

# Metodyka oceny stanu technicznego konstrukcji z betonu po pożarze

Dr inż. Izabela Hager, dr inż. Krzysztof Chudyba

W artykule przedstawiono metodykę oceny stanu technicznego konstrukcji z betonu poddanej oddziaływaniu temperatur pożarowych obejmującą: określenie charakteru i zakresu uszkodzeń, sposoby identyfikacji właściwości materiałowych betonu konstrukcyjnego i stali zbrojeniowej po pożarze (badania polowe i laboratoryjne), analizę wpływu stwierdzonych uszkodzeń na poziom bezpieczeństwa konstrukcji, a także diagnozę końcową wraz z klasyfikacją uszkodzeń oraz odpowiednie techniki naprawcze.

**Słowa kluczowe:** uszkodzenia pożarowe, konstrukcje z betonu, ocena stanu technicznego.

## Methodology of concrete structure technical state estimation after fire

The paper presents the methodology of technical state estimation for concrete structures subjected to fire actions that includes the following elements: determination of character and scope of damages, methods of identification of material properties for both structural concrete and reinforcing steel (in-situ and laboratory tests) after the fire, analysis of the influence of occurred damages onto safety level of structure as well as the final diagnosis with damages classification and appropriate repair techniques.

**Key words:** fire damages, concrete structures, technical state estimation.

### 1. Wprowadzenie

W efekcie oddziaływania pożarowego na konstrukcję z betonu dochodzić może do różnych uszkodzeń, których zakres i intensywność zależą od szczegółowych zastosowanych w obiekcie rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych, rodzaju i wielkości oddziaływań oraz rzeczywistego przebiegu zmian temperatury w czasie pożaru. Aby dokonać prawidłowej oceny stanu technicznego i poziomu bezpieczeństwa konstrukcji po pożarze oraz zdecydować o zakresie ewentualnych czynności naprawczych, konieczne jest przeprowadzenie analizy wpływu stwierdzonych uszkodzeń na nośność konstrukcji, bazując na zredukowanych parametrach materiałowych określonych z uwzględnieniem niekorzystnych wpływów wysokiej temperatury pożarowej. Ponieważ czas trwania rzeczywistego pożaru jest ograniczony, a konstrukcje z betonu zwykle nie ulegają całkowitemu zniszczeniu w trakcie pożaru,

określenie stanu technicznego i przeprowadzenie analizy poziomu bezpieczeństwa konstrukcji po pożarze jest niezbędne, aby podjąć właściwą decyzję odnośnie strategii naprawy/wzmacniania konstrukcji jako alternatywy dla wyburzenia.

### 2. Procedura stosowana do analizy stanu konstrukcji po pożarze

Kompletna procedura określania stanu technicznego konstrukcji po pożarze obejmuje [1, 2, 3]:

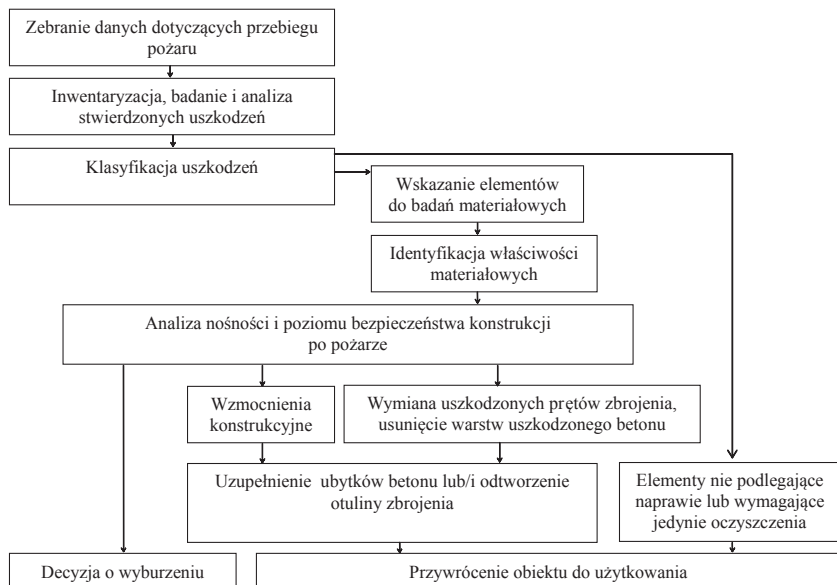
- Zebranie danych dotyczących przebiegu pożaru – czynności te należy wykonać możliwie jak najszybciej, tzn. jak tylko pomieszczenia poddane w trakcie pożaru działaniu ognia będą dostępne (po ochłodzeniu) i przed podjęciem prac związanych z oczyszczeniem obiektu. Wielu istotnych informacji o przebiegu pożaru, maksymalnej temperaturze osiągniętej w poszczególnych punktach w trakcie jego trwania dostar-

