

dr hab. inż. Krzysztof Chudyba, prof. PK¹⁾
ORCID: 0000-0001-8880-5222

Simplified calculation methods of verification for fire design of concrete structures

Uproszczone metody obliczeniowe weryfikacji odporności ogniowej konstrukcji z betonu

DOI: 10.15199/33.2024.12.10

Abstract. The paper presents some selected issues related to verification methods for concrete structures in fire situation according to the code PN-EN 1992-1-2. There are analyzed the simplified calculation methods used for fire design of concrete structures, with their assumptions and possible scope of application. The changes within this range introduced by the new code PN-EN 1992-1-2:2023 are also commented.

Keywords: concrete structures; fire resistance; design; simplified methods.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące metod weryfikacji odporności ogniowej konstrukcji z betonu wg normy PN-EN 1992-1-2. Omówiono uproszczone metody obliczeniowe stosowane przy projektowaniu konstrukcji z betonu w sytuacji pożarowej, podając ich ogólne założenia i analizując możliwy zakres stosowania. Zaprezentowano i skomentowano zmiany w tym zakresie wprowadzone w nowej wersji normy PN-EN-1992-1-2: 2023.

Słowa kluczowe: konstrukcje z betonu; odporność ogniowa; projektowanie; metody uproszczone.

For the verification of reinforced concrete structural elements fire resistance there are used methods with different level of complexity and defined scope of application. They include:

- fire tests;
- tabulated data (descriptive method);
- engineering calculation methods – simplified and advanced;
- combination of tests and calculations.

Calculation methods provide in an effective way determination of fire resistance for structures. Analysis may be carried out different fire scenarios, geometry of elements, material properties or load conditions.

Simplified methods are applied mainly for determining the load bearing capacity on the cross-sectional level for elements for which Bernoulli's hypothesis of plain sections is satisfied. Additionally, the following assumption are then made:

- deformation from fire actions do not influence the temperature field;
- free thermal strains are neglected in the analysis;
- transient strains from creep are omitted or taken into account in indirect way (additional strains may be accounted for in stress-strain relationship which is used for analysis and that is determined experimentally in transient thermal conditions);
- stresses in direction perpendicular to the elements axis, resulted from temperature gradient, are neglected while assuming the same mechanical material characteristics as in uniaxial state of stress;

Do weryfikacji odporności ogniowej żelbetowych elementów konstrukcyjnych stosowane są metody o różnym poziomie złożoności oraz określonym zakresie stosowania. Są wśród nich:

- testy ogniowe;
- dane tabelaryczne (metoda opisowa);
- inżynierskie metody obliczeniowe – uproszczone i zaawansowane;
- kombinacje badań i obliczeń.

Metody obliczeniowe zapewniają efektywne określanie odporności ogniowej konstrukcji. Analiza może być prowadzona w przypadku odmiennych scenariuszy pożaru, różnej geometrii elementów, różnych właściwości materiałowych czy warunkach obciążenia.

Metody uproszczone stosowane są głównie do określania nośności na poziomie przekroju w sytuacji pożarowej dla elementów, w przypadku których spełniona jest hipoteza płaskich przekrojów Bernoullego. Dodatkowo, przyjmowane są następujące założenia:

- deformacje od oddziaływania pożarowego nie wpływają na pole temperatury;
- w analizie pomijane są swobodne odkształcenia termiczne;
- pomija się lub uwzględnia w sposób pośredni przejściowe odkształcenia od pełzania (dodatkowe odkształcenia mogą być uwzględnione w zależności naprężenie-odkształcenie betonu przyjmowanej do analizy, określanej doświadczalnie w przejściowych warunkach termicznych);
- pomija się naprężenia w kierunku prostopadłym do osi elementu, wynikające z gradientu temperatury, przy przyjęciu takich samych mechanicznych charakterystyk materiałowych, jak w jednoosiowym stanie naprężenia;

¹⁾ Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej; krzysztof.chudyba@pk.edu.pl

- the influence of concrete explosive spalling is not taken into account in the calculation analysis;
- concrete tensile strength is ignored;
- there is assumed the full bond between reinforcing steel bars and surrounding concrete within the whole process of heating the element.

Such methods are usually supplemented with appropriate assumptions and information as to the way of reduction the values of material properties as a result of high temperature actions as well as of taking dimensions for reduced cross-sections.

Application of **advanced calculation methods** ensures obtaining the most realistic results of analysis of structures subjected to the action of fire. Such methods should be based onto the major principles of physics leading to reliable estimation of expected behaviour of appropriate components of structural materials in fire conditions. Advanced methods of analysis should include calculations models for the determination of:

- development and distribution of temperature in structural elements (thermal response model);
- mechanical behaviour of structure or its isolated part (mechanical response model).

Verification of the accuracy of calculation models should be carried out by confrontation with the appropriate results of experimental researches.

In the case of calculation methods it is necessary to conduct thermal analysis that should generally be based onto the principles and assumptions of the heat flow theory. The model of the thermal response should account for the appropriate thermal actions according to PN-EN 1991-1-2 [1] and values of thermal properties determined as a function of temperature. The influence of moisture and its migration in concrete or protective layers (if they are applied) may be ignored. Temperature distribution (temperature profile) may be determined with the omitting the presence of reinforcement in cross-section. Models of mechanical response ought to be based onto principles of mechanics of structures, with taking into account the variation of mechanical properties due to the high temperature action.

Simplified calculation methods according to PN-EN 1992-1-2

In the code PN-EN 1992-1-2 [2] there are presented three methods for fire resistance analysis of concrete elements. They may be used mainly for beams and columns, i.e. for elements subjected to the action of bending moment and/or axial forces. First two methods are based on the concept of reduced cross-section (effective cross-section) – **500°C isotherm** and **zone method**. The third of them constitutes the **incremental-iterative procedure**, where for given value of N_u ($N_u \leq N_{u0}$, N_{u0} – cross-section load bearing capacity for pure axial compression) there is determined the value of ultimate bending moment M_u based on the relationship bending moment – cross-section curvature. While applying this method some inconveniences result from the necessity to construct for each given value N_u the relationship bending moment – curvature,

- nie uwzględnia się wpływu odprysków eksplozywnych betonu w analizie obliczeniowej;
- pomija się wytrzymałość betonu na rozciąganie;
- zakłada się pełną przyczepność pomiędzy stalą zbrojeniovą i otaczającym betonem w całym procesie ogrzewania elementu.

