



# Diagnostyka korozyjna obiektów żelbetowych

Dr hab. inż. Tomasz Błaszczyński, dr hab. inż. Aldona Łowińska-Kluge, Politechnika Poznańska, prof. dr hab. inż. Leonard Runkiewicz, Instytut Techniki Budowlanej, Politechnika Warszawska

## 1. Wprowadzenie

Ostatnio w trakcie realizacji obiektów żelbetowych występują spękania elementów nośnych na całej wysokości przekroju. Takie spękania oznaczają, że elementy te tracą swą sztywność i nie pracują jako pełny przekrój żelbetowy. Konieczne staje się wtedy określenie przyczyn powstania takich uszkodzeń, do czego niezbędna jest odpowiednia diagnostyka. Za jedną z przyczyn takiego stanu rzeczy można uznać destrukcję wewnętrzną betonu spowodowaną niewłaściwym doбором składników mieszanek betonowych. W związku z tym diagnostyka taka powinna być oparta na badaniach na obiekcie i badaniach laboratoryjnych oraz badaniach strukturalnych (SEM, XRD, DTA). Na tej podstawie można przeanalizować przyczyny zaistnienia stanu awa-

ryjnego i rozważyć możliwości naprawy.

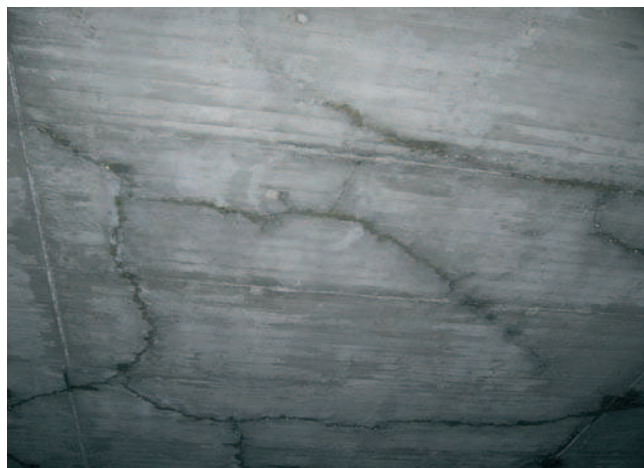
Coraz powszechniejsze staje się występowanie rys i spękań żelbetowych elementów nośnych na całej wysokości przekroju betonowego w okresie do kilku dni od ich wykonania, pomimo prawidłowego wykonawstwa, właściwej pielęgnacji i braku oddziaływań dynamicznych. Najczęściej dotyczy to płyt stropowych [1, 2]. To samo zjawisko obserwuje się również w przypadku innych żelbetowych elementów konstrukcyjnych [3, 4]. Jako jedną z przyczyn niszczenia betonu uznaje się destrukcję wewnętrzną spowodowaną niewłaściwym doбором składników mieszanek betonowych (tj. wchodzących ze sobą w niepożądane reakcje prowadzące do zniszczenia struktury betonu). Zjawiska te nasiliły się szczególnie od roku 2003, czyli po wejściu nowej normy okre-

ślającej skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku [5]. Norma ta wprowadziła nowe rodzaje i składy cementów. Niestety wytwórcy betonu nie zawsze uwzględniają te dane stosując nadal wypełnienia i dodatki jak dla niemodyfikowanych cementów. Nie kontrolują przy tym efektów takich receptur i nie analizują niepożądanych reakcji pomiędzy składnikami, które mogą mieć miejsce.