czyć może ogląd i analiza stanu zachowania różnych materiałów w obiekcie po pożarze (np.: stali, metali nieżelaznych, drewna, tworzyw sztucznych, szkła).

- Inwentaryzację, badanie i analizę stwierdzonych uszkodzeń (powstałych w trakcie działania pożaru oraz w trakcie prowadzonej akcji gaśniczej) – szczegółowe określenie charakteru, zakresu i lokalizacji uszkodzeń, będących efektem działania wysokiej temperatury pożarowej na konstrukcję.

- Klasyfikację uszkodzeń – zdefiniowanie kategorii uszkodzeń konstrukcji na podstawie charakteru, zakresu i konsekwencji wpływu tych uszkodzeń na poziom bezpieczeństwa konstrukcji, a także wskazanie elementów do szczegółowych badań materiałowych.

- Identyfikację właściwości materiałowych po pożarze – określenie poziomu właściwości mechanicznych materiałów (betonu konstrukcyjnego i stali zbrojeniowej) w konstrukcji po pożarze – czyli z uwzględnieniem niekorzystne-



**Rys. 1.** Procedura oceny stanu konstrukcji po pożarze – schemat blokowy  
**Fig. 1.** Procedure for structure technical state estimation after fire – schematic diagram

go wpływu wysokiej temperatury – przy wykorzystaniu niszczących oraz nieniszczących technik badawczych.

- Diagnozę końcową – wybór najbardziej właściwej metody naprawy lub decyzja o wyburzeniu konstrukcji – na podstawie analizy stanu technicznego i poziomu bezpieczeństwa konstrukcji (dla nośności obliczonych dla zredukowanych właściwości mechanicznych materiałów i sztywności przekrojów elementów) i przy uwzględnieniu czynnika ekonomicznego (analiza porównawcza kosztów wymaganych napraw i wykonania nowej konstrukcji). Schemat blokowy procedury oceny stanu technicznego konstrukcji po pożarze przedstawiono na rysunku 1.

### 3. Uszkodzenia materiałowe i na poziomie elementów konstrukcyjnych

Typowe uszkodzenia betonu w konstrukcji, będące efektem oddziaływania wysokiej temperatury pożarowej, to zarysowania i spękania, wykruszenia, odpryski i ubytki powierzchniowe, powstające od wysokiego nagrzania

w pobliżu źródła ognia oraz nierównomiernych zmian objętości [4]. W przypadku stali zbrojeniowej, określeniu i zlokalizowaniu podlegają miejsca uszkodzeń otuliny betonowej i odsłonięcia prętów zbrojeniowych oraz obszary, w których wystąpiło wybozczenie prętów lub utrata ciągłości zbrojenia. Inwentaryzacji i ewentualnym pomiarom geotechnicznym podlegają ponadto strefy znacznych deformacji konstrukcji od oddziaływań pośrednich (wymuszone oraz ograniczone wydłużenia i deformacje spowodowane zmianami temperatury w wyniku pożaru, wywołujące dodatkowe efekty oddziaływań).

