

dr inż. Krzysztof Chudyba¹

Przyjęty/Accepted/Принята: 07.04.2014;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 22.05.2015;

Opublikowany/Published/Опубликована: 31.03.2016;

Bezpieczeństwo pożarowe konstrukcji z betonu według eurokodów (norm PN-EN)

Fire Safety for Concrete Structures According to Eurocodes (Codes PN-EN)

Пожарная безопасность бетонных конструкций согласно еврокодам (стандартам PN-EN)

ABSTRAKT

Cel: Celem artykułu jest zaprezentowanie zasad weryfikacji bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji z betonu zgodnie z eurokodami (normami PN-EN). Wprowadzenie tych norm do polskiej praktyki projektowej w przypadku analizy konstrukcji w warunkach pożarowych ustanowiło nową jakość w treści i zakresie dodatkowych szczegółowych wymagań, które należy spełnić przy projektowaniu obiektów budowlanych.

Wprowadzenie: Zgodnie z ogólnymi zapisami Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 305/2011 (a wcześniej – Dyrektywy 89/106/EWG) oraz postanowieniami normy PN-EN 1990 bezpieczeństwo pożarowe stanowi jedno z podstawowych wymagań przy projektowaniu konstrukcji (obok niezawodności i trwałości). Wytyczne odnośnie zasad ustalania i przyjmowania szczegółowych charakterystyk oddziaływania pożarowego zamieszczono w normie PN-EN 1991-1-2. Części 1-2 poszczególnych eurokodów konstrukcyjnych (dla konstrukcji z betonu – PN-EN 1992-1-2) podają metody weryfikacji odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych, przy czym określenia szczegółowych wymagań odporności ogniowej (w odniesieniu do nośności i/lub funkcji separacyjnej – R, EI, REI) dla elementów konstrukcyjnych budynków dokonuje się w oparciu o regulacje krajowe.

Analizowane zagadnienia: W artykule opisano różne możliwe do przyjęcia modele pożaru (standardowe; naturalne – uproszczone, zaawansowane) oraz informacje o zasadach weryfikacji konstrukcji budowlanych dla warunków pożarowych. Scharakteryzowano zachowanie konstrukcji z betonu w warunkach pożaru, wskazując podstawowe parametry materiałowe dla betonu i stali zbrojeniowej determinujące zachowanie elementów konstrukcyjnych w sytuacji pożaru i jednocześnie niezbędne do przeprowadzenia analizy konstrukcji. Zidentyfikowano główne obszary zainteresowań badawczych w zakresie problematyki odporności ogniowej konstrukcji betonowych. Podano metody weryfikacji odporności ogniowej konstrukcji z betonu obejmujące: badania ogniowe, metody opisowe, uproszczone i zaawansowane metody obliczeniowe. Omówiono szczegółowo wybrane metody analizy zamieszczone w normie PN-EN 1992-1-2. Przedstawiono dodatkowo podstawowe informacje w zakresie analizy i klasyfikacji uszkodzeń pożarowych konstrukcji z betonu, co stanowi element niezbędny dla przeprowadzania oceny stanu technicznego konstrukcji po pożarze i wnioskowania o poziomie bezpieczeństwa takiej konstrukcji.

Podsumowanie: W podsumowaniu zestawiono najważniejsze informacje o obowiązującej aktualnie wg Eurokodów procedurze projektowania konstrukcji z betonu z uwagi na warunki pożarowe (obejmującej analizę termiczną i mechaniczną dla założonego scenariusza pożarowego) i możliwych do zastosowania metodach weryfikacji odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo pożarowe, konstrukcje z betonu

Typ artykułu: artykuł przeglądowy

ABSTRACT

Aim: The purpose of this paper is to present the principles of fire safety verification for concrete structures in accordance with Eurocodes (PN-EN norms). Introduction of these codes into Polish design practice, for analysis of structures exposed to fire conditions, set a new dimension in the content and range of additional detailed requirements, which need to be satisfied during the building design stage.

Introduction: In compliance with Regulation (EU) No 305/2011 of the European Parliament and of the Council (previously – EC Directive 89/106), and provisions of PN-EN 1990, fire safety constitutes one of the basic requirements for structure design (apart from durability and reliability). Guidelines for the determination of specific fire interaction characteristics are included in PN-EN 1991-1-2. Parts 1-2 of individual structural Eurocodes (PN-EN 1992-1-2 for concrete structures) and reveal verification methods for fire resistance of structural elements. Whereas the determination of specific detailed fire resistance requirements (load bearing and/or separating functions – R, EI, REI), for structural elements of buildings, are based on national regulations.

Analyzed issues: The article describes a range of potentially acceptable fire models (standard; natural – simplified or advanced) as well as provides information about principles for verification of structures for fire conditions. Additionally, the study characterized behaviour of concrete structures in fire conditions, indicating the basic material parameters for concrete and reinforced steel, which determine the behaviour of structural elements in such conditions and provide the basis for a structural analysis. The major area of research interest, involving the determination of concrete structures fire resistance, was achieved. The study imparted fire resistance verification methods for concrete structures, which included; fire tests,

¹ Politechnika Krakowska / Cracow University of Technology; kchudyba@op.pl;

descriptive techniques, simplified and advanced calculation methods. Some selected methods from PN-EN 1992-1-2 are described in detail. Additionally, key information was presented, which dealt with analysis and classification of fire damage to concrete structures. Both are essential elements for an assessment of the technical condition of structures after a fire and conclusions concerning the level of safety for such structures.

Summary: The study highlighted most significant information concerning obligatory Eurocodes procedures relating to the design of concrete structures, which may be exposed to the influence of fire. This encapsulated a thermal and mechanical analysis for assumed fire scenarios and techniques with a potential for application in the verification of fire resistance of structural elements.

Keywords: fire safety, concrete structures

Type of article: review article

АННОТАЦИЯ

Цель: Цель данной статьи – представить правила проверки пожарной безопасности бетонных конструкций в соответствии с еврокодами (стандартами PN-EN). Введение этих стандартов в польскую практику проектирования относительно анализа конструкций в условиях пожара позволило качественно улучшить их содержание и объем дополнительных детальных требований, которые должны быть соблюдены при проектировании строительных объектов.

Введение: В соответствии с общими положениями Регламента Европейского парламента и Совета ЕС номер 305/2011 (а ранее - Директивы 89/106 /EWG) и положениями стандарта PN-EN 1990 требования пожарной безопасности - это одни из важнейших требований при проектировании конструкции (вместе с надежностью и долговечностью). Руководства по правилам определения и применения конкретных характеристик пожарного воздействия приведены в стандарте PN-EN 1991-1-2. Части 1-2 отдельных строительных еврокодов (для бетонных конструкций - PN-EN 1992-1-2) описывают методы проверки огнестойкости конструктивных элементов, при чем специфические требования к огнестойкости (относительно грузоподъемности и / или разделительной функции - R, EI, REI) конструктивных элементов здания определяются на основе национальных положений.

Анализируемые вопросы: В статье описываются разные возможные для применения модели пожара (стандартные, естественные - упрощенные, расширенные), а также содержится информация о правилах проверки безопасности строительных конструкций в условиях пожара.

Проведена характеристика поведения бетонных конструкций в условиях пожара с указанием основных характеристик бетона и арматурной стали, которые определяют поведение конструктивных элементов в случае пожара и, которые, в то же время, необходимы для проведения анализа конструкции. Определены основные направления научных интересов относительно вопросов огнестойкости бетонных конструкций. Указаны методы проверки огнестойкости бетонных конструкций, которые включают в себя огневые испытания, описательные методы, упрощенные и расширенные вычислительные методы. Подробно обсуждались избранные методы анализа, содержащиеся в стандарте PN-EN 1992-1-2. Кроме того, указана основная информация об анализе и классификации повреждений бетонных конструкций при воздействии пожара. Такой анализ необходим для проведения оценки технического состояния конструкции после пожара и решения об уровне безопасности такой конструкции.

Заключение: В заключении кратко собрана важная информация о действующей сейчас в соответствии с еврокодами процедуре проектирования бетонных конструкций с точки зрения условий пожара (которая охватывает термический и механический анализ для предполагаемого пожарного сценария) и возможных для применения методов проверки огнестойкости структурных элементов.

Ключевые слова: пожарная безопасность, бетонные конструкции

Вид статьи: обзорная статья

1. Wprowadzenie

Normy europejskie do projektowania konstrukcji budowlanych (eurokody – oznaczone w Polsce symbolem PN-EN) obejmują swym zakresem całe spektrum zagadnień: od sformułowania ogólnych reguł projektowania, poprzez podanie zasad ustalania rodzajów i określania wartości oddziaływań na konstrukcje aż po szczegółowe kwestie dotyczące obliczania konstrukcji, które wykonywane mogą być z różnych materiałów (beton, stal, drewno, ceramika, aluminium), bądź też odnoszące się do specyficznych zagadnień projektowych (geotechnika, wpływ sejsmiczne, oddziaływania pożarowe).

