

# Wpływ porowatości wybranych wyrobów budowlanych oraz zjawiska subflorescencji na przyspieszenie korozji chlorkowej

Inż. Beata Bielecka, dr inż. Teresa Rucińska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

## 1. Wprowadzenie

W budownictwie bardzo często spotykamy się z pojęciem korozji. Na związki soli narażone są nie tylko konstrukcje nadmorskie, ale problem ten występuje na całym świecie z uwagi na obecność jonów chlorkowych w atmosferze. Wody słone zajmują 97% zasobów, nie jesteśmy więc w stanie zapobiec oddziaływaniu soli chlorkowej na materiały budowlane. Szereg badań i rozwój techniczny pozwala nam jednak zwalczać zewnętrzne uszkodzenia spowodowane korozją, poprawiając walory estetyczne obiektów. Istnieją również metody zabezpieczania konstrukcji przed oddziaływaniem agresywnego środowiska, co skutecznie wydłuża ich żywotność, jednak nie powstrzymuje procesu niszczenia. Temat zabezpieczeń podczas bezpośredniego narażenia (struktury częściowo lub w pełni zanurzone) omówiono w [16], odnosząc się do przypadku niszczenia konstrukcji żelbetowych wystawionych na działanie słonej wody morskiej. Opisany most Bryant Patton na Florydzie, na którym zaobserwowano znaczne uszkodzenia wywołane korozją, zabezpieczono izolacją płaszczową, która okazała się bezsilna na działanie soli. Kapilarne podciąganie przyczyniło się do podniesienia poziomu chlorków, w wyniku tego jony zostały uwięzione w nienaprawionych obszarach. Powłoki przyspieszyły więc korozję, ponieważ jak piszą autorzy, beton nie wysycha i zawsze ma wystarczającą ilość tlenu dostępnego pod powierzchnią płaszcza. Inną ochronę przeciwkorozyjną pokazano w [14], w której autorzy napisali, że zastosowanie powierzchniowej ochrony betonu, takiej jak wkłady do porów, blokery do porów (reagujące z rozpuszczalnymi składnikami betonu i tworzące produkty nierozpuszczalne), czy też powłoki (tworzące ciągły film na powierzchni betonu), hamuje „...penetrację agresywnych środków przez dyfuzję i absorpcję kapilarną” [14].

Problem związany z zabezpieczaniem konstrukcji wynika między innymi z wiązania się różnych soli, których połączenia są skomplikowane, a powstrzymanie ich penetracji do wnętrza wyrobów budowlanych nie zostało wyjaśnione i wciąż nie jest znane.

W artykule poruszono temat działania jednego ze szkodliwych związków wpływających na trwałość materiałów, jakim jest

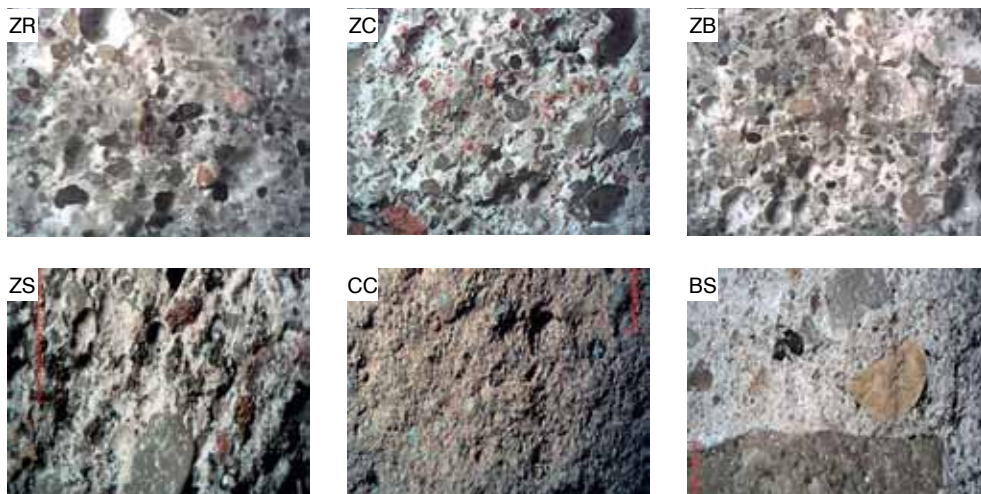
chlorek sodu (NaCl). O oddziaływaniach tego związku dowiadujemy się z pracy [7], w której napisano o wszechobecnym występowaniu chlorku sodu, zależności między krystalizacją a ciśnieniem hydrostatycznym, czy też wpływie żelazocyjanu na krystalizację soli wewnątrz struktury. O sorpcji na podstawie porównania wyrobów ceramicznych z trzech różnych wytwórni mówi pozycja [5]. Temat wpływu soli na ceramiczne materiały omówiono w [10, 17].

