

dr hab. inż. Krzysztof Chudyba, prof. PK¹⁾

ORCID: 0000-0001-8880-5222

Thermal analysis of concrete structures in fire situation

Analiza termiczna konstrukcji z betonu w warunkach pożarowych

DOI: 10.15199/33.2025.02.01

Abstract. The paper presents the questions of thermal analysis of concrete structures in fire situation. There are described general rules as well as practical methods for conducting thermal analysis. The basic recommendations and detailed informations included within this scope in the new code for fire design are also discussed, with special attention paid to the differences in comparison with the present code PN-EN 1992-1-2.

Keywords: concrete structures; fire actions; thermal analysis of structure.

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienie analizy termicznej konstrukcji z betonu w warunkach oddziaływania pożarowego. Podano ogólne zasady prowadzenia takiej analizy, a także opisano możliwe praktyczne sposoby jej realizacji. Skomentowano zalecenia i szczegółowe informacje zawarte w nowej normie do projektowania konstrukcji z betonu na warunki pożarowe, przedstawiając różnice w porównaniu z obecną normą PN-EN 1992-1-2.

Słowa kluczowe: konstrukcje z betonu; oddziaływanie pożarowe; analiza termiczna konstrukcji.

Conducting the thermal analysis for structure in fire situation means determination of temperature distribution for each point of structure as a function of fire duration time for a given fire scenario (temperature changes course in time). It constitutes an inevitable element of the process of verification of fire resistance with application of all calculation methods, both the simplified and advanced ones.

Real fire is characterized by variation in duration time, the increase rate of temperature as well as maximum temperature level reached, depending on many factors as: magnitude and geometry of the compartment, amount and distribution of flammable materials, ventilation conditions, thermal properties of the compartment surroundings, etc. In the codes for the fire safety design [1, 2], there are proposed several relationships for determining the fire temperature course as a function of time. The simplest approach within the frame of design practice is application of nominal fire curves – according to ISO 834, ASTM E119, hydro-carbon curve (HC) or for fire outside the building [1, 3 ÷ 7]. They are formulated as simple relationships providing the constant gas temperature within compartment as a function of time. Hence they describe the fully-developed fire. In literature they may also be found other propositions for standard curves – for ex.: Barnett [8] presented the conception of BFD curves, describing the temperature changes course according to logarithmic equation. All those relationships concern buildings or petrochemical objects (HC curve). It is worth mentioning that for the other engineering structures there are applied different formulas than nominal curves for fire analysis. In tunnels, where temperature increases are faster and maximum temperatures higher than for buildings, then may be used information included in Dutch (fire curve RWS – Rijkswaterstaat, worked out by Dutch Ministry of Transportation, based on tests conducted in 1979) or German regulations (heat curves according to guidelines for equipment

Przeprowadzenie analizy termicznej konstrukcji w warunkach pożarowych to określenie rozkładu temperatury w każdym jej punkcie w funkcji czasu trwania oddziaływania pożarowego w przypadku zadanego scenariusza pożarowego (przebiegu zmian temperatury w czasie). Stanowi niezbędny element procesu weryfikacji odporności pożarowej z zastosowaniem uproszczonych i zaawansowanych metod obliczeniowych.

Pożar rzeczywisty cechuje zmienność czasu trwania, szybkości przyrostu temperatury i 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. W normach do projektowania konstrukcji w warunkach pożarowych, np. [1, 2], znajduje się wiele zależności do określania przebiegu zmian temperatury pożarowej w funkcji czasu. Najprostszym podejściem w praktyce projektowej jest stosowanie krzywych nominalnych pożaru wg ISO 834, ASTM E119 oraz krzywej węglowodorowej (HC) lub pożaru zewnętrznego [1, 3 ÷ 7]. Sformułowane są one jako proste zależności, podające stałą temperaturę gazu w pomieszczeniu w funkcji czasu trwania pożaru. Opisują zatem w pełni rozwinięty pożar. W literaturze można napotkać także inne propozycje przyjmowania krzywych standardowych, np. Barnett [8] przedstawił koncepcję krzywych BFD, podających przebieg zmian temperatury za pomocą równania logarytmicznego. Wszystkie te zależności dotyczą budynków lub obiektów przemysłu petrochemicznego (krzywa węglowodorowa HC). Warto zwrócić uwagę, że w przypadku innych obiektów inżynierskich wykorzystuje się odmienne krzywe standardowe do analizy pożarowej. W tunelach, gdzie przyrost temperatury jest bardzo szybki, a osiągnięta maksymalna temperatura wyższa niż w budynkach, można wykorzystywać informacje podane w przepisach holenderskich (krzywa pożarowa RWS – Rijkswaterstaat, opracowana przez holenderskie Ministerstwo Transportu na podstawie wyników testów przeprowadzonych w 1979 r.) lub niemieckich (krzywa nagrzewania wg wytycznych dotyczących wyposażenia i eks-

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

and operation of road tunnels RABT-ZTV), or modification of HC curve [7].

Amongst the natural fires, there may be generally distinguished simplified models (zone or localised fires) or advanced ones (single zone, double zones, with the application of numerical fluid dynamics) [2, 3, 5]. Simplified fire models are based on specific physical parameters with the limited range of application. Gas temperature is recommended to specify on the base of physical parameters taking into account at least fire load density and ventilation conditions. Advanced models should generally account for: gas properties, mass and energy exchange. Fire load ought to take into consideration all flammable elements of the building equipment and structure, including linings, coverings and other finishing. In Fig. 1 there is presented schematically the comparison of courses for natural fires and for standard curve according to ISO 834, which is most commonly applied for typical analysis cases.

