5, 6. Wykresy zawierają bardzo interesujące informacje pomimo wydawałoby się, jakby braku jednoznacznej możliwości porównywania tych zależności między różniącymi się, chociażby składem fazowym, kompozytami. Pamiętać należy jednak o tym, że proporcje składników zaczynu i zaprawy przyjęto identyczne jak w betonie.

Na wykresach podano wartości średnie, statystycznie wszystkie wyniki mieszczą się w dopuszczalnym parametrze zmienności 15% podanym przez [29] i normę [30] (pkt 8.2.1.2). Daje się wyraźnie zauważyć praktycznie identyczny przebieg zależności dla wszystkich badanych w/c (0,4; 0,5 i 0,6), co pokazują rysunki 4, 5 i 6. Kształt i ułożenie wykresów, pomimo różnych wartości, dla wszystkich badanych temperatur pożarowych jest w zasadzie identyczny. Przerwane linie na wykresach nie obrazują wyników badań, ich zadaniem jest ułatwienie „czytania” wykresów i wyraźniejsze pokazanie przebiegu badanych zależności. Należy zwrócić uwagę na początkowe wielkości parametrów odporności na pękanie w temperaturze 20°C – na wszystkich wykresach w tej temperaturze krytyczny współczynnik intensywności naprężeń jest najwyższy, a w wysokich temperaturach następuje bardzo szybki spadek tego parametru w betonie. Charakterystyczny jest tu zwłaszcza mniejszy spadek w wysokich temperaturach współczynnika K_{IC} zaprawy i zaczynu niż betonu, wyrażony zarówno w wartościach bezwzględnych, jak i procentowych.

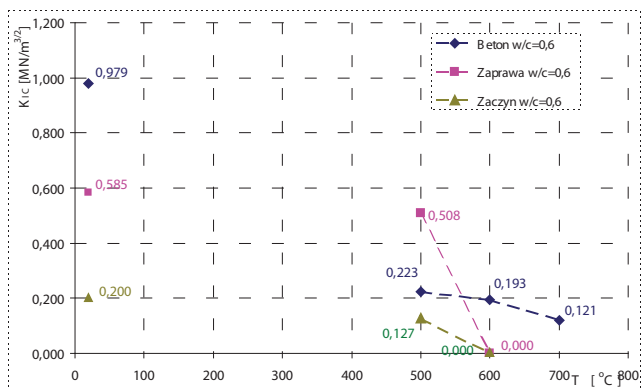
Istotnych informacji dostarczyło zestawienie wyników badań betonu, zaczynu i zaprawy na jednym wykresie (rysunki 4, 5, 6). Z uwagi na lepszą czytelność, wykresy wykonano oddzielnie dla każdego w/c . Porównanie procentowego spadku współczynnika K_{IC} betonu, zaczynu i zaprawy pod wpływem wysokich temperatur prowadzi do dość interesujących wniosków - praktycznie dla wszystkich badanych wskaźników w/c beton wykazał największy spadek współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} .



Rys. 4. Zależności $K_{IC} - T$ betonu, zaczynu i zaprawy dla $w/c = 0,4$ pod wpływem wysokich temperatur



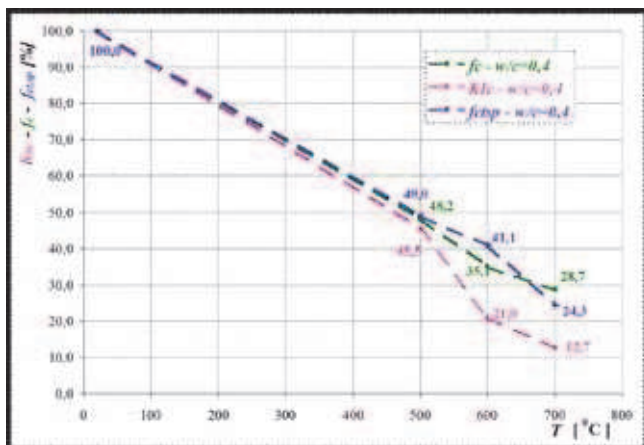
Rys. 5. Zależności $K_{IC} - T$ betonu, zaczynu i zaprawy dla $w/c = 0,5$ pod wpływem wysokich temperatur



