

DIAGNOSTICS OF CONCRETE ELEMENTS AFTER THE FIRE

DIAGNOSTYKA ELEMENTÓW BETONOWYCH PO POŻARZE

DOI: 10.30540/sae-2018-022

Abstract

The paper presents selected methods for determining the influence of fire on the load capacity of concrete elements – diagnostics and damages arising after application of fire temperatures. The subject may not seem new in terms of the well-known drop in the strength of concrete in fire conditions, but an important aspect discussed in the paper is the fracture toughness of concrete depending on high temperatures.

Destructions, caused by fire temperatures, affects the physical and mechanical properties of concrete, and their size can be assessed using the stress intensity factor. According to our own research, the critical stress intensity factor K_{IC} of concrete decreases faster than the dynamic modulus of elasticity, and also faster than compressive and tensile strength. The paper describes selected methods of diagnostics of construction elements from concrete damaged by fire.

Keywords: diagnostics, fire temperatures, damage, cracks, fractures, non-destructive testing, destructive testing, strength, dynamic modulus of elasticity, stress intensity factor

Streszczenie

W referacie przedstawiono wybrane metody określania wpływu pożaru na nośność elementów betonowych – diagnostykę oraz uszkodzenia powstające po aplikacji temperatur pożarowych. Temat może nie wydaje się nowy w aspekcie, powszechnie znanego spadku wytrzymałości betonu w warunkach pożarowych, jednak istotnym zagadnieniem poruszonym w referacie jest odporność betonu na pękanie w zależności od wysokich temperatur.

Destrukcje powstałe pod wpływem temperatur pożarowych wpływają na właściwości fizykomechaniczne betonu, a ich wielkość może być oceniana za pomocą współczynnika intensywności naprężeń. Z badań własnych wynika, że krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} betonu zmniejsza się szybciej niż dynamiczny moduł sprężystości E_{dyn} , a także szybciej niż wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie.

W referacie opisano wybrane metody diagnostyki elementów konstrukcyjnych z betonu, uszkodzonych przez pożar.

Słowa kluczowe: diagnostyka, temperatury pożarowe, uszkodzenia, zarysowania, spękania, badania nieniszczące, niszczące, wytrzymałość, dynamiczny moduł sprężystości, współczynnik intensywności naprężeń

1. INTRODUCTION

The subject of this paper is the diagnostics of concrete elements after a fire and the assessment of concrete behavior after the application of fire temperatures including fracture mechanics. Proper assessment of concrete fracture toughness based on the conducted tests, by determining the size of the stress intensity factor at fire temperatures, will enable proper assessment of concrete destruction resulting from high temperatures action.

In their professional activity, the authors of this paper have often participated in the development of design documentation for structural elements that

1. WPROWADZENIE

Przedmiotem niniejszego referatu jest diagnostyka elementów betonowych po pożarze i ocena zachowania się betonu po aplikacji temperatur pożarowych z uwzględnieniem mechaniki pękania. Właściwa ocena odporności na pękanie betonu na podstawie prowadzonych badań, poprzez ustalenie wielkości współczynnika intensywności naprężeń w temperaturach pożarowych, umożliwi właściwą ocenę destrukcji betonu wynikającą z działania wysokich temperatur.

W swojej działalności zawodowej autorzy niniejszego referatu niejednokrotnie brali udział w opracowywaniu dokumentacji projektowych elementów

had to meet the requirements of fire resistance to high temperatures in fire conditions. Current methods of designing structures in such conditions as well as their fire diagnostics are based mainly on taking into account the decrease of concrete strength as the temperature increases, not the drop in fracture toughness parameters, which may be important in determining fire resistance, especially of bent concrete structures (slabs, beams).

2. ACTION OF FIRE TEMPERATURES ON THE CONCRETE

Many researchers dealt with this problem, but most of them studied mainly the effect of high temperatures on the strength of concrete, changes in its physical, chemical, mechanical, structural and phase composition.

Transformations that occur in concrete during the increase of fire temperatures are described, among others in [1-3]. They can be accurately determined in particular temperature ranges:

- 105°C – evaporation of free (capillary) water contained in the concrete (chem.) Beginning of dehydration of ettringite $\text{Ca}_6\text{A}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$, causing its reduction in the cement matrix,
- 120÷163°C – decomposition of the gypsum $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – decrease of its content in the cement matrix,
- 180°C – total reduction of physically bound water (eg from capillaries to 0.1 mm) – increase in capillary porosity and microcracks. Dehydration of ettringite and hydrated CSH calcium silicates,
- 190÷300°C – sudden breakout at the edges and scaling of the concrete surface (*spalling*),
- 300°C – the end of ettringite dehydration and further dehydration of CSH, the concrete still has a compact structure,
- 250÷350°C – the drop in strength starts at a temperature of approx. 300°C. Pink-red coloration of the aggregates caused by the oxidation of iron compounds (also about 300°C),
- approx. 500°C – dehydroxylation of portlandite (calcium hydroxide), which converts into a free lime with the possibility of re-binding: $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ and reduction of chemically bound water, followed by rehydration of CaO (atmospheric humidity or pouring concrete water during extinguishing [4]): $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$.
- 600÷700°C – due to the above-mentioned reaction and due to decomposition of calcium carbonate ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) there is a large increase

konstrukcji, które musiały spełniać wymogi odporności ogniowej na działanie wysokich temperatur w warunkach pożaru. Aktualne metody projektowania konstrukcji w takich warunkach, jak i ich diagnostyki po pożarze opierają się głównie na uwzględnianiu spadku wytrzymałości betonu wraz ze wzrostem temperatury, a nie spadku parametrów odporności na pękanie, która może mieć istotne znaczenie w określaniu nośności pożarowej, zwłaszcza zginanych konstrukcji betonowych (płyty, belek).

2. DZIAŁANIE TEMPERATUR POŻAROWYCH NA BETON

Wielu badaczy zajmowało się tym problemem, jednak większość z nich badała głównie wpływ wysokich temperatur na wytrzymałość betonu, zmiany jego cech fizycznych, chemicznych, mechanicznych, strukturalnych i składu fazowego.

Przemiany, które zachodzą w betonie podczas wzrostu temperatur pożarowych opisano m.in. w [1-3]. Można je w miarę dokładnie określić w poszczególnych zakresach temperatur:

- 105°C – odparowanie wody wolnej (kapilarnej) zawartej w betonie (chem.) Początek dehydratacji ettringitu $\text{Ca}_6\text{A}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ powodujący jego redukcję w matrycy cementowej,
- 120÷163°C – rozkład gipsu $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – spadek jego zawartości w matrycy cementowej,
- 180°C – całkowita redukcja wody związanej fizycznie (np. z kapilar do 0,1 μm) – wzrost porowatości kapilarnej i mikropełnięć. Dehydratacja ettringitu i uwodnionych krzemianów wapnia CSH,
- 190÷300°C – nagłe odpajanie na krawędziach i łuszczenie powierzchni betonu (*spalling*),
- 300°C – koniec dehydratacji ettringitu i dalsza dehydratacja CSH, beton zachowuje jeszcze strukturę zwartą,
- 250÷350°C – spadek wytrzymałości rozpoczyna się w temperaturze ok. 300°C. Różowoczerwone przebarwienie kruszywa spowodowane utlenianiem związków żelaza (też ok. 300°C),
- ok. 500°C – dehydroksylacja portlandytu (wodorotlenku wapnia), który przechodzi w wolne wapno posiadające możliwość powtórnego wiązania: $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ i redukcja wody związanej chemicznie, a następnie powtórne nawodnienie CaO (wilgoć atmosferyczna lub polewanie betonu wodą w czasie gaszenia [4]): $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$.
- 600÷700°C – skutek ww reakcji oraz z powodu rozkładu węglanu wapnia ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) następuje duży przyrost objętości związków wap-