Ponadto beton z litery prawa budowlanego nadal nie jest wyrobem w rozumieniu ustawy o wyrobach budowlanych (Dz. U. Nr 92, poz. 881, 2004, z późn. zm.), co powoduje, że za jego jakość i bezpieczeństwo zgodnie z art. 5 Prawa budowlanego (Dz. U. Nr 89, poz. 414, 1994, z późn. zm.), odpowiada kierownik budowy, a nie producent. W przypadku kierownika budowy jedynym narzędziem diagnostycz-



Rys. 1, 2. Przykładowe zarysowania powstałe na stropie I i II (widok od dołu)



Rys. 3, 4. Przykładowe zarysowania powstałe na stropie I i II (widok od dołu)

nym są badania wytrzymałościowe, w celu sprawdzenia projektowanej klasy betonu. Dzisiaj w niektórych przypadkach się to sprawdza, jednakże coraz częściej zdarzają się przypadki spełnienia wymaganej klasy betonu, przy postępującym procesie korozji wewnętrznej. W związku z tym, w celu prawidłowej oceny korozyjnej elementów żelbetowych, niezbędne jest opracowanie odpowiedniej metodologii diagnostycznej.

Proponowana diagnostyka opiera się na wieloetapowym egzaminowaniu analizowanego betonu. Rozpoczyna się ona etapem oceny makroskopowej na obiekcie i na pobranych próbkach, która już umożliwia określenie zarysowań i spękań oraz niektórych przyczyn i skutków (tj. nadmiernej ilości niezwiązanych popiołów i innych wypełniaczy, wewnętrzne mikro-zarysowania, lokalny brak przyczepności pomiędzy kruszywem i matrycą cementową lub pomiędzy zbrojeniem i otaczającym mikrobetonem, rodzaj i granulację zastosowanego kruszywa itp.). Następnie proponuje się ocenę wybranych cech mechanicznych i fizycznych (tj. gęstości objętościowej, nasiąkliwości wagowej, pH oraz wytrzymałości na ściskanie itp.). W kolejnym etapie powinno się wykonać bardziej szczegółową analizę opartą na wybranych badaniach strukturalnych (tj. SEM – skaningowa mikroskopia elektronowa, XRD –

rentgen i DTA – derywatografia). Całość wieloetapowego egzaminowania powinna być zakończona badaniami chemicznymi. Dopiero tak pogłębiona wiedza umożliwia przeprowadzenie pełnej diagnostyki korozyjnej elementu żelbetowego.

Opracowana metoda diagnostyczna przedstawiona zostanie na przykładzie jednego z obiektów budowlanych, gdzie w trakcie realizacji stropów doszło do samoczynnego zarysowania się dwóch obszarów stropów. Jeden strop zarysował się w czerwcu (strop I na poz. +0,90 m – temp. 26–30°C, brak opadów), a drugi we wrześniu (strop II na poziomie +4,20 m – temp. 6–22°C brak opadów). Na całej grubości przedmiotowych stropów, po kilkunastu godzinach od zabetonowania, pojawiły się rysy i spękania o układzie nieregularnym, wielokierunkowym, tworząc w efekcie rodzaj siatki rys (rys. 1–4). W związku z istniejącymi warunkami pogodowymi, po zabetonowaniu stosowano pielęgnację w postaci bezpośredniego stałego polewania wodą.

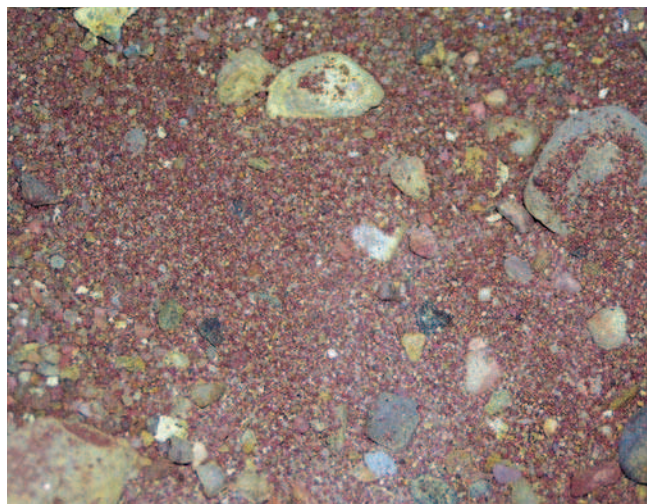
## 2. Badania makroskopowe

Z zarysowanych stropów wycięto po 6 próbek, w tym 3 w strefach zarysowanych i 3 w strefach niezarysowanych, które zostały przebadane w ośrodku poznańskim oraz 6 próbek (niezależnie