Wprowadzenie norm PN-EN do polskiej praktyki projektowej w przypadku analizy konstrukcji w warunkach pożarowych ustanowiło nową jakość w treści i zakresie dodatkowych szczegółowych wymagań, które należy spełnić przy projektowaniu obiektów budowlanych. Podstawowe wymagania sformułowane w normach do projektowania konstrukcji budowlanych dotyczą trwałości i niezawodności. Zgodnie z postanowieniami ogólnymi Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (EU) nr 305/2011 [1] oraz wymaganiami normy PN-EN 1990 [2] obiekty budowlane muszą być dodatkowo tak zaprojektowane i wykonane, aby w przypadku pożaru: nośność konstrukcji mogła być zapewniona przez założony czas, powstanie i rozprzestrzenianie się ognia i dymu w obiektach było ograniczone, rozprzestrzenianie się ognia na sąsiednie obiekty było ograniczone, mieszkańcy mogli opuścić obiekt lub być uratowani w inny sposób, uwzględnione zostało bezpieczeństwo ekip ratowniczych. Podstawowe wy-

magania mogą być spełnione poprzez stosowanie w krajach członkowskich odpowiednich elementów strategii bezpieczeństwa pożarowego, takich jak konwencjonalne (normowe) lub „rzeczywiste/naturalne” (parametryczne) scenariusze pożarowe, łącznie ze środkami biernej lub aktywnej ochrony przeciwpożarowej.

Zgodnie z normą PN-EN 1990 [2] pożar traktowany jest w analizie konstrukcji jako wyjątkowa sytuacja obliczeniowa, podobnie jak wybuch, uderzenie czy konsekwencje lokalnego zniszczenia konstrukcji. Zasady ustalania oddziaływań w sytuacji pożaru określone zostały w normie PN-EN 1991-1-2 [3] i są one wspólne dla wszystkich stosowanych materiałów konstrukcyjnych. Szczegółowe metody weryfikacji odporności ogniowej konstrukcji wykonanych z różnych materiałów podane są w częściach 1-2 odpowiednich eurokodów konstrukcyjnych (np.: dla konstrukcji z betonu – w normie PN-EN 1992-1-2 [4]).

Odpowiednie części eurokodów konstrukcyjnych dla sytuacji pożaru dotyczą specyficznych aspektów biernej ochrony przeciwpożarowej z uwzględnieniem projektowania konstrukcji w celu zapewnienia wymaganej nośności i ograniczenia rozprzestrzeniania się ognia. W przypadku konstrukcji z betonu zagadnienia projektowania konstrukcji w sytuacji pożaru należy rozpatrywać łącznie z ogólnymi zasadami projektowania i zasadami dla budynków sformułowanymi w normie PN-EN 1992-1-1 [5].

Wymagane funkcje i poziomy właściwości użytkowych mogą zostać określone albo pod kątem normowych (standar-

dowych) klasyfikacji odporności ogniowej (zwykle podawanych w krajowych przepisach pożarowych), albo – jeśli pozwalają na to krajowe przepisy pożarowe – przez odwołanie się do zasad inżynierii bezpieczeństwa pożarowego w celu oceny biernych i aktywnych środków ochrony przeciwpożarowej. Dodatkowe wymagania dotyczące na przykład: możliwej instalacji i konserwacji systemów tryskaczowych, warunków użytkowania budynków lub strefy pożarowej, stosowania zaaprobowanych instalacji i materiałów pokrywających (łącznie z ich utrzymaniem) nie są podane w PN-EN 1991-1-2 [3], ponieważ są przedmiotem odrębnych ustaleń dokonywanych przez kompetentne instytucje.

Elementy układu konstrukcyjnego (płyty, belki, słupy, ściany) odgrywają w budynkach dwie zasadnicze funkcje: nośną i separacyjną/oddzielającą. Spełnienie pierwszej funkcji zapewnia zachowanie nośności i stateczności budynku, drugiej – szczelności (ograniczenie penetracji płomieni i gorących gazów przez rysy i otwory) oraz izolacyjności (ograniczenie przyrostu temperatury na powierzchniach niepoddanych bezpośredniemu działaniu ognia).

Należy podkreślić, że określenia szczegółowych wymagań odporności ogniowej (w odniesieniu do nośności i/lub funkcji separacyjnej – R, E, RE) dla elementów konstrukcyjnych budynków dokonuje się w oparciu o regulacje krajowe [6], natomiast odpowiednie normy PN-EN (np. PN-EN 1992-1-2 [4] w przypadku konstrukcji z betonu) służą do weryfikacji tak ustalonych wymagań. W praktyce polskiej przed wprowadzeniem eurokodów, projektowanie z uwagi na warunki pożarowe odbywało się zwykle z wykorzystaniem informacji zawartych w Instrukcji ITB [7].

2. Ogólna charakterystyka oddziaływań pożarowych

Oddziaływania w sytuacji pożaru określa się na podstawie normy PN-EN 1991-1-2 [3], która jest przeznaczona do stosowania przez inwestorów (np. dla opracowania ich szczegółowych wymagań), projektantów, wykonawców oraz przez właściwe władze publiczne.

Pożar rzeczywisty cechuje zmienność czasu trwania, szybkości przyrostu temperatury oraz maksymalnej osiągniętej temperatury, w zależności od wielu czynników takich jak: wielkość i geometria pomieszczenia, ilość i rozkład materiałów palnych, warunki wentylacji, właściwości termiczne otoczenia pomieszczenia itp. Co więcej, temperatura gazu może być zmienna w obrębie pomieszczenia. Pomieszczenie w sytuacji pożaru rozumiane jest jako przestrzeń w budynku

rozciągająca się na obszar jednej lub kilku kondygnacji, wydzielona w taki sposób, że rozprzestrzenianie się ognia poza ten obszar jest ograniczone.

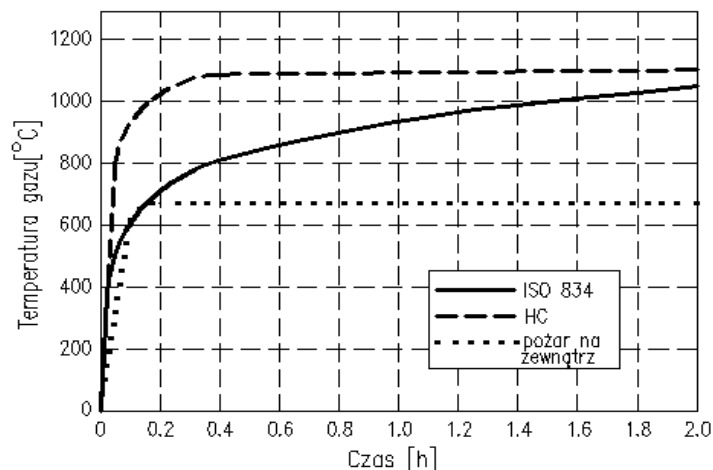
Dla każdego obliczeniowego scenariusza pożaru należy określić w odpowiednich strefach pożarowych przebieg temperatury w czasie, czyli pożar obliczeniowy. Jeżeli nie postanowiono inaczej, to pożar obliczeniowy może być uwzględniony w tym samym czasie tylko w jednej strefie pożarowej budynku. W konstrukcjach, w stosunku do których władze krajowe ustalają wymagania w zakresie odporności ogniowej można przyjmować, że odpowiedni pożar obliczeniowy jest pożarem standardowym.

Oddziaływania termiczne określa w ogólności strumień ciepła netto na powierzchni elementu, którego to wartość należy ustalać z uwzględnieniem przepływu ciepła przez konwekcję i radiację.

Wśród stosowanych w analizie termicznej modeli pożaru wyróżnić można: normowe/nominalne krzywe temperatura-czas (krzywa standardowa wg ISO 834, krzywa pożaru zewnętrznego, krzywa węglowodorowa HC) oraz modele naturalne (uproszczone – pożary strefowe i pożary zlokalizowane, zaawansowane – jednostrefowe, wielostrefowe, z wykorzystaniem numerycznej mechaniki płynów). Na ryc. 1 przedstawiono graficznie zależności temperatura gazu – czas dla nominalnych scenariuszy pożarowych.

Uproszczone modele naturalne pożaru oparte są na specyficznych parametrach fizycznych z ograniczonym zakresem stosowania. W przypadku pożarów strefowych zakłada się równomierny rozkład temperatury w funkcji czasu. Zaleca się przy tym określanie temperatury gazu na podstawie fizycznych parametrów uwzględniających co najmniej gęstość obciążenia ogniowego i warunki wentylacji. Dla elementów zewnętrznych radiacyjny strumień ciepła należy obliczać jako sumę udziałów składowych pochodzących ze strefy pożarowej i od płomieni wydobywających się z otworów. Dla elementów wewnętrznych strefy pożarowej przy obliczaniu temperatury gazu w strefie można stosować parametryczne krzywe temperatura-czas. Zakładają one – podobnie jak krzywe nominalne – równomierny rozkład temperatury w pomieszczeniu, ale aktualna temperatura w czasie zależy od dodatkowych parametrów (ilość i rodzaj materiałów palnych w pomieszczeniu, warunki wentylacji, właściwości cieplne stropów i ścian ograniczających pomieszczenie, itp.).

