

Wpływ pożaru na jakość i strukturę betonu w ścianowej konstrukcji żelbetowej

THE INFLUENCE OF FIRE ON QUALITY AND STRUCTURE OF REINFORCED
CONCRETE WALL STRUCTURE

Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę jakości i strukturę betonu uszkodzonego na skutek oddziaływania wysokiej temperatury. Beton został pobrany z prefabrykowanej, żelbetowej ściany oddzielenia pożarowego budynku biurowca. Konstrukcja budynku uległa katastrofie budowlanej poprzez spalanie. Ściana pożarowa spełniła wymagania odporności ogniowej i w sposób prawidłowy ochroniła konstrukcję budynku biurowego. Na podstawie badań laboratoryjnych określono przybliżoną temperaturę jaką uzyskał beton w trakcie pożaru.

Abstract

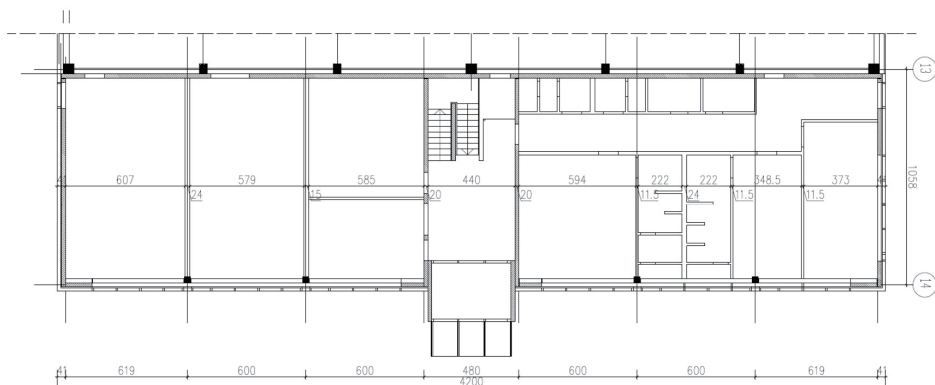
On the paper was introduced the analysis of quality and inner structure of concrete damaged by high temperature. Concrete was received from the prefabricated RC fire-separation wall in office building. The building structure was burned-out. The fire-separation wall accommodated demand of the fire-resistance and in the correct manner was protected the structure of this building. On the basis of laboratory-research the approximate temperature obtained by concrete in progress of fire was defined.

1. Wstęp

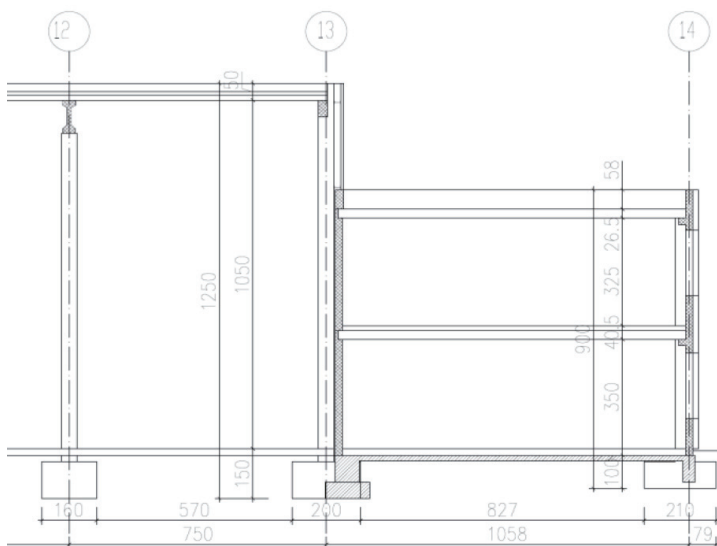
Pożar jest zjawiskiem bardzo trudnym do przewidzenia, a ocena szkód pożarowych betonu jest zagadnieniem wieloetapowym, bardzo złożonym i wymaga zastosowania zaawansowanych metod badawczych. Jest to spowodowane dużą ilością zmiennych (takich jak temperatura i czas pożaru, gradient temperatury, czy dynamika rozchodzenia ognia), jakie należy przeanalizować i poddać ocenie. Głównym zagrożeniem dla konstrukcji jest występowanie wysokiej temperatury. W związku z tym poddano ocenie jakość i strukturę betonu uszkodzonego na skutek oddziaływania pożaru. Analizie poddano beton pobrany ze ściany oddzielenia pożarowego budynku biurowego. Metodą nieniszczącą i niszczącą określono wytrzymałość betonu na ściskanie oraz przeanalizowano zmiany struktury wewnętrznej betonu (z użyciem analizy SEM).