- in the volume of calcium compounds (about 40%), which results in increased cracking of concrete and a significant decrease in its strength (chem.). Beginnings and development of cracks and weakening of bonds between aggregate and paste in concrete, possible beginnings of degradation. Increase in porosity of the paste. Concrete construction unsuitable after heating at temperatures of 550÷600°C – strength drops above 50%, and for temperatures of 800°C approx. 80%,
- 573°C – phase transformation of quartz from low temperature variety β into high temperature variety α ; the process of rebuilding the structure occurs with intensive enlargement of the concrete volume (on the aggregate with silicon content) and is the main factor of its low strength during the operation of high temperatures (chem.),
 - 100÷800°C – dehydration of CSH cement matrix components,
 - 350÷900°C – transformations occurring in the aggregate: volume changes, phase transitions and chemical decomposition reactions,
 - 700÷800°C – decomposition of limestone aggregates – calcium carbonate CaCO_3 (chem.),
 - 1200÷1350°C – melting (softening) of concrete.

As stated in [5], concrete heated to a temperature of approx. 500÷600°C, shows such a significant drop in strength that in a fire or after a fire, this concrete can be classified as not useful in terms of structural load capacity. Therefore, the behavior of concrete at a temperature exceeding 600°C, practically no have a grand significance, while the information presented above is used to deepen the knowledge related to the impact of high temperatures on concrete.

The reduction of compressive strength of concrete by approx. 50÷60% at a temperature above 500°C respects the standard 500°C isothermal method [6], according to which static parts of the concrete cross-section are not included in the calculations, where the temperature exceeded this value.

3. STATE OF CONCRETE STRUCTURES AFTER THE FIRE

In the literature on the subject [7], it was noted that concrete is a composite that stands fairly well the effect of significant temperatures. The concrete heats up quite slowly because of the not too high thermal conductivity coefficient, so that the reinforcing steel warms up after some time. Increase in temperature in concrete causes thermal deformation of its components, evaporation of water contained in it, increase in pressure in pores and partial depreciation of

- nia (ok. 40%), co powoduje wzmożone pękanie betonu i znaczny spadek jego wytrzymałości (chem.). Początki i rozwój rys oraz osłabienie więzi między kruszywem i zaczynem w betonie, możliwe początki degradacji. Przyrost porowatości zaczynu. Beton konstrukcyjnie nieprzydatny po nagraniu w temperaturach 550÷600°C – spadki wytrzymałości powyżej 50%, a dla temperatury 800°C ok. 80%,
- 573°C – przemiana fazowa kwarcu z odmiany niskotemperaturowej β w odmianę wysokotemperaturową α ; proces z przebudową struktury zachodzi z intensywnym powiększeniem kubatury betonu (na kruszywie z zawartością krzemu) i jest zasadniczym czynnikiem jego niskiej wytrzymałości podczas działania wysokich temperatur (chem.),
 - 100÷800°C – dehydratacja komponentów matrycy cementowej CSH,
 - 350÷900°C – przemiany zachodzące w kruszywie: zmiany objętości, przemiany fazowe i reakcje rozkładu chemicznego,
 - 700÷800°C – rozkład kruszyw wapiennych – węgla wapnia CaCO_3 (chem.),
 - 1200÷1350°C – topnienie (mięknienie) betonu.

Jak podano w [5] beton ogrzany do temperatury ok. 500÷600°C wykazuje tak znaczny spadek wytrzymałości, że w warunkach pożaru lub po pożarze beton ten można klasyfikować jako nieużyteczny pod kątem nośności konstrukcji. W związku z tym zachowania betonu w temperaturze przekraczającej 600°C praktycznie mają już niewielkie znaczenie, natomiast informacje przedstawione powyżej służą do pogłębienia wiedzy związanej z oddziaływaniem wysokich temperatur na beton.

Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie betonu o ok. 50÷60% w temperaturze ponad 500°C respektuje normowa metoda izotermy 500°C [6], według której nie uwzględnia się w obliczeniach statycznych części przekroju betonowego, gdzie temperatura przekroczyła tę wielkość.

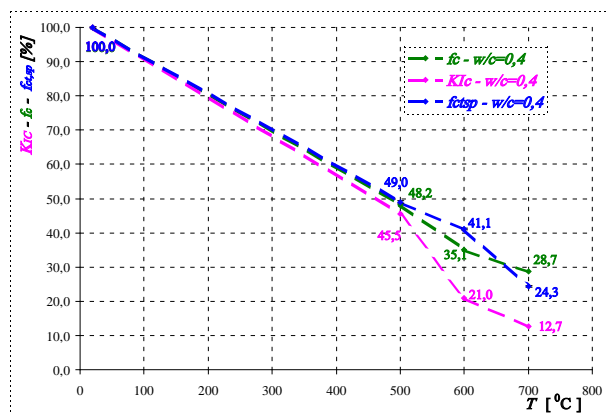
3. STAN BETONU W KONSTRUKCJI PO POŻARZE

W literaturze przedmiotu [7] odnotowano, że beton jest kompozytem znoszącym dość dobrze oddziaływania znacznych temperatur. Beton nagrzewa się dosyć wolno z powodu niezbyt wysokiego współczynnika przewodności cieplnej, przez co stal zbrojeniowa rozgrzewa się dopiero po pewnym czasie. Wzrost temperatury w betonie powoduje odkształcenia termiczne jego składników, odparowywanie zawartej w nim wody, wzrost ciśnienia w porach oraz częściową deprecjację własności mechanicznych

mechanical properties of both concrete and reinforcing steel. Concrete after their rapid heating may undergo the phenomenon of spalling occurring under the temperature of $190\div 350^{\circ}\text{C}$, which manifests itself in the rapid detachment of concrete pieces or peeling of its surface and can expose reinforcement and has direct impact of high temperature on it, as well as decrease or even loss load bearing capacity of reinforced concrete structure [8].

In fire conditions, the heat slowly penetrates into the material, but as a result of the slow pace of its course in the concrete, there are significant differences in temperature between the plane of the element and its interior. The effect of temperature gradients is the degradation of concrete, defined mainly by the change in compressive strength f_c and stretching $f_{ct,sp}$, but also, as our own studies show [9], the reduction in fracture toughness expressed by the stress intensity factor K_{IC} . From the graph (Fig. 1) it follows that, for example at 600°C , the fracture toughness decreases by nearly 79%, while the compressive strength decreases by about 65%, and by tensile strength about 59%.

It can therefore be concluded that the stress intensity factor should be more indicated in the diagnosis of concrete structure after fire than the strength of concrete.



