

# Badania karbonatyzacji betonu

## Research on the carbonation of the concrete

dr inż. Wioletta Raczkiewicz (ORCID: 0000-0001-5929-3571), dr inż. Artur Wójcicki (ORCID: 0000-0003-2829-7005), mgr inż. Adam Wójcicki, Politechnika Świętokrzyska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1301

**Streszczenie:** W artykule zawarto informacje na temat metod badania karbonatyzacji betonu w kontekście oceny otuliny betonowej i jej wpływu na zapewnienie trwałości elementów konstrukcji żelbetowych. Opisane zostały zarówno proste testy kolorymetryczne wykonywane in-situ, jak i analizy laboratoryjne wykonywane na próbkach pobranych z konstrukcji.

**Słowa kluczowe:** trwałość konstrukcji żelbetowych, karbonatyzacja betonu, otulina betonowa, badania in-situ, metody kolorymetryczne, badania laboratoryjne próbek pobranych z konstrukcji.

**Abstract:** The paper contains information on the methods used to test carbonation of concrete in the context of the assessment of the concrete cover and its impact on ensuring the durability of reinforced concrete structure elements. Both simple colorimetric tests performed in-situ and laboratory analyses performed on samples taken from the structure are described.

**Keywords:** durability of RC structures, carbonation of concrete, concrete cover, in-situ tests, colorimetric methods, laboratory tests of samples taken from the structure.

## 1. Wprowadzenie

Trwałość konstrukcji jest jednym z podstawowych wymagań stawianych przy ich projektowaniu [1]. Zapewnienie trwałości w projektowaniu konstrukcji żelbetowych według [2] jest realizowane przez dobór odpowiedniej jakości i grubości otuliny betonowej oraz ograniczenie szerokości rys adekwatnie do założonej klasy konstrukcji i klasy ekspozycji. Rola otuliny betonowej w zapewnieniu trwałości wynika z wysoko alkalicznego odczynu  $pH$  betonu, co sprawia, że na powierzchni stalowych prętów zbrojenia osłoniętych betonem powstaje bardzo cienka warstwa pasywna, która chroni je przed korozją [3, 4]. Jednak z czasem, najczęściej na skutek działania czynników środowiska zewnętrznego, dochodzi do zmian w strukturze betonu i stopniowej utraty jego właściwości ochronnych względem zbrojenia, depasywacji stali i postępujących procesów korozji prętów [4–6].

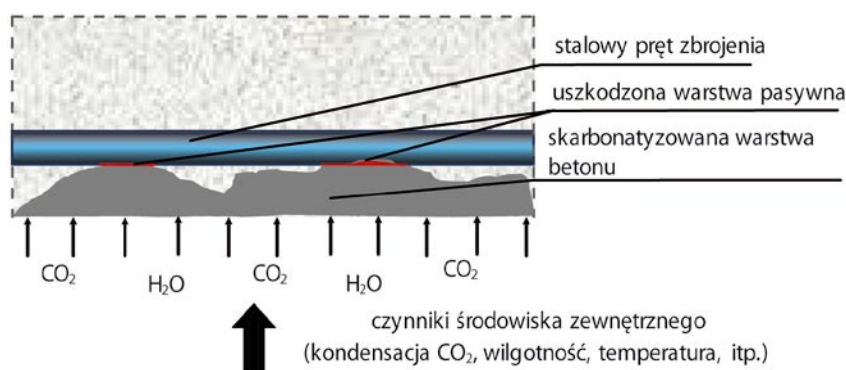
## 2. Karbonatyzacja betonu

Długotrwałe oddziaływanie dwutlenku węgla na nieosłonięte powierzchnie betonu, zwłaszcza w warunkach podwyższonej wilgotności, inicjuje procesy fizykochemiczne prowadzące do karbonatyzacji betonu (rys. 1) i w efekcie obniżenia jego  $pH$ , co z czasem skutkuje uszkodzeniem warstwy pasywnej na powierzchni

stalowych prętów zbrojenia i zwiększeniem zagrożenia wystąpienia korozji [7, 8].

