

Zasady projektowania konstrukcji żelbetowych uwzględniające odporność pożarową

Design principles of reinforced concrete structures taking into account their fire resistance

1. Wprowadzenie

W sytuacji pożaru beton cementowy jako materiał wykazuje szereg pozytywnych właściwości: jest niepalny, zazwyczaj nie emituje żadnych szkodliwych substancji, zapewnia dobrą izolacyjność termiczną i naturalną ochronę dla prętów zbrojeniowych w żelbetowych elementach konstrukcyjnych. Jednak podczas długotrwałego działania ognia na konstrukcję temperatura w betonie stopniowo wzrasta, powodując odkształcenia termiczne składników betonu, parowanie wilgoci i spowodowany tym przyrost ciśnienia w porach. Zjawiska te powodują generalnie pogorszenie wszystkich właściwości mechanicznych betonu. Sytuacja pożaru wprowadza wysokie gradienty temperatury, a w wyniku tego rozgrzane do wyższej temperatury warstwy powierzchniowe wykazują tendencję do oddzielania się i odłupywania od chłodniejszego wnętrza elementu.

W przypadku działania ognia na konstrukcje formułuje się następujące ogólne wymagania:

- uniknięcie przedwczesnego zawalenia się konstrukcji – funkcja nośności,
- ograniczenie rozprzestrzeniania się ognia (płomień, gorące gazy, nadmierna temperatura) poza wyznaczone obszary – funkcja separacyjna (oddzielająca).

Należy podkreślić, że określenia szczegółowych wymagań odporności ogniowej (w odniesieniu do nośności i/lub funkcji separacyjnej – R , EI , REI) dla żelbetowych elementów konstrukcyjnych budynków dokonuje się w oparciu o przepisy krajowe (1), natomiast weryfikacja tak ustalonych wymagań odbywa się w oparciu o odpowiednie przepisy normowe - dla konstrukcji z betonu właściwą normą jest PN-EN 1992-1-2 (2).

Proces projektowania konstrukcji uwzględniający warunki pożarowe obejmuje następujące etapy:

- wybór właściwego scenariusza pożaru, czyli przebiegu zmian temperatury w czasie trwania oddziaływania pożarowego,
- ustalenie rozkładu temperatury w poszczególnych punktach elementów konstrukcyjnych w funkcji czasu dla przyjętego scenariusza pożarowego (analiza termiczna),

1. Introduction

In fire situation cement concrete as a structural material indicates several positive features: it is non-flammable, usually does not emit any harmful substances, provides good thermal insulation and natural protection for reinforcing bars in reinforced concrete structural elements. However, with long-term action of fire onto the structure the temperature in concrete gradually increases, causing thermal strains of concrete components, moisture evaporation and resulting pressure increase in pores. These phenomena generally result in deterioration of all concrete mechanical properties. Fire situation introduces high temperature gradients and as a result of this effect surface layers heated to the higher temperatures indicate a tendency to separate from the cooler inner parts of the element.

In the case of fire action onto the structure there are formulated the following general requirements:

- avoiding the pre-mature failure of the structure – load-bearing function,
- limitation of fire spread (flames, hot gases, excessive temperature) outside the determined zones – separating function.

It is worth underlying that determination of detailed requirements for fire resistance (in relation to load-bearing and/or separating functions - R , EI , REI) for reinforced concrete structural elements is carried out on the base of national regulations (1), while the verification of established requirements is made according to appropriate standards - for concrete structures the proper code is PN-EN 1992-1-2 (2).

The whole process of structure design for fire conditions includes the following phases:

- choice of the appropriate fire scenario, i.e. the course of temperature changes during the action of fire,
- determination of temperature distribution at particular points in structural elements as a function of fire action duration time (thermal analysis),
- definition of mechanical response of the structure for the determined temperature field (mechanical analysis),

- określenie mechanicznej odpowiedzi konstrukcji dla ustalonego pola temperatur (analiza mechaniczna),
- sprawdzenie odpowiednich warunków zachowania odporności ogniowej.

Pożar rzeczywisty cechuje zmienność czasu trwania, szybkości przyrostu temperatury, maksymalnej osiągniętej temperatury, w zależności od szeregu czynników, takich jak: wielkość i geometria pomieszczenia, ilość i sposób rozmieszczenia w nim materiałów palnych, warunki wentylacji, właściwości termiczne otoczenia pomieszczenia, itp. Wśród stosowanych w analizie termicznej modeli pożaru wyróżnić można: 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) (3).

2. Właściwości betonu konstrukcyjnego i efekty oddziaływania pożarowego

Zachowanie konstrukcji z betonu w warunkach pożaru determinowane jest poprzez dwie zasadnicze grupy właściwości materiałowych: termiczne/fizyczne oraz mechaniczne. W ogólnym przypadku w celu dokonania realistycznej analizy pracy konstrukcji z betonu w warunkach pożarowych niezbędne jest określenie tych podstawowych właściwości materiałowych tak dla betonu, jak i dla stali zbrojeniowej. Jednak w wielu przypadkach dopuszcza się uproszczenia, polegające na przykład na tym, że wpływ właściwości termicznych stali zbrojeniowej w przekroju na pole temperatury jest pomijalny.

Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na różnice w zachowaniu w warunkach pożarowych elementów wykonanych z betonu zwykłej wytrzymałości (BZW) i wysokiej wytrzymałości (BWW) – dotyczą one głównie wartości poziomów redukcji właściwości wytrzymałościowych w funkcji narastającej temperatury pożarowej oraz wyższej wrażliwości betonów wysokiej wytrzymałości na efekty odpadania otuliny betonowej.

Określenie rozkładu temperatury w elemencie poddanym działaniu ognia według odpowiednio przyjętego scenariusza pożarowego jest niezbędnym etapem w procesie projektowania uwzględniających warunki pożaru. Wiarygodność uzyskanych temperatur zależy od realistycznego i poprawnego przyjęcia podstawowych właściwości termicznych betonu i stali zbrojeniowej, w szczególności: gęstości objętościowej ρ , ciepła właściwego c_p , współczynnika przewodzenia ciepła λ .

Wraz ze wzrostem temperatury zachodzi w betonie szereg procesów, które powodują duże zmiany jego właściwości mechanicznych. Zachowanie betonu zależy znacznie od jego składu, ale generalnie, po przekroczeniu poziomu temperatury ok. 300°C następuje spadek wytrzymałości dla betonów zwykłych (BZW), zaś przy dalszym wzroście temperatury powyżej 600°C beton staje się praktycznie nieprzydatny jako materiał konstrukcyjny z uwagi na

- verification of the appropriate condition for fire resistance.

Real fire is characterized with variety in duration time, temperature increase rate and maximum temperature obtained, depending on numerous factors such as: magnitude and geometry of compartment, amount and way of distribution of combustible materials inside the compartment, ventilation conditions, thermal properties of surroundings, etc. Among the applied models of fire for thermal analysis there may be distinguished: nominal temperature-time curves (standard curve according to ISO 834, curve for the external fire, hydro-carbon curve) and natural models (simplified – zone fires and localized fires; advanced – uni-zone, multi-zones, with the application of fluid mechanics) (3).

2. Structural concrete properties and effects of fire actions

Behavior of concrete structures at fire situation is determined by two basic groups of material properties: thermal/physical and mechanical. In general case to carry out realistic analysis of reinforced concrete (RC) structure behavior at fire conditions it is necessary to determine those basic material properties both for concrete and for reinforcing steel. But for many cases simplifications are admissible, for example the influence of thermal properties of reinforcing steel onto temperature field distribution may be ignored.

It is worth noticing the differences in behavior at fire temperatures for elements made on normal strength concrete (NSC) and high strength concrete (HSC), which mainly concern the levels of material properties reduction as a function of temperature as well as higher sensitivity of HSC to the unfavorable effect of spalling/explosive spalling.

Determination of temperature distribution in element subjected to fire action according to appropriately assumed fire scenario constitutes the inevitable phase within the process of fire design. Reliability of obtained temperature results depends on realistic and proper assumption of basic parameters describing thermal properties of concrete and reinforcing steel, and especially: volume density ρ , specific heat c_p , thermal conductivity coefficient λ .

