

Ocena betonu jako otuliny stali zbrojeniowej

Dr inż. Wioletta Raczkiewicz, Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Betonowych, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, dr inż. Wioletta Grzmil, Katedra Architektury i Urbanistyki, Politechnika Świętokrzyska, Kielce

1. Wprowadzenie

Duży wpływ na trwałość konstrukcji z betonu ma jakość otuliny betonowej [1, 2]. Jej ochronna rola względem zbrojenia wynika z wysoko alkalicznego odczynu betonu ($\text{pH} = 12,5 \div 13,5$, a przynajmniej 11,8), co skutkuje powstaniem na powierzchni prętów ochronnej warstwy pasywnej [2, 3, 4]. Jednak wpływ środowiska zewnętrznego, w tym głównie procesy związane z karbonatyzacją betonu oraz działaniem chlorków (zwykle występujących w stosowanych powszechnie środkach odładzających) doprowadzają do uszkodzenia otuliny i depasywacji zbrojenia. W efekcie może dojść do korozji betonu i stali [5]. Dodatkowo, proces korozji może się pogłębić na skutek wielokrotnego zamrażania i odmrażania cieczy w porach betonu w okresie zimowym [1]. Zapewnienie trwałości [6] polega głównie na wykonywaniu betonu o odpowiedniej strukturze i właściwym składzie. W celu ograniczenia karbonatyzacji najważniejszym jest zastosowanie betonu na bazie cementu portlandzkiego, ale ze względu na przeciwdziałanie korozji chlorkowej i mrozu, ważne jest, aby beton charakteryzował się szczelną, nienasiąkliwą strukturą, co można osiągnąć np. przez napowietrzanie go i zastosowanie cementu hutniczego zawierającego żużel [1, 4].

Opisane w artykule badania miały na celu porównanie wpływu zastosowania dwóch różnych rodzajów cementu: cementu portlandzkiego CEM I oraz cementu hutniczego CEM IIIA (o podwyższonej odporności chlorkowej) na przebieg procesów korozji w próbkach żelbetowych. Ocenę zagrożenia korozją stali zbrojeniowej w betonie oparto na badaniach materiałowych i badaniach elektrochemicznych [3, 7, 8]. Badania materiałowe dotyczyły pomiaru pH i tym samym określenia stopnia karbonatyzacji betonu i składu mineralnego metodą rentgenograficzną, co pozwoliło głównie ustalić przyczyny korozji. Badania elektrochemiczne natomiast pozwoliły w sposób nieniszczący określić obszary objęte korozją oraz ocenić intensywność procesów korozyjnych w powiązaniu z oddziaływaniem środowiska zewnętrznego (karbonatyzacja, zamrażanie – odmrażanie).

2. Materiały i metody badań

Badania przeprowadzono na próbkach o wymiarach $210 \times 228 \times 100$ mm wykonanych z betonów napowietrzanych z użyciem dwóch rodzajów cementów. Do wykona-

