

dr inż. Marcin Zygmunt^{1)*}

ORCID: 0000-0003-1304-8591

dr inż. Dalia Bednarska¹⁾

ORCID: 0000-0002-2146-0650

dr inż. Alicja Wieczorek¹⁾

ORCID: 0000-0003-2723-3552

dr hab. Dominika Drzewiecka²⁾

ORCID: 0000-0002-2753-7700

dr hab. inż. Marcin Koniorczyk, prof. PŁ¹⁾

ORCID: 0000-0002-6887-4324

dr inż. Maciej Batog³⁾

ORCID: 0000-0001-9908-0642

mgr inż. Jakub Bakalarz³⁾

Mikrobiologiczne wytrącanie kalcytu jako alternatywna metoda uszczelniania powierzchniowego kompozytu cementowego

Microbiological calcite precipitation as an alternative method for strengthening of the concrete surface

DOI: 10.15199/33.2022.07.07

Streszczenie. W artykule przedstawiono zastosowanie mikrobiologicznego wytrącania kalcytu jako alternatywnej metody wzmocnienia powierzchniowego kompozytów cementowych. Opisano procedury wytrącania kalcytu (ang. *microbiologically induced calcium carbonate precipitation*, MICP) oraz przedstawiono wyniki pilotażowych badań laboratoryjnych zastosowania tej metody. Wykazano duży potencjał zastosowania mikrobiologicznego wytrącania kalcytu w budownictwie, co w porównaniu z metodami tradycyjnymi jest procesem ekologicznie przyjaznym oraz energooszczędnym. Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowanie wytrącania kalcytu prowadzi do wyraźnej poprawy właściwości badanych próbek i ich uszczelnienia. Planowane jest kontynuowanie i rozszerzenie badań, sprawdzające inne procedury zastosowania MICP.

Słowa kluczowe: wytrącanie kalcytu; MICP; wzmocnianie betonu; ekobeton; zrównoważony beton; biocement.

Abstract. In this article, an application of MICP is examined, as an alternative method of surface strengthening in cement composites. Several MICP procedures and results out of some reference lab testing are shown in this paper. The high potential of MICP building application is shown based on the obtained results – the surface strengthening and sealing are improved. Additionally, the examined method is more ecologically friendly and energy-efficient compared with the standard procedures of surface strengthening. It is planned to continue research on MICP application in concrete elements.

Keywords: calcite precipitation; MICP; concrete strengthening; ecoconcrete; sustainable concrete; biocement.

Ostatnio coraz bardziej popularne są badania betonu zgodnie z koncepcją gospodarki o obiegu zamkniętym (ang. *circular economy*) [1], a więc dotyczące jego powtórnego wykorzystania i recyklingu, stosowania domieszek pochodzących z odzysku z innych produktów/odpadów [2], a także wprowadzenie tzw. ekobetonu (ang. *green concrete*), w którym częściowo zastąpiono klinkier portlandzki żużlem, pyłem krzemionkowym lub metakaolinitem [3]. Wiele badań prowadzonych jest również w celu wydłużenia czasu eksploatacji elementów/obiektów już istniejących. Dotyczą one najczęściej poprawy powierzchni-

wych właściwości betonu [4 – 6]. **Nowym podejściem do powierzchniowego ulepszania betonu jest zastosowanie biomineralizacji**, która występuje w przyrodzie jako zjawisko naturalne, a jej efektem jest **usztynwienie lub utwardzenie tkanek** [7]. Coraz częściej prowadzone są badania nad wykorzystaniem mikrobiologicznego wytrącania kalcytu w celu zabezpieczenia (uszczelnienia) powierzchni betonu. **Zastosowanie kalcytu pochodzenia mikrobiologicznego pozwala zwiększyć wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych oraz uszczelnić zarysowane elementy betonowe** [8].

W artykule przedstawiono zastosowanie mikrobiologicznego wytrącania kalcytu jako alternatywnej metody wzmocnienia powierzchniowego. Opisano procedury wytrącania kalcytu, jak również wyniki pilotażowych badań laboratoryjnych zastosowania tej meto-

dy. Wykazano duży potencjał zastosowania mikrobiologicznego wytrącania kalcytu w budownictwie, co w porównaniu z metodami tradycyjnymi jest procesem ekologicznie przyjaznym oraz energooszczędnym.