Modele zaawansowane pożaru powinny uwzględniać właściwości gazu oraz wymianę masy i energii. W takim przypadku obciążenie ogniowe jest zwykle określane po-



Ryc. 1. Przebiegi zależności temperatura–czas dla krzywych standardowych według [3]

Fig. 1. Temperature–time relationships for standard curves according to [3]

przez obliczeniową gęstość obciążenia ogniowego. Zaleca się przyjmowanie tej wartości jako wynikającej z pomiarów lub w szczególnych przypadkach ustalonej na podstawie wymagań podanych w przepisach krajowych w zakresie odporności ogniowej. Obliczeniowa gęstość obciążenia ogniowego może być wyznaczana na podstawie klasyfikacji krajowej obciążenia ogniowego wynikającego ze sposobów użytkowania lub ściśle dla pojedynczego projektu przez sporządzenie opinii technicznej obciążenia ogniowego. Zgodnie z normą [3] obliczeniowa wartość obciążenia ogniowego jest określana jako:

$$q_{f,d} = q_{f,k} m \delta_{q1} \delta_{q2} \delta_n$$

$q_{f,k}$ – wartość charakterystyczna gęstości obciążenia ogniowego na m^2 powierzchni zależna od sposobu użytkowania i rodzaju pomieszczenia – tabela 1.

m – współczynnik wypalenia,

δ_{q1} – częściowy współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający ryzyko wystąpienia pożaru z uwagi na rozmiary pomieszczenia – tabela 2,

δ_{q2} – częściowy współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający ryzyko pożaru z uwagi na przeznaczenie pomieszczenia – tabela 3,

$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni}$ – współczynnik uwzględniający różne typy działań zwalczających ogień – tabela 4.

Tabela 1. Wartości charakterystyczne gęstości obciążenia ogniowego $q_{f,k}$ [MJ/m²] według [3]

Table 1. Characteristic values for fire load density $q_{f,k}$ [MJ/m²] according to [3]

Sposób użytkowania (Rodzaj pomieszczenia) Exploitation (Space type)	Wartość średnia / Mean value	80% fraktyl (rozkład Gumbela) / 80% fractile (Gumbel's distribution)
Szpitala (pokoje) / Hospitals (rooms)	230	280
Hotele (pokoje) / Hotels (rooms)	310	377
Biblioteki /Libraries	1500	1824
Biura / Offices	420	511
Klasy szkolne / Class-rooms	285	347
Centra handlowe / Commercial centres	600	730
Teatry i kina / Theaters and cinemas	300	365
Mieszkania / Apartments	780	948
Komunikacja (przestrzenie publiczne) / Communication (public spaces)	100	122

Tabela 2. Wartości częściowych współczynników bezpieczeństwa δ_{q1} według [3]

Table 2. Values for partial safety factors δ_{q1} according to [3]

Pole powierzchni pomieszczenia – powierzchnia podłogi strefy pożarowej A_f [m ²] / Space area – fire compartment zone floor area A_f [m ²]	δ_{q1}
25	1,10
250	1,50
2500	1,90
5000	2,00
10000	2,13

Tabela 3. Wartości częściowych współczynników bezpieczeństwa δ_{q2} według [3]

Table 3. Values for partial safety factors δ_{q2} according to [3]

Przykłady sposobów użytkowania obiektów / Examples of building exploitation	δ_{q2}
Muzea, galerie, baseny / Museums, galleries, swimming-pools	0,78
Biura, budynki mieszkalne, hotele, obiekty przemysłu papierniczego / Offices, apartment buildings, hotels, paper-industry premises	1,00
Zakłady wytwarzające urządzenia i silniki / Factories producing machinery and engines	1,22
Laboratoria chemiczne, sklepy z farbami / Chemical laboratories, shops selling paint	1,44
Wytwórnice fajerwerków lub farb / Fire-works or paint manufactures	1,66

Tabela 4. Wartości współczynników δ_{ni} według [3]

Table 4. Values of δ_{ni} factors according to [3]

Automatyczne gaszenie ognia / Automatic extinguishing of fire	Samoczynny wodny system gaszący / Automatic water extinguish system	δ_{n1}	0,61
	Niezależne zaopatrzenie w wodę / Independent water supply	δ_{n2}	0,7 – 1,0
Automatyczne wykrywanie pożaru / Automatic fire detection	Samoczynna detekcja pożaru – detekcja ciepła / Automatic fire detection – heat detection	δ_{n3}	0,87
	Samoczynna detekcja pożaru – detekcja dymu / Automatic fire detection – smoke detection	δ_{n4}	0,73
	Automatyczne powiadamianie straży pożarnej / Automatic fire brigade notification	δ_{n5}	0,87

Środki walki z ogniem (ręczne tłumienie pożaru) / Firefighting method (manual fire dousing)	Miejscowe zawodowe brygady straży pożarnej / Local professional fire brigades	δ_{n6}	0,61
	Zamiejscowe brygady publicznej straży pożarnej / Distant State Fire Service units	δ_{n7}	0,78
	Bezpieczne drogi ewakuacyjne i drogi dostępu / Safe evacuation and access ways	δ_{n8}	0,9 – 1,0 lub/or 1,5
	Urządzenia do zwalczania pożaru / Firefighting equipment	δ_{n9}	1,0 – 1,5
	Systemy oddymiania / Smoke extraction	δ_{n10}	1,0 – 1,5

Obciążenie ogniowe powinno uwzględniać wszystkie elementy palne wyposażenia budynku i elementy palne konstrukcji, wliczając okładziny, wykładziny i inne wykończenia. Przy braku szczegółowych danych odnośnie sposobu użytkowania, gęstości obciążenia ogniowego mogą być określone dla poszczególnego projektu na podstawie opinii technicznej obciążeń ogniowych wynikających z użytkowania. Obciążenia ogniowe i ich miejscowe rozmieszczenie należy wtedy oceniać, uwzględniając przewidziane użytkowanie, wyposażenie i instalacje, a także możliwe zmiany funkcji obiektu w czasie.

3. Ogólne zasady weryfikacji konstrukcji dla warunków pożarowych

Kompletna procedura projektowania konstrukcji w warunkach pożarowych powinna uwzględniać zachowanie układu konstrukcyjnego w podwyższonych temperaturach, potencjalne oddziaływanie ciepła, korzystne efekty zastosowania aktywnych i biernych systemów ochrony przeciwpożarowej oraz ważność obiektu (konsekwencje zniszczenia).

Aktualnie możliwe jest stosowanie takich procedur projektowych, które uwzględniają wymienione powyżej elementy i wykazanie w efekcie, że konstrukcja lub jej elementy zapewnią odpowiednie właściwości użytkowe w warunkach rzeczywistego pożaru. Jednakże w przypadku, gdy procedura projektowa dotyczy pożaru standardowego (normowego), to system klasyfikacji, który wymaga określonych okresów odporności ogniowej, uwzględnia – choć nie w sposób bezpośredni – opisane wyżej cechy i niepewności.

Alternatywne procedury projektowania mogą bazować na podejściu tradycyjnym lub opartym na właściwościach użytkowych. Podejście tradycyjne operuje pożarami normowymi generującymi oddziaływanie termiczne, natomiast podejście oparte na właściwościach użytkowych, posługujące się zasadami inżynierii bezpieczeństwa pożarowego, korzysta z oddziaływań termicznych opartych na parametrach fizycznych i chemicznych.

Metody podane w PN-EN 1991-1-2 [3] stosuje się do budynków z obciążeniem ogniowym, które odnosi się do obiektu i jego użytkowania. Norma dotyczy oddziaływań termicznych i mechanicznych, natomiast nie znajduje zastosowania do analizy uszkodzeń konstrukcji po pożarze. W uzupełnieniu ogólnych ustaleń normy PN-EN 1990 [2] przyjmuje się następujące założenia: uwzględniony w projekcie system zabezpieczenia przeciwpożarowego (czynny lub bierny) będzie odpowiednio utrzymany, odpowiedni projektowy scenariusz pożaru zostanie wybrany przez wykwalifikowane i doświadczane osoby albo zostanie przyjęty na podstawie odpowiednich przepisów krajowych.

Procedura projektowa dla warunków oddziaływania pożarowego dla konstrukcji obejmuje następujące elementy: wybór odpowiedniego scenariusza pożarowego, ustalenie odpowiadającego temu scenariuszowi pożaru obliczeniowego, określenie przebiegu zmian temperatury w elementach konstrukcyjnych (analiza termiczna) w czasie trwania pożaru, ustalenie mechanicznej odpowiedzi konstrukcji poddanej oddziaływaniu pożaru (analiza mechaniczna), sprawdzenie

odpowiednich warunków zachowania odporności ogniowej.

Przeprowadzając analizę termiczną w elemencie, należy uwzględnić położenie obliczeniowego pożaru względem tego elementu. W elementach zewnętrznych zaleca się uwzględnianie oddziaływania pożaru przez otwory w ścianach zewnętrznych i dachach. Dla oddzielających ścian zewnętrznych należy w ogólnym przypadku uwzględnić oddziaływanie pożaru zarówno od wewnątrz (z odpowiedniej strefy pożarowej), jak i od zewnątrz (z innej strefy pożarowej).