Rys. 6. Zależności $K_{IC} - T$ betonu, zaczynu i zaprawy dla $w/c = 0,6$ pod wpływem wysokich temperatur

Spadek ten wynosił (zależnie od w/c) w temperaturze 500°C od około 55% do 77%, w temperaturze 600°C od około 79% do 82%, natomiast w temperaturze 700°C – około 88% dla wszystkich w/c [9].

W przypadku wskaźnika $w/c = 0,4$ (rys. 4) najmniejszy spadek współczynnika K_{IC} zaobserwowano w zaprawie – tylko 10% w temperaturze 500°C , nieco większy spadek w tej temperaturze zaczyn cementowy – około 37%. Wszystkie spadki współczynnika K_{IC} dla poszczególnych kompozytów były następujące:



Rys. 7. Zależności K_{IC} ; f_c i $f_{ct,sp-T}$ betonu o $w/c = 0,4$ pod wpływem wysokich temperatur

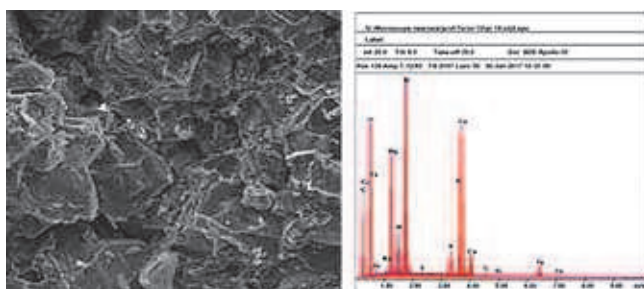
- 500°C: beton o około 55%, zaczyn o około 37%, zaprawa o około 10%,
- 600°C: beton o około 79%, zaczyn o 100%, zaprawa o około 32%,
- 700°C: beton o około 87%, zaprawa o około 72%.

Przy $w/c = 0,5$ (rys. 5) najmniejszy spadek współczynnika K_{IC} stwierdzono w zaprawie cementowej – o około 18% w temperaturze 500°C, w pozostałych kompozytach zaobserwowano następujące spadki:

- 500°C – beton o około 65%, zaczyn o około 27%, zaprawa o około 18%,
- 600°C – beton o około 82%, zaczyn o 100%, zaprawa o około 33%,
- 700°C – beton o około 88%, zaprawa o 100%.

Natomiast przy wskaźniku $w/c = 0,6$ można porównać beton z zaprawą i zaczynem tylko do temperatury 500°C, gdyż powyżej tej temperatury próbki zaczynu i zaprawy uległy zniszczeniu. Spadek współczynnika K_{IC} betonu w tej temperaturze wyniósł około 77%, zaczynu około 36%, a zaprawy tylko około 13%.

Jak można zauważyć z wykresów i zestawień spadków wyrażonych w procentach, przy wszystkich badanych w/c , największą względną i bezwzględną odporność na pęknięcie w wysokich temperaturach wykazywała zaprawa cementowa, oczywiście w zakresie temperatur, w których jeszcze nie uległa uszkodzeniu. Przykładowe zależności współczynnika intensywności naprężeń i wytrzymałości betonu od temperatury pokazano na rysunku 7. Jak wynika z wykresu, współczynnik intensywności



Rys. 8. Przykładowe zdjęcie SEM i mikroanaliza EDS betonu dla $w/c = 0,4$ po działaniu wysokich temperatur

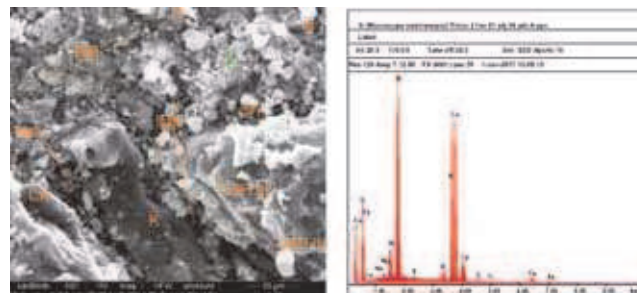
naprężeń betonu spada szybciej pod wpływem temperatur pożarowych niż jego wytrzymałości.