Metody takie zwykle uzupełnione są dodatkowymi, odpowiednimi założeniami i informacjami o sposobie redukcji właściwości materiałowych przy oddziaływaniu wysokiej temperatury oraz przyjmowania wymiarów przekroju zredukowanego.

Stosowanie **zaawansowanych metod obliczeniowych** zapewnia uzyskanie najbardziej realistycznych wyników analizy konstrukcji poddanej działaniu ognia. Metody takie powinny bazować na podstawowych prawach fizycznych prowadzących do wiarygodnych przybliżeń przewidywanego zachowania odpowiednich składowych materiałów konstrukcyjnych w warunkach pożaru. Zaawansowane metody analizy powinny uwzględniać modele obliczeniowe do określania:

- rozwoju i rozkładu temperatury w elementach konstrukcyjnych (model odpowiedzi termicznej);
- zachowania mechanicznego konstrukcji lub jej wydzielonej części (model odpowiedzi mechanicznej).

Sprawdzenie dokładności modeli obliczeniowych powinno się odbywać przez konfrontację z odpowiednimi wynikami badań doświadczalnych.

W przypadku stosowania metod obliczeniowych niezbędne jest przeprowadzenie analizy termicznej konstrukcji, która powinna bazować na znanych zasadach i założeniach teorii przepływu ciepła. Model odpowiedzi termicznej powinien uwzględniać: oddziaływania termiczne wg PN-EN 1991-1-2 [1] oraz właściwości termiczne materiałów z uwzględnieniem czynnika temperatury. Wpływ wilgotności i migracji wilgoci w betonie lub warstwach ochronnych (jeśli takie występują) może zostać pominięty. Rozkład temperatury w przekroju (profil temperatury) można określać, pomijając zbrojenie w przekroju. Modele odpowiedzi mechanicznej powinny bazować na zasadach i założeniach teorii mechaniki konstrukcji, z uwzględnieniem zmienności właściwości mechanicznych materiałów z uwagi na wpływ temperatury.

Uprozczone metody obliczeniowe wg PN-EN 1992-1-2

W normie PN-EN 1992-1-2 [2] przedstawiono trzy uproszczone metody analizy odporności ogniowej elementów betonowych. Znajdują one zastosowanie przede wszystkim w przypadku belek i słupów, czyli elementów obciążonych momentem zginającym i/lub siłą podłużną ściskającą. Dwie pierwsze metody bazują na koncepcji przekroju zredukowanego (przekroju efektywnego) – **metoda izotermy granicznej 500°C** i **metoda stref**. W przypadku trzeciej **metody przyrostowo-iteracyjnej**, dla danej wartości siły podłużnej N_u ($N_u \leq N_{u0}$, N_{u0} – nośność przekroju przy czystym osiowym ściskaniu) określa się wartość granicznego momentu zginającego M_u na podstawie zależności moment zginający – krzywizna przekroju. W przypadku tej procedury niedogodnością jest konieczność określenia zależności moment zginają-

which is relatively time consuming process in comparison to the other mentioned methods.

Others simplified methods and procedures for determining the fire resistance of structural elements are available, especially for reinforced concrete columns. In order to estimate their fire resistance Rankin's formula [3] may be used or different national methods being the extension of the codes notations for normal temperature conditions for fire conditions, for ex.: [4 ÷ 6]. There may also be found in the literature other propositions formulated for different types of concretes and detailed load cases, for ex.: [7 ÷ 9].

Methods based on the reduced cross-section are quite well known and described in the literature [2, 10, 11, 12] and hence they will not be here presented in details. Examples of application of these methods for the fire resistance verification of reinforced concrete structural elements may also be found in [13, 14].

In the paper there was presented in a more detailed way the **incremental-iterative approach** [2, 10]. It is not so widely known and constitutes the example of more advanced method, however still classified within the group of simplified methods. The way of constructing the load bearing capacity envelope $M_u - N_u$ for reinforced concrete cross-section is presented in figure 1 [2, 10]. The ultimate load-bearing capacity is determined on the base of concrete physical law $\sigma_c = \sigma_c(\epsilon, \theta)$ with taking into account the descending branch of this relationship in post-critical strain zone. Physical relationship for reinforcing steel $\sigma_s = \sigma_s(\epsilon, \theta)$ may be taken with strengthening or without the strengthening after reaching the yielding stress level.

Relationship between the strain in the extreme compressive fibre of concrete ϵ_c , the most tensioned reinforcing bar strains and the curvature of cross-section κ may be expressed by equation (figure 2):

$$\kappa = \frac{\epsilon_c - \epsilon_s}{d} \tag{1}$$

By assuming the plane cross-section principle and appropriate physical laws for concrete and reinforcing steel, for each curvature κ there should be determined such strains ϵ in the cross-section for which the resultant of normal stresses is equal to N_u . Such approach leads to the solution of the equation (for ϵ_c) in the following form:

$$\iint_A \sigma_c(\kappa \cdot (z - h_1) + \epsilon_c; \theta(y, z)) dA_c + \sum_{j=1}^{N_s} A_{sj} \sigma_s(\kappa \cdot (Z_{sj} - h_1) + \epsilon_s; \theta(Y_{sj}, Z_{sj})) - N_u = 0 \tag{2}$$

where:

cy – krzywizna dla każdej wartości siły podłużnej N_u , co jest stosunkowo pracochłonne w porównaniu z pozostałymi metodami.

Dostępne są inne uproszczone metody i procedury określania odporności ogniowej elementów konstrukcyjnych, szczególnie słupów żelbetowych. W celu oszacowania ich odporności ogniowej można wykorzystać formułę Rankine'a [3] albo metody krajowe stanowiące rozszerzenie normowych zapisów dotyczących projektowania w zwykłych warunkach na warunki pożarowe, np. [4 ÷ 6]. Ponadto w literaturze omówiono jeszcze inne propozycje formułowane dla różnych typów betonów i szczegółowych przypadków obciążeniowych, np. [7 ÷ 9].