Research works determine the that a process of changing strength depending on the temperature results, among others, from the concrete composition (type of aggregate, of w/c ratio, presence of additives, etc.), but also depends on the speed of heating and of duration of action of temperatures [10]. Gradual degradation of concrete is the result of physico-chemical changes taking place in concrete at fire temperatures [11].

The influence of high fire temperatures on the basic characteristics of concrete is very important.

zarówno betonu, jak i stali zbrojeniowej. Betony po ich gwałtownym podgrzaniu mogą ulegać zjawisku *spallingu* pojawiającego się pod działaniem temperatury $190\div 350^{\circ}\text{C}$, co uzewnętrznia się raptownym odspajaniem kawałków betonu lub złuszczeniem jego powierzchni i może powodować odsłonięcie zbrojenia oraz bezpośrednie oddziaływanie nań wysokiej temperatury, a także spadek lub nawet utratę nośności konstrukcji żelbetowej [8].

W warunkach pożarowych ciepło powoli przenika w głąb materiału, ale w następstwie wolnego tempa jego przebiegu w betonie występują znaczne różnice temperatur między płaszczyzną elementu a jego wnętrzem. Wynikiem gradientów temperatury jest degradacja betonu, definiowana głównie zmianą wytrzymałości na ściskanie f_c i rozciąganie $f_{ct,sp}$, ale też, jak dowodzą badania własne [9], obniżeniem odporności na pękanie, wyrażonej współczynnikiem intensywności naprężeń K_{IC} . Z rysunku 1 wynika, że przykładowo w temperaturze 600°C odporność na pękanie spada o blisko 79%, podczas gdy wytrzymałość na ściskanie spada o ok. 65%, a na rozciąganie ok. 59%. Można zatem uznać, że współczynnik intensywności naprężeń powinien być bardziej wskazany w diagnostyce konstrukcji z betonu po pożarze niż wytrzymałość betonu.

Prace badawcze określają, że proces zmian wytrzy-

Fig. 1. K_{IC} dependencies f_c and $f_{ct,sp}$ – T of concrete with $w/c = 0.4$ at fire temperatures

Rys. 1. Zależności K_{IC} ; f_c i $f_{ct,sp}$ – T betonu o $w/c = 0,4$ w temperaturach pożarowych

małości w zależności od temperatury wynika m.in. ze składu betonu (rodzaj kruszywa, wskaźnik w/c, obecność dodatków itp.), ale zależny jest także od szybkości nagrzewania i czasu działania temperatur [10]. Stopniowa degradacja betonu to wynik przemian fizykochemicznych zachodzących w betonie w temperaturach pożarowych [11].

Wpływ wysokich temperatur pożarowych na podstawowe cechy betonu jest bardzo istotny. Zmniejsza się jego wytrzymałość na ściskanie [12] i roz-

Its compressive [12] and tensile strength (which determines cracking and fracturing), the elastic modulus (also the dynamic module – Fig. 5) is reduced, and the deformation increases, often to the destruction of the structure [13]. Accurate determination of the range and impact of these phenomena should be thoroughly examined in order to develop the best methods for diagnosing as well as designing and making concrete as much as possible, in given conditions and capabilities, fire resistance. The use of fracture mechanics seems to be a promising tool that can contribute to a better understanding of these issues [14-16].

4. ASSESSMENT OF CONCRETE STRUCTURES AFTER FIRE ACTION

The primary purpose of repairing a structure after a fire is to restore it to its condition and destiny precede the condition before the fire. It should be demonstrated that after repair works (cleaning and securing the reinforcement, reconstructing the geometry of concrete cross-sections and other required operations) the structure will be characterized by the same durability as before the fire, as well as the same load-bearing capacity and fire resistance.

The course of proceedings in assessing the technical condition of a concrete structure after a fire [17]:

- a. Establishing data on the course of the fire; this should be done as soon as possible before the facility is started. Valuable information about the course of the fire, its temperature in particular places of the structure can give a visual inspection of various materials in the facility (eg steel, wood, plastics, glass).
- b. Inspection, inventory, measurement, research and analysis of damage – a detailed description of their nature, scope and location.
- c. Damage classification – defining structural defects, scope and impact on the safety level of a building.
- d. Determination of mechanical properties of materials (concrete and reinforcing steel) in the structure taking into account the destructive influence of high temperature using non-destructive and/or destructive test methods.
- e. Final assessment based on the analysis of the technical condition and the level of safety of the structure and considering the economic factor – selection of the most appropriate method of repair or decree on the necessity of demolition of the structure.

In Polish [7] and foreign [3] literature, a 5-level scale of damage categories is presented for the

ciąganie (która determinuje zarysowanie i pękanie), moduł sprężystości (również moduł dynamiczny rys. 5), a wzrastają odkształcenia, niejednokrotnie aż do zniszczenia konstrukcji [13]. Dokładne określenie zasięgu i wpływu tych zjawisk powinno być wnikliwie zbadane w celu opracowania jak najlepszych metod diagnozowania, ale też i projektowania oraz wykonania betonu o jak największej, w danych warunkach i możliwościach, odporności na działanie ognia. Zastosowanie mechaniki pęknięcia wydaje się obiecującym narzędziem, które może przyczynić się do lepszego rozpoznania tych zagadnień [14-16].

4. OCENA KONSTRUKCJI BETONOWEJ PO DZIAŁANIU POŻARU

Podstawowym celem naprawy konstrukcji po pożarze jest przywrócenie jej do stanu i przeznaczenia poprzedzającego stan przed pożarem. Należy wykazać, że po pracach naprawczych (oczyszczeniu i zabezpieczeniu zbrojenia, odtworzeniu geometrii przekrojów betonowych i innych wymaganych zabiegach) konstrukcja charakteryzować się będzie taką samą trwałością, jak przed pożarem, a także taką samą nośnością i odpornością ogniową.

Tok postępowania w ocenie stanu technicznego konstrukcji betonowej po pożarze [17]:

- a. Ustalenie danych dotyczących przebiegu pożaru; należy to zrobić jak najprędzej, przed rozpoczęciem porządkowania obiektu. Cennych wiadomości o przebiegu pożaru, jego temperaturze w poszczególnych miejscach konstrukcji mogą dać oględziny różnych materiałów w obiekcie (np. stali, drewna, tworzyw sztucznych, szkła).
- b. Oględziny, inwentaryzacja, pomiary, prace badawcze i analizy zaistniałych uszkodzeń – szczegółowe określenie ich charakteru, zakresu i lokalizacji.
- c. Klasyfikacja uszkodzeń – zdefiniowanie defektów konstrukcji, zakresu i wpływu na poziom bezpieczeństwa budowli.
- d. Określenie właściwości mechanicznych materiałów (betonu i stali zbrojeniowej) w konstrukcji z uwzględnieniem destrukcyjnego wpływu wysokiej temperatury przy zastosowaniu nieniszczących lub/i niszczących metod badawczych.
- e. Ocena końcowa dokonana na podstawie analizy stanu technicznego i poziomu bezpieczeństwa konstrukcji oraz przy rozważeniu czynnika ekonomicznego – wybór najwłaściwszej metody naprawy lub orzeczenie o konieczności rozbioru konstrukcji.