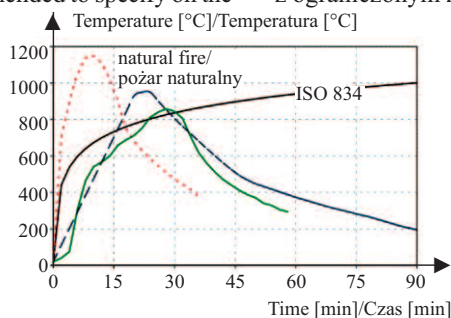


Fig. 1. Comparison of courses for natural fires (real fires) and standard ISO 834 temperature – time curve
Rys. 1. Porównanie przebiegu pożarów naturalnych (rzeczywistych) i standardowej krzywej temperatura – czas wg ISO 834

ploatacji tuneli drogowych RABT-ZTV) lub stosować zmodyfikowaną krzywą węglowodorową HC [7].

Wśród naturalnych modeli pożaru wyróżnić można modele uproszczone (pożary strefowe i zlokalizowane) oraz zaawansowane – jednostrefowe, dwustrefowe, z wykorzystaniem numerycznej dynamiki płynów [2, 3, 5]. Modele uproszczone bazują na specyficznych parametrach fizycznych z ograniczonym zakresem stosowania. Temperaturę gazu zaleca się określać na podstawie co najmniej takich parametrów fizycznych, jak gęstość obciążenia ogniowego i warunki wentylacji. Modele zaawansowane pożaru powinny natomiast uwzględniać właściwości gazu oraz wymianę masy i energii, a obciążenie ogniowe wszystkie elementy palne wyposażenia budynku i elementy palne konstrukcji, wliczając okładziny, wykładziny i inne materiały wykończeniowe. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie porównanie przebiegu pożarów naturalnych i krzywej standardowej według ISO 834, najczęściej przyjmowanej w typowych przypadkach analizy.

Thermal analysis for concrete structures

The basis for concrete structures analysis in fire conditions constitute the temperature distributions in elements that in general case may be determined by fire tests or calculated with taking into account the appropriate fire scenarios as well as thermal and physical parameters of concrete and reinforcing steel. For reinforced concrete structures, decisive role play geometrical dimensions and physical/thermal properties of concrete due to the ratio of concrete volume to reinforcing steel. While carrying out the thermal analysis, the presence of reinforcing steel in cross-section is thus usually ignored.

Physically, the heat transfer may be realized by few different ways: by conduction, convection and radiation (see: Fig. 2). In order to achieve the temperature field for the analysed element it is necessary to possess the knowledge of heat transfer differential equation. For fire situation, the heat exchange takes place through convection and radiation – then Fourier-Kirchhoff formula should be applied:

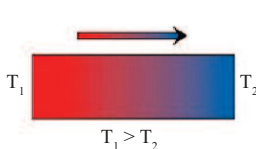
$$\frac{d\theta}{dt} \rho(\theta) c_p(\theta) = \nabla(\lambda(\theta)\nabla\theta) \tag{1}$$

where:

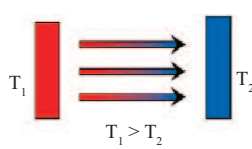
- ρ – volume density;
- c_p – specific heat;
- λ – heat conduction coefficient.

For thermal analysis of concrete structures – beside fire tests – the following approaches are used:

heat exchange by conduction/
wymiana ciepła przez przewodzenie



heat exchange by radiation/
wymiana ciepła przez promieniowanie



heat exchange by convection/
wymiana ciepła przez konwekcję

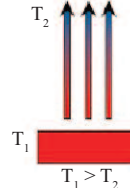


Fig. 2. Schemes of the heat exchange
Rys. 2. Schematy wymiany ciepła

Analiza termiczna konstrukcji z betonu

Podstawę do analizy konstrukcji z betonu w warunkach pożaru stanowi rozkład temperatury w elementach, które mogą być określane na podstawie testów (badania ogniowe) lub obliczane z uwzględnieniem odpowiednich scenariuszy pożarowych oraz przyjęcie właściwych wartości parametrów termicznych i fizycznych betonu oraz stali zbrojeniowej. W przypadku konstrukcji żelbetowych decydujące znaczenie mają wymiary geometryczne przekroju oraz parametry fizyczne/termiczne betonu ze względu na stosunek objętości betonu do stali zbrojeniowej. Przy wykonywaniu analizy termicznej pomija się zwykle obecność zbrojenia w przekroju.

Pod względem fizycznym, transport ciepła może być realizowany kilkoma sposobami: przez przewodzenie, konwekcję i radiację (rysunek 2). W celu uzyskania rozkładu pól temperatury w rozpatrywanym elemencie konieczna jest znajomość równania różniczkowego przewodzenia ciepła. W sytuacji pożarowej wymiana ciepła odbywa się przez konwekcję i radiację – zastosowanie znajduje wtedy równanie przewodzenia ciepła Fouriera-Kirchhoffa:

$$\frac{d\theta}{dt} \rho(\theta) c_p(\theta) = \nabla(\lambda(\theta)\nabla\theta) \tag{1}$$

gdzie:

- ρ – gęstość objętościowa;
- c_p – ciepło właściwe;
- λ – współczynnik przewodzenia ciepła.

Podczas analizy termicznej konstrukcji z betonu, oprócz badań ogniowych, stosowane są: obliczenia z wykorzystaniem programów MES; uproszczone metody/formu-

application of FEM programmes, simplified methods/formulas for temperature field estimation, codes design aids – for ex.: in the form of the attached temperature profiles for given fire scenario and cross-section dimensions. Application of computer programmes based on finite element method (FEM) while conducting the thermal analysis makes it possible to take into account several geometrical and material factors as well as different parameters of heat transfer mechanism and fire scenarios. Accuracy of obtained results of temperature distributions depends on though reliability of physical, thermal and material parameters introduced into the model. In Fig. 3, Fig. 4 there are presented examples of temperature distributions obtained from thermal analysis conducted with the application of FEM (numerical

analysis of temperature fields by programme ABAQUS 6.12-1). The analysis was carried out for the part of the frame (see: Fig. 3a) with cross-section dimensions for columns equal to 30 x 50 cm, made from concrete class C25/30 with silicate aggregate with volume density equal to 2400 [kg/m³]. In Fig. 3b there is also presented temperature distribution for the column cross-section for fire duration time equal to 90 minutes and for fire scenario according to ISO 834 standard curve.