Mechaniczna odpowiedź konstrukcji zależy w ogólności od oddziaływań termicznych oraz wpływu tych efektów na właściwości materiałowe i oddziaływanie mechaniczne pośrednie, jak również od bezpośredniego efektu oddziaływań mechanicznych. Analizę mechaniczną należy przeprowadzać przy założeniu takiego czasu trwania, jak dla analizy termicznej. Sprawdzenie odporności ogniowej może się odbywać w odniesieniu do:

- czasu: $t_{fi,d} \geq t_{fi,req}$
- nośności: $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$
- temperatury: $\theta_d \leq \theta_{cr,d}$

$t_{fi,d}$ – obliczeniowa wartość odporności ogniowej,
 $t_{fi,req}$ – wymagana odporność ogniowa,
 $R_{fi,d,t}$ – obliczeniowa wartość nośności elementu w sytuacji pożaru po czasie t ,
 $E_{fi,d,t}$ – obliczeniowa wartość efektu oddziaływań w sytuacji pożaru po czasie t ,
 θ_d – obliczeniowa wartość temperatury materiału,
 $\theta_{cr,d}$ – obliczeniowa wartość temperatury krytycznej.

Wymuszone oraz ograniczone wydłużenia i deformacje spowodowane zmianami temperatury w wyniku pożaru wywołują efekty oddziaływań, tj. siły i momenty, które należy uwzględnić w analizie konstrukcji. W szczególności, przy ocenie oddziaływań pośrednich należy uwzględnić: ograniczenia wydłużenia termicznego samych elementów (np. słupów w wielokondygnacyjnych konstrukcjach ramowych ze sztywnymi ścianami), różnicowanie wydłużenia termicznego elementów statycznie niewyznaczalnych (np. ciągłych płyt stropowych), gradienty termiczne w przekroju wywołujące naprężenia wewnętrzne, wydłużenia termiczne elementów przylegających (np. przemieszczenie głowicy słupa spowodowane wydłużeniem płyty stropowej), wydłużenia termiczne elementów wpływających na inne elementy znajdujące się poza strefą pożarową. Oddziaływania pośrednie od elementów przylegających mogą zostać pominięte, jeżeli wymagania bezpieczeństwa pożarowego dotyczą elementów w standardowych warunkach pożarowych.

Jednoczesne występowanie sytuacji pożaru wraz z innymi niezależnymi oddziaływaniami wyjątkowymi nie wymaga uwzględnienia. W zależności od wyjątkowych sytuacji obliczeniowych może jednakże zaistnieć potrzeba uwzględnienia dodatkowych oddziaływań w czasie trwania pożaru, np. uderzenia na skutek zniszczenia elementów konstrukcyjnych lub ciężkich maszyn. Dla ścian oddzielenia przeciwpożarowego (ścian ogniowych) może być także wymagane sprawdzenie (wg normy PN-EN 1363-2 [8]) nośności tych elementów dla przeniesienia obciążenia poziomego od uderzenia. Nie zaleca się uwzględniania redukcji obciążeń spowodowanej spale-

niem. Przypadki, w których obciążenie śniegiem z powodu jego stopienia się nie musi być uwzględniane, należy oceniać indywidualnie.

4. Zachowanie konstrukcji z betonu w warunkach pożarowych

W sytuacji pożaru beton wykazuje wiele pozytywnych właściwości: jest niepalny jako materiał, nie emituje dymu ani żadnych szkodliwych substancji przy spalaniu, zapewnia dobrą izolacyjność termiczną. Otulina betonowa zapewnia naturalną ochronę dla prętów zbrojeniowych w elementach żelbetowych. Jednakże w trakcie działania ognia na konstrukcję, temperatura w betonie stopniowo wzrasta, powodując wydłużenie termiczne składników betonu, parowanie wilgoci, przyrost ciśnienia w porach oraz pogorszenie właściwości mechanicznych betonu i stali zbrojeniowej. Sytuacja pożaru wprowadza wysokie gradienty temperatury, a w wyniku tego gorące warstwy powierzchniowe elementów wykazują tendencje do oddzielania się i odłupywania (niekiedy w sposób bardzo gwałtowny) od chłodniejszego wnętrza elementu. Pęknięcia łatwiej powstają w złączach, w źle zagęszczonych obszarach betonu oraz w płaszczyznach prętów zbrojenia. Z chwilą, gdy pręty zbrojeniowe zostaną odsłonięte i narażone na bezpośrednie oddziaływanie wysokiej temperatury, w szybkim tempie tracą swoje właściwości mechaniczne, powodując w efekcie spadek nośności elementu żelbetowego.

Szczegółowe charakterystyki przyrostu temperatury w czasie, maksymalnej temperatury i czasu trwania pożaru zasadniczo determinują zachowanie konstrukcji. Stąd też projektowanie powinno bazować na realistycznych scenariuszach pożarowych. Przy szybkich przyrostach temperatury szczególnie zewnętrzne warstwy betonu są poddane działaniu wysokiej temperatury. Jej rozkład wewnątrz elementu uzależniony jest nie tylko od maksymalnej temperatury na powierzchni zewnętrznej, ale także od czasu trwania pożaru, przebiegu temperatury w czasie, geometrii elementu czy właściwości zastosowanego typu betonu. W budynkach maksymalna temperatura zwykle nie przekracza poziomu ok. 800÷1000°C, a czas trwania pożaru wynosi od kilku minut do maksymalnie kilku godzin. W przypadku tuneli ogień rozwija się szybciej (nawet do 1000°C w kilka minut), maksymalna temperatura jest wyższa (do 1100÷1200°C), a czas trwania pożaru dłuższy – nawet do kilkudziesięciu godzin.

W warunkach pożarowych analizę konstrukcji można przeprowadzać na poziomie wydzielonego elementu, dla części konstrukcji oraz globalnie – dla całej konstrukcji. Modele pożaru stosowane do analizy mogą także wykazywać różny stopień złożoności i dokładności – od pożarów nominalnych (standardowych) do pożarów rzeczywistych wielo-parametrycznych. W obrębie poszczególnych kombinacji modelu pożaru i poziomu analizy konstrukcji zastosowanie mogą znajdować różne metody weryfikacji odporności ogniowej konstrukcji: dane tabelaryczne (metody opisowe), uproszczone lub zawansowane metody obliczeniowe, badania ogniowe, kombinacje różnych tych metod.

Zachowanie konstrukcji z betonu w warunkach pożarowych determinowane jest poprzez dwie zasadnicze grupy właściwości materiałowych: termiczne/fizyczne oraz mechaniczne. W celu dokonania realistycznej oceny pracy konstrukcji z betonu w warunkach pożarowych niezbędne jest określenie tych podstawowych właściwości materiałowych zarówno dla betonu, jak i dla stali zbrojeniowej.

Określenie rozkładu temperatur w elemencie poddanym działaniu ognia według odpowiednio przyjętego scenariusza pożarowego jest niezbędnym etapem w procesie projektowania w warunkach pożaru. Wiarygodność uzyskanych tempe-

ratur zależy od realistycznego i poprawnego przyjęcia podstawowych parametrów określających właściwości termiczne betonu i stali zbrojeniowej: wydłużalności termicznej ciepła właściwego, przewodnictwa cieplnego.

Wraz ze wzrostem temperatury w betonie zachodzi szereg procesów, które skutkują istotnymi zmianami w jego właściwościach mechanicznych. Zachowanie betonu zależy w znacznym stopniu od jego składu, ale generalnie po przekroczeniu temperatury ok. 300°C następuje spadek wytrzymałości dla betonów zwykłej wytrzymałości, zaś przy dalszym wzroście temperatury, powyżej ok. 600°C, beton staje się praktycznie nieprzydatny jako materiał konstrukcyjny ze względu na dużą (nawet ponad 50-procentową) redukcję wytrzymałości na ściskanie. W przypadku betonów wysokiej wytrzymałości znaczące redukcje wytrzymałości na ściskanie (na poziomie 30÷50%) mogą wystąpić już w temperaturach 300÷400°C.

Przy projektowaniu elementów żelbetowych (płyt, belek, słupów, ścian) szczególnie istotnym parametrem staje się temperatura w zbrojeniu. Należy wziąć pod uwagę fakt, że temperatura w zbrojeniu nie jest równa temperaturze na powierzchni zewnętrznej betonu elementu konstrukcyjnego. Maksymalna wartość temperatury wewnątrz przekroju zostaje osiągnięta później niż na powierzchni i może wystąpić nawet w fazie chłodzenia, a nie przyrostu temperatury na wewnątrz elementu.

Podstawowe parametry mechaniczne określone w funkcji temperatury niezbędne do wykonania obliczeń konstrukcji żelbetowych w sytuacji pożaru to: wytrzymałość betonu na ściskanie i rozciąganie, wytrzymałość stali zbrojeniowej na rozciąganie, współczynniki sprężystości dla betonu i stali zbrojeniowej oraz właściwości odkształceniowe obu materiałów w formie zależności naprężenie-odkształcenie. Określenie całego zestawu właściwości mechanicznych materiałów wymaganych do przeprowadzenia pełnej analizy konstrukcji jest zadaniem skomplikowanym badawczo i technicznie.

Szczegółowe informacje odnośnie przyjmowania wartości odpowiednich parametrów materiałowych dla betonu i dla stali zbrojeniowej w funkcji temperatury znaleźć można w licznych źródłach (np. [9-15]). Podstawowe dane i zależności do wykorzystania w obliczeniach zamieszczone zostały także w normie PN-EN 1992-1-2 [4].