Proces wytrącania kalcytu

Biologiczne wytrącanie kalcytu jest procesem biomineralizacji, który bazuje na naturalnych procesach metabolicznych organizmów żywych. W procesie wytrącania węglanu wapnia ważną rolę odgrywa tzw. strącanie indukowane mikrobiologicznie (ang. *microbiologically induced calcium carbonate precipitation*, MICP), które zachodzi np. z udziałem bakterii ureolitycznych. MICP jest procesem szybkim i przyjaznym środowisku naturalnemu, co uzasadnia wykorzystanie tej techniki w zastosowaniu inżynierskim.

¹⁾ Politechnika Łódzka; Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

²⁾ Uniwersytet Łódzki; Wydział Biologii i Ochrony Środowiska

³⁾ Centrum Technologiczne Betotech Sp. z o.o.

^{*}) Adres do korespondencji: marcin.zygmunt@p.lodz.pl

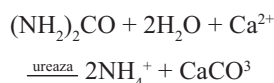
Wytrącanie węglańca wapnia możliwe jest przy odpowiednim, alkalicznym odczynie pH otoczenia (tzn. powyżej 7,5). Proces intensywnie zachodzi pod wpływem działania bakterii ureolitycznych, które mają na swojej powierzchni, w strukturach budujących ścianę komórkową, ujemnie naładowane grupy funkcyjne, co może prowadzić do przyciągania dodatnich jonów wapnia. Bakterie ureolityczne mają zdolność rozkładania mocznika na amoniak i dwutlenek węgla. Rozpuszczony dwutlenek węgla, w postaci anionów węglanowych CO_3^{2-} przyłącza się do kationów Ca^{2+} , natomiast powstający amoniak, w postaci jonów NH_4^+ , silnie zwiększa pH. W takim alkalicznym środowisku węgiel wapnia wytrąca się z roztworu. Dochodzi do krystalizacji CaCO_3 na powierzchni bakterii, które służą jako centra zarodkowania [7]:



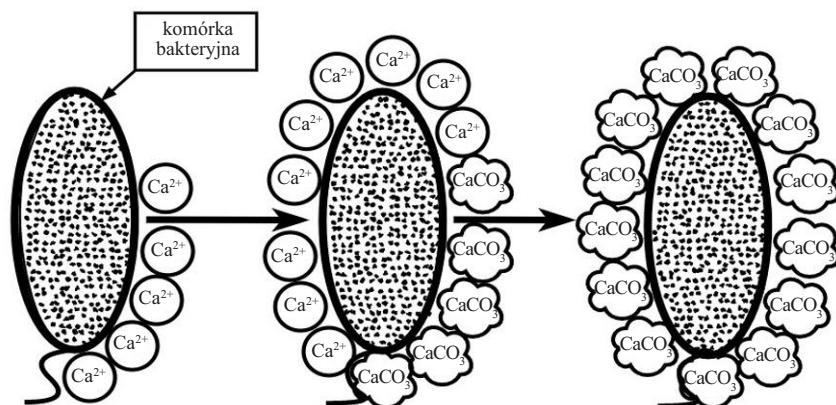
Jest to krystalizacja heterogeniczna, która zachodzi na powierzchni ściany komórkowej bakterii, natomiast homogeniczna w sąsiadującym roztworze, bez udziału faz obcych. Schemat procesu krystalizacji heterogenicznej kalcytu pokazano na rysunku 1.