Kluczowym tematem pracy jest porowatość badanych materiałów pod kątem odporności na starzenie przy oddziaływaniu chlorku sodu oraz zagrożenie, jakie niesie za sobą występowanie zjawiska subflorescencji w tych wyrobach. Wiele informacji i opisanych badań dotyczących zależności pomiędzy porowatością i agresją solną, a także o jej wpływie na nasiąkliwość, podciąganie kapilarne, gęstość objętościową, co w efekcie znacznie zmienia parametry wytrzymałościowe struktury (na przykład wytrzymałość na ścislenie), znajduje się w [1–4, 7–14, 17]. Zmienność wewnętrznej struktury materiału po oddziaływaniu soli chlorkowej, opierając swoją analizę na badaniach laboratoryjnych wykonanych za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego opisano w [12]. Uzyskane wyniki, wskazujące na zmniejszenie porów pod wpływem nasycenia chlorkami, autorzy porównali z wynikami próbek zanurzonych w wodzie dejonizowanej poddanych temu samemu badaniu. W rezultacie badania mikrostruktury ceramiki za pomocą mikroskopu konfokalnego, znaleziono podobieństwo zaobserwowanych uszkodzeń zasolonej próbki do eksudacji, czyli wietrzenia solnego skał, co przedstawiono w [17]. Autorka pisze, że krystalizacja soli doprowadziła do nacisku na ściany porów, powodując rozpad materiału ceramicznego, co w przypadku oddziaływania siarczanu sodu nazywa się rozpadem glanuralnym, często określanym „pudrowaniem murów”.

## 2. Metodologia

### 2.1. Materiały

Do badań wykorzystano zaprawy cementowe o zróżnicowanej zawartości kruszywa drobnoziarnistego naturalnego i pozyskanego z surowców odpadowych, cegły ceramiczne i bloczki silikatowe (rys. 1).



**Rys. 1.** Makrostruktura badanych materiałów

Ostatecznie ustalono 12 wariantów próbek, które poddano zaplanowanym badaniom. Są to:

- zaprawa cementowa referencyjna (ZR),
- zaprawa cementowa z udziałem 10 (ZC10), 20 (ZC20) i 30% (ZC30) recyklatu ceramicznego,
- zaprawa cementowa z udziałem 10 (ZB10), 20 (ZB20) i 30% (ZB30) recyklatu betonowego,
- zaprawa cementowa z udziałem 10 (ZS10), 20 (ZS20) i 30% (ZS30) recyklatu pozyskanego z wypalonego osadu ściekowego,
- cegła ceramiczna klasy 15 (CC),
- bloczek silikatowy klasy 25 (BS).

Recepturę zaprawy referencyjnej ustalono wagowo w odniesieniu do składu normowej zaprawy cementowej – jedna porcja cementu, trzy porcje piasku i  $w/c=0,5$  (1:3:0,5). Recyklat dozowano w ramach objętości drobnoziarnistego naturalnego kruszywa, ujmując kolejno 10, 20, 30% piasku, i wprowadzając w to miejsce zmielony odpad ceramiczny, betonowy i wypalony osad ściekowy o takim samym uziarnieniu jak piasek. Zaprawy wykonano wykorzystując cement portlandzki CEM I 42,5 R (ZS) oraz hutniczy CEM III/A 42,5 N-LH/HSR/NA (ZC, ZB). Należy tu wspomnieć, iż z uwagi na porowatą strukturę kruszyw recyklingowych, absorbujących wodę zarobową, do mieszanek dozowano wodę dodatkową, w celu uzyskania porównywalnej konsystencji. Woda ta z czasem częściowo odparowała, a także sprzyjała samopiełgnacji wewnętrznej w okresie dojrzewania zapraw.

## 2.2. Przygotowanie próbek i metody badań

Ocenę starzenia materiałów pod wpływem chlorku sodu wykonano w oparciu o procedurę opisującą badanie kamienia naturalnego wg normy PN-EN 14147:2003 [18].

Do badania przygotowano po 8 sztuk próbek w kształcie sześcianu o boku 50 mm, które uzyskano poprzez docięcie z dostępnego materiału badawczego dziesięciu zapraw (ZR, ZC10/20/30, ZB10/20/30, ZS10/20/30), cegły ceramicznej porowatej (CC) i bloczka silikatowego (BS). Następnie próbki wysuszono do stałej masy w temperaturze  $70 \pm 5^\circ\text{C}$ , po czym