2. Ogólne informacje o obiekcie

Budynek biurowy był częścią kompleksu przemysłowego składającego się z hali produkcyjno – magazynowej, części magazynowej oraz części biurowej. Hala produkcyjno-magazynowa, wraz z częścią magazynową uległy katastrofie budowlanej i całkowitemu spaleni. Budynek biurowy (ze względu na prawidłowo wykonaną ścianę pożarową REI120) pozostał nieuszkodzony. Biurowiec po zniszczeniu części produkcyjno – magazynowej stanowi niezależny, wolnostojący budynek. Wymiary obiektu to: wysokość – 8,00 m, szerokość – 12,20 m (uwzględniając wiatrołap), długość – 42,00m (rys. 1). Obiekt został zaprojektowany jako budynek prefabrykowany, żelbetowy, jednonawowy, dwukondygnacyjny, przyległy do hali produkcyjno-magazynowej. Strop nad parterem i stropodach zaprojektowano z prefabrykowanych płyt kałowych HC265. Rozpiętość konstrukcyjna stropu i stropodachu to 10,50 m, kierunek ułożenia stropu był poprzeczny. Ściana pożarowa w osi 13 (rys. 1 i 2) stanowiła przegrodę oddzielenia pożarowego pomiędzy budynkiem administracyjno-biurowym, a częścią produkcyjno-magazynową i była integralną częścią konstrukcji budynku administracyjno-biurowego. Budynek był posadowiony na stopach i ławach fundamentowych.



Rys. 1. Rzut przyziemia



Rys. 2. Przekrój poprzeczny

3. Opis technologii i procesów niszczących

Ściana budynku biurowego w osi 13 została poddana działaniu wysokiej temperatury w trakcie pożaru i nagłemu schłodzeniu w wyniku akcji gaśniczej.



Fot. 1. Widok spalonego obiektu

Pożar rozpoczął się w części produkcyjno-magazynowej. W wyniku oddziaływania ognia większość elementów konstrukcyjnych ww. części budynku została zniszczona. Po uprzątnięci zgliszczy pozostały tylko żelbetowe słupy hali (fot. 1.). Po rozbiórce części pro-

dukcyjno–magazynowej oraz części magazynowej pozostały dwa wolnostojące budynki: opisany biurowiec oraz budynek pomieszczeń technicznych i trafostacji.

Częściowemu zniszczeniu również uległa ściana pożarowa (fot. 2).



Fot. 2. Widok ściany pożarowej: a) widoczne odspojenia otuliny, b) ślady sadzy i osmolenia

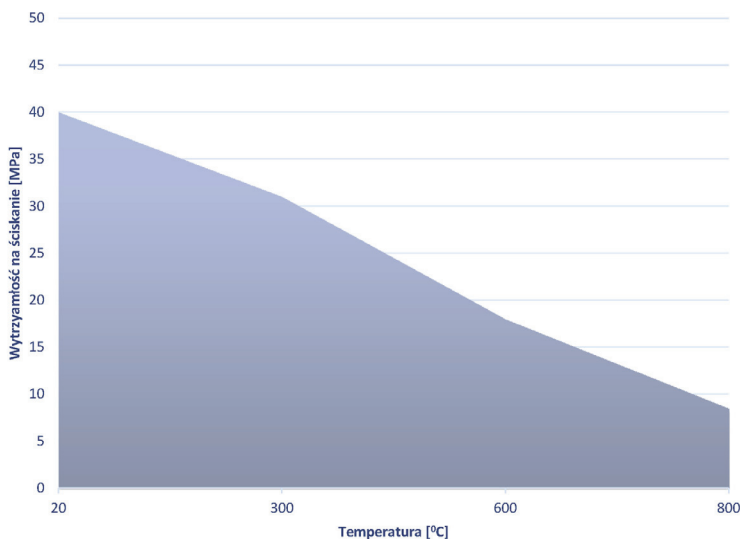
4. Wpływ wysokiej temperatury na właściwości betonu cementowego

