

niej. Również w tej serii próbek ilość obserwowanych produktów korozji siarczanowej była najmniejsza. Podobnie jak w próbkach serii 10/10 poddanych działaniu gazowego CO<sub>2</sub>, w obserwacjach mikroskopowych stwierdzono występowanie przypowierzchniowej skarbonatyzowanej warstwy doszczelniającej.

#### 4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania układów modelowych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

- Zwiększony udział glinianu trójwapniowego w składzie spoiw cementowych zmniejsza ich trwałość w środowisku siarczanowo-węglanowym. Pośród produktów korozji oprócz typowych: ettringitu i gipsu, obserwowano także tworzenie się thaumasytu.
- Podwyższona zawartość glinożelazianu wapnia, przy jednoczesnym obniżeniu ilości glinianu trójwapniowego, ogranicza postęp korozji siarczanowo-węglanowej badanych spoiw.
- Obniżona temperatura przechowywania (5°C) sprzyja powstawaniu thaumasytu w badanych układach.
- Węglan wapnia wprowadzony do badanych spoiw przyspieszał hydratację faz klinkierowych.

- Dodatek drobno zmielonego węgla wapnia intensyfikuje także postęp korozji siarczanowo-węglanowej w badanych spoiwach.
- Oddziaływanie CO<sub>2</sub> o zwiększonym (1% obj.) w stosunku do atmosferycznego stężeniu powoduje we wczesnym okresie dojrzewania spoiw wytworzenie się powierzchniowej warstwy doszczelniającej, która hamuje dalszą karbonatyzację próbek.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Hobbs D. W., Taylor M. G., Cement and Concrete Research, nr 30, 2000, p. 529–533
- [2] Skalny J., Marchand J. M., Odler I., Sulfate attack on concrete. Spon Press. London and New York, 2002
- [3] Małolepszy J., Mróz R., Cement-Wapno-Beton, 2, 2006, p. 93–101
- [4] Thaumasite Expert Group., The thaumasite from of sulfate attack: Risks, diagnosis, remedial works and guidance on new construction. Raport of the Thaumasite Expert Group. DETR, Londyn, 1999
- [5] Partyka A., „Trwałość betonu z kruszywem węglanowym w środowisku siarczanowym”. rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 1980
- [6] Bonavetti V. L., Rahhal V. F., Irassar E. F., Cement and Concrete Research, nr 31, 2001, p. 853–859
- [7] Feldman R., Ramachandran V., Sereda P., Journal of American Ceramic Society, nr 48, 1965, p. 25–30
- [8] Fierens P., Verhaegen A., Verhaegen J., Cement and Concrete Research, nr 4, 1974, p. 695–707

# Trwałość, koszty, normalizacja oraz przykłady zastosowań metod ekstrakcji chlorków i realkalizacji skarbonatyzowanego betonu

Mgr inż. Piotr Piaskowski,  
consulting engineer John Bruce Miller, scientist, Millab Consult AS, Oslo, Norwegia

## 1. Wprowadzenie

Na całym świecie obserwuje się uszkodzenia konstrukcji żelbetowych spowodowane korozją zbrojenia. Odpowiedzialne są za to głównie dwa mechanizmy, a mianowicie: korozja chlorkowa stali i korozja spowodowana karbonatyzacją betonowej otuliny zbrojenia [1]. W związku z karbonatyzacją i utratą przez beton ochronnych właściwości, bądź też przedostaniem się jonów chlorkowych w pobliże zbrojenia, dochodzi w ich początkowej fazie do uszko-

dzenia pasywnego filmu znajdującego się na powierzchni stali zbrojeniowej, co w następstwie skutkuje powstaniem ognisk korozji i uszkodzeniem zarówno zbrojenia, jak i betonu. Istnieje wiele metod walki i zapobiegania owym niszczącym mechanizmom [2]. Często wybieraną metodą jest mechaniczne usunięcie otuliny betonowej i zastąpienie jej nowym materiałem. Metoda ta ma wiele słabych punktów, a nawet może czasami prowadzić do pogorszenia stanu konstrukcji w miejscach nieobjętych naprawą. Może również być niemożliwa do zastosowania, ze wzglę-