Metody bazujące na przekroju zredukowanym są dość dobrze opisane w literaturze przedmiotu [2, 10, 11, 12] i dlatego w tym artykule nie zostaną omówione. Przykłady stosowania tych metod do weryfikacji odporności ogniowej żelbetowych elementów konstrukcyjnych można znaleźć w [13, 14].

W artykule omówiono **metodę przyrostowo-iteracyjną** [2, 10]. Nie jest ona tak powszechnie znana, ale stanowi przykład bardziej zaawansowanego podejścia w obrębie metod uproszczonych. Sposób konstruowania obwiedni nośności $M_u - N_u$ w przypadku przekroju żelbetowego wg tej metody [2, 10] przedstawiono na rysunku 1. Nośność graniczna jest określa-

na na podstawie zależności fizycznych betonu $\sigma_c = \sigma_c(\epsilon, \theta)$ z uwzględnieniem gałęzi opadającej zależności w strefie odkształceń pokrytych. W przypadku stali zbrojeniowej zależności fizyczne $\sigma_s = \sigma_s(\epsilon, \theta)$ mogą być przyjmowane ze wzmocnieniem lub bez wzmocnienia po osiągnięciu granicy plastyczności.

Zależność pomiędzy odkształceniem w skrajnym ściskającym włóknie betonu ϵ_c , najbardziej rozciąganym pręcie zbrojeniowym ϵ_s i krzywizną przekroju κ można wyrazić wzorem (rysunek 2):

$$\kappa = \frac{\epsilon_c - \epsilon_s}{d} \tag{1}$$

Zakładając zasadę płaskich przekrojów i odpowiednie zależności fizyczne w przypadku betonu i stali zbrojeniowej, dla każdej krzywizny κ należy określić takie odkształcenie ϵ w przekroju, dla którego wypadkowa naprężeń normalnych wynosi N_u . Podejście takie prowadzi do rozwiązania równania (z uwagi na ϵ_c):

$$\iint_A \sigma_c(\kappa \cdot (z - h_1) + \epsilon_c; \theta(y, z)) dA_c + \sum_{j=1}^{N_s} A_{sj} \sigma_s(\kappa \cdot (Z_{sj} - h_1) + \epsilon_s; \theta(Y_{sj}, Z_{sj})) - N_u = 0 \tag{2}$$

gdzie:

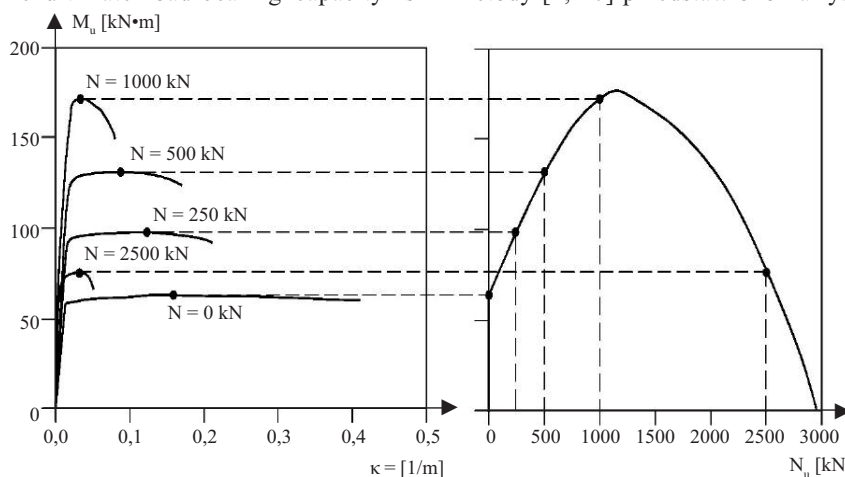


Fig. 1. Scheme of constructing $M_u - N_u$ envelope for incremental-iterative method
Rys. 1. Schemat konstruowania obwiedni $M_u - N_u$ w metodzie przyrostowo-iteracyjnej

$\theta(y, z)$ – temperature field for the analysed moment in time,

Y_{sj}, Z_{sj} – coordinates of j -th reinforcing bar with the cross-section area of A_{sj} ,

The ultimate value of bending moment M_u corresponding to the normal force N_u is the maximum of the function $M = M(\kappa)$:

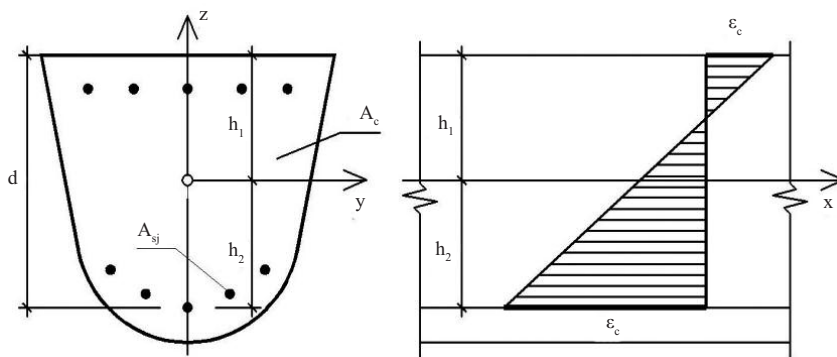


Fig. 2. General notations for incremental-iterative method

Rys. 2. Ogólne oznaczenia w metodzie przyrostowo-iteracyjnej

$\theta(y, z)$ – pole temperatury w analizowanej chwili czasu t ;

Y_{sj}, Z_{sj} – współrzędne j -tego pręta zbrojenieowego o polu powierzchni A_{sj} .