Z uwagi na sposób wykonywania, żelbetowe konstrukcje monolityczne w praktyce stanowią zawsze układy statycznie niewyznaczalne. Typowymi przykładami takich konstrukcji stosowanymi w budownictwie są elementy ciągłe (płyty, belki) oraz ramy złożone z belek i słupów. Zachowanie i bezpieczeństwo statycznie niewyznaczalnych konstrukcji z betonu w temperaturach pożarowych zależy nie tylko od zachowania elementów konstrukcyjnych, ale także od zmienności sił wewnętrznych (redystrybucji) w czasie trwania pożaru. Z uwagi na niskie przewodnictwo cieplne betonu, w przekrojach konstrukcji podczas pożaru pojawia się niejednolite pole temperatury. Jednocześnie następują znaczące deformacje, które ograniczane są przez obecność elementów przylegających. W wyniku pogorszenia właściwości materiałowych sztywności elementów ulegają redukcji. Stąd, siły wewnętrzne w całej konstrukcji podlegają znaczącym redystrybucjom. Zazwyczaj analiza na poziomie elementu konstrukcyjnego może stanowić podstawę do weryfikacji odporności ogniowej - analiza taka jest wystarczająca dla sprawdzenia standardowych warunków pożarowych. W takim podejściu, oddziaływania pośrednie – wynikające z wydłużeń termicznych elementów – nie są uwzględniane i pomijana jest także mechaniczna odpowiedź konstrukcji z uwzględnieniem czasu. W konstrukcjach statycznie wyznaczalnych wydaje

się to w pełni uzasadnione. Ale dla konstrukcji statycznie niewyznaczalnych można wnioskować, że analiza na poziomie przekroju prowadzić może do wyników po stronie niebezpiecznej.

W sytuacji, gdy układy statycznie niewyznaczalne w podwyższonej temperaturze pożarowej ulegają zniszczeniu, deformacje rozwijają się bardzo szybko, a sam proces zniszczenia jest stosunkowo krótki. Trwałe deformacje i intensywne zarysowania po zniszczeniu są wyraźne. Jednakże tempo procesu zniszczenia jest wolniejsze niż dla układów statycznie wyznaczalnych. Regularność i amplituda zmian sił wewnętrznych zależą od typu konstrukcji, sztywności poszczególnych elementów konstrukcyjnych, względnego stosunku sztywności elementów, początkowego poziomu obciążenia i warunków ogrzewania. Układy statycznie niewyznaczalne wytwarzają różne mechanizmy i ulegają zniszczeniu po wystąpieniu kolejnych przegubów plastycznych.

W żelbetowych elementach ciągłych (belkach, płytach) poddanych działaniu ognia występują duże deformacje od gradientu temperatury występującego w przekroju. Jeżeli obrót na podporze jest ograniczony, powstają dodatkowe momenty zginające (termiczne) na podporze, co prowadzi do zmiany rozkładu momentów na długości elementu. W takich przypadkach zapewnienie odpowiedniej ilości zbrojenia podporowego (górnego) na podporach pośrednich staje się kwestią kluczową dla zapewnienia odpowiedniej odporności ogniowej elementu. W żelbetowych ramach oddziaływania pożarowe mogą powodować redystrybucję sił wewnętrznych (momentów zginających, sił ścinających i sił podłużnych) w belkach i słupach, a także – poprzez wystąpienie dodatkowych przemieszczeń – intensyfikować efekty II rzędu w słupach. Zmiany takie mogą być znaczne, a przyrosty wartości sił poprzecznych w słupach mogą skutkować zniszczeniem słupów od ścinania w czasie oddziaływania pożarowego znacznie krótszego niż projektowany.

Aktualnie w zakresie problematyki odporności ogniowej konstrukcji betonowych wyróżnić można następujące obszary zainteresowań badawczych:

- badania materiałowe betonu i stali zbrojeniowej w celu określenia podstawowych parametrów fizycznych, termicznych i mechanicznych materiałów z uwzględnieniem czynnika temperatury pożarowej (np.: [4], [9-15]),
- projektowanie i stosowanie betonów (zarówno zwykłych, jak i wysokowartościowych – BWW) bardziej odpornych na wysokie temperatury oraz z dodatkami poprawiającymi odporność na wybuchowe odpadanie otuliny w wysokich temperaturach (*explosive spalling*) – np.: [4], [9], [16-23],
- opracowywanie coraz dokładniejszych metod obliczeniowych do analizy konstrukcji w sytuacji pożaru, obejmujących: wymiarowanie na poziomie przekroju dla różnych przypadków obciążeniowych – zginanie z siłą podłużną, ścinanie i skręcanie, analizę redystrybucji sił wewnętrznych w konstrukcjach z betonu poddanych działaniu ognia, modelowanie i przewidywanie niekorzystnych zjawisk zachodzących w betonie pod wpły-

wem działania wysokiej temperatury pożarowej oraz ich doświadczalna weryfikacja (np.: [4], [9], [20], [22-29]),

- analiza i identyfikacja uszkodzeń pożarowych w konstrukcji w kontekście wnioskowania o poziomie bezpieczeństwa konstrukcji, która poddana była działaniu pożaru (np.: [26], [30-32]).

5. Metody weryfikacji odporności ogniowej elementów żelbetowych

Podstawowe metody określania i sprawdzania odporności ogniowej elementów oraz konstrukcji żelbetowych PN-EN 1992-1-2 [4] to: testy ogniowe, dane tabelaryczne, inżynierskie metody obliczeniowe, kombinacje badań i obliczeń. Testy ogniowe obejmują zakres od badań wydzielonych elementów aż do badań konstrukcji w skali naturalnej. Metody obliczeniowe mogą wykazywać różny stopień dokładności: od uproszczonych metod o ograniczonym do pewnej grupy elementów zakresie stosowania aż do skomplikowanych analiz prowadzonych z wykorzystaniem MES.

Standardowe testy w komorze ogniowej są prowadzone na wydzielonych elementach i dlatego nie jest wtedy możliwe odwzorowanie obecności, rodzaju i wielkości więzów oraz obecności elementów przylegających. Przewagą badań nad prostymi metodami jest jednak to, że dostarczają one informacji o rzeczywistym rozkładzie temperatury w elemencie i jego deformacjach przy ogrzewaniu, a także o ewentualnych słabych lub wrażliwych miejscach niemożliwych do wykrycia w inny sposób niż w trakcie badań.

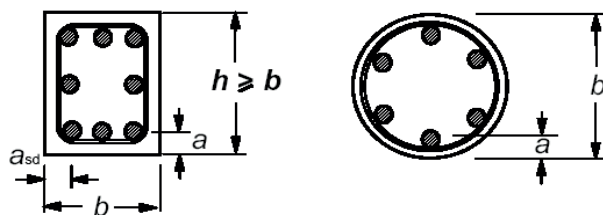
Obecnie praktyka inżynierska w odniesieniu do projektowania konstrukcji w sytuacji pożaru oparta jest głównie na stosowaniu norm zawierających dane tabelaryczne, które są najprostsze w zastosowaniu. Odpowiednie tabele zawierają minimalne wymiary przekroju różnych typów elementów (płyt, belek, słupów, ścian) i minimalne odległości od osi zbrojenia do powierzchni zewnętrznej, które są niezbędne w celu zapewnienia wymaganej odporności ogniowej. Podane w tabelach normowych wymagania geometryczne stanowią według PN-EN 1992-1-2 [4] sprawdzone rozwiązania projektowe dla sytuacji standardowego pożaru (patrz ryc. 1) dla czasu działania do 240 minut. Przy spełnieniu wymagań zamieszczonych w tabelach nie są wymagane żadne dodatkowe sprawdzenia odnośnie ścinania, skręcania czy zakotwienia, ale w odniesieniu do wyeliminowania zjawiska odpadania otuliny betonowej należy spełnić wymóg minimalnego zbrojenia przypowierzchniowego. Na ryc. 2 przedstawiono sposób definiowania szerokości przekroju (b) oraz odległości osi zbrojenia (a) dla przekroju prostokątnego i kołowego, które to wielkości stanowią podstawowe parametry geometryczne w metodzie tabelarycznej sprawdzania odporności ogniowej według normy [4]. W tabeli 5 przedstawiono przykładowe wymagania sformułowane dla belek żelbetowych wolno podpartych.

Przy korzystaniu z tabel normowych należy każdorazowo zwrócić uwagę na zakres stosowania poszczególnych danych

Tabela 5. Minimalne wymiary przekroju i odległości od osi zbrojenia dla belek wolno podpartych według [4]

Table 5. Minimum cross-section dimensions and distance from reinforcement axis for simply supported beams according to [4]

Odporność ogniowa / Fire resistance	Kombinacje: minimalna szerokość / odległość osi zbrojenia [mm] / Combinations: minimum width / distance from reinforcement axis [mm]				
	R30	80/25	120/20	160/15	200/15
R60	120/40	160/35	200/30	300/25	300/25
R90	150/55	200/45	300/40	400/35	400/35
R120	200/65	240/60	300/55	500/50	500/50
R180	240/80	300/70	400/65	600/60	600/60
R240	280/90	350/80	500/75	700/70	700/70



Ryc. 2. Definiowanie wymiarów przekroju w metodzie tabelarycznej według normy [4]

Fig. 2. Definitions of cross-section dimensions for tabulated method according to [4]

– zarówno w odniesieniu do różnych typów elementów konstrukcyjnych (belki, słupy, płyty, ściany), jak i w obrębie tych poszczególnych typów elementów, np.: dla różnych schematów statycznych pracy (belki wolno podparte i belki ciągłe; płyty jedno- i dwu-kierunkowo zbrojone, płyty w stropach płaskich). Dla płyt i belek ciągłych obowiązują ponadto dodatkowe (uzupełniające w stosunku do danych zamieszczonych w tabelach normowych) wymagania, związane z możliwą redystrybucją sił wewnętrznych w elementach konstrukcyjnych w efekcie działania temperatury pożarowej.