Beton jako materiał konstrukcyjny jest w stanie zachować swoje właściwości wytrzymałościowe w wysokiej temperaturze. Efektem działania ognia oraz wystąpienia dużych gradientów temperatury w betonie jest jego degradacja, w postaci zmian cech fizyko-mechanicznych oraz zmian w jego strukturze wewnętrznej. Zasięg jej oddziaływania można określać poprzez analizę stref spadku wytrzymałości na ściskanie betonu. Spadek wytrzymałości betonu zależy od: zastosowanej receptury (rodzaju kruszywa, zawartości dodatków i domieszek oraz wskaźnika W/C), szybkości wzrostu i czasu oddziaływania temperatury. Degradacja betonu jest spowodowana przez przemiany fizykochemiczne zachodzące w jego strukturze. Wzrost temperatury powoduje odparowanie wody z materiału, rozkład żelu CSH, wodorotlenku wapniowego i glinianów wapniowych.

Jak wiadomo poszczególne składniki zaczynu cementowego w betonie mają różną trwałość. W temperaturze bliskiej 200°C następuje częściowe odwodnienie ettringitu i początek odwodnienia uwodnionych krzemianów wapniowych typu CSH. Wzrost temperatury do 300°C doprowadza do zakończenia procesu odwodnienia ettringitu i kontynuacji odwodnienia uwodnionych krzemianów wapniowych typu CSH. Odwodnienia uwodnionych krzemianów wapniowych typu CSH i zakończenie procesu

dehydroksylacji portlandytu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ następuję w temperaturze 600°C . Przy ogrzewaniu betonu do temperatury 1000°C ulegają rozkładowi wszystkie produkty hydratacji i hydrolizy, a także karbonatyzacji cementu. W zależności od wysokości temperatury i czasu jej oddziaływania na zaczyn w betonie zarówno stopień odwodnienia zaczynu, jak i jego dekarbonatyzacji będzie zróżnicowany. W wysokiej temperaturze zachodzą również zmiany fizykochemiczne w strukturze kruszywa, gdyż przemiana fazowa kwarcu powoduje wzrost objętości materiału, a w temperaturze powyżej 800°C dochodzi do rozkładu kruszywa wapiennych [1–4].

Wraz ze wzrostem temperatury następuje stopniowy i proporcjonalny spadek wytrzymałości betonu na ściskanie. Gdy temperatura betonu przekroczy 300°C spadek wytrzymałości następuje szybciej, a przekroczenie temperatury 500°C powoduje spadek wytrzymałości z zakresu od 50% do 60%, wtedy beton uznaje się za zniszczony (Rys. 3) [5].



Rys. 3. Zmiana wytrzymałości na ściskanie betonu C30/37 w zależności od oddziałującej temperatury [5]

5. Zastosowane metody badawcze

Ocenę wpływu wysokiej temperatury na właściwości fizyczne betonu (analizę uszkodzeń pożarowych betonu) rozpoczęto od oceny wizualnej budynku. Zakres stref oddziaływania wysokiej temperatury na stan konstrukcji i betonu oceniono na podstawie: obecności sadzy i osmolenia, zmiany koloru betonu, wystąpienia złuszczeń i odspojen otuliny, obecności rys i spękań na jego powierzchni. Oględziny przeprowadzono od strony zewnętrznej, czyli od strony pożaru, a także od strony wewnętrznej budynku. W badaniach wykorzystano elektroniczny młotek Schmidta Silver Schmidt typu N o energii uderzenia 2,21 Nm, oprogramowanie komputerowe Proceq Hammerlink, prasę hydrauliczną MA-

TEST, mikroskop skaningowy Hitachi UHR FE-SEM SU 8010 oraz mikroskop optyczny cyfrowy KEYENC VHX-5000.