W literaturze polskiej [7] i zagranicznej [3] prezentowana jest pięciostopniowa skala kategorii uszko-

standard of visual assessment of concrete after a fire.

Simplified visual classification of fire damages:

0. "Cosmetic" repair – thermally undamaged concrete (discoloration on the surface),
1. Surface repair – damage to concrete surface and cover, dropping of lagging with limited range and range, presence of soot and entrenchment, visible network of micro-cracks.
2. General repair – moderate cracks (> 0.5 mm) and concrete chippings (up to 10 mm in size), slight deformation and corrosion on the surfaces of reinforcing steel rods, up to 25% of exposed reinforcing bars, surface color pink red.
3. Basic repair – structural damage at the cross-section level (significant cracks and defects of the reinforcement concrete cover), structural deformations lowering the bearing capacity or significant displacements causing lack of proper connection of adjacent elements or parts of the structure, up to 50% of exposed reinforcing bars, color of the pink surface red or whitish-gray.
4. Main repair (overhaul) – structural damage at the level of elements or parts of the structure (significant and serious damage to structural elements, local damage and large deformations), advanced loss of concrete cover, damage to the squeezed zone of the elements and exposure or damage to the reinforcement, color whitish – Gray.

Assessment of concrete structure after a fire can be made on the basis of non-destructive and destructive tests. Non-destructive testing includes: visual assessment of the construction status, inventory of corroded areas and locations where cracks and fractures, sclerometric, radiological, acoustic and electromagnetic methods are found

5. VISUAL ASSESSMENT OF CONCRETE AFTER FIRE

An ad hoc method of assessing the size of the fire temperature affecting the concrete constructions is the visual assessment carried out at the site of the incident. This assessment can be considered as preliminary and auxiliary, but gives a specific view of fire damage. This preliminary assessment of the suitability of the concrete structure after the fire, which can be visually estimated on the basis of the color of the heated concrete, should set the directions for further actions and more detailed tests.

dzeń dla ujednoczenia wzrokowej oceny betonu po pożarze.

Uproszczona wizualna klasyfikacja uszkodzeń pożarowych:

0. Naprawa „kosmetyczna” – beton nieuszkodzony termicznie (przebarwienia na powierzchni).
1. Naprawa powierzchniowa – uszkodzenia powierzchni i otuliny betonowej, odpadanie otuliny o ograniczonym zasięgu i zakresie, obecność sadzy i okopceń, widoczna sieć mikrozarostów.
2. Naprawa ogólna – umiarkowane zarysowania (o rozwarości $> 0,5$ mm) i odpryski otuliny betonowej (wielkości do 10 mm), niewielkie deformacje i korozja na powierzchniach prętów stali zbrojeniowej, do 25% odkrytych prętów zbrojeniowych, kolor powierzchni różowoczerwony.
3. Naprawa zasadnicza – uszkodzenia konstrukcyjne na poziomie przekroju (znaczne zarysowania i ubytki otuliny betonowej zbrojenia), deformacje konstrukcji obniżające nośność lub znaczne przemieszczenia powodujące brak właściwego powiązania ze sobą przyległych elementów lub części konstrukcji, do 50% odkrytych prętów zbrojeniowych, kolor powierzchni różowoczerwony lub białawoszary.
4. Naprawa główna (remont kapitalny) – uszkodzenia konstrukcyjne na poziomie elementów lub części konstrukcji (znaczne i poważne uszkodzenia elementów konstrukcyjnych, z lokalnym zniszczeniem i dużymi deformacjami), zaawansowana utrata otuliny betonowej, uszkodzenia strefy ściskanej elementów i odsłonięcie bądź uszkodzenie zbrojenia, kolor białawoszary.

Oceny konstrukcji betonowej po pożarze można dokonać na podstawie badań nieniszczących i niszczących. Do badań nieniszczących zalicza się: ocenę wizualną stanu konstrukcji, inwentaryzację obszarów skorodowanych oraz miejsc, gdzie znajdują się rysy i pęknięcia, metody sklerometryczne, radiologiczne, akustyczne oraz metody elektromagnetyczne.

5. OCENA WIZUALNA BETONU PO POŻARZE

Doraźną metodą oceny wielkości temperatury pożarowej oddziałującej na konstrukcję betonową jest ocena wizualna przeprowadzona w miejscu zdarzenia. Ocena ta może być traktowana jako wstępna i pomocnicza, ale dająca określony pogląd na uszkodzenia wywołane pożarem. Ta wstępna ocena przydatności konstrukcji betonowej po pożarze, którą można wizualnie oszacować na podstawie zabarwienia wygrzanego betonu, powinna wyznaczać kierunki dalszych działań i bardziej szczegółowych badań.

In the visual assessment, the coloration of the concrete surface, resulting from fire temperatures, is important. In the literature [18], the color of the concrete surface was specified depending on the size of the fire temperature:

Temperature [°C]: Color:

- up to 120°C - gray,
- up to 300°C - light gray,
- up to 500°C - light gray with a shade of pink,
- up to 600°C - light gray with a yellow shade.

Based on own research, after heating concrete samples at temperatures of 500°C, 600°C and 700°C, colors of concrete were obtained, shown in the pictures Figures 2 and 3. The tests were carried out on 70 × 15 × 8 cm on concrete samples heated to appropriate temperatures in a chamber furnace. The rate of samples heating to the set temperature was 4.3÷6.7°C/min. and it was comparable with of datas reported in the literature [19-20] and RILEM recommendations [21]. For reasons described in the literature, explosive phenomena of heated concrete samples [22], it was not decided to heat them according to the standard standard time-temperature heating curve [23], according to which the initial temperature rise rate is dizzy (115°C/min) and known from practice are cases of sample explosion and destruction of the furnace.

W ocenie wizualnej istotne są przebarwienia powierzchni betonu powstałe wskutek działania temperatur pożarowych. W literaturze [18] podano zabarwienie powierzchni betonu w zależności od wielkości temperatury pożarowej:

Temperatura [°C]: Zabarwienie:

- do 120°C - szare,
- do 300°C - jasnoszare,
- do 500°C - jasnoszare z odcieniem różowym,
- do 600°C - jasnoszare z odcieniem żółtym.

Na podstawie badań własnych, po ogrzewaniu próbek betonowych w temperaturach 500°C, 600°C i 700°C, otrzymano zabarwienia betonu pokazane na zdjęciach rysunkach 2 i 3. Badania prowadzono na próbkach betonowych o wymiarach 70 × 15 × 8 cm, nagrzewanych do odpowiednich temperatur w piecu komorowym. Szybkość nagrzewania próbek do zadanej temperatury wynosiła 4,3÷6,7°C/min, i była porównywalna z wielkościami podawanymi w literaturze przedmiotu [19, 20] oraz zaleceniami RILEM [21]. Z powodów, opisywanych w literaturze zjawisk eksplozywnych nagrzewanych próbek betonowych [22] nie zdecydowano się na ich wygrzewanie wg nominalnej standardowej krzywej nagrzewania „czas-temperatura” [23], według której początkowe tempo przyrostu temperatury jest zawrotne (115°C/min) i znane z praktyki są przypadki wystąpienia eksplozji próbek oraz zniszczenia pieca.