Na tempo procesu karbonatyzacji ma wpływ wiele czynników, zarówno związanych z samym betonem (czynniki wewnętrzne), jak i otoczeniem, w tym m.in. stężenie  $CO_2$  w powietrzu i wilgotność (czynniki zewnętrzne). Receptura mieszanki betonowej, technologia wykonania betonu i jego pielęgnacja mają bardzo istotne znaczenie, ponieważ wpływają na strukturę stwardniałego betonu, obecność i procentową zawartość porów żelowych, kapilarnych i mikroporów oraz ich wzajemne połączenia, co bezpośrednio przekłada się na możliwość przenikania dwutlenku węgla na drodze dyfuzji, a z drugiej strony na napływ wodorotlenku wapnia z głębszych warstw betonu do obszarów już skarbonatyzowanych. Wielkość i sposób wzajemnego połączenia porów decydują też o stopniu ich wypełnienia wodą (mają wpływ na wilgotność betonu).

Grubość otuliny ma bardzo duże znaczenie w ograniczeniu procesu karbonatyzacji, ponieważ wraz z głębokością spada koncentracja  $CO_2$  w betonie. Ponadto, ze względu na efektywniejsze dojrzewanie głębiej położonych warstw betonu, wzrasta koncentracja  $Ca(OH)_2$ .



**Rys. 1.** Schemat rozwoju korozji na powierzchni pręta w wyniku karbonatyzacji betonu

W późniejszym okresie eksploatacji konstrukcji, kluczowy wpływ na tempo karbonatyzacji mają czynniki środowiska zewnętrznego, w tym szczególnie koncentracja dwutlenku węgla oraz bezpośredni wpływ czynników atmosferycznych, w tym wilgotność względna, temperatura, ciśnienie, nasłonecznienie, wiatr i opady atmosferyczne [6, 9, 10].

### 3. Metody badania karbonatyzacji otuliny zbrojenia

#### 3.1. Testy kolorymetryczne wykonywane in situ

Diagnostyka zaawansowania procesu karbonatyzacji w betonie jest elementem koniecznym oceny stanu technicznego konstrukcji żelbetowych i wykonywanym jako jeden z pierwszych. Badania karbonatyzacji otuliny betonowej stosowane są w pracach przygotowawczych do napraw i remontów, a także przy prognozowaniu możliwych zmian stanu konstrukcji w kolejnych okresach eksploatacji. W badaniach wykorzystuje się zarówno szybkie testy oznaczania  $pH$  wykonywane bezpośrednio na konstrukcji (na świeżo odsłoniętych powierzchniach przełomu betonu), jak również bardziej precyzyjne badania laboratoryjne próbek betonu pobranych z konstrukcji.

Przygotowanie powierzchni, czy też próbek do badania, należy wykonać przez dłutowanie, a nie poprzez cięcie lub wiercenie, ponieważ może to mieć wpływ na zmianę wartości  $pH$  (ze względu na uaktywnienie niezhydratyzowanych ziaren cementu) [11]. Do metod szybkiego oznaczania  $pH$  należą tzw. testy kolorymetryczne, wśród których można wymienić: test fenoloftaleinowy, test tymoloftaleinowy, czy tzw. test tęczy (*Rainbow Test*). Polegają one na rozpylaniu na badaną powierzchnię przełomu otuliny betonowej roztworu odpowiedniego odczynnika (np. fenoloftaleiny), co, przy określonym  $pH$  betonu, skutkuje zmianą zabarwienia badanej powierzchni. Roztwór powinien być aplikowany bezpośrednio na świeżo przełamaną powierzchnię betonu [12, 13], a zmiana zabarwienia odczytywana po kilku do kilkudziesięciu sekundach. Pojawiający się kolor po porównaniu z odpowiednią skalą (konkretny kolor odpowiada odpowiedniemu poziomowi  $pH$ ) stanowi bezpośrednią informację o odczynie  $pH$  betonu.

Najpopularniejszym odczynnikiem stosowanym w tym celu jest fenoloftaleina. Badanie karbonatyzacji za pomocą wskaźnika fenoloftaleiny jest zalecane przez normy EN 13295:2004 oraz RILEM CPC-18 [14, 15]. Roztwór fenoloftaleiny (1 g fenoloftaleiny rozpuszczony w 70 gramach alkoholu etylowego i rozcieńczony 30 gramami wody destylowanej) w kontakcie z betonem nieskarbonatyzowanym o wysokim  $pH$  (powyżej 9) powoduje jego zabarwienie na charakterystyczny, intensywny kolor malinowo-różowy (rys. 2). Natomiast, jeśli w wyniku karbonatyzacji  $pH$  betonu spadnie poniżej 9, fenoloftaleina nie spowoduje jego zabarwienia. Zmianę zabarwienia betonu należy ocenić po 30 s, a następnie zmierzyć głębokość obszaru niezabarwionego