ly szacowania pól termicznych; normowe pomoce projektowe, np. w postaci załączonych profili temperatury w przypadku konkretnych scenariuszy pożarowych i wymiarów przekrojów. Stosowanie programów bazujących na metodzie elementów skończonych (MES) pozwala na uwzględnienie wielu czynników geometrycznych i materiałowych, a także różnych parametrów mechanizmu przepływu ciepła oraz odmiennych scenariuszy pożarowych. Dokładność uzyskanych rezultatów rozkładu temperatury zależy jednak od wiarygodności i dokładności danych fizycznych, termicznych oraz materiałowych wprowadzonych do modelu. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono przykładowe rozkłady temperatury w przekroju elementów z betonu uzyskane przeze mnie z analizy termicznej wykonanej za pomocą MES (analiza numeryczna pól temperatury z wykorzystaniem programu ABAQUS 6.12-1). Analizie poddano fragment ramy (rysunek 3a) o wymiarach przekroju poprzecznego słupów: szerokość – 30 cm; wysokość – 50 cm, wykonanej z betonu C25/30 na kruszywie krzemianowym o gęstości objętościowej 2400 [kg/m³]. Na rysunku 3b podano również rozkład temperatury w przekroju słupa w czasie trwania oddziaływania pożarowego 90 min w przypadku krzywej standardowej wg ISO 834.

In Fig. 4 there are shown in turn the results obtained for the same case, but with taking into account two different fire scenarios: for ISO 834 and HC curve, for fire duration times equal to 30 and 90 minutes. In the conducted analysis, the influence of reinforcing steel in cross-section onto temperature field distributions was ignored. Thermo-physi-

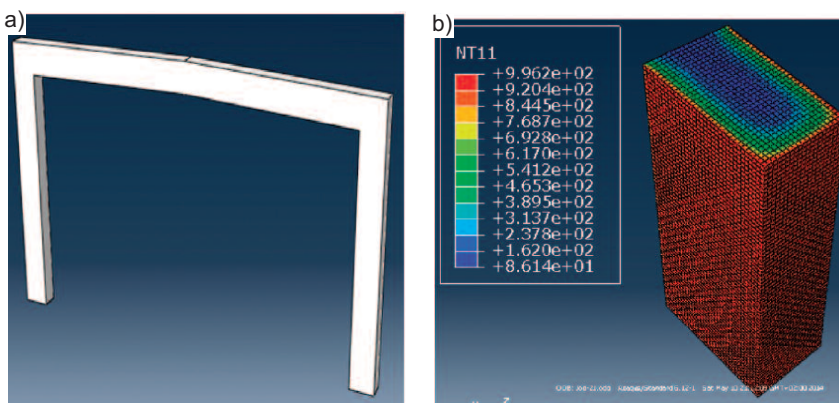


Fig. 3. Geometry of the analyzed frame (a) as well as the distribution of temperature (b) for fire duration time equal to 90 minutes (for standard ISO 834 curve, heat exchange by convection and radiation)

Rys. 3. Geometria analizowanej ramy (a) oraz wyniki rozkładu temperatury w słupie w czasie trwania oddziaływania pożarowego 90 min (krzywa standardowa temperatura – czas wg ISO 834, wymiana ciepła przez konwekcję i promieniowanie)

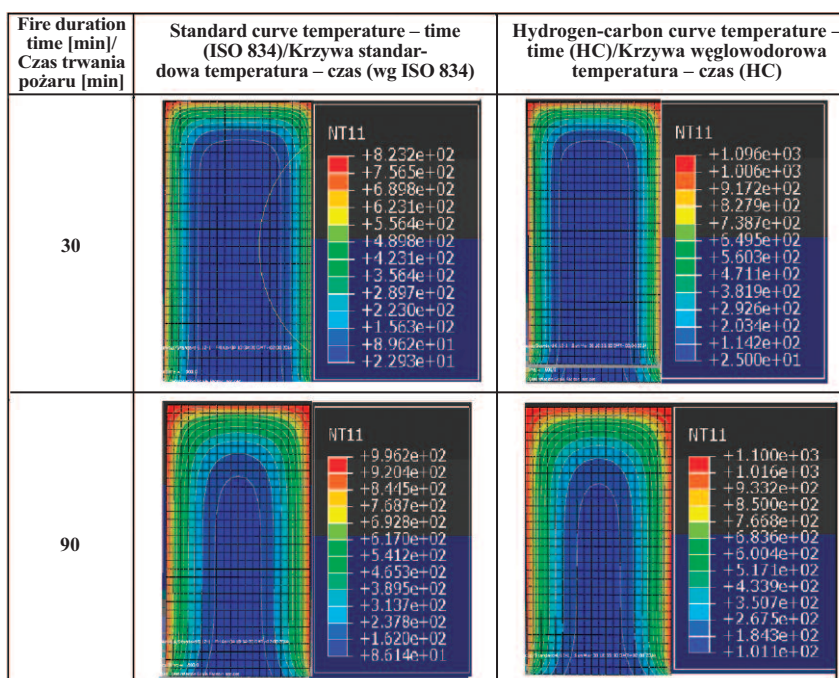


Fig. 4. Temperature distribution for column subjected to the action of fire from three sides for fire duration time 30 and 90 minutes (according to standard ISO curve and HC curve)

Rys. 4. Rozkład temperatury w słupie poddanym działaniu ognia z trzech stron w czasie oddziaływania pożarowego 30 i 90 min (wg krzywej standardowej ISO834 i krzywej węglowodorowej HC)

W analizie pominięto wpływ zbrojenia na rozkład pól

W analizie pominięto wpływ zbrojenia na rozkład pól

cal properties for concrete were taken based on PN-EN 1992-1-2 [2]. It was assumed that the analyzed column was heated from three sides and on the fourth one the constant temperature equal to 20°C was taken as well as the value of heat transfer coefficient by convection equal to 4 W/(m²K) according to PN-EN 1991-1-2 [1] was used.