od strefy), które zostały przebadane w laboratoriach ITB, Politechniki Krakowskiej i AGH. Na podstawie obserwacji makroskopowych stwierdzono występowanie pęknięć o rozwarciu od 0,32 mm do 3,4 mm, na całą wysokość próbek betonowych. W próbkach wywierconych z niezarysowanych stref stropów zarysowanych, stwierdzono także rysy wewnętrzne, które nie objawiły się na żadnej z powierzchni. Beton we wszystkich próbkach zbrojony był dołem, zbrojenie górą występowało jedynie lokalnie.

W analizowanym betonie stwierdzono obecność kruszywa węglanowego. Dodatkowo w betonach z obu ocenianych stropów widoczne były niewielkie kawałki cegieł. Na przełomach próbek betonu wszystkich ocenianych stropów stwierdzono zmiany barwy od stalowoszarej poprzez jasnobeżową do ciemnobeżowej oraz niezwiązany, osypujący się popiół lotny i opitki metalowe. Stwierdzono też, że w ramach każdego z badanych stropów stosowano betony o różnym składzie. Chcąc to sprawdzić próbki przedmiotowych betonów z różnych miejsc tych samych stropów poddano działaniu roztworu wodnego kwasu solnego (1:3), w taki sposób jak przy określaniu kruszywa i cementu wg [6]. Otrzymane w ten sposób kruszywa wysuszono w temperaturze 105°C. Składały się one w dużej





Rys. 5, 6. Kruszywo otrzymane po ekstrakcji z próbek betonów, pobrane z ocenianych stropów

mierze z mielonej ceramiki i innych zanieczyszczeń (rys. 5, 6).

We wszystkich ocenianych betonach zaobserwowano także brak właściwej przyczepności większych ziaren kruszywa do matrycy cementowej. Betony z obu stropów, od spodu płyt stropowych, były skarbonatyzowane na głębokość od 0,6 do 0,8 mm. Beton o kolorze beżowym nie miał odczynu zasadowego. Pomimo, że zbrojenie w stropach znajdowało się jeszcze w betonie o zasadowym pH, to na zbrojeniu obserwowano już ślady rdzy.

### 3. Badania wybranych cech mechanicznych i fizycznych

W celu określenia wybranych cech mechanicznych i fizycznych przeprowadzono badania gęstości objętościowej, nasiąkliwości wagowej oraz pH. Badanie gęstości objętościowej przeprowadzono na wszystkich próbkach walcowych określając średnią gęstość objętościową dla zastosowanego betonu w każdym ze stropów. W efekcie badań wykonanych w ośrodku poznańskim oceniono, że beton ze stropu I posiada gęstość 2256 kg/m<sup>3</sup>, a ze stropu II – 2446 kg/m<sup>3</sup>. Wyniki te potwierdziły badania w laboratorium ITB, gdzie średnią gęstość oszacowano jako 2340 kg/m<sup>3</sup>. Gęstość objętościowa pomiędzy 2300

i 2400 kg/m<sup>3</sup> jest gęstością dobrze charakteryzującą większość betonów konstrukcyjnych [7]. Dla ocenianych betonów określono także nasiąkliwość wagową, która wynosiła dla betonu ze stropu I – 6,9%, a ze stropu II – 6,1%. Badane stropy pod względem nasiąkliwości spełniały wymagania dla betonów ostoiętych przed bezpośrednim działaniem czynników atmosferycznych (nasiąkliwość wagowa < 9%). Odczyny wyciągu wodnego rdzenia próbek betonu ze stropów I i II, oszacowane w ośrodku poznańskim, wynosiły odpowiednio: dla stropu I – 12,00, a dla stropu II – 11,96. Badania przeprowadzone w ośrodku krakowskim (Politechnika Krakowska) potwierdziły te wyniki oceniając pH odpowiednio jako 11,90 i 12,15. Przedstawione wartości odczynów pH świadczą o różnym stopniu hydratacji spoiw użytych do wykonania badanych stropów. Wartości te są niższe od typowych pH dla normalnych betonów (pH ~ 12,5).