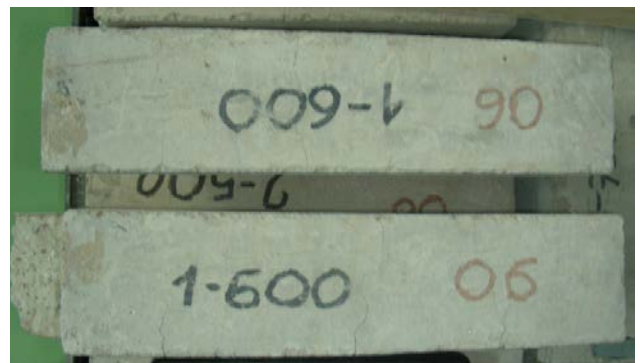
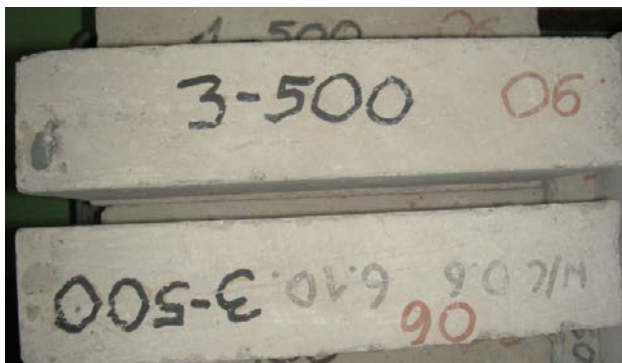


Fig. 2. View of concrete samples $w/c = 0.6$ after application of fire temperatures

Rys. 2. Widok próbek betonowych $w/c = 0,6$ po aplikacji temperatur pożarowych

The slower pace of heating is also motivated by the fact that in many practical design cases (eg: auditoria, sports halls or other facilities with low fire load) it is not economically justified to use a nominal curve [24]).

Analysis of the color of the samples (Figs. 2 and 3) indicates that in the case of applying the temperature of 500°C, the concrete color with $w/c = 0.5$ and $w/c = 0.6$ is basically consistent with the literature data [18].

Regarding samples after applying the temperature of 600°C, the compatibility of the color with the data from the literature is already rather less pronounced, while the yellow shade is more visible on the samples heated at 700°C.

Generalizing – as the temperature rises, differences in the color of the concrete are visible. Compared to the color of concrete at normal temperature, in which the color is determined to be gray, the color of the samples changes as the temperature rises: after a temperature of 500°C, the color changes to light gray with a slight pink shade, at a temperature of 600°C – light gray with a slight shade of yellow, then at 700°C in light gray with a more pronounced yellow color.

Wolniejsze tempo nagrzewania jest umotywowane również tym, że w wielu praktycznych przypadkach projektowania (np. hal widowiskowych, sportowych lub innych obiektów o niskim obciążeniu ogniowym) nie jest ekonomicznie uzasadnione stosowanie krzywej nominalnej [24].

Analizy zabarwienia próbek (rys. 2 i 3) wskazują, że w przypadku aplikacji temperatury 500°C zabarwienie betonu o $w/c = 0,5$, jak i $w/c = 0,6$ jest w zasadzie zgodne z danymi literaturowymi [18].

Odnośnie próbek po aplikacji temperatury 600°C zgodność koloru z danymi z literatury jest już mniej wyraźna, a żółty odcień widoczny jest bardziej na próbkach wygrzewanych w temperaturze 700°C.

Uogólniając, wraz ze wzrostem temperatury widoczne są różnice w kolorze betonu. W porównaniu do zabarwienia betonu w temperaturze normalnej, w której barwę określa się jako szarą, wraz ze wzrostem temperatury zmienia się kolor próbek: po działaniu temperatury 500°C kolor zmienia się w jasnoszary z lekkim odcieniem różowym, po temperaturze 600°C w jasnoszary z lekkim odcieniem żółtym, a następnie w temperaturze 700°C w jasnoszary z wyraźniejszym żółtym zabarwieniem.



Fig. 3. View of concrete samples $w/c = 0.5$ after application of fire temperatures: a) 500°C, b) 600°C, c) 700°C, d) breakthroughs of the sample from the Figure c)

Rys. 3. Widok próbek betonowych $w/c = 0,5$ po aplikacji temperatur pożarowych: a) 500°C, b) 600°C, c) 700°C, d) przełomy próbki z rysunku c)

One should also pay attention to other symptoms of fire temperatures on concrete such as cracks, fractures, spalling and surface peeling of concrete [25]. In Figure 3d shows the fractures of the concrete sample with $w/c = 0.5$ visible in Figure 3c, after applying the temperature of 700°C – in addition to the mentioned damage, longitudinal cracks are also noticeable. In breakthroughs, damages in concrete under the influence of fire temperature, were formed mainly on the boundary of coarse grains and paste. This is proof of the drop in strength under the influence of high temperatures, especially the transition zone between the matrix and the aggregate, but also the decrease in the strength of the paste and cement mortar contained in the concrete.

6. NON-DESTRUCTIVE TESTING

If it is not possible to take samples boreholes from the structure, it is possible and necessary to pre-evaluate changes in the strength of concrete in the surface layers of structural elements after a fire by means of sclerometer tests using a Schmidt hammer. This device certainly knows and has every construction expert, so the method will not be discussed here.

Non-destructive diagnostic tests of concrete objects also use the ultrasound method, which has been known for quite a long time. A relatively new, little-known method is the impact-echo impulse method (hammer method). The publication [26] confirmed experimentally that this method can be used to assess the degree of degradation of “post-fire” concrete. This is a future issue, because further research is necessary to determine experimentally the relationship between signal parameters (amplitude, frequency, waveform time, reflected wave speed) and mechanical properties of the material under investigation. The devices for this research are so specialized and expensive that the average expert has no possibility of using them directly, and also not all technical universities and laboratories have them.

An important test, which can be done in a very simple way, but with the help of specialist equipment, is to determine the dynamic modulus of elasticity of concrete. The test of the dynamic elastic modulus is a non-destructive test, which is aimed at demonstrating the destructive changes occurring in the concrete, both under the influence of the variable w/c ratio as well as under the influence of temperature. In this case, the word “non-destructive” refers to the samples, unfortunately, when evaluating an existing structure, the samples must be cut out. The quantity

Należy też zwrócić uwagę na inne objawy oddziaływania temperatur pożarowych na beton, jak spękania, zarysowania, *spalling*, odpryski i złuszczenia powierzchniowe betonu [25]. Na rysunku 3d pokazano przełomy próbki betonu o $w/c = 0,5$ widocznej na rysunku 3c, po aplikacji temperatury 700°C – oprócz wymienionych uszkodzeń zauważalne są również spękania podłużne. W przełomach, uszkodzenia w betonie pod działaniem temperatury pożarowej powstały głównie na granicy ziaren kruszywa grubego i zaczynu. Jest to dowód spadku wytrzymałości pod wpływem wysokich temperatur, zwłaszcza strefy przejściowej pomiędzy matrycą a kruszywem, ale także spadku wytrzymałości zaczynu i zaprawy cementowej zawartych w betonie.