With the increase in temperature there are generated some processes within the concrete which result in the changes in its mechanical properties. Detailed behavior of concrete depends strongly on its composition, but generally after exceeding the level of temperature about 300°C there is observed the reduction of strength for NSC and then with the further increase of temperature above 600°C concrete becomes practically inadequate as a structural material due to high level of compressive strength reduction (even more than 50%). For HSC the significant reduction in strength is visible for temperatures 300 ÷ 400°C – hence it may be stated that high strength concretes are more sensitive to the unfavorable effect of fire temperatures than NSC.

Basic mechanical parameters determined as a functions of temperature that are indispensable for conducting calculation of

dużą - nawet ponad 50% - redukcję wytrzymałości na ściskanie. W przypadku betonów wysokiej wytrzymałości (BWW) obserwuje się wyraźne spadki wytrzymałości już nawet w temperaturach rzędu 300 ÷ 400°C. Można zatem stwierdzić, że betony wysokiej wytrzymałości są bardziej wrażliwe na niekorzystne działanie temperatury pożarowej niż betony o zwykłej wytrzymałości.

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

W projektowaniu inżynierskim konstrukcji żelbetowych poddanych działaniu wysokich temperatur zależność σ - ϵ dla betonu przy ściskaniu - zwykle idealizowana - musi zostać określona w funkcji temperatury. Dla betonu ogrzewanego bez obciążenia, wzrost temperatury w czasie badania powoduje zmniejszenie modułu sprężystości (nachylenia wznoszącej części wykresu σ - ϵ) i redukcji maksymalnego naprężenia (wytrzymałości na ściskanie) oraz zmniejszeniem nachylenia opadającej gałęzi krzywej (materiał staje się mniej kruchy a bardziej ciągliwy). Wraz ze wzrostem temperatury rośnie natomiast odkształcenie przy maksymalnym naprężeniu i graniczne odkształcenie przy zniszczeniu. Dla betonu ogrzewanego pod obciążeniem wpływ temperatury jest mniej widoczny, czyli efekt wstępnego obciążenia określić można jako pozytywny (2), (6), (10). Maksymalny poziom temperatury, do której beton był ogrzewany jest ważnym czynnikiem wpływającym na relację σ - ϵ , niezależnie od tego, czy badania prowadzone były przy ogrzewaniu, czy po ochłodzeniu próbki betonowej. Powszechną praktyką przy badaniu próbek jest umieszczanie ich na określony czas w piecu i ogrzanie do odpowiedniej temperatury bez obciążenia, a potem ich obciążenie aż do zniszczenia - przy tym samym poziomie temperatury albo po ochłodzeniu. W takim przypadku historia obciążenia i ogrzewania nie są uwzględnione. Kolejną istotną kwestią jest moment przeprowadzenia badania próbki, tzn. czy badaniom poddano gorące próbki, czy ostudzone. W fazie chłodzenia mogą rozwinać się naprężenia termiczne (zależne od prędkości tego procesu) i związane z nimi rysy, wpływając znacznie na zależność σ - ϵ .

Wartości odpowiednich właściwości termicznych i mechanicznych betonu konstrukcyjnego, określonych jako funkcje narastającej temperatury pożarowej, można przyjmować według normy (2). Dopuszczalne jest również przyjmowanie innych zależności funkcyjnych, pod warunkiem wszakże, iż zostały one doświadczalnie zweryfikowane. W literaturze przedmiotu można znaleźć liczne propozycje w tej mierze, zwłaszcza w zakresie właściwości mechanicznych betonów wysokich wytrzymałości, np.: (4 ÷ 9).

Typowe uszkodzenia betonu w konstrukcji, będące efektem oddziaływania wysokiej temperatury pożarowej i wywołanymi nią

reinforced concrete structure at fire situation includes: concrete compressive and tensile strengths, yielding strength for reinforcing steel, modulus of elasticity for concrete and steel as well as deformation characteristics for both materials in the form of stress-strain relationship. Evaluation of the whole set of mechanical properties for materials required for the complete structural analysis constitutes complicated task from technical and investigative point of view.

In engineering design of RC structures under the action of fire the relationship σ - ϵ for the concrete under compression - usually idealized - has to be determined as a function of temperature. For concrete heated without the load, the increase in temperature during the tests results in reduction of elasticity modulus for concrete (inclination of stress-strain curve ascending part) and reduction of maximum stress (concrete compressive strength) as well as reduction in inclination of descending branch of the curve (material becomes less brittle and more ductile). With the increase in temperature, strain at the maximum stress becomes higher as well as the ultimate strain value at failure. For material heated under the load, the influence of temperature is less visible - hence the effect of initial loading can be defined as positive (2, 6, 10). Maximum temperature level at which the concrete was heated constitutes important factor influencing the stress-strain relationship, despite the fact whether the tests were carried out while heating or after cooling of the concrete sample. Placing the samples for the specified period of time within the fire chamber and heating to appropriate level of temperature and then loading them up to the failure - for the same temperature or after cooling down - becomes a common practice for determining stress-strain curve. For such case the load history is not taken into account. Another significant issue is the moment of testing the sample, i.e. if tests were carried out on hot or cooled samples. During cooling phase, there may be developed thermal stresses (that are dependent on the cooling rate) and associated cracks, which can influence significantly σ - ϵ relationship for concrete.

Values of appropriate thermal and mechanical parameters for structural concrete determined as a function of increasing fire temperature may be taken based on the code PN-EN 1992-1-2 (2). It is also admissible to operate with different functions and relationships, but under the condition that they were experimentally verified. In the literature there may be found numerous propositions within this subject, especially for mechanical properties of HSC, for ex.: (4 ÷ 9).

Typical damages of concrete in structures, being the effect of high temperature action and complicated processes taking place within the material, include: cracks, chipping off, surface losses and spalling produced by heating from the fire source and uneven volume changes.

In reinforced concrete elements, with progressive damages of concrete that constitutes reinforcing bars protection, the direct action of the high temperature onto reinforcing steel takes place and consequently the load-bearing capacity of elements is strongly reduced due to deterioration of steel mechanical properties.

skomplikowanymi procesami zachodzącymi w materiale, to spękania, wykruszenia, odpryski i ubytki powierzchniowe powstające od silnego nagrzania w pobliżu źródła ognia oraz nierównomiernych zmian objętości.

W elementach żelbetonowych, wraz z postępującymi uszkodzeniami betonu, który stanowi ochronę prętów zbrojeniowych, dochodzi do bezpośredniego działania wysokiej temperatury na stal zbrojową i szybkiej utraty nośności z powodu pogorszenia właściwości mechanicznych stali. Dodatkowo, po wykruszeniu otuliny betonowej, dochodzić może do wyboczenia prętów zbrojeniowych i utraty przyczepności przylegającego do nich betonu, nawet w tych obszarach, w których zbrojenie jest jeszcze osłonięte.

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

W zakresie temperatur do około 500÷600°C można w pewnym stopniu kształtować pożądane zachowania konstrukcji w warunkach pożarowych przez zastosowanie odpowiedniego składu

Additionally, after concrete cover loss, the buckling of reinforcing bars and bond failure of surrounding concrete may occur even for the regions where steel bars are not yet exposed.

While determining the fire resistance of the concrete structure there should be considered all possible and appropriate for assumed situations failure mechanisms. Depending on the load distribution, history of thermal load and the type of the structure, there may be occurred the failure due to bending, buckling (at compression), shear or torsion, or as a result of bond loss in anchorage zone. Fire damages of concrete in structure do not constitute the direct failure mode, but the effects of spalling and losses of concrete may initiate – through the loss of the part of the cross-section and exposing of steel onto the action of fire – occurring one of the mentioned failure mechanism.

Within the temperature range up to 500÷600°C it is possible to shape the desired behavior of concrete structure at fire conditions by application of appropriate concrete composition. Important factor is then the right selection of aggregates as some of them are subjected to destruction at 350°C (boulder aggregate), while the others – granite – at almost 600°C. The most desired features of aggregate are generally the following: low thermal elongation that improves co-operation with the paste, rough surface making it possible to create physical bonds with the paste and the presence of reactive silica fume which influences the chemical bonds with the paste.