Metody obliczeniowe zapewniają w efektywny sposób określanie odporności ogniowej konstrukcji. Szczegółowa sytuacja może być analizowana dla odmiennych scenariuszy pożaru, dla różnej geometrii elementów, właściwości materiałowych, warunków obciążenia i podparcia elementów. Wśród stosowanych inżynierskich metod obliczeniowych można wyróżnić trzy kategorie:

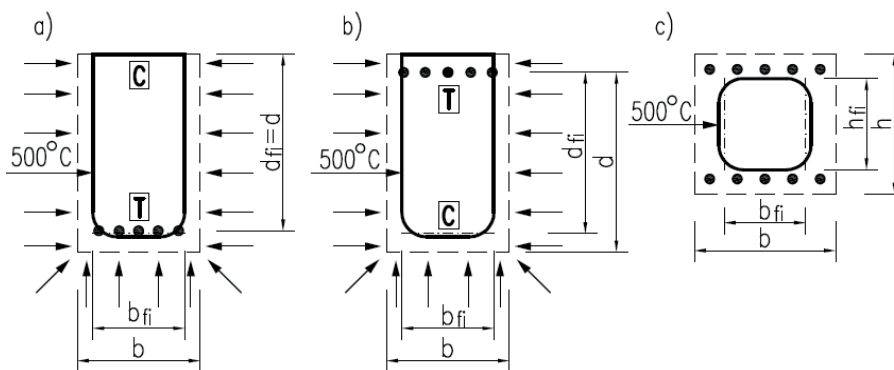
- Uproszczone obliczenia oparte o analizę stanów granicznych. W przypadku, gdy odporność ogniowa określana jest obliczeniowo, pierwszym krokiem jest ustalenie odpowiedzi termicznej konstrukcji w postaci rozkładu temperatury w czasie. Analiza termiczna może być wykonana w zakresie od prostego scenariusza pożaru z jednorodnym rozkładem temperatury gazu do zmiennych warunków temperatury uwzględniających przepływ ciepła za pomocą MES. W najprostszym sposobie rozkład temperatury można określić za pomocą profili temperatury dla przekroju betonowego, poddanego działaniu ognia z jednej strony lub z kilku stron jednocześnie, dla różnych czasów trwania pożaru (zarówno dla warunków pożaru standardowego, jak i parametrycznego). Dla zadanych wymiarów przekroju betonowego i przy określonych innych parametrach można takie profile sporządzić w formie pomocy projektowych. Dla stałego przekroju elementu po długości i przy jednorodnym rozkładzie temperatury w pomieszczeniu, profil temperatury będzie jednakowy w każdym przekroju elementu. Znając rozkład temperatury w przekroju, można zastosować technikę obliczeniową bazującą na przekroju zredukowanym (np.: metoda izotermy granicznej 500°C wg normy [4]). Metoda ta znajduje zastosowanie dla żelbetonowych przekrojów poddanych działaniu momentu zginającego i siły podłużnej, a jej podstawę stanowi założenie, że grubość uszkodzonej warstwy betonu przy działaniu pożaru równa jest średniej głębokości izotermy 500°C w strefie ściskanej przekroju. Beton uszkodzony – o temperaturze powyżej 500°C – nie przenosi żadnych obciążeń i jest pomijany w analizie nośności elementu, podczas gdy pozostały przekrój betonowy zachowuje swoje pełne pierwotne właściwości mechaniczne – wytrzymałość na ściskanie i moduł sprężystości. Wpływ temperatury na stal zbrojeniową w przekroju uwzględnia się w tej metodzie, przyjmując w poszczególnych prętach zredukowaną wytrzymałość na rozciąganie zależną od temperatury w prętach (według zależności zamieszczonych w [4]). Uwaga do metody izotermy gra-

nicznej dotyczy szczegółowego przyjęcia poziomu tej izotermy, która dobrze opisuje zachowanie betonów na kruszywie krzemianowym. Należy pamiętać, że w ogólnym przypadku wartość izotermy granicznej zależy od składu mieszanki betonowej i ewentualnych różnic w zachowaniu w stosunku do betonów krzemianowych, a w konsekwencji od szybkości spadku wytrzymałości na ściskanie dla konkretnego betonu wraz ze wzrostem temperatury. Dodatkowo, należy zauważyć, że dla betonów wysokiej wytrzymałości – z uwagi na ich większą wrażliwość na wpływy wysokiej temperatury na spadek wytrzymałości betonu na ściskanie – konieczne jest stosowanie niższej wartości izotermy granicznej. Na ryc. 3 przedstawiono sposób określania przekroju zredukowanego w metodzie izotermy granicznej według normy [4] dla różnych warunków oddziaływania pożarowego. Przykładowe profile temperatury dla przekroju kołowego o średnicy 300 mm dla czasu trwania standardowego oddziaływania pożarowego (według krzywej ISO834 – patrz: ryc. 1) zamieszczone jako pomoce projektowe do stosowania tej metody w normie [4] pokazano natomiast na ryc. 4. Ostatecznie weryfikacja odporności ogniowej według metody izotermy granicznej sprowadza się do określenia nośności dla przekroju zredukowanego i zredukowanej wytrzymałości stali zbrojeniowej przy wykorzystaniu procedur sformułowanych dla zwykłych warunków temperatury, czyli zgodnie z normą PN-EN 1992-1-1 [5].

Innym sposobem uproszczonej analizy dla warunków pożarowych na poziomie przekroju jest zastosowanie procedury przyrostowo-iteracyjnej według zasad podanych w normie [4]. Szczegółowy opis tej metody wraz z przykładowymi wynikami obliczeń zamieszczono w pracy [27].

- Analiza cieplno-mechaniczna z wykorzystaniem MES. Zwykle w pierwszym kroku przeprowadza się obliczenia termiczne dla określonego czasu trwania pożaru, potem zaś wyniki te wprowadza się do programu analizy mechanicznej w celu uzyskania rozkładów odkształceń i naprężeń w elemencie lub całej konstrukcji. Nieuwzględnianie w programie efektu migracji wilgoci oznacza, że nie można przewidzieć np. efektów wybuchowego odpadania otuliny betonowej.
- Kompletna analiza cieplno-wilgotnościowo-mechaniczna z użyciem MES. Pierwszy model tego typu zaproponowano w pracy [24], z pewnymi jednak ograniczeniami co do efektów wilgotnościowych. Bardziej zaawansowany model opracowano np. w ramach programu badawczego HITECOSP [25].

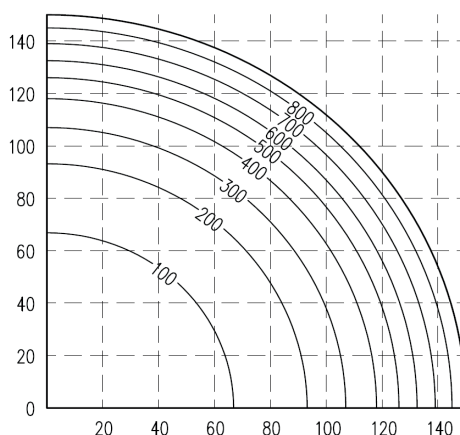
Niezależnie od stosowanej metody obliczeniowej wymaga się, aby wyeliminowany został niekorzystny efekt odpadania otuliny betonowej (*spalling*). Można to osiągnąć spełniając konkretne wymagania odnośnie mieszanki betonowej (skład, zawartość wilgoci), dodatkowego zbrojenia konstrukcyjnego w strefie przypowierzchniowej albo uwzględniając ten wpływ w analizie elementu. W normie [4] zamieszczono praktyczne wskazówki, dotyczące przede wszystkim betonów wysokiej



Ryc. 3. Oznaczenia wymiarów przekroju zredukowanego w metodzie obliczeniowej według [4]:

a) przekrój poddany działaniu ognia z trzech stron wraz ze strefą rozciąganą, b) przekrój poddany działaniu ognia z trzech stron wraz ze strefą ścisłą, c) przekrój poddany działaniu ognia ze wszystkich stron

Fig. 3. Reduced cross-section dimensions for the simplified calculation method according to [4]: a) cross-section subjected to fire action from three sides with tensile zone, b) cross-section subjected to fire action from three sides with compressive zone, c) cross-section subjected to fire action from all four sides



Ryc. 4. Przykładowy profil temperatury dla przekroju kołowego według [4] – średnica przekroju 300 mm, czas trwania pożaru standardowego 60 minut (z uwagi na symetrię przekroju i profili temperatury przedstawiono tylko ¼ całego profilu dla przekroju).

Fig. 4. Example of temperature profile for a circular cross-section according to [4] – cross-section diameter 300 mm, standard fire duration 60 min 9due to cross-section and profile symmetry only a ¼ of the whole profile is presented)

wytrzymałości, odnośnie metod ograniczenia możliwości wystąpienia tego zjawiska.