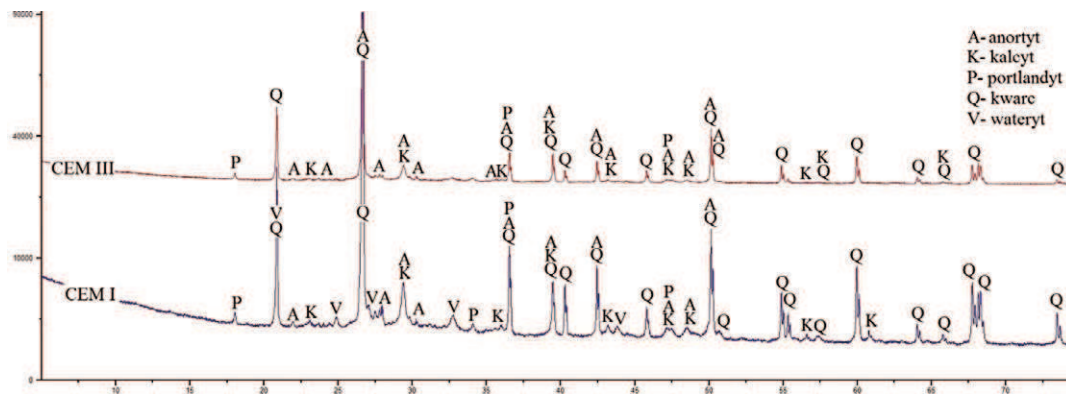
nia pierwszej serii próbek zastosowano cement portlandzki CEM I (CEM I 42,5 N-MSR/NA), a drugą serię wykonano na cemencie hutniczym CEM III A (CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA). Próbki wykonano wg receptury dla betonu klasy C30/37, konsystencji K-5, stosunku wodno-cementowego $w/c = 0,43$. Przyjęto następujące ilości składników na 1 m^3 : cement – 384 kg, piasek – 663 kg, żwir ($2 \div 8$) – 585 kg, żwir ($8 \div 16$) – 634 kg, woda – 166 l, oraz plastyfikator (0,6%) i domieszka napowietrzająca (0,1%). Na zbrojenie próbek składały się dwa równoległe żebrowane pręty o średnicy $\phi 8$ mm ze stali BST 500 ułożone w odległości 70 mm. Przyjęta otulina wynosiła 25 mm.

Wszystkie próbki wykonano w identycznych warunkach termicznych i wilgotnościowych. Próbki wyjmowane były z form następnego dnia po zabetonowaniu i przechowywane w wodzie przez okres 14 dni. Przez kolejne dni próbki dojrzewały w warunkach laboratoryjnych powietrzno-suchych. Po okresie dojrzewania na próbkach sześciennych przeprowadzone zostały badania towarzyszące wytrzymałości betonu na ściskanie zgodnie z [9].

W każdej serii próbek (wynikającej z zastosowania innego rodzaju cementu) wyodrębniono dwie grupy: jedną grupę (3 sztuki) w dalszym ciągu przechowywano w powietrzno-suchych warunkach laboratoryjnych, a drugą grupę (6 sztuk) poddano 70 cyklom mrożenia w 3% roztworze NaCl w celu zainicjowania procesu korozji zbrojenia.

Przed przystąpieniem do mrożenia na wszystkich próbkach wykonane zostały metodą impulsu galwanostaticznego pomiary odniesienia pozwalające na ustalenie występowania korozji zbrojenia oraz stopnia jej zaawansowania.

Metoda impulsu galwanostaticznego jest nieniszczącą elektrochemiczną metodą badawczą opisaną dokładnie m.in. w [3, 8, 9, 10]. W metodzie tej wykorzystuje się fakt, że proces korozji zbrojenia w betonie to proces elektrochemiczny, a pomiary pewnych wielkości elektrycznych (gęstości prądu korozyjnego, potencjału stacjonarnego zbrojenia, rezystywności otuliny betonowej) odniesione do wielkości kryterialnych [3, 10] pozwalają pośrednio ocenić zaawansowanie korozji stali w betonie. W opisanych badaniach ocenę stopnia zagrożenia korozją zbrojenia oparto na pomiarach gęstości prądu korozyjnego wykonanych za pomocą zestawu GP-5000 Galva PulseTM [10]. Przed mrożeniem próbek na każdej z nich wyznaczone zostały cztery punkty pomiarowe rozmieszczone regularnie nad prętami zbrojeniowy-



Rys. 1.
Rentgenogramy betonów z: CEM I i CEM IIIA przechowywane w warunkach powietrzno-suchych

mi, w których wykonano pomiary. W identyczny sposób na tych samych próbkach wykonano pomiary po 70 cyklach mrożenia ich w 3% roztworze NaCl.