Tablica 1 / Table 1

CHARAKTERYSTYKI RÓŻNYCH TYPÓW USZKODZEŃ POŻAROWYCH BETONU WEDŁUG (10)

CHARACTERISTICS OF THE DIFFERENT FORMS OF CONCRETE FIRE DAMAGES ACCORDING TO (10)

Typ uszkodzenia / Type of damages	Czas Wystąpienia / Time of occurrence [min]	Charakter / Nature	Towarzyszący dźwięk Associated sound	Główne czynniki warunkujące Main influences ¹⁾
Wykruszanie kruszywa Aggregate chipping off	7-30	--	Wystrzał / Popping	H, A, S, D, W
Odpryski naroży Corner losses	30-90	Niegwałtowny Non-violent	Brak dźwięku / None	T, A, Ft, R
Odpryski powierzchniowe Surface spalling	7-30	Gwałtowny / Violent	Pęknięcie / Cracking	H, W, P, Ft
Odpryski eksplozyjne Explosive spalling	7-30	Gwałtowny / Violent	Głośnie uderzenie Loud bang	H, A, S, Fs, G, L, O, P, Q, R, S, W, Z
Uszkodzenia przy ochładzaniu Post-cooling damages	Podczas i po ochładzaniu przy absorpcji wilgoci During and after cooling upon absorption of moisture	Niegwałtowny Non-violent	Brak dźwięku / None	T, Fs, L, Q, R, W1, AT

¹⁾ Czynniki warunkujące wystąpienie poszczególnych typów uszkodzeń: A – rozszerzalność cieplna kruszywa, D – przenikalność cieplna, kruszywa, Fs – wytrzymałość betonu na ścinanie, Ft – wytrzymałość betonu na rozciąganie, G – wiek betonu, H – szybkość nagrzewania, L – warunki obciążenia i więzy, O – profil nagrzewania, AT – rodzaj kruszywa, P – przepuszczalność, Q – kształt przekroju, R – zbrojenie, S – wymiar maksymalnego ziarna kruszywa, T – maksymalna temperatura, W – wilgotność betonu, Z – wielkość przekroju, W1 – absorpcja wilgoci.

Main influences for particular damage types: A – aggregate thermal expansion, D – aggregate thermal diffusivity, Fs – shear strength for concrete, Ft – tensile strength for concrete, G – age of concrete, H – heating rate, L – loading/restraint, O – heating profile, AT – aggregate type, P – permeability, Q – section shape, R – reinforcement, S – aggregate size, T – maximum temperature, W – moisture content, Z – section size, W1 – moisture absorption.

betonu. Ważnym czynnikiem jest odpowiedni dobór rodzaju kruszywa, gdyż niektóre z nich ulegają zniszczeniu nawet w 350°C (otoczkowe), podczas gdy inne dopiero w 600°C (granitowe). Pożądanymi właściwościami kruszyw są w ogólności: mała rozszerzalność cieplna poprawiająca współpracę z zaczynem cementowym, szorstka powierzchnia ułatwiająca wytworzenie fizycznych więzów przyczepności z zaczynem, a także obecność reaktywnej krzemionki, która poprawia chemiczne więzy z zaczynem.

Uszkodzenia betonu w efekcie działania wysokiej temperatury można podzielić na: wykruszanie ziaren kruszywa, odpryski eksplozyjne betonu, odpryski powierzchniowe, odpryski naroży (np.: w belkach i słupach), uszkodzenia po ochłodzeniu. Charakterystyki różnych uszkodzeń pożarowych betonu wraz z zestawieniem podstawowych czynników warunkujących ich wystąpienie podano za biuletynem fib (10) w Tablicy 1.

Odpryski eksplozyjne betonu uważane są za najpoważniejszy i najgroźniejszy rodzaj uszkodzenia pożarowego, co znajduje odzwierciedlenie w licznych teoretycznych i doświadczalnych pracach badawczych (6, 11÷14). Przyjmuje się, że następują one w efekcie współdziałania mechanizmów obejmujących przyrost ciśnienia w porach (związany z transportem wody z powierzchni elementu) oraz powstania naprężeń termicznych w betonie (wywołanych gradientem ciśnienia od szybkiego nagrzewania) i występujących rys wewnętrznych. Rysy rozwijają się równoległe do powierzchni, gdy suma naprężeń przekracza wytrzymałość na rozciąganie materiału. Jest to stowarzyszone z nagłym uwolnieniem energii i gwałtownym zniszczeniem nagrzanego obszaru powierzchniowego.

Czynniki determinujące wystąpienie odprysków eksplozyjnych betonu można podzielić na materiałowe (rodzaj i rozmiar kruszywa, rodzaj cementu, w/c, porowatość, zawartość włókien polipropylenowych lub włókien stalowych, wilgotność, wytrzymałość), geometryczne (kształt i wymiary elementu, grubość otuliny zbrojenia, ilość i układ zbrojenia w elemencie) oraz zewnętrzne (oddziaływanie ogniowe – zależność temperatura – czas, profil oddziaływania ognia – z ilu stron element poddany jest działaniu ognia).

Analiza oraz prawidłowa identyfikacja i klasyfikacja uszkodzeń pożarowych betonu jest dodatkowo bardzo ważną informacją do oceny stanu technicznego konstrukcji po pożarze (15).

Wpływ odprysków eksplozyjnych na odporność ogniową elementu określaną obliczeniowo, należałoby uwzględnić przez przyjęcie zredukowanej powierzchni przekroju oraz zmniejszenie wytrzymałości (w funkcji temperatury) betonu rdzenia przekroju oraz stali w prętach, które zostają odsłonięte po powstaniu ubytków otuliny. Kluczową kwestią pozostaje wtedy przyjęcie zakresu wystąpienia odprysków betonu i w konsekwencji szczegółowych wielkości powierzchniowych ubytków oraz zmniejszenia wytrzymałości materiałów w przekroju.

Pewne praktyczne informacje w tym względzie zawiera PN-EN 1992-1-2 (2). Zgodnie z postanowieniami tej normy, jeżeli zawartość wilgoci w betonie przekracza 3%, to dla belek, płyt i elementów rozciąganych wpływ odprysków eksplozyjnych betonu na funkcję

Damages of concrete as a result of high temperature action may be divided into the following types: chipping off the aggregate grains, explosive spalling, surface spalling, corner losses (in beams and columns), post-cooling damages. Characteristics of different fire damage types together with the setting up of basic factors influencing their occurrence according to (10) are presented in Table 1.

Explosive spalling of concrete is considered to be the most serious and most dangerous form of fire damage, which reflects in numerous theoretical and experimental research works, for ex.: (6), (11÷14). It is assumed that explosive spalling is produced as a result of co-operation of mechanisms including pore pressure increase (connected with the moisture transfer from the surface of the element), concrete thermal stress occurrence (caused by pressure gradient from fast heating) and internal cracks. Cracks are developed parallel to the surface when the sum of stresses exceeds the material tensile strength. It is associated with the sudden release of energy and violent destruction of heated surface region.

Factors determining the concrete explosive spalling occurrence may be divided into material (type and size of the aggregate, cement type, w/c ratio, porosity, poly-propylene or steel fiber contents, moisture, strength), geometrical (shape and dimensions of element, concrete cover, amount and arrangement of reinforcement) and external ones (temperature – time dependence, fire action profile – from which sides the elements is subjected to fire).

Analysis as well as proper identification and classification of concrete fire damages constitutes additional significant element at the process of technical state estimation for the structure after the fire (15).

The influence of explosive spalling onto fire resistance level for the element determined by calculations should be accounted for by taking the reduced cross-section area and reduced concrete strength (as a function of temperature) for the core of cross-section and steel reinforcing bars that are exposed after concrete cover loss occurrence. Key issue then is the definition of the range of spalling occurrence and as a consequence – detailed geometrical values of losses and reduction of material mechanical properties.