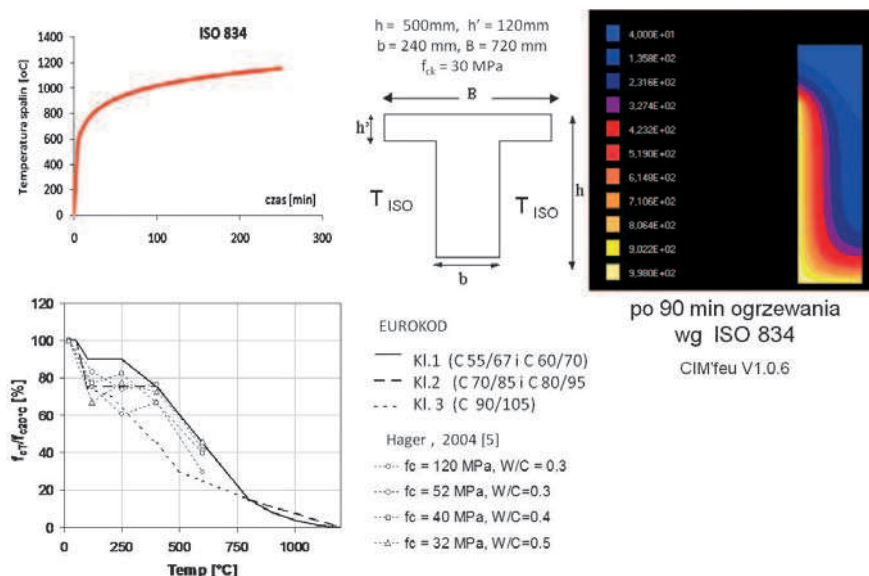
Rozkład temperatury wewnątrz elementu zależy nie tylko od jej maksymalnej wartości na powierzchni zewnętrznej, ale także od czasu trwania pożaru, przebiegu zmian temperatury w czasie, geometrii elementu czy właściwości zastosowanego betonu. W przypadku, gdy pręty zbrojeniowe zostają odsłonięte i narażone na bezpośrednie oddziaływanie wysokiej temperatury, stal w szybkim tempie traci swoje właściwości mechaniczne, powodując zmniejszenie nośności żelbetowych elemen-

tów konstrukcyjnych. Dodatkowo, po wykruszeniu otuliny betonowej, dochodzić może do wybozczenia prętów zbrojeniowych i utraty przyczepności do przyległego betonu, nawet w tych obszarach, w których zbrojenie jest jeszcze osłonięte. W warunkach pożaru jedynie w strefie bliskiej zewnętrznej powierzchni betonu temperatura osiąga maksymalne poziomy – jeżeli tylko beton nie podlega lokalnym lub powierzchniowym odpryskom, to warstwy zewnętrzne zapewniają ochronę termiczną stali zbrojeniowej i wewnętrznych warstw betonu w przekroju, stanowiąc ciągle dość efektywną barierę termiczną, choć ich rola konstrukcyjna może być już wyczerpana.

Oddziaływanie wysokiej temperatury pożarowej powoduje dla betonu i stali zbrojeniowej redukcję właściwości mechanicznych oraz redukcję sztywności przekrojów elementów konstrukcyjnych. Jednakże stal zbrojeniowa ma tendencję do częściowego odzyskiwania swych początkowych właściwości wytrzymałościowych po ochłodzeniu, podczas gdy w przypadku betonu konstrukcyjnego – w trakcie studzenia i po ochłodzeniu – dochodzić może nawet do dalszej redukcji parametrów wytrzymałościowych.

Na rysunku 2 przedstawiono zależności opisujące redukcję wytrzymałości na ściskanie betonów wysokowartościowych w funkcji temperatury pożarowej dla różnych klas wytrzymałości [5] na tle zaleceń Eurokodu 2. Podstawą do wykorzystania tych danych przy analizie nośności elementów z betonu jest uzyskanie informacji o rozkładzie temperatury w przekroju w trakcie pożaru dla konkretnej geometrii elementu i przy odtworzonym rzeczywistym scenariuszu pożarowym. Na rysunku 2 zamieszczono przykładową mapę profili temperatury dla podanego obok przekroju po czasie 90 minut oddziaływania pożarowego wg krzywej ISO834.

