

DARIA JÓZWIAK - NIEDŹWIEDZKA¹⁾

ZAPOBIEGANIE ŁUSZCZENIU POWIERZCHNI BETONOWYCH PRZY UŻYCIU NAWILŻONEGO KRUSZYWA LEKKIEGO Cz. I – Stan wiedzy

STRESZCZENIE. W pracy naszkicowano aktualny stan wiedzy na temat mechanizmów, powodujących powierzchniowe łuszczenie betonów. Uzupełniając opis zjawisk powierzchniowych przytoczono również podstawowe hipotezy, dotyczące wewnętrznej destrukcji betonu, spowodowanej działaniem mrozu, a także przedstawiono podstawy koncepcji zastosowania „inteligentnego” materiału, tj. nawilżonych drobnych frakcji kruszywa lekkiego jako alternatywy w stosunku do tradycyjnych środków napowietrzających. Ponadto, opisano rodzaje porów występujących w betonie oraz sposób ich wypełnienia przez wodę.

1. WSTĘP

Zapewnienie trwałości konstrukcji budowlanych w warunkach agresywności środowiska jest zagadnieniem ciągle aktualnym i nierozwiązanym. Jedną z głównych przyczyn powodujących niszczenie obiektów betonowych jest brak odporności betonu na cykliczne działanie mrozu. Niszczenie powierzchni betonowych spowodowane zamrażaniem i odmrażaniem w obecności środków odładzających, a także późniejsza postępująca degradacja konstrukcji są zjawiskami powszechnymi. Uszkodzenia powierzchni betonowych występują w wielu obiektach inżynierskich, narażonych na oddziaływania klimatyczne w Polsce i w innych krajach w tym regionie.

¹⁾ dr inż. – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

Wykorzystywane w budownictwie metody badania mrozoodporności dotyczą głównie wewnętrznego pęknięcia materiału, natomiast mechanizmy powierzchniowego niszczenia nie są dostatecznie poznane. Zrozumienie przyczyn powodujących niszczenie powierzchni betonowych jest niezbędne do projektowania i wykonania betonu odpornego na agresję środowiska. Wymaga to znajomości wpływu poszczególnych składników mieszanki betonowej, sposobu betonowania i oddziaływań zewnętrznych. W konstrukcjach betonowych, zwłaszcza w budownictwie drogowym i mostowym, a także w konstrukcjach hydrotechnicznych i innych, interesujące jest znalezienie alternatywy w stosunku do domieszek napowietrzających przede wszystkim z uwagi na trudności technologiczne przy skutecznym ich stosowaniu. Ważne jest również opracowanie metody badawczej, która najlepiej odwzorowuje warunki agresji środowiska, a zarazem jest stosunkowo łatwa i tania w zastosowaniu.

Dotychczas w Polsce systematyczne badania zjawiska łuszczenia były podejmowane w wąskim zakresie, natomiast prace przeprowadzane w ośrodkach zagranicznych (kraje skandynawskie i Kanada) dotyczyły głównie możliwości uniknięcia zastosowania domieszki napowietrzającej w betonach mrozoodpornych. W artykule przedstawiono propozycję dodania do mieszanki betonowej nawilżonych drobnych frakcji kruszywa lekkiego (LWA, *ang. lightweight aggregate*) oraz opisano stan wiedzy na temat mechanizmów powodujących powierzchniowe łuszczenie betonów.

2. ZAMARZANIE WODY W BETONIE

Woda w materiale porowatym przemieszcza się zarówno jako faza gazowa, jak i ciekła. Wzajemne proporcje tych faz zależą od warunków wysychania materiału (zaczynu, zaprawy, betonu), jego struktury, wilgotności i temperatury oraz wymiarów elementu. W materiałach porowatych, takich jak beton, woda zachowuje się zależnie od stopnia wypełnienia porów powietrznych oraz od ich wielkości. Na potrzeby analizy niszczącego działania mrozu przyjęto dwa rodzaje przepływów w zależności od fazy, w jakiej występuje woda (gazowa czy ciekła): dyfuzję pary wodnej i przepływ kapilarny wody, określając mianem dyfuzji zjawiska transportu pary wodnej, a mianem przewodnictwa kapilarnego - transport w porach materiału wody ciekłej.