Some practical information as to this question is included in PN-EN 1992-1-2 (2). According to this code statements if the moisture contents in the concrete does not exceed 3%, than for beams, slabs and tensile elements the effect of spalling of concrete onto load-bearing function R may be analyzed under the assumption of the local loss of concrete cover for one reinforcing bar in the cross-section and verification of load-bearing capacity for reduced cross-section. Temperature for other bars may then be determined as for non-damaged cross-section. Such verification is not required for elements with proven proper behavior during fire tests. For the case of large amount of reinforcing bars within the cross-section – for slabs with evenly distributed reinforcement as well as for beams with the width greater than 400 mm and reinforced with at least 9 bars in the tensile zone – it may be assumed that stress re-distribution take place without the decrease in load-bearing capacity of the element.

nośności elementu R może być określany przy założeniu lokalnej utraty otuliny betonowej jednego pręta zbrojeniowego w przekroju i sprawdzeniu nośności dla przekroju zmniejszonego. Temperaturę pozostałych prętów może wówczas określić tak jak dla przekroju nieuszkodzonego. Sprawdzenie takie nie jest wymagane dla elementów o stwierdzonym prawidłowym zachowaniu w badaniach ogniowych. W przypadku występowania dużej liczby prętów zbrojeniowych w przekroju – dla płyt z równomiernie rozłożonym zbrojeniem oraz belek o szerokości przekroju większej niż 400 mm i zbrojonych co najmniej 9 prętami w strefie rozciąganej – można założyć, że nastąpi redystrybucja naprężeń bez zmniejszenia nośności elementu.

3. Weryfikacja odporności pożarowej żelbetowych elementów konstrukcyjnych

W odniesieniu do analizy konstrukcji w warunkach pożaru można jej dokonywać na poziomie wydzielonego elementu, na poziomie części konstrukcji, czy wreszcie globalnie – dla całej konstrukcji. Modele pożaru stosowane do analizy mogą także wykazywać różny stopień złożoności i dokładności – od pożarów nominalnych do pożarów rzeczywistych wieloparametrycznych. W obrębie poszczególnych kombinacji przyjętego modelu pożaru i poziomu analizy konstrukcji zastosowanie znajdować mogą różne metody weryfikacji odporności ogniowej konstrukcji: dane tabelaryczne (metoda opisowa), uproszczone lub zaawansowane obliczenia inżynierskie, badania ogniowe lub kombinacje wymienionych metod.

W ogólności, należy wykazać, że dla odpowiedniego czasu trwania pożaru „ t ” spełniony jest warunek:

$$E_{d,t,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad [1]$$

gdzie:

$E_{d,fi}$ – obliczeniowy efekt oddziaływań w warunkach pożaru, określony zgodnie z PN-EN 1991-1-2 (3), przy czym dla elementów wydzielonych w uproszczeniu można przyjmować wg (2), że $E_{d,fi} = 0,70 E_d$ (E_d – wartość efektu oddziaływań w warunkach normalnej temperatury),

$R_{d,t,fi}$ – odpowiadająca nośność w sytuacji pożaru.

Przy określaniu nośności w warunkach pożaru należy w ogólnym przypadku uwzględnić następujące czynniki:

- oddziaływania termiczne i odpowiednie pola temperatury w elementach,
- zmniejszenie wytrzymałości materiałów spowodowane wysoką temperaturą,
- efekty sił wywołanych wydłużeniami termicznymi,
- efekty II rzędu dla elementów poddanych ścisaniu, czyli dodatkowe przemieszczenia i siły wewnętrzne wynikające z deformacji konstrukcji spowodowanej oddziaływaniem pożarowym.

Badania ogniowe mogą być wykonywane w zakresie 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

3. Verification of fire resistance for RC structural elements

In reference with structural analysis in fire situation, it is possible to carry out the calculations on the cross-sectional level, for the part of the structure or globally – for the whole structure. Fire models for analysis may also indicate different level of complexity and accuracy – from nominal fire curves to real multi-parameter fires. Within the specified combinations of the assumed fire model and structure analysis level, there may be applied various methods of verification of structure fire resistance: tabulated data (descriptive method), simplified or advanced engineering calculation methods, fire tests or combinations of these methods.

In general, it should be indicated that for the appropriate fire duration time „ t ” the following condition is satisfied:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad [1]$$

where:

$E_{d,fi}$ – design effect of actions in fire situation determined in compliance with PN-EN 1991-1-2 (3), wherein for isolated elements as a simplification it may be taken according to (2) that $E_{d,fi} = 0,70 E_d$ (E_d – effect actions for normal temperature condition),

$R_{d,t,fi}$ – corresponding load-bearing capacity for fire situation.

While determining the load-bearing capacity for fire conditions in general case it is necessary to take into account the following factors:

- thermal action and appropriate temperature fields in elements,
- reduction in mechanical properties of materials caused by fire temperature,
- effects of forces due to thermal elongations,
- second order effects in compressed elements, i.e. additional displacements and internal forces produced by deformation of structure due to fire actions.

Fire tests may be conducted within the range from isolated elements to natural scale experiments. Calculation methods can indicate various level of accuracy: from simplified methods with the application field limited to a certain types of cases or elements to complicated analysis carried out with the aid of FEM.

Presently, engineering practice with regard to concrete structure design in fire situation is based mainly on application of codes including tabulated data, which are easy to operate. They were formulated for different levels of fire resistance (30, 60, 90, 120 and 240-minutes) and for standard temperature-time curve ISO 834. Tables in codes define minimum cross-section dimensions for different types of structural elements (slabs, beams, columns, walls) and minimum distances from the axis of reinforcing bars to the external surface of cross-section of the elements that are necessary to assure the specified level of fire resistance (2). If requirements given in tables are not satisfied and it is not possible to increase the cross-section dimensions, then the fire resistance

elementów zakresie stosowania aż do skomplikowanych analiz prowadzonych z wykorzystaniem MES.

Obecnie praktyka inżynierska w odniesieniu do projektowania konstrukcji z betonu w warunkach pożaru oparta jest głównie na stosowaniu norm zawierających dane tabelaryczne, które są najprostsze w stosowaniu. Zostały one sformułowane dla odporności ogniowych 30, 60, 90, 120, oraz 240-minutowych przy działaniu pożaru standardowego według ISO 834. Odpowiednie tabele zawierają minimalne wymiary przekroju różnych rodzajów elementów (płyt, belek, słupów, ścian) i minimalne odległości od osi zbrojenia do powierzchni zewnętrznej, które są niezbędne w celu zapewnienia wymaganej odporności ogniowej (2). Jeżeli podane w tabelach wymagania nie są spełnione, a nie jest możliwe zwiększenie wymiarów przekroju poprzecznego elementów lub grubości otuliny betonowej, to odporność ogniową można zwiększyć poprzez stosowanie powłok ochronnych, membran czy innych systemowych rozwiązań.

Metody obliczeniowe zapewniają efektywne określanie odporności ogniowej konstrukcji - szczegółowa sytuacja może być analizowana dla różnych scenariuszy pożaru, dla różnej geometrii elementów, właściwości materiałowych, warunków obciążenia i podparcia elementów. Inżynierskie metody obliczeniowe można podzielić na trzy kategorie: 1/ uproszczone obliczenia oparte o analizę stanów granicznych (zwykle na poziomie przekroju, przy przyjęciu hipotezy płaskich przekrojów Bernoulliego), 2/ analiza ciepłno-mechaniczna z wykorzystaniem MES, 3/ kompletna analiza ciepłno - wilgotnościowo - mechaniczna z użyciem MES.

Obecnie, pomimo zaawansowanych termicznych i mechanicznych modeli do analizy żelbetowych elementów (lub całej konstrukcji) w warunkach pożarowych oraz specjalistycznych programów obliczeniowych, istnieje nadal silna potrzeba rozwijania i doskonalenia uproszczonych metod analizy dla typowych przypadków. Takie metody powinny umożliwić inżynierom kontrolę procesu projektowania dla warunków pożarowych oraz stanowić narzędzie do wstępnego projektowania złożonych i nietypowych konstrukcji.

Niezależnie od stosowanej metody obliczeniowej wymaga się dodatkowo, aby zmniejszony został niekorzystny efekt odpadania otuliny betonowej. Można to osiągnąć spełniając pewne konkretne wymagania odnośnie do betonu (skład jakościowy i ilościowy, wskaźnik w/c, i inne), stosując dodatkowe zbrojenie konstrukcyjne w strefie przypowierzchniowej albo można uwzględnić ten wpływ w sposób uproszczony, w analizie odporności ogniowej elementu.

4. Wpływ właściwości betonu na odporność pożarową elementów konstrukcyjnych

Szczegółowe wartości i zależności funkcyjne parametrów materiałowych betonu konstrukcyjnego od temperatury wykorzystywane są na różnych etapach procesu weryfikacji odporności pożarowej.