Przy określaniu odporności ognio-



**Rys. 2.** Redukcja wytrzymałości na ściskanie betonu (BWW) w funkcji temperatury pożarowej dla różnych klas wytrzymałości betonu wraz z przykładowym rozkładem temperatury w przekroju określonym dla oddziaływania pożarowego wg krzywej ISO834 – wyniki na podstawie [5]

**Fig. 2.** Concrete compressive strength (HPC) reduction due to fire action for different strength classes together with the example of temperature distribution within the specified cross-section geometry for ISO834 fire curve – results from [5]

wej konstrukcji z betonu należy rozważyć wystąpienie wszystkich możliwych i odpowiednich w danej sytuacji mechanizmów zniszczenia. W zależności od rozkładu obciążenia, historii termicznej i rodzaju konstrukcji, wystąpić mogą zniszczenia wskutek zginania, wyboczenia (przy ściskaniu), ścinania lub skręcania bądź z powodu utraty przyczepności w strefie zakotwienia. Uszkodzenia pożarowe samego betonu w konstrukcji nie stanowią bezpośredniego sposobu zniszczenia, ale efekty wystąpienia odprysków i ubytków betonu inicjują – przez utratę części przekroju i odkrycie stali zbrojeniowej na działanie ognia – wystąpienie jednego z wymienionych mechanizmów zniszczenia.

#### 4. Klasyfikacja uszkodzeń

W celu unifikacji procesu wizualnej oceny stanu konstrukcji z betonu po pożarze (biorąc pod uwagę: obecność sadzy i osmolenia, zmianę koloru betonu, wystąpienie złuszczeń lub odspojen betonu,

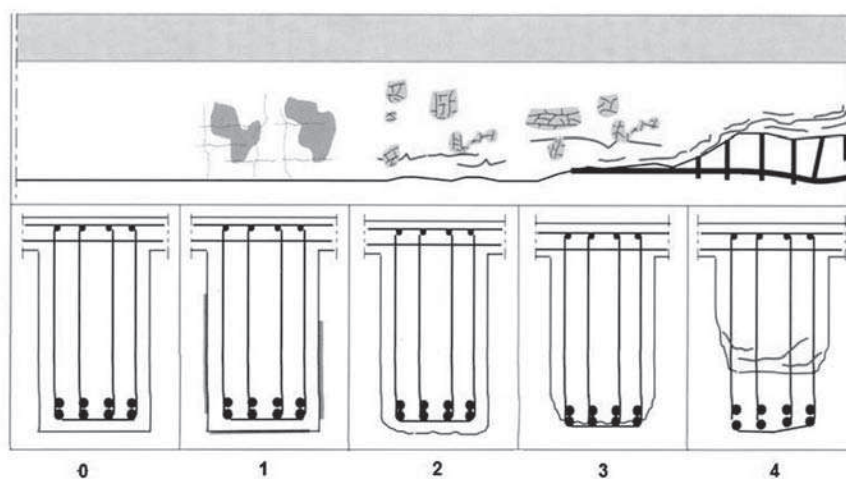
obecność rys i mikrorys oraz stopień odstąpienia stali zbrojeniowej) wprowadza się 5-stopniową skalę kategorii uszkodzeń [1, 3]: 0 – beton nieuszkodzony termicznie (zwykle tylko przebarwienia na powierzchni), 1 – uszkodzenia powierzchni i otuliny betonowej, odpadanie otuliny o ograniczonym zasięgu i zakresie, korozja niebezpieczonych materiałów, obecność sadzy i osmoleń, widoczna sieć mikrozarysowań, 2 – zaryso-

wania (o rozwarości  $> 0,5$  mm) i odpryski otuliny betonowej (wielkości do 10 mm), niewielkie deformacje i korozja na powierzchniach prętów stali zbrojeniowej, 3 – uszkodzenia konstrukcyjne na poziomie przekroju (znaczne zarysowania i ubytki otuliny betonowej zbrojenia), deformacje konstrukcji obniżające nośność lub znaczne przemieszczenia powodujące brak właściwego powiązania ze sobą przyległych elementów lub części konstrukcji, 4 – uszkodzenia konstrukcyjne na poziomie elementów lub części konstrukcji (znaczne i poważne uszkodzenia elementów konstrukcyjnych, z lokalnym zniszczeniem i dużymi deformacjami), zaawansowana utrata otuliny betonowej, uszkodzenia strefy ściskanej elementów i odstąpienie bądź uszkodzenie zbrojenia.