Istnieje wiele metod otrzymywania węglańca wapnia na drodze mikrobiologicznej. Wytrącenie kalcytu (CaCO_3) wymaga bakterii ureolitycznych, które rozkładają mocznik w pożywe hodowlanej oraz jonów Ca^{2+} (w postaci roztworu wodnego). Hodowlę bakterii i roztwór soli wapnia można aplikować przez wstrzykiwanie lub nanieść na powierzchnię, co

skutkuje natychmiastowym wytrąceniem kryształów na powierzchni materiału. Wiele bakterii rozkładających mocznik wzbudza zainteresowanie możliwością wykorzystania ich właściwości w budownictwie. Modelowymi drobnoustrojami są laseczki Gram-dodatnie z gatunku *Sporosarcina pasteurii*. Są to niechorobotwórcze, środowiskowe bakterie występujące w glebie, intensywnie wytwarzające ureazę i preferujące zasadowe pH otoczenia [9]. Proces wytrącania kalcytu opisuje następujące równanie:



Istnieje wiele możliwości zastosowania wytrącania kalcytu w budownictwie. Precypitacja CaCO_3 może być wykorzystana do oczyszczania wód, wzmacniania i konsolidacji gruntu, a także w celach ochronnych i renowacyjnych obiektów budowlanych. Wymienić można także wykorzystanie metody MICP do intensyfikacji wydobywania ropy naftowej, składowania (wychwytywania) CO_2 , czy też w geotechnice (np. konsolidacja i wzmacnianie gruntu). Mikrobiologiczne wytrącanie kalcytu coraz częściej stosowane jest w materiałach budowlanych, przede wszystkim w betonie (ang. *bacteria-based concrete*). Technologia umożliwia poprawę właściwości wytrzymałościowych, hydrofobowych oraz trwałości elementów budowlanych. Prowadzone są również badania nad rozwiązaniami samoczynnej lub autonomicznej naprawy powierzchniowej elementów budowlanych – przykład mogą stanowić prace nad samonaprawiającym się betonem (ang. *self-healing concrete*) [10].



Rys. 1. Schemat procesu krystalizacji węglańca wapnia na powierzchni komórki (opracowanie własne)

Fig. 1. Schema of calcium carbonate crystallization on the cell surface (own studies)

Analiza eksperymentalna

W celu porównania skuteczności różnych warunków hodowli bakterii i metod prowadzenia bioprecypitacji sporządzono próbki zaprawy cementowej, a następnie poddano je powierzchniowemu wytrącaniu kalcytu. Do tego celu zaprojektowano i zastosowano trzy różne procedury wytrącania CaCO_3 . Przeprowadzono analizę podciągania kapilarnego wody w celu wyznaczenia współczynnika absorpcji (C). Dodatkowo zbadano mikrostrukturę zaczynu cementowego w przypadku każdego zastosowanego wariantu wytrącania węglańca wapnia (5 lub 10 cykli MICP). Analizowano również materiał referencyjny, który nie został poddany procesowi powierzchniowego wytrącania kalcytu. Badania przeprowadzono w przypadku zaczynu i zaprawy cementowej o wskaźniku wodno-cementowym 0,5, wykonanych na bazie cementu portlandzkiego CEM I 42,5R. Zastosowane spoiwo spełnia wymagania normy PN-EN 197-1 [11] dotyczące wytrzymałości normowej. Do przygotowania zapraw użyto piasku rzeczno-glinianego. Próbkę zaprawy cementowej sporządzono zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 196-1 [12], a próbkę zaczynu w następujący sposób: po zasypaniu wody spoiwem masę mieszano przez 2 min z prędkością 1600 obrotów na minutę (ang. *rotations per minute; rpm*). Następnie świeży zaczyn umieszczono w niewielkich cylindrycznych formach z PVC, pięciokrotnie je wstrząsnęto w celu zagęszczenia mieszanki i szczelnie zamknięto. Próbkę z zaprawy rozformowano po 24 h. Następnie kondycjonowano je przez pół roku, w stałych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych ($T = 20^\circ\text{C}$, $\text{RH} = 50\%$). Wymiary badanych próbek to, w przypadku zaprawy cementowej, połowa beleczki prostopadłościowej o wymiarach 40 x 40 x 80 mm, a zaczynu cementowego – próbki cylindryczne o średnicy 20 mm i wysokości 2 mm. Dodatkowo sporządzono normowe próbki zaprawy cementowej, na których kontrolnie oznaczono wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania w wodzie. Procedury MICP przeprowadzono w temperaturze pokojowej, z użyciem szczepu typowego *Sporosarcina pasteurii* DSM33 z Niemieckiej Kolekcji