W przypadku analizy termicznej decydują właściwości fizyczne/termiczne (przewodnictwo ciepłe, gęstość objętościowa, ciepło

level may be increased by application of protective layers, membranes or other system solutions.

Calculation methods provide in an effective way determination of fire resistance for structure – considered situation may be analyzed for various fire scenario, for different geometry of elements, material properties, load and restraint conditions. Engineering calculation methods may be classified into three categories: 1/ simplified calculations based on the analysis of limit states (usually on cross-sectional level, with assuming Bernoulli hypothesis), 2/ thermo-mechanical analysis with the application of FEM, 3/ complex thermo-moisture-mechanical analysis with the help of FEM.

Currently, despite the existence of advanced thermal and mechanical models for RC structural elements analysis in fire situation as well as sophisticated computer programs, there is still a need for developing and improving simplified method of analysis for typical cases. Such methods should allow engineers to control the process of design for fire situation and constitute the tool for initial design of complex and non-typical structures.

But despite the applied method, it is required additionally to limit the unfavorable effect of concrete spalling. This may be achieved by satisfying a certain specific requirements as to the concrete (quantitative and qualitative composition, w/c ratio, etc), by applying additional reinforcement within the near-surface zone of the cross-section or by taking this effect in a simplified manner in analysis of fire resistance for the element.

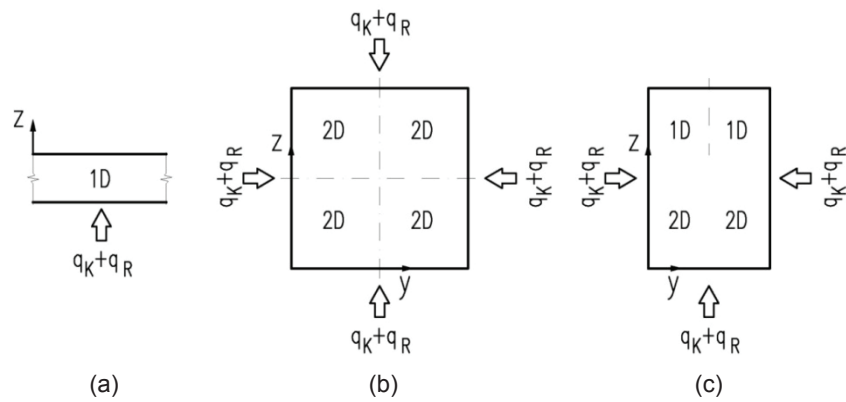
4. Influence of concrete properties onto fire resistance of RC structural elements

Specific values and detailed functions for material parameters of structural concrete with accounting for the effect of fire temperature are used on different stages of fire resistance verification process.

For thermal analysis thermal/physical properties are of greatest importance (thermal conductivity, volume density, specific heat – all determined as a temperature functions) as well as parameters connected with the general physical description of heat flow process (through convection and radiation). After solution of Fourier – Kirchhoff equation for heat flow with accounting for material thermal parameters the distribution of temperature as a function of time is being determined for particular points within the whole structure.

Obviously, obtained temperature distributions in cross-section of structural elements depend also significantly on assumed fire scenario and heating conditions (location of fire source with regard to the element, determination from which sides the elements is subjected to fire).

In order to illustrate the influence of concrete properties and composition onto the distribution of temperature within the elements cross-section there are presented some results of calculation with the application of simplified method for temperature field determination for fire action (modified Wickstrom method) (16).



Rys. 1. Ogólne oznaczenia i określenie obszarów 1D i 2D w uproszczonej metodzie szacowania pól temperatury według Kodura i in. (16) - wymiana ciepła przez konwekcję (q_K) i promieniowanie (q_R)

Fig. 1. General notations and definitions of zones 1D and 2D in simplified method of temperature field determination according to (16) – heat transfer through convection (q_K) and radiation (q_R)

właściwe – określone w funkcji temperatury) oraz parametry związane z opisem fizycznym procesu przepływu ciepła (przez konwekcję i promieniowanie). Przy ich uwzględnieniu i po rozwiązaniu w ogólnym przypadku równania przewodzenia ciepła Fouriera – Kirchhoffa ustala się rozkład temperatury w funkcji czasu trwania oddziaływania pożarowego, w poszczególnych punktach konstrukcji.

Oczywiście, uzyskane rozkłady temperatury w przekrojach elementów konstrukcyjnych zależą także znacznie od przyjętego scenariusza pożarowego czy warunków ogrzewania (usytuowanie źródła pożaru względem elementu i określenie z ilu stron przekroju występuje oddziaływanie termiczne).

W celu zobrazowania wpływu właściwości i składu betonu na rozkład temperatury w przekroju przedstawiono wyniki obliczeń dla uproszczonej metody szacowania pól termicznych przy oddziaływaniu pożarowym (zmodyfikowana metoda Wickstroma) (16). Na rysunku 1 pokazano ogólne oznaczenia przyjmowane w tej metodzie wraz ze zdefiniowaniem obszarów 1D i 2D, dla których zastosowanie znajdują odpowiednie, podane poniżej, wzory obliczeniowe.

Przypadek 1D:

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

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

gdzie:

t [h], z [m],

$a = 935$; $n = 0,168$; $a_1 = 0,155$; $a_2 = -0,348$; $a_3 = -0,371$

$c_1 = 1,00$ – beton zwykły (BZW) na kruszywie węglanowym

= 1,01 – beton o wysokiej wytrzymałości (BWW) na kruszywie węglanowym

= 1,12 – beton zwykły (BZW) i beton o wysokiej wytrzymałości (BWW) na kruszywie krzemianowym

Przypadek 2D:

In Fig.1 there are shown and explained the general notations for this method together with definitions of 1D and 2D zones for which particular formulas are to be used.

Zone 1D:

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

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

where:

t [h], z [m],

$a = 935$; $n = 0,168$; $a_1 = 0,155$; $a_2 = -0,348$; $a_3 = -0,371$

$c_1 = 1,00$ – normal strength concrete (NSC) on carbonate aggregate

= 1,01 – high strength concrete (HSC) on carbonate aggregate

= 1,12 – normal strength concrete (NSC) and high strength concrete (HSC) on silicate aggregate

Zone 2D:

$$\theta(y, z, t) = c_2 [b_1 \eta(y, t) \eta(z, t) + b_2 (\eta(y, t) + \eta(z, t)) + b_3] a t^n \quad [3]$$

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

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

where:

t [h], y [m], z [m],

$b_1 = -1,481$; $b_2 = 0,985$; $b_3 = 0,017$

$c_2 = 1,00$ – normal strength concrete (NSC) on carbonate aggregate

= 1,06 – high strength concrete (HSC) on carbonate aggregate

= 1,12 – normal strength concrete (NSC) on silicate aggregate

= 1,20 – high strength concrete (HSC) on silicate aggregate

As clearly visible from equations [2], [3] the general relationships between temperatures determined for different concrete strength classes and for different aggregates is expressed by c_1 and c_2 coefficients. Hence, the differences in temperatures for particular cases reaches maximum 20%. But the temperature levels in defined points of cross-section depend on the fire duration time,

Tablica 2 / Table 2

WYNIKI OBLICZEŃ ROZKŁADU TEMPERATURY DLA ANALIZOWANYCH PRZYPADKÓW WG ZMODYFIKOWANEJ METODY WICKSTROMA (16) – BETON O ZWYKŁEJ WYTRZYMAŁOŚCI (BZW)

RESULTS OF CALCULATIONS OF TEMPERATURES FOR THE ANALYZED CASES ACCORDING TO MODIFIED WICKSTROM METHOD (16) – NORMAL STRENGTH CONCRETE (NSC)

Współrzędne punktu Coordinates of point	Płyta (1D) – temperatura [°C]; kruszywo węglanowe / kruszywo krzemianowe Slab (zone 1D) – temperature [°C]; carbonate aggregate / silicate aggregate			
	30 min	60 min	90 min	120 min
z = 3,5 cm	230 / 258	360 / 402	447 / 502	515 / 577
z = 7,5 cm	--	130 / 147	203 / 227	271 / 303
Współrzędne punktu Coordinates of point	Słup (2D) – temperatura [°C]; kruszywo węglanowe / kruszywo krzemianowe Column (zone 2D) – temperature [°C]; carbonate aggregate / silicate aggregate			
	30 min	60 min	90 min	120 min
y = z = 3,5 cm	373 / 418	519 / 581	600 / 672	658 / 737
y = z = 8 cm	--	211 / 236	321 / 360	400 / 448
y = z = 15 cm	--	--	--	108 / 120

$$\theta (y, z, t) = c_2 [b_1 \eta (y, t) \eta (z, t) + b_2 (\eta (y, t) + \eta (z, t)) + b_3] a t^n \quad [3]$$