Graniczna wartość momentu zginającego M_u odpowiadającego sile normalnej N_u jest maksymalną wartością funkcji $M = M(\kappa)$:

$$M_u = \max \left[\int_A \sigma_c (\kappa \cdot (z - h_1) + \varepsilon_c; \theta(y, z)) z dA_c + \sum_{j=1}^{N_s} A_{sj} Z_{sj} \sigma_s (\kappa \cdot (Z_{sj} - h_1) + \varepsilon_c; \theta(Y_{sj}, Z_{sj})) \right] \quad (3)$$

Constructing the envelope $M_u - N_u$ with the application of incremental-iterative approach is time-consuming process, requiring the solution of $n_i \times n_j$ equations (n_i – the level of axial force values N_u , n_j – number of analysed curvatures) in order to determine the relationship $M = M(\kappa)$ and finally to find maximum bending moment M_u . But it may be assumed that this method constitutes the reference one in comparison with the other simplified calculation methods.

$$M_u = \max \left[\int_A \sigma_c (\kappa \cdot (z - h_1) + \varepsilon_c; \theta(y, z)) z dA_c + \sum_{j=1}^{N_s} A_{sj} Z_{sj} \sigma_s (\kappa \cdot (Z_{sj} - h_1) + \varepsilon_c; \theta(Y_{sj}, Z_{sj})) \right] \quad (3)$$

Konstruowanie obwiedni $M_u - N_u$ z zastosowaniem procedury przyrostowo-iteracyjnej jest procesem czasochłonnym, wymagającym rozwiązania $n_i \times n_j$ równań (n_i – liczba poziomów wartości siły podłużnej N_u , n_j – liczba rozważonych krzywizn) w celu określenia zależności $M = M(\kappa)$ i znalezienia maksymalnej wartości momentu M_u . Można przyjąć, że metoda może być traktowana jako referencyjna przy porównywaniu z innymi uproszczonymi metodami obliczeniowymi.

Comparison of calculation results for different simplified codes methods

In this paper there will be presented some selected examples of calculation results within the frame of thermal and mechanical analysis with the application of different simplified methods (based on reduced cross-section – boundary isotherm method and zone method; incremental-iterative approach). Qualitatively consistent results of comparison of different calculation methods were obtained also for several different analysed cases (for different cross-section dimension and shapes, for different mechanical parameters of concrete and steel) that presented in the paper. The aim of the conducted analysis is to estimate the possible ranges of application of individual methods, taking into account the significant differentiation in practical load cases as well as in parameters of applied structural concrete.

In order to compare the results obtained by different methods for determination of fire resistance, there are presented the results for square cross-section with dimensions equal to 30 x 30 cm with symmetrical reinforcement 8ø20 (reinforcement ratio $\rho_s = 2,8\%$). For the analysed cross-section, calculations were conducted for two different concrete strength classes $f_c = 30$ MPa (normal strength concrete C30/37) and $f_c = 90$ MPa (high strength concrete C90/105). For both cases there was used reinforcing steel with yielding stress equal to 420 MPa. The same fire scenario according to ISO 834 curve was assumed for all calculations. The heat flow between the surrounding environment and the element was due to convection (Newton law) and thermal radiation (Stefan-Boltzmann law). The basic parameters for heat flow were assumed based on the codes [1, 2] in the following way: heat flow coefficient for convection $\alpha_k = 25$ W/(m²K);

Porównanie wyników obliczeń wg różnych uproszczonych metod normowych

W artykule przedstawiono przykładowe wyniki analizy termicznej oraz mechanicznej z zastosowaniem różnych uproszczonych metod obliczeniowych (metody uproszczone – izotermy granicznej oraz stref bazujące na przekroju zredukowanym; oraz metoda przyrostowo-iteracyjna). Jakościowo zgodne wyniki wg różnych metod obliczeniowych uzyskano także w innych przeanalizowanych przypadkach (różniących się wymiarami i kształtem przekroju, parametrami mechanicznymi betonu i stali zbrojenieowej innych niż zamieszczone w artykule). Celem analizy jest określenie możliwego zakresu stosowania poszczególnych metod uproszczonych, uwzględniając zróżnicowanie możliwych przypadków obciążeniowych i parametrów betonu konstrukcyjnego.

W celu porównania wyników uzyskanych różnymi metodami obliczeniowymi określania odporności ogniowej przedstawiono analizę przekroju kwadratowego o boku 30 cm ze zbrojeniem symetrycznym 8ø20 (stopień zbrojenia $\rho_s = 2,8\%$). Obliczenia wykonano dla dwóch różnych klas betonu $f_c = 30$ MPa (beton zwykłej wytrzymałości C30/37) i $f_c = 90$ MPa (beton wysokiej wytrzymałości – BWW; C90/105). W obu przypadkach przyjęto stal zbrojenieową o granicy plastyczności 420 MPa. Założono jednakowy scenariusz pożarowy wg krzywej ISO 834. Przepływ ciepła pomiędzy środowiskiem a elementem odbywał się przez konwekcję (prawo Newtona) i radiację cieplną/promieniowanie (prawo Stefana-Boltzmana). Parametry przepływu ciepła przyjęto wg [1, 2]: współczyn-

heat source emissivity $\varepsilon_f = 1,0$; element surface emissivity $\varepsilon_r = 0,8$; surface configuration coefficient 1,0; Stefan-Boltzmann constant $\sigma_{s-B} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$. Temperature profiles were obtained by solving the equation of Fourier-Kirchhoff. Numerical calculations were carried out with the application of ANSYS program, assuming the following material relationships (thermal properties) for concrete:

- normal strength concrete – according to the code PN-EN 1992-1-2 [2] for concrete made on silicate aggregate, for the moisture level 3% and for adopting the upper limit for thermal conductivity,

- high strength concrete – according to [15] for concrete on silicate aggregate.

Results of thermal analysis are presented in figure 3.