6. Uszkodzenia pożarowe i ocena stanu technicznego konstrukcji z betonu po pożarze

Zakres normy PN-EN 1992-1-2 [4] nie obejmuje zagadnienia oceny stanu technicznego konstrukcji z betonu po pożarze. W przypadku zadania inżynierskiego (eksperskiego) dotyczącego określenia poziomu bezpieczeństwa konstrukcji, która poddana została oddziaływaniu pożarowemu, przeprowadzenie takiej oceny staje się jednakże konieczne.

W efekcie działania wysokiej temperatury pożarowej na konstrukcje 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.

Kompletna procedura określania stanu technicznego konstrukcji po pożarze obejmuje następujące etapy [26], [28-32]:

- Zebranie danych dotyczących przebiegu pożaru – czynności te należy wykonać możliwie jak najszybciej, tzn. jak tylko pomieszczenia poddane działaniu ognia będą dostępne i przed podjęciem prac związanych z oczyszczaniem obiektu. Wielu informacji o przebiegu pożaru, maksymalnej temperaturze osiągniętej w poszczególnych punktach w trakcie jego trwania dostarczyć 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 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.
- Identyfikację właściwości materiałowych po pożarze – określenie poziomu właściwości mechanicznych materiałów (betonu konstrukcyjnego i stali zbrojeniowej) w konstrukcji po pożarze – czyli z uwzględnieniem niekorzystnego wpływu wysokiej temperatury – przy wykorzystaniu niszczących oraz nieniszczących technik badawczych.
- Diagnozę końcową – wybór najbardziej właściwej metody naprawczej 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).

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. Charakterystyki różnych uszkodzeń pożarowych betonu wraz z zestawieniem podstawowych czynników warunkujących ich wystąpienie według [9] podano w tabeli 6.

W przypadku stali zbrojeniowej określeniu i zlokalizowaniu podlegają miejsca uszkodzeń otuliny betonowej i odsłonięcia prętów zbrojeniowych oraz obszary, w których wystąpiło wyoboczenie 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 oddziaływania wysokiej

temperatury, stal w szybkim tempie traci swoje właściwości mechaniczne, powodując zmniejszenie nośności żelbetowych elementów konstrukcyjnych. Dodatkowo, po wykruszeniu otuliny betonowej, dochodzić może do wyoboczenia 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.

W celu ułatwienia prowadzenia 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 odsłonięcia stali zbrojeniowej) wprowadza się 5-stopniową skalę kategorii uszkodzeń: 0 – beton nieuszkodzony termicznie (zwykle tylko przebarwienia na powierzchni), 1 – uszkodzenia powierzchni i otuliny betonowej, odpadanie otuliny o ograniczonym zasięgu i zakresie, korozja niezabezpieczonych materiałów, obecność sadzy i osmoleń, widoczna sieć mikro-zarysowań, 2 – zarysowania (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 odsłonięcie bądź uszkodzenie zbrojenia [26], [30], [31]. Przykładowe uszkodzenia dla poszczególnych kategorii dla belki żelbetowej przedstawiono na ryc. 5.

W efekcie dokonanej inwentaryzacji uszkodzeń konstrukcji, przeprowadzonej klasyfikacji stwierdzonych uszkodzeń

Tabela 6. Charakterystyki różnych typów uszkodzeń pożarowych betonu według [9]

Table 6. Characteristics for different type of concrete fire damages according to [9]

Typ uszkodzenia / Type of damage	Czas wystąpienia [min] / Incident duration [min]	Charakter / Nature	Towarzyszący dźwięk / Accompanying sound	Główne czynniki warunkujące / Main influences
Wykruszanie kruszywa/ Aggregate spalling	7-30	--	wystrzał / discharge report	H, A, S, D, W
Odpryski naroży/ Corner spalling	30-90	niegwałtowny / non-violent	brak dźwięku / no sound	T, A, Ft, R
Odpryski powierzchniowe/ Surface spalling	7-30	gwałtowny / violent	pękanie / cracking	H, W, P, Ft
Odpryski eksplozyjne/ Explosive spalling	7-30	gwałtowny / violent	głośne uderzenie / loud knock	H, A, S, Fs, G, L, O, P, Q, R, S, W, Z
Uszkodzenia przy ochładzaniu/ Post-cooling damage	podczas i po ochładzaniu przy absorpcji wilgoci / during and after cooling/ with absorption of moisture	niegwałtowny / non-violent	brak dźwięku / no sound	T, Fs, L, Q, R, W1, AT

* A – rozszerzalność cieplna kruszywa / thermal expansion of aggregate, D – przenikalność cieplna kruszywa / thermal permeability of aggregate, Fs – wytrzymałość betonu na ścinanie / shearing durability of concrete, Ft – wytrzymałość betonu na rozciąganie / tensile strength of concrete, G – wiek betonu / age of concrete, H – szybkość nagrzewania / heating rate, L – warunki obciążenia i więzy / loading, restraint, O – profil nagrzewania / heating profile, AT – rodzaj kruszywa / aggregate type, P – przepuszczalność / permeability, Q – kształt przekroju / section shape, R – zbrojenie / reinforcement, S – wymiar kruszywa / aggregate size, T – maksymalna temperatura / maximum temperature, W – zawartość wilgoci / moisture content, Z – wielkość przekroju / section size, W1 – absorpcja wilgoci / moisture absorption.

i na podstawie analizy poziomu bezpieczeństwa konstrukcji (przeprowadzonej w oparciu o zidentyfikowane zredukowane właściwości mechaniczne materiałów i sztywności 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.

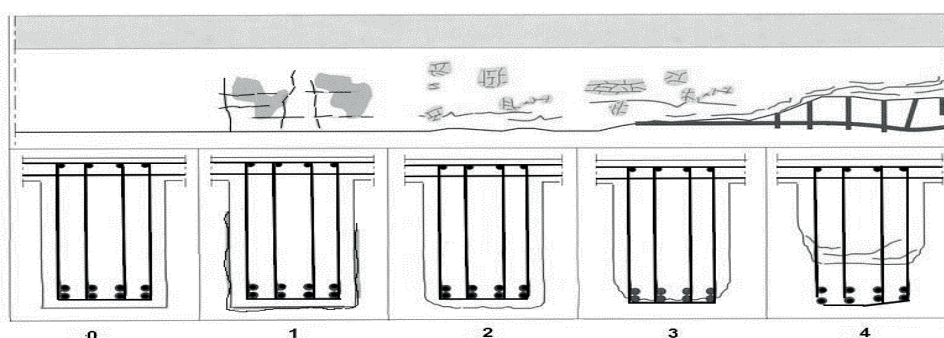
Należy podkreślić, że podstawowym celem naprawy konstrukcji po pożarze jest jej przywrócenie do stanu i przeznaczenia pierwotnego (przed pożarem). Stąd też, wykazać należy, że po pracach naprawczych (oczyszczeniu i zabezpieczeniu zbrojenia, odtworzeniu geometrii przekrojów betonowych, innych szczegółowych 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. Podsumowanie

Zgodnie z ogólnymi zapisami sformułowanymi w dokumencie [1] oraz postanowieniami normy PN-EN 1990 [2] odporność pożarowa stanowi jedno z podstawowych wymagań

obliczeniową gęstość obciążenia ogniowego. Norma [3] opisuje sposób określania wartości liczbowych obliczeniowej gęstości obciążenia ogniowego, z uwzględnieniem ryzyka wystąpienia pożaru z uwagi na wielkość i przeznaczenie pomieszczenia, a także z uwagi na różne typy działań zwalczających ogień.

Przeprowadzenie całościowej i dokładnej analizy odporności ogniowej dla konstrukcji betonowych jest zadaniem trudnym i złożonym. Punktem wyjścia dla wszystkich metod obliczeniowych są odpowiednie dane materiałowe (fizyczne, termiczne, mechaniczne) dla betonu i stali zbrojeniowej określone z uwzględnieniem parametru temperatury. W warunkach pożarowych analizę konstrukcji można przeprowadzać na poziomie wydzielonego elementu, dla części konstrukcji oraz globalnie – dla całej konstrukcji. W analizie konstrukcji zastosowanie mogą znajdować różne metody weryfikacji odporności ogniowej konstrukcji: dane tabelaryczne (metody opisowe), uproszczone lub zaawansowane metody obliczeniowe, badania ogniowe, kombinacje różnych wymienionych metod. Wśród obliczeniowych sposobów sprawdzania odporności ogniowej konstrukcji żelbetonowych stosowane są metody o różnym stopniu zaawansowania: zarówno metody uproszczone sprowadzone do analizy stanów granicznych nośności prowadzone na podstawie wyników analizy termicznej (np. metoda izotermy granicznej bazująca na przekroju zredukowanym według normy [4]), jak i zaawansowane pro-



Ryc. 5. Klasyfikacja uszkodzeń pożarowych na przykładzie belki żelbetonowej (kategorie od 0 do 4)

Fig. 5. Fire damage classification for RC beam (categories from 0 to 4)

przy projektowaniu konstrukcji (obok niezawodności i trwałości). Wytyczne odnośnie zasad ustalania i przyjmowania szczegółowych charakterystyk oddziaływania pożarowego zamieszczono w normie PN-EN 1991-1-2 [3]. Części 1-2 poszczególnych eurokodów konstrukcyjnych (w przypadku konstrukcji z betonu PN-EN 1992-1-2 [4]) podają metody weryfikacji odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych, przy czym określenia szczegółowych wymagań odporności ogniowej (w odniesieniu do nośności i/lub funkcji separacyjnej – R, E, REJ) dla elementów konstrukcyjnych budynków dokonuje się w oparciu o regulacje krajowe [6].