**Rys. 1.** Poprawienie kontaktu elektrycznego w zbrojeniu



**Rys. 2.** Połączenie zbrojenia z instalacją



**Rys 3.** Instalacja przygotowana do natrysku włókien celulozowych



**Rys. 4.** Gotowa instalacja

du na utratę nośności lub walorów architektonicznych. Coraz częściej wybieranymi sposobami napraw są metody elektrochemiczne, a mianowicie ochrona katodowa stali, ekstrakcja chlorków i realkalizacja skarbonatyzowanego betonu. Wymienione metody zostały szczegółowo opisane w fachowej literaturze i prasie oraz omawiane na konferencjach [3, 4]. Przy zastosowaniu elektrochemicznych metod napraw można znacznie ograniczyć ingerencję w głębsze warstwy betonu, a co za tym idzie – naruszenie systemu nośnego konstrukcji i utratę walorów architektonicznych. Przy wykonywaniu napraw za pomocą tych metod, często można użytkować remontowane obiekty. W czasach ciągłego wzrostu kosztów zatrudnienia i potrzeby bardziej precyzyjnego kosztorysowania robót, metody te pozwalają na ograniczenie do minimum zakresu kucia betonu, zużycia sprzętu, zużycia materiałów, a także uciążliwego dla otoczenia hałasu. Wycena napraw przy użyciu tradycyjnych mechanicznych metod jest obciążona dużym ryzykiem, gdzie inwestor narażony jest na poniesienie wysokich nieprzewidzianych kosztów oraz przekroczenie budżetu, co nierzadko jest powodem sporów z wykonawcami.

## 2. Krótkie przypomnienie metod ekstrakcji chlorków i realkalizacji skarbonatyzowanego betonu

Ekstrakcję chlorków i realkalizację skarbonatyzowanego betonu wykonuje się z powodzeniem w wielu miejscach na całym świecie od końca lat osiemdziesiątych. Celem obydwu metod jest odtworzenie pasywnego filmu na powierzchni stali i odzyskanie przez beton ochronnych właściwości w stosunku do zbrojenia za pomocą przepływającego prądu. Podczas ekstrakcji chlorków obserwujemy dwa procesy fizykochemiczne: elektrolizę i migrację jonów. Elektroliza wpływa na zmniejszenie koncentracji chlorków wokół zbrojenia, a jej produkty, o wysokim zasadowym odczynie, powodują ponowną pasywację powierzchni stali zbrojeniowej. Migracja jonów pomaga w usunięciu jonów chlorkowych z betonu i wytworzenie wokół zbrojenia jonów wodorotlenkowych, podnosząc w ten sposób trwale zasadowość cieczy porowej. Po wyłączeniu prądu zbrojenie znajduje się w środowisku wysoko zasadowym. Podczas realkalizacji betonu zachodzą trzy procesy: elektroosmoza oraz elektroliza



i migracja jonów. Elektroosmoza powoduje dodatkowo wchłanianie i dyfuzję zasadowego elektrolitu w kierunku zbrojenia, a co za tym idzie podniesienie zasadowości otuliny betonowej. Wykonanie opisywanych metod w praktyce jest o wiele prostsze niż opisy samych procesów. Najczęściej w praktyce wygląda tak, że po przygotowaniu powierzchni betonu i naprawie widocznych uszkodzeń sprawdza się czy zbrojenie w obrębie obwodu ma kontakt elektryczny, ewentualnie poprawia się je, a następnie wykonuje się połączenia zbrojenia z biegunem ujemnym źródła prądu. Po wykonaniu połączeń przymocowuje się anodę, którą może być lekka stalowa siatka zbrojeniowa, bądź też siatka wykonana z platynowanego tytanu. Anodę montuje się na łąkach drewnianych, przytwierdzonych do betonu plastikowymi kołkami, aby uniknąć bezpośredniego kontaktu elektrycznego między anodą i katodą. Na tak przygotowaną instalację natryskuje się zwilżone wodą lub elektrolitem włókna celulozowe, jest to przeważnie popularnie zwany „ekofiber”. Następnie włókna nasąca się w przypadku ekstrakcji chlorków głównie wodą, a w przypadku realkalizacji najczęściej jednomolowym roztworem węgla potasu. Węgiel potasu jest stosowany z powodzeniem na powierzchniach betonowych, które po naprawie wymagają naniesienia powłok malarskich. Przykłady poszczególnych etapów montażu pokazano na rysunkach 1–4.