z dokładnością do 1 mm. Jako wynik badania podawane są dwie wielkości: maksymalna głębokość frontu karbonatyzacji  $d_{kmax}$  oraz średnia głębokość  $d_{kmean}$ . Na tej podstawie można rozpoznać beton skarbonatyzowany i nieskarbonatyzowany. Wadą stosowania tego testu jest fakt, że fenoloftaleina w wyższych temperaturach często szybko odparowuje z powierzchni betonu, zanim jeszcze dojdzie do odczytu pomiaru, tj. rozpoznania właściwego koloru i określenia wartości  $pH$  – zmniejszone stężenie roztworu na skutek odparowania części fenoloftaleiny może skutkować zmianą zabarwienia powierzchni i tym samym zniekształcić wynik badania [16]. Ponadto należy pamiętać, że fenoloftaleina jest szkodliwa dla organizmu ludzkiego.

**Rys. 2.** Zdjęcie fragmentu odkrytki zbrojenia po oznaczeniu  $pH$  za pomocą 1% roztworu fenoloftaleiny



Alternatywą do stosowania fenoloftaleiny jest roztwór [17] kurkumy w 0,5% etanolu. Skuteczność stosowania obu wskaźników jest porównywalna, ale roztwór kurkumy nie stanowi zagrożenia dla zdrowia ludzkiego.

W podobny sposób wykonuje się badanie  $pH$  betonu otuliny zbrojenia przy użyciu roztworu tymoloftaleiny. W tym przypadku beton nieskarbonatyzowany (o  $pH = 9,3-10,5$ ) zabarwia się na niebiesko. Zabarczenie od fioletowego po zielony świadczy o  $pH \approx 9$ . Natomiast brak zabarwienia oznacza beton skarbonatyzowany.

Przedstawione powyżej metody są jednak relatywnie mało precyzyjne w ocenie stopnia karbonatyzacji betonu w kontekście zagrożenia korozyjnego zbrojenia. Wynika to z faktu, że stal ulega depasywacji już przy  $pH$  betonu ok 11,5–11,8. Tymczasem wymienione wyżej wskaźniki są skuteczne dopiero przy niższym  $pH$ . Fenoloftaleina zmienia kolor powierzchni betonu w zakresie  $pH$  od 8,5 do 9,5, a tymolftaleina przy  $pH$  rzędu 9,3–10,5. Ponadto w wyniku ich aplikacji na powierzchnię betonu można uzyskać tylko jeden konkretny kolor. To pozwala wprawdzie uzyskać bardzo istotną informację na temat głębokości karbonatyzacji, ale trudno na tej podstawie określić stopień jej zaawansowania w poszczególnych obszarach badanego elementu. Z tego powodu stosowane są również inne wskaźniki: alizaryna lub  $T^FPLPt$  [18,19]. Test z użyciem  $T^FPLPt$  może być stosowany do oznaczenia  $pH$  w zakresie 11,0–13,5. Beton nieskarbonatyzowany zabarwi się w tym przypadku na zielono lub kremowo. Używając tego wskaźnika, możliwe jest również wykonanie analiz rozkładu  $pH$  na badanej powierzchni za pomocą kamery z odpowiednimi filtrami pasmowoprzepustowymi.

**Rys. 3.** Porównanie zakresu wyników testów kolorymetrycznych w zależności od wartości  $pH$  i użytego wskaźnika (na podstawie [22])

Wartość $pH$	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Test fenoloftaleinowy	< 9				> 9				
Test tymoloftaleinowy	< 9,3					> 10,5			
Test tęczyowy (Rainbow)	5	7	9	11	13				

Najlepszy do wykonywania testów kolorymetrycznych wydaje się być tzw. test tęczyowy, który pozwala na oznaczenie  $pH$  w zakresie od 5 do 13 [20, 21]. Różnica w  $pH$  o 2 jest wyraźnie sygnalizowana innym kolorem natryskiwanej powierzchni betonu (beton nieskarbonatyzowany, o  $pH = 11$  zabarwi się na fioletowo). Dla porównania możliwe wyniki w zabarwieniu betonu w zależności od wartości  $pH$  i zastosowanego wskaźnika pokazano na rysunku 3.