6. BADANIA NIENISZCZĄCE

W przypadku braku możliwości pobrania odwiertów z konstrukcji, można i należy wstępnie oszacować zmiany wytrzymałości betonu w warstwach powierzchniowych elementów konstrukcji po pożarze za pomocą badań sklerometrycznych młotkiem Schmidta. Urządzenie to na pewno zna i posiada każdy rzeczoznawca budowlany, w związku z czym metoda nie będzie tu omawiana.

W nieniszczących badaniach diagnostycznych obiektów betonowych wykorzystuje się też, znaną już od dość dawna, metodę ultradźwiękową. Stosunkowo nową, mało jeszcze u nas znaną metodą, jest metoda impulsowa impact-echo (metoda młoteczkowa). W publikacji [26] potwierdzono doświadczalnie, że metoda ta może być wykorzystana do oceny stopnia degradacji betonu „popożarowego”. Jest to kwestia przyszłościowa, ponieważ konieczne są dalsze badania w celu określenia na drodze doświadczalnej wzajemnych relacji pomiędzy parametrami sygnału (amplituda, częstotliwość, czas przejścia fali, prędkość fali odbitej) a właściwościami mechanicznymi badanego materiału. Urządzenia do tych badań są na tyle specjalistyczne i drogie, że przeciętny rzeczoznawca nie ma możliwości bezpośredniego ich stosowania, a też i nie wszystkie uczelnie techniczne oraz laboratoria je posiadają.

Ważnym badaniem, które można wykonać w bardzo prosty sposób, ale za pomocą specjalistycznej aparatury, jest ustalenie dynamicznego modułu sprężystości betonu. Badanie dynamicznego modułu sprężystości to badanie nieniszczące, które ma na celu wykazanie zmian destrukcyjnych powstałych w betonie zarówno pod wpływem zmiennego wskaźnika w/c , jak również pod działaniem temperatury. W tym przypadku

of destructions created in the macrostructure of concrete affects changes in wavelength and resonance frequency. Depending on the w/c ratio and temperature changes, defects in the concrete are formed to varying degrees.



słowo „nieniszczące” odnosi się do próbek, niestety w przypadku oceny istniejącej konstrukcji próbki trzeba z niej wyciąć. Ilość powstałych destrukcji w makrostrukturze betonu wpływa na zmiany długości fal i wielkość częstotliwości rezonansowej. W zależności od wskaźnika w/c i zmian temperatury w różnym stopniu kształtują się defekty w betonie.

Fig. 4. Apparatus for testing the dynamic modulus of elasticity with the sample under test

Rys. 4. Aparatura do badania dynamicznego modułu sprężystości wraz z badaną próbką

The measuring device shown in Figure 4 calculates the resonant frequency of the samples during tensile, twisting and bending. Because these are non-destructive tests of samples, at first should determine the dynamic modulus of elasticity, and then other tests can be performed on the same samples, eg strain measurements and tensile strength for bending and compression.

The only data to enter is the dimensions and mass of the sample. The results of measurements of $E_{L_{dyn}}$ and transverse elastic modulus $E_{T_{dyn}}$ are read automatically from the meter of the measuring apparatus. The example of results from the work [9] are shown in the Figures 5 and 6 graphs. In these studies, there were clear relationships: with the increase of temperature and concrete w/c ratio, the size of dynamic elastic modulus decreased and the decrease of longitudinal elasticity modulus is very similar to the drop in the strength of concrete, both for compression and stretching, especially after application of temperatures of 600°C and 700°C.

The presented apparatus can be used to test both rectangular and cylindrical shapes, which is important in the collection of samples; it is known that sample-borehole is easier to pick up and does not require such processing as a rectangular one.

The instructions do not specify the minimum or maximum dimensions of the samples, it is important that the length of the sample is at least twice as large as its width or diameter. For possible comparative tests it can be assumed that prismatic samples should

Pokazany na rysunku 4 przyrząd pomiarowy oblicza częstotliwość rezonansową próbek przy rozciąganiu, skręcaniu i zginaniu. Ponieważ są to badania nieniszczące próbek, w pierwszej kolejności należy ustalić dynamiczny moduł sprężystości E_d , a następnie na tych samych próbkach można wykonać inne badania, np. pomiary odkształceń oraz wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu i na ściskanie.

Jedyne dane, jakie należy wprowadzić, to wymiary i masa próbki. Wyniki pomiarów dynamicznego modułu sprężystości podłużnej $E_{L_{dyn}}$ i poprzecznej $E_{T_{dyn}}$ odczytywane są automatycznie z licznika aparatury pomiarowej. Przykładowe wyniki badań z pracy [9] przedstawiono na rysunkach 5 i 6. W badaniach tych stwierdzono wyraźne zależności: wraz ze wzrostem temperatury oraz wskaźnika w/c betonu zmniejszała się wielkość dynamicznego modułu sprężystości oraz spadek modułu sprężystości podłużnej jest bardzo zbliżony do spadku wytrzymałości betonu zarówno na ściskanie, jak i rozciąganie, zwłaszcza po aplikacji temperatur 600°C i 700°C.

W prezentowanym aparacie można badać próbki o kształcie zarówno prostokątnym, jak i walcowym, co ma istotne znaczenie w pobieraniu próbek; wiadomo, że próbki-odwierty są łatwiejsze do pobrania i nie wymagają takiej obróbki jak prostokątne.

Instrukcja nie podaje minimalnych lub maksymalnych wymiarów próbek, ważne jest, aby długość próbki była co najmniej dwukrotnie większa niż jej szerokość lub średnica. Dla ewentualnych badań porównawczych można przyjąć, że próbki przyzma-

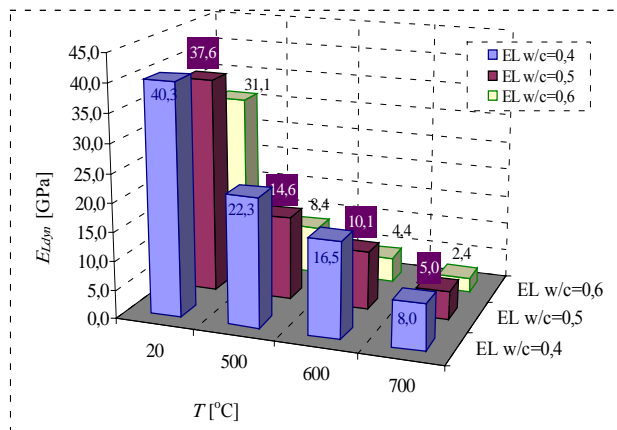


Fig. 5. Dependences of the dynamic longitudinal elasticity modulus EL_{dyn} from T and w/c

Rys. 5. Zależności dynamicznego modułu sprężystości podłużnej EL_{dyn} od T i w/c

not be smaller than $16 \times 4 \times 4$ cm, and cylindrical ones with a diameter of min. 50 mm.

7. DESTRUCTIVE TESTING

These tests are the most reliable, but it is not always possible to take samples from the construction, especially those weakened by the action of high fire temperatures.

In the case of the possibility to take samples, the basic method of determining the compressive strength of concrete is the sclerometric method, supported and correlated with the results of destructive tests of compressive strength of samples. Tensile strength is very important (tested most often by bending or Brazilian method for splitting), because as mentioned, fracture toughness of concrete falls faster in fire conditions than its compressive and tensile strength. Knowing the size of tensile strength, we can calculate the basic fracture toughness parameter – K_{IC} stress intensity factor, and thus realistically estimate the suitability of concrete degraded by fire for possible further exploitation.