Mikroorganizmów (*Deutsche Sammlung von Mikroorganismen*), w następujących wariantach:

- **wariant 1** (hodowla na bogatej pożywce). Wykorzystano podłoże TSB (bulion tryptozowo-sojowy 30 g/l) z dodatkiem 2% mocznika [13]. Pożywkę inokulowano hodowlą szczepu *S. pasteurii* na podłożu TSB z dodatkiem 2% mocznika w stosunku objętościowym inokulatu do pożywki 1 : 100 i inkubowano w temperaturze pokojowej przez 72 h. Otrzymana w ten sposób hodowla zawierała ok. 12×10^8 komórek/ml, a także produkty rozkładu mocznika i miała alkaliczne pH. Pojedynczy cykl MICP obejmował inkubację próbek zanurzonych w tej hodowli przez minimum dobę, następnie lekkie osuszenie próbek na ligninie i dalszą inkubację po zanurzeniu próbek w wodnym roztworze 2,5% CaCl_2 przez minimum dobę oraz suszenie na ligninie minimum godzinę;

- **wariant 2** (hodowla na pożywce zubożonej). Wykorzystano podłoże NB (bulion odżywczy wzbogacony 3 g/l) z dodatkiem 1% mocznika [14]. Pożywkę inokulowano i inkubowano jak w wariant 1. Otrzymana w ten sposób hodowla zawierała ok. 6×10^8 komórek/ml, a także produkty rozkładu mocznika i miała alkaliczne pH. Pojedynczy cykl MICP wykonano jak w wariant 1;

- **wariant 3**. Zastosowano podłoże jak w wariant 2, ale uzupełnione jonami wapnia, tj. NB z dodatkiem 1% mocznika i 0,28% CaCl_2 . Wariant ten wykorzystywał więc pożywkę zubożoną z dodatkiem jonów wapnia, inokulowaną biomasą bakterii w momencie rozpoczęcia kolejnego cyklu [15]. Oznacza to, że w czasie rozpoczęcia cyklu mocznik nie był jeszcze rozłożony, pH było obojętne, a bakterie dopiero rozpoczynały swoją aktywność. Pojedynczy cykl MICP obejmował inkubację próbek zanurzonych w inokulowanym biomasą podłożu przez minimum 3 doby (namnożenie bakterii w pożywce, wytrącanie węglanu wapnia) oraz suszenie na ligninie przez minimum godzinę.

Przy każdorazowym zanurzeniu próbek w roztworze powierzchnia cieczy znajdowała się min. 2 cm powyżej powierzchni próbki, w zamkniętych pojemnikach zabezpieczających przed nadmiernym parowaniem i wysychaniem.

Pod względem ekonomicznym najmniej korzystny jest wariant 1. Procedury 2 i 3, ze względu na zastosowanie zubożonej pożywki, wiążą się z mniejszymi kosztami. Jednocześnie wariant 3 jest najdłuższą wśród zaproponowanych procedur, ale nie wymaga naprzemiennego stosowania dwóch płynów (hodowla bakterii, roztwór chlorku wapnia).

Metody badań

Wytrzymałość na ściskanie. Badano referencyjne zaprawy cementowe (niepoddane procesowi mikrobiologicznego wytrącania kalcytu) zgodnie z normą PN-EN 196-1 [12] po 7 i 28 dniach dojrzewania próbek w wodzie.

Podciąganie kapilarne. Wartość współczynnika absorpcji wody (C), wyrażonego w $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$, wyznaczono zgodnie z procedurą opisaną w normie PN-EN 1015-18 [16]. Przed przystąpieniem do badań, boczne powierzchnie próbek prostopadłościennych, o wymiarach $40 \times 40 \times 80$ mm, zaizolowano za pomocą masy silikonowej oraz wysuszono w temperaturze 40°C do stałej masy. W ramach każdego z analizowanych wariantów użyto trzech próbek. Pierwszy pomiar przyrostu masy wykonano po 5 min, natomiast kolejne w odstępie 10 min, aż do upływu pierwszej godziny od zanurzenia próbek w wodzie. Następnie, do upływu sześciu godzin, próbki ważono co godzinę. Ostatni pomiar wykonano po 24 h. Szybkość absorpcji wody wyznaczono jako kąt nachylenia linii regresji między przyrostem masy po 10 i 90 min na jednostkę powierzchni czołowej (powierzchni kontaktu próbek z wodą) i pierwiastkiem kwadratowym z czasów ważenia.