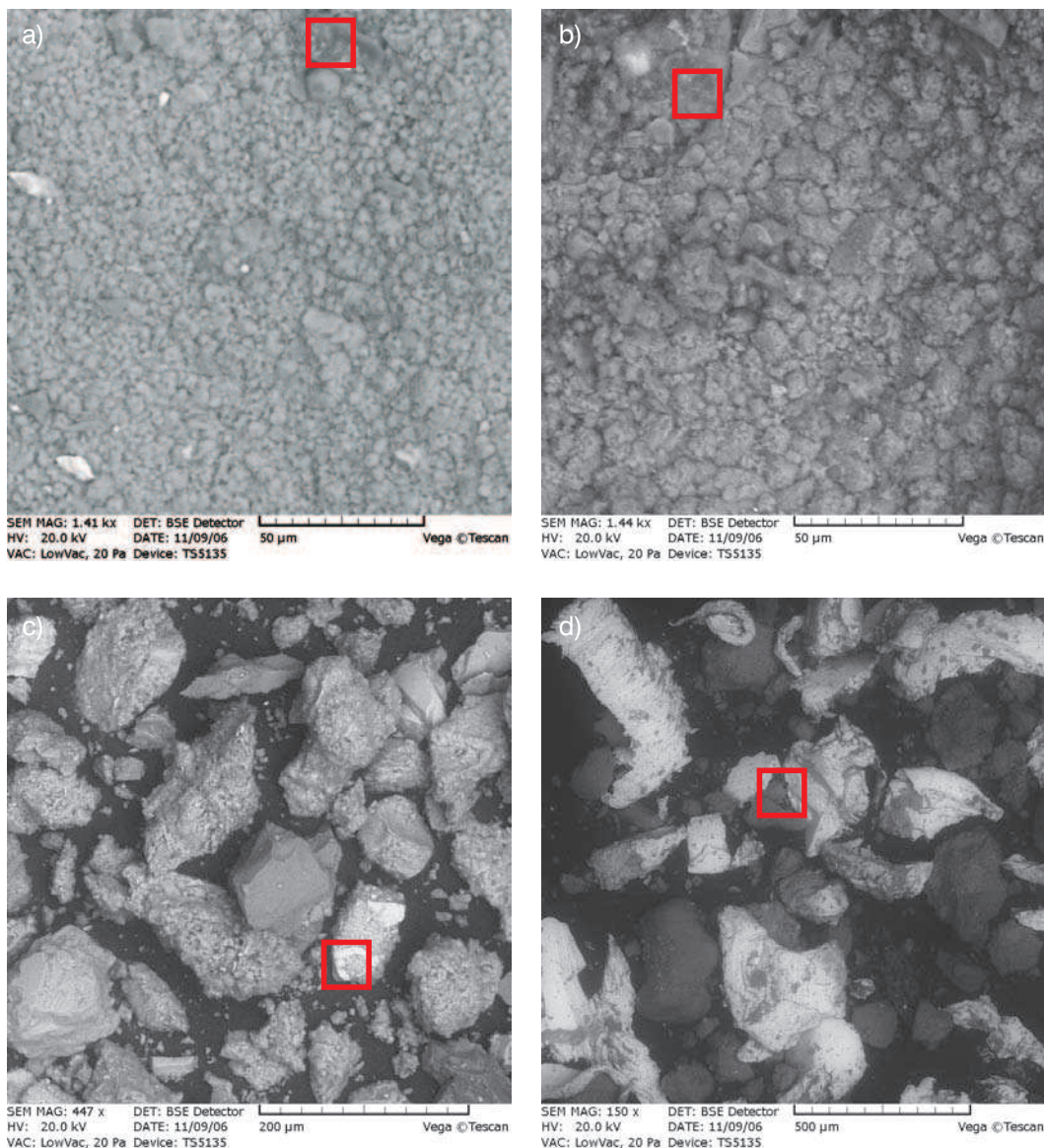
### 4. Wybrane badania strukturalne

W celu określenia struktury i rodzaju powstałych związków oraz rodzaju dodatków dodanych do betonu, dla próbek pobranych ze stropów, wykonano badania mikroskopowe (rys. 7). Badania

mikroskopowe miały również służyć ocenie ewentualnych możliwości i kierunków zachodzenia dalszych reakcji w analizowanych betonach [8]. Na podstawie analizy obserwowanych obszarów, jak i zdjęć stwierdzono, że w badanych próbkach betonu występowały: portlandyt, fazy tobermorytowe żelowe i wykrystalizowane krótkowłókniste, niewielkie ilości węglanu wapniowego i żużel wielkopieczowy (rys. 7a, 7b). W całej objętości widoczne były ziarna popiołu lotnego. W betonie ze stropu I występowało mniej żużla wielkopieczowego, niż w pozostałych betonach.

W betonie ze stropu II występowały znaczne ilości „luźnego” popiołu lotnego, sferoidy tlenków żelaza i opiłki metaliczne połączone z matrycą cementową (rys. 7c i 7d). Wykonane przy użyciu mikroskopy rentgenowskiej mikroanalizy bezwzorcowej EDX obserwowanych, w betonie ze stropu II, produktów reakcji wykazywały w nich obecność wapnia, krzemu, glinu, tlenu, węgla, magnezu, siarki i żelaza.

Badania rentgenowskie wykonano na preparacie proszkowym uzyskanym z wyekstraktowanego „kruszywa czerwonego”, przy użyciu skomputeryzowanego dyfraktometru rentgenowskiego (rys. 8). Na dyfraktogramie dla tego kruszywa stwierdzono następujące