In this group, one should also mention petrographic studies, which according to publication [3] are the most important and decisive in determining the depth of fire damage in concrete. They should be performed by experienced of petrographs in the laboratory using optical microscopes. Concrete samples are subjected to low-power visual microscopy and then more thoroughly examined using high-powered microscopes. A petrographic study is invaluable in determining the history of concrete heating, because it can determine whether the characteristics observed

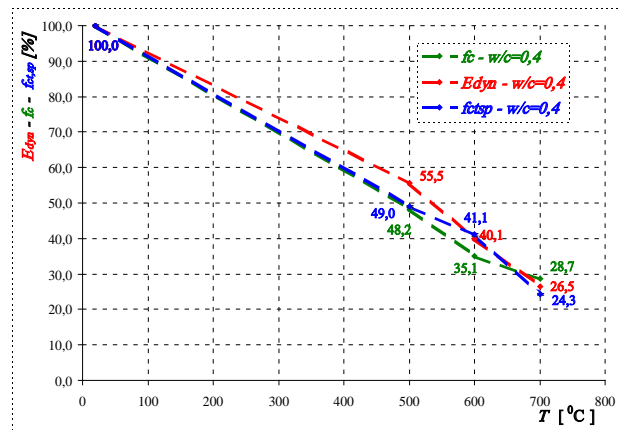


Fig. 6. Dependences of EL_{dyn} ; f_c and $f_{ct,sp}$ – T of concrete with $w/c = 0.4$ at fire temperatures

Rys. 6. Zależności EL_{dyn} ; f_c i $f_{ct,sp}$ – T betonu o $w/c = 0.4$ w temperaturach pożarowych

tyczne nie powinny być mniejsze niż $16 \times 4 \times 4$ cm, a walcowe o średnicy min. 50 mm.

7. BADANIA NISZCZĄCE

Badania te są najbardziej wiarygodne, jednak nie zawsze możliwe jest pobranie próbek z konstrukcji, zwłaszcza już osłabionej działaniem wysokich temperatur pożarowych.

W przypadku możliwości pobrania próbek, również podstawową metodą określenia wytrzymałości na ściskanie betonu jest metoda sklerometryczna, poparta i skorelowana z wynikami niszczących badań wytrzymałości na ściskanie próbek. Bardzo ważna jest wytrzymałość na rozciąganie (badana najczęściej przy zginaniu lub metodą brazylijską przy rozłupywaniu), gdyż jak wspomniano, odporność na pękanie betonu spada szybciej w warunkach pożaru niż jego wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie. Znając wielkość wytrzymałości na rozciąganie, możemy wyliczyć podstawowy parametr odporności na pękanie – współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} , a tym samym realnie oszacować przydatność betonu zdegradowanego przez pożar do ewentualnej dalszej eksploatacji.

W tej grupie należy jeszcze wymienić badania petrograficzne, które według publikacji [3] są najważniejsze i rozstrzygające w określaniu głębokości uszkodzeń ogniowych w betonie. Powinny być wykonywane przez doświadczonych petrografów w laboratorium przy użyciu mikroskopów optycznych. Próbki betonu poddaje się wizualnemu badaniu mikroskopowemu o małej mocy, a następnie bardziej szczegółowemu badaniu za pomocą mikroskopów

are actually caused by high temperature, and not by some other factor.

In addition to the color changes of the aggregate, the heating temperature can be compared with changes in the cement matrix and physical characteristics such as cracking and microcracks. These tests may determine, among others: approximate classification of coarse and fine aggregate, type of cement and its content, w/c ratio, porosity, depth of carbonation. The recognition of microscopic features allows printing of thermal contours by the depth of individual concrete elements. You can plot outlines for 105°C (increased porosity of cement matrix), 300°C (red discoloration of aggregate), 500°C (cement matrix becomes completely isotropic), 600°C (transition α - to β -quartz), 800°C (calcination of limestone) and 1200°C (first signs point).

8. SUMMARY

The paper discusses only a part of the extensive range of concrete elements after a fire, interested in this issue, we refer to numerous publications in this field, including: [27, 28].

This article presents the possibility of using the K_{IC} factor as a good indicator of the level of destruction of concrete exposed to high temperatures. It can therefore be concluded that the stress intensity factor should be more widely recommended for determining the fire resistance of elements in the diagnosis of concrete structures (especially those working on bending) than the strength of concrete.

The destructive processes created in the structure of concrete after the fire temperature can be determined also by measuring the dynamic modulus of elasticity of E_{dyn} . The quantity of destruction in the macrostructure of concrete influence on changes in wavelength and resonance frequency. Depending on the w/c ratio and temperature changes, defects in the concrete are formed to varying degrees. There is a significant dependence of the dynamic modulus of elasticity, deformation of samples and of stress intensity factor of concrete from the w/c ratio and temperature.

In the diagnosis of concrete structures after a fire, it is also possible to take advantage of very similar (nearly identical at 600°C and 700°C) relative (percentage) reduction of the dynamic modulus of elasticity to a decrease in compressive and tensile strength.

o dużej mocy. Badanie petrograficzne jest nieocenione w ustaleniu historii nagrzewania betonu, ponieważ może określić, czy cechy obserwowane wizualnie są faktycznie spowodowane wysoką temperaturą, a nie jakimś innym czynnikiem.

Oprócz zmian koloru kruszywa, temperaturę ogrzewania można porównać ze zmianami w matrycy cementowej i cechami fizycznymi, takimi jak pęknięcie i mikropęknięcia. Badania te mogą określić m.in.: przybliżoną klasyfikację kruszywa grubego i drobnego, rodzaj cementu i jego zawartość, wskaźnik w/c, porowatość, głębokość karbonatyzacji. Rozpoznanie cech mikroskopowych umożliwia drukowanie konturów termicznych przez głębokość poszczególnych elementów betonowych. Można wykreślić kontury dla 105°C (zwiększona porowatość matrycy cementowej), 300°C (czerwone przebarwienia kruszywa), 500°C (matryca cementowa staje się całkowicie izotropowa), 600°C (przejście α - do β -kwarcu), 800°C (kalcynacja wapienia) i 1200°C (pierwsze oznaki topnienia).

8. PODSUMOWANIE

W referacie omówiono tylko część z bogatego wachlarza badań elementów betonowych po pożarze, zainteresowanych tym zagadnieniem odsyłamy do licznych publikacji w tym zakresie, m.in.: [27, 28].

Niniejszy artykuł przedstawia możliwości zastosowania współczynnika K_{IC} jako dobrego wskaźnika poziomu destrukcji betonu poddanego wpływom wysokich temperatur. Można zatem uznać, że współczynnik intensywności naprężeń powinien być szerzej zalecany do określania spadku odporności ogniowej elementów w diagnostyce konstrukcji z betonu (zwłaszcza pracujących na zginanie) niż wytrzymałość betonu.