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

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

gdzie:

t [h], y [m], z [m],

b₁ = - 1,481; b₂ = 0,985; b₃ = 0,017

c₂ = 1,00 – beton zwykły (BZW) na kruszywie węglanowym

= 1,06 – beton o wysokiej wytrzymałości (BWW) na kruszywie węglanowym

= 1,12 – beton zwykły (BZW) na kruszywie krzemianowym

= 1,20 – beton o wysokiej wytrzymałości (BWW) na kruszywie krzemianowym

Jak widać ze wzorów [2], [3] ogólne zależności pomiędzy temperaturami określonymi dla różnych wytrzymałości betonu i dla różnych zastosowanych kruszyw wyrażone są poprzez współczynniki c₁ oraz c₂. Stąd różnice w temperaturach dla poszczególnych przy-

cross-section geometry and the whole set of factors involved in these equations.

Results of calculations of temperatures for analyzed cases (carbonate or silicate aggregate, NSC or HSC, zone 1D or 2D) are compared in Table 2 and Table 3. As an example of zone 1D there was considered the concrete slab with the thickness equal to 15 cm – see: (a) in Fig. 1. As for the zone 2D there was analyzed the column with cross-section dimensions 35 x 35 cm – see: (b) in Fig. 1. Values of temperatures determined for the co-ordinates z = 3,5 cm (for slab) and y = z = 3,5 cm (for column) may correspond to the temperature level for reinforcing bars within the cross-sections for the concrete cover equal to 30 mm.

In Table 2 there are presented results for temperatures obtained for normal strength concrete (NSC), whereas in Table 3 – for high strength concrete (HSC). For each case two values of temperatures are given: the first – for carbonate aggregate, the second – for silicate one.

Tablica 3 / Table 3

WYNIKI OBLICZEŃ ROZKŁADU TEMPERATURY DLA ANALIZOWANYCH PRZYPADKÓW WG ZMODYFIKOWANEJ METODY WICKSTROMA (16) – BETON WYSOKIEJ WYTRZYMAŁOŚCI (BWW)

TABLE 3: RESULTS OF CALCULATIONS OF TEMPERATURES FOR THE ANALYZED CASES ACCORDING TO MODIFIED WICKSTROM METHOD (16) – HIGH STRENGTH CONCRETE (HSC)

Współrzędne punktu Coordinates of point	Płyta (1D) – temperatura [°C]; kruszywo węglanowe / kruszywo krzemianowe Slab (zone 1D) – temperature [°C]; carbonate aggregate / silicate aggregate			
	30 min	60 min	90 min	120 min
z = 3,5	232 / 258	364 / 402	451 / 502	520 / 577
z = 7,5 cm	--	131 / 147	205 / 227	274 / 303
Współrzędne punktu Coordinates of point	Słup (2D) – temperatura [°C]; kruszywo węglanowe / kruszywo krzemianowe Column (zone 2D) – temperature [°C]; carbonate aggregate / silicate aggregate			
	30 min	60 min	90 min	120 min
y = z = 3,5 cm	395 / 447	550 / 623	636 / 720	697 / 790
y = z = 8 cm	--	223 / 253	340 / 385	424 / 480
y = z = 15 cm	--	--	--	114 / 130

padków wynoszą maksymalnie do 20%. Natomiast same poziomy temperatur w zdefiniowanych punktach przekroju zależą od czasu trwania oddziaływania pożarowego, geometrii przekroju i całego zestawu stałych parametrów równań.

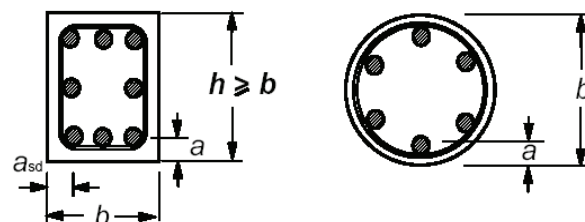
Wyniki obliczeń temperatury dla różnych analizowanych przypadków (kruszywo węglanowe lub krzemianowe, BZW lub BWW, obszar 1D lub 2D) zestawiono w Tablicach 2 i 3. Jako przypadek 1D rozważono płytę o grubości 15 cm - patrz: (a) na Rys. 1, natomiast jako przypadek 2D analizowano słup o przekroju 35x35 cm - patrz: (b) na rysunku 1. Temperatura dla współrzędnych $z = 3,5$ cm (dla płyty) oraz $y = z = 3,5$ cm (dla słupa) odpowiadać mogą w przybliżeniu poziomowi temperatury dla prętów zbrojeniowych przy otulinie betonowej wynoszącej 30 mm. W tablicy 2 zestawiono wyniki obliczeń dla betonu o zwykłej wytrzymałości (BZW), natomiast w Tablicy 3 – dla BWW. W każdym przypadku zamieszczono dwa wyniki temperatury – pierwszy dla betonu na kruszywie węglanowym, drugi – na krzemianowym.

Wpływ właściwości mechanicznych betonu (w szczególności – poziomu wytrzymałości na ściskanie oraz zależności σ - ϵ określonej przy ściskaniu) przejawia się w różny sposób dla odmiennych zastosowanych metod weryfikacji odporności pożarowej żelbetowych elementów konstrukcyjnych.

W najprostszej metodzie opisowej, opartej na danych tabelarycznych – patrz: PN-EN 1992-1-2 (2), jedynymi używanymi parametrami są wielkości geometryczne: minimalny wymiar przekroju elementu konstrukcyjnego i minimalna odległość od osi zbrojenia głównego do krawędzi przekroju [rysunek 2]. Jeżeli tylko te wymagania są spełnione, to automatycznie odpowiedni poziom odporności ogniowej jest zapewniony, bez konieczności żadnego dodatkowego sprawdzania dotyczącego zginania, ścinania czy zakotwienia. W takim przypadku żaden parametr mechaniczny ani fizyczny/termiczny betonu nie wpłynie bezpośrednio na weryfikację odporności pożarowej. Należy jednak dodać, iż dopuszcza się pewne modyfikacje podstawowych wartości w tablicach z uwagi na zastosowany rodzaj kruszywa lub poziom wytrzymałości betonu na ściskanie (2).

W przypadku zastosowania uproszczonych metod obliczeniowych opartych na koncepcji przekroju zredukowanego, w której niekorzystny wpływ oddziaływania pożarowego uwzględniany jest poprzez zmniejszenie wymiarów przekroju, przy założeniu odpowiedniego poziomu izotermy granicznej definiującej część przekroju pomijaną w analizie. Wynik obliczeń nośności przekroju w warunkach pożarowych zależy zarówno od właściwości fizycznych i termicznych betonu (determinujących rozkład temperatury i lokalizację izotermy granicznej), jak i właściwości mechanicznych materiałów: betonu i stali zbrojeniowej.

W podstawowej metodzie izotermy 500°C (opartej na wartości izotermy granicznej na poziomie 500°C) zakłada się jednak uproszczenie polegające na przyjęciu, że dla zmniejszonego przekroju wytrzymałość betonu na ściskanie jest równa wartości określonej w warunkach zwykłej temperatury (20°C) i tylko naprężenia w stalowych prętach zbrojeniowych podlegają redukcji jako funkcje



Rys. 2. Przekroje poprzeczne elementów - definiowanie szerokości przekroju (b) oraz odległości osi zbrojenia (a) w metodzie tabelarycznej według PN-EN 1992-1-2 (2)

Fig.2. Cross-sections of the RC elements – definition of width (b) and the distance from the reinforcing bars axis (a) for tabulated data method according to PN-EN 1992-1-2 (2)

The influence of mechanical properties of concrete (in particular – concrete compressive strength and stress-strain relationship for compression) is manifested differently for various applied verification method for RC structural elements fire resistance.