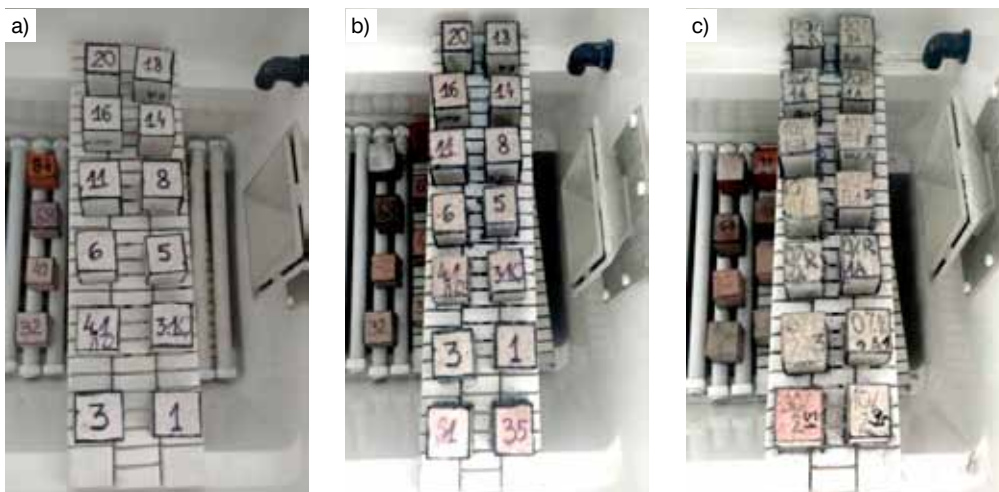
rozdzielono je na dwie grupy: 4 próbki, z każdego materiału, po wystudzeniu umieszczono w eksykatorze, aby chronić je przed ponownym zawilgoceniem, a 4 pozostałe przeznaczone do oznaczenia odporności na starzenie pod wpływem chlorku sodu (NaCl). W celu rozróżnienia poszczególnych wyrobów, kostki oznaczono numerycznie, a ich krawędzie obrysowano, co ułatwiało wizualną ocenę ewentualnych szkód wyrządzonych na skutek działania soli.

Do oznaczenia odporności na starzenie pod działaniem mgły solnej wykorzystano komorę solną Ascott 450xp. Zaplanowano 30 cykli, gdzie jeden cykl obejmował czterogodzinną ekspozycję próbek na oddziaływanie mgły solnej i ośmiogodzinne suszenie ciepłym powietrzem. W czasie badania w komorze solnej panowała temperatura  $35 \pm 5^\circ\text{C}$ . Po każdym 15 cyklach próbki poddawano oględzinom. Roztwór soli do napyłania przygotowano z 1 kg NaCl o czystości min. 95% oraz 9 litrów wody destylowanej. Po zakończeniu badania próbki płukano przez okres trzech tygodni, do momentu kiedy zaobserwowano brak osadu soli na ich matrycy, a następnie wysuszono do stałej masy w celu oznaczenia ubytku masy.

Oznaczenie nasiąkliwości metodą moczenia przeprowadzono na podstawie normy PN-85 B-04500 [19], natomiast współczynnika absorpcji wody w wyniku podciągania kapilarnego wg PN-EN 1015-18:2003 [20]. Badania wykonano na próbkach o wymiarach  $10 \times 10 \times 5$  cm. Współczynnik absorpcji wody wyznaczono w czasie 10 min i 90 min, przy zachowaniu stałej wysokości zwierciadła wody – próbki zanurzone na wysokość 1 cm.

Ważnym parametrem, mogącym wskazywać na uszkodzenie struktury materiałów, jest wytrzymałość. W ramach badania, wg procedury zawartej w normie EN 1015-11:1999/A1 [22] w odniesieniu do zapraw oraz w oparciu o normę PN-EN 772-1:2001 [21] w przypadku cegły ceramicznej i bloczka silikatowego, na próbkach w kształcie sześcianu o boku 5 cm, przeprowadzono oznaczenie wytrzymałości na ściskanie. Badanie przeprowadzono na próbkach poddanych działaniu roztworu soli i przechowywanych w warunkach bez obecności tego czynnika.

W celu uzyskania szczegółowych informacji na temat struktury badanych materiałów, ich porowatości i ewentualne istnienie wewnętrznej krystalizacji soli, wykorzystano optyczny mikroskop stereoskopowy oraz elektronowy mikroskop HITACHI TM3000. Dzięki temu oceniono i porównano próbki przed i po oddziaływaniu chlorku sodu. Natomiast analizę zawartości stężenia pierwiastków chemicznych umożliwił analizator EDS, współpracujący z oprogramowaniem QUANTAX 70.



**Rys. 2.** Przykładowe zestawienie próbek podczas badania w komorze solnej: a) przed rozpoczęciem badania, b) po 15 cyklach; c) po 30 cyklach

### 3. Wyniki i analiza badań

#### 3.1. Ocena odporności na starzenie pod wpływem chloru sodu

W trakcie badania odporności na starzenie pod wpływem działania mgły solnej próbki poddano ocenie makroskopowej. Aby porównać zaistniałe zmiany zaobserwowane na powierzchni próbek, zarejestrowano ich wygląd (rys. 2 i 3): przed badaniem, po 15 cyklu i po 30 cyklu oddziaływania mgły solnej w komorze Ascott 450xp.

Analizując rysunek 2, widać wyraźną różnicę i pogorszenie stanu próbek poddanych działaniu środowiska NaCl. Matryca cementowa wraz ze wzrostem cykli stopniowo ulegała niszczeniu. Próbki wyraźnie się kruszą, a ich zewnętrzna struktura jest bardziej chropowata. Dokładniejszy charakter zniszczeń ukazuje rysunek 3. Na próbce 2 widać wyraźny biały nalot, utworzony w wyniku naprzemiennego poddawania ceramicznej kostki działaniu mgły solnej i suszenia. Podobnie dzieje się w reakcji materiału z chlorkami występującymi w otoczeniu, a ma to ściśły związek z białymi nalotami, inaczej zwanymi wykwitami. Najczęściej możemy zaobserwować je wiosną, kiedy ściany wysychają i wyflukują sole, a latem powierzchnię oczyszcza deszcz i tak cyklicznie każdego roku [13]. Oczywiście proces ten nie przebiega w nieskończoność. Z czasem materiały ulegają zniszczeniu, a jest to, w zależności od rodzaju materiału i jego właściwości fizycznych i chemicznych, proces powolny lub szybki. Wykwity powstają wskutek