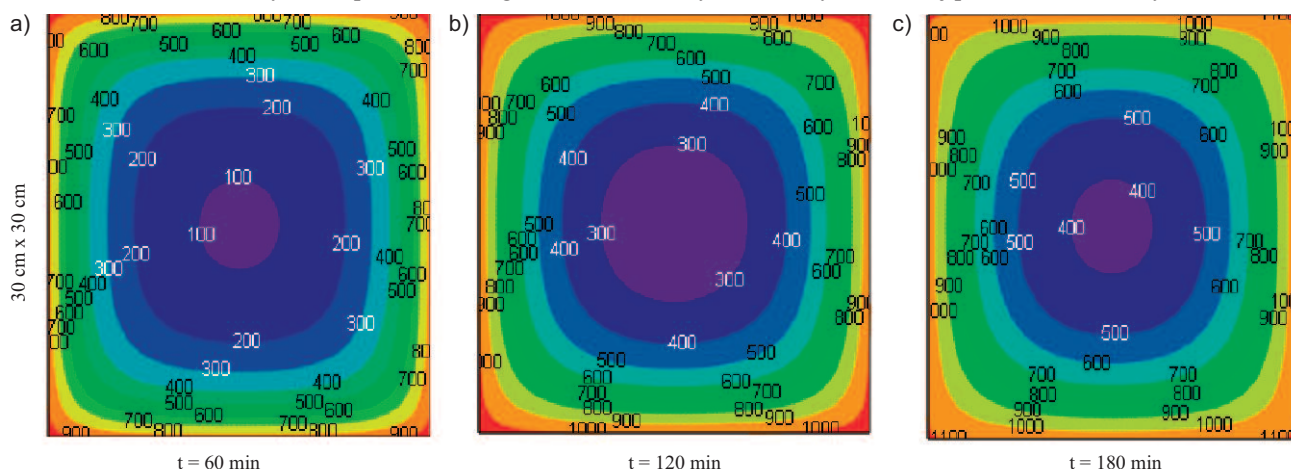


Fig. 3. Temperature profiles for the analysed cross-section for fire duration time according to ISO 834 equal to: a) 60; b) 120 and c) 180 minutes
Rys. 3. Profile temperatury analizowanego przekroju w przypadku oddziaływania pożarowego wg krzywej ISO 834 wynoszącego: a) 60; b) 120 oraz c) 180 minut

Mechanical analysis was carried out for three different methods:

- 500°C isotherm method;
- zone method;
- incremental-iterative approach.

For boundary isotherm method it was assumed the classical relationship $\sigma_c - \varepsilon_c$ (parabola-rectangular relationship). The same relationship was also applied for the zone method, whereby concrete compressive strength was reduced to the value $k_c(\theta_M) \cdot f_c$. For both mentioned methods, for reinforcing steel there was assumed linear elastic relationship with reduced yielding stress $k_s(\theta_s) \cdot f_y$. Within the zone method the number of zones in the cross-section was equal to $n = 6$.

Load bearing capacity envelopes (interaction curves) $M_u - N_u$ for reduced dimensions of the analysed cross-sections were constructed based on the classical approach according to ultimate values of strains for reinforced concrete cross-section in normal temperature conditions by PN-EN 1992-1-1 [16]. In incremental-iterative approach there was used the stress-strain relationship for concrete with descending branch. For normal strength concrete for the description of stress-strain curve within the range up to the maximum stress there was applied equation from PN-EN 1992-1-2 [2]. As this code doesn't give the formula for the descending part, it was assumed the relationship in the following form:

nik przepływu ciepła przez konwekcję $\alpha_k = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$; emisyjność źródła ciepła (pożaru) $\varepsilon_f = 1,0$; emisyjność powierzchni elementu $\varepsilon_r = 0,8$; współczynnik konfiguracji powierzchni 1,0; stała Stefana-Boltzmann $\sigma_{s-B} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$. Profile temperatury uzyskano przez rozwiązanie równania Fouriera-Kirchhoffa. Obliczenia numeryczne przeprowadzono z wykorzystaniem programu ANSYS, zakładając następujące zależności materiałowe:

- beton zwykłej wytrzymałości – wg PN-EN 1992-1-2 [2]; beton na kruszywie krzemianowym; wilgotność betonu 3%; górna granica przewodnictwa cieplnego;

- beton wysokiej wytrzymałości – wg [15] na kruszywie krzemianowym.

Wyniki analizy termicznej przedstawiono na rysunku 3.

Analizę mechaniczną przeprowadzono wg trzech różnych metod:

- izotermi 500°C;
- stref;
- iteracyjno-przyrostowej.

W przypadku metody izotermi 500°C przyjęto klasyczną zależność $\sigma_c - \varepsilon_c$ wg „paraboli madryckiej” (zależność paraboliczno-prostokątna). Taką samą zależność zastosowano także w przypadku metody stref, przy czym wytrzymałość betonu na ściskanie zredukowano do wartości $k_c(\theta_M) \cdot f_c$. W przypadku obydwu wymienionych metod dla stali zbrojeniowej przyjęto zależność liniowo-sprężystą ze zredukowaną granicą plastyczności $k_s(\theta_s) \cdot f_y$. W metodzie stref założono podział przekroju na liczbę stref $n = 6$.

Obwiednie nośności (krzywe interakcji) $M_u - N_u$ w przypadku zredukowanych wymiarów analizowanych przekrojów zostały skonstruowane na podstawie klasycznego podejścia dla granicznych wartości odkształceń przekroju żelbetowego dla temperatury normalnej [16]. W metodzie przyrostowo-iteracyjnej wykorzystano zależność naprężenie-odkształcenie betonu wraz z uwzględnieniem gałęzi opadającej zależności. W przypadku betonu zwykłej wytrzymałości do opisu krzywej naprężenie-odkształcenie w zakresie do maksymalnej wartości naprężenia wykorzystano równania podane w PN-EN 1992-1-2 [2]. W związku z tym, że norma ta nie podaje formuły w przypadku opadającej części zależności, przyjęto zależność w postaci:

$$\sigma_c(\varepsilon_c, \theta) = f_c(\theta) \cdot 10^{-p \left(1 - \frac{\varepsilon_{c1}(\theta)}{\varepsilon_c}\right)^2} \quad \varepsilon_c > \varepsilon_{c1}(\theta) \quad (4)$$

where:

$\varepsilon_{c1}(\theta)$ – strain for maximum stress for the relationship $\sigma_c - \varepsilon_c$;
 $p = 3,0$.

For high strength concrete the relationship $\sigma_c - \varepsilon_c$ within the range up to the maximum stress was assumed according to [9], but the values $f_c(\theta)/f_c(20^\circ\text{C})$ and $\varepsilon_{c1}(\theta)$ were taken according to tests results from [17]. Stress-strain relationship for the descending branch was assumed as for the normal strength concrete – equation (4), but with the value $p = 2,5$.

Results of calculations in the form of relationship: bending moment – axial force (interaction curves) for different fire duration time are presented in figure 4. For all analysed cases, with the increase in fire duration time (heating process) interaction curves $M_u - N_u$ are subjected to „shrinkage” and deformation in shape.