W betonie woda znajduje się w układzie porów połączonych, o zróżnicowanym kształcie i różnej budowie powierzchni, podlegając ich oddziaływaniu. Rozmiary porów w matrycy cementowej zmieniają się w szerokim zakresie i większość porów jest dostępna dla wody. Od porowatości betonu zależy jego przepuszczalność, a przez to trwałość. Jednak nie łączna porowatość (objętość wolnych przestrzeni), ale rozkład porów, ich rozmiary i ciągłość wpływają na przepuszczalność i trwałość zaczynu cementowego i betonu. W betonie występują różne rodzaje porów, które można klasyfikować np. według rozmiarów i przyczyn powstawania (tabl. 1). Układ porów w zaczynie cementowym jest rezultatem procesów zachodzących podczas hydratacji cementu i twardnienia betonu i zależy od współczynnika w/c , proporcji składników, sposobu mieszania i zagęszczania oraz warunków dojrzewania betonu. Pory są przeważnie częściowo lub całkowicie wypełnione wodą.

Tablica 1. Klasyfikacja porów w zacynie cementowym wg rozmiarów i przyczyn powstawania, Brandt [1]
 Table 1. Classification of pores in cement paste according to their size and formation, Brandt [1]

Klasyfikacja	Rozmiary	Metody badania	Przyczyny powstania	Znaczenie
Duże pory	> 500 μm	Mikroskopia optyczna	Sztuczne napowietrzanie, albo niedostateczne zagęszczenie lub brak właściwej pielęgnacji, nadmiar wody zarobowej	Zmniejszają wytrzymałość
Pory wprowadzone w wyniku działania środka napowietrzającego	(50 ÷ 1 250) μm zwykle < 500 μm	Mikroskopia optyczna	Sztuczne napowietrzanie	Nieco zmniejszona wytrzymałość, podwyższona odporność na cykliczne zamrażanie i odmrażanie
Pory kapilarne				
Makropory	> 50 nm	Porozymetria rtęciowa	Pozostałości przestrzeni wypełnionych wodą w zacynie	Decydują o przepuszczalności i trwałości
Mezopory	(2,5 ÷ 50) nm	Porozymetria rtęciowa, adsorpcja - desorpcja gazów	Pozostałości przestrzeni wypełnionych wodą, mniejsze pory rozmieszczono w C-S-H	Zjawiska kapilarne powodują naprężenia podczas wysychania betonu
Mikropory pory żelowe	< 2,5 nm	Adsorpcja - desorpcja gazów	Rozmieszczono w C-S-H	Zjawiska kapilarne mogą występować podczas nawilżania i wysychania

Związek między mrozoodpornością a strukturą porowatości stwardniałego zaczynu cementowego przyjęto określać wskaźnikiem rozmieszczenia porów powietrznych (ang. *spacing factor*), interpretowanym jako parametr powiązany z maksymalną odległością przypadkowego punktu w zaczynie cementowym do brzegu najbliższego pora, Powers [2]. Maksymalna odległość transportu wody jest równa połowie maksymalnej odległości między danymi porami i może być obliczana ze wzorów (1) lub (2):

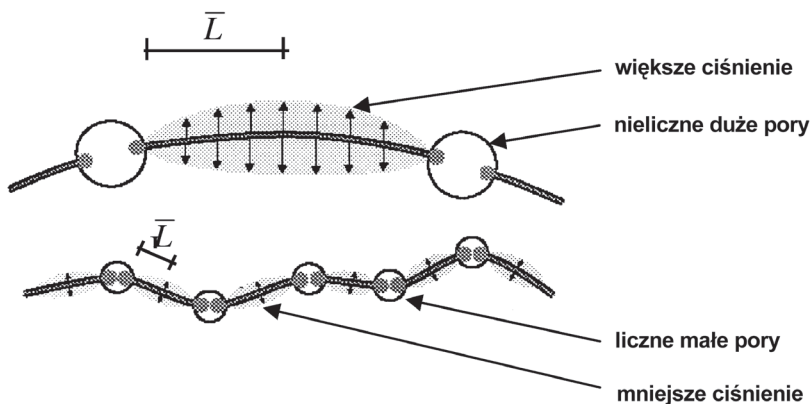
$$\bar{L} = \frac{P_z}{400 n} , \quad \text{gdy } \frac{P_z}{A} \leq 4,342 , \quad (1)$$

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1,4 \left(\frac{P_z}{A} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] , \quad \text{gdy } \frac{P_z}{A} > 4,342 , \quad (2)$$

gdzie:

- \bar{L} – wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych w [mm],
- p_z – procentowa zawartość zaczynu cementowego w betonie [%],
- n – średnia liczba porów przypadająca na jednostkę długości linii pomiarowej,
- A – całkowita zawartość powietrza w [%],
- α – powierzchnia właściwa porów powietrznych w [mm⁻¹]

Według tej hipotezy, im mniejsza jest odległość między pęcherzykami powietrza, tym większa jest odporność betonu na działanie mrozu (rys. 1).