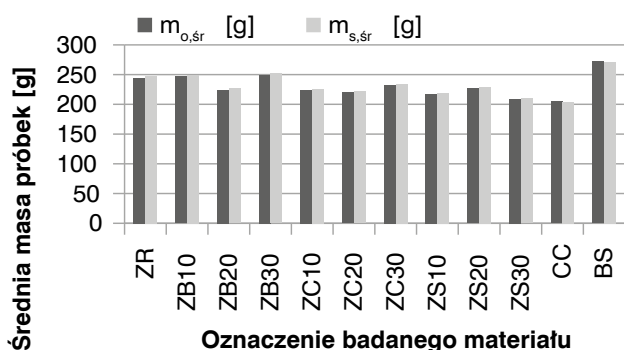
wyflukowania soli. Ma to ściśły związek z porowatością materiału. Woda wraz z cząsteczkami rozpuszczonej soli poprzez kapilary (pory) przedostaje się do wnętrza próbki. Kiedy kapilary są wąskie, ciśnienie przepływającej cieczy jest większe, sól nie ma możliwości osiadania wewnątrz materiału, więc razem z cząsteczkami wody jest wynoszona na zewnątrz. Wbrew pozorom proces ten pod kątem chemicznym jest pozytywny. Sól uszkadza zewnętrzną powierzchnię wyrobu, powodując stop-

niowe wykruszanie i wyflukowanie jego fragmentów, jednak niebezpieczne jest uwięzienie cząsteczek soli wewnątrz struktury. Taka sytuacja ma miejsce w przypadku, kiedy pory są duże, a zalegający w nich roztwór nie jest wyflukiwany, ponieważ ciśnienie hydrostatyczne płynu jest zbyt małe. Podczas wzrostu temperatury, zalegająca w kapilarach woda zaczyna parować, a znajdujące się w niej cząsteczki soli osiadają na ścianach porów, krystalizując się. Kiedy skryształizowana sól zostanie ponownie rozpuszczona, zwiększa swoją objętość, co prowadzi do powstania naprężeń rozciągających oddziałujących na ściany pora, powodując mikropęknięcia i inne uszkodzenia struktury. Cały proces powtarza się, a agresywny roztwór solny ma więcej przestrzeni do wnikania w strukturę materiału, nie tylko przez pory zewnętrzne, ale również poprzez rysy powstałe w wyniku wewnętrznych naprężeń. Beton jest względnie słaby na naprężenia rozciągające, pęknięcia wkrótce się pojawiają i tak jak to jest na przykład w przypadku konstrukcji żelbetowych, odślaniana jest stal, a do wnętrza przedostaje się duża ilość chlorków, tlenu i wilgoci, co powoduje przyśpieszenie procesu korozyjnego [15].

Przeprowadzana analiza jest eksperymentem, mającym ułatwić ocenę odporności chlorkowej zapraw bez recyklatów i z nimi oraz cegły ceramicznej i bloczka silikatowego. Na próbce 1 (rys. 3) widać okruszone krawędzie, kolejna obrazuje charakterystyczny osad na wyrobie ceramicznym w postaci białego wykwitu. Trzecia i czwarta próbka, to kolejne zmiany, do których przyczyniła się reakcja z chlorkiem sodu, a dokładniej



**Rys. 3.** Zdjęcia próbek wykonane po ukończeniu 15 cyklu oddziaływania mgły solnej



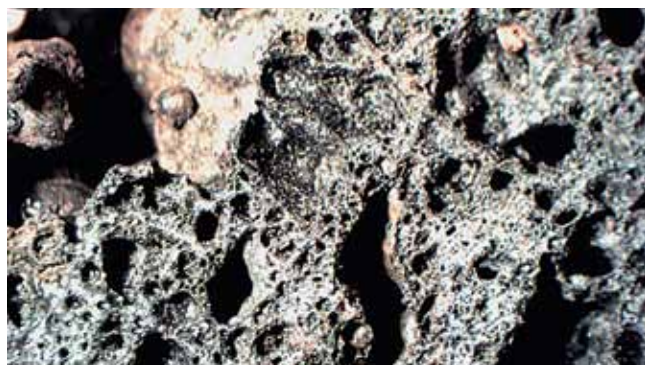
**Rys. 4.** Porównanie średniej masy suchej próbek przed ( $m_{o,sr}$ ) i po ( $m_{s,sr}$ ) oddziaływaniu środowiska chlorku sodu

na próbce 3 (rys. 3) widoczne powstanie zewnętrznych otwartych porów, co jest dużym zagrożeniem przy dalszym oddziaływaniu na taki element agresywnego środowiska. Pory stwarzają bowiem największe ryzyko wystąpienia korozji poprzez łatwy i szybki dostęp agresywnego czynnika do wnętrza materiału. Próbką 4 (rys. 3) ukazuje niszczenie powierzchni, na którą oddziałuje chlorek sodu, poprzez kruszenie i wyfukowanie otaczającej ją powłoki wapiennej badanego silikatu. Ostatnia próbka – 5 (rys. 3) – wykazuje zawilgocenie struktury w wyniku oddziaływania mgły solnej.