In the simplest descriptive method, according to tabulated data – see: PN-EN 1992-1-1 (2), the only parameters used for verification are geometrical data: minimum cross-section dimension of the elements cross-section and minimum distance between the axis of reinforcing bars and external surface of the element – Fig. 2. If only these conditions are satisfied then automatically the specified level of fire resistance is achieved, without the necessity to carry out any additional verifications for bending, shear or anchorage zone. For such approach no thermal or mechanical concrete parameter is involved directly into fire resistance verification procedure. However, it is worth adding that some modifications of the basic values in tables – as for aggregate type and concrete strength class – are admissible (2).

For the case of application of simplified calculation methods based on the concept of reduced cross-section (where unfavourable effect of fire action is taken into account by reduction of cross-section dimensions with assuming the appropriate level of the boundary isotherm defining the part of cross-section to be neglected in analysis) the result of calculation of load-bearing capacity in fire conditions depends on physical and thermal properties of concrete (determining the temperature distribution and position of the boundary isotherm within the cross-section) as well as on mechanical properties of materials (concrete and reinforcing steel).

In the basic method of 500°C isotherm (boundary isotherm equal to 500°C) it is assumed as a simplification that for the reduced cross-section concrete compressive may be taken without any reductions as the value determined for normal temperature condition (20°C) and only stresses in reinforcing bars are subjected to reduction as a function of temperatures at their axis for specific period of fire duration time (2), (10).

But the level of fire resistance determined by this method, due to the form of the general load-bearing capacity condition according to equation [1], depends on the concrete compressive strength (concrete class). In Fig. 3 there is presented the influence of

temperatury określonej w ich osiach dla określonego czasu trwania oddziaływania pożarowego (2, 10).

Natomiast sam poziom, określonej z zastosowaniem tej metody odporności pożarowej, z uwagi na strukturę ogólnego warunku nośności według równania [1], zależny jest od wytrzymałości betonu na ściskanie/ klasy betonu. Na rysunku 3 pokazano przykładowo wpływ klasy wytrzymałości betonu na poziom redukcji nośności z uwagi na siłę podłużną ($N_{Rd,fi} / N_{Rd}$, gdzie: $N_{Rd,fi}$ – nośność przekroju w sytuacji pożarowej dla ustalonego czasu trwania oddziaływania pożarowego, N_{Rd} – nośność przekroju w warunkach zwykłej temperatury) dla przekroju słupa o wymiarach 30 x 30 cm. Odporność pożarowa R może być wtedy definiowana jako czas, dla którego poziom redukcji nośności nie jest niższy niż 0,70 – patrz: opis do równania [1]. Obliczenia, których wyniki zestawiono na rysunku 3, wykonano z wykorzystaniem profili temperatury dla przekrojów zamieszczonych w normie (2) dla standardowej krzywej temperatury wg ISO 834 i przy zastosowaniu algorytmów obliczeniowych dla przekroju poddanego łącznemu działaniu momentu zginającego i siły podłużnej według normy PN-EN 1992-1-1 (17).

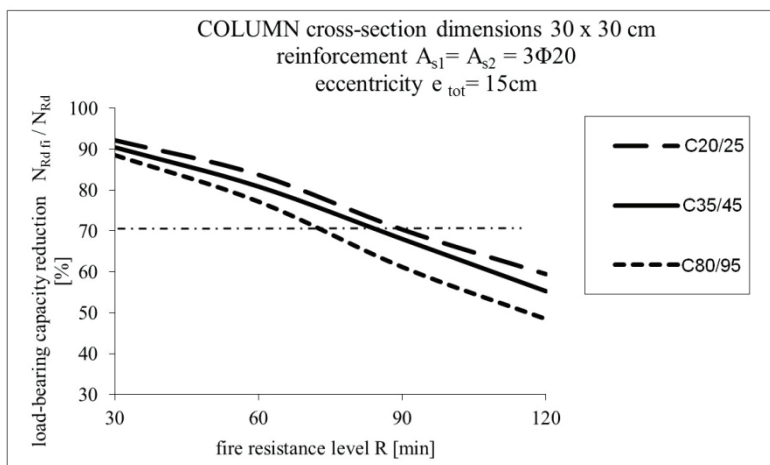
Na podstawie tak opisanej metody można ostatecznie podkreślić, że w analizowanym przypadku dla betonu klasy C20/25 poziom odporności pożarowej oparty na metodzie izotermy 500°C wynosi $R90$, podczas, gdy dla pozostałych rozważanych w przykładzie klas betonu – $R60$. Widać wyraźnie, że zmniejszenie nośności przekroju następuje szybciej dla betonów wyższych klas wytrzymałości.

Inne uproszczone metody obliczeniowe dla warunków pożarowych na poziomie przekroju - np.: metoda stref (2), (18); metoda przyrostowo-iteracyjna (2), (10) - uwzględniają redukcję wytrzymałości betonu na ściskanie wraz z temperaturą, ale same procedury obliczeniowe są wtedy dużo bardziej skomplikowane i czasochłonne. Więcej informacji na ten temat wraz z wynikami przeprowadzonych obliczeń znaleźć można w pracy (19).

Dla zaawansowanych metod weryfikacji odporności pożarowej elementów konstrukcyjnych z betonu modele odpowiedzi mechanicznej oparte być powinny na zasadach i założeniach teorii mechaniki konstrukcji, z uwzględnieniem zmienności właściwości mechanicznych materiałów z uwagi na wpływ temperatury. W analizie należy uwzględnić efekt odkształceń i naprężeń termicznych wywołanych wzrostem temperatury i różnicami temperatury. Całkowite odkształcenie powinno wtedy uwzględniać następujące składowe: odkształcenie termiczne, natychmiastowe odkształcenie wywołane naprężeniem (obciążeniem), odkształcenie spowodowane pełzaniem, odkształcenie w stanie przejściowym.

5. Podsumowanie

Zachowanie konstrukcji w sytuacji pożarowej jest warunkowane wieloma czynnikami: przyjętym układem statycznym i historią obciążenia konstrukcji, rzeczywistym przebiegiem zmian tempe-



Rys. 3. Wpływ klasy wytrzymałości betonu na poziom redukcji nośności w sytuacji pożaru dla słupa o przekroju kwadratowym 30 x 30 cm, dla mimośrodowej siły podłużnej $e_{tot}=15$ cm i stopnia zbrojenia podłużnego 2,1% ($6\Phi20$)

Fig. 3. The influence of concrete strength class onto the level of load-bearing capacity reduction in fire conditions for column with square cross-section 30 x 30 cm, for eccentricity of axial force $e_{tot}=15$ cm and for longitudinal reinforcement ratio equal to 2,1% ($6\Phi20$)

concrete compressive strength class onto the reduction of load-bearing capacity with respect to axial force ($N_{Rd,fi} / N_{Rd}$, where: $N_{Rd,fi}$ – load-bearing capacity in fire situation for specified duration time of fire action, N_{Rd} – load-bearing capacity for normal temperature conditions) for the column with cross-section dimensions 30 x 30 cm. Fire resistance of the element R may then be defined as a time for which the level of capacity reduction is not lower than 0,70 – see: description to equation [1].

Calculations for which results are presented in Fig. 3 were conducted with the application of temperature profiles for cross-sections included in the code (2) for standard temperature-time curve according to ISO 834 and with modification of algorithms for the design of cross-section subjected to the action bending moment and axial force according to PN-EN 1992-1-1 (17).

Based on the described procedure it may finally be determined that for the analyzed case for the concrete class C20/25 the level of fire resistance according to method of 500°C isotherm is $R90$, while for the other classes - $R60$. Thus, it is visible that capacity reduction for the cross-section is faster for higher concrete strength classes.

Other simplified calculation methods for fire conditions on cross-sectional level, for ex.: zone method (2), (18); incremental-iterative approach (2), (10), takes into account reduction in concrete compressive strength with the temperature, but the calculation procedures are then far more complicated and time-consuming. More information about these methods together with some results of conducted calculations may be found in [19].

For advanced method of fire resistance verification for elements/structures made of concrete the models of mechanical response should be based on principles and assumptions of theory of mechanics of structure with accounting for the variation of material properties as a result of temperature action. In analysis there

ratury w czasie trwania pożaru, właściwościami zastosowanego materiału konstrukcyjnego.