**Rys. 7.**  
 Obraz mikroskopowy betonu ze stropu II: a) i b) widoczne niewielkie ilości ettryngitu, portlandytu, faz tobermorytowych, znaczne ilości nieprzereagowanych ziaren popiołu lotnego, mączka mineralna, żużel wielkopieczowy, sferoidy tlenków żelaza; luźna struktura, c) osypujące się ziarna kruszywa, d) osypujące się opiłki metalowe

fazy: kwarc,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , mulit, kaolinit. Odpowiadało to w przybliżeniu składowi ceramiki, rdzy oraz naturalnemu kwarcowi.

Aby określić czy w betonach były dodatki wapienia oraz by określić zawartość związków przyłączonych w trakcie wiązania i twardnienia cementu, dla próbek betonów pobranych z analizowanych stropów przeprowadzono badania derywatograficzne. Próbki badano metodą termogravimetryczną na derywatografie w atmosferze  $\text{N}_2$  w zakresie temperatur od 20 do 900°C.

Ubytek masy przy ogrzewaniu do temperatury 580°C dla próbek z betonu stropów nr I i II, wynosił odpowiednio: 9,50% i 9,45%.

Całkowity ubytek masy wynosił dla próbek betonu ze stropów I i II, odpowiednio: 15,05% i 13,63%. Po badaniu próbki nie zmieniły swej proszkowej postaci. Nie zauważono nadtopień.

### 5. Badania chemiczne

W celu dokładnego określenia ilości związków mogących wywoływać spękania i w przyszłości podczas eksploatacji mogących być przyczyną „korozji wewnętrznej”, a mianowicie  $\text{SO}_{3\text{cał}}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  oraz  $\text{Cl}^-$  wykonano analizy chemiczne próbek betonów pobranych z ocenianych stropów. Na pobranych metodą kwartowania o odpowiedniej wielkości prób-

kach zmielonych betonów z badanych stropów wykonano analizy chemiczne zgodnie z normami [5, 9÷11].