Według procedury zawartej w EN 14147:2003, efektem końcowym oceny oddziaływania roztworu chlorku sodu jest porównanie masy suchej próbek przed i po badaniu – rysunek 4. Jak widać, w większości przypadków nastąpił wzrost masy po oddziaływaniu NaCl. Oznacza to, że mimo długoterminowego płukania próbek po zakończeniu badania, w strukturze zalegają kryształki soli. W przeprowadzonym eksperymencie ustalono 30 cykli, gdzie jeden cykl to cztery godziny oddziaływania na próbki mgły solnej i osiem godzin suszenia ciepłym powietrzem o temperaturze  $35 \pm 5^\circ\text{C}$ . W warunkach naturalnych proces ten jest bardziej wzmożony i może prowadzić do uszkodzenia struktury badanych materiałów w większej skali.

### 3.2. Badanie nasiąkliwości i współczynnik absorpcji kapilarnej

Wykorzystując procedurę zawartą w normie PN-85 B-04500 do oznaczenia nasiąkliwości metodą moczenia, wykorzystano próbki o wymiarach  $10 \times 10 \times 5$  cm, które po wysuszeniu do stałej masy umieszczono w pojemniku (wymiary podstawy –  $10 \times 5$  cm) na podkładkach z tworzywa sztucznego i zalano wodą, postępując zgodnie z normą. Kontrolnie sprawdzono również temperaturę wody. Nasycenie materiału jest zależne przede wszystkim od jego rodzaju i typu porów. Zazwyczaj nasiąkliwość wyrobów budowlanych jest mniejsza od ich porowatości, ponieważ woda nie jest w stanie dostać się do wnętrza małych porów, a jedynie nawilża je. Wśród badanych materiałów największą nasiąkliwością wykazała się cegła ceramiczna klasy 15, charakteryzująca się strukturą o czerpie drobnoporowatym. Należy wspomnieć, że maksymalne wartości nasiąkliwości tego materiału są osiągnięte przy nasyceniu w próżni. Kolejne wyroby o wysokiej nasiąkliwości (największa nasiąkliwość zaprawy ZS30 – 12,47%) – tabela 1, to zaprawy z recyklatem pozyskany z wypalonego osadu



**Rys. 5.** Struktura wypalonego osadu ściekowego

**Tabela 1.** Średnia wartość nasiąkliwości badanych wyrobów budowlanych

Oznaczenie próbki	Nasiąkliwość [%]	Oznaczenie próbki	Nasiąkliwość [%]
ZR	6,83	ZC10	7,76
CC	16,10	ZC20	7,96
BS	9,52	ZC30	10,08
ZB10	7,42	ZS10	8,18
ZB20	7,84	ZS20	10,63
ZB30	8,12	ZS30	12,47

ściekowego [6]. Zaprawy te już podczas wstępnych obserwacji, przy poddawaniu próbek działaniu mgły solnej, okazały się materiałem wysoce porowatym o otwartych porach. Jest to spowodowane wyraźną porowatością ziaren wypalonego osadu ściekowego, o zróżnicowanej wielkości porów – rysunek 5. Przełożyło się to na wzrost nasiąkliwości tej grupy zapraw wraz ze wzrostem ilości dodanego recyklatu. W konsekwencji tak porowata struktura zapraw jest niekorzystna z uwagi na trwałość tego materiału. Zaprawy z udziałem recyklatu ceramicznego, w miarę jego wzrastającej ilości stały się mniej szczelne, co przyczynia się do wnikania w głąb soli. Podobna sytuacja dotyczy kolejno zapraw z recyklatem wypalonego osadu ściekowego i betonowego. Im więcej dodanego recyklatu do zaprawy, tym wyższa nasiąkliwość. Najmniej nasyconym materiałem okazała się zaprawa cementowa bez recyklatu, której nasiąkliwość wyniosła 6,83%.

Wśród wyników wyznaczonego współczynnika absorpcji wody (tab. 2), współczynnik cegły ceramicznej okazał się najwyższy, co jest charakterystyczne w przypadku tego typu wyrobów, które wykazują pory o wielkości nawet 0,001 mm [5]. W zaprawach z recyklatem betonowym zaobserwowano wzrost podciągania kapilarnego wraz ze zmniejszeniem dozowanego recyklatu. Może to być spowodowane niedostatecznym zagęszczeniem, niewłaściwą pielęgnacją lub nadmiarem wody zarobowej [1]. Natomiast w zaprawach z osadem ściekowym i mieloną cegłą ceramiczną, w miarę wzrastającej ilości recyklatu, następuje wzrost współczynnika absorpcji kapilarnej (tab. 2). Należy zaznaczyć, że wysokość kapilarnie podciąganej wody jest odwrotnie proporcjonalna do wielkości porów (ich średnicy) i kapilar [5]. Oznacza to wzrost porów o małej średnicy w strukturze tych zapraw i potwierdza mikroporowatą strukturę ziaren recyklatu ceramicznego i wypalonego osadu ściekowego.