For the purposes of conducting the thermal analysis there may be also applied the simplified calculation equations, for ex. modified Wickstrom’s formulas for estimating the temperature fields [9]. The assumptions made for this method are the following:

- the influence of steel onto temperature distribution in cross-section is ignored (assumption commonly applied for reinforced concrete structures analysis);
- cross-section is heated according standard ISO 834 curve;
- heat exchange is realized by convection (q_k) and radiation (q_R).

While using this method, few possible cases are considered (Fig. 5).

Case 1D:

$$\theta(z, t) = c_1 \eta(z, t) a t^n \quad (2)$$

$$\eta(z, t) = a_1 \ln(t/z^{1.5}) + a_2 z^{1/2} + a_3 \quad (3)$$

where:

t [h], z [m];
 a = 935; n = 0,168;
 a₁ = 0,155;
 a₂ = -0,348; a₃ = -0,371

- c₁ = 1,00 – normal strength concrete (NSC) on carbonate aggregate,
- c₁ = 1,01 – high strength concrete (HSC) on carbonate aggregate,
- c₁ = 1,12 – concrete on silicate aggregate (both NSC and HSC).

Case 2D:

$$\theta(y, z, t) = c_2 [b_1 \eta(y, t) \eta(z, t) + b_2 (\eta(y, t) + \eta(z, t)) + b_3] a t^n \quad (4)$$

$$\eta(y, t) = a_1 \ln(t/y^{1.5}) + a_2 y^{1/2} + a_3;$$

$$\eta(z, t) = a_1 \ln(t/z^{1.5}) + a_2 z^{1/2} + a_3 \quad (5)$$

where:

t [h]; y, z [m];
 b₁ = -1,481; b₂ = 0,985; b₃ = 0,017;
 c₂ = 1,00 – normal strength concrete (NSC) on carbonate aggregate;
 c₂ = 1,06 – high strength concrete (HSC) on carbonate aggregate,
 c₂ = 1,12 – normal strength concrete (NSC) on silicate aggregate,
 c₂ = 1,20 – high strength concrete (HSC) on silicate aggregate.

In the code PN-EN 1992-1-2 [2] there are included, for some selected cross-section dimensions, for different structural element types (beams, slabs, columns) and required fire resistance levels, examples of temperature profiles that may be directly used for calculation analysis. These profiles are given for elements made on silicate aggregates and for standard fire curves. It is assumed that they constitute the safe estimations for most of other aggregates.

All temperature profiles presented in [2] concern the case of fire action from all four sides of cross-section. Due to the symmetry of temperature distribution for such situation, there are given only quarters of the whole cross-sections in

temperatury w przekroju poprzecznym rozpatrywanego elementu. Właściwości termofizyczne betonu przyjęto na podstawie PN-EN 1992-1-2 [2]. Założono, że analizowany słup jest ogrzewany z trzech stron, natomiast na czwartej założono stałą temperaturę otaczającego powietrza równą 20°C oraz stałą wartość współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję wynoszącą 4 W/(m²K) zgodnie z PN-EN 1991-1-2 [1].

Do celów prowadzenia analizy termicznej mogą być także stosowane przybliżone wzory obliczeniowe, np. zmodyfikowane formuły Wickstroma do szacowania pól termicznych [9]. Założenia przyjęte w tej metodzie są następujące:

- nie uwzględnia się wpływu stali na rozkład temperatury w przekroju (założenie powszechnie przyjmowane w analizie konstrukcji żelbetowych);
- przekrój jest ogrzewany wg krzywej standardowej ISO 834;
- wymiana ciepła następuje przez konwekcję (q_k) i radiację (q_R).

Przy zastosowaniu tej metody rozważa się kilka możliwych przypadków (rysunek 5).

Przypadek 1D:

$$\theta(z, t) = c_1 \eta(z, t) a t^n \quad (2)$$

$$\eta(z, t) = a_1 \ln(t/z^{1.5}) + a_2 z^{1/2} + a_3 \quad (3)$$

gdzie:

t [h], z [m];
 a = 935; n = 0,168;
 a₁ = 0,155; a₂ = -0,348;
 a₃ = -0,371

- c₁ = 1,00 – beton zwykły na kruszywie węglanowym;
- c₁ = 1,01 – beton wysokiej wytrzymałości (BWW) na kruszywie węglanowym;
- c₁ = 1,12 – beton na kruszywie krzemianowym (zwykły i BWW).

Przypadek 2D:

$$\theta(y, z, t) = c_2 [b_1 \eta(y, t) \eta(z, t) + b_2 (\eta(y, t) + \eta(z, t)) + b_3] a t^n \quad (4)$$

$$\eta(y, t) = a_1 \ln(t/y^{1.5}) + a_2 y^{1/2} + a_3;$$

$$\eta(z, t) = a_1 \ln(t/z^{1.5}) + a_2 z^{1/2} + a_3 \quad (5)$$

gdzie:

t [h]; y, z [m];
 b₁ = -1,481; b₂ = 0,985; b₃ = 0,017;
 c₂ = 1,00 – beton zwykły na kruszywie węglanowym;
 c₂ = 1,06 – beton wysokiej wytrzymałości (BWW) na kruszywie węglanowym;
 c₂ = 1,12 – beton zwykły na kruszywie krzemianowym;
 c₂ = 1,20 – beton wysokiej wytrzymałości (BWW) na kruszywie krzemianowym.

W normie PN-EN 1992-1-2 [2] zamieszczono przykładowe profile temperatury konkretnych wybranych wymiarów przekroju, różnych typów elementów konstrukcyjnych (belek, płyt, słupów) i różnych wymaganych poziomów odporności ogniowej, które mogą być wprost zastosowane do analizy obliczeniowej. Profile te mogą być użyte do określania temperatury w przekrojach elementów betonowych na kruszywie krzemianowym, przy działaniu standardowego pożaru. Przyjmuje się, że stanowią one oszacowanie po stronie bezpiecznej w przypadku wielu innych kruszyw.