Uszkodzenia przypisane poszczególnym kategoriom przedstawiono schematycznie dla belki żelbetowej na rysunku 3, natomiast na rysunku 4 zamieszczono przykłady uszkodzeń pożarowych konstrukcji żelbetowych według podanej skali.

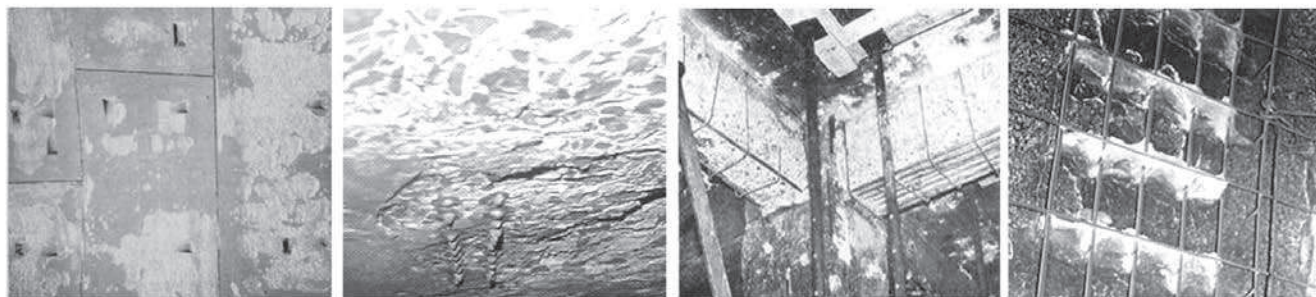
#### 5. Techniki badawcze do identyfikacji właściwości materiałowych po pożarze

Techniki diagnostyczne stosowane do oceny stanu betonu i stali zbrojeniowej w konstrukcji uszko-



**Rys. 3.** Klasyfikacja uszkodzeń pożarowych dla belki żelbetowej, według [3]  
**Fig. 3.** Fire damages classification for RC beam according to [3]





1 - widoczna sieć mikrozarzysowań, obecność sadzy i osmolenia	2 - odpryski powierzchniowe wielkości od 0 do 10 mm, rysy widoczne i zorientowane (rozwartość rys > 0,5 mm)	3 - widoczne ubytki otuliny zbrojenia, beton złuszczone, widoczne odsłonięte zbrojenie	4 - zbrojenie widoczne i uszkodzone, wyraźne ubytki znacznej części betonu
---	---	--	--

**Rys. 4.** Przykłady uszkodzeń pożarowych elementów żelbetonowych według podanej 5-stopniowej klasyfikacji [3]  
**Fig. 4.** Examples of fire damages of reinforced concrete elements according to given 5-degree classification [3]

dzionej działaniem wysokiej temperatury można podzielić na: badania wykonywane *in situ* oraz prowadzone w warunkach laboratoryjnych na pobranych z konstrukcji próbkach [6]. W tabeli 1 zestawiono różne szczegółowe metody i techniki diagnostyczne stosowane do oceny uszkodzeń pożarowych w konstrukcji.

W przypadku lokalnej oceny jakości betonu, badania *in situ* wykonywane są najczęściej metodami nieniszczącymi i częściowo niszczącymi, stosowanymi powszechnie do kontroli właściwości betonu w konstrukcji.

W metodach oceny uszkodzeń pożarowych betonu specjalne miejsce zajmują techniki pozwalające

na kompleksową ocenę elementu konstrukcyjnego [3]. Metody te wykorzystują zjawiska fizyczne związane z rozchodzeniem się fali elektromagnetycznej (*georadar*) lub zjawiska związane z rozprzestrzenianiem się fal powierzchniowych – analiza fal powierzchniowych (*Multichannel Analysis of Surface Waves*). Obie techniki zostały zaczerpnięte z geotechniki i pozwalają na uzyskanie map izolinii właściwości materiałowych dla analizowanych elementów, jednak ich zastosowanie do oceny uszkodzeń pożarowych są wciąż pionierskie i wymagają dalszych badań i analiz.