Badania rozpoczęto od nieniszczącej oceny młotkiem Schmidta wytrzymałości na ściskanie betonu znajdującego się w analizowanej ścianie. Na podstawie oględzin oraz wyników badań wykonanych młotkiem Schmidta wybrano reprezentacyjne miejsca, z których pobrano 10 próbek rdzeniowych (na pełną grubość ściany). Dobór miejsc był następujący (fot. 3):

- miejsca z widocznym odspojeniem otuliny zbrojenia – próbki 1, 2, 3, 5,
- miejsca pokryte sadzą – próbki 7, 8, 9, 10,
- miejsca bez widocznych uszkodzeń i śladów sadzy – próbki 4 i 6.



Fot. 3. Lokalizacja miejsc pobrania próbek rdzeniowych betonu

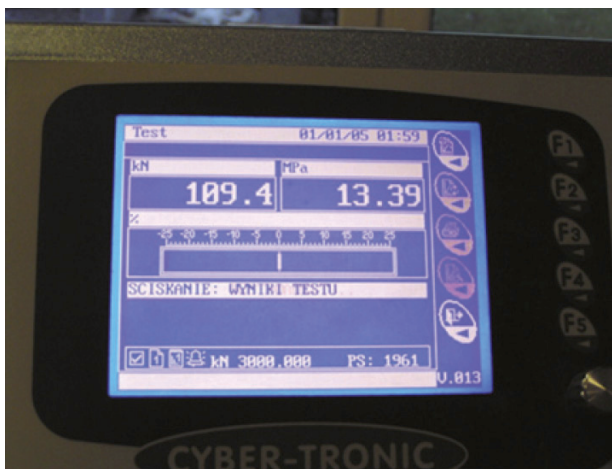
Odwiercone próbki rdzeniowe przewieziono do laboratorium Instytutu Konstrukcji Budowlanych PP i poddano szczegółowym badaniom. Pozyskane walce o średnicy 100 mm i długość 200 mm oczyszczono, osuszono oraz poddano wstępnym oględzinom. Następnie próbki przecięto na połowę wysokości (2x100 mm) i oznaczono literą A od strony wewnętrznej i literą B od strony zewnętrznej, czyli od strony pożaru. Na przygotowanych próbkach rdzeniowych określono metodą niszczącą wytrzymałość analizowanego betonu na ściskanie. Badanie wytrzymałości na ściskanie przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej do prób statycznych MATEST nr fabryczny C 089 P 131, rok produkcji 2005 (fot. 4.). Maszyna posiada napęd elektrohydrauliczny i hydrauliczny z elektronicznym



Fot. 4. Maszyna wytrzymałościowa do prób statycznych MATEST

układem sterującym CYBER TRONIK (fot. 5.). Zgodnie ze świadectwem wzorcowania nr OUM1-W1/1355-1/05 i z p. 4.2.2 normy PN-EN 12390-4:2001 *Badania betonu. Część 4: Wytrzymałość na ściskanie. Wymagania dla maszyn wytrzymałościowych*, maszynę należy zaliczyć do klasy 1. Maksymalne obciążenie maszyny wynosiło 3000kN.

Badania wykonano zgodnie z normą PN-EN 12390-3:2002. *Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania*.



Fot. 5. Monitor elektronicznego układu sterującego CYBER TRONIK

Przeprowadzono również badania struktury analizowanego betonu przy użyciu mikroskopu skaningowego Hitachi UHR FE-SEM SU 8010 oraz cyfrowego mikroskopu KEYENC VHX-5000 [6]. Z próbki nr 3 pobrano dwa szlify o wymiarach 1x1x1cm (od strony pożaru) i poddano analizie (fot. 6.).



Fot. 6. Badanie przy użyciu mikroskopu skaningowego Hitachi UHR FE-SEM SU 8010

6. Wyniki badań

W tabeli 1 przedstawiono wyniki wytrzymałości betonu na ściskanie w analizowanej konstrukcji badane metodą nieniszczącą, przedstawiono średnie wartości obliczone z 12 pomiarów.