W dalszej części badań zarówno na próbkach przechowywanych w powietrzno-suchych warunkach laboratoryjnych, jak i na próbkach po odbytych cyklach mrożenia zbadano głębokość karbonatyzacji. Głębokość karbonatyzacji oceniano na świeżych przełamach próbek betonu po 22 miesiącach ekspozycji, stosując roztwór fenoloftaleiny [11]. Dodatkowo zbadano skład fazowy betonu metodą rentgenograficzną. Zastosowano warunki pomiaru: zakres kątów 2θ od 2° do 80°, lampa Cu.

3. Wyniki i analiza badań

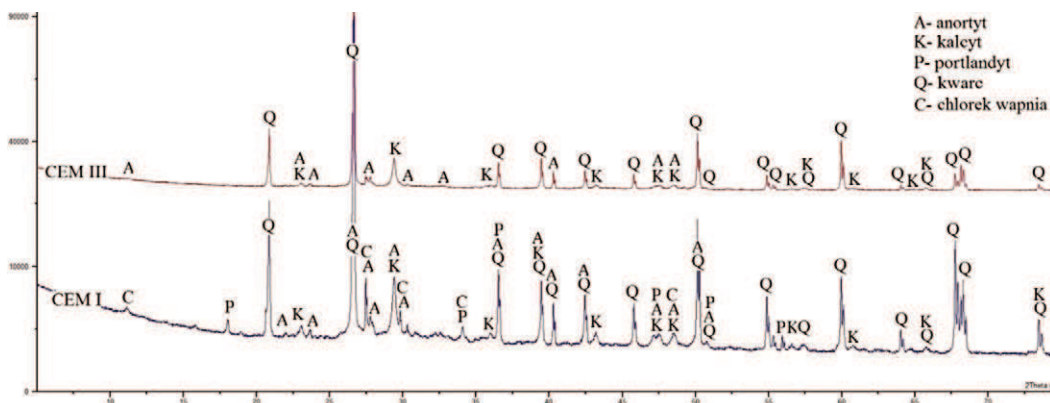
Średnia głębokość karbonatyzacji oznaczona za pomocą fenoloftaleiny wynosiła w betonie z: CEM I – 2 mm; CEM IIIA – 3 mm. Głębokość karbonatyzacji po cyklach zamrażania i odmrażania w 3% roztworze NaCl wyniosła dla betonu z: CEM I – 5 mm; CEM IIIA – 8 mm. Na małą głębokość karbonatyzacji próbek przechowywanych w warunkach laboratoryjnych powietrzno-suchych mogła mieć wpływ wielkość stosunku wodno-cementowego równa 0,43. W betonie z cementem CEM IIIA powstała większa głębokość karbonatyzacji niż w betonie z cementem portlandzkim, co należy tłumaczyć zwiększeniem zapotrzebowania na wodorotlenek wapnia do reakcji z anionami krzemianowymi powstałymi z hydratacji żużla dając fazę C-S-H. Dlatego w stwardniałym zaczynie cementowym występuje znacznie mniejsza ilość wodorotlenku wapniowego i odpowiednio duża koncen-

tracja fazy C-S-H [12]. Próbki po cyklach zamrażania i odmrażania miały większą głębokość karbonatyzacji, wynoszącą 5÷8 mm. Na zwiększenie głębokości karbonatyzacji w betonie po cyklach zamrażania i odmrażania mogła mieć wpływ zmiana mikrostruktury spowodowana utratą spójności matrycy cementowej [13]. Mniejszą głębokość karbonatyzacji w betonie z CEM I można wyjaśnić wysoką alkalicznością fazy ciekłej w porach betonu (kształtowaną dużą ilością wodorotlenku wapniowego) porównując do zawartości w CEM IIIA.