Rys.1. Schemat działania w betonie porów o różnych średnicach i różnym rozstawie, podczas zamarzania wody, Krenkler [3]

Fig.1. Scheme of concrete air-voids differ from their diameters and distance, Krenkler [3]

Wskaźnik rozmieszczenia porów powietrznych \bar{L} powinien być mniejszy od 0,25 mm (0,20 mm przy oddziaływaniu środków rozmrażających), jeżeli napowietrzenie ma w istotnej mierze zwiększać odporność betonu na cykliczne zamrażanie i odmrażanie, Powers [2]. Zależności \bar{L} od stosunku wodno-cementowego oraz sugerowaną liczbę cykli przy badaniu mrozoodporności lub odporności na powierzchniowe łuszczenie w betonach wysokowartościowych podaje np. Aitcin [4].

Innymi parametrami charakteryzującymi strukturę porów w betonie, oprócz całkowitej porowatości i wskaźnika \bar{L} są: powierzchnia właściwa układu porów powietrznych α oraz zawartość mikroporów A_{300} . Powierzchnia właściwa przedstawia wynik podzielenia całkowitej powierzchni porów powietrznych przez ich objętość i jest wyrażona w $\text{mm}^2/\text{mm}^3 = \text{mm}^{-1}$. Parametr A_{300} określa zawartość powietrza w porach powietrznych o średnicy 300 μm lub mniejszej, które uznaje się za najbardziej skuteczne w ochronie przeciw uszkodzeniu betonu podczas cykli zamrażania i odmrażania. Wyniki badania powyższych parametrów będą przedstawione w II części artykułu, w części badawczej.

3. PODSTAWOWE HIPOTEZY DESTRUKCJI MROZOWEJ

Oddziaływanie ujemnej temperatury nie jest szkodliwe dla żadnej postaci betonu (mieszanka betonowa, młody lub dojrzały beton). Zachodzące w nim reakcje chemiczne przebiegają wolniej w niskiej temperaturze lub zostają zupełnie zahamowane. Szkodliwe są natomiast fizyczne procesy, związane z tworzeniem się lodu, ciśnieniem hydraulicznym i transportem wody. Powodują one mechaniczne uszkodzenie lub nawet całkowite zniszczenie struktury betonu. Szkodliwość fizycznego oddziaływania mrozu zależy od stopnia dojrzałości betonu, jego mikrostruktury, od stopnia zawilgocenia oraz od prędkości i powtarzalności temperatury (długotrwałe, krótkotrwałe, cykliczne).

Istnieje kilka hipotez odnoszących się do mechanizmów mrozowego niszczenia betonu. Przeglądu takich hipotez dokonali m.in. Marchand et al [5] i Pigeon [6]. Najprostszy mechanizm uszkodzeń spowodowanych działaniem mrozu jest często porównywany do „mechanizmu zamkniętego pojemnika” (ang. *closed container theory*). Opisuje on w prosty sposób fakt, że objętość właściwa lodu jest większa niż objętość wody i w ten sposób, jeśli zamknięty zbiornik zawiera dostateczną ilość wody, to przejściu fazowemu wody w lód odpowiada wzrost ciśnienia. Ponieważ objętość właściwa lodu jest o 9,3 % większa od objętości wody, ciśnienie będzie wzrastać, jeśli początkowo ponad 91,7% objętości zbiornika będzie wypełnione wodą. Przy temperaturze -1°C ciśnienie osiągnie ok. 10 MPa, więc wzrośnie wystarczająco, aby uszkodzić porowate i kruche struktury materiałów budowlanych, o niewielkiej wytrzymałości na rozciąganie.

Za prekursora badań destrukcji mrozowej betonu powszechnie uważany jest Powers, który w 1945 r. zauważył [7], że główną przyczyną niszczenia nie jest ciśnienie lodu jako takie, ale raczej ciśnienie hydrauliczne, które wzrasta podczas tworzenia się lodu, kiedy woda jest usuwana z porów, w których zamarzanie miało miejsce. Ta hipoteza przyjęła nazwę „hipotezy ciśnienia hydraulicznego”. Ciśnienie hydrauliczne

w systemie porów w ogólności jest funkcją prędkości formowania się lodu, szybkości spadku temperatury, układu i kształtu porów i związanych z tym oporów przepływu wody. Teoria dotyczy przede wszystkim betonów mało przepuszczalnych, dobrze zagęszczonych, o niskiej porowatości. Naprężeniom w betonie spowodowanym zwiększeniem się objętości zamarzającej wody, towarzyszą koncentracje naprężeń spowodowane niejednorodnością betonu. Występują one przy każdej zmianie temperatury, bowiem kruszywo i zaczyn lub zaprawa są ciałami mającymi inne właściwości termiczne.