Tabela 1. Wytrzymałość na ściskanie betonu w konstrukcji $f_{ck, is}$ badana metodą nieniszczącą

Nr próbki	Średnia wartość liczby odbicia	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
1	53,4 ± 0,3	72,9
2	49,4 ± 0,2	67,4
3	49,9 ± 0,5	68,2
4	45,1 ± 0,4	61,6
5	58,9 ± 0,1	80,4
6	59,6 ± 0,3	81,3
7	60,6 ± 0,6	82,8
8	63,3 ± 0,4	85,7
9	62,1 ± 0,3	77,2
10	53,4 ± 0,5	92,5

W tabeli 2 przedstawiono wyniki wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcji $f_{ck, is}$ otrzymane z metody niszczącej.

Tabela 2. Wytrzymałość na ściskanie betonu w konstrukcji $f_{ck, is}$ badana metodą niszczącą

Nr próbki	Ciężar objętościowy próbki [kg/dm ³]	Siła nacisku [kN]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
1A	2,344	519,406	75,647
1B	2,334	500,475	72,891
2A	2,510	515,194	75,034
2B	2,434	462,764	67,398
3A	2,348	562,439	81,915
4B	2,329	467,953	68,154
5A	2,356	562,577	81,935
5B	2,341	422,952	61,600
6A	2,319	599,867	87,366
6B	2,399	551,784	80,363
7A	2,369	563,417	82,058
7B	2,502	558,513	81,344

Tabela 2. Cd. Wytrzymałość na ściskanie betonu w konstrukcji $f_{ck, is}$ badana metodą niszczącą

Nr próbki	Ciężar objętościowy próbki [kg/dm ³]	Siła nacisku [kN]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
8A	Tabela	612,785	89,248
8B	2,369	568,186	82,752
9A	2,511	649,182	94,549
9B	2,522	588,652	85,733
10A	2,554	725,535	108,669
10B	2,246	529,914	77,178

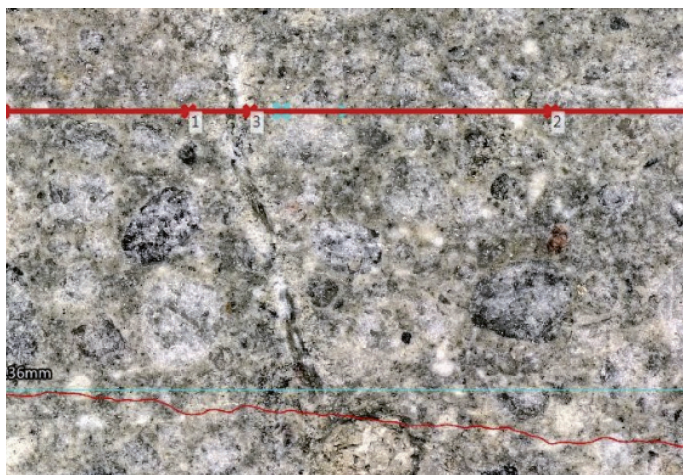
A – próbki od strony wewnętrznej; B – próbka od strony zewnętrznej (pożaru)

W tabeli 3 przedstawiono procentowy spadek wytrzymałości betonu na ściskanie w analizowanej konstrukcji $f_{ck, is}$.

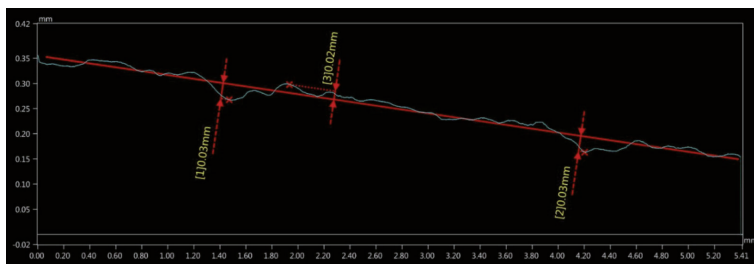
Tabela 3. Procentowy spadek wytrzymałości betonu na ściskanie w analizowanej konstrukcji $f_{ck, is}$