Po nasączeniu układy podłącza się do stałego źródła prądu. Napięcie prądu powinno wynosić maksymalnie 40 V, natomiast natężenie przyjmuje się od około 1 do 2 A/m<sup>2</sup>. Ekstrakcja chlorków trwa zazwyczaj około od 3 do 7 tygodni, realkalizacja od 3 do 7 dni. Ekstrakcję kończy się przy dostarczeniu minimum 600 Ah/m<sup>2</sup> i więcej – jest to zależne od poziomu zasolenia i parametrów betonu. Realkalizację kończy się po dostarczeniu minimum 200 Ah/m<sup>2</sup>. Zanim instalacja zostanie zdemontowana należy sprawdzić skuteczność zabiegu, kontrolując powierzchnie stali, zasadowość otuliny oraz poziom zasolenia. Po zdemontowaniu i upływie kilku miesięcy można ewentualnie sprawdzić różnicę potencjału elektrochemicznego. Należy zaznaczyć, że wyżej podane parametry odnoszą się do betonu wykonanego przy użyciu cementu portlandzkiego. Przy zastosowaniu innych cementów należy wykonać projekty próbne, by ocenić skuteczność zabiegów. Ważne jest również sprawdzenie czy powierzchnia betonu jest wystarczająco chłonna. Pewnym utrudnieniem może być fakt, że beton został wcześniej zabezpieczony głęboko wnikającymi środkami hydrofobizującymi. W takim przypadku trzeba usunąć wierzchnią warstwę powierzchni betonu.

### 3. Trwałość napraw i przykłady zastosowań

Na dzień dzisiejszy mamy już potwierdzoną ponad dwudziestoletnią trwałość napraw żelbetu po odpowiednio wykonanej ekstrakcji chlorków i realkalizacji. Jest to okres o wiele dłuższy niż przy naprawach wykonanych tradycyjnymi metodami mechanicznymi, czy też innymi dostępnymi metodami. Przypuszcza się, że na dzień dzisiejszy

zabiegi te wykonano na ponad 5 000 000 m<sup>2</sup> naprawianych konstrukcji żelbetowych. Jednym z często podawanych przykładów jest 13-piętrowy budynek Norweskiego Uniwersytetu Naukowo-Technicznego w Trondheim w środkowej Norwegii [5]. W 1989 roku wykonano tam realkalizację około 2000 m<sup>2</sup> betonowej elewacji. Ekspertyza wykonana w 1997 roku potwierdziła skuteczność zabiegów i nie wykazała najmniejszych nowo powstałych uszkodzeń. Na dzień dzisiejszy, czyli po 25 latach nie otrzymano żadnych niepokojących sygnałów o powstaniu jakichkolwiek uszkodzeń. Kolejnym przykładem może być wybudowany w 1959 roku budynek siedziby NEMKO (Norweskiej Kontroli Artykułów Elektrycznych) i Norweskiego Instytutu Meteorologicznego w Oslo [5]. Ekspertyza w 1987 roku wykazała uszkodzenia zbrojenia i betonu na 30% powierzchni betonowych elementów elewacji, a w obrębie krawędzi płyt nawet 60% ich długości. Jedną część budynku została poddana zabiegowi realkalizacji w 1991 roku, również w tym przypadku nie zaobserwowano do dnia dzisiejszego jakichkolwiek uszkodzeń na części poddanej realkalizacji, natomiast na części niepoddanej temu procesowi degradacja elementów elewacji postępowała bardzo szybko. Jednym z przykładów trwałości ekstrakcji chlorków mogą być szczegółowe badania skuteczności tego zabiegu na filarze mostu Burlington Bay Skyway w pobliżu Toronto w Kanadzie [5]. Beton został zanieczyszczony przez roztwór soli drogowej spływającej z nawierzchni mostu. Ekstrakcji dokonano w 1989 roku. Skutecznie obniżono poziom chlorków w otulinie zbrojenia do poziomu niezagrażającego korozją. Badania przeprowadzone w 1998 roku wykazały, że poziom chlorków w okolicy zbrojenia pozostał niemalże niezmienny od momentu ekstrakcji w 1989 roku. Następnymi bardzo dobrymi przykładami mogą być ekstrakcja chlorków z filarów mostu drogowego w prefekturze Niigata oraz realkalizacja wiaduktu kolejowego w prefekturze Hyogo w Japonii [6]. Filary mostu drogowego narażone są na działanie wody morskiej, natomiast beton wiaduktu był głęboko skarbonatyzowany. Oba zabiegi wykonano w 1993 roku. Po 10 latach przeprowadzono szczegółowe badania. Wyniki były bardzo dobre, a wnioski mówiły o wciąż doskonałych parametrach betonu oraz stali i zakładały jeszcze wieloletnią, bezproblemową eksploatację obiektów. Założenia te potwierdziły się na chwilę obecną. Wymienione przykłady dotyczą konstrukcji o stosunkowo dużych powierzchniach. Zdarzają się projekty, gdzie poddaje się tym zabiegom powierzchnie rzędu 10 000 m<sup>2</sup>, ale również metody te stosuje się na co dzień na powierzchniach kilkudziesięciu lub nawet kilku metrów kwadratowych, takich jak gzymsy fasad, pojedyncze balkony, czy fundamenty.