**Tabela 2.** Określenie współczynnika absorpcji wody badanych materiałów

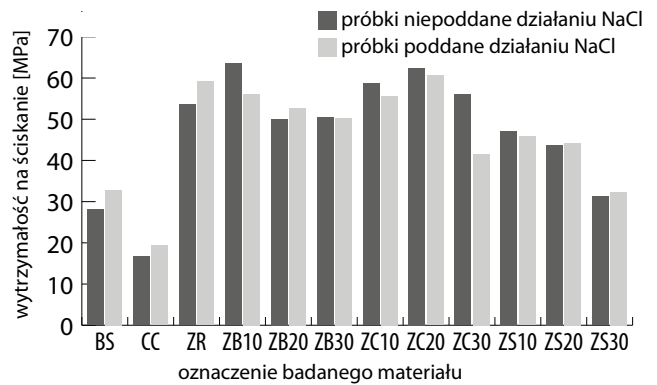
Oznaczenie próbki	C [kg/m <sup>2</sup> *min <sup>0,5</sup> ]	Oznaczenie próbki	C [kg/m <sup>2</sup> *min <sup>0,5</sup> ]
ZR	0,13	ZC10	0,16
CC	1,33	ZC20	0,16
BS	0,21	ZC30	0,17
ZB10	0,16	ZS10	0,14
ZB20	0,15	ZS20	0,17
ZB30	0,14	ZS30	0,20

**3.3. Wytrzymałość na ściskanie badanych wyrobów budowlanych**

Najważniejszą rolę w badaniu wytrzymałości kompozytów cementowych odgrywa matryca. W początkowym okresie hydratacji (uwodnienia) wytrzymałość wzrasta. Jest to związane z powstawaniem krystalicznego etryngitu, a w późniejszym etapie portlantydu. Niedługo po tym rolę przejmuje faza C-S-H, która jest odpowiedzialna za dalszy rozwój właściwości twardniejącego zaczynu [2].

Porównanie wytrzymałości na ściskanie badanych materiałów, uzyskanej na próbkach nie poddanych i poddanych ekspozycji chlorku sodu pozwala na stwierdzenie, że przyczyną wzrostu wytrzymałości ponad połowy badanych wyrobów jest zjawisko subflorescencji – rysunek 6.

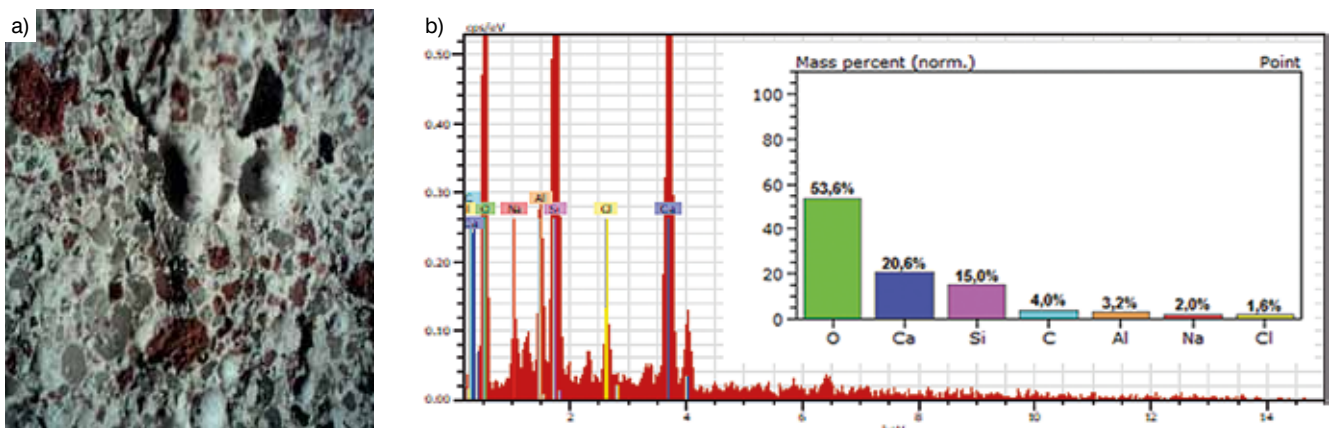
Subflorescencja określa potencjalnie szkodliwą akumulację i nawarstwianie się skryształizowanej soli wewnątrz materiału [17]. Zjawisko subflorescencji przedstawiono w pracy eksperymentalnej [12], określone powstawaniem soli Friedla wewnątrz porów. Chlorki reagują ze składnikiem cementu portlandzkiego, glinianem trójwapniowym (C<sub>3</sub>A), a produktem tej reakcji jest hydrat chloroaluminian wapnia 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaCl<sub>2</sub>·10H<sub>2</sub>O (sól Friedla). Sól reaguje z diwodorotlenkiem wapnia – Ca(OH)<sub>2</sub> – tworząc CaCl<sub>2</sub>, który sprawia, że beton staje się szczelniejszy. Autor zaobserwował zależność występowania tego zjawiska z równoległym zmniejszeniem średnicy porów. W przeprowadzonych badaniach zauważono związek uzyskanych wyników z opisanym w literaturze zjawiskiem. Wzrost masy, gęstości objętościowej, co za tym idzie wzrost wytrzymałości po przeprowadzeniu badania w komorze solnej (rys. 6)