Nr próbki	Wytrzymałość na ściskanie od strony pożaru [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie od strony wnętrza budynku [MPa]	Spadek wytrzymałości [MPa]	Procentowy spadek wytrzymałości
1	75,647	72,891	2,756	3,643%
2	75,034	67,398	7,636	10,177%
5	81,935	61,600	20,335	24,818%
6	87,366	80,363	7,003	8,016%
7	82,058	81,344	0,714	0,870%
8	89,248	82,752	6,496	7,279%
9	94,549	85,733	8,816	9,324%
10	108,669	77,178	31,491	28,979%

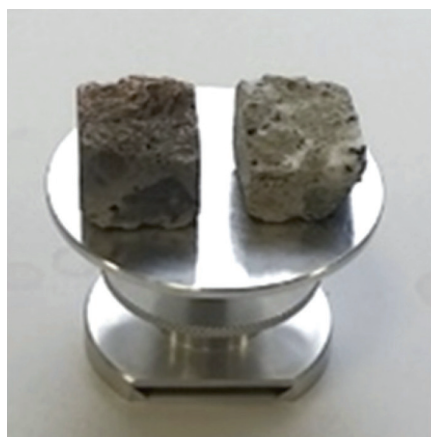
Efektom przeprowadzonych badań mikroskopowych były zarysowania wewnętrzne (fot. 7, 8) oraz zmiany w strukturze wewnętrznej analizowanego betonu poddanego wysokiej temperaturze (fot. 9–13)



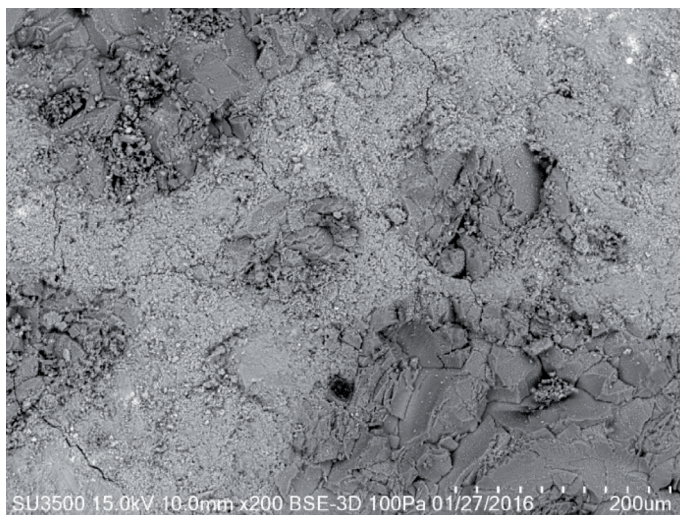
Fot. 7. Widok próbki betonu w powiększeniu 1000x



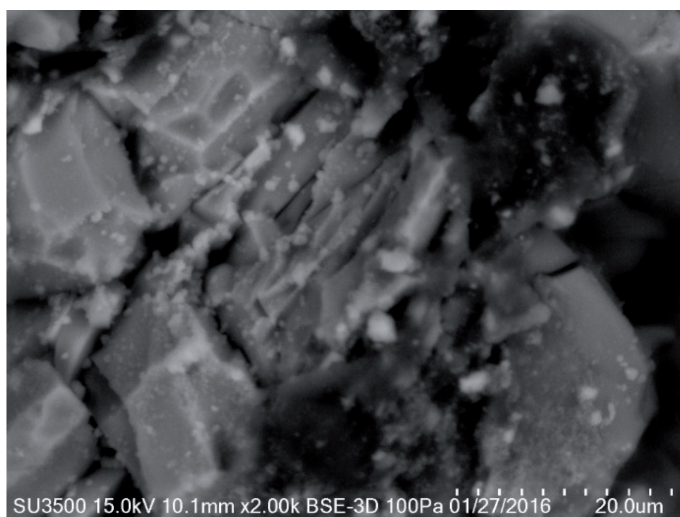
Fot. 8. Rozwinięcie przekroju – analiza zarysowania (czerwona linia na fot. 7)