Wszystkie zamieszczone w [2] profile temperatury dotyczą przypadku działania ognia z czterech stron przekro-

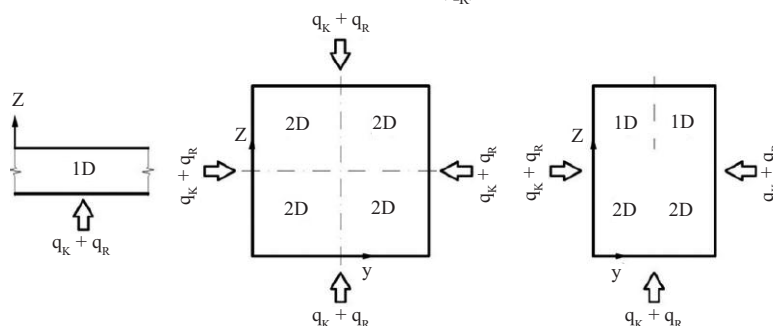


Fig. 5. General notations for 1D and 2D zones in method for temperature field estimation [9]

Rys. 5. Ogólne oznaczenia obszarów 1D i 2D w metodzie szacowania pól temperatury wg [9]

appropriate figures – example of such profile for the circular cross-section is presented in Fig. 6. Values of temperatures for profiles were determined based on assuming thermal concrete properties according to PN-EN 1992-1-2 [2]. Emmissivity coefficient equal to 0,56 was taken in compliance with PN-EN 1991-1-2 [1], while convection coefficient for uncovered concrete surface was assumed as $a_c = 25$ [W/m²K]. Examples of application of these methods for practical issues concerning verification of fire resistance for reinforced concrete structural elements may be found in the national literature [10, 11].

New code EN 1992-1-2:2024

Project of the new code EN 1992-1-2:2023 [12] for fire design of concrete structures was elaborated within the frame of process of preparation of new generation of European codes. At the latest by 2027 this code [12] should gain the status of national code and all codes contradictory to [12] should be withdrawn by March 2028.

The changes implemented into document [12] in comparison with the current version PN-EN 1992-1-2:2004 [2] include – among the others – introduction of the simplified analytical formulas for determination of temperature distribution/profiles in elements instead of posted earlier profiles for specified cross-sections. These information are given in point titled “Simplified design methods” and cover different load cases (fire from one side, from more than one side). However, no changes were made in the new code [12] contents as to the method and details of determining thermal/physical properties of concrete.

The basic solution is the case of fire action from one side only (walls, slabs). Then, the minimum thickness of the element is also given for which these formulas may be applied (from value 60 mm for R30 up to the value of 200 mm – for R240). The temperature field may be calculated from equation:

$$\theta(x, t) = \theta_1(x, t) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6)$$

Temperature increase during the fire as a function of coordinate x may be expressed as:

$$\theta_1(x, t) = 345 \cdot \lg_{10} \left(\frac{7(t-\Delta t)}{60} + 1 \right) \cdot \exp \left(-x \sqrt{\frac{k}{t}} \right) \quad (7)$$

where

t – duration of the standard fire (in seconds), $t \geq 1800$ [s];

x – distance from the exposed surface [m];

$\Delta t = 720$ s – represents the delay between the temperature in the fire compartment and the concrete surface as an approximation of the effects of convection and radiation, $k = 3 \times 10^6$ s/m².

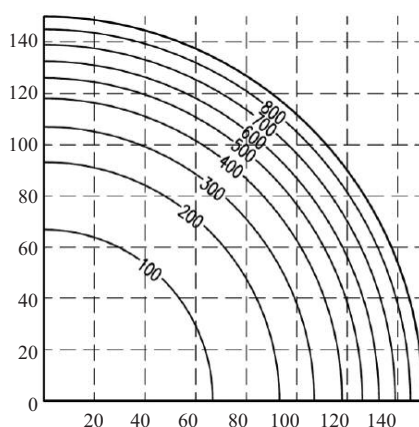


Fig. 6. Example of temperature profile for circular cross-section according to [2] – cross-section diameter 300 mm, fire duration time 60 min

Rys. 6. Przykładowy profil temperatury w przypadku przekroju kołowego wg [2] – średnica przekroju 300 mm, czas trwania pożaru standardowego 60 minut

ju. Ze względu na symetrię rozkładu temperatury przy takim oddziaływaniu pożaru podano profile temperatury dla jednej ćwiartki całego przekroju – przykładowe profile w przypadku przekroju kołowego pokazano na rysunku 6. Wartości temperatury profili określone zostały przy przyjęciu właściwości termicznych betonu podanych w PN-EN1992-1-2 [2]. Zgodnie z normą PN-EN 1991-1-2 [1] przyjęto współczynnik emisji 0,56, natomiast współczynnik konwekcji na powierzchni nieosłoniętej betonu $a_c = 25$ [W/m²K.]. Przykłady aplikacji tych metod do weryfikacji odporności ogniowej żelbetonowych elementów konstrukcyjnych można znaleźć w literaturze krajowej [10, 11].

Nowa norma EN 1992-1-2:2024

Projekt nowej normy EN 1992-1-2:2023

[12], dotyczącej projektowania konstrukcji z betonu ze względu na bezpieczeństwo pożarowe, został opracowany w ramach procesu przygotowywania nowej generacji norm europejskich. Najpóźniej do sierpnia 2027 r. norma [12] powinna uzyskać status normy krajowej, a wszystkie krajowe normy, które są z nią sprzeczne, muszą zostać wycofane do marca 2028 r.