5. Wyniki badań SEM

Znaczna głębia ostrości mikroskopu skaningowego umożliwia badania fraktograficzne (topografii) przełomów, które polegają na ocenie ich powierzchni powstałych wskutek działania naprężeń rozrywających materiał próbki. Badania te umożliwiają również poznanie mechanizmów pęknięcia. Jak wiadomo, pęknięcia powstają i rozwijają się w najłagodniejszych miejscach próbek, toteż na przełomach widoczne są różnorodne detale struktury, np. wydzielenia obcych faz, wady materiałowe (pory, pustki i mikropęknięcia). W trakcie prowadzonych badań własnych wykonano zdjęcia skaningowym mikroskopem elektronowym SEM próbek betonu, zaczynu i zaprawy poddanych działaniu wysokich temperatur. Przeprowadzone mikroanalizy rentgenowskie (EDS – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy) pozwoliły na identyfikację składu pierwiastkowego badanych materiałów. Porównano przemiany strukturalne zachodzące w badanych kompozytach w zależności od w/c oraz temperatur, jak i temperatury 20°C.

Zaprezentowano przykładowe zdjęcia próbek struktury betonu i zaprawy dla $w/c = 0,4$ oraz ich mikroanalizy rentgenowskie po działaniu wysokiej temperatury. Zdjęcie SEM (rysunek 8, powiększenie 500x) wskazuje lokalizację badań EDS po aplikacji temperatury pożarowej 700°C – widoczne są kryształy portlandytu (lub podobne do nich płytki), które wskutek działania wysokiej temperatury uległy spękanom i rozluźniła się struktura ich kolumn oraz straciły kształt heksagonalny. Potwierdza to fakt, że w temperaturach pożarowych w wyniku odwodnienia wodorotlenku wapnia i redukcji wody związanej chemicznie następuje rozkład portlandytu [31].

Mikroanalizy EDS (Zdjęcie SEM zaprawy po aplikacji temperatury 500°C (powiększenie 5000x) pokazano na rysunku 9. Z analizy EDS wynika, że w fazie CSH III stosunek C/S = 0,97 wg klasyfikacji Nonata. Wartość ta jest bardzo bliska do C/S = 0,99, przy której kompozyt posiada najwyższą odporność na pęknięcie (max K_{IC}). Świadczy to o potwierdzeniu wyników badań opisanych w pkt 4 przez zdjęcia SEM i mikroanalizy EDS, że zaprawa cementowa posiada większą odporność na pęknięcie w wysokich temperaturach niż beton, uwzględniające również skład tlenkowy wykazały, że stosunek tlenku wapnia do dwutlenku krzemu wynosi $C/S = 0,81 < 1,0$, czyli jest to



Rys. 9. Przykładowe zdjęcie SEM i EDS zaprawy dla $w/c = 0,4$ po działaniu wysokich temperatur: CH – portlandyt, faza CSH, MR – mikrorzysy, P – pory, K – kruszywo

faza „α” wg klasyfikacji Nonata. Kompozyt posiada najwyższą odporność na pękanie, gdy w fazie CSH stosunek C/S wynosi 0,99, zgodnie z [32].

Zdjęcie SEM zaprawy po aplikacji temperatury 500°C (powiększenie 5000×) pokazano na rysunku 9. Z analizy EDS wynika, że w fazie CSH III stosunek C/S = 0,97 wg klasyfikacji Nonata. Wartość ta jest bardzo bliska do C/S = 0,99, przy której kompozyt posiada najwyższą odporność na pękanie (max K_{IC}). Świadczy to o potwierdzeniu wyników badań opisanych w pkt 4 przez zdjęcia SEM i mikroanalizy EDS, że zaprawa cementowa posiada większą odporność na pękanie w wysokich temperaturach niż beton.