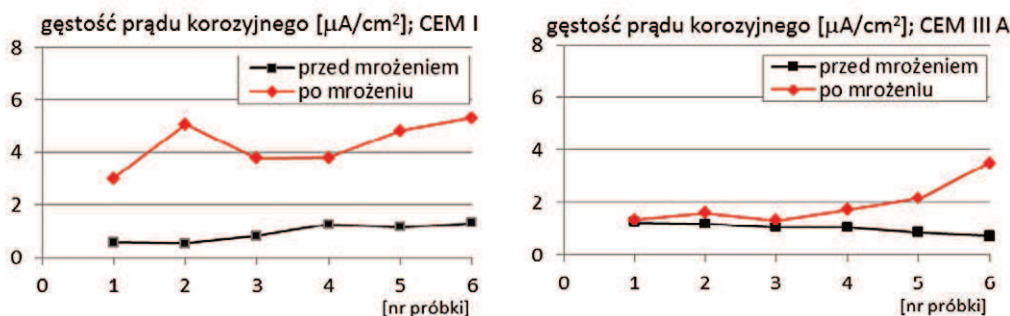
Wyniki badania składu fazowego betonów metodą rentgenowską pokazano na rysunkach 1 i 2. W betonach występują różne produkty karbonatyzacji. W betonie z cementem hutniczym powstaje kalcyt, a w betonie z cementem portlandzkim kalcyt i metastabilny wateryt. W obu betonach pozostał jeszcze portlandyt, z czego wynika, że warstwa wierzchnia betonu nie jest całkowicie skarbonatyzowana. W betonie z cementem CEM I po procesie zamrażania i odmrażania występuje chlorek wapnia; nie został on uwidoczniony w betonie z CEM IIIA.

Wyniki otrzymane z pomiarów gęstości prądu korozyjnego uzyskane na próbkach przed i po mrożeniu odniesione zostały do granicznych wartości kryterialnych. Jak podano w [3, 10] ocenę stopnia zagrożenia korozyjnego zbrojenia na podstawie wartości gęstości prądu korozyjnego (i_{kor}) należy określić według następującego kryterium; dla i_{kor} :

- $< 0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ – obszary o nieprognozowanej aktywności korozyjnej,
- $0,5 \div 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ – nieistotna aktywność korozyjna,
- $2 \div 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ – niska aktywność korozyjna,



Rys. 2.
Rentgenogramy betonów z: CEM I i CEM IIIA po cyklach zamrażania – odmrażania



Rys. 3.
Wyniki pomiarów gęstości prądu korozyjnego

- $5 \div 15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ – umiarkowana aktywność korozyjna,
- $> 15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ – wysoka aktywność korozyjna.

Wstępna analiza wyników pomiarów gęstości prądu korozyjnego wykazała, że wyniki z czterech punktów pomiarowych wykonanych w obrębie jednej próbki nie różniły się znacznie między sobą. W artykule przedstawiono więc wyniki dla jednego punktu pomiarowego z każdej próbki, w którym pomiar i_{kor} wykazywał największy wzrost korozji. Pomiar gęstości prądu korozyjnego wykonane przed cyklami mrożenia na próbkach z cementu CEM I oraz CEM IIIA wskazały, że w żadnym punkcie pomiarowym jej wartości nie przekroczyły $i_{\text{kor}} = 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (rys. 3) co, według przyjętego kryterium, świadczy o „nieistotnej aktywności korozyjnej”.

Po ponownym wykonaniu pomiarów na próbkach podanych cyklem zamrażania – odmrażania stwierdzono, że w próbkach z cementem CEM I we wszystkich analizowanych punktach pomiarowych gęstość prądu korozyjnego, wprawdzie nieznacznie, ale wzrosła, przekraczając $i_{\text{kor}} = 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, co, zgodnie z przyjętym kryterium, oznacza obszary zbrojenia „o niskiej aktywności korozyjnej” (w dwóch punktach wartość ta była nawet nieco wyższa niż $i_{\text{kor}} = 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$). Natomiast gęstość prądu korozyjnego zmierzona na próbkach z cementem CEM IIIA w większości punktów pomiarowych prawie nie uległa zmianie, w jednym punkcie wzrosła nieznacznie (do wartości $i_{\text{kor}} \sim 2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$), a w jednym osiągnęła wartość $i_{\text{kor}} = 3,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Przyczyny braku korozji stali i penetracji chlorku wapnia w betonie z CEM IIIA można dopatrywać się we wzroście porowatości żelowej oraz zmniejszeniu porowatości kapilarnej. Takie zmiany porowatości można wyjaśnić powstawaniem fazy C-S-H, która wypełnia pory kapilarne, co zostało opisane w pracach Kurdowskiego [4] i Lea's [13]. Mikrostruktura badanego betonu z cementem hutniczym była zwarta, a zmniejszona porowatość utrudniła dyfuzję chlorków do wnętrza betonu.

4. Podsumowanie

Analiza wyników uzyskanych z przeprowadzonych badań pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- Karbonatyzacja betonu oznaczona za pomocą fenoloftaleiny na cemencie CEM IIIA jest większa w porównaniu do betonu wykonanego na cemencie CEM I;

dodatkowo, w obu betonach zwiększa się głębokość karbonatyzacji po procesie zamrażania – odmrażania. W warstwie wierzchniej betonu z CEM IIIA produktem karbonatyzacji jest kalcyt, natomiast w betonie z CEM I kalcyt i metastabilny wateryt. Obecność portlandytu w warstwie wierzchniej betonu z CEM I oraz CEM IIIA świadczy o niepełnej karbonatyzacji.

- W betonie z CEM I po procesie zamrażania w obecności 3% NaCl występuje chlorek wapnia; nie został on uwidoczniiony w betonie z CEM IIIA, co może świadczyć o zwartej mikrostrukturze betonu z cementem CEM IIIA.
- Proces korozji zbrojenia w próbkach z CEM I rozpoczął się zanim warstwa wierzchnia betonu uległa całkowitej karbonatyzacji (o czym świadczy obecność portlandytu). Pomiar gęstości prądu korozyjnego w metodzie impulsu galwanostatycznego pozwala stwierdzić, że zastosowanie do betonu cementu CEM IIIA (zamiast cementu CEM I) wyraźnie wpływa na ograniczenie korozji zbrojenia ze względu na działanie chlorków.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ściślewski Z., „Ochrona konstrukcji żelbetowych”, Warszawa, Arkady 1999
- [2] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., O trwałości, diagnostyce i obserwacji konstrukcji żelbetowych. „Inżynieria i Budownictwo”, 10/2010
- [3] Zybura A., Jaśniok M., Jaśniok T., Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. Badania korozji zbrojenia i właściwości ochronnych betonu, PWN, Warszawa 2011
- [4] Kurdowski W., Chemia cementu i betonu. Polski Cement, PWN, Warszawa 2010
- [5] Czarniecki L., Emmons P. H., Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych. Wydawnictwo Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2002
- [6] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla Budynków
- [7] Jaśniok M., Jaśniok T., Metody diagnostyki zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych (cz. I) Charakterystyka procesu korozji zbrojenia w betonie. „Przegląd Budowlany”, 2/2007
- [8] Jaśniok M., Jaśniok T., Metody diagnostyki zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych (cz. III). Podstawowe badania elektrochemiczne. „Przegląd Budowlany”, 6/2007
- [9] Rączkiewicz W., Zestaw pomiarowy GP-5000 jako przykład aparatury wykorzystywanej do oceny procesu korozji zbrojenia w betonie – Aparatura Badawcza i Dydaktyczna, przewidziany do opublikowania w I kwartale 2014 r.
- [10] <http://www.germann.org/TestSystems/GalvaPulse/GalvaPulse.pdf>
- [11] PN-EN 14630:2007: Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji betonowych – Metody badań – oznaczenie głębokości karbonatyzacji w betonie metodą fenoloftaleinową
- [12] Chładyński S., Garbacik A., Cementy wieloskładnikowe w budownictwie. Wyd. Stow. Producentów Cementu, Kraków 2008
- [13] Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Ed. by Peter C. Hewlett, London 2001