Presented methods lead to the similar results only for cross-sections under bending moment without the presence of axial force. The differences between individual methods are clearly visible for the cases of bending with axial force, especially for high strength concretes. Then the differences in results

between incremental-iterative approach and boundary isotherm method may reach even 40%. Significant differences in results obtained by 500°C isotherm method for high strength concretes may be compensated to some extent by modification of the numerical value of the boundary isotherm in calculations taking values lower than 500°C (as the high strength concretes are characterized with faster reduction in strength with temperature than normal strength concretes), that is specified in [2].

Methods based on the effective (reduced) cross-section in terms of the code [2] may be treated as reliable only for the case of bending and for normal strength concretes. With the presence of the axial force, especially for high strength concretes, load bearing capacities determined for the fire conditions may be significantly under- or over-estimated. This applies mainly to 500°C isotherm method.

New code EN 1992-1-2:2023

For some time there has been going on the process of preparation of the new European codes. The project of the code EN 1992-1-2:2023 [18] related to the fire design of concrete structures constitutes one of such documents. It was prepared

$$\sigma_c(\varepsilon_c, \theta) = f_c(\theta) \cdot 10^{-p \left(1 - \frac{\varepsilon_{c1}(\theta)}{\varepsilon_c}\right)^2} \quad \varepsilon_c > \varepsilon_{c1}(\theta) \quad (4)$$

gdzie:

$\varepsilon_{c1}(\theta)$ – odkształcenie przy maksymalnym naprężeniu w przypadku $\sigma_c - \varepsilon_c$;
 $p = 3,0$.

W przypadku betonu wysokiej wytrzymałości (BWW) zależność $\sigma_c - \varepsilon_c$ w zakresie do maksymalnego naprężenia przyjęto wg [9], ale wartości $f_c(\theta)/f_c(20^\circ\text{C})$ oraz $\varepsilon_{c1}(\theta)$ zostały określone wg [17]. Zależność naprężenie-odkształcenie w części opadającej przyjęto jak w przypadku betonu zwykłej wytrzymałości – równanie (4), ale dla wartości $p = 2,5$.

Wyniki obliczeń zależności moment zginający-siła podłużna (krzywe interakcji) w przypadku różnego czasu trwania pożaru przedstawiono na rysunku 4. Wraz ze wzrostem czasu trwania pożaru (nagrzewania) krzywe interakcji $M_u - N_u$ podlegają „skurczeniu” i deformacji.

Prezentowane metody prowadzą do podobnych wyników przekrojów poddanych działaniu momentu zginającego bez udziału siły podłużnej. Różnice pomiędzy poszczególnymi metodami widoczne są w przypadkach występowania siły podłużnej, szczególnie w przypadku betonów wysokiej wytrzymałości (BWW). Różnice pomiędzy

metodą przyrostowo-iteracyjną i metodą izotermi 500°C wynoszą wtedy nawet 40%. Znaczne różnice w wynikach betonów wysokiej wytrzymałości (BWW) uzyskiwanych metodą izotermi 500°C mogą być w pewnym stopniu skompensowane przez przyjęcie w obliczeniach niższego niż 500°C poziomu izotermi granicznej (betony BWW charakteryzują się szybszą redukcją wytrzymałości na ściskanie wraz z przyrostem temperatury niż betony zwykłe), co określono w [2].

Metody bazujące na efektywnym (zredukowanym) przekroju w ujęciu normy [2] można traktować jako rzetelne tylko w przypadku zginania bez udziału siły podłużnej i betonów zwykłej wytrzymałości. Szczególnie w przypadku BWW i występowaniu siły podłużnej nośność na poziomie przekrojów określona dla warunków pożarowych może być niedoszacowana lub przeszacowana. Dotyczy to przede wszystkim metody izotermi 500°C.

Nowa norma EN 1992-1-2:2023

Od pewnego czasu prowadzone są prace nad przygotowaniem nowych norm europejskich. Jedną z nich jest EN 1992-1-2: 2023 [18], dotycząca projektowania konstrukcji z betonu z uwagi na bezpieczeństwo pożarowe. Została ona

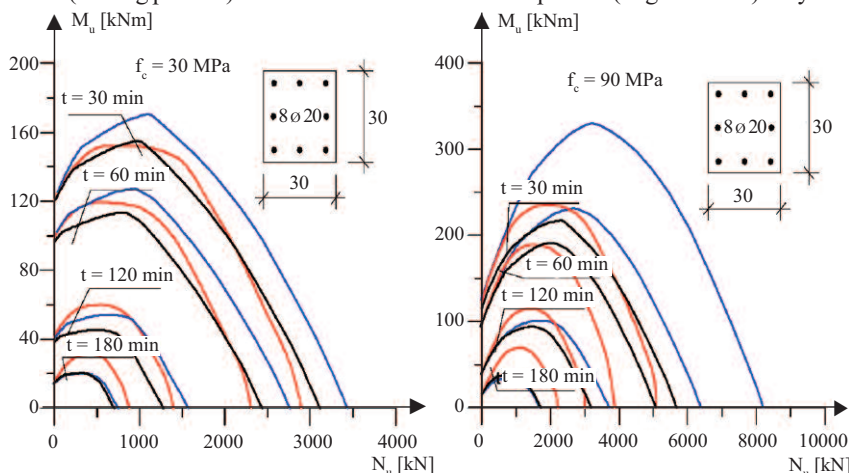


Fig. 4. $M_u - N_u$ interaction curves for the analysed methods: incremental-iterative – red line; 500°C isotherm – blue line; zone – black line

Rys. 4. Krzywe interakcji $M_u - N_u$ w przypadku analizowanych metod: przyrostowo-iteracyjnej – linia czerwona; izotermi 500°C – linia niebieska; stref – linia czarna

by the Technical Committee CEN/TC 250 „Structural Codes” and at the latest by the August 2027 this code [18] should gain the status of the national code, and all codes contradictory to [18] should be withdrawn from use till March 2028. The major changes in comparison to the previous version of the code PN-EN 1992-1-2:2004 [2] include: improving the simplified calculation methods and updating the requirements in tabulated data (in order to ensure the consistency between tabulated data, simplified and advanced methods of calculation) as well as introducing the simplified analytical formula for determining the temperature distributions in cross-sections.