Hipoteza ciśnienia hydraulicznego nie wyjaśnia zjawisk związanych z uszkodzeniem betonu spowodowanym działaniem ujemnej temperatury. Na przykład, jeśli ciśnienie hydrauliczne powoduje rozszerzanie się próbek podczas zamrażania, to rozszerzanie powinno zmniejszać się, gdy zamrażanie, a co za tym idzie tworzenie się lodu, ustaje. Z dostępnych publikacji wynika, że takie badania nigdy nie były przeprowadzone. Może tu zaproponować proste wyjaśnienie: jeśli ciśnienie hydrauliczne było zdolne do spowodowania rozszerzania próbki, to mogło uszkodzić do pewnego stopnia strukturę betonu tak, że próbka nie mogła powrócić do pierwotnych wymiarów. Na rozbieżność teorii z obserwacjami wskazuje także fakt, że po zamarznięciu wody i początkowej ekspansji próbki napowietrzonego zaczynu cementowego przy dalszym jego ochładzaniu można zaobserwować skurcz [8].

W 1953 r. Powers i Helmuth [9] zaproponowali inną hipotezę, tzw. teorię ciśnienia osmotycznego. Zaobserwowali, że próbki zaczynów cementowych nienapowietrzonych mogą rozszerzać się podczas ochładzania i utrzymywać ten stan przy działaniu stałej, ujemnej temperatury, podczas gdy próbki napowietrzonych zapraw kurczą się. Zjawisko to nie było możliwe do wytłumaczenia za pomocą teorii ciśnienia hydraulicznego. Powers i Helmuth tłumaczyli takie zachowanie za pomocą mechanizmu później określanego w języku angielskim jako „*osmotic micro ice body growth*”.

Zgodnie z hipotezą ciśnienia osmotycznego zamarzanie zaczyna się w większych porach – kapilarach, a w miarę obniżania temperatury ciśnienie wzrasta w mniejszych porach. W danej temperaturze w porach kapilarnych występuje równowaga pomiędzy ilością lodu i wody. Po przejściu pewnej ilości wody w lód, stężenie pozostałego roztworu wzrasta i jest na tyle duże, że bez obniżenia temperatury dalsza zmiana wody w lód nie zachodzi. Powstaje różnica w stężeniu roztworu w małych porach, która wywołuje ciśnienie osmotyczne, ponieważ roztwór dąży do wyrównania stężeń dyfunduje z mniejszych do większych porów, o większej koncentracji roztworu [8].

Wymienione hipotezy uzależniają powstałe uszkodzenia mrozowe od warunków nierównowagi, spowodowanej przez spadek temperatury poniżej punktu zamarzania wolnej wody, przez generowanie ciśnienia wewnętrznego w zaczynie cementowym.

Wszystkie powstałe później hipotezy dotyczące niszczącego działania cyklicznego zamrażania na strukturę betonu w większym lub mniejszym stopniu oparte są na jednej z trzech wyżej wymienionych teorii. Inną hipotezę podał Litvan: hipoteza „ciśnienia desorpcyjnego wody” [10-12], Setzer – ang. „*micro ice lens pump*” [13] oraz zaproponowany przez Fagerlunda [14] „krytyczny stopień nasycenia”.

Litvan wyprowadził hipotezę ciśnienia desorpcyjnego wody z założenia, że woda w porach materiału nasączonego wodą jest niezdolna do krystalizacji bez jej przemieszczenia. Pod tym względem ta hipoteza jest rozwinięciem hipotezy hydraulicznej Powersa. Według Litvana obniżenie temperatury powoduje różnicę ciśnień pary w porach kapilarnych i wykryszalowanego lodu już na powierzchni zewnętrznej próbki, bądź w szczelinach, pęknięciach lub dużych porach powietrznych niewypełnionych całkowicie wodą. Wyrównanie ciśnienia może nastąpić bądź przez krystalizację wody w porach, co według Litvana jest niemożliwe, bądź przez jej przemieszczenie do miejsc, gdzie może ona zamarznąć, co się właśnie odbywa. Jeżeli ilość przemieszczającej się wody jest większa niż możliwość porów do jej transportu, to następuje niszczenie materiału.