6. Podsumowanie

Z wyżej opisanych badań i analiz wynika, że pomimo wyższej odporności betonu na wysokie temperatury, o czym świadczy przetrwanie przez próbki betonowe temperatury 700°C, spadek współczynnika K_{IC} jest dużo szybszy w betonie niż w zaczynie i zaprawie, które w rzeczywistości mają mniejszą odporność ogniową niż beton, czego dowodzi uszkodzenie, a nawet zniszczenie tych próbek (zwłaszcza dla $w/c = 0,6$) w temperaturach powyżej 500°C.

Powodem takiego zachowania się tych kompozytów cementowych jest brak kruszywa grubego, a zatem inny poziom struktury zaprawy (mikro) i zaczynu cementowego (submikro) niż betonu (makro). Brak kruszywa grubego powoduje również zmniejszenie strefy przejściowej (kontaktowej) na styku matrycy cementowej i kruszywa, co eliminuje najłabsze ogniwo, którym jest ta strefa w betonie. Wprawdzie w zaprawie strefa przejściowa też istnieje, jednak z powodu niewielkich gabarytów ziaren kruszywa drobnego nie występuje tzw. „efekt ściany” w takiej skali, jak to ma miejsce na styku kruszywa grubego i matrycy cementowej, co prawdopodobnie rzutuje na relatywnie większą wytrzymałość ITZ (*Interfacial Transition Zone*) w zaprawie.

Potwierdzeniem są opisane w pkt. 3.3. uszkodzenia w betonie po działaniu wysokich temperatur, które powstają głównie na granicy ziaren kruszywa grubego i zaczynu, nie przechodząc przez ziarna kruszywa grubego i nie rozrywając ich. Jest to wynikiem spadku wytrzymałości pod wpływem działania wysokich temperatur, zwłaszcza strefy przejściowej pomiędzy matrycą a kruszywem, ale także, choć w mniejszym stopniu, zaczynu i zaprawy cementowej zawartych w betonie. W przypadku zaczynu z powodu braku kruszywa, warstwa przejściowa właściwie występuje jakby szczątkowo, jedynie na pozostałościach części niezhidratyzowanych ziaren cementu [33], co uzasadnia mniejszy spadek współczynnika K_{IC} w temperaturach pożarowych.

Referat prezentowany na konferencji KRYNICA 2018

BIBLIOGRAFIA

[1] Prokopski G., Analiza związku struktury z odpornością betonów na pękanie. Praca habilitacyjna. Seria monografie nr 14/1990, 88-97, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 1990
 [2] Malhotra H. L., The effect of temperature on the compressive strength of concrete. Magazine of Concrete Research, tom 8, nr 23, str. 85–94, 1956