Within the frame of thermal analysis, being the inevitable element of application the calculation methods for verification of fire resistance, new code [18] provides relatively simple formulas for determining the temperature distribution for different cases of fire action onto the structural concrete elements: basic formula – for fire action from one side (walls, slabs); for fire actions from two opposite sides (walls, slabs); for fire actions from three or all four sides.

In relation to simplified methods of calculations on the cross-sectional level, this was resigned from method of the boundary isotherm and zone method. But reduced cross-section dimensions that are used in new formulas are to be determined according to the new code [18] similarly to the provisions of the previous code [2]. In the new code [18] there are included and formulated separately the simplified methods for the case of bending (beams, slabs) and for bending with axial force (columns). As a simplified calculation for beams there was maintained the approach from the code [2], but the more refined method, based on the reduced cross-section and reduced values for material properties as a function of temperature, finally operates with the values of resultant forces in compressive and in tensile zones which are the basis for load bearing capacity calculation and as a consequence – for determining the level of fire resistance for cross-section.

It seems that the resignation from the use of boundary isotherm method is justified – in many cases (for bending with axial force and for high strength concretes) calculation results could differ quite significantly from more refined methods (figure 4).

According to [18] in fire situation it is always necessary to take into account the second order effects for columns. During the fire action the damages of the external layers and reduction of elasticity modulus of concrete result in decrease in structural elements stiffness. Hence, second order effects for columns may be important in fire situation even if they may be ignored in normal temperature condition.

For the case of bending with axial force according to the new code [18] two methods may be applied: the basic one or refined – modified for fire conditions, but based on the assumptions of the nominal curvature [16]. Introduction of detailed regulations and provisions of the code [18] will be strictly connected with important changes in calculation and design procedures used for the analysis of concrete structures in fire conditions. From pure practical side, it would be then advisable to work out, in advance, the appropriate design aids within this frame.

opracowana przez Technical Committee CEN/TC 250 „Structural Codes” i najpóźniej do sierpnia 2027 r. powinna uzyskać status normy krajowej, a wszystkie krajowe normy sprzeczne z nią powinny zostać wycofane do marca 2028 r. Główne zmiany w stosunku do poprzedniej wersji PN-EN 1992-1-2: 2004 [2] obejmują m.in: udoskonalenie uproszczonych metod projektowych i uaktualnienie wymagań w danych tabelarycznych (w celu zapewnienia spójności pomiędzy danymi tabelarycznymi, uproszczonymi i zaawansowanymi metodami obliczeniowymi), a także wprowadzenie uproszczonych formuł analitycznych do określania rozkładu temperatury w przekroju.

W zakresie analizy termicznej, będącej nieodzownym elementem stosowania metod obliczeniowych weryfikacji odporności ogniowej, nowa norma [18] podaje relatywnie proste formuły do ustalania rozkładu temperatury w różnych przypadkach oddziaływania pożarowego na betonowe elementy konstrukcyjne: ogień z jednej strony (ściany, płyty); ogień z dwóch przeciwległych stron (ściany, płyty); ogień z trzech lub ze wszystkich czterech stron.

W odniesieniu do uproszczonych metod obliczeniowych na poziomie przekroju zrezygnowano z metody izotermi granicznej i metody stref. Wymiary przekroju zredukowanego, wykorzystywane w nowych formułach obliczeniowych, ustala się wg [18] podobnie jak w przypadku metody stref wg normy [2]. W nowej normie [18] sformułowano osobno metody uproszczone dla przypadku zginania (belki, płyty) i zginania z siłą podłużną (słupy). W przypadku belek podtrzymano jako obliczenia uproszczone podejście zawarte w normie [2], natomiast metoda bardziej dokładna, która bazuje na przekroju zredukowanym i zredukowanej wytrzymałości materiałów w funkcji temperatury, ostatecznie operuje wartościami wypadkowych sił wewnętrznych w strefie ściskanej i rozciąganej, które są podstawą do określenia nośności i w konsekwencji – ustalenia poziomu odporności ogniowej przekroju.

Wydaje się, że rezygnacja z metody izotermi granicznej ma swoje uzasadnienie – w wielu przypadkach (dla zginania z siłą podłużną oraz betonów wysokiej wytrzymałości) wyniki obliczeń odbiegały od rezultatów bardziej dokładnych metod (rysunek 4).

Zgodnie z [18] w sytuacji pożarowej dla słupów należy zawsze uwzględniać efekty drugiego rzędu. W warunkach pożarowych uszkodzenia warstw zewnętrznych wskutek działania wysokiej temperatury pożarowej oraz spadek modułu sprężystości warstw wewnętrznych powodują redukcje sztywności elementów konstrukcyjnych. Stąd, efekty drugiego rzędu w warunkach pożarowych mogą być istotne, nawet jeśli w warunkach zwykłej temperatury są pomijane.

W przypadku zginania z siłą podłużną można stosować dwie metody [18]: podstawową lub udoskonaloną – zmodyfikowaną dla warunków pożarowych, ale bazującą na założeniach nominalnej krzywizny [16]. Wprowadzenie szczegółowych regulacji normy [18] będzie wiązać się z poważnymi zmianami w procedurach obliczeniowych i projektowych stosowanych w analizie konstrukcji żelbetowych w warunkach pożarowych. Od strony czysto praktycznej wskazane byłoby opracowanie, ze stosownym wyprzedzeniem, odpowiednich pomocy projektowych w tym zakresie.

Summary

Analysis of reinforced concrete elements subjected to the action of high temperature may be carried out with the application of different methods, with different level of accuracy and complexity. On the simplest level there are used descriptive methods in the form of tabulated data, but only for cases strictly defined by the code PN-EN 1992-1-2 [2]. Such approach was maintained as a rule in the new code [18]. On the other hand, in the last years there have been observed significant progress in elaborating more refined and advanced design methods for RC elements in fire situation, taking advantage of modern computer tools and advanced material models.