Testy kolorymetryczne pozwalają w szybki sposób oznaczyć  $pH$  betonu na badanej powierzchni. Pojemniczek z odczynnikami w formie aerozolu do wykonania testu tęczyowego pokazano na rysunku 4.



**Rys. 4.** Buteleczka z odczynnikami w formie aerozolu do wykonania testu tęczyowego

Jednak tego typu preparaty nie dają precyzyjnej informacji o dokładnej wartości  $pH$  ani o zasięgu strefy skarbonatyzowanej. Z tego względu opracowanych zostało wiele innych metod badawczych, których wykonanie wymaga zwykle bardziej skomplikowanego sprzętu, lub choćby aparatury badawczej i warunków laboratoryjnych. Do wykonania takich badań zwykle wykorzystuje się próbki betonu pobrane z konstrukcji przy okazji wykonywania testów kolorymetrycznych.

### 3.2. Badania laboratoryjne na próbkach pobranych z konstrukcji

Oznaczenie  $pH$  betonu w sposób bardziej dokładny niż testem kolorymetrycznym można uzyskać przez badanie cieczy porowej za pomocą miernika  $pH$ . Specjalistyczny przykładowy miernik służący takim celom pokazano na rysunku 5. Badanie takie jest jednak znacznie bardziej skomplikowane i czasochłonne. Ciecz porową uzyskuje się z mieszaniny wody destylowanej i rozdrobnionego betonu (maksymalnie do frakcji 0,2 mm). Po około 24 godzinach z takiej mieszaniny odsącza się fazę stałą i przygotowuje wyciąg wodny, który podlega oznaczeniu  $pH$ .

Jeżeli do pobierania próbek betonu z elementu zostanie wykorzystana specjalistyczna



**Rys. 5.** Miernik Seven Compact do oznaczenia  $pH$  w cieczy porowej

**Rys. 6.** Ściernica Profile Grinder do precyzyjnego pobierania pyłu betonowego z elementów konstrukcji



ściernica (np. ProfileGrinder pokazana na rysunku 6), możliwe jest precyzyjne wyodrębnienie odpowiednio rozdrobnionego betonu (pyłu betonowego) z kolejnych warstw otuliny nawet z dokładnością do 0,5 mm. Dzięki temu możliwe staje się określenie frontu karbonatyzacji na głębokości badanego elementu, na podstawie wyników dla kolejnych próbek pobieranych z coraz to głębszych partii betonu.

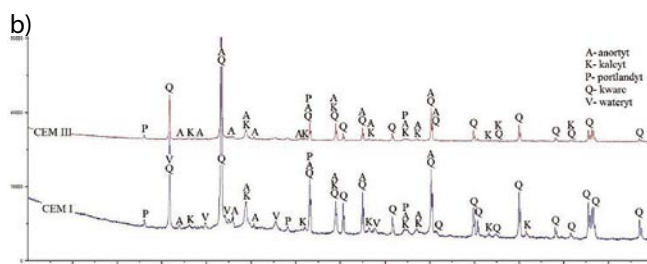
Ciecz porowa uzyskana z odsączenia fazy stałej jest stosunkowo prosta do przygotowania i wykonania badania, ale jednocześnie nie w pełni odpowiada naturalnej cieczy w betonie. Bardziej właściwe w tym celu jest pozyskanie cieczy przez ekstrakcję ciśnieniową, tj. wyciskanie cieczy z próbki betonu w odpowiedniej prasie. Jednak w praktyce ilość uzyskanej cieczy jest bardzo niewielka i nie jest możliwe określenie frontu karbonatyzacji.

Do innych nowoczesnych metod służących zdiagnozowaniu procesu karbonatyzacji w betonie należą też m.in.: komputerowa tomografia rentgenowska (XCT), dyfrakcja rentgenowska (XRD), różnicowa analiza termiczna (DTA), skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM), metody elektrooporowe, spektroskopia w podczerwieni (FTIR). Metody te wymagają zastosowania specjalistycznego sprzętu i zwykle, choć nie wszystkie, mogą być wykonywane tylko w laboratoriach. Komputerowa tomografia rentgenowska (XCT) [23, 24] pozwala ocenić, czy beton jest skarbonatyzowany czy nie na podstawie analizy jego struktury widocznej na obrazach rentgenowskich – beton skarbonatyzowany o większej gęstości i mniejszej liczbie porów absorbuje więcej promieni niż beton nieskarbonatyzowany. Badania tą metodą należą do grupy badań niszczących i w niektórych sytuacjach można je wykonać bezpośrednio na konstrukcji bez konieczności pobierania próbek. Dzięki uzyskanym obrazom można nie tylko określić obszary skarbonatyzowanego betonu i głębokość karbonatyzacji, ale także zbadać jego porowatość oraz zlokalizować położenie prętów zbrojeniowych i ocenić, czy doszło do korozji na podstawie identyfikacji ewentualnej obecności rdzy.