Porozymetria rtęciowa. Badania porowatości wykonano za pomocą porozymetru rtęciowego Autopore IV model 9500, o zakresie badanych średnic 6 nm

do $100 \mu\text{m}$. Objętość rtęci penetrującej pory mierzona jest w funkcji przyłożonego ciśnienia, które jest odwrotnie proporcjonalne do rozmiarów analizowanych porów. Wynik analizy dostarcza globalną informację o wielkości i udziale objętościowym porów połączonych z powierzchnią zewnętrzną materiału.

W przypadku wszystkich metod wytrącania kalcytu (warianty 1, 2 i 3) oraz liczby przyjętych cykli MICP (5 lub 10 cykli) zbadano po dwie próbki zaczynu cementowego. Przed przystąpieniem do badań próbki wysuszono do stałej masy w suszarce próżniowej w temperaturze 30°C . Następnie cylindryczne próbki o grubości 2 mm i średnicy 20 mm pokruszono na mniejsze kawałki. Materiał umieszczony w aparacie ważył ok. 1,5 g. Pomiar rozkładu porowatości w badanej próbce przedstawiono w postaci skumulowanej oraz różniczkowej krzywej rozkładu objętości porów.

Wyniki badań i ich analiza

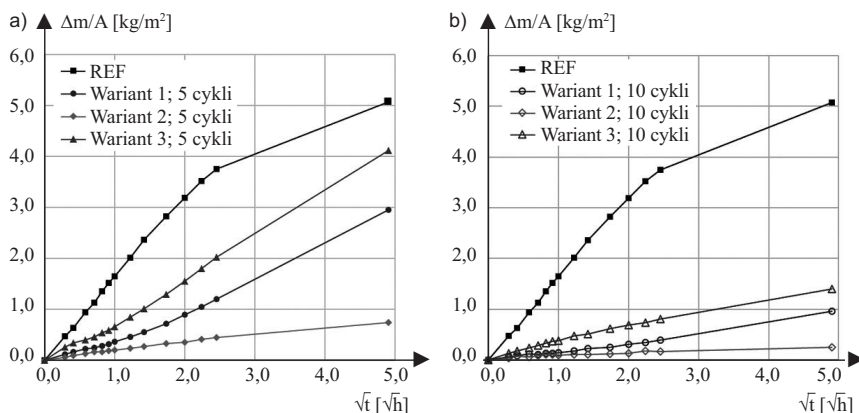
Wytrzymałość na ściskanie. Średnia wytrzymałość na ściskanie po 7 i 28 dniach dojrzewania badanej zaprawy cementowej wynosiła odpowiednio 46,6 i 58,4 MPa (tabela 1). Żaden z wyników nie różnił się o więcej niż 10% od wartości średniej. W związku z tym, że zastosowanie MICP jest wzmocnieniem powierzchniowym, zakłada się, że nie wpływa na wytrzymałość na ściskanie.

Wartość współczynnika absorpcji wody. Na rysunku 2 przedstawiono wpływ warunków hodowli i metody prowadzenia bioprecypitacji na szybkość podciągania kapilarnego wody w analizowanych zaprawach. Uzyskane wyniki średniej wielkości współczynnika absorpcji wody oraz masy zaabsorbowanej po 24 h zamieszczono w tabeli 2. Przedstawione wyniki stanowią średnią z trzech pomiarów. W badaniach zaob-

Tabela 1. Wytrzymałość na ściskanie próbek referencyjnych

Table 1. Compressive strength of reference samples

Oznaczenie próbki	Wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach [MPa]	Średnia wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	Średnia wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]
1.1.	45,2	46,6	59,7	58,4
1.2.	46,8		55,6	
2.1.	48,3		60,1	
2.2.	47,3		57,8	
3.1.	45,5		59,9	
3.2.	46,5		57,2	