Simplified calculation methods for determination of the load bearing capacity for cross-sections subjected to the action of fire for the load case (bending moment + axial force) are located in between those two extreme approaches. Despite the advanced thermal and mechanical models for the analysis of RC elements (or the whole structure) in fire conditions, there is still a strong need for developing and improving the simplified methods for typical cases. Such methods should enable engineers to control the design process and constitute the tool for the initial design of complex and non-typical structures.

The consequence of the process of improving methods for structural analysis, also in fire conditions, is introduction of several significant changes in simplified methods for RC structures design in fire conditions in the new code [18]. The simplest calculation methods given in the previous code [2] were deleted from the text of the new code [18] – more detailed approach was introduced and it was coupled with new formula for determining the temperature profiles as well as with modification of the general analysis methods for normal temperature conditions (cross-sections subjected to the action of bending moment and axial force – method for nominal curvature and model column method).

Received: 28.08.2024

Revised: 01.10.2024

Published: 20.12.2024

Literatura

- [1] PN-EN 1991 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru, 2006.
- [2] PN-EN 1992 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-2: Projektowanie z uwzględnieniem bezpieczeństwa pożarowego, 2004.
- [3] Tan KH, Tang CY. Interaction formula for reinforced concrete columns in fire conditions. *ACI Structural Journal*. 2004; 101 (1): 19 – 28.
- [4] Dotreppe J-C, Fransen JM, Vanderzeypen Y. Calculation methods for design of reinforced concrete columns under fire condition. *ACI Structural Journal*. 1999; 96 (1): 9 – 18.
- [5] Franssen J-M, Dotreppe J-C. Fire tests and calculation methods for circular concrete columns. *Fire Technology*. 2003; 39 (1): 89 – 97.
- [6] Tan KH, Yao Y. Fire resistance of reinforced concrete columns subjected to 1-, 2-, and 3-face heating. *Journal of Structural Engineering*. 2003; 130 (11): 1820 – 1828.
- [7] Di Capua D, Mari AR. Nonlinear Analysis of reinforced concrete cross-sections exposed to fire. *Fire Safety Journal*. 2007; 42: 139 – 149.
- [8] Faria R, Xavier HF, Real PV. Simplified procedure for shear failure assessment of RC framed structures exposed to fire. *Proceedings of the Sixth International Conference „Structures in Fire”*, Editors – Kodur V. K. R., Franssen J.-M., DEStech Publications, Inc., USA, 2010, ISBN 978-1-60595-027-3, 197 – 205.

Podsumowanie

Analiza elementów żelbetowych poddanych działaniu pożaru może być przeprowadzona z wykorzystaniem różnych metod, o różnej dokładności i stopniu komplikacji. Na najprostszym poziomie stosowane są metody opisowe w postaci danych tabelarycznych, ale tylko w przypadkach określonych przez PN-EN 1992-1-2 [2]. Takie podejście podtrzymało również co do zasady w nowej normie [18]. Z drugiej strony, w ostatnich latach zaobserwowano znaczny postęp w opracowywaniu coraz doskonalszych i bardziej zaawansowanych metod projektowania elementów żelbetowych w sytuacji wyjątkowej pożaru, wykorzystujących współczesne narzędzia komputerowe i zaawansowane modelowanie materiałowe.

Uproszczone metody obliczeniowe określania nośności przekrojów żelbetowych poddanych działaniu pożaru dla przypadku obciążeniowego moment zginający + siła podłużna lokują się pomiędzy tymi dwoma skrajnymi podejściami. Pomimo zaawansowanych termicznych i mechanicznych modeli do analizy elementów żelbetowych (lub całej konstrukcji) w warunkach pożarowych, istnieje potrzeba rozwijania i doskonalenia uproszczonych metod analizy dla typowych przypadków. Powinny one umożliwiać inżynierom kontrolę procesu projektowania w warunkach pożarowych oraz stanowić narzędzie do wstępnego projektowania złożonych i nietypowych konstrukcji.

Konsekwencją procesu doskonalenia metod analizy konstrukcji, także w warunkach pożarowych, jest wprowadzenie wielu zmian w uproszczonych metodach obliczeniowych konstrukcji żelbetowych w warunkach pożarowych w nowej normie [18]. Zrezygnowano z najprostszych metod podanych w normie [2], wprowadzając dokładniejsze podejście i łącząc je z nowymi zaleceniami dotyczącymi określania profilu temperatury w przekrojach oraz modyfikacją ogólnych metod analizy w przypadku warunków temperatury zwykłej (przekroje poddane działaniu momentu zginającego i siły podłużnej – bazowanie na założeniach metody nominalnej krzywizny i słupa modelowego).

Artykuł wpłynął do redakcji: 28.08.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 01.10.2024 r.

Opublikowano: 20.12.2024 r.

- [9] Kodur VKR, Wang TC, Cheng FP. Predicting the fire resistance behavior of high strength concrete columns. *Cement & Concrete Composites*. 2004; 26 (2): 141 – 153.
- [10] fib Bulletin No. 46. *Fire Design of Concrete Structures – structural behavior and assessment*. Lausanne, Switzerland, April 2008.
- [11] Hertz KD. *Design of fire exposed concrete structures*. Technical Report no. 160, CIB W15/81/20 (DK). Technical University of Denmark, Lyngby, 1981.
- [12] Lennon T, Moore DB, Wang YC, Bailey CG. *Designer's guide to EN1991-1-2, EN1992-1-2, EN1993-1-2 and EN1994-1-2 – Handbook for the fire design of steel, composite and concrete structures to the Eurocode*. Thomas Telford. 2006, ISBN 978-0-7277-3157-9.
- [13] Chudyba K. *Weryfikacja odporności pożarowej elementów żelbetowych wg Eurokodów*. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2018, ISBN 978-83-7242-989-6.
- [14] Kowalski R. *Konstrukcje żelbetowe w warunkach pożarowych*. Wyd. Naukowe PWN, 2019.
- [15] Kodur VKR, Sultan MA. Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2003; 15 (2): 101 – 107.
- [16] PN-EN 1992 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Zasady ogólne i zasady dla budynków.
- [17] fib Bulletin No. 38: *Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling*. Lausanne, April 2007.
- [18] EN 1992-1-2: Eurocode 2: 2023. *Design of concrete structures – Part 1-2: Structural fire design*, November 2023.