Zmiany wprowadzone w normie [12] w porównaniu z poprzednią wersją, czyli normą PN-EN 1992-1-2:2004 [2], obejmują m.in. wprowadzenie uproszczonych formuł analitycznych do określania rozkładów/profilu temperatury w elementach zamiast zamieszczonych wcześniej profili temperatury wybranych przekrojów. Informacje te podane zostały w punkcie „Uprozczone metody projektowania” i obejmują różne przypadki obliczeniowe (oddziaływanie pożaru z jednej strony oraz z więcej niż jednej strony). W zapisach nowej normy [12] nie dokonano natomiast żadnych zmian dotyczących sposobu i szczegółów ustalania właściwości termicznych/fizycznych betonu.

Rozwiązaniem podstawowym jest działanie ognia z jednej strony (ściany, płyty). Podaje się wtedy dodatkowo minimalną grubość elementu do stosowania formuł normowych w przypadku działania ognia z jednej strony (od wartości 60 mm przy R30 do wartości 200 mm przy R240). Przyrost temperatury w czasie oddziaływania pożarowego wynosi:

$$\theta(x, t) = \theta_1(x, t) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6)$$

Rozkład temperatury, w funkcji współrzędnej x wraz z czasem trwania oddziaływania pożarowego, można określać wg zależności:

$$\theta_1(x, t) = 345 \cdot \lg_{10} \left(\frac{7(t-\Delta t)}{60} + 1 \right) \cdot \exp \left(-x \sqrt{\frac{k}{t}} \right) \quad (7)$$

gdzie:

t – czas trwania pożaru standardowego, $t \geq 1800$ [s];

x – odległość od powierzchni nagrzewanej [m];

$\Delta t = 720$ s – określa opóźnienie czasowe pomiędzy temperaturą w pomieszczeniu i na powierzchni elementu jako wynik aproksymacji efektów konwekcji i promieniowania, $k = 3 \times 10^6$ s/m².

For fire action on two opposite surfaces (walls, slabs) the temperature increase in a concrete member may be calculated as:

- for vertical element (wall)

$$\theta_2(y, t) = \theta_1(y, t) + \theta_1(b - y, t) \quad (8)$$

- for horizontal element (slab)

$$\theta_2(z, t) = \theta_1(z, t) + \theta_1(h - z, t) \quad (9)$$

where:

values of θ_1 may be determined from formula (7).

Finally, for such situation temperature distribution is:

- for vertical element (wall)

$$\theta(y, t) = \theta_2(y, t) + 20^\circ\text{C} \quad (10)$$

- for horizontal element (slab)

$$\theta(z, t) = \theta_2(z, t) + 20^\circ\text{C} \quad (11)$$

For fire action from all four sides, value of temperature at a given point of the cross-section with coordinates (y, z) for a specified moment in time t can be determined from the following relationships:

$$\theta(y, z, t) = \theta_2(y, t) + \theta_2(z, t) - \frac{\theta_2(y, t) \cdot \theta_2(z, t)}{\theta_1(0, t)} + \Delta\theta(y', z', t) + 20^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$\Delta\theta(y', z', t) = \left\{ 345 \cdot \lg_{10} \left(\frac{8t}{60} + 1 \right) - \theta_1(0, t) \right\} \cdot \frac{(a_c - y') \cdot (a_c - z')}{a_c^2} \quad (13)$$

where:

$a_c = 0,04$ m for fire duration time up to 60 min;

$a_c = 0,10$ – for fire duration time longer than 60 minutes.

Formula (12) may also be used for estimation of temperature in corners subjected to action of fire from two opposite sides. For fire action from three sides assuming $\Delta\theta(y', z', t)$ only for corners (y, z) = (0, 0) and (y, z) = (b, 0), where both sides adjoining to corner are subjected to fire action:

$$\theta(y, z, t) = \theta_2(y, t) + \theta_1(z, t) - \frac{\theta_2(y, t) \cdot \theta_1(z, t)}{\theta_1(0, t)} + \Delta\theta(y', z', t) + 20^\circ\text{C} \quad (14)$$

There is no information in the new code [12] or in other documents, for ex.: [13, 14], as to the bases of the applied relationships. There is only given for which values of physical and thermal parameters (emissivity coefficient, thermal conductivity, specific heat, concrete density, convection coefficient) presented equations are valid. No informations are also given as to the possible modifications of formulas due to aggregate type or level of concrete compressive strength (which includes for ex.: Wickstrom's simplified formula).

In Table 1 there are compared example of calculated values of temperatures obtained for the basic situation (fire action from one side only) for reinforced concrete slab with thickness equal to 200 mm with the application of formulas [2, 9, 12]. Temperatures were determined for the point located in a distance equal to 5 cm from the exposed surface. In Table 2 in turn, there were presented results of calculations for different formulas, but for the case of fire action from all four

Podczas działania ognia z dwóch przeciwległych stron (ściany, płyty), przyrost temperatury w czasie oddziaływania pożaru wynosi w przypadku elementu:

- pionowego (ściana)

$$\theta_2(y, t) = \theta_1(y, t) + \theta_1(b - y, t) \quad (8)$$

- poziomego (płyta)

$$\theta_2(z, t) = \theta_1(z, t) + \theta_1(h - z, t) \quad (9)$$

gdzie:

θ_1 określać można z formuły (7).

Ostatecznie, w takiej sytuacji rozkład temperatury wynosi w przypadku elementu:

- pionowego (ściana)

$$\theta(y, t) = \theta_2(y, t) + 20^\circ\text{C} \quad (10)$$

- poziomego (płyta)

$$\theta(z, t) = \theta_2(z, t) + 20^\circ\text{C} \quad (11)$$

Podczas działania ognia ze wszystkich czterech stron, wartość temperatury w danym punkcie przekroju elementu o współrzędnych (y, z) można określać w danej chwili czasu t z zależności:

$$\theta(y, z, t) = \theta_2(y, t) + \theta_2(z, t) - \frac{\theta_2(y, t) \cdot \theta_2(z, t)}{\theta_1(0, t)} + \Delta\theta(y', z', t) + 20^\circ\text{C} \quad (12)$$

$$\Delta\theta(y', z', t) = \left\{ 345 \cdot \lg_{10} \left(\frac{8t}{60} + 1 \right) - \theta_1(0, t) \right\} \cdot \frac{(a_c - y') \cdot (a_c - z')}{a_c^2} \quad (13)$$

gdzie:

$a_c = 0,04$ m w przypadku czasu oddziaływania pożarowego do 60 min;

$a_c = 0,10$ – przy czasie dłuższym niż 60 min.