Promieniowanie Roentgena wykorzystywane jest również do oceny składu fazowego badanego materiału metodą dyfrakcji rentgenowskiej (XRD). Badania wykonywane są w specjalnym urządzeniu – dyfraktometrze. Przykładowy dyfraktometr



**Rys. 7.** Dyfraktometr rentgenowski Empyrean firmy PANalytical do badań składu fazowego materiałów krystalicznych (a), przykład rentgenogramów wykonanych dla dwóch próbek betonu różniących się rodzajem użytego cementu: CEM I i CEM III (b)



firmy PANalytical został pokazany na rysunku 7a. W efekcie przeprowadzonych badań można uzyskać informację o procesie karbonatyzacji badanego betonu, ponieważ skarbonatyzowany zaczyn cementowy zawiera mniejszą ilość (lub wcale) portlandytu, zamiast którego uwidaczniają się amorficzne węglany wapnia (wateryt, aragonit, czy ostatecznie kalcyt), co obrazują uzyskane z badania przykładowe wykresy (rys. 7b). Wykrycie w czasie badania jednej z metastabilnych polimorficznych form węglanu wapnia może wskazywać na proces karbonatyzacji wapnia [25, 26]. Do badania należy przygotować sproszkowane próbki betonu, z którego uprzednio odseparowano ziarna kruszywa. Z tego względu próbki pyłu betonowego uzyskane jako zwierniny są w tym przypadku niewskazane, ponieważ wymieszane z zaczynem fragmenty rozdrobnionego kruszywa zaburzają wynik badania, co często widoczne jest w postaci wysokich pików na wykresach. Na podobnej zasadzie, tj. oceny zmian składu fazowego zaczynu cementowego w wyniku procesu karbonatyzacji, opiera się metoda spektroskopii w podczerwieni (Fourier transformation infrared spectroscopy, FTIR) [18, 25]. Za pomocą tego badania możliwe jest nie tylko określenie ilości powstałych produktów karbonatyzacji, ale także jej zasięg, choć wymaga to dodatkowo pewnych obliczeń odniesionych do graficznych wyników

**Rys. 8.** Analiza termograwimetryczna: a) widok analizatora termicznego TGA/DSC Q600, b) przykład wyników badań termograwimetrycznych wykonanych na próbce betonu

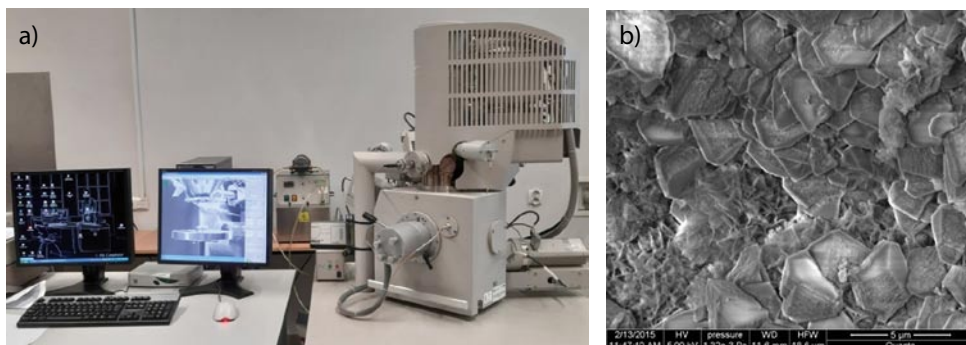


uzyskanych z badań. Więcej informacji na ten temat można znaleźć m.in. w [16].