Procesy destrukcyjne powstałe w strukturze betonu po oddziaływaniu temperatury pożarowej można określić również przez pomiar dynamicznego modułu sprężystości E_{dyn} . Ilość destrukcji w makrostrukturze betonu wpływa na zmiany długości fal i wielkość częstotliwości rezonansowej. W zależności od wskaźnika w/c i zmian temperatury w różnym stopniu kształtują się defekty w betonie. Występuje istotna zależność dynamicznego modułu sprężystości, odkształceń próbek oraz współczynnika intensywności naprężeń betonu od wskaźnika w/c i temperatury.

W diagnostyce konstrukcji betonowych po pożarze można korzystać również z zależności bardzo zbliżonego (niemal identycznego w temperaturach 600°C i 700°C) względnego (procentowego) zmniejszenia dynamicznego modułu sprężystości do spadku wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie.

It is indicated to develop, between others using the results of the work [9], of the program of further tests of fracture toughness of concrete at high temperatures. Based on previous research and analyzes, it can be concluded that there is a need to develop guidelines that take into account the use of fracture mechanics in the diagnosis of concrete structures (especially which are bending) after fire temperatures.

Wskazane jest opracowanie, m.in. z wykorzystaniem wyników pracy [9], programu dalszych badań odporności na pęknięcie betonu w wysokich temperaturach. Na podstawie dotychczasowych badań i analiz można stwierdzić, że istnieje potrzeba opracowania wytycznych uwzględniających stosowanie mechaniki pęknięcia w diagnostyce konstrukcji betonowych (zwłaszcza zginanych) po działaniu temperatur pożarowych.

References

- [1] Kowalski R.: *Obliczeniowa ocena nośności zginanych elementów żelbetowych w sytuacji pożaru*. Politechnika Warszawska. Prace naukowe – Budownictwo. Z. 149. Warszawa 2008.
- [2] Ogrodnik P., Zegardło B., Halicka A.: *Wstępna analiza możliwości zastosowania odpadów ceramiki sanitarnej w funkcji kruszywa do betonów pracujących w warunkach wysokich temperatur*. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, nr 2012/1, s. 49-56.
- [3] Concrete Society: *Assessment, Design and Repair of Fire-Damaged Concrete Structures*. Technical Report No. 68, The Concrete Society, London, United Kingdom 2008.
- [4] Runkiewicz L., Sołomonow W., Kuźniecowa I.: *Ocena bezpieczeństwa konstrukcji żelbetowych po pożarze*, Inżynieria i Budownictwo nr 12/1993, s. 518-522.
- [5] Kowalski R., *Zabezpieczenie pożarowe konstrukcji żelbetowych*. XXV Konferencja Ogólnopolska „Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji” Szczyrk 2010, t. 2. s. 183-232.
- [6] PN-EN 1992-1-2: 2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu; Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.
- [7] Hager I., Chudyba K.: *Metodyka oceny stanu technicznego konstrukcji z betonu po pożarze*. Przegląd Budowlany 6/2010, s. 40-44.
- [8] Kosiorek M., Pogorzelski J.A., Laskowska Z., Pilich K.: *Odporność ogniowa konstrukcji budowlanych*. Arkady, Warszawa 1988.
- [9] Plechawski S.: *Wpływ temperatur pożarowych na wybrane parametry struktury betonów*. Praca doktorska. Politechnika Lubelska, WBiA, Lublin 2017.
- [10] Thelandersson S.: *Effect of High Temperatures on Tensile Strength of Concrete*. Bulletin 26, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden 1972.
- [11] Shah A.H., Sharma U.K., Bhargava P.: *Outcomes of a major research on full scale testing of RC frames in post earthquake fire*. Construction and Building Materials 155 (2017) p. 1224-1241.
- [12] Malhotra H.L.: *The effect of temperature on the compressive strength of concrete*. Magazine of Concrete Research Vol 8, 1956, No 23, p. 85-94.
- [13] Kodur V.: *Properties of Concrete at Elevated Temperatures*. Hindawi Publishing Corporation, ISRN Civil Engineering, Article ID 468510, 15, Volume 2014.
- [14] Duan K., Hu X., Wittmann F.H.: *Boundary effect on concrete fracture and non-constant fracture energy distribution*. Engineering Fracture Mechanics 70, Australia, Zurich 2003, p. 2257-2268.
- [15] Elices M., Planas J.: *Fracture Mechanics Parameters of Concrete*. Advanced Cement Based Materials, Madrid, 1996, p. 116-127.
- [16] Mi Z., Hu Y., Li Q.: An Z.: *Effect of curing humidity on the fracture properties of concrete*. China. Construction and Building Materials 169 (2018) p. 403-413.
- [17] Chudyba K.: *Bezpieczeństwo pożarowe konstrukcji z betonu według eurokodów (norm PN-EN)*, Wydawnictwo CNBOP-PIB, BiTP Vol. 41 Issue 1, 2016, pp. 85-96,
- [18] Bednarek Z., Krzywobłocka-Laurów R., Drzymała T.: *Wpływ wysokiej temperatury na strukturę, skład fazowy i wytrzymałość betonu*. Zeszyty Nauk. SGSP Nr 38/2009, s. 5-27.
- [19] Baker G.: *The effect of exposure to elevated temperatures on the fracture energy of plain concrete*. (Materials and Structures, Vol. 29, July 1996, p. 383-388).
- [20] Bazant Z.P., Prat P.C.: *Effect of Temperature and Humidity on Fracture Energy of Concrete*. ACI Materials Journal – July-August 1988.

- [21] RILEM TC 129-MHT: *Test Methods for Mechanical Properties Concrete at High Temperatures*. Recommendations: Part 6 – Thermal Strain. Materials and Structures, Supplement March, 1997, p. 17-21.
- [22] Olsen N.H.: *Heat-induced Explosion in High Strength Concrete*. Copyright © by Nicholaus Holkmann Olsen, 1990, Afdelingen for Baerende Konstruktioner Danmarks Tekniske Hojskole Lyngby.
- [23] PN-B-02851-1:1997: Ochrona przeciwpożarowa budynków. Badania odporności ogniowej elementów budynków. Wymagania ogólne i klasyfikacja.
- [24] Smardz P.: *Wyznaczanie odporności ogniowej elementów konstrukcji wg Eurokodów*. Ochrona Przeciwpożarowa 1/2010.
- [25] Ma Q., Guo R., Zhao Z., Lin Z., He K.: *Mechanical properties of concrete at high temperature A review*. China. Construction and Building Materials 93 (2015) p. 371-383.
- [26] Hager I., Krzemień K.: *Metoda impact-echo i wstępna próba jej zastosowania do oceny stopnia uszkodzeń betonu poddanego działaniu wysokiej temperatury*. XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna „Awarie Budowlane”, Międzyzdroje 2013.
- [27] Hager I., *Metody oceny stanu betonu w konstrukcji po pożarze*, Dwumiesięcznik: Cement Wapno Beton, lipiec/sierpień 2009 r., nr 4, s. 167-178.
- [28] Chudyba K., *Uszkodzenia pożarowe betonu konstrukcyjnego*, Inżynieria i Budownictwo, nr 1/2010, s. 30-33.

Acknowledgments:

The work was financed by Lublin University of Technology

Podziękowania:

Praca była finansowana przez Politechnikę Lubelską