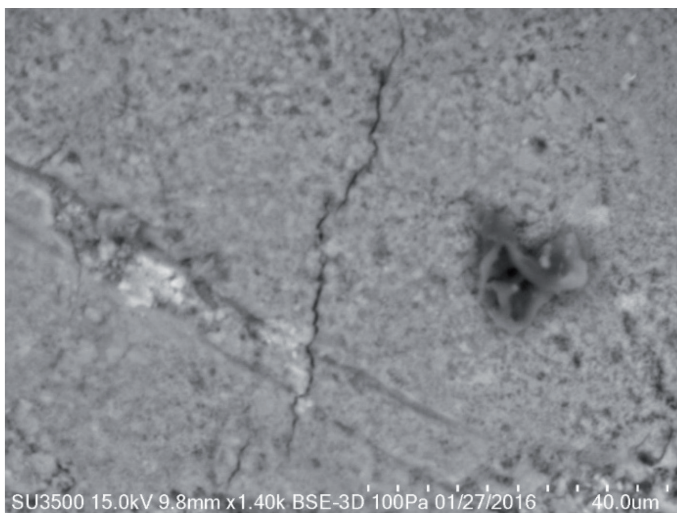
Fot. 9. Widok próbek przygotowanych do badań z użyciem mikroskopu optycznego i skaninowego



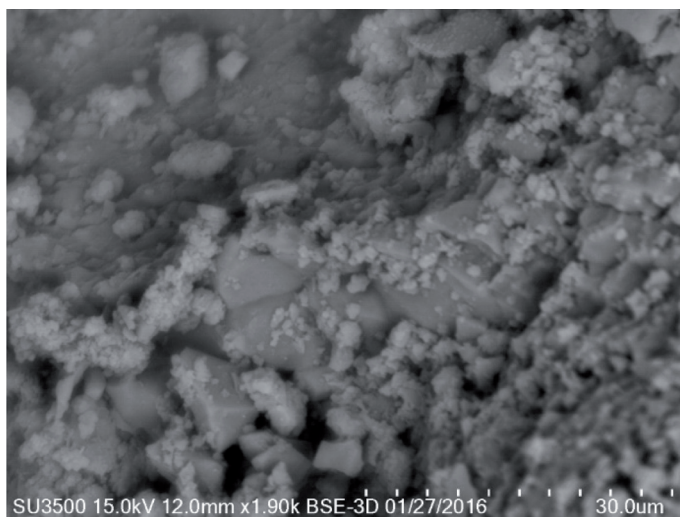
Fot. 10. Liczne mikropęknięcia struktury wewnętrznej



Fot. 11. Widoczne kryształy wodorotlenku wapnia w postaci dużych tabliczek o zarysach sześciokątnych, budowie warstwowej, charakterystyczne dla betonów poddanych temp. 300°C



Fot. 12. Struktura nazywana „różą pustyni” tworząca się w wyniku rekrystalizacji portlandytu charakterystyczna dla betonów poddanych działaniu temp >500°C



Fot. 13. Nowo powstałe składniki zaczynu cementowego charakterystyczne dla betonów poddanych działaniu temp >600°C

7. Analiza uzyskanych wyników badań

Ogłędziny ściany żelbetowej wykazały, że w betonie doszło do zjawiska „spallingu”, czyli do eksplozyjnego zachowania się betonu po gwałtownym ogrzaniu. Zjawisko to objawia się odspajaniem fragmentów betonu lub jego intensywnym złuszczeniem się. Prowadzi to do odsłonięcia zbrojenia, a w konsekwencji do gwałtownej utraty nośności elementu

żelbetowego. Makroskopowa ocena pobranych próbek wykazała właściwą barwę betonu (jasno szarą z brakiem odcienia różowego czy żółtego, które są charakterystycznego dla betonów poddanych wysokiej temperaturze), wykazała także brak znaczących pustych przestrzeni. Stwierdzono również obecność kruszywa łamanego, grys granitowego, praktycznie kruszywa o ciągłym uziarnieniu.