[3] Concrete Society: Assessment, Design and Repair of Fire-Damaged Concrete Structures. Technical Report nr 68, The Concrete Society, London, United Kingdom, 2008
 [4] Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling. Bulletin FIB, nr. 38, CEB-FIB, 2007
 [5] Hager I., Tracz T., Śliwiński J., Krzemień K., The influence of aggregate type on the physical and mechanical properties of high-performance concrete subjected to high temperature. Fire and materials, 40/2016, str. 668–682
 [6] Ogrodnik P., Zegardło B., Halicka A., Wstępna analiza możliwości zastosowania odpadów ceramiki sanitarnej w funkcji kruszywa do betonów pracujących w warunkach wysokich temperatur, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza 1/2012, str. 49–56
 [7] Runkiewicz L., Sotomonow W., Kuźniecowa I., Ocena bezpieczeństwa konstrukcji żelbetowych po pożarze, Inżynieria i Budownictwo 12/1993, str. 518–522
 [8] Piasta J., Piasta W.G., Beton zwykły, Arkady, Warszawa, 1994
 [9] Plechawski S., Wpływ temperatur pożarowych na wybrane parametry struktury betonów. Praca doktorska, Politechnika Lubelska, WBiA, Lublin, 2017
 [10] Zhang B., Bicanic N., Fracture energy of high performance concrete at high temperatures up to 450°C: the effects of heating temperatures and testing conditions (hot and cold). Magazine of Concrete Research, 58, nr 5, czerwiec 2006, str. 277–288
 [11] Kodur V., Properties of Concrete at Elevated Temperatures. Hindawi Publishing Corporation, ISRN Civil Engineering, Article ID 468510, 15, Volume 2014
 [12] PN-EN 1992-1-2:2008, Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu Część 1-2, Reguły ogólne Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe
 [13] Hager I., Behaviour of cement concrete at high temperature, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, tom 61, nr 1, 2013
 [14] RILEM Draft Recommendations TC-89-FMT, Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete. Materials and Structures, 23, str. 461–465, 1990
 [15] RILEM Draft Recommendations TC-89-FMT, Determination of fracture parameters (K_{IC}-CTOD_c) of plain concrete using three-point bend tests. Materials and Structures, 23, str. 457–460, 1990
 [16] Higgins D.D., Bailey J.E., Fracture measurements on cement paste. Journal of Materials Science, 11, str. 1995–2003, 1976
 [17] Naus D., Lott J., Fracture toughness of Portland cement concretes. ACI Journal, czerwiec 1969, str. 481–489
 [18] Prokopski G., Analiza związku struktury z odpornością betonów na pękanie. Praca habilitacyjna, Seria monografie nr 14/1990, str. 88–97, Politechnika Częstochowska
 [19] PN-EN 196-1:2006, Metody badania cementu. Część 1, Oznaczenie wytrzymałości
 [20] Swamy N.R., Fracture Mechanics Applied To Concrete. Developments in Concrete Technology. LTD, London, str. 221–281, 1979
 [21] PN-EN 12390-2, 2011 Badania betonu. Część 2, Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych
 [22] Baker G., The effect of exposure to elevated temperatures on the fracture energy of plain concrete. Materials and Structures, tom 29, czerwiec 1996, str. 383–388
 [23] Olsen N.H., Heat-induced Explosion in High Strength Concrete. Copyright by Nicholas Holkmann Olsen, Afdelingen for Baerende Konstruktioner Danmarks Tekniske Højskole Lyngby, 1990
 [24] PN-B-02851-1:1997 Ochrona przeciwpożarowa budynków. Badania odporności ogniowej elementów budynków. Wymagania ogólne i klasyfikacja
 [25] Smardz P., Wyznaczanie odporności ogniowej elementów konstrukcji wg Eurokodów. Ochrona Przeciwpożarowa 1/2010
 [26] RILEM TC 129-MHT, Test Methods for Mechanical Properties Concrete at High Temperatures, Recommendations: Part 6 – Thermal Strain. Materials and Structures, Supplement March, 17–21, 1997
 [27] Mendes A., Sanjayan J., Gates W., Collins F., The influence of water absorption and porosity on the deterioration of cement paste and concrete exposed to elevated temperatures, as in a fire event. Cement & Concrete Composites 34/2012, str. 1067–1074
 [28] Djaknoun S., Ouedraogo E., Ahmed Benyahia A., Characterisation of the behaviour of high performance mortar subjected to high temperatures. Construction and Building Materials 28/2012, str. 176–186
 [29] Brunarski L., Określenie wytrzymałości betonu na podstawie diagnostycznych badań konstrukcji. XXI Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, tom 1, str. 39–54, Szczyrk, 2006
 [30] PN-EN 206-1, 2003 Beton. Część 1, Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
 [31] Fic S., Szelaż M., Analysis of the development of cluster cracks caused by elevated temperatures in cement paste. Construction and Building Materials 83/2015, str. 223–229
 [32] Golewski G. L., Procesy pękania w betonie z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych. Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury, Lublin, 2015
 [33] Brandt A.M., Wpływ warstwy przejściowej na właściwości mechaniczne betonów wysokowartościowych (BWW), II Konferencja Matbud’98. Kraków, str. 21–29, 1998