### 4. Koszty przedstawione jako nakłady sprzętu, materiałów i robocizny

Istnieje przekonanie, że metody elektrochemiczne są bardzo zaawansowane i kosztowne w użyciu. Nie jest

to słuszna opinia, szczególnie w tak dynamicznie rozwijającej się branży usług remontowo-budowlanych, gdzie ciągle wzrastają koszty nakładów pracy i coraz częściej firmy wykonawcze decydują się na zakup drogiego sprzętu, aby podnieść swoją jakość i efektywność. W przeciwieństwie do wspomnianej wcześniej ochrony katodowej stali, gdzie konieczny jest zakup drogich komponentów instalacji i ciągły nadzór nad nią, aż do końca jej użytkowania – ekstrakcja chlorków i realkalizacja skarbonatyzowanego betonu jest zabiegiem jednorazowym, a potrzebne materiały i sprzęt są powszechnie dostępne i stosowane na wielu budowach. Montaż poszczególnych elementów instalacji nie wymaga specjalnych kwalifikacji. Najdroższe w zakupie może być źródło prądu stałego (prostownik) i ewentualnie pompa do natrysku celulozy, ale jest to inwestycja jednorazowa i przy przestrzeganiu zasad odpowiedniej eksploatacji – na wiele lat. Reszta sprzętu, czyli: spawarka, młotowiertarka, miernik elektryczny czy instrument do lokalizacji zbrojenia są często standardowym wyposażeniem firm remontowo-budowlanych. Jeżeli chodzi o użyte materiały, są to: łaty drewniane, kołki plastikowe, lekka siatka zbrojeniowa, włókna celulozowe, węże zraszające, kable elektryczne o przekroju 2,5 mm<sup>2</sup> i 16 mm<sup>2</sup>, oraz w przypadku realkalizacji, dodatkowo węgiel potasu, który jest stosunkowo łatwo dostępny. Należy oczywiście wziąć pod uwagę zużycie prądu. Jeżeli mówimy o nakładach pracy, to przy mało skomplikowanej powierzchni, rzędu około 100 m<sup>2</sup>, mogą one wynieść około pół godziny w przeliczeniu na 1 m<sup>2</sup>. Mówimy tu o lokalizowaniu położenia zbrojenia, poprawieniu kontaktu elektrycznego między prętami, montażu kontaktów elektrycznych do zbrojenia wraz z ich izolacją, montażu siatki anodowej, podłączeniu instalacji do źródła prądu, natrysku oraz nasączeniu celulozą, nadzorze nad instalacją w okresie jej działania oraz demontażu i umyciu powierzchni betonu. Trzeba oczywiście do tego doliczyć uproszczoną naprawę już istniejących uszkodzeń i przygotowanie powierzchni betonu, gdzie należy usunąć wszelkie powłoki malarskie i ewentualne zanieczyszczenia. Wyliczenia te oparte są na danych uzyskanych z firm norweskich, z którymi autorzy współpracują i są w stałym kontakcie. W warunkach polskich, przy założeniu bardzo przybliżonych kosztów roboczogodziny, materiałów i cen energii elektrycznej – koszt nakładów pracy, sprzętu i materiałów podczas realkalizacji betonu i ekstrakcji chlorków powinien wynieść pomiędzy 80 a 200 zł/m<sup>2</sup>. Na różnice w cenie ma wpływ wiele czynników, m.in. zróżnicowanie powierzchni i charakteru konstrukcji, potrzeba poprawienia ciągłości elektrycznej zbrojenia itd. Podana wartość jest bardzo przybliżona, do tego należy doliczyć koszty organizacyjne i zysk firmy wykonawczej.