Oznaczone w ośrodku poznańskim ilości  $\text{SO}_{3\text{cał}}$  dla betonu z analizowanych stropów wahały się w granicach od 9,31 do 9,75% w odniesieniu do masy cementu. W laboratorium ITB wielkość ta wahała się od 12,53 aż do 24,21% (w odniesieniu do masy cementu). Otrzymane wielkości nie spełniały wymagań normy [5] dla cementu CEM II 32,5, która to wielkość zgodnie z normą nie może przekroczyć wartości 3,5% oraz dla cementu CEM III 32,5, która to wielkość zgodnie z normą nie może przekroczyć wartości 4,0%.





Oznaczona w badaniach ilość Cl<sup>-</sup> (ośrodek poznański i AGH) w całości betonów spełniała wymagania normy [7].

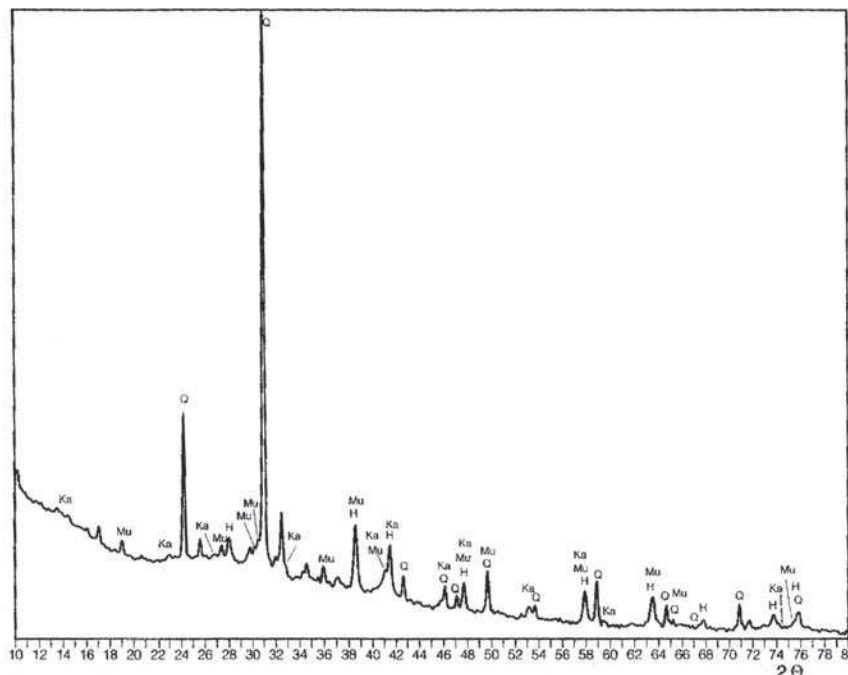
Oznaczona w ośrodku poznańskim ilość MgO, wynosząca od 14,61 do 19,97% w odniesieniu do masy cementu przekraczała według [12] wartość dopuszczalną wynoszącą 4%. Przez wiele lat w normach większości krajów dopuszczano zawartość MgO w cemencie do 5%. Jednakże przypadki destrukcji wielu obiektów w USA i innych krajach, a także wyniki długotrwałych badań wykazały, że niezbędne są dodatkowe gwarancje.

Oznaczona w ośrodku poznańskim ilość alkaliów (Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>) wynosiła od 9,31 do 11,03% w stosunku do masy cementu. W laboratorium ITB wielkość tę określono na poziomie od 20,34 do 32,23%, w ośrodku krakowskim od 11,46 do 16,33%, a w laboratorium AGH o wartości około 19% (w stosunku do masy cementu). Wszystkie określone wartości znacznie przekraczały wartość dopuszczalną, wynoszącą według [12], 0,6%. Związki siarki przeliczone na siarkę całkowitą mogły pochodzić od cementu i zastosowanego wypełnienia (kruszywa wolne są od związków siarki). Natomiast zawartość MgO i Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> w ocenianych betonach pochodzić mogły z kruszyw i ich zanieczyszczeń, z cementu oraz zastosowanego wypełnienia.