Wzór (12) może być także stosowany do szacowania temperatury w narożnikach elementów poddanych działaniu ognia z dwóch przeciwległych stron. Natomiast podczas oddziaływania pożarowego z trzech stron, przyjmując $\Delta\theta(y', z', t)$, tylko w przypadku narożników (y, z) = (0, 0) i (y, z) = (b, 0), gdzie obie strony przylegające do narożnika są poddane działaniu ognia:

$$\theta(y, z, t) = \theta_2(y, t) + \theta_1(z, t) - \frac{\theta_2(y, t) \cdot \theta_1(z, t)}{\theta_1(0, t)} + \Delta\theta(y', z', t) + 20^\circ\text{C} \quad (14)$$

W nowej normie [12] oraz innych dokumentach, np. [13, 14] nie ma informacji lub powołań literaturowych o podstawach przyjętych zależności. Podano tylko, przy założeniu jakich wartości parametrów fizycznych i termicznych (współczynnik emisyjności, przewodnictwo cieplne, ciepło właściwe, gęstość betonu, współczynnik konwekcji) obowiązują podane wzory. Nie zamieszczono też informacji o możliwych modyfikacjach ze względu na rodzaj kruszywa czy poziom wytrzymałości betonu (co uwzględni np. uproszczona formuła Wickstroma).

W tabeli 1 zestawiono przykładowe wyniki porównania wartości temperatury uzyskane w sytuacji podstawowej (działanie ognia z jednej strony) w przypadku płyty żelbetonowej grubości 200 mm wg różnych formuł [2, 9, 12]. Wartości temperatury określono w odległości 5 cm od powierzchni nagrzewanej. W tabeli 2 pokazano temperaturę uzyskaną wg różnych opisanych formuł w przypadku

sides (square column with dimensions 30 x 30 cm, concrete on silicate aggregate) for the point in a cross-section located close to the corner within the distance 5 cm from the heated surfaces, for different fire duration time. Obtained results are for all analyzed cases very close with differences not exceeding 10 ÷ 15%.

Summary

Thermal analysis of concrete structures is an inevitable element in the procedure of verification of fire resistance with application of calculation methods (simplified, advanced). It is carried out for an assumed fire scenario, whereby for typical cases nominal curve temperature-time according to ISO 834 is commonly used. Accuracy and reliability of calculations depend on appropriate assumptions as the values of several material properties (physical, thermal) as well as parameters describing the heat flow phenomena. The influence of reinforcing steel in the elements cross-section onto temperature distribution is negligible, which constitutes commonly applied assumption made for the thermal analysis of reinforced concrete structures.

Temperature distributions in concrete elements may be determined on the base of tests (fire tests) or calculated – then different approaches may be used: application of FEM programmes, simplified formulas for temperature fields estimation, codes design aids (for ex.: in the form of attached temperature profiles for specified fire scenarios and cross-section dimensions). Depending on the applied method it is possible to take into account to different extent additional factors influencing the behavior of structural elements in fire conditions, such as: material composition of the concrete mix – especially the aggregate type; the level of the concrete compressive strength; concrete physical/thermal properties; assumed fire scenario – the course of the temperature in time; heating condition; parameters describing the heat flow process. All those elements may be most fully taken into account by the application of FEM programmes, but even for simplified formulas some of these factors may be introduced into calculation procedure.

Table 1. Comparison of temperatures obtained for different simplified formulas (slab with thickness 200 mm, fire from one side)

Tabela 1. Porównanie wartości temperatury uzyskanej w przypadku różnych formuł uproszczonych (płyta grubości 200 mm, ogień z jednej strony)

Values of temperature [°C]: at the distance 5 cm from external/heated surface/ Wartość temperatury [°C] w odległości 5 cm od powierzchni zewnętrznej/nagrzewanej					
Fire duration time [min]/ Czas trwania oddziaływania pożarowego [min]	30	60	90	120	180
Eq. (6) according to [12]/Wzór (6) wg [12]	110	220	305	380	470
According to [2]: silicate aggregate/Wg [2]: kruszywo krzemianowe	110	230	310	390	500
According to Wickstrom formula [9]: carbonate/silicate aggregate/ Wg formuły Wickstroma [9]: kruszywo węglanowe/krzemianowe	120/135	235/265	315/355	375/420	475/530

Table 2. Comparison of temperature obtained for different simplified formulas (column 30 x 30 cm, fire from all four sides)

Tabela 2. Porównanie wyników temperatury uzyskanej w przypadku różnych formuł uproszczonych (słup 30 x 30 cm, ogień ze wszystkich czterech stron)

Values of temperature [°C]: at the point close to corner, at the distance 5 cm from external/heated surfaces/ Wartość temperatury [°C]: w punkcie przy narożniku przekroju, w odległości 5 cm od powierzchni zewnętrznych/nagrzewanych			
Fire duration time [min]/ Czas trwania oddziaływania pożarowego [min]	60	120	180
Formulas according to [12]/Wzory wg [12]	575	675	840
According to [2]: silicate aggregate/Wg [2]: kruszywo krzemianowe	500	650	850
According to Wickstrom formula [9]: silicate aggregate/ Wg formuły Wickstroma [9]: kruszywo krzemianowe	545	655	800

działania ognia ze wszystkich czterech stron (słup kwadratowy o wymiarach 30 x 30 cm, beton zwykły na kruszywie krzemianowym) w punkcie przekroju przy narożniku, odległym o 5 cm od powierzchni zewnętrznych przekroju, w różnym czasie trwania oddziaływania pożaru. Uzyskane wyniki są we wszystkich analizowanych przypadkach bardzo zbliżone. Różnica wynosi nie więcej niż 10 ÷ 15%.