Rys. 2. Zestawienie przyrostu masy przypadającego na jednostkę powierzchni próbki w funkcji pierwiastka z czasu prowadzonego badania: a) próbki po 5 cyklach MICP; b) próbki po 10 cyklach MICP

Fig. 2. Comparison of the relation between mass increase per unitary surface area and the square root of time: a) after 5 cycles; b) after 10 cycles of MICP

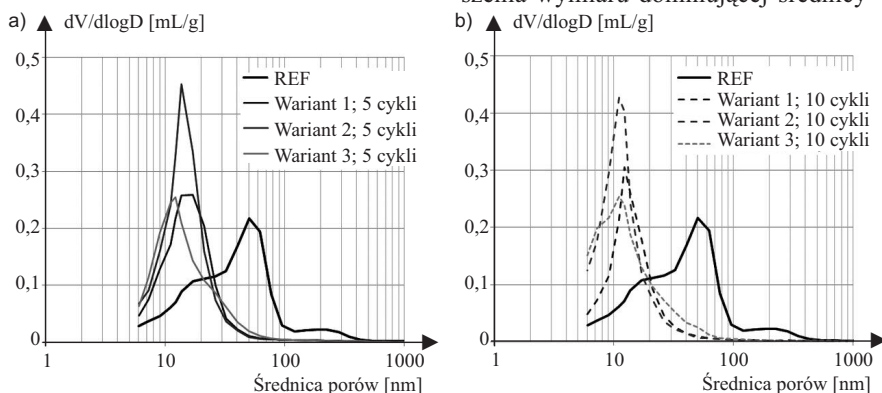
Tabela 2. Współczynnik absorpcji wody (C) oraz masa zaabsorbowanej wody po 24 h (Δm_{24})

Table 2. Water absorption coefficient (C) and cumulative mass absorbed water after 24 hours (Δm_{24})

Oznaczenie	Cykle MICP	C [kg/(m ² ·min ^{0,5})]	Δm_{24} [g]
REF	0	0,219	8,12
Wariant 1	5	0,046	4,72
Wariant 2		0,022	1,18
Wariant 3		0,081	6,59
Wariant 1	10	0,014	1,53
Wariant 2		0,007	0,40
Wariant 3		0,046	2,24

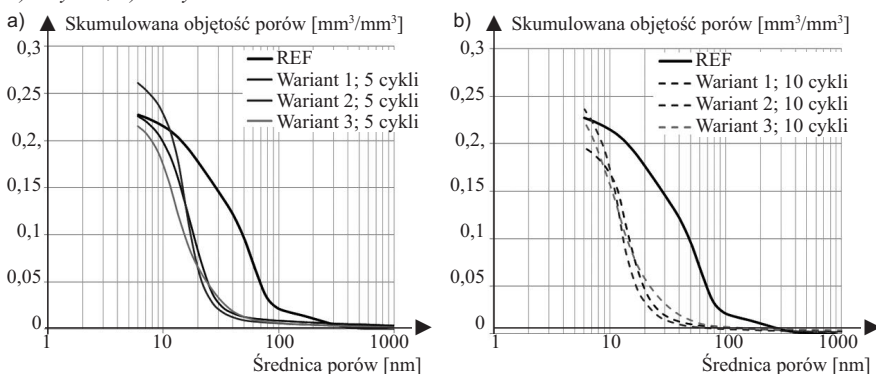
serwowano, że wszystkie zastosowane warianty biomineralizacji, a także liczba wykonanych powtórzeń istotnie ograniczyły szybkość i masę podciągniętej cieczy. Wykonanie już 5 cykli MICP spowodowało zmniejszenie współczynnika absorpcji wody w przypadku wariantów 1, 2 i 3 odpowiednio o 79, 90 i 63%. Największy efekt uszczelnienia powierzchni zewnętrznej badanych zapraw uzyskano w przypadku wariantu 2, zarówno po pięciu, jak i dziesięciu cyklach MICP. Zastosowanie dziesięciu cykli spowodowało zmniejszenie wartości współczynnika absorpcji wody o 79% w przypadku wariantu 3 oraz o ponad 90% przy wariantie 1 (prawie 94%) i 2 (97%) w porównaniu z wartością, jaką uzyskano w przypadku zaprawy niemodyfikowanej (referencyjnej).