Dodatkowo zgodnie z [6] dokonano oceny kruszywa węglanowego (z wapienia), którego ilość określono na podstawie badań derywatograficznych. Z badań wyniknęło, że zastosowane kruszywo zawierało ok. 10% kruszywa węglanowego.

## 6. Podsumowanie

W celu określenia przyczyn spękania żelbetonowych stropów w czasie ich realizacji przeprowadzono szczegółową diagnostykę korozyjną. Na podstawie badań na obiek-



**Rys. 8.** Dyfraktogram „kruszywa czerwonego” wykrytego w betonie ocenianych stropów

cie, badań laboratoryjnych oraz badań strukturalnych (SEM, XRD, DTA) przeanalizowano przyczyny zaistnienia stanu awaryjnego i rozważono możliwości naprawy. Stwierdzono, że do betonu użyto oprócz kruszyw naturalnych kruszywo węglanowe oraz kruszywo z recydingu. Zastosowany rodzaj cementów jak i kruszyw wywołał podwyższoną zawartość magnezu, alkali i związków siarki w uśrednionych (reprezentacyjnych) próbach badanych betonów. Niewłaściwy dobór składników do wytworzenia mieszanki betonowej wywołał spękania spowodowane odkształceniami skurczowymi i stwarzał możliwość wystąpienia „korozyj wewnętrznej” betonu stropów w trakcie późniejszej eksploatacji, bowiem wystąpiły warunki do zaistnienia korozyj siarczanowej. Niestety nie dałoby się tego określić tylko na podstawie badań wytrzymałościowych, szczególnie gdy te wypadły poprawnie. Tylko proponowana diagnostyka elementów żelbetonowych była w stanie poprawnie określić przyczyny i zakres powstałych zjawisk.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Błaszczyński T., Łowińska-Kluge A., Durability assessment of RC floors based on concrete properties, AMCM 2008, Łódź
- [2] Runkiewicz L., Błaszczyński T., Łowińska-Kluge A. Trwałość współczesnych stropów monolitycznych. Współczesne metody naprawy. DWE, Wrocław, 2009, s. 324–337
- [3] Błaszczyński T., Łowińska-Kluge A., Zgoła B., Wpływ wykonawstwa na degradację betonu, Materiały Budowlane, Nr 9/2004
- [4] Błaszczyński T., Łowińska-Kluge A., Zgoła B., Błędy wykonawcze jako przyczyna zagrożeń korozyjnych betonu na przykładzie fundamentów hali sportowej, XXII Konferencja Naukowo-Techniczna Awaryjne Budowlane, maj 17–20, 2005 Szczecin – Międzyzdroje
- [5] PN-EN 197-1:2002. Cement. Część 1. Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku
- [6] ITB nr 277/86 Instrukcja określania składu stwardniałego betonu
- [7] PN-EN 206-1:2003. Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [8] Łowińska-Kluge A., Józwiak K., A study of the resistance of concrete to corrosion using SEM and microanalysis, Microscopy and Analysis, vol. 20, No. 1, 2006
- [9] PN-EN 196-2:1996. Metody badania cementu. Analiza chemiczna cementu
- [10] PN-EN 196-21:1997. Metody badania cementu. Oznaczenie zawartości chlorków, dwutlenku węgla i alkaliów w cemencie
- [11] PN-EN 196-21/Ak:1997. Metody badania cementu. Oznaczenie zawartości chlorków, dwutlenku węgla i alkaliów w cemencie
- [12] Peukert S., Cementy powszechnego użytku i specjalne, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2000