**Rys. 6.** Porównanie wytrzymałości na ściskanie próbek poddanych i nie poddanych działaniu NaCl

świadczy, że pory ulokowane w strukturze analizowanych materiałów poddanych ekspozycji chlorku sodu, zostały wypełnione tworząc bardziej zwartą i cięższą próbkę. Dzieje się tak, ponieważ woda wraz z rozpuszczonymi cząsteczkami soli przedostaje się poprzez powierzchnię zewnętrzną próbki do jej wnętrza. Drobne pory i bardziej spójna struktura powodują, że ciśnienie przepływającego kapilarami roztworu jest większe. Roztwór przemieszcza się szybciej, a natykając się na mikropory, co obserwujemy na przykład w przypadku cegły ceramicznej, jedynie nawilża jego ścianki. Jest to uzasadnione między innymi wielkościami cząsteczki wody, które są znacznie mniejsze niż cząsteczki soli, tym samym ilość rozpuszczonego związku chlorku sodu w wodzie, która przedostaje się do małych porów materiału jest znikoma. W wyniku tego przy wzroście temperatury na nawilżonych ściankach nie krystalizują się znaczące ilości NaCl. Przeciwnie jest w sytuacji, gdy mamy do czynienia z porami o dużych średnicach. Roztwór soli przedostający się do wnętrza wyrobu stopniowo rozprzestrzenia się w strukturze. Natykając się na duże pory, ciśnienie zmniejsza się i powoduje zaleganie wody z rozpuszczonymi w niej solami. W momencie wzrostu temperatury woda zaczyna parować, a sól osadza się na ścianach pora, krystalizując się.

Wykorzystując EDS, dokonano analizy stężenia pierwiastków zaobserwowanych na powierzchni badanych wyrobów.



**Rys. 7.** Efekty oddziaływania roztworu soli na zaprawę ZC20: a) przykład osadzenia skryształizowanej soli wewnątrz porów zaprawy ZC20; b) widmo energetyczne pierwiastków zidentyfikowanych na obserwowanej powierzchni oraz ich udział w %

Wyniki wygenerowane za pomocą programu QUANTAX 70 pozwoliły ustalić istnienie kryształków soli uwieczonych w ich strukturze w wyniku długotrwałego oddziaływania środowiska solnego. Przykład ulokowania się kryształków soli w porach materiału przedstawiono na rysunku 7. Świadczy to o obecności soli wewnątrz badanego wyrobu, ale również może potwierdzać wystąpienie zjawiska subflorescencji.

Analiza mikroskopowa zaprawy z recyklatem betonowym ZB10 wykazała brak obecności chloru po 30 cyklach oddziaływania roztworu NaCl, a następnie odpowiednim płukaniu próbek. Bloczki silikatowe okazały się materiałem najodporniejszym na działanie chlorku sodu. Odporność tę materiał zyskuje dzięki zwartej strukturze, niskiej porowatości i nasiąkliwości. Najbardziej narażonym na działanie soli materiałem okazały się zaprawy ZS10, ZS20 i ZS30. W próbkach tych już na początku badań zaobserwowano wysoką porowatość, co potwierdziła analiza struktury wykonana za pomocą mikroskopu optycznego.

#### 4. Podsumowanie

Uzyskane wyniki podczas przeprowadzonych badań eksperymentalnych pozwalają sformułować poniższe wnioski.