W celu przeprowadzenia analizy konstrukcji w warunkach pożarowych niezbędne jest przyjęcie realistycznego scenariusza pożaru, określającego zależność pomiędzy temperaturą gazu w pomieszczeniu a czasem trwania pożaru. Wśród stosowanych w analizie termicznej modeli pożaru wyróżnić można: normowe/nominalne krzywe temperatura-czas oraz modele naturalne (uproszczone lub zaawansowane). Szczegółowe zależności dla tych różnych modeli zamieszczono w PN-EN 1991-1-2 [3]. Dla modeli zaawansowanych obciążenie ogniowe jest zwykle określane poprzez

gramy MES uwzględniające w sposób łączny efekty termiczne, wilgotnościowe i mechaniczne w opisie zachowania całej konstrukcji.

W wyniku działania wysokiej temperatury w trakcie pożaru zachodzi w betonie szereg procesów fizyko-chemicznych, które mogą skutkować wystąpieniem uszkodzeń materiałowych. Typowe uszkodzenia pożarowe betonu to spękania, miejscowe lub powierzchniowe wykruszenia i ubytki odpryskowe. Uszkodzenia pożarowe betonu nie stanowią bezpośredniego mechanizmu zniszczenia elementu czy części konstrukcji, ale mogą inicjować wystąpienie jednego z typowych sposobów zniszczenia w warunkach pożarowych. Znaczne ubytki betonu w efekcie działania pożaru powodować mogą odsłonięcie wewnętrznych warstw przekroju (rdzenia) i stali zbrojeniowej w konstrukcjach żelbetonowych, co spowoduje szybsze zwiększenie temperatury wewnątrz przekroju i w odsłoniętych prętach, a w efekcie – postępującą redukcję nośności. Jednak tak długo, jak beton nie poddaje się lokalnym lub powierzchniowym odpryskom, warstwy zewnętrzne mogą zapewniać skuteczną ochronę termiczną stali zbrojeniowej i wewnętrznych warstw betonu, choć rola konstrukcyjna

tych warstw może być już wyczerpana z uwagi na znaczne redukcje właściwości mechanicznych betonu w warstwach zewnętrznych. Analizując charakter oraz określając główne czynniki warunkujące wystąpienie poszczególnych rodzajów uszkodzeń pożarowych, można poprzez odpowiednie zabiegi projektowe (materiałowe, konstrukcyjne), ograniczać niekorzystne zjawiska związane z działaniem ognia na beton.

Norma PN-EN 1992-1-2 [4] nie obejmuje swym zakresem oceny stanu technicznego konstrukcji po pożarze. W artykule przedstawiono dodatkowo podstawowe informacje w zakresie analizy i klasyfikacji uszkodzeń pożarowych konstrukcji z betonu, co stanowi element niezbędny dla przeprowadzania oceny stanu technicznego konstrukcji po pożarze i wnioskowania o poziomie bezpieczeństwa takiej konstrukcji.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (EU) nr 305/2011 z dnia 9 marca 2011 r. ustanawiające zharmonizowane warunki wprowadzenia do obrotu wyrobów budowlanych i uchylające dyrektywę Rady 89/106/EWG; Załącznik 1: Podstawowe wymagania dotyczące obiektów budowlanych, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, 04.04.2011.
- [2] PN-EN 1990: Podstawy projektowania konstrukcji.
- [3] PN-EN 1991-1-2: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.
- [4] PN-EN 1992-1-2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-2: Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.
- [5] PN-EN 1992-1-1: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Zasady ogólne i zasady dla budynków.
- [6] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dziennik Ustaw z dnia 15 czerwca 2002, Dział VI: Bezpieczeństwo pożarowe).
- [7] Kosiorek M., Woźniak G., *Projektowanie elementów żelbetonowych i murowych uwagi na odporność ogniową*, „Instrukcje, Wytyczne, Poradniki” nr 409/2005, ITB, Warszawa, 2005.
- [8] PN-EN 1363-2:2001: Badania odporności ogniowej. Część 2 – Procedury alternatywne i dodatkowe.
- [9] FIB Bulletin 38: *Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling*. FIB state-of-art report prepared by Working Party 4.3-1, Lausanne, April 2007.
- [10] Neville A., *Właściwości betonu*, Polski Cement, Kraków 2000.
- [11] Behnood A., Ziari H., *Compressive strength of HSC at temperatures up to 300C*. Proceedings of fib Symposium “Keep concrete attractive”, Budapest 2005.
- [12] Meda A., Gambarova P., Bonomi M.: *High-Performance Concrete in Fire-Exposed Reinforced Concrete Sections*. “ACI Structural Journal”, Vol. 99, Issue 3, 2002.
- [13] Poon C., Azhar S., Anson M., Wong Y., *Comparison of the Strength and Durability Performance of Normal- and High-strength Pozzolanic Concretes at Elevated Temperatures*. “Cement and Concrete Research”, Vol. 31, Pergamon Press, 2001.
- [14] Kowalski R., *Wpływ wysokiej temperatury na cechy mechaniczne betonu*. „Inżynieria i Budownictwo” Issue 10, 2010.
- [15] Gawin D., Pesavento F., Majorana C. E., Schrefler B. A., *Modelowanie procesu degradacji betonu w wysokich temperaturach*, „Inżynieria i Budownictwo” Issue 4 2003.
- [16] Silfwerbrand J., *Guidelines for preventing explosive spalling in concrete structures exposed to fire*, Proceedings of fib Symposium “Keep concrete attractive”, Budapest 2005.
- [17] Zeiml M., Lackner R., *Experimental investigation on spalling mechanisms in heated concrete*, “Fracture Mechanics of Concrete Structures – High-Performance Concrete, Brick-Masonry and Environmental Aspects”, Carpinteri, et al. (eds), Taylor&Francis group, London 2007.
- [18] Ali F.A., Nadjai A., Talamona D., Rafi M.M., *Fracture and explosive spalling of concrete slabs subjected to severe fire*, “Fracture Mechanics of Concrete Structures - High-Performance Concrete, Brick-Masonry and Environmental Aspects”, Carpinteri, et al. (eds), Taylor&Francis Group, London 2007.
- [19] Kalifa P., Menneteau F.-D., Quenard D., *Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures*, “Cement and Concrete Research”, Vol. 30, 2000.
- [20] Gawin D., Pesavento F., *Prediction of the thermal spalling risk of concrete structures exposed to high temperatures*, Conference Proceedings of the 6th International Conference “Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures - AMCM’ 2008”, Łódź, Poland 2008.
- [21] Gawin D., Witek A., *Wpływ włókien polipropylenowych na degradację betonu wysokowartościowego i zjawiska ciepłowo-wilgotnościowe w wysokich temperaturach*, „Inżynieria i Budownictwo” Issue 2, 2005.
- [22] Dehn F., E.A. B. Koenders E.A. B. (eds), Proceedings of the 1st International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure (From Real Life Experiences and Practical Applications to Lab-scale Investigations and Numerical Modelling), September 2009.
- [23] Pimienta P., Meftah F. (eds.), Proceedings of the 3rd International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Paris, September 2013; Materials science, Engineering and Chemistry, Vol. 6, 2013.
- [24] Bažant Z., Thonguthai W., *Pore pressure in heated concrete walls – theoretical predictions*, “Magazine of Concrete Research”, Vol. 107, Issue 31, 1979, pp. 67-75.
- [25] Khoury G.A., *Applications – Fire & Assessment*, Proceedings of CISM Course on “Effects of heat on concrete”, Udine, Italy 9-13 June 2003.
- [26] Fib bulletin No. 46. *Fire Design of Concrete Structures - structural behaviour and assessment*, Lausanne, Switzerland, April 2008.
- [27] Chudyba K., Seręga S., *Structural fire design methods for reinforced concrete members*, Technical Transactions - Civil Engineering, zeszyt 2-B/2013, Wyd. PK.
- [28] Proceedings of the Sixth International Conference ‘Structures in Fire’, Michigan, USA, 2010, DEStech Publications Inc., ed. V. Kodur, J.-M. Franssen.
- [29] Proceedings of the 7th International Conference ‘Structures in Fire’, Zurich, Switzerland, 2012, ETH Zurich, ed. M. Fontana, A. Frangi, M. Knobloch.
- [30] *Assessment, Design and Repair of Fire-Damaged Concrete Structures*. Technical Report No . 68, The Concrete Society, London, United Kingdom 2008.
- [31] *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.
- [32] Chudyba K., Hager I.: *Metodyka oceny stanu technicznego konstrukcji z betonu po pożarze*, Przegląd Budowlany, nr 6, czerwiec 2010.

* * *

dr inż. Krzysztof Chudyba – pracuje na stanowisku adiunkta naukowo-badawczego w Zakładzie Konstrukcji Żelbetonowych Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych Politechniki Krakowskiej. Zainteresowania naukowo-badawcze: analiza i projektowanie konstrukcji z betonu i konstrukcji murowych – z uwzględnieniem oddziaływań pożarowych, zagadnienia oddziaływań długotrwałych/reologicznych i problematyka trwałości dla konstrukcji z betonu.