Do innych nowoczesnych metod badawczych służących ocenie karbonatyzacji betonu pobranego z konstrukcji należą metody analizy termicznej, m.in. różnicowa analiza termiczna (DTA), różnicowa analiza termogravimetryczna (DTG), termogravimetria (TG) itp. [25-27]. Termogravimetria pozwala na ilościowe oznaczenie skarbonatyzowania zaczynu cementowego i polega na pomiarze ubytku masy próbki na skutek jej ogrzewania. Do badania konieczne jest właściwe przygotowanie próbki badawczej, tj. dokładne odseparowanie kruszywa od zaczynu cementowego, rozdrobnienie zaczynu do frakcji poniżej 0,063 mm, a następnie ogrzewanie próbki w określonym zakresie temperaturowym przy stałej szybkości wzrostu temperatury (rys. 8a). Na podstawie wykonanego badania uzyskuje się krzywe termogravimetryczne (rys. 8b), które pozwalają określić zawartość wodorotlenku wapnia,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i węglanu wapnia,  $\text{CaCO}_3$ , co w sposób pośredni, poprzez analizę wzajemnej ilości obu produktów pozwala określić stopień karbonatyzacji badanej próbki.

Badania wykonywane są w specjalnych analizatorach termicznych (rys. 8a). Za ich pomocą nie jest jednak możliwe rozróżnienie form polimorficznych węglanu wapnia występujących w betonie. Dlatego często tego typu badania wykonuje się wraz z analizą składu fazowego wykorzystując spektroskopię w podczerwieni (FTIR) lub metodę dyfrakcji rentgenowskiej (XRD). Uzupełnieniem powyższych metod mogą być badania polegające na obserwacji i analizie mikrostruktury betonu wykonywane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) lub elektronowego mikroskopu transmisyjnego (TEM) [18,25,28,29] na specjalnie do tego przygotowanych próbkach, tzw. zglądach. Wynika to z faktu, że na skutek karbonatyzacji dochodzi do zmian w strukturze betonu, o czym pisano już przy okazji omawiania metod analizy rentgenowskiej. Beton skarbonatyzowany jest mniej porowaty, co można zaobserwować przy mniejszych powiększeniach, natomiast, co bardziej miarodajne, w wyniku takiej obserwacji przy dużych powiększeniach można znaleźć na obrazie badanej próbki inne produkty reakcji bądź to kryształów portlandytu, świadczące o nieskarbonatyzowanej warstwie betonu, bądź produkty karbonatyzacji w postaci waterytu, aragonitu czy kalcytu, co pozwala na jakościowe stwierdzenie zachodzącego procesu karbonatyzacji.

**Rys. 9.** Mikroskopia skaningowa: a) zestaw do wykonania obrazowania za pomocą SEM, b) uzyskany obraz struktury betonu



Elektronowy mikroskop skaningowy (rys. 9a) oraz przykładowe zdjęcie z obserwacji próbek betonu (rys. 9b) pokazano na rysunku 9. Na zdjęciu widoczne są wyraźne kryształy portlandytu w postaci heksagonalnych płytek świadczące o braku karbonatyzacji w badanym obszarze.

Wśród innych, dość skomplikowanych metod służących ocenie stopnia karbonatyzacji betonu można ponadto wymienić: spektroskopię Ramana, magnetyczny rezonans jądrowy czy impedancję elektrochemiczną [18, 30].

