

Dr inż. Izabela Hager

Politechnika Krakowska, Katedra Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli

Metody oceny stanu betonu w konstrukcji po pożarze

Methods for assessing the state of concrete in fire damaged structures

1. Wprowadzenie

Beton jest materiałem konstrukcyjnym zachowującym stosunkowo dobrze swoje właściwości w podwyższonych temperaturach. Dzięki stosunkowo niskiemu współczynnikowi przewodności cieplnej, ruch ciepła w tym materiale jest powolny, co długo chroni wrażliwą na działanie temperatury stal zbrojeniową. Wyjątek stanowią betony wykazujące po ich gwałtownym ogrzaniu skłonność do eksplozyjnego zachowania się (tzw. *spalling*). Zjawisko „*spallingu*” występuje w elementach betonowych ogrzanych do temperatury w zakresie 190°C – 350°C i objawia się gwałtownym odpajaniem się fragmentów betonu lub jego intensywnym złuszczeniem (tzw. efekt *pop-cornu*), co prowadzi do odsłonięcia zbrojenia, a w konsekwencji do gwałtownej utraty nośności elementu żelbetowego. Betonami wykazującymi skłonność do eksplozyjnego zachowania się są zwłaszcza betony wysokowartościowe (HPC), a skuteczną metodą przeciwdziałania temu zjawisku jest stosowanie włókien polipropylenowych (1).

W trakcie ogrzewania betonu w warunkach pożarowych wzrost temperatury głębszych partii materiału następuje stopniowo, jednak na skutek powolnego przebiegu tego procesu, w elemencie betonowym powstają duże różnice temperatur pomiędzy powierzchnią elementu i jego wnętrzem (2). Efektem działania temperatury na beton oraz wystąpienia gradientów temperatury jest jego degradacja, którą najczęściej określa się poprzez przedstawienie zmian wytrzymałość na ściskanie. Jak pokazują badania zmiany wytrzymałości w funkcji temperatury związane są między innymi ze skła-

1. Introduction

Concrete is a construction material preserving relatively well its properties at high temperatures. Owing to its fairly low coefficient of thermal conductivity, heat movement through concrete is slow, and thus reinforcing steel, which is sensitive to high temperature, is protected for a long period of time. Concretes that exhibit explosive behaviour (so-called spalling) when heated rapidly are an exception to this rule. Spalling is observed in concrete elements heated to the temperature of 190°C–350°C, and manifests itself by the violent delamination of concrete or its intensive flaking (the so-called popcorn effect), which leads to the reinforcement exposition and, as a consequence, to a sudden drop in the load-bearing capacity of a reinforced concrete element. High-performance concretes (HPCs) are particularly prone to explosive behaviour; the incorporation of polypropylene fibres (1) is an effective method in mitigating of this phenomenon.

When concrete is heated under fire conditions, the increase of temperature of deeper layers of material is progressive, but because this process is slow, significant temperature gradients are produced between the surface and the core of the concrete member (2). As a result of concrete being exposed to heat and as a consequence of temperature gradients formed, degradation occurs, which is most frequently measured by determining changes in the compressive strength of concrete. Research has demonstrated that changes in the strength of concrete as a function of temperature are related to, *inter alia*, concrete composition (the type of aggregate, the

dem betonu (rodzaj zastosowanego kruszywa, wskaźnik wodno-spoiwowy, obecność dodatków pucolanowych, itp.), jednak przede wszystkim zależą od szybkości wzrostu temperatury oraz od czasu jej oddziaływania na beton (3, 4). Stopniowa degradacja betonu jest wynikiem zachodzących w nim przemian fizykochemicznych. Wzrost temperatury powoduje odparowanie wody z materiału, rozkład żelu CSH, wodorotlenku wapniowego i glinianów wapniowych. Równocześnie ze wzrostem temperatury zachodzą także przemiany w kruszywie, między innymi w temperaturze 573°C ma miejsce przemiana fazowa kwarcu, której towarzyszy wzrost objętości, a w temperaturze 800°C dochodzi do rozkładu kruszywa wapiennych. Konsekwencją tych zjawisk jest zmiana właściwości fizycznych betonu, a przede wszystkim jego wytrzymałości (3, 4). Przyjąć można, że wytrzymałość betonu stopniowo maleje wraz ze wzrostem temperatury, a po przekroczeniu ok. 300°C spadek ten następuje szybciej. Przekroczenie temperatury 500°C powoduje zazwyczaj spadek wytrzymałości na ściskanie o 50-60%, a beton uznaje się za zniszczony (6). Na tym założeniu opiera się metoda obliczania nośności elementu żelbetonowego po pożarze według założeń Eurokodu (7). W metodzie „izotermi 500°C” pomija się w obliczeniach części powierzchni betonu, w której temperatura przekroczyła 500°C.

Metody diagnostyczne mają na celu nie tylko ocenę stopnia degradacji materiału spowodowaną działaniem wysokiej temperatury, ale również ocenę zasięgu zaistniałych zmian. Zasięg degradacji betonu jest ściśle powiązany z przebiegiem izoterm w ogrzewanym materiale. Jak już wspomniano uszkodzenia betonu spowodowane działaniem temperatury opisuje się najczęściej przez określenie resztkowej wytrzymałości na ściskanie lub/i modułu sprężystości metodami niszczącymi, bądź nieniszczącymi. Jednak zmianom spowodowanym działaniem temperatury ulegają również inne właściwości fizyczne betonu: jego gęstość, porowatość (całkowita ilość porów i średnia wielkość porów), kolor, twardość, itp. Zmiana tych cech stanowi podstawę innych metod oceny stanu betonu po pożarze.

Przeprowadzone badania stanu betonu w konstrukcji po pożarze, pozwalające na określenie jego resztkowych właściwości mechanicznych oraz głębokości występowania uszkodzeń, umożliwiają podjęcie decyzji o zakresie działań naprawczych lub prac wzmacniających element betonowy.

2. Metody oceny stanu betonu w konstrukcji po pożarze

Ocenę uszkodzeń pożarowych betonu w konstrukcji zazwyczaj rozpoczyna ocena wizualna, oparta na obserwacji zmian spowodowanych wpływem temperatury. W celu uproszczenia tego zadania stworzono czterostopniową klasyfikację uszkodzeń dla belek (rysunek 1), słupów i płyt (5, 8), wraz z przewidywanymi metodami naprawczymi dla każdej z klas. Stan elementu ocenia się biorąc pod uwagę następujące parametry: obecność sadzy i osmolenia, zmianę koloru betonu, wystąpienie złuszczeń betonu lub odspojeń, obecność rys i mikrorys, stopień odsłonięcia stali zbrojeniowej oraz

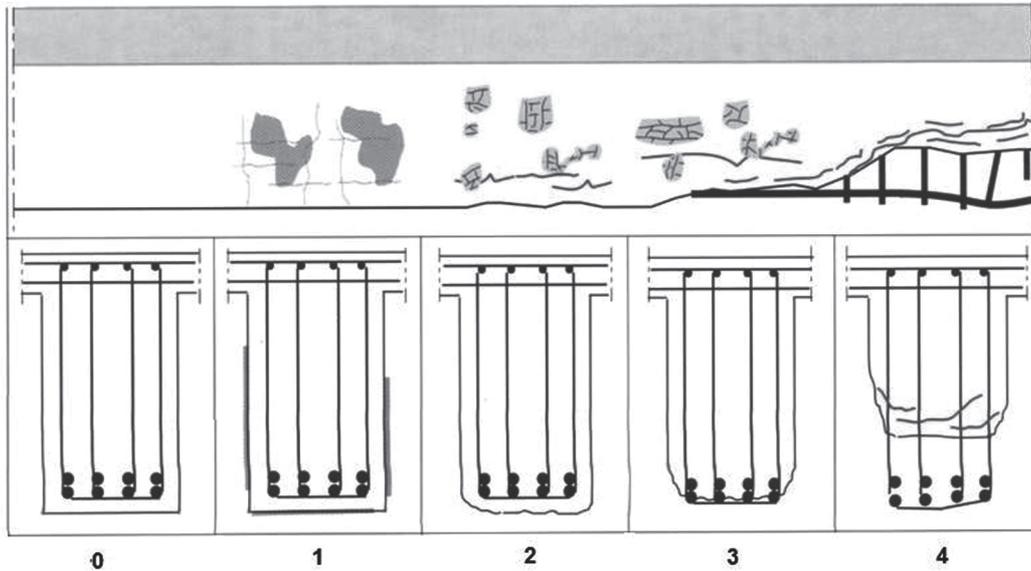
water/cement ratio, the presence of pozzolana additives, etc.), but they are basically determined by the rate of heating and the time of concrete exposition to the temperature (3, 4). The gradual degradation of concrete is the result of physico-chemical changes. The increase of temperature results in water evaporation, the CSH gel, calcium hydroxide and calcium aluminates decomposition, etc. In parallel with the increase of temperature the changes in the aggregate take place, among other the polymorphic transformation of quartz occurs at the temperature of 573°C which is accompanied by an increase in its volume; at 800°C, limestone aggregates decompose. As a consequence of these phenomena, the physical properties of concrete change (3, 4), in particular compressive strength. It can be assumed that concrete strength decreases gradually as the temperature increases, and when the temperature exceeds ca. 300°C, the decline in strength becomes more rapid. When the 500°C threshold is passed, the compressive strength of concrete usually drops by 50 to 60%, and the concrete is considered fully-damaged (6). The Eurocode method of calculating the load-bearing capacity of reinforced concrete elements subjected to a fire is based on this assumption (7). In the 500°C isotherm method, sections of concrete surface where the temperature had exceeded 500°C are disregarded in calculations.

Diagnostic methods aim not just to assess the degree of material degradation caused by exposure to high temperatures, but also to determine the extent of the changes caused. The extent of concrete degradation is closely correlated with the distribution of isotherms in the heated material. As has already been mentioned, concrete damage caused by temperature is usually measured by determining residual compressive strength and/or the modulus of elasticity using destructive or non-destructive methods. However, other physical properties of concrete are also subject to change as a result of exposure to heat: its density, porosity (the total number and average size of pores), colour, hardness, etc. are affected. Changes in these features form the basis for other methods of assessing the condition of fire-damaged concrete.

Assessment of the condition of concrete structures after being exposed to fire, permit the determination of its residual mechanical properties as well as the depth of the damage and make it possible to decide on remedial action or steps aimed at reparation and reinforcing the concrete element in question.

2. Methods of assessing the condition of concrete in structures after fire

The assessment of fire damage of concrete structure usually starts with a visual evaluation, which consists in establishing the changes caused by heat exposure. In order to simplify this task, a four-degree classification of damage of beams (Fig. 1), columns and slabs (5, 8) has been developed, which includes the usual repair methods for each damage class. The condition of element is classified through the assessment of the following parameters: the presence of soot and smoke deposits, the colour change of concrete, concrete flaking or spalling, the presence of cracks and



Rys. 1. Klasyfikacja uszkodzeń pożarowych belki według (5, 8), 0 – beton nieuszkodzony termicznie, 1 – obecność sadzy i osmolenia, widoczna sieć mikrozarysowań, 2 – odpryski powierzchniowe wielkości do 10 mm, rysy widoczne i zorientowane (rozwartość > 0,5 mm), 3 – widoczne ubytki otuliny zbrojenia, beton złuszczone, widoczne odsłonięte zbrojenie, 4 – zbrojenie widoczne i uszkodzone, wyraźne ubytki znacznej części betonu

Fig. 1. Classification of fire damage of the beams according to (5, 8): 0 – no thermal damage of concrete; 1 – soot and smoke deposits present, a network of microcracks visible; 2 – surface spalling (to 10 mm in diameter), visible oriented cracks (crack width > 0.5 mm); 3 – visible damage of concrete cladding, spalling of concrete, exposed reinforcement visible; 4 – reinforcement visible and damaged, significant loss of concrete.

Table 1

ASSESSMENT METHODS OF FIRE-DAMAGED CONCRETE IN STRUCTURES

<i>In situ</i> methods		Laboratory methods
Group I. Local assessment of concrete condition	Group II. Special methods for the overall assessment of the condition of concrete within element	Group III. Assessment of concrete properties based on core drilling
Non-destructive methods: – visual evaluation; – sclerometric assessment; – ultrasound assessment. Partially destructive methods: – “pull-off” tests; – “pull-out” (CAPO) test; – Windsor probe; – BRE internal fracture test; – drilling resistance.	Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) method Ground Penetrating Radar (GPR) Analysis of surface images of damaged concrete	Assessment of mechanical properties of core: – direct method; – indirect methods (resonance frequency test, ultrasound method) Estimating the temperature reached by concrete: – colourimetry; – DTA and TGA; – X-ray diffraction; – scanning microscopy; – thermoluminescence; – porosimetry; – microcrack density assessment.

microcracks, the degree to which reinforcing steel is exposed and possible visible deformations of the structure (excessive deflection of beams and lateral distortion of columns).

In Table 1 the methods used to assess damage of concrete structures in a more precise manner are depicted. Diagnostic techniques fall into two main groups: *in situ* and laboratory tests. Moreover, three groups of tests have been distinguished. Group I comprises test methods where the condition of a concrete element is assessed at a single point. Group II embraces special techniques enabling the overall response assessment of the concrete element. Finally, Group III includes assessment techniques based on the properties examination of small samples taken from various locations and at different depths.

2.1. *In situ* methods

Most of the *in situ* techniques included in Group I that are used to assess the condition of concrete after being exposed to fire are well-known methods that are widely used to check the properties of concrete structures.

ewentualnie widoczne odkształcenia elementu konstrukcyjnego (nadmierne ugięcie belek, lub wybożenie słupów).

W tablicy 1 zestawiono stosowane metody mające na celu bardziej precyzyjną ocenę uszkodzeń betonu w konstrukcji. Techniki diagnostyczne podzielono na dwie główne grupy: badania wykonywane

The sclerometric test is one of the most commonly used methods for estimating the hardness of the surface concrete layer. The limitations of this technique in diagnosing fire damage of concrete result from the absence of a fixed correlation between compressive

in situ oraz badania laboratoryjne. Tablica 1

Ponadto wyróżniono trzy grupy badań. Grupę I stanowią metody badań, w których punktowej ocenie podlega beton w elemencie betonowym. Do grupy II zalicza się specjalne techniki kompleksowej oceny elementu betonowego. Grupa III obejmuje metody oceny oparte na badaniu właściwości odwiertów pobranych w różnych punktach i z różnej głębokości elementu betonowego.

2.1. Metody stosowane *in situ*

Większość technik stosowanych *in situ* do oceny stanu betonu po pożarze, które znalazły się w grupie I, to metody znane i powszechnie stosowane do kontroli właściwości betonu w konstrukcji.

Metoda sklerometryczna stanowi jedną z najczęściej stosowanych

metod orientacyjnej oceny twardości powierzchniowej warstwy betonu. Ograniczenia tej techniki w diagnostyce pożarowych uszkodzeń betonu wynikają z braku stałej zależności między wytrzymałością na ściskanie, a liczbą odbicia stanowiąca wynik pomiaru sklerometrem. Ponadto, warunkiem uzyskania prawidłowych wyników jest wykonywanie pomiarów na płaskiej powierzchni, co w przypadku elementu silnie uszkodzonego działaniem pożaru ze znacznymi złuszczeniami i odspojeniami jest trudne do zrealizowania. Wykonywanie badania sklerometrem zakłada następujące etapy: weryfikację prawidłowości funkcjonowania urządzenia, ustalenie liczby odbicia w strefie betonu nienaruszonego oraz wykonanie pomiarów w strefach uszkodzeń, według założonego schematu rozmieszczenia pomiarów. Zaproponowany przez Laboratorium Dróg i Mostów w Paryżu (8) schemat przyjęty do oceny betonowych elementów sklepienia tunelu pod kanałem La Manche zakłada promieniste rozmieszczenie punktów pomiarowych, w równomiernych odległościach od strefy wyraźnych uszkodzeń. Zazwyczaj pomiarom sklerometrycznym towarzyszy pomiar wytrzymałości na ściskanie badany na odwiertach w celu znalezienia korelacji liczby odbicia z wytrzymałością na ściskanie.

W grupie technik nieniszczących obok metody sklerometrycznej stosuje się technikę opartą na pomiarze prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej. Prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie jest związana z jego modułem sprężystości oraz z wytrzymałością na ściskanie. Dzięki temu możliwa jest obserwacja wyraźnych zmian prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie, który poddany był działaniu podwyższonej temperatury (6, 8, 10). Stosując powierzchniowy układ sond

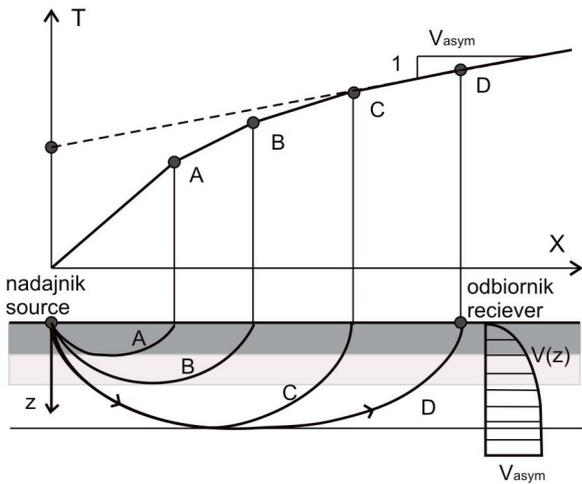
METODY OCENY USZKODZEŃ POŻAROWYCH BETONU W KONSTRUKCJI

Metody <i>in situ</i>		Metody laboratoryjne
Grupa I. Lokalna ocena jakości betonu	Grupa II. Specjalne metody globalnej oceny stanu betonu w elemencie	Grupa III. Ocena właściwości betonu prowadzona na odwiertach
<p>Metody nieniszczące:</p> <ul style="list-style-type: none"> – ocena wizualna, – sklerometryczna, – ultradźwiękowa. <p>Metody częściowo niszczące:</p> <ul style="list-style-type: none"> – metody pull-off, – metoda pull-out (CAPO), – sonda Windsor, – metoda destrukcji, wewnętrznej (BRE), – opór wiercenia. 	<p>Metoda analizy fal powierzchniowych (MASW)</p> <p>Georadar (GPR)</p> <p>Analiza obrazu uszkodzonej powierzchni betonu</p>	<p>Ocena cech mechanicznych odwiertów:</p> <ul style="list-style-type: none"> – metodą bezpośrednią, – metodami pośrednimi: (metodą częstotliwości rezonansowej, metodą ultradźwiękową). <p>Oszacowanie osiągniętej przez beton temperatury:</p> <ul style="list-style-type: none"> – kolorymetria, – DTA i TGA, – rentgenografia, – mikroskopia skaningowa, – termoluminescencja, – porozymetria, – ocena gęstości mikrozarysowań.

strength and the rebound index obtained as a result of sclerometric measurements. Moreover, in order to obtain correct results, the test should be conducted on a flat surfaces, which is difficult for concrete elements that have been heavily-damaged by fire and exhibit visible spalling. Sclerometer measurement method comprises the following stages: verifying whether the device functions properly, establishing the rebound index for the damage-free zone of the concrete and the performance of measurements in damage zones according to the predetermined measurement location pattern. The pattern proposed by Laboratoire Central des Ponts et Chaussées in (8) for testing the fire damaged concrete in the lining of the Channel Tunnel assumes a radial pattern of measurement points, which are equidistant from the visible damage zone. Sclerometric measurements are usually accompanied by compressive strength measurements of cores in order to correlate the rebound index with compressive strength.

In the group of non-destructive methods another technique, based on the measurement of the ultrasonic wave speed velocity, is used. The velocity of propagation of ultrasonic wave in concrete is related to its modulus of elasticity and compressive strength. It is therefore possible to observe significant changes in the speed of propagation of ultrasonic waves in concrete that was exposed to high temperature (6, 8, 10). By placing measurement probes on the surface and increasing the distance between the source and the receiver, it is possible to assess the properties of increasingly deeper layers of concrete (Fig. 2). Just as for the sclerometric method, this test requires a flat surfaces that have not been damaged by spalling.

pomiarowych o zwiększającej się odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem można ocenić jakość coraz głębszych warstw materiału (rysunek 2). Podobnie jak w metodzie sklerometrycznej wskazane jest prowadzenie badań ultradźwiękowych na płaskich powierzchniach betonu, nieuszkodzonych przez odspojenia.

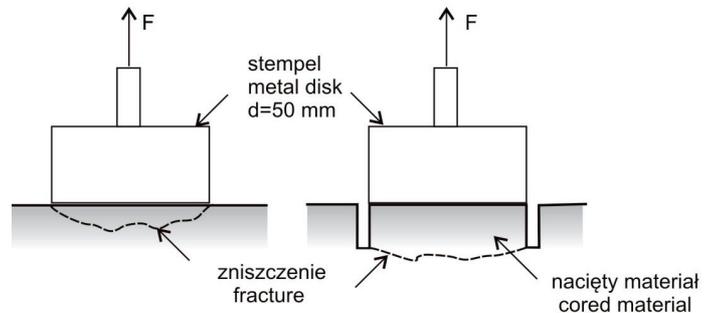


Rys. 2. Zasada pomiaru prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej. Układ powierzchniowy sond pomiarowych umożliwiającą ocenę stanu betonu w coraz głębszych jego warstwach (10)

Fig. 2. Measurement of the ultrasonic pulse velocity. Surface arrangement of measurement probes enabling the investigation of increasingly deeper layers of concrete (10)

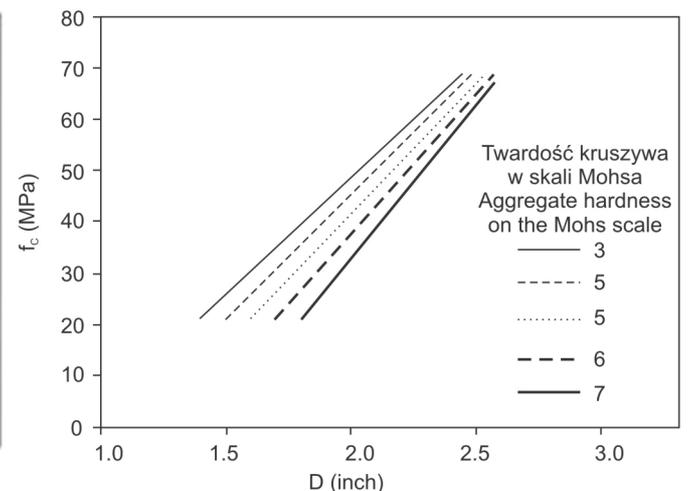
Do oceny betonu w warstwie powierzchniowej można wykorzystać również metody częściowo niszczące. Należy do nich metoda „pull-off”, polegająca na przyłożeniu obciążenia rozciągającego beton poprzez metalowy stempel przyklejony żywicą epoksydową do jego powierzchni. Położenie materiału poddawanego rozciąganiu może znajdować się nieco głębiej w betonie, dokąd sięgać będzie nacięcie wykonane za pomocą piły koronkowej (rysunek 3). Technika „pull-off” pozwala na wyznaczenie wytrzymałości na rozciąganie betonu. W celu oszacowania wytrzymałości na ściskanie na pod-

Concrete condition within the surface layer may also be assessed using partially destructive methods. Among these methods, the “pull-off” test should be mentioned, consisting of applying a tensile load to concrete via a metal disk glued to its surface with epoxy resin adhesive. The tested material can be located deeper through the kerf obtained with the saw (Fig. 3). The “pull-off” technique permits the testing of the tensile strength of concrete. In order to estimate the compressive strength on the basis of the tensile strength determined during the “pull-off” test, appropriate experimental relationships are used.



Rys. 3. Pomiar wytrzymałości na rozciąganie betonu metodą „pull-off”
Fig. 3. Tensile strength testing of concrete using the “pull-off” method

Another good method of testing the extent of damage of concrete is the Windsor probe method, which is based on measuring the depth to which a probe shoot from a specially constructed gun penetrates into the concrete (Fig. 4). The strength of concrete is found from the correlation linking the length of the probe sticking out of the material (D, in inches) with strength. This method may be used for ordinary and high-performance concretes (silver probe) as well as to lightweight ones (gold probe). It is recommended that the hardness of the aggregate used in concrete will be determined before the test, using the 10-point Mohs scale. Subsequently, three probes are shoot from the distance determined by the template that is included in the kit. The average result of three values is



Rys. 4. Zestaw do pomiaru wytrzymałości na ściskanie metodą sondy Windsor oraz krzywe przedstawiające zależność między długością wystającej części sondy (D) i wytrzymałością na ściskanie betonów z kruszyw o twardości od 3 do 7 w skali Mohsa (12)

Fig. 4. A Windsor probe compressive strength measurement kit and curves illustrating relationships between the length of probe sticking out from the material (D) and the compressive strength of concretes made from aggregates with a hardness of 3 to 7 in the Mohs scale (12)

stawie zmierzonej w próbie „pull off” wytrzymałości na rozciąganie stosuje się odpowiednie zależności doświadczalne.

Trafną ocenę uszkodzeń betonu można uzyskać stosując metodę sondy Windsor, opierającą się na pomiarze głębokości penetracji sworznia wystrzelonego ze specjalnie skonstruowanego pistoletu na naboje prochowe (rysunek 4). Wytrzymałość betonu wyznacza się ze znalezionej korelacji łączącej długość wystającej z materiału części sondy (D w calach), z wytrzymałością betonu na ściskanie. Metoda ta może być stosowana zarówno do betonów zwykłych i wysoko wartościowych (sworzeń „srebrny”), jak i do betonów lekkich (sworzeń „złoty”). Zaleca się, aby przed rozpoczęciem badań przeprowadzić ocenę twardości kruszywa zastosowanego w betonie, stosując skalę Mohsa. Następnie wykonuje się trzy strzały w odległości podyktowanej wielkością szablonu stanowiącego wyposażenie zestawu. Średnia z trzech pomiarów długości wystającej części sworznia pozwala na określenie wytrzymałości na ściskanie betonu w danym punkcie pomiarowym. Zaletą tej techniki jest możliwość oceny wytrzymałości betonu także na nierównej powierzchni uszkodzonej odspojeniami (6).

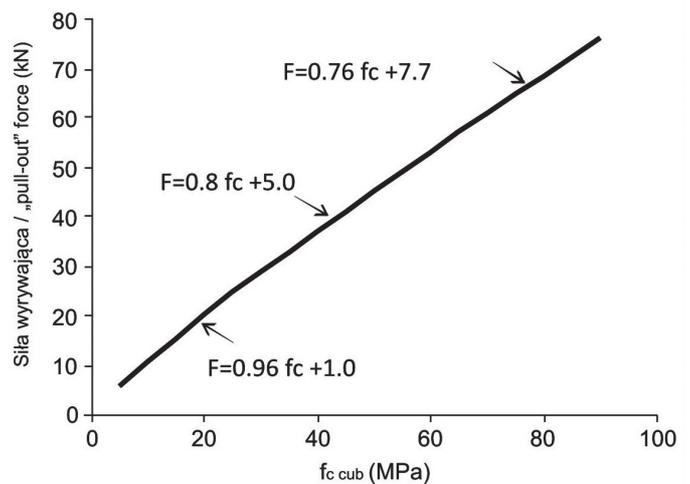
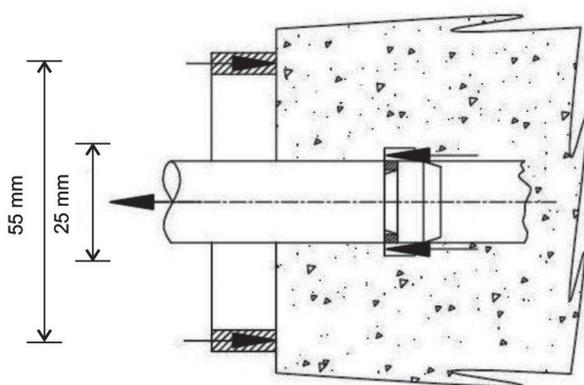
W krajach skandynawskich, a także w USA i Wielkiej Brytanii, stosowana jest metoda „pull-out” nazywana CAPO (ang. *cut and pull out*) (6, 13). Jest to odmiana tradycyjnej techniki „pull-out” (LOK test), w której pierścienie osadza się w betonie w trakcie betonowania. Specyfiką i zaletą metody CAPO jest stosowanie pierścieni samo-rozprężających się po wprowadzeniu do wyłobienia, wycinanego frezem wewnątrz odwiertu. Metoda polega na pomiarze siły potrzebnej do wyrwania z betonu stalowej kotwy wprowadzonej do wykonanego w betonie kanału. Obciążenie jest przekazywane za pośrednictwem siłownika hydraulicznego, który z jednej strony poddaje trzpień kotwy działaniu siły wyrwywającej, z drugiej zaś jest wsparty na powierzchni betonu za pośrednictwem centrycznego pierścienia oporowego (rysunek 5). Pierścień ten, dzięki właściwemu doborowi proporcji swoich wymiarów w stosunku do głębokości położenia kotwy oraz jej wymiarów, wymusza złożony

used to determine the compressive strength of the concrete at the measurement point in question. The advantage of this technique is that it enables concrete strength to be determined also on uneven surfaces that have been damaged by spalling (6).

A method used in Scandinavia as well as in the US and UK is the CAPO (cut and pull out) test, which belongs to the “pull-out” group (6, 13). This is a variant of the traditional “pull-out” technique (LOK test), where rings are embedded in concrete during casting. An advantage and peculiar feature of the CAPO test is the use of an expanding ring placed in a groove cut within a drilled hole using a milling cutter. The technique is based on the measurement of the force required to pull out a steel anchor installed in a concrete hole. The load is applied via a hydraulic actuator, which applies “pull-out” force to the anchor, while on the other hand it presses the concrete surface via a concentric stopper ring (Fig. 5). Owing to the fact that the stopper ring dimensions are adjusted to the depth at which the anchor is placed and to the dimensions of the anchor itself, this arrangement results in a complex state of stress leading to failure. On the basis of experimental relationships (Fig. 5), the compressive strength of the concrete is estimated.

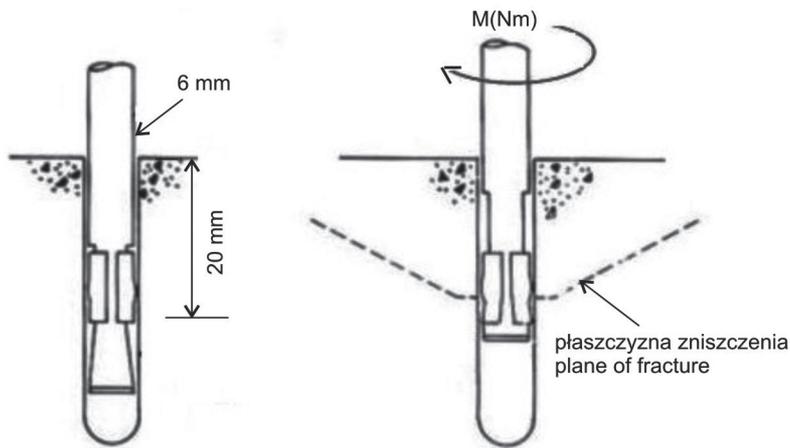
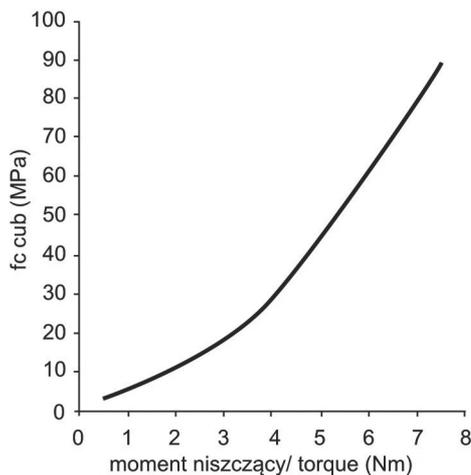
The BRE internal fracture test was developed and published by the Building Research Establishment (14). In this method, a hole with a diameter of 6 mm and a depth of 30 to 35 mm is drilled in the material to be examined. An anchor with an expansion sleeve is inserted into the hole to the depth of 20 mm. The head is tightened using a torque wrench until the load causes the anchor to be pulled out (Fig. 6). The direct measure of concrete quality is the breaking moment, which is subsequently converted into a compressive strength value.

The drilling resistance test method merits special attention. This is a relatively easy and effective technique making it possible to evaluate the extent of heat damage to concrete. When examining concrete properties after the fire in the Channel Tunnel (8), a statio-



Rys. 5. Zasada badania betonu metodą „pull – out” (CAPO) oraz przykład zależności wytrzymałości betonu na ściskanie od siły wyrwywającej (British Institute of Non Destructive Technics, UK)

Fig. 5. CAPO concrete testing illustration and an example of the relationship between the compressive strength of concrete and its holding strength (British Institute of Non Destructive Testing, UK)



Rys. 6. Ilustracja zasady badania betonu metodą destrukcji wewnętrznej [BRE internal fracture(14)] oraz zależność między momentem obrotowym powodującym niszczenie (Nm) i wytrzymałością na ściskanie (MPa)

Fig. 6. Illustration of the BRE internal fracture (14) method used to test concrete and the relationship between the breaking moment (Nm) and compressive strength (MPa)

stan naprężeń, który prowadzi do jego miejscowego zniszczenia. Ustalone doświadczalnie zależności (rysunek 5) pozwalającą na oszacowanie wytrzymałości betonu na ściskanie.

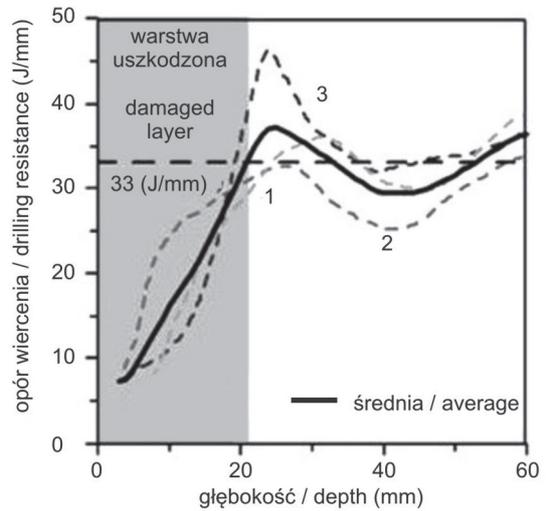
Metoda destrukcji wewnętrznej (*BRE internal fracture*) została opracowana przez Building Research Establishment (14). W badanym materiale wierce się otwór o średnicy 6 mm i głębokości 30-35 mm. W otwór wprowadza się kotwy z tuleją samorozprężającą na głębokość 20 mm. Dokręcenie głowicy kluczem dynamometrycznym powoduje wyrwanie kotwy (rysunek 6). Bezpośrednią miarą jakości betonu jest znaleziona wartość momentu obrotowego, która następnie przeliczana jest na wytrzymałość na ściskanie.

Na szczególną uwagę zasługuje metoda pomiaru oporu wiercenia. Jest to stosunkowo łatwa i skuteczna metoda pozwalająca na oznaczenie zasięgu występowania betonu uszkodzonego wysoką temperaturą. Do oceny stopnia zniszczenia betonu po pożarze w tunelu La Manche (8) stosowano wiertnicę na podwoziu stacjonarnym, którą wykonano 500 odwiertów, pozwalających na sporządzenie „mapy” uszkodzeń betonu. W badaniach oporu wiercenia prowadzonych przez Felicetti (11) wykorzystano powszechnie stosowaną wiertarkę udarową, wyposażoną w indukcyjny czujnik przemieszczania wiertła oraz miernik poboru energii elektrycznej (rysunek 7). Informacje uzyskane podczas wiercenia pozwalają na obliczenie oporu wiercenia, który określa wykonaną pracę na jednostkę głębokości wykonanego odwiertu (J/mm). Po przeanalizowaniu wpływu średnicy wiertła oraz doboru nacisku na wiertło zoptymalizowano te dwa parametry. Przy zastosowaniu wiertła średnicy 10 mm i nacisku na wiertło 170 N uzyskano zadowalającą powtarzalność wyników. Krzywe oporu wiercenia w funkcji położenia wiertła pozwalają na wyznaczenie głębokości, na której występuje strefa nieuszkodzonego materiału. Fluktuacje rejestrowanego sygnału przypisuje się naturalnej niejednorodności betonu, wynikającej z jego kompozytowej budowy (rysunek 7).

nary drilling rig was used, and the 500 holes drilled made it possible to compile a “map” of concrete damage. In drilling resistance tests conducted by Felicetti (11), a general purpose hammer-drill fitted with an inductive displacement sensor and a power consumption meter was used (Fig. 7). The information obtained during drilling makes it possible to calculate the drilling resistance expressed as the drilling work per unit of drilling depth (J/mm). After analysing the impact of drill diameter and drill force, these two parameters were optimised. Using the spotting drill of diameter equal 10 mm, and applying a drill force of 170 N, satisfactory result repeatability was obtained. By plotting drilling resistance against drill position, the depth at which the undamaged material zone begins can be clearly determined. Fluctuations in the signal recorded are attributed to the heterogeneous nature of concrete stemming from its composite structure (Fig. 7).

Techniques enabling the overall assessment of the construction element occupy a special place among the methods of assessing fire damage. These methods exploit physical phenomena related to the propagation of electromagnetic waves (ground penetrating radar — GPR) or phenomena related to the propagation of surface waves (multichannel analysis of surface waves). Both techniques are geotechnical methods enabling isoline maps to be obtained that describe the properties of the analysed elements. Promising results have been obtained by using these techniques to assess the condition of concrete structures after a fire (8); however, these are still pioneering applications that require further research and analysis.

The concrete surface cracking image analysis technique also enables the comprehensive assessment of concrete members. This method, which is based on the analysis of digital photographs, was developed in order to assess the damage of the lining of the Channel Tunnel (8). The assumption behind the method is that the geometry of surface cracks reflects concrete damage and depends on the fire temperature. Digital photographs are processed by com-

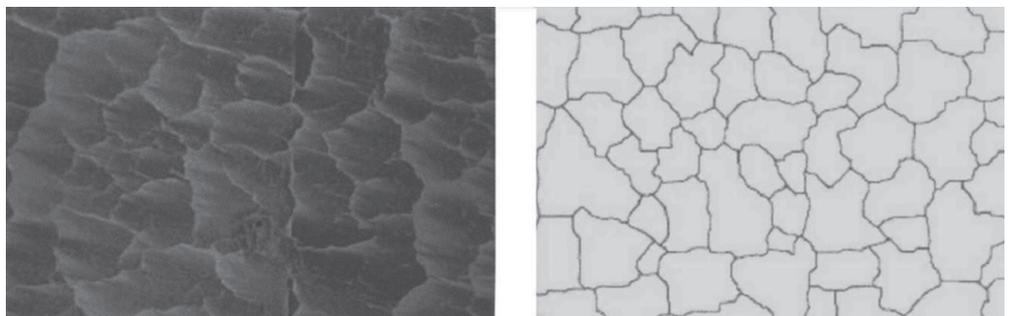


Rys. 7. Wiertarka stosowana w metodzie pomiaru oporu wiercenia Felicettiego oraz przykład krzywych zużycia energii niezbędnej w funkcji głębokości odwiertu (11)

Fig. 7. The drill used in Felicetti's drilling resistance measurement method and an example of recorded variance in the energy required to drill a 1 mm deep hole depending on drilling depth (11)

W metodach oceny uszkodzeń pożarowych specjalne miejsce zajmują techniki pozwalające na kompleksową ocenę całego elementu konstrukcyjnego. Metody te wykorzystują zjawiska fizyczne związane z rozchodzeniem się fali elektromagnetycznej (georadar) lub zjawiska związane z rozprzestrzenianiem się fal powierzchniowych, określaną nazwą analizy fal powierzchniowych (*Multichannel Analysis of Surface Waves*). Obie techniki zostały zaczerpnięte z geotechniki i pozwalają na uzyskanie map izolinii właściwości analizowanych elementów. Obiecujące wyniki uzyskano stosując te metody do oceny stanu konstrukcji betonowych po pożarze (8), jednak są to dotychczas zastosowania pionierskie, wymagające dalszych badań i analiz.

Na kompleksową ocenę elementu betonowego pozwala także technika analizy obrazu zarysowania powierzchni betonu. Metoda ta, opierająca się na analizie zdjęć wykonanych techniką cyfrową, opracowana została do oceny uszkodzeń elementów sklepienia tunelu pod kanałem La Manche (8). Metoda zakłada, że geometria zarysowania powierzchni elementu odpowiada uszkodzeniom betonu związanym z wysokością temperatury spowodowanej pożarem. Zdjęcia cyfrowe poddane zostają obróbce za pomocą programu komputerowego, który oblicza pole powierzchni, obwód i współczynnik kształtu obrysu pól tworzonych przez zarysowania betonu (rysunek 8). W następnym etapie przeprowadzić można analizę korelacji pomiędzy uzyskaną w ten sposób charakterystyką zarysowań, a na przykład liczbą odbicia sklerometru zmierzoną w środku każdego z pól.



Rys. 8. Powierzchnia zarysowanego betonu po pożarze i uzyskany metodą komputerowej analizy obraz geometryczny zarysowań (8)

Fig. 8. Surface of fire-damaged concrete and the geometric cracking image obtained by computer analysis (8)

puter software that calculates the surface areas, circumferences and shape factors of fields formed by concrete cracks (Fig. 8). In the next stage, the correlation between the cracking parameters thus determined and e.g. the sclerometer rebound index measured in the centre of each field can be analysed.

2.2. Laboratory Methods

The tests designed to determine the extent to which concrete has been degraded and to estimate the depth of the damage zone in fire-damaged elements that require the sampling of material and laboratory testing are listed in Group III (Table 1). The tests carried out on concrete core samples are designed to determine the residual mechanical properties of the damaged concrete or else to estimate the temperature to which the concrete was exposed during the fire.

Laboratory tests aimed at determining the residual mechanical properties of damaged concrete consist of the direct testing of the sample material (cores) or the estimation of these values for the cores sampled using indirect methods.

2.2. Metody laboratoryjne

Badania mające na celu ocenę degradacji betonu oraz oszacowanie głębokości występowania uszkodzeń, wymagają pobrania materiału z elementów uszkodzonych pożarem i ich zbadania w warunkach laboratoryjnych (grupa III w tablicy 1). Badania odwiertów mają na celu określenie właściwości mechanicznych uszkodzonego betonu, bądź też oszacowanie temperatury, jakiej poddany został beton w czasie pożaru.

Badania laboratoryjne mające na celu określenie właściwości mechanicznych uszkodzonego betonu dotyczą bezpośrednich pomiarów na odwiertach lub oszacowania tych właściwości metodami pośrednimi.

Do pomiaru wytrzymałości odwiertów stosuje się metody zawarte w normach PN-EN 206 i PN-EN 12540-1. Normy te precyzują średnicę i wysokość odwiertu, a także sposób przygotowania próbek. Ważne znaczenie ma wybór miejsc i liczba zaplanowanych odwiertów. Pierwsze odwierty powinny zostać wykonane w miejscach występowania betonu nieuszkodzonego, w celu oceny właściwości materiału w stanie nienaruszonym. Następnie należy wykonać odwierty w miejscach występujących uszkodzeń. Wybór miejsc i ilości odwiertów podyktowany jest zazwyczaj zakresem planowanych badań oraz rozległością zniszczeń pożarowych.

Ponieważ wiercenia odbywają się w materiale o częściowo bądź całkowicie zdehydratyzowanej matrycy cementowej zaleca się, w miarę możliwości, usuwanie pyłu i chłodzenie odwiertów sprężonym powietrzem, a nie wodą. Z oczywistych względów należy pamiętać o unikaniu wykonywania odwiertów w miejscach zagrażających stabilności i nośności badanych elementów oraz nie należy, w miarę możliwości, prowadzić odwiertów w strefie występowania zbrojenia.

W celu oceny dynamicznego modułu sprężystości betonu metodami pośrednimi stosować można pomiar częstotliwości rezonansowej betonowego plastra uzyskanego przez pocięcie odwiertu wykonanego w miejscu uszkodzeń pożarowych (8). Przeprowadzenie pomiarów na plastrach pochodzących z kolejnych warstw betonu, pozwala na wyznaczenie profilu zmian modułu aż do głębokości, na której występuje beton nieuszkodzony. Do pomiarów stosuje się analizator częstotliwości rezonansowej wraz z czujnikiem, młoteczką wzbudzającą drgania i odpowiednimi podkładkami ze spienionej gumy. Wyniki badania próbek pochodzących z różnych głębokości odwiertu pozwalają na określenie profilu zmian dynamicznego modułu sprężystości betonu, a w konsekwencji na oznaczenie zasięgu jego uszkodzeń termicznych.

Metoda ultradźwiękowa może być stosowana również jako pośrednia technika pozwalająca na ocenę właściwości mechanicznych próbek betonu pochodzących z odwiertów. W tym przypadku stosuje się układ skośny czujników, na dwóch średnicach wzajemnie prostopadłych. Wykonując pomiary na całej długości odwiertu w odstępach co 1 cm, wyznaczyć można profil zmian prędkości fali ultradźwiękowej, a następnie określić zasięg występowania uszkodzeń (8).

The determination of core strength is based on the guidelines provided in the PN-EN 206 and PN-EN 12540-1 standards. These standards stipulate core diameter and height as well as the manner in which samples are to be prepared for testing. An important aspect of sampling for laboratory test purposes is the choice of locations and the number of samples collected. Samples should first be collected from locations where concrete has not been damaged in order to assess the properties of the intact material. Subsequent cores should be sampled in damage zones. The choice of locations and the number of cores sampled is usually determined by the level of detail required and the extent of fire damage.

Because the cores are sampled from material whose cement matrix has been partly or entirely dehydrated, where possible compressed air should be used instead of water for dust removal and cooling during drilling. For obvious reasons, samples should not be collected from locations where this could endanger the stability and load-bearing capacity of the elements tested; moreover, holes should not be drilled, if possible, in zones where reinforcement is present.

The resonance frequency method can be used in order to estimate the dynamic modulus of elasticity of concrete using indirect methods. This consists of the measurement of the resonance frequency of concrete disks obtained by cutting a sample collected from the fire damage zone (8). Through determining this characteristic for disks collected from successive layers of concrete, a profile of modulus changes from the surface layer to the undamaged concrete layer can be obtained. The measurement involves a resonance frequency analyser equipped with a sensor, a hammer that produces vibrations and rubber foam washers. Results of tests for concrete collected from different depths make it possible to determine the profile of changes in the dynamic modulus of elasticity of concrete, and thus to establish the extent of thermal damage.

The ultrasound method may also be used as an indirect technique of assessing the mechanical properties of concrete in the core samples. In this case, sensors are placed along two perpendicular diameters. The profile of changes of the ultrasonic waves speed can be determined by performing measurements at 1 cm intervals along the entire length of the core, thus allowing the extent of the damage zone to be established (8).

The laboratory tests permitting the estimation of the temperature reached by the concrete use the following techniques: DTA, TGA, X-ray diffraction, scanning microscopy, thermoluminescence, colourimetry, chemical or petrographic analyses. When concrete is heated, its colour changes. The most pronounced changes in colour occur in concretes made from siliceous aggregates which become red or pink when heated to 300–600°C; for temperatures ranging from 600°C to 900°C they turn whitish-grey, and for temperatures ranging from 900°C to 1000°C their colour is described as buff (yellow with a grey tinge). Therefore changes in the mechanical properties of concrete can be estimated on the basis of its discolouration. In order to describe changes in

Badania laboratoryjne mające na celu oszacowanie temperatury, do której beton został podgrzany polegają na wykorzystaniu DTA, TGA, rentgenografii, mikroskopii skaningowej, termoluminescencji, kolorymetrii, analizy chemicznej, bądź analizy petrograficznej. Ogrzewanie betonu powoduje zmianę jego koloru. Najbardziej intensywne zmiany koloru wykazują betony na kruszywie krzemionkowym, które podgrzane do temperatury w zakresie 300-600°C przybierają kolor czerwony lub różowy, do temperatury 600-900°C białawo-szary, a do temperatury 900°C-1000°C ich kolor określamy jako płowy (żółty z odcieniem szarości). W efekcie na podstawie zabarwienia oszacować można zmiany właściwości mechanicznych betonu. W celu precyzyjnego opisu zmian koloru wykorzystuje się techniki stosowane do opisu barw w kolorymetrii. Badania prowadzone przez Faure'a i Hemonda (8) wykonano podczas diagnostyki betonu w tunelu pod kanałem La Manche. Do pomiaru barwy stosowano kolorymetr przykładany bezpośrednio do powierzchni próbek betonu. Metoda stosowana przez Shorta i innych (15) polegała na obserwacji próbek pod mikroskopem optycznym i analizę zdjęć cyfrowych powiększonego obrazu. Metoda zastosowana przez Felicetti'ego (10) oparta była na analizie zmian koloru betonu w zależności od osiągniętej temperatury (rysunek 9). Zdjęcia odwiertów o długości 80 mm wykonano powszechnie stosowanym aparatem cyfrowym.

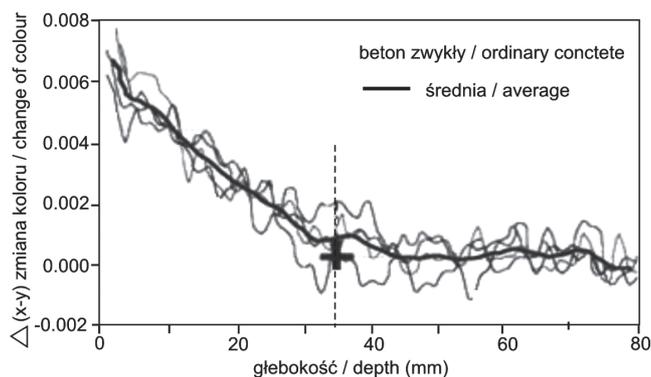
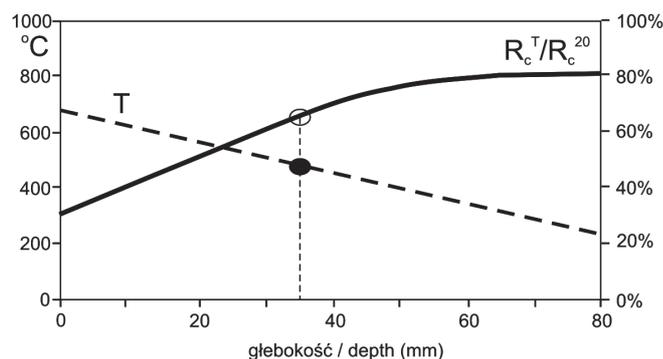
DTA i TGA opierają się na obserwacji przemian fizykochemicznych zachodzących w próbce betonu podczas jego ogrzewania w warunkach laboratoryjnych. Przyjmując, że większość przemian spowodowanych wzrostem temperatury ma charakter nieodwracalny, podczas ponownego ogrzewania próbki betonowej pobranej w miejscu pożaru można stwierdzić na krzywych DTA i TGA brak efektów termicznych, aż do poziomu temperatury osiągniętej przez beton podczas pożaru. W wyższych temperaturach powinny pojawić się na krzywych charakterystyczne piki związane z przemianami zachodzącymi w ogrzewanym materiale (8). Korzystając z tej zasady, poprzez porównanie krzywych odpowiadających próbkom betonu nienaruszonego oraz pobranych w miejscu pożaru, można oszacować osiągniętą przez beton temperaturę.

Rentgenografia pozwala na zidentyfikowanie występowania w materiale faz krystalicznych i oszacowanie ilości tych faz w próbkach betonu. Stwierdzona obecność lub brak różnych faz jest podstawą do oszacowania temperatury do jakiej podgrzany został beton (6, 8).

Obserwacje pod mikroskopem skaningowym (8) pozwalają na oszacowanie temperatury jakiej poddany został beton na podstawie zaobserwowanych przemian fazowych składników mineralnych oraz obecności charakterystycznych dla danej temperatury faz mineralnych. Dodatkowo obserwacje odkształceń (skurczu zaczynu i rozszerzalności termicznej kruszywa) i spowodowanych nimi zarysowań mogą świadczyć o osiągniętej przez materiał temperaturze. Obserwacje prowadzi się zarówno na przelamach jak i na zgładach. Obserwacje mikroskopowe pozwalają na stwierdzenie obecności igiełek ettringitu potwierdzające, że beton nie przekroczył temperatury wyższej niż 100°C (rysunek 10a), bądź na obserwację rekryształizacji portlandytu w formach podobnych

colour in a precise manner, colourimetry description techniques are used. The tests conducted by Faure and Hemond (8) were performed during the diagnostic examination of concrete in the Channel Tunnel. In colour measurements, a colourimeter was used directly on the surface of concrete samples. The method used by Short et al. (15) consists of samples analysing under an optical microscope and analysing magnified digital photographs. The method used by Felicetti (10) consists of analysing changes in concrete colour depending on the temperature reached (Fig. 9). Photographs of 80 mm long cores were taken using a general purpose digital camera.

DTA and TGA are methods based on the examination of physicochemical changes occurring in concrete during heating in laboratory conditions. Assuming that most changes caused by exposure to temperature are irreversible, during the second heating of a concrete sample collected from a fire scene, no visible changes can be observed on DTA and TGA curves until the temperature to which the concrete was exposed during the previous heating is reached. When this level is exceeded, characteristic peaks appear on the curves that correspond to changes occurring in the material when heated to the temperature in question (8). Therefore, by comparing curves for intact concrete with those for the concrete sampled from the fire scene, the temperature reached by the concrete can be estimated.



Rys. 9. Krzywa maksymalnej temperatury (T) oraz względnej resztkowej wytrzymałości betonu na ściskanie (R_c^T/R_c^{20}) i odpowiadająca tym zmianom zarejestrowana zmiana koloru (wartości uzyskane z 4 odwiertów o długości 80 mm) (10)

Fig. 9. Maximum temperature (T) and the relative residual compressive strength of concrete (R_c^T/R_c^{20}) and corresponding changes in the colour recorded (results for four 80 mm long cores) (10)

do „róży pustyni”, która wykazuje, że beton poddany został działaniu temperatury wyższej od 500°C (rysunek 10b) (8).

Termoluminescencja jest wywołana przez ogrzewanie substancji, która wcześniej została pobudzona przez światło (falę elektromagnetyczną) lub promieniowanie przenikliwe. Metoda polega na podgrzaniu badanego materiału i zmierzeniu termoluminescencji, czyli ilości światła wypromieniowanego przez badany materiał, która jest proporcjonalna do pochłoniętego promieniowania. Zjawisko to występuje w fazach krystalicznych. Metoda ta stosowana jest głównie w archeologii

do datowania ceramiki oraz w geologii do datowania osadów skalnych. Metoda pozwala na określenie okresu w jakim materiał został podgrzany oraz maksymalnej temperatury osiągniętej przez ten materiał. Z tego powodu znalazła ona także zastosowanie w diagnostyce uszkodzeń pożarowych (8). W technice termoluminescencyjnej jarzenie próbek pobranych z uszkodzonych stref betonu porównuje się z jarzeniem betonu wygrzewanego w warunkach laboratoryjnych (warunki wygrzewania powinny odpowiadać rzeczywistym warunkom pożarowym).

W publikacjach możemy odnaleźć również metody oceny uszkodzeń w oparciu o pomiary porowatości za pomocą porozymetrii rtęciowej (12) oraz średniej wielkości porów lub poprzez ocenę gęstości mikro-zarysowań (16) (całkowita długość rys na jednostkę powierzchni).

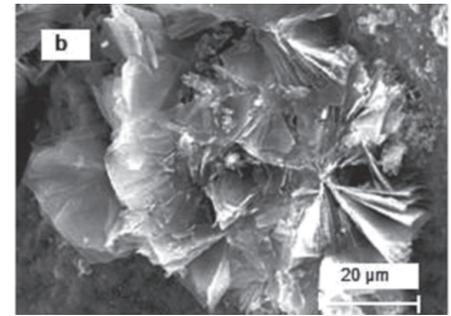
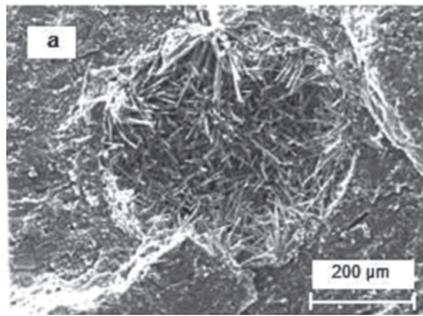
3. Podsumowanie

Przedstawione w artykule metody oceny uszkodzeń betonu podczas pożaru obejmują techniki powszechnie stosowane do badania właściwości betonu (metoda sklerometryczna, ultradźwiękowa, lub „pull-off”, itp) oraz metody adaptowane z innych dziedzin nauki (termoluminescencja, analiza fal powierzchniowych, georadar, itp).

Do dyspozycji inżyniera pozostają zarówno bardzo praktyczne metody stosowane *in situ*, jak i zaawansowane techniki laboratoryjne. Pierwsze z nich pozwalają często na wystarczającą, lecz jedynie szacunkową i zgrubną, ocenę jakości betonu. Metody laboratoryjne są bardziej dokładne, jednak droższe i bardziej czasochłonne. W praktyce zaleca się łączenie kilku metod w celu uzyskania wystarczająco pełnego i dokładnego obrazu uszkodzeń elementu betonowego (8, 10, 15).

Literatura / References

1. I. Hager, P. Pimienta, Impact of the polypropylene fibers on the mechanical properties of HPC concrete, Proceedings of Sixth Rilem Symposium on Fibre Reinforced Concrete (FRC), BEFIB 2004, September 2004, Varenna, Italy.



Rys. 10. Obserwacje pod mikroskopem skaningowym: a – igielki ettryngitu ($T < 100^{\circ}\text{C}$), b – rekrytalizacja portlandytu w formach podobnych do „róży pustyni” ($T > 500^{\circ}\text{C}$) (8)

Fig. 10. Scanning microscopy observations: a – ettringite needles ($T < 100^{\circ}\text{C}$), b – recrystallization of portlandite in forms resembling to “desert roses” ($T > 500^{\circ}\text{C}$) (8)

The X-ray diffraction test makes it possible to identify crystalline phases and estimate the quantity of mineral phases within the concrete samples. The presence or absence of some phases forms the basis for estimating the temperature to which the concrete was heated (6, 8).

The scanning microscope observations (8), enable to estimate the temperature to which the concrete was exposed by analysing phase transitions of mineral ingredients and ascertaining the presence of the mineral phases characteristic of certain temperatures. Moreover, the deformations observed (grout shrinkage and aggregate thermal expansion) and the cracks caused by them may help determine the temperature reached by the material. Both fractured and polished sections are examined. Microscopy observations make it possible, among other things, to ascertain the presence of ettringite needles, which would demonstrate that the concrete was not exposed to a temperature higher than 100°C (Fig. 10a), or to observe the recrystallisation of portlandite in forms resembling to “desert roses”, which shows that the concrete was exposed at temperatures exceeding 500°C (Fig. 10b).

Thermoluminescence is induced by heating substances that were previously stimulated by light (electromagnetic waves) or penetrating radiation. The method consists of heating the material in question and measuring the thermoluminescence (the amount of light radiated from the sample), which is proportional to the radiation absorbed. This phenomenon is observed in crystalline minerals. The method is primarily used in archaeology for dating pottery and in geology for dating rock sediments. It enables one to determine the time at which the material was heated and the maximum temperature reached. For this reason, it is also used in fire-damage assessment (8). In thermoluminescence tests, the glowing of concrete samples collected from the damage zone is compared to that of concrete samples heated under laboratory conditions (heating time and intensity should correspond to real fire conditions).

In literature, techniques can also be found whose objective is to determine the extent of damage by using mercury porosimetry methods (12), average size of pores or by assessing microcrack density (16) (total crack length per unit area).

2. I. Hager, J. Śliwiński, T. Durica, The impact of heating conditions on temperature distribution in high performance concrete specimens of various shapes and sizes.", Slovak Journal of Civil Engineering, Volume XIV, 2006/2, p. 8-13.
3. I. Hager, P. Pimienta, Mechanical properties of HPC at high temperatures, Proc. Int. Workshop fib Task Group 4.3, Fire Design of Concrete Structures: What now? What next? Milan, Italy, December, 2004. p. 95-100.
4. I. Hager, Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques, thèse du doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, listopad 2004.
5. Concrete Structures After Fire, Concrete Construction, March 1972, Vol. 17, No. 3, Concrete Construction Publications, Inc., Addison, IL, 1972, p. 101.
6. Fire design of concrete structures – structural behavior and assessment. State-of-art report prepared by Task Group 4.3, Fire design of concrete structures, FIB - Federation International du Béton, July 2008, p. 209.
7. EN 1992-1-2: Eurocode 2 – Design of concrete structures. Part 1.2: General rules – Structural fire design, December 2004, p. 97.
8. Présentation des techniques de diagnostic de l'état d'un béton soumis à un incendie, décembre 2005, n° 62, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France, p. 114.
9. Assessment and Repair of Fire-Damaged Concrete Structures, Technical Report No. 33, The Concrete Society, London, United Kingdom, 1990.
10. M. Colombo, R. Felicetti, New NDT techniques for the assessment of fire-damaged concrete structures, Fire Safety Journal, Vol. 42, Issues 6-7, September-October 2007, Pages 461-472.
11. R. Felicetti, The drilling resistance test for the assessment of fire damaged concrete, Cement and Concrete Composites, Vol. 28, Issue 4, April 2006, Pages 321-329.
12. http://www.ndtjames.com/catalog/strengthTesting/windsorHighPerformanceProbe_standard.html.
13. D. C. K. Tay, C. T. Tam, In situ investigation of the strength of deteriorated concrete, Construction and Building Materials, Vol. 10 (1996), p. 17-26.
14. Internal fracture testing of in-situ concrete: a method of assessing compressive strength, Building Research Establishment, BRE Information paper IP22/80, 1980, p. 4.
15. N. R. Short, J. A. Purkiss, S. E. Guise, Assessment of fire damaged concrete using color image analysis, Construction and Building Materials, Vol. 15 (2001) p. 9-15.
16. N. R. Short, J. A. Purkiss, S. E. Guise, Assessment of fire damaged concrete using crack density measurements, Structural Concrete, Vol. 5 (2002), p. 137-143.

3. Conclusions

The methods for assessing concrete damage after fire presented in the paper include techniques that are commonly used in evaluating concrete quality (sclerometry method, ultrasonic pulse velocity, "pull-off" tests, etc.) as well as techniques adapted from other areas of science (thermoluminescence, multichannel analysis of surface waves, ground penetrating radar, etc.).

Engineer can choose between very practical in situ techniques and advanced laboratory ones. The first ones, although often sufficient, only enable a sketchy estimation of the concrete's properties. Laboratory tests are more accurate, but also more expensive and time-consuming. In practice, several techniques should be combined in order to obtain a sufficiently complete and accurate picture of the damage to the concrete element in question (8, 10, 15).