W przypadku konstrukcji z betonu ważne są nie tylko właściwości mechaniczne/wytrzymałościowe, które stanowią podstawę projektowania konstrukcyjnego w warunkach normalnej temperatury. Skład betonu (w szczególności rodzaj kruszywa i zastosowane dodatki mineralne – np. popioły lotne) i właściwości fizyczne/termiczne (gęstość objętościowa ρ_0 , ciepło właściwe c_p , współczynnik przewodzenia ciepła λ) odgrywają ważną rolę, gdyż decydują o rozkładzie temperatury w przekrojach elementów konstrukcyjnych i wrażliwości na oddziaływania pożarowe. Jest ona wyrażana jako szybkość zmniejszania podstawowych parametrów wytrzymałościowych wraz z przyrostem temperatury, który powinien ujmować także zmniejszenie odporności żelbetu spowodowane odpadaniem otuliny betonowej od zbrojenia.

Wyniki analizy termicznej w postaci określonych pól temperatur w przekrojach dla danego czasu trwania oddziaływania pożarowego są podstawą do przeprowadzenia analizy mechanicznej i ostatecznie do weryfikacji poziomu odporności pożarowej elementów konstrukcyjnych. Na tym etapie analizy wymagana jest w ogólnym przypadku znajomość zależności funkcyjnych wytrzymałości i odkształcalności betonu spowodowane wzrostem temperatury.

Wpływ właściwości materiałowych betonu występuje zatem we wszystkich składowych metody weryfikacji odporności pożarowej elementów konstrukcyjnych i stąd bardzo ważnym zagadnieniem jest przyjęcie wiarygodnych zależności na każdym etapie analizy.

W podejściach najprostszych, z wykorzystaniem danych tabelarycznych do weryfikacji odporności w sytuacji pożaru dla typowych budynków, sprawdzeniu podlegają jedynie parametry geometryczne przekroju (minimalne wymiary i odległości od osi zbrojenia do powierzchni elementu) i wtedy właściwości betonu nie mają bezpośredniego wpływu na proces weryfikacji. Jednak dopuszcza się pewne modyfikacje podstawowych wartości w tablicach z uwagi na zastosowany rodzaj kruszywa lub poziom wytrzymałości betonu na ściskanie (2).

Przy zastosowaniu uproszczonych metod weryfikacji z obliczeniami na poziomie przekroju, co można znaleźć w normie (2), w Biuletynie fib (10) i w pracy (19), niezbędna jest już pełna znajomość właściwości betonu określonych w funkcji temperatury. W artykule zamieszczono przykładowe obliczenia, które obrazują wpływ właściwości betonu na poziom temperatury w przekrojach elementów konstrukcyjnych (płytach i słupach) przy wykorzystaniu uproszczonej metody szacowania pól termicznych przy oddziaływaniu pożarowym (16). Ilustrują one wpływ wytrzymałości betonu na poziom redukcji nośności z uwagi na siłę podłużną w przekroju słupa w sytuacji pożarowej (dla różnych czasów trwania oddziaływania pożarowego na podstawie krzywej standardowej ISO834) według metody izotermy granicznej 500°C (2) wraz z ostatecznym wnioskowaniem na tej podstawie o poziomie odporności pożarowej.

ought to be taken into account the effects of thermal stresses and strains caused by temperature increase and differences in the temperature. Total concrete strain should then include the following components: thermal strains, immediate strain from the stress (load), creep strain, transient strain.

5. Summary

Behaviour of building structure in fire situation is conditioned by numerous factors: assumed static system, load history of the structure, real course of temperature change during the fire action, properties of applied structural material.

For concrete structures significant are not only mechanical properties that constitute the basis for design at normal temperature conditions. Concrete composition (especially the aggregate type and applied mineral additives – for ex. silica fume) and physical/thermal properties (volume density ρ_0 , specific heat c_p , thermal conductivity coefficient λ) play an important role as they decide about temperature distribution in cross-section of structural elements, about sensitivity to fire actions (expressed by the rate of reduction of basic strength parameters with temperature increase) as well as about resistance to unfavourably effect of concrete cover spalling.

Results of thermal analysis in the form of determined temperature fields within the cross-sections for specific fire duration time constitute the basis for mechanical analysis and finally – for verification of fire resistance for elements. At this stage of analysis the knowledge about relationships between strength and deformability of concrete and temperature is generally required.

Influences of concrete material properties have a cumulative effect within the whole procedure of fire resistance verification for structural elements and hence the question of assuming reliable relationships at each stage of analysis seems to be of great importance.

In simplest approaches based on tabulated data for verification of fire resistance for typical buildings only some geometrical parameters of cross-section (minimal dimensions, minimum distance between reinforcing bars axis and external surface) are to be checked and no concrete properties interfere directly in the verification procedure. However, it is admissible to modify the basic values from the tables with regard to applied aggregate type or the level of compressive strength of concrete (2).

While using simplified verification method with calculations carried out on cross-sectional level, for ex.: (2), (10), (19), it is necessary to possess detailed information as to the whole set of concrete parameters as a function of temperature. In the paper there are included exemplary calculations that illustrate the influence of concrete properties onto temperature values in cross-sections of structural elements (for slabs and columns) with the use of simplified method for temperature field determination for fire actions (16) as well as the effect of concrete compressive strength class onto reduction in load-bearing capacity for column cross-section

Literatura / References

1. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Załącznik do obwieszczenia Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 17 lipca 2015, Dziennik Ustaw RP, Warszawa, dnia 18 września 2015r, poz.1422
2. PN-EN 1992 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-2: Projektowanie z uwzględnieniem bezpieczeństwa pożarowego.
3. PN-EN 1991 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-2: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania na konstrukcje w warunkach pożaru.
4. A. Behnood, H. Ziari: "Compressive strength of HSC at temperatures up to 300C", Proceedings of fib Symposium "Keep concrete attractive", Budapest 2005.
5. C. Poon, S. Azhar, M. Anson, Y. Wong: "Comparison of the Strength and Durability Performance of Normal- and High-strength Pozzolanic Concretes at Elevated Temperatures", Cem. Concr. Res., **31**, (2001).
6. fib Bulletin No. 38: "Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling", Lausanne, April 2007.
7. Y. F. Fu, Y. L. Wong, C. S. Poon, C. A. Tang: "Stress-strain behavior of high-strength concrete at elevated temperatures", Mag. Concr. Res., **57**(9):535–545, November (2005).
8. Proceedings of the 6th International Conference 'Structures in Fire', Michigan, USA, 2010, DEStech Publications Inc., ed. V. Kodur, J.-M. Franssen.
9. Proceedings of the 7th International Conference 'Structures in Fire', Zurich, Switzerland, 2012, ETH Zurich, ed. M. Fontana, A. Frangi, M. Knobloch.
10. fib Bulletin No. 46: "Fire Design of Concrete Structures - structural behavior and assessment", Lausanne, Switzerland, April 2008.
11. D. Gawin, F. Pesavento: "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.
12. 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, Ed. F. Dehn, E. A. B. Koenders.
13. Proceedings of the 3rd International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Paris, September 2013; Materials science, Engineering and Chemistry, Vol.6 – 2013, Ed. P. Pimienta, F. Meftah.
14. I. Hager, T. Tracz: "Influence of elevated temperature on selected properties of high performance concrete modified with the addition of polypropylene fibres", Cement Wapno Beton, 1/2009, 3-10
15. I. Hager: "Methods for assessing the state of concrete in fire damaged structures", Cement Wapno Beton, 4/2009, 168-178
16. V. K. R. Kodur, B. Yu, M. M. S. Dwaikat: "A simplified approach for predicting temperature in reinforced concrete members exposed to standard fire", Fire Safety Journal 56, 2013
17. PN-EN 1992 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Zasady ogólne i zasady dla budynków.
18. K. D. Hertz: "Design of fire exposed concrete structures", Technical Report no. 160, CIB W15/81/20(DK), Technical University of Denmark, Lyngby, 1981.
19. K. Chudyba, S. Seręga : "Structural fire design methods for reinforced concrete members", Technical Transactions - Civil Engineering, zeszyt 1-B/2013, Wyd. Politechniki Krakowskiej.

subjected to the action of bending moment and axial force (for various fire duration time by ISO 834 curve) according to 500°C isotherm method (2) together with final concluding about the fire resistance level.