Rozkład wielkości porów zaczynu cementowego. Różniczkowy rozkład wielkości porów w przypadku analizowanych wariantów bioprecypitacji w



Rys. 3. Zestawienie rozkładu wielkości porów zaczynu cementowego zależnie od liczby cykli MICP: a) po 5 cyklach; b) po 10 cyklach

Fig. 3. Comparison of pore size for cement paste depending on the number of MICP cycles: a) 5 cycles; b) 10 cycles



Rys. 4. Zestawienie całkowitej objętości porów zaczynu cementowego zależnie od liczby cykli MICP: a) po 5 cyklach; b) po 10 cyklach

Fig. 4. Comparison of cumulative pore volume in cement paste depending on the number of MICP cycles: a) 5 cycles; b) 10 cycles

głanu wapienia przedstawiono na rysunku 3, natomiast skumulowany na rysunku 4. Prezentowane wyniki stanowią średnią z trzech pomiarów. Struktura wewnętrzna referencyjnego zaczynu cementowego charakteryzowała się jednomodalnym rozkładem wielkości porów, dla której wartość dominującej średnicy

porów wyniosła 50 nm. Wszystkie zastosowane warianty biomineralizacji nie zmniejszyły wyraźnie całkowitej porowatości materiału, ale miały bardzo istotny wpływ na rozkład wielkości porów w analizowanym zaczynie cementowym. Na rysunku 3a i b widoczne jest wyraźne przesunięcie dominującej średnicy porów w stronę mniejszych rozmiarów (do 15 nm). Ponadto w wariantie 2 odnotowano dwukrotny wzrost zawartości porów o średnicy 15 nm względem wariantów 1 i 3. Przeprowadzone badanie wykazało zmniejszenie zawartości porów o średnicy 30 – 100 nm przy jednoczesnym zwiększeniu zawartości pustek o średnicy do 20 nm. Skutkiem zmniejszenia wymiaru dominującej średnicy

porów jest znaczny spadek szybkości

wnikania wody w wyniku podciągania kapilarnego. Taki zabieg korzystnie wpływa na trwałość materiałów na bazie cementu. Woda wypełniająca mniejsze pory zamarza w niższej temperaturze, np. średnica 20 nm odpowiada temperaturze zamarzania poniżej -30°C [16].



CANASTOL – Water under Control

- kompletny hydrofobizator do systemów mineralnych,
- prosty w dozowaniu,
- sprawdzony w działaniu



Rettenmaier Polska
 Sp. z o.o.
 Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B
 02-366 Warszawa
 mobile +48 600 423 423
 Tel + 48 22 608 51 00
 e-mail: arbolcel@jrs.pl

Podsumowanie

Uzyskane wyniki wskazują, że każda z analizowanych procedur wytrącania kalcytu prowadziła do wyraźnej poprawy właściwości badanych materiałów na bazie cementu. Najkorzystniejsze wyniki, tzn. najniższy współczynnik absorpcji wodnej oraz najszczelniejszą strukturę, zaobserwowano w przypadku wariantu 2 wytrącania. Zakłada on wykorzystanie podłoża zubożonego, tzn. o mniejszej zawartości substancji odżywczych, w tym mocznika. Tak więc zastosowanie wariantu 2 pozwala na osiągnięcie najlepszych rezultatów przy zdecydowanie mniejszych kosztach zastosowania MICP w porównaniu z wariantem 1, który wykorzystuje pożywkę bogatszą.

Najmniejszą poprawę właściwości badanych materiałów w wyniku bioprecypitacji węglanu wapnia uzyskano, stosując wariant 3, który charakteryzuje się mniejszym kosztem procedury MICP oraz jest rozwiązaniem prostszym (bardziej praktycznym) w zastosowaniu (w przypadku wariantów 1 oraz 2 konieczna jest określona sekwencja aplikacji). Być może użycie znacznie większej ilości biomasy bakteryjnej do inokulacji pożywki stosowanej w wariantcie 3 zwiększyłoby jego skuteczność. W wariantcie 2 już po pięciu cyklach osiągnięto znaczne uszczelnienie próbek, natomiast podwojenie liczby cykli MICP dało lepsze wyniki szczególnie w wariantach 1 oraz 3.