Analiza wyników badań wykazała bardzo wysoką wytrzymałość na ściskanie analizowanego betonu. Najwyższą wartość odnotowano dla próbki nr 10A (108,7 MPa), a najniższą dla próbki nr 5B (61,6 MPa). Dla wszystkich próbek pobranych od strony pożaru odnotowano niższe wartości wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z podpróbkami pobranymi od strony wewnętrznej budynku. Najwyższy spadek wytrzymałości odnotowano dla próbki nr 10 i 5, a najmniejszy dla próbki nr 7. Spadek wytrzymałości betonu na ściskanie miał losowy charakter i nie miał odzwierciedlenia w śladach odnalezionych na powierzchni ściany (takich jak ślady sadzy, odsłonięcia zbrojenia i złuszczenia betonu).

Analiza mikroskopowa próbek wykazała, że beton lokalnie uległ obciążeniu temperaturą większą niż 500°C. Świadczą o tym m.in. liczne mikropęknięcia (fot. 10.), której najczęściej pojawiają się w temperaturze większej niż 300°C [5]. Odnaleziono także kryształy wodorotlenku wapnia w postaci dużych tabliczek o zarysach sześciokątnych (Fot. 11), które pojawiają się w temperaturze większej niż 300°C [4, 5]. Stwierdzono również obecność struktury „róży pustyni” (fot. 12.), która jest charakterystyczna dla betonów poddanych działaniu temp większej niż 500°C [1, 4].

8. Wnioski

Spadek wytrzymałości betonu na ściskanie oraz analiza mikroskopowa próbek wykazała, że beton lokalnie uległ obciążeniu temperaturą większą niż 500°C. Świadczą o tym liczne mikropęknięcia oraz obecność struktury zwanej „różą pustyni”, która jest charakterystyczna dla betonów poddanych działaniu temperaturze większej niż 500°C. Stwierdzono także degradację zaczynu cementowego. Należy zwrócić uwagę, że dzięki zastosowaniu kruszyw dobrej jakości i o właściwym uziarnieniu, pomimo oddziaływania wysokiej temperatury beton nie uległ zniszczeniu. Uszkodzeniu uległa jedynie jego wierzchnia warstwa.

Należy również podkreślić, że ocena szkód pożarowych betonu jest zagadnieniem bardzo złożonym i wymaga zastosowania zaawansowanych metod badawczych. Makroskopowa ocena elementów konstrukcyjnych nie pozwala nawet na szacunkową ocenę jakości betonu. W badaniach stwierdzono brak korelacji pomiędzy makroskopową oceną (analiza sadzy i osmolenia, zmiany koloru betonu, wystąpienie złuszczeń i odspojeń otuliny, obecność rys i spękań powierzchni), a wynikami badań niszczących. Pozornie zniszczone miejsca (z licznymi odpryskami i odspojeniami oraz pęknięciami) charakteryzowały się większą wytrzymałością w porównaniu do miejsc bez widocznych spękań i odspojeń, ale pokrytych sadzą.

Ze względu na brak stałej zależności między wytrzymałością betonu na ściskanie a liczbą odbicia, powszechnie stosowana metoda sklerometryczna w diagnostyce pożarowej umożliwia uzyskanie tylko przybliżonych wyników, ale pozwala określić jednak miejsca referencyjne do dalszych badań.

Literatura

- [1] Hager J., Metody oceny stanu betonu w konstrukcji po pożarze, Cement Wapno Beton, lipiec – sierpień 2009, s. 167–178.
- [2] Hager J., Śliwiński J., Durica T., „The impact of heating conditions on temperature distribution in high performance concrete specimens of various shapes and sizes.”, Slovak Journal of Civil Engineering, Volume XIV, 2006/2, p. 8–13.
- [3] Hager J., Pimienta P., Mechanical properties of HPC at high temperatures, Proc. Int. Workshop fi b Task Group 4.3, Fire Design of Concrete Structures What now? What next? Milan, Italy, December, 2004. p. 95–100.
- [4] Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie, décembre 2005, n° 62, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, p. 114.
- [5] Bednarek Z., Krzuwobłocka-Laurów R., Drzymała T., Effect of high temperature on the structure phase composition and strength of concrete, Zeszyty naukowe SGSP nr 38, Warszawa 2009, p. 5–25.
- [6] Golewski G., Zastosowanie mikroskopu skaningowego do analizy uszkodzeń wewnątrz materiałowych w betonach konstrukcyjnych, Przegląd budowlany 7-8/2008 s. 64–68.