Podsumowanie

Analiza termiczna konstrukcji z betonu jest niezbędnym elementem w proce-

durze weryfikacji odporności ogniowej z zastosowaniem metod obliczeniowych (uproszczonych, zaawansowanych). Wykonywana jest w przypadku określonego scenariusza pożarowego, przy czym w typowych sytuacjach stosuje się powszechnie krzywą nominalną temperatura – czas wg ISO 834. Dokładność i rzetelność obliczeń zależy od właściwego przyjęcia wartości wielu parametrów materiałowych (fizycznych i termicznych) oraz opisujących zjawisko przepływu ciepła. Wpływ stali zbrojeniowej w przekroju na rozkład temperatury jest zaniebawany – jest to założenie powszechnie przyjmowane w analizie termicznej konstrukcji żelbetonowych.

Rozkład temperatury w elementach z betonu może być określany na podstawie testów (badania ogniowe) lub obliczany. Stosowane są wtedy różne metody: programy MES; uproszczone formuły szacowania pól termicznych; normowe pomoce projektowe, np. w postaci załączonych profili temperatury dotyczących konkretnych scenariuszy pożarowych i wymiarów przekrojów. W zależności od przyjętej metody możliwe jest uwzględnienie dodatkowych czynników, które wpływają na zachowanie elementów konstrukcyjnych w warunkach pożarowych takich, jak: skład materiałowy mieszanki betonowej, przede wszystkim rodzaj kruszywa; poziom wytrzymałości betonu; właściwości fizyczne/termiczne; założony scenariusz pożarowy – przebieg zmian temperatury w czasie; warunki nagrzewania; parametry opisujące proces wymiany ciepła. Najpełniej te wszystkie elementy można uwzględnić przy stosowaniu programów MES, ale nawet w formułach uproszczonych część z nich może zostać wprowadzona do wzorów obliczeniowych.

New code for fire design of concrete structures [12] introduces significant changes, in comparison with the currently used version PN-EN 1992-1-2: 2004 [2], within the range of temperature profiles determination for concrete elements. Appendix to the code [2] with temperature profiles for specified cross-sections was deleted. There were introduced new analytical formulas for determining temperature, with the fire action from one side (walls, slabs) as the basic solution case. However, in the text of the new code, there were maintained details of determination of concrete thermal/physical properties as for the current code version [2].

It is worth pointing that is difficult to conclude directly about the quantitative influence of differences in obtained values of temperature onto the final result of fire resistance of concrete structural element. Detailed temperature distribution in cross-sections directly determines within the subsequent steps in calculation procedures the levels of reduction for cross-section dimensions and material properties (for concrete and reinforcing steel). Finally, only the results of mechanical analysis of structure in fire conditions, that are based onto such parameters, make it possible to determine the level of fire resistance.

Received: 30.11.2024
Revised: 02.12.2024
Published: 21.02.2025

Nowa norma do projektowania konstrukcji z betonu w warunkach pożarowych [12] wprowadza istotne zmiany w porównaniu z aktualną wersją normy PN-EN 1992-1-2:2004 [2], w przypadku określania rozkładu temperatury w elementach z betonu. Zrezygnowano z załącznika normy [2] podającego profile temperatury dotyczące wybranych przekrojów. Wprowadzono uproszczone formuły analityczne do ustalania temperatury, przy czym jako rozwiązanie podstawowe podano przypadek działania ognia z jednej strony (płyty, ściany). Podtrzymano natomiast w zapisach nowej normy szczegóły ustalania właściwości termicznych/fizycznych betonu wg normy [2].

Należy podkreślić, że trudno jest bezpośrednio wnioskować o ilościowym wpływie różnic w ustalonych wartościach temperatury na ostateczny wynik odporności ogniowej elementu z betonu. Szczegółowe rozkłady temperatury w przekrojach będą bezpośrednio determinować poziom redukcji wymiarów przekroju oraz właściwości materiałowych (betonu i stali zbrojeniowej) w kolejnych krokach procedury obliczeniowej. Ostatecznie, to dopiero wyniki analizy mechanicznej w warunkach pożarowych, bazujące na tych parametrach, pozwolą określić poziom odporności ogniowej elementu.

Artykuł wpłynął do redakcji: 30.11.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.12.2024 r.
Opublikowano: 21.02.2025 r.

Literature

- [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] Anderberg Y. Fire scenarios and buildings, Proceedings of CISM Course on „Effect of heat on concrete”, 9 – 13 June, 2003, Udine, Italy.
- [4] ASTM E119: Standard Test Method for Fire Tests of Building Construction and Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- [5] Buchanan AH. Structural Design for Fire Safety. John Wiley & Sons, Ltd, 2006, ISBN 978-0-471 89060 7
- [6] fib Bulletin No. 54: Structural Concrete – Textbook on behaviour, design and performance, Lausanne, October 2010.
- [7] fib Bulletin No. 38: Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling, Lausanne, April 2007.

- [8] Barnett CR. Replacing international temperature-time curves with BFD curve. Fire Safety Journal. 2007; 42: 321 – 327.
- [9] Kodur VKR, Baolin Yu, Dwaikat MMS. A simplified approach for predicting temperature in reinforced concrete members exposed to standard fire. Fire Safety Journal. 2013; 56: 39 – 51.
- [10] Chudyba K. Weryfikacja odporności pożarowej elementów żelbetowych wg Eurokodów. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2018, ISBN 978-83-7242-989-6.
- [11] Kowalski R. Konstrukcje żelbetowe w warunkach pożarowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019.
- [12] EN 1992-1-2: Eurocode 2: 2023. Design of concrete structures – Part 1-2: Structural fire design, November 2023.
- [13] fib Bulletin No. 108: Performance-based fire design of concrete structures. State of the art report, Commission 2, task Group 2.3, Working Group 2.3.2, Lausanne, Switzerland, May 2023.
- [14] fib Bulletin No. 46: Fire Design of Concrete Structures – structural behavior and assessment. Lausanne, Switzerland, April 2008.