Opisane wyniki wstępnych badań wyraźnie wskazują korzyści wynikające z zastosowania procedury MICP do konserwacji powierzchni betonowych. Planowane są dalsze badania, dzięki którym możliwe będzie opracowanie najkorzystniejszych warunków zastosowania MICP do regeneracji betonu pod względem łatwości aplikacji, a także zwiększenia skuteczności i wydajności procesu przy jednoczesnym obniżeniu kosztów. Zweryfikowany zostanie również korzystny wpływ MICP na trwałość i odporność kompozytów cementowych na czynniki korozyjne, m.in. oddziaływanie mrozu oraz zwiększonego stężenia CO₂.

Literatura

[1] Mostert C, Sameer H, Glanz D, Bringezu S. Climate and resource footprint assessment and

visualization of recycled concrete for circular economy. *Resour. Conserv. Recycl.* 2021; <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105767>.

[2] Nodehi M, Mohamad Taghvae V. Sustainable concrete for circular economy: a review on use of waste glass. *Glass Struct. Eng.* 2021; <https://doi.org/10.1007/s40940-021-00155-9>.

[3] Al-Hamrani A, Kucukvar M, Alnahhal W, Mahdi E, Onat NC. Green Concrete for a Circular Economy: A Review on Sustainability, Durability, and Structural Properties. *Materials.* 2021; <https://doi.org/10.3390/ma14020351>.

[4] Tang L, Petersson PE. Slab test: Freeze/thaw resistance of concrete – Internal deterioration. *Mat. Struct.* 2004; <https://doi.org/10.1007/BF02480522>.

[5] Vries de J, Polder RB. Hydrophobic treatment of concrete. *Constr. Build. Mater.* 1997; [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00046-9](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00046-9).

[6] Koniorczyk M, Gawin D, Bednarska D. Modeling damage of building materials induced by sodium sulphate crystallization. *Bauphysik.* 2016; <https://doi.org/10.1002/bapi.201610041>.

[7] Krajewska B. Urease-aided calcium carbonate mineralization for engineering applications: A review. *J. Adv. Res.* 2018; <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.10.009>.

[8] Ghosh P, Mandal S, Chattopadhyay BD, Pal S. Use of microorganism to improve the strength of cement mortar. *Cem. Concr. Res.* 2005; <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.005>.

[9] Seifan M, Berenjian A. Microbially induced calcium carbonate precipitation: a widespread phenomenon in the biological world. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2019; <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09861-5>.

[10] Vijay K, Murmu M, Deo SV. Bacteria based self healing concrete – A review. *Constr. Build. Mater.* 2017; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040>.

[11] PN-EN 197-1:2012 Cement. Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.

[12] PN-EN 196-1:2016-07 Metody badania cementu. Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.

[13] Ma L, Pang AP, Luo Y, Lu X, Lin F. Beneficial factors for biomineralization by ureolytic bacterium *Sporosarcina pasteurii*. *Microb. Cell Fact.* 2020; <https://doi.org/10.1186/s12934-020-1281-z>.

[14] De Muynck W, Debrouwer D, De Belie N, Verstraete W. *Cem. Concr. Res.* 2008; <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.005>.

[15] Ghosh T, Bhaduri S, Montemagno C, Kumar A. *Sporosarcina pasteurii* can form nanoscale calcium carbonate crystals on cell surface. *PLoS ONE* 2019; <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210339>.

[16] PN-EN 1015-18 Metody badań zapraw do murów. Część 18: Określenie współczynnika absorpcji wody spowodowanej podciąganiem kapilarnym stwardniałej zaprawy.

[17] Koniorczyk M, Bednarska D, Wiczorek A, Maniukiewicz W. The single freezing episode of early-age cementitious composites: Threshold properties of cement matrix ensuring the frost resistance. *Con. Build. Mat.* 2020; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122319>.

Przyjęto do druku: 04.07.2022 r.