Badania laboratoryjne betonu, mające na celu ocenę degrada-

cji oraz oszacowanie głębokości występowania uszkodzeń, wymagają pobrania materiału z elementów uszkodzonych podczas pożaru, najczęściej poprzez wykonywanie odwiertów. Badania prowadzone na odwiertach dotyczą określenia właściwości mechanicznych betonu metodą niszcząca, bądź ich oszacowanie metodami pośrednimi (UPV, metoda częstości rezonansowej). Celem badań laboratoryjnych jest również określenie głębokości występowania uszkodzeń poprzez określenie przebiegu izoterm temperatury. Do tego celu stosowane są m.in.: rentgenografia, mikroskopia skaningowa, badania DTA i TGA, termoluminescencja, kolorymetria, analiza

**Tabela 1.** Metody oceny uszkodzeń pożarowych betonu w konstrukcji [6]

**Table 1.** Methods of assessing the fire damages in concrete structures [6]

Metody <i>in situ</i>		Metody laboratoryjne
Grupa I. Lokalna ocena jakości betonu	Grupa II. Specjalne metody globalnej oceny stanu betonu w elemencie	Grupa III. Ocena właściwości betonu prowadzona na odwiertach
Metody nieniszczące: – ocena wizualna, – sklerometryczna, – ultradźwiękowa.  Metody częściowo niszczące: – metody pull-off, – metoda pull-out (CAPO), – sonda Windsor, – metoda destrukcji wewnętrznej (BRE), – opór wiercenia.	Metoda analizy fal powierzchniowych (MASW)  Georadar (GPR)  Analiza obrazu uszkodzonej powierzchni betonu	Ocena cech mechanicznych odwiertów: – metodą bezpośrednią, – metodami pośrednimi: metodą częstotliwości rezonansowej, metodą ultradźwiękową. Oszacowanie osiągniętej przez beton temperatury: – kolorymetria, – DTA i TGA, – rentgenografia, – mikroskopia skaningowa, – termoluminescencja, – porozymetria, – ocena gęstości mikrozarzysowań.

chemiczna bądź petrograficzna, a także metody oceny prowadzone w oparciu o pomiary porowatości za pomocą porozymetrii rtęciowej lub poprzez ocenę gęstości mikrozarysowań.

Badania stali zbrojeniowej prowadzone *in situ* dotyczą zazwyczaj określenia jej twardości z wykorzystaniem twardościomierzy przenośnych – dynamicznych. W warunkach laboratoryjnych określenie aktualnego poziomu wytrzymałości stali zbrojeniowej po pożarze odbywa się poprzez badanie na rozciąganie próbek wyciętych z konstrukcji. W ten sposób uzyskuje się także informacje dotyczące zależności  $\sigma - \epsilon$  dla stali po wystąpieniu oddziaływania pożarowego, niezbędnej do przeprowadzenia prawidłowej analizy nośności elementów.

## 6. Diagnoza końcowa – wybór właściwej metody naprawczej lub decyzja o wyburzeniu konstrukcji

W efekcie dokonanej inwentaryzacji uszkodzeń konstrukcji, przeprowadzonej klasyfikacji stwierdzonych uszkodzeń i na podstawie analizy poziomu bezpieczeństwa konstrukcji (przeprowadzonej w oparciu o zidentyfikowane zredukowane właściwości mechaniczne materiałów i sztywność przekrojów elementów) można postawić końcową diagnozę stanu technicznego konstrukcji i dokonać wyboru strategii docelowego postępowania. Wyróżnić można następujące działania w odniesieniu do analizowanej konstrukcji: całkowitą naprawę, kombinację częściowej naprawy i częściowej rekonstrukcji, zmianę przeznaczenia lub użytkowania, a wreszcie – wyburzenie lub rozbiórkę. Przy wyborze odpowiedniego sposobu postępowania, uwzględnienia wymaga oczywiście czynnik ekonomiczny (porównanie kosztów wymaganych napraw i wykonania nowej konstrukcji). Należy podkreślić, że podstawowym celem naprawy konstrukcji

po pożarze jest przywrócenie jej do stanu i przeznaczenia pierwotnego (sprzed pożaru). Stąd też wykazać należy, że po pracach naprawczych (oczyszczeniu i zabezpieczeniu zbrojenia, odtworzeniu geometrii przekrojów betonowych, innych szczegółowych wymaganych zabiegach) konstrukcja charakteryzować się będzie taką samą trwałością i przewidywanym okresem użytkowania, jak przed pożarem, a także taką samą nośnością i odpornością ogniową w przypadku zachowania pierwotnego przeznaczenia konstrukcji.