Podstawę mechanizmu „*micro ice lens pump*” opisanego przez Setzera [19], stanowi stwierdzenie, że proces pęknięcia zmęczeniowego nie jest główną przyczyną mrozowego niszczenia betonu, lecz raczej zjawisko sztucznego nasycania betonu spowodowane przez cykliczne zamrażanie i odmrażanie. Zachodzi skurczenie materiału podczas zamrażania i rozszerzanie się podczas odmrażania, połączone z pobraniem wody z zewnątrz, jeśli jest dostępna. Gdy z powodu powyższego zjawiska krytyczny stopień nasycenia jest przekroczony, to wtedy inne mechanizmy zniszczenia stają się aktywne. Współistnienie równowagi termodynamicznej trzech faz w porowatym materiale w szerokim zakresie temperatur oraz krucha matryca są założeniami modelu „*micro ice lens*”.

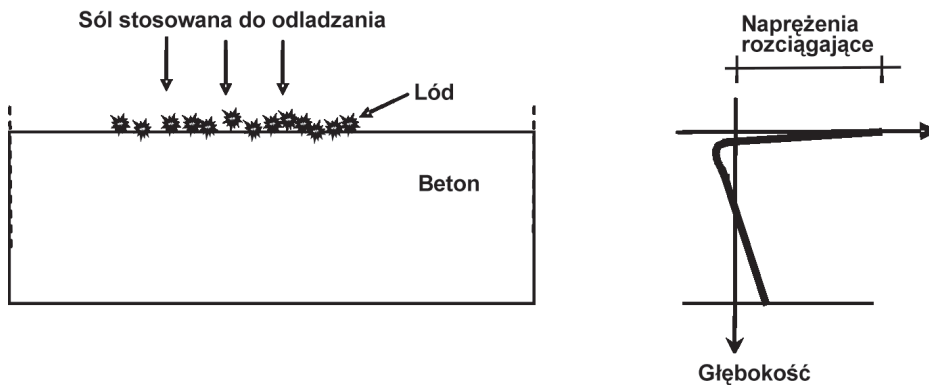
Na podstawie teorii Powersa, Fagerlund zaproponował teorię niszczenia mrozowego opartą na pojęciu krytycznego stopnia nasycenia. Poddając zamrażaniu próbki tego samego betonu, ale o różnym zawilgoceniu, można określić krytyczny poziom zawilgocenia. Powyżej tej wartości beton będzie ulegać widocznym uszkodzeniom w wyniku cyklicznego zamrażania i odmrażania, poniżej – pozostanie nienaruszony. Fagerlund ustalił w wyniku badań [14], że w zwykłych betonach zakres krytycznego stopnia nasycenia wynosi od 0,75 do 0,90. Wzrost zawartości porów powietrznych występuje przy niższych wartościach krytycznego stopnia nasycenia.

Mechanizm ciśnienia osmotycznego w połączeniu z mechanizmem ciśnienia hydraulicznego lub z prostszym mechanizmem tzw. zamkniętego pojemnika tłumaczy ogólnie zjawisko niszczenia wewnętrznej struktury betonu spowodowane zamrażaniem i rozmrażaniem betonu. Takie uproszczone mechanizmy przyjmowane są jako podstawa zaleceń i norm, dotyczących ochrony konstrukcji przed zniszczeniem pod działaniem mrozu.

4. ZJAWISKO ŁUSZCZENIA POWIERZCHNI BETONOWYCH

Zjawisko łuszczenia powierzchni betonowych (ang. *scaling*) w obecności środków odladzających nie jest jeszcze do końca poznane, chociaż zostało już zaobserwowane w latach dwudziestych XX wieku. Wiele czynników powoduje, że zjawisko to różni się od objętościowego niszczenia struktury betonu. Do najważniejszych z nich zalicza się [9, 15 – 17]:

- szok termiczny (rys. 2) spowodowany różnicą temperatury betonu i lodu, podanych działaniu soli odladzających,
- stężenie soli i jej wpływ na proces zamarzania wody (rys. 3),
- różnicę w temperaturze zamarzania wody w porach betonu z i bez roztworu soli, (rys. 3, 4),
- różnice w składzie i strukturze warstwy powierzchniowej betonu i jego wnętrza,
- dużo silniejsze oddziaływania warunków zewnętrznych i naprężeń na powierzchnię betonu niż we jego wnętrzu,
- ciśnienie osmotyczne w wyniku różnic między stężeniem soli w roztworze w warstwie powierzchniowej i głębszych warstwach betonu,
- wpływ środków odladzających na rozpuszczalność wodorotlenku wapnia, który ma większą rozpuszczalność w roztworze chlorków niż w wodzie.