#### 4. Podsumowanie

Ze względu na to, że otulina betonowa odgrywa kluczową rolę w ochronie stali zbrojeniowej przed korozją, a karbonatyzacja betonu jest jedną z głównych przyczyn osłabienia betonu, badania oceny stopnia karbonatyzacji betonu w elementach konstrukcji wydają się niezbędne do oceny stanu istniejącego oraz prognozowania trwałości konstrukcji żelbetonowych w dalszym okresie eksploatacji. Stanowią jedno z podstawowych badań diagnostycznych. Badania te można wykonywać różnymi metodami, poczynając od prostych testów kolorymetrycznych, które pozwalają w szybki sposób oszacować *pH* betonu bezpośrednio na obiekcie – po skomplikowane badania laboratoryjne wykonywane na próbkach materiału pobranego z konstrukcji, które dostarczają szerokiej wiedzy na temat stopnia i zasięgu karbonatyzacji betonu.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1990-2004: Podstawy projektowania konstrukcji, Polski Komitet Normalizacyjny, 2014
- [2] PN EN 1992-1-1:2008: Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, Polski Komitet Normalizacyjny, 2008
- [3] Ściślewski Z., Ochrona konstrukcji żelbetonowych, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1999
- [4] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., Diagnostyka konstrukcji żelbetonowych. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2011
- [5] Kurdowski W., Chemia cementu i betonu, SPC, Kraków, 2010
- [6] Czarniecki L. i in., Chemia w budownictwie, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1996
- [7] Woyciechowski P., Model Karbonatyzacji betonu, Prace naukowe budownictwo z.157, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2013
- [8] Czarniecki L., Woyciechowski P., Metody oceny przebiegu karbonatyzacji betonu, Materiały II Smpozjum Naukowo-Techniczne, Trwałość Betonu, Góraźdze Cement, Kraków, Materiały Budowlane 2/2008, str. 5–7
- [9] Łakomy T., Korozja zbrojenia w obiektach mostowych w zależności od stanu betonu w konstrukcji, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2009
- [10] Grzmil W., Metody oceny stopnia karbonatyzacji betonu, w książce Diagnostyka budowlana: wybrane metody badania materiałów, elementów i konstrukcji, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2019
- [11] Czapiak P., Owsiak Z., Chemical corrosion of external stairs – Case study, In Proceedings of the MATBUD'2018 – 8th Scientific-Technical Conference on Material Problems in Civil Engineering, 163, 2018, str. 1–7
- [12] PN-EN 13295:2005: Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Oznaczanie odporności na karbonatyzację, Polski Komitet Normalizacyjny, Polska, 2005
- [13] PN-EN 14630:2007: Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – Oznaczanie głębokości karbonatyzacji w betonie metodą fenoltaleinową, Polski Komitet Normalizacyjny, 2007
- [14] EN 13295:2004: Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of resistance to carbonation, Regulation (eu) No 305/2011 of the European Parliament
- [15] RILEM CPC-18, CPC 18 Measurement of hardened concrete carbonation depth, International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, 1988
- [16] Tworzewski P., Raczkiewicz W., Czapiak P., Tworzewska J., Diagnostics of Concrete and Steel in Elements of an Historic Reinforced Concrete Structure, Materials, 14, 306, 2021
- [17] Grzmil W., Metody oceny stopnia karbonatyzacji betonu, w książce Diagnostyka budowlana. Wybrane metody badania materiałów, elementów i konstrukcji, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2019 (64)
- [18] Qiu Q., A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and characterization techniques, Construction and Building Materials, 2020
- [19] Liu E., Ghandehari M., Brückner C., Khalil G., Worlinsky J., Jin W., Sidelev A., Hyland M. A., Mapping high pH levels in hydrated calcium silicates, Cement and Concrete Research, 95, 2017, str. 232–239
- [20] Jasienio J., Moczko M., Moczko A., Dżugar R., Testing the mechanical and physical properties of concrete in the bottom perimeter ring of the dome of the Centennial Hall in Wrocław, Conserv. News, 27, 2010, str. 21–34
- [21] Runkiewicz L., Hoła J., Technical diagnostics of reinforced concrete structures, Engineering Constructions, 2018
- [22] Łakomy T., Korozja zbrojenia w obiektach mostowych w zależności od stanu betonu w konstrukcji, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2009
- [23] Han J., Sun W., Pan G., Caihui W., Monitoring the Evolution of Accelerated Carbonation of Hardened Cement Pastes by X-Ray Computed Tomography, Journal of Materials in Civil Engineering, 25, 2013, str. 347–354
- [24] Šavija B., Luković M., Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities, Construction and Building Materials, 117, 2016, str. 285–301
- [25] Tomasin P., Mondin G., Zueno M., El Habra N., Nodari L., Moretto L.M.: Calcium alkoxides for stone consolidation: Investigating the carbonation process, Powder Technology, 344, 2019, str. 260–269
- [26] Tracz T., Zdeb T., Effect of Hydration and Carbonation Progress on the Porosity and Permeability of Cement Pastes, Materials 12(1)2019, str. 192
- [27] Stępkowska E. T., Simultaneous IR/TG study of calcium carbonate in two aged cement pastes, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 84, 2006, str. 175–180
- [28] Chen Y., Peng L., Zhiwu Y., Effects of Environmental Factors on Concrete Carbonation Depth and Compressive Strength, Materials 11/2018, str. 2167
- [29] Czapiak P., Wolniewicz M., Microstructure of cement paste containing large amount of silica fume, w książce Monografie technologii betonu. Proceedings of 10th Dni Betonu Conference, Wisła, 2018
- [30] Dong B.Q., Qiu Q. W., Xiang J. Q., Huang C. J., Xing F., Han N., Lu Y. Y., Electrochemical impedance measurement and modeling analysis of the carbonation behaviour for cementitious materials, Construction and Building Materials 54, 2014, str. 558–565