## 7. Techniki naprawcze konstrukcji z betonu po pożarze

Naprawę uszkodzeń konstrukcji rozpoczyna usunięcie warstw betonu na głębokość określoną badaniami materiałowymi. Następnie wymienia się uszkodzone pręty zbrojenia, a ubytki betonu uzupełnia się w celu odtworzenia geometrii przekroju elementów oraz warstwy otuliny zapewniającej prawidłową współpracę betonu i stali, a także trwałość w okresie dalszej eksploatacji. W przypadku decyzji o wymaganym lokalnym wzmocnieniu, należy każdorazowo indywidualnie opracować szczegóły konstrukcyjne i technologię takich rozwiązań.

Po zrealizowaniu prac związanych z naprawą zbrojenia, przystępuje się do uzupełniania ubytków betonu. Przy stosunkowo małych powierzchniach uszkodzeń (do 1 m<sup>2</sup>) stosuje się ręczne nakładanie zapraw cementowych lub cementowo-polimerowych. W miejscach wystąpienia ubytków o znacznej objętości stosuje się betony konwencjonalne, a w miejscach o gęstym układzie zbrojenia – mieszanki betonowe na bazie kruszywa drobnego. W przypadku elementów, dla których nie wymagane jest uzyskanie po naprawie równej powierzchni, zastosowane mogą zostać betony natryskowe.

Jeżeli uszkodzenia, które wystąpiły w trakcie pożaru dotyczą wystąpie-

nia rys, to do ich wypełniania stosuje się zwykle systemowe materiały naprawcze na bazie spoiw mineralnych.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Assessment, Design and Repair of Fire-Damaged Concrete Structures, Technical Report No. 68, The Concrete Society, London, United Kingdom, 2008
- [2] Fire design of concrete structures – structural behavior and assessment. State-of-art report prepared by Task Group 4.3, Fire design of concrete structures, FIB – Federation International du Béton, July 2008, p. 209
- [3] 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
- [4] Chudyba K., Uszkodzenia pożarowe betonu konstrukcyjnego, Inżynieria i Budownictwo, nr 1/2010, s. 30–33
- [5] Hager I., Comportement à haute température des bétons à haute performance – évolution des principales propriétés mécaniques, Praca doktorska, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, listopad 2004, p. 172
- [6] Hager I., Metody oceny stanu betonu w konstrukcji po pożarze, Dwumiesięcznik: Cement Wapno Beton, lipiec/sierpień 2009 r., nr 4, s. 167–178

### INFORMACJE O AUTORACH

**Dr inż. Izabela Hager**, absolwentka Politechniki Krakowskiej (1998), stopień doktora Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Francja (2004), zatrudniona w Politechnice Krakowskiej w Katedrze Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego, zainteresowania zawodowe: wpływ temperatury pożarowej na beton oraz inne materiały budowlane, e-mail: ihager@pk.edu.pl

**Dr inż. Krzysztof Chudyba**, absolwent Politechniki Krakowskiej (1991), zatrudniony na Politechnice Krakowskiej w Zakładzie Konstrukcji Żelbetowych Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych na stanowisku adiunkta naukowo-dydaktycznego, zainteresowania zawodowe: konstrukcje żelbetowe ze szczególnym uwzględnieniem oddziaływań długotrwałych i efektów II rzędu oraz wpływów wysokiej temperatury pożarowej, e-mail: kchudyba@op.pl

**Adres do korespondencji:** dr inż. Izabela Hager, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli Wydział Inżynierii Ładowej, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków.