



# XXIV

XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna  
Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009

# awarie budowlane

Dr inż. IZABELA HAGER, [ihager@pk.edu.pl](mailto:ihager@pk.edu.pl)

Politechnika Krakowska,

Katedra Technologii Materiałów Budowlanych i Ochrony Budowli

## METODY OCENY STANU BETONU W KONSTRUKCJI PO POŻARZE

### ASSESSMENT METHODS OF FIRE DAMAGED CONCRETE

**Streszczenie** Referat stanowi opracowany na podstawie literatury przegląd metod stosowanych w celu oceny wpływu działania wysokiej temperatury na beton w konstrukcji. Przedstawiono tu techniki oceny uszkodzeń pożarowych betonu możliwych do stosowania in-situ oraz metody laboratoryjne. Omówiono podstawowe założenia opisanych metod.

**Abstract** In this paper, the state-of-art of the diagnostic method used to assess the impact of high temperature on concrete is presented. In-situ techniques and laboratory methods of assessment of fire damaged concrete are described. The basic assumptions of those methods are discussed.

### 1. Wprowadzenie

Beton jest materiałem konstrukcyjnym zachowującym się relatywnie dobrze w warunkach działania wysokiej temperatury. Dzięki stosunkowo niskiemu współczynnikowi przewodności cieplnej, ciepło w tym materiale rozprzestrzenia się wolno, chroniąc 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 otoczenia rzędu 190°C – 350°C i objawia się gwałtownym odspajaniem się fragmentów betonu lub jego intensywnym złuszczeniem (tzw. efekt *pop-cornu*) prowadzące 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 efektywnym sposobem przeciwdziałania temu zjawisku jest stosowanie włókien polipropylenowych [1].

W trakcie ogrzewania betonu w warunkach pożarowych ciepło rozprzestrzenia się stopniowo w głąb materiału, 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 wytrzymałości na ściskanie. Jak pokazują badania przebiegu zmian wytrzymałości w funkcji temperatury związany jest m.in. ze składem betonu (typ zastosowanego kruszywa, wskaźnik wodno-spoiwowy, obecność dodatków pucolanowych, itp.), ale w zdecydowany sposób zależy również od prędkości wygrzewania oraz od czasu ekspozycji na działanie temperatury [3, 4]. Stopniowa degradacja betonu jest wynikiem przemian fizyko-chemicznych zachodzących w ogrzewa-

nym betonie. Działanie temperatury powoduje odparowanie wody z materiału, dehydratację żelu CSH, rozkład wodorotlenku wapniowego itp. Dodatkowo wzrost temperatury powoduje przemiany w zawartym w betonie kruszywie, m.in.: w temperaturze 573°C zachodzi przemiana fazowa kwarcu, której towarzyszy wzrost objętości; w temperaturze 800°C dochodzi do rozkładu kruszyw wapiennych. Konsekwencją tych zjawisk jest zmiana właściwości fizycznych i mechanicznych betonu [3, 4]. Przyjąć można, że wytrzymałość betonu stopniowo maleje wraz ze wzrostem temperatury, a po przekroczeniu ok. 300°C spadek wytrzymałości staje się bardziej intensywny. Przekroczenie temperatury 500°C powoduje zazwyczaj spadek wytrzymałości na ściskanie betonu rzędu 50–60%, a beton uznaje się za zniszczony [6]. Na tym założeniu bazuje metoda obliczania popożarowej nośności elementu żelbetowego według założeń Eurokodu [7]. W metodzie izotermy 500°C pomija się w obliczeniach części powierzchni betonu, w której temperatura przekroczyła 500°C.

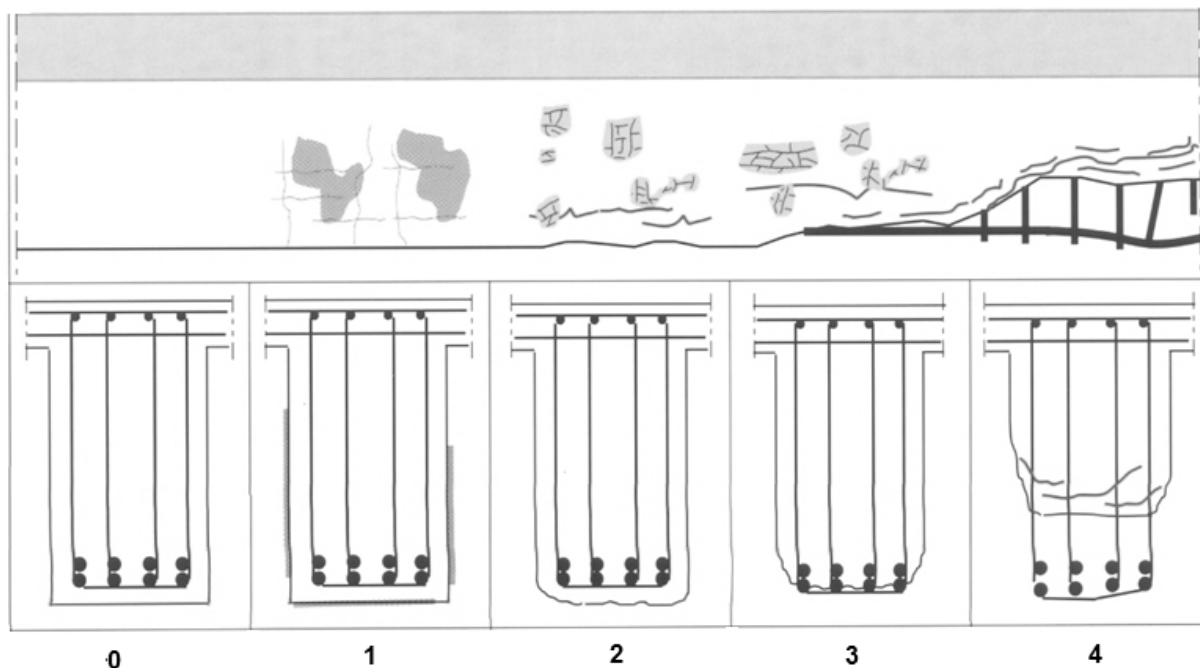
Metody diagnostyczne mają na celu nie tylko ocenę stopnia degradacji materiału spowodowaną działaniem wysokiej temperatury, ale również ocenę zasięgu zaistniałych zmian. Zasięg degradacji betonu będzie ściśle powiązany z przebiegiem izoterm w ogrzewanym materiale. Jak już wspomniano uszkodzenia betonu 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 resztkowych właściwości mechanicznych betonu 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 cech wizualnych oparta na obserwacji obecności zmian spowodowanych działającą temperaturą. W celu uproszczenia tego zadania stworzono czterostopniową klasyfikację uszkodzeń dla belek (rys. 1), słupów i płyt [5, 8], wraz z przewidywanymi metodami naprawczymi dla każdej z klas. Stan elementu klasyfikuje się oceniając następujące parametry: obecność sadzy i osmolenia, zmianę koloru betonu, wystąpienie złuszczeń betonu lub *spallingu*, obecność rys i mikrorys, stopień odsłonięcia stali zbrojeniowej oraz ewentualne widoczne odkształcenia elementu konstrukcyjnego (nadmierne ugięcie dla belek, lub wyboczenie dla słupów).

W tabeli 1 zestawiono stosowane metody mające na celu bardziej precyzyjną ocenę uszkodzeń betonu w konstrukcji. Techniki diagnostyczne podzielono na dwie główne grupy: badania wykonywane in-situ oraz badania laboratoryjne. Ponadto wyróżniono trzy grupy badań. Grupę I stanowią metody badań, w których punktowo ocenie podlega beton w Elementach betonowych. W grupie II znajdują się specjalne techniki kompleksowej oceny elementu betonowego. Grupa III obejmuje techniki oceny oparte na badaniu właściwości odwiertów pobranych w różnych punktach i z różnej głębokości elementu betonowego.



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

Tabela.1 Zestawienie metod oceny uszkodzeń pożarowych betonu w konstrukcji

Metody in-situ		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"> <li>– ocena wizualna,</li> <li>– sklerometryczna,</li> <li>– ultradźwiękowa.</li> </ul> <p>Met. częściowo niszczące:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– metody pull-off,</li> <li>– metoda pull-out (CAPO),</li> <li>– sonda Windsor,</li> <li>– metoda destrukcji, wewnętrznej (BRE),</li> <li>– opór wiercenia.</li> </ul>	<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"> <li>– metodą bezpośrednią,</li> <li>– metodami pośrednimi: (metodą częstotliwości rezonansowej, metodą ultradźwiękową).</li> </ul> <p>Oszacowanie osiągniętej przez beton temperatury:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– kolorymetria,</li> <li>– DTA i TGA,</li> <li>– dyfrakcja promieni X,</li> <li>– mikroskopia skaningowa,</li> <li>– termoluminescencja,</li> <li>– porozymetria,</li> <li>– ocena gęstości mikro zarysowań.</li> </ul>

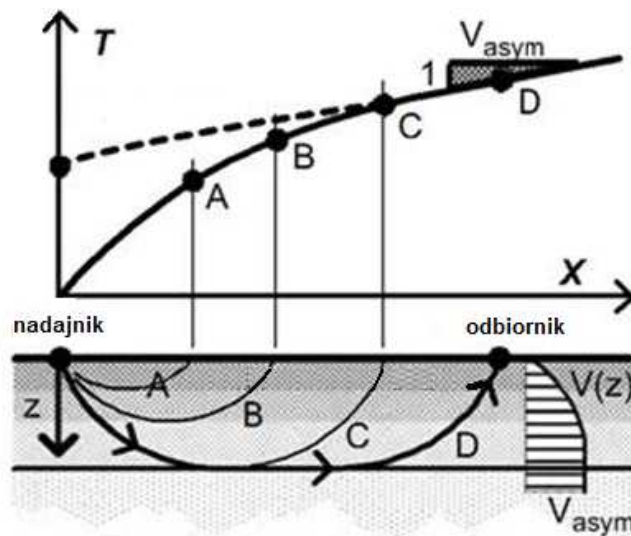
## 2.1 Metody stosowane in-situ

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 przypowierzchniowej warstwy betonu. Ograniczenia tej techniki w diagnostyce pożarowych uszkodzeń betonu wynikają z braku stałej zależności między wytrzyma-

łością na ściskanie, a liczbą odbicia stanowiąca wynik pomiaru sklerometrem. Ponadto, do uzyskania prawidłowych wyników, badanie powinno być wykonywane na płaskiej powierzchni, co w przypadku elementu silnie uszkodzonego działaniem pożaru z wyraźnymi oznakami *spallingu* jest trudne do zrealizowania. Metodologia wykonania badania sklerometrem zakłada następujące etapy: weryfikację prawidłowości funkcjonowania urządzenia, ustalenie wartości liczby odbicia w strefie betonu nienaruszonego oraz wykonanie pomiarów w strefach uszkodzeń według założonego schematu rozmieszczenia pomiarów. Zaproponowany przez [8] schemat przyjęty do oceny betonowych elementów sklepienia tunelu pod kanałem La Manche zakłada przyjęcie punktów pomiarowych w układzie promienistym i w równomiernych odległościach od strefy wyraźnych uszkodzeń. Zazwyczaj pomiarom sklerometrycznym towarzyszy pomiar wytrzymałości na ściskanie badany na odwiertach w celu dokonania powiązania liczby odbicia z wytrzymałością na ściskanie.

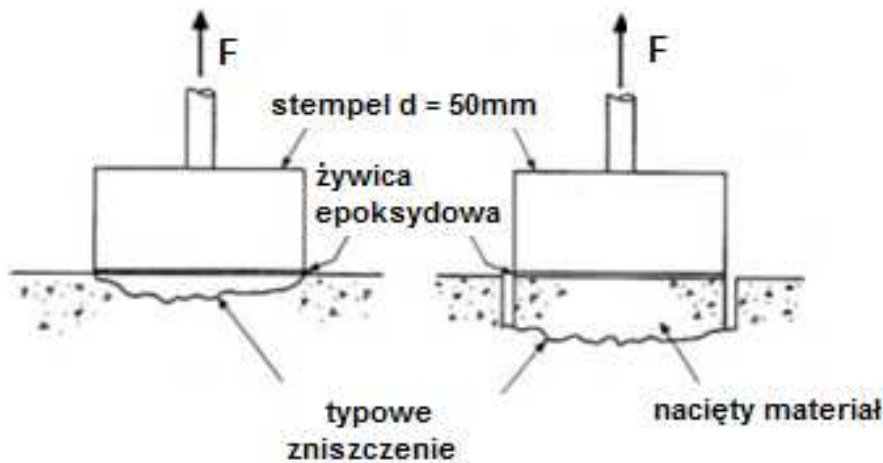
W grupie technik nieniszczących obok metody sklerometrycznej znajduje się technika oparta na pomiarze **prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej**. Prędkość rozprzestrzeniania się fali ultradźwiękowej w betonie jest związane z jego modułem sprężystości oraz z wytrzymałością na ściskanie. Dzięki temu możliwa jest obserwacja wyraźnych zmian prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w betonie, który poddany był działaniu temperatury [6, 8, 10]. Stosując powierzchniowy układ sond pomiarowych przy zwiększającej się odległości pomiędzy nadajnikiem i odbiornikiem możliwa jest ocena jakości coraz głębszych warstw materiału (rys. 2). Podobnie jak w metodzie sklerometrycznej wskazane jest prowadzenie badań ultradźwiękowych na płaskich powierzchniach betonu, nie uszkodzonych przez *spalling*.



Rys. 2. Pomiar prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej. Układ powierzchniowy sond pomiarowych umożliwiający ocenę betonu w coraz głębszych jego warstwach [10]

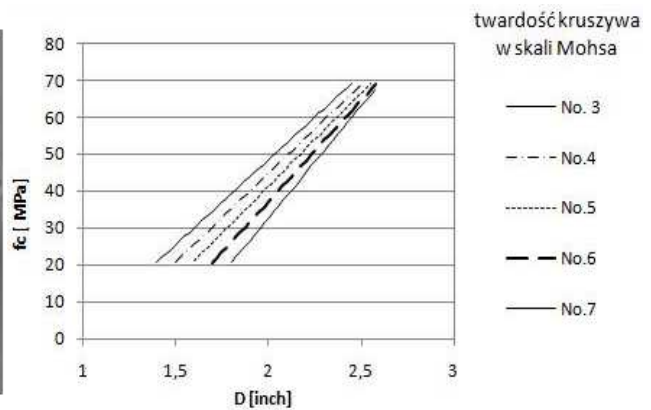
Oceny betonu w warstwie przypowierzchniowej można dokonać również metodami częściowo niszczącymi. Wśród metod tych można wymienić **metodę „pull-off”** polegającą na przyłożeniu obciążenia rozciągającego beton poprzez metalowy stempel przyklejony żywicą epoksydową do jego powierzchni. Miejsce zniszczenia można zlokalizować w głębszych partiach materiału, wykonując częściowe nacięcie za pomocą piły koronkowej (rys. 3). Technika „pull-off” pozwala na wyznaczenie wytrzymałości na bezpośrednie rozciąganie betonu. W celu oszacowania wytrzymałości na ściskanie betonu na podstawie uzyskanej w badaniu wytrzymałości na rozciąganie stosuje się odpowiednie zależności doświadczalne.

Inną przydatną metodą oceny uszkodzeń betonu jest **metoda sondy Windsor**, bazująca na pomiarze głębokości penetracji sworznia wystrzelonego ze specjalnie skonstruowanego pistoletu na naboje prochowe (rys. 4). W metodzie tej skorelowano zależność między długością wystającej z betonu części sondy ( $D$  w calach), a wytrzymałością betonu na ściskanie. Metoda ta może być stosowana zarówno do betonów zwykłych i wysoko wartościowych (sworzni „srebrny”), jak i betonów lekkich (sworzni „złoty”). Zaleca się, aby przed rozpoczęciem badań przeprowadzić ocenę twardości kruszywa zastosowanego w betonie stosując 10 stopniową skalę Mohsa.



Rys. 3. Pomiar wytrzymałości na rozciąganie betonu metodą „pull-off”

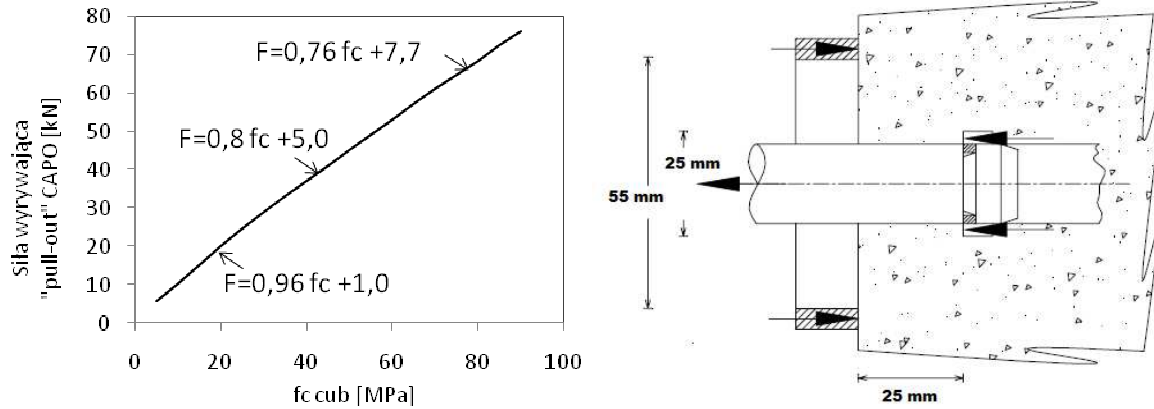
Następnie wykonuje się trzy strzały z odległości podyktowanej wielkością szablonu stanowiącego wyposażenie zestawu. Po dokonaniu trzech pomiarów długości wystającej części sworznia ich średnia pozwala na określenie wytrzymałości na ściskanie betonu w danym punkcie pomiarowym. Zaletą tej techniki jest możliwość oceny wytrzymałości betonu także i na nierównej powierzchni uszkodzonej *spallingiem* [6].



Rys. 4. Zestaw do pomiaru wytrzymałości na ściskanie metodą sondy Windsor oraz wykresy przedstawiające zależność między długością wystającej części sondy ( $D$ ) i wytrzymałością na ściskanie betonów wykonanych na kruszycach o twardości od 3 do 7 w skali Mohsa [12]

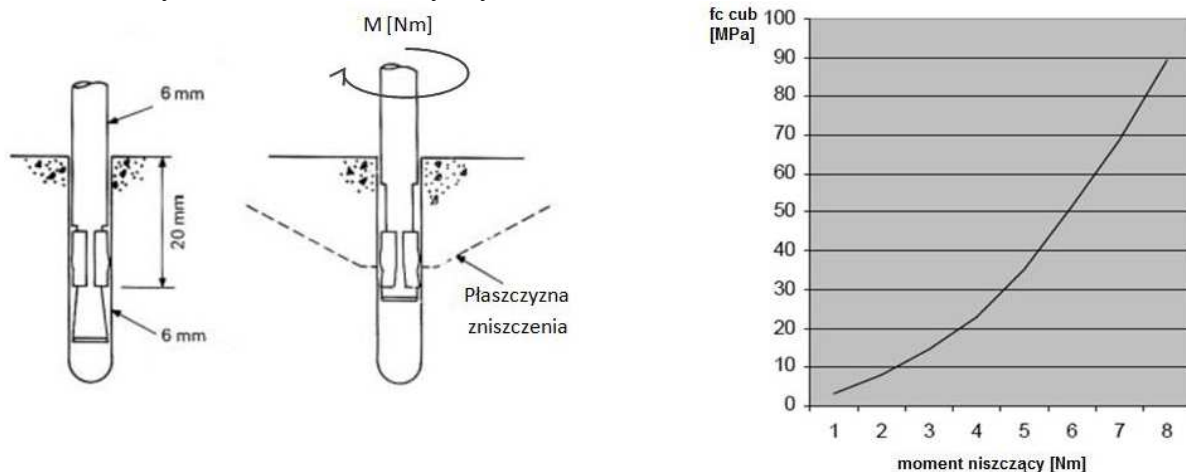
Metodą stosowaną w krajach skandynawskich, a także w USA i Wielkiej Brytanii jest metoda z grupy technik „pull-out” nazywana **CAPO** (ang. *cut and pull out* [6, 13]). Jest to odmiana tradycyjnej techniki „pull-out” (LOK test), w której pierścienie osadzone są w betonie na etapie betonowania elementu. Specyfiką i zaletą metody CAPO jest stosowanie pierścieni samo rozprężających się po wprowadzeniu do wyłobienia, wycinanego frezem wewnątrz odwiertu. Istotą tej techniki jest pomiar wartości siły niezbędnej do wyrwania z betonu stalo-

wiej kotwy zainstalowanej w wykonanym w betonie kanale. Obciążenie jest przekazywane za pośrednictwem siłownika hydraulicznego, który z jednej strony przekazuje siłę wyrwywającą na trzpień kotwy, z drugiej zaś dociska powierzchnię betonu za pośrednictwem centrycznego pierścienia oporowego (rys. 5). Pierścień ten, dzięki właściwemu doborowi proporcji swoich wymiarów w stosunku do głębokości położenia kotwy oraz wymiarów samej kotwy, wymusza złożony stan naprężenia, który w efekcie prowadzi do zniszczenia. Na podstawie ustalonych doświadczalnie zależności (rys. 5) szacuje się wytrzymałość betonu na ściskanie.



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

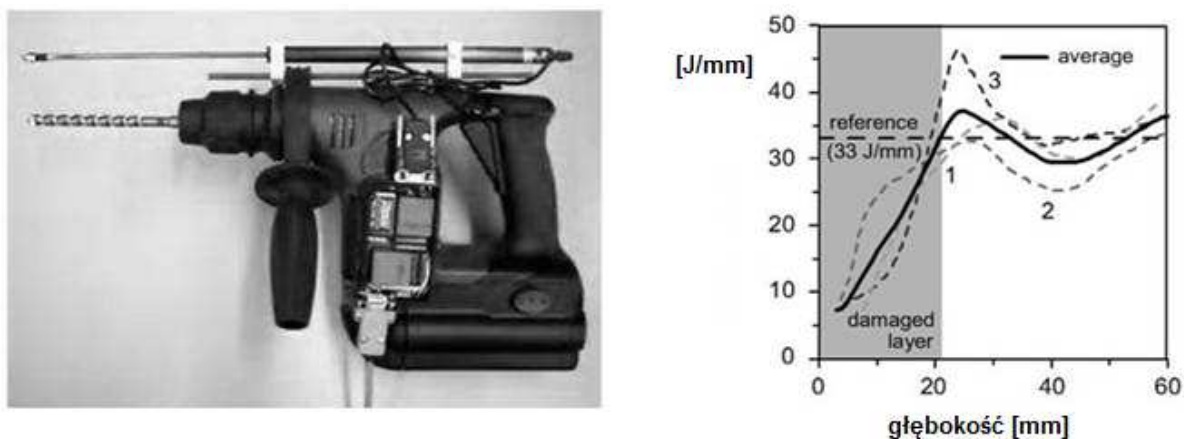
**Metoda destrukcji wewnętrznej** (*BRE internal fracture*) jest metodą opracowaną i opublikowaną przez Building Research Establishment [14]. W metodzie tej w badanym materiale wiercony jest otwór o średnicy 6 mm i głębokości 30–35 mm. W otwór wprowadza się kotwy z tuleją samorozprężającą na głębokości 20 mm. Poprzez dokręcenie głowicy kluczem dynamometrycznym następuje obciążenie momentem i wyrwanie kotwy (rys. 6). Bezpośrednią miarą jakości betonu jest odczytana wartość momentu niszczonego, która następnie przeliczana jest na wytrzymałość na ściskanie. Istotnym ograniczeniem tej metody jest możliwość jej stosowania tylko do betonów o wytrzymałości do 40 MPa.



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

Na szczególną uwagę zasługuje **metoda oceny oporu wiercenia**. Badanie to jest stosunkowo łatwą i efektywną techniką pozwalającą na oznaczenie zasięgu (mapy) występowania betonu uszkodzonego działającą temperaturą. W badaniach oceny jakości betonu po pożarze w tunelu La Manche [8] stosowano wiertnicę na podwoziu stacjonarnym, a zrealizowane 500

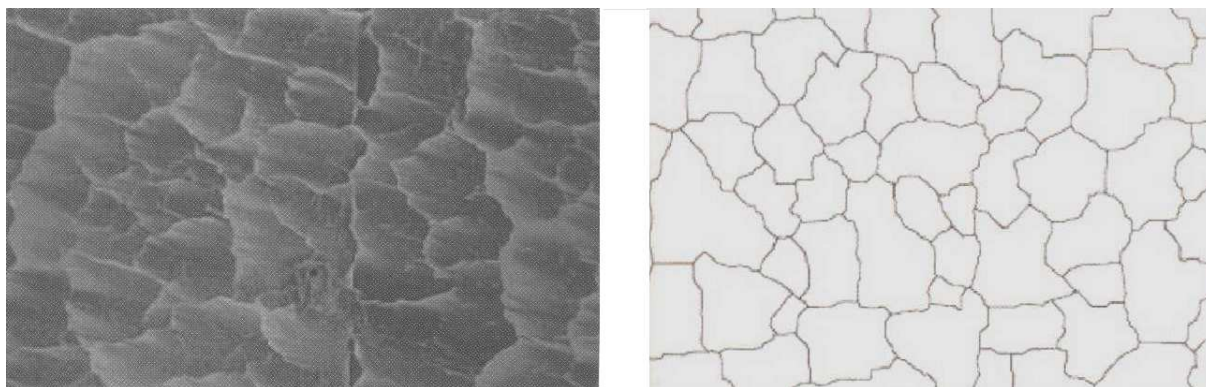
odwiertów pozwoliło na wykreślenie „mapy” uszkodzeń betonu. W badaniach oporu wiercenia prowadzonych przez Felicetti’ego [11] wykorzystano wiertarkę udarową powszechnego stosowania, wyposażoną w indukcyjny czujnik przemieszczenia oraz miernik poboru energii elektrycznej (rys. 7.). Informacje uzyskane podczas wiercenia pozwalają na obliczenie oporu wiercenia, który określa wykonaną pracę na jednostkę głębokości wiercenia [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. Wykresy oporu wiercenia w funkcji postępu wiertła w sposób wyraźny pozwalają na wyróżnienie głębokości, na której występuje strefa nieuszkodzonego materiału. Fluktuacje rejestrowanego sygnału przypisuje się naturalnej niejednorodności twardości betonu wynikającej z jego kompozytowej struktury (rys. 7).



Rys. 7. Wiertarka stosowana w metodzie pomiaru oporu wiercenia Felicetti’ego oraz przykład zarejestrowanej zmienności energii niezbędnej do wykonania 1 mm odwiertu od jego głębokości [11]

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

Na kompleksową ocenę elementu pozwala także technika **analizy obrazu zarysowania powierzchni betonu**. Metoda ta, bazująca na analizie zdjęć wykonanych w technice cyfrowej, opracowana została dla oceny uszkodzeń elementów sklepienia tunelu pod kanałem La Manche [8]. Metoda zakłada, że geometria zarysowania powierzchni elementu odpowiada uszkodzeniom betonu i zależy od intensywności pożaru jaki miał miejsce. Zdjęcia cyfrowe podane zostają obróbcie za pomocą programu komputerowego, który oblicza pole powierzchni, obwód i współczynnik kształtu wyszczególnionych pól tworzonych przez kontur zarysowania betonu (rys. 8). W następnym etapie przeprowadzić można analizę korelacji między tak określonymi parametrami charakteryzującymi zarysowanie, a na przykład liczbą odbicia sklerometru zmierzoną w środku każdego z pól.



Rys. 8. Fotografia zarysowanej powierzchni betonu po pożarze i uzyskany metodą komputerowej analizy obraz pozwalający na wyznaczenie geometrycznych parametrów zarysowania [8]

## 2.2 Metody laboratoryjne

Badania mające na celu ocenę degradacji betonu oraz oszacowanie głębokości występowania strefy uszkodzeń, wymagające pobrania materiału z elementów uszkodzonych pożarem i ich przebadania w warunkach laboratoryjnych przedstawia Tab. 1 (grupa III). Prowadzone na odwiertach badania mają na celu określenie resztkowych właściwości mechanicznych uszkodzonego betonu, bądź też oszacowanie temperatury, jakiej poddany został beton w czasie pożaru.

Badania laboratoryjne mające na celu **określenie resztkowych właściwości mechanicznych uszkodzonego betonu** dotyczą bezpośredniego badania pobranego materiału (odwierty), lub oszacowanie tych wartości na odwiertach metodami niebezpośrednimi.

Wyznaczenie **cech wytrzymałościowych na odwiertach** przeprowadza się stosując wytyczne norm PN-EN 206 i PN-EN 12540-1. Normy te precyzują dobór średnicy i wysokości odwiertu, a także sposób przygotowania próbek do badania. Istotnym aspektem wykonywania odwiertów do badań laboratoryjnych jest 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 powinny zostać wykonane odwierty w miejscach zaistniałych uszkodzeń. Wybór miejsc i ilości dokonanych odwiertów podyktowany jest zazwyczaj szczegółowością planowanych badań oraz rozległością zniszczeń pożarowych.

Biorąc pod uwagę, że wiercenie odbywa się w materiale o częściowo bądź całkowicie zdehydratyzowanej matrycy cementowej zaleca się, w miarę możliwości, odpylanie 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 unikania, w miarę możliwości, prowadzenia odwiertów w strefie występowania zbrojenia.

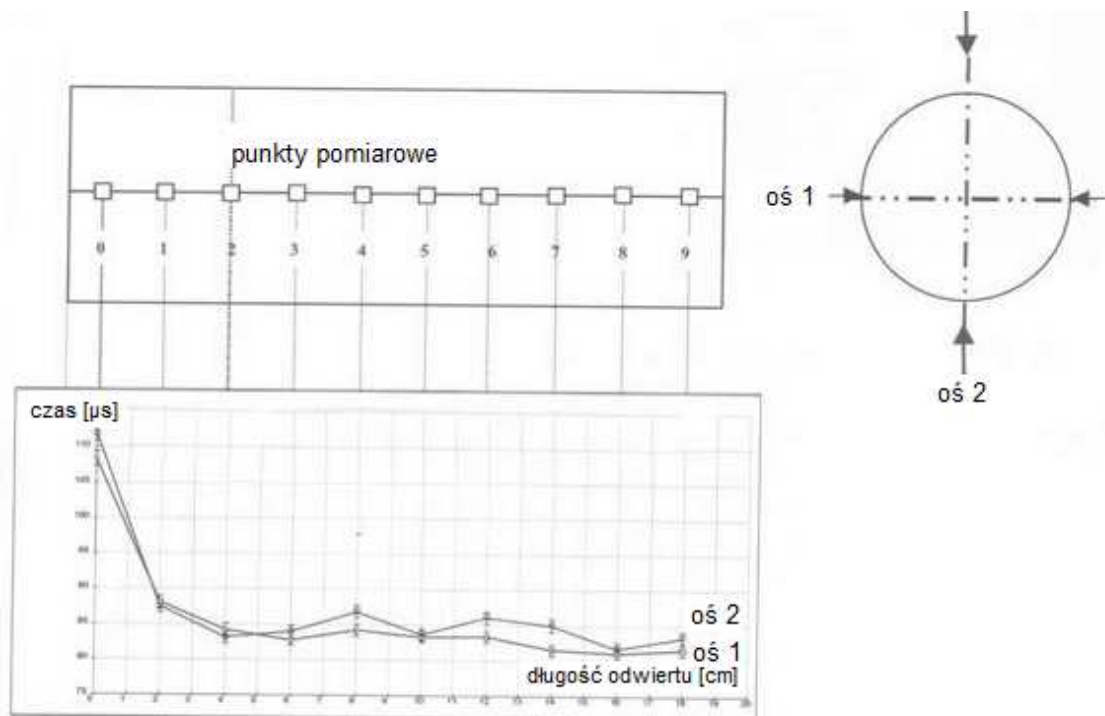
W celu oceny wartości dynamicznego modułu sprężystości betonu metodami niebezpośrednimi stosować można **metodę częstotliwości rezonansowej**. Polega ona na pomiarze częstotliwości rezonansowej betonowego plastra uzyskanego przez pocięcie odwiertu pobranego w miejscu uszkodzeń pożarowych [8]. Przeprowadzenie oceny tej cechy na plastrach pochodzących z kolejnych warstw betonu, pozwala na wyznaczenie profilu zmian modułu od warstwy wierzchniej, aż do warstwy betonu nieuszkodzonego. Do pomiaru potrzebny jest analizator częstotliwości rezonansowej wraz z czujnikiem, młoteczką wzbudzającą drgania i odpowiednimi podkładkami ze spienionej gumy. Wyniki badania betonu pochodzącego



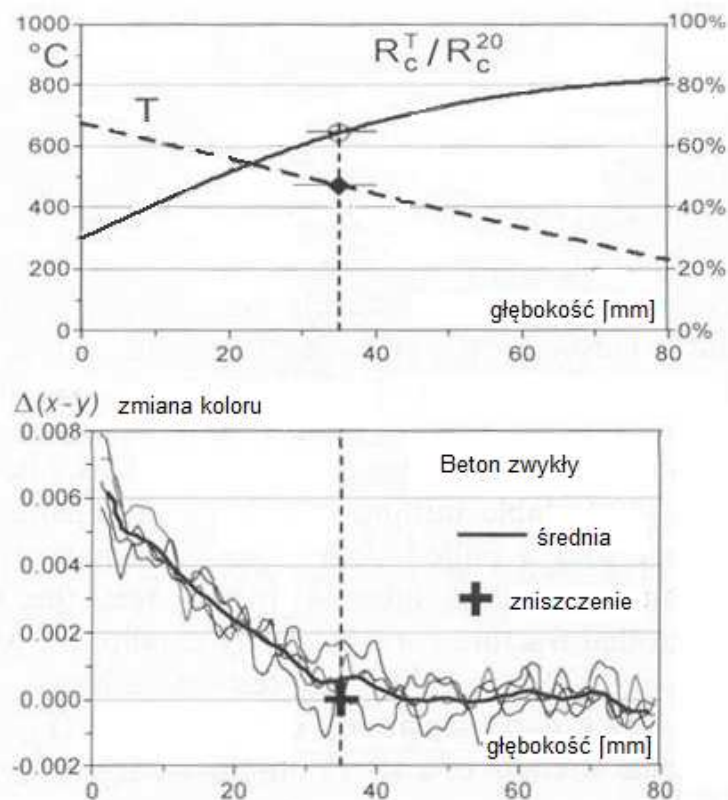
z różnych głębokości odwiertu pozwalają na określenie profilu zmian dynamicznego modułu sprężystości betonu, a w konsekwencji na oznaczenie zasięgu jego uszkodzeń termicznych.

**Metoda ultradźwiękowa** może być stosowana również jako niebezpośrednia technika pozwalającej na ocenę właściwości mechanicznych betonu w pobranych odwiertach. W tym przypadku stosuje się układ skrośny czujników, na dwóch średnicach wzajemnie prostopadłych (rys. 9). Wykonując pomiary na całej długości odwiertu co 1 cm, wyznaczyć można profil zmian prędkości fali ultradźwiękowej, a następnie określić zasięg występowania uszkodzeń [8].

Grupa badań laboratoryjnych umożliwiających **oszacowanie osiągniętej przez beton temperatury** wykorzystuje techniki: DTA, TGA, dyfrakcję promieni X, mikroskopię skaningową, termoluminescencję, kolorymetrię, analizy chemiczne, bądź analizy petrograficzne. Ogrzewanie betonu powoduje zmianę jego koloru. Najbardziej zaakcentowanym zmianom koloru podlegają betony na kruszywie krzemianowym, które poddane działaniu temperatury 300–600°C uzyskują kolor czerwony lub różowy, w temperaturze 600–900°C białawo-szary, a w temperaturze 900°C–1000°C ich kolor określa się jako płowy (żółty z odcieniem szarości). W efekcie oceny barwy oszacować więc można zmiany właściwości mechanicznych betonu. W celu precyzyjnego opisu zmian koloru stosuje się techniki stosowane do opisu barw w **kolorymetrii**. Badania prowadzone przez Faure i Hemond [8] wykonano podczas badań diagnostycznych betonu w tunelu pod kanałem La Manche. Do pomiaru barwy stosowano kolorymetr przykładany bezpośrednio do powierzchni próbek betonu. Metodyka stosowana przez Short et al. [15] polega na obserwacji próbek w mikroskopie optycznym i analizie zdjęć cyfrowych powiększonego obrazu. Metodyka zastosowana przez Felicetti [10] oparta jest na analizie zmian koloru betonu w zależności od osiągniętej temperatury (rys. 10). Zdjęcia odwiertów długości 80 mm wykonano aparatem cyfrowym powszechnego stosowania.



Rys. 9. Zastosowanie metody ultradźwiękowej do badania jakości betonu w odwiertach [8]

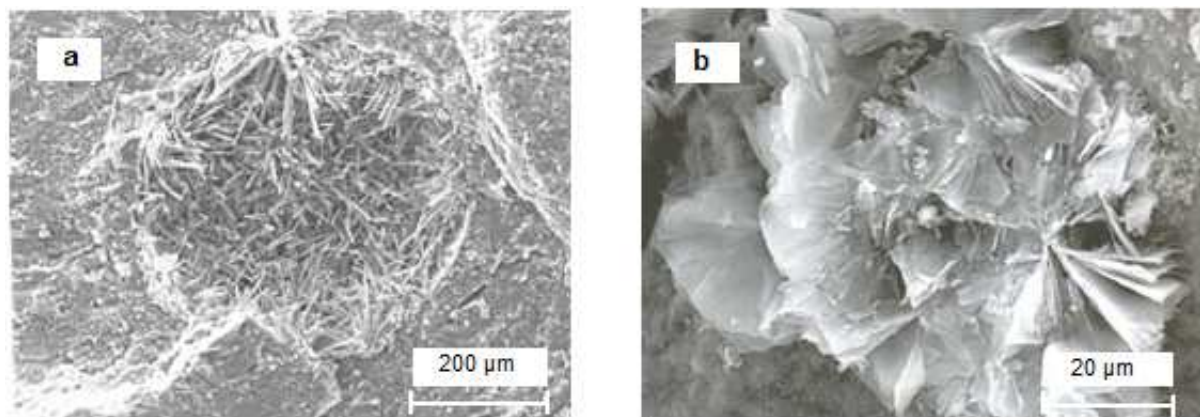


Rys. 10. Zmienność maksymalnej temperatury (T) oraz względnej wartości resztkowej wytrzymałości betonu na ściskanie ( $R_c^T/R_c^{20}$ ) oraz odpowiadająca tym zmianom zarejestrowana zmiana koloru (wartości uzyskane z 4 odwiertów długości 80 mm) [10]

**DTA i TGA** to metody bazujące na obserwacji przemian fizyko-chemicznych zachodzących w betonie podczas jego ogrzewania w warunkach laboratoryjnych. Przyjmując, że większość przemian spowodowanych działaniem temperatury ma charakter nieodwracalny, podczas ponownego ogrzewania próbki betonowej pobranej w miejscu pożaru można zaobserwować na wykresach DTA i TGA brak widocznych przemian, aż do momentu osiągnięcia temperatury pierwszego ogrzewania. Jej przekroczenie skutkuje bowiem pojawieniem się na wykresach charakterystycznych dla danej temperatury pików odpowiadających przemianom zachodzącym w ogrzewanym materiale [8]. Korzystając z tej zasady, poprzez porównanie wykresów uzyskanych z betonu nienaruszonego z wykresem uzyskanym dla betonu z miejsc poddanych działaniu pożaru, pozwala na oszacowanie osiągniętej przez beton temperatury.

**Dyfrakcja promieni X** (fali elektromagnetycznej 0,1–10 Å) pozwala na zidentyfikowanie w materiale faz o charakterze krystalicznym. Metoda pozwala na oszacowanie ilości faz mineralnych zawartych w materiale. Stwierdzona obecność lub brak jednej z faz jest podstawą do oszacowania temperatury do jakiej ogrzany został beton [6, 8].

Stosując **obserwacje w mikroskopie skaningowym** [8] możliwe jest szacowanie temperatury jakiej poddany został betonu 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 przełamach jak i zgładach. Obserwacje mikroskopowe pozwalają min. na odnotowanie obecności igiełek ettryngitu świadczące, że beton nie doświadczył temperatury wyższej niż 100°C (rys. 11a), bądź na obserwację rekrystalizacji portlandytu w postaci "róż pustyni", która świadczy, iż beton poddany został działaniu temperatury powyżej 500°C (rys. 11b).



Rys. 11. Obserwacje w mikroskopie skaningowy: a) igielki ettryngitu ( $T < 100^{\circ}\text{C}$ ), b) „różę pustyni”  $T > 500^{\circ}\text{C}$ ) [8]

**Termoluminescencja** (jarzenie, zimne świecenie) substancji 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 z badanego materiału, która jest proporcjonalna do pochłoniętego promieniowania. Zjawisko to występuje w minerałach 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 ogrzany oraz maksymalnej temperatury osiągniętej przez materiał. Z tego powodu znalazła ona także zastosowanie do diagnostyki uszkodzeń pożarowych [8]. W technice termoluminescencyjnej jarzenie próbek betonu pobranego z uszkodzonych stref betonu porównuje się z jarzeniem betonu wygrzewanego w warunkach laboratoryjnych (czas wygrzewania i jego intensywność powinna odpowiadać realnym warunkom zaistniałego pożaru).

W publikacjach możemy odnaleźć również techniki mające na celu ocenę ilości uszkodzeń prowadzone metodami **porozymetrii** rtęciowej [12] (ocena całkowitej porowatości oraz średniej wielkości porów w materiale) lub poprzez **ocenę gęstości mikro zarysowań** [16] (całkowita długość rys na jednostkę powierzchni).

### 3. Podsumowanie

Pośród przedstawionych w referacie metod oceny uszkodzeń betonu po pożarze znajdują się techniki powszechnie stosowane do oceny jakości betonu (met. sklerometryczna, metoda ultradźwiękowa, metoda „pull-off”, itp) oraz techniki adaptowane z innych dziedzin nauki (termoluminescencja, metoda analizy fal powierzchniowych, georadar, itp).

Do dyspozycji inżyniera dostępne są zarówno bardzo praktyczne w zastosowaniu techniki możliwe do stosowania in-situ, jak i zawansowane techniki laboratoryjne. Pierwsze z nich pozwalają na często wystarczającą lecz jedynie szacunkową i zgrubną ocenę jakości betonu. Metody laboratoryjne są bardziej dokładne, jednak droższe i bardziej czasochłonne. W praktyce zaleca się stosowanie łączenia kilku technik celem uzyskania wystarczająco pełnego i dokładnego obrazu uszkodzeń elementu betonowego [8, 10, 15].

### Literatura

1. Hager I., Pimienta P.: 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

2. Hager I., Śliwiński J., Durica T.: 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. Hager I., Pimienta P.: 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. Hager I.: 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, 172 pp.
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. Colombo, M., Felicetti R.: 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. Felicetti R.: 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](http://www.ndtjames.com/catalog/strengthTesting/windsorHighPerformanceProbe_standard.html)
13. Tay, D.C.K., Tam, C.T.: 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, Pages 4
15. Short N.R., Purkiss, J.A., Guise S.E.: Assessment of fire damaged concrete using color image analysis, *Construction and Building Materials*, Vol. 15 (2001) p. 9–15.
16. Short N.R., Purkiss, J.A., Guise S.E.: Assessment of fire damaged concrete using crack density measurements, *Structural Concrete*, Vol. 5 (2002), p. 137–143.