## 5. Normalizacja

Omawiane metody opisane są w normach europejskich: PKN-CEN/TS 14038-1:2009P Procesy realkalizacji elektrochemicznej i usuwania chlorków z żelbetu. Część 1:

Realkalizacja., będącej w przygotowaniu CEN/TS 14038-2:2011 Electrochemical re-alkalization and chloride extraction treatments for rein-forced concrete – Part 2: Chloride extraction., PN-EN ISO 12696:2012E Ochrona katodowa stali w betonie., PN-EN 1504-9:2010P Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności – Część 9: Ogólne zasady dotyczące stosowania wyrobów i systemów., oraz PN-EN 1504-10:2005P Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności – Część 10: Stosowanie wyrobów i systemów na placu budowy oraz sterowanie jakością prac.

## 6. Podsumowanie

Celem artykułu jest rozpowszechnienie metod ekstrakcji chlorków i realkalizacji betonu również w Polsce. W porównaniu z innymi metodami napraw żelbetu pozwalają one na przedłużenie okresu użytkowania konstrukcji nierzadko o ponad dwadzieścia lat. Nie jest konieczny zakup drogich elementów instalacji i ciągły nadzór nad nią, aż do końca jej użytkowania. Wszystkie potrzebne materiały, środki i sprzęt są łatwo dostępne w Polsce. Nie ma konieczności, tak jak w przypadku metod tradycyjnych, usuwania z okolicy zbrojenia całości skarbonatyzowanego lub zanieczyszczonego chlorkami betonu, co powoduje potrzebę zaangażowania poważnych środków i generuje bardzo wysokie koszty wykonanych napraw. Praktycznie nie ma ograniczenia co do wielkości naprawianej powierzchni, może to być kilka, jak i tysiące metrów kwadratowych. Zawsze przed wykonaniem jakiegokolwiek ingerencji w konstrukcję obiektów należy wykonać mniej lub bardziej zaawansowane testy i analizy, aby wybrać odpowiednią technologię naprawy ewentualnych uszkodzeń. W przypadku żelbetu, dotkniętego chlorkową korozją zbrojenia lub karbonatyzacją betonu, najczęściej jedynym sensownym i trwałym rozwiązaniem jest naprawa za pomocą metod elektrochemicznych.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Broomfield J. P., Corrosion of Steel in Concrete, E & FN Spon, London, 1997. ISBN 0-419-19630-7
- [2] PN-EN 1504:9 oraz PN-EN 1504:9
- [3] Zybura A., Zabezpieczenie konstrukcji żelbetowych metodami elektrochemicznymi, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003
- [4] Jaśniok M., Zybura A., Zabezpieczenie i regeneracja zagrożonych korozją konstrukcji z betonu. Elektrochemiczne odtwarzanie ochronnych właściwości otuliny betonowej (cz. IV), Przegląd Budowlany, 7-8/2007, pp. 44
- [5] Miller J. B., A Milestone in Concrete Infrastructure Repair – Desalination and Realkalisation, Keynote address, New Zealand Concrete Society Conference '96 "Making Innovations Happen", Wairakei, Taupo, N.Z., October 1996
- [6] Ashida M., Ishibashi K., Nanasawa A., Matsukubo H., „10 years follow-up survey of bridge pier after desalination”, Proceedings of Annual Meetings of the Japan Concrete Institute, Vol.26, No. 1, pp.831-836, 2004.7