- Skupiska skryształizowanej soli mogą świadczyć o występowaniu zjawiska subflorescencji, co powoduje początkowy wzrost masy, gęstości objętościowej, przyczynia się do uszczelnienia skryształizowaną solą porów, czyniąc strukturę bardziej zwartą i poprawiając jej parametry wytrzymałościowe. W rozpatrywanym przypadku zaobserwowano zwiększenie wytrzymałości na ściskanie.
- Duże pory zwiększają ryzyko wystąpienia zjawiska subflorescencji, przyczyniając się do zmniejszenia ciśnienia przepływającego kapilarami roztworu i jego zalegania wewnątrz wyrobu.
- Mikropory przyczyniają się do wydłużenia żywotności materiałów i złagodzenia skutków zachodzącej w ich strukturze korozji chlorkowej, nie jest to jednak sprawdzone w przypadku wiązania się innych jonów soli, które występują w atmosferze, ponieważ do tej pory nie wyjaśniono korelacji pomiędzy ich skomplikowanymi połączeniami.
- Otwarte pory i zewnętrzne uszkodzenia struktury przyspieszają korozję.
- Wykwity w postaci białego nalotu, powstałe na materiałach budowlanych, są zjawiskiem pozytywnym. Świadczą bowiem o wypłukiwaniu niszczącego związku z wnętrza wyrobu dzięki wąskim kapilaram, sól nie ma więc możliwości krystalizacji wewnątrz, co zmniejsza ryzyko wystąpienia naprężeń, powstania rys i pęknięć. Drobnoporowate struktury wyrobów wpływają więc korzystnie na ich trwałość.
- Wyluszczenie powierzchni zewnętrznej materiału może świadczyć o szczelności matrycy badanego wyrobu i o niewielkiej ilości soli wewnątrz struktury.
- Im większa liczba mikroporów, tym szybsze podciąganie kapilarne.
- Tendencja wzrostowa nasiąkliwości w przypadku zwiększania dozowanego, w ramach objętości piasku, drobnoporiastego recyklatu betonowego, ceramicznego i wypalonego osadu ściekowego.
- Im większa nasiąkliwość, tym większe ryzyko korozji chlorkowej.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Brandt A.M., Diagnostyka betonu na podstawie struktury, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Przegląd budowlany 10/2012, Warszawa
- [2] Budownictwo Ogólne, tom 1, Materiały i wyroby budowlane, red. Stefańczyk B., Arkady, Warszawa, 2010
- [3] Chłudzkiński S., Odporność betonów z cementu z dodatkami mineralnymi na rozmrażanie w obecności 3% roztworu NaCl, CWB, 2005, str. 1–33
- [4] Chłudzkiński S., Wpływ obniżonej temperatury na odporność zapraw z cementów z dodatkami mineralnymi na oddziaływanie wody morskiej, CWB, 2005, str. 5–283
- [5] Garbalińska H., Głowacki M., Zróżnicowanie sorpcyjności kapilarnej cegieł ceramicznych pochodzących z różnych wytwórni, Fizyka budowli w teorii i praktyce, tom VIII, 4/2016
- [6] Głowacka A., Rucińska T., Kiper J., The slag original from the process of sewage sludge incineration selected properties characteristic, E3S Web Conf, tom 22, 00054 (2017)
- [7] Gupta S., Sodium Chloride Crystallization in drying Poros media: influence of inhibitor, Eindhoven University of Technology, 2013
- [8] Horszczaruk E., Brzozowski P., Rucińska T., Odporność na korozję chlorkową podwodnego betonu naprawczego dojrzewającego w warunkach oddziaływania ciśnienia hydrostatycznego, Budownictwo i Architektura, 12(3)2013, str. 161–168
- [9] Jaśniok T., Słomka-Słupik B., Zybura A., Przebieg korozji chlorkowej zbrojenia w betonie bezpośrednio po inicjacji, CWB, 2014, str. 3–158
- [10] Kulovaná T., Vejmelová E., Keppert M., Rovnaniková P., Ondráček, Keršner Z., Černý R., Technologia betonu napowietrzającego jako efektywna metoda zwiększenia dodatku zmieszanych odpadów z cegieł w cementach wieloskładnikowych, CWB, 2015, str. 1–11
- [11] Li M., Zhang Y., Wu Z., Qian Ch., Sun W., Wpływ chlorków na mikrostrukturę betonu w warunkach cyklicznego zamrażania i rozmrażania, CWB 2013, str. 3–74
- [12] Liu J., Tang K., Qiu P., Pan D., Lei R., Xing F., Experimental Investigation on Pore Structure Charakterization of Concrete Exposed to Water and Chlorides, 7, Materials, 2014, str. 6646–6659
- [13] Lourens A. R., Salt crystallization in Tours materials, an NMR stud, Technische Universiteit Eindhoven, 2004
- [14] Medeiros M.H.F., Castro-Borges P., Aleixo D.M., Quarcioni V.A., Marcondes C.G.N. and Helene P., Reducing water and chloride penetration through silicate treatments for concrete as a mean to control corrosion kinetics, Int. J. Electrochem. Sci., 7/2012, str. 9682–9696
- [15] Scannell W. T., Sohahngpurwala A., Cathodic Protection as a Corrosion Control Alternative, Concrete Repair Bulletin, July/August, 1993
- [16] Sohahngpurwal A., Scannell W. T., Repair and Protection of Concrete Exposed to Seawater. Concrete Repair Bulletin July/August, 1994
- [17] Wesółowska M., Zmiany mikrostruktury ceramiki wynikające ze subflorescencji siarczanu sodu. Fizyka budowli w teorii i praktyce, tom X, nr 1, 2018
- [18] EN 14147:2003, Metody badań kamienia naturalnego – Oznaczenie odporności na starzenie pod działaniem mgły solnej
- [19] PN-85 B-04500, Zaprawy budowlane. Badania cech fizycznych i wytrzymałościowych
- [20] PN-EN 1015-18:2003, Metody badań zapraw do murów. Część 18: Określenie współczynnika absorpcji wody spowodowanej podciąganiem kapilarnym stwardniałej zaprawy
- [21] PN-EN 772-1:2001, Metody badań elementów murowych. Część 1: Określenie wytrzymałości na ściskanie
- [22] PN-EN 1015-11:2001/A1, Metody badań zapraw do murów. Część 11: Określenie wytrzymałości na zginanie i ściskanie stwardniałej zaprawy

Serdecznie zapraszamy autorów

do publikacji w miesięczniku

„Przegląd budowlany”

za artykuł recenzowany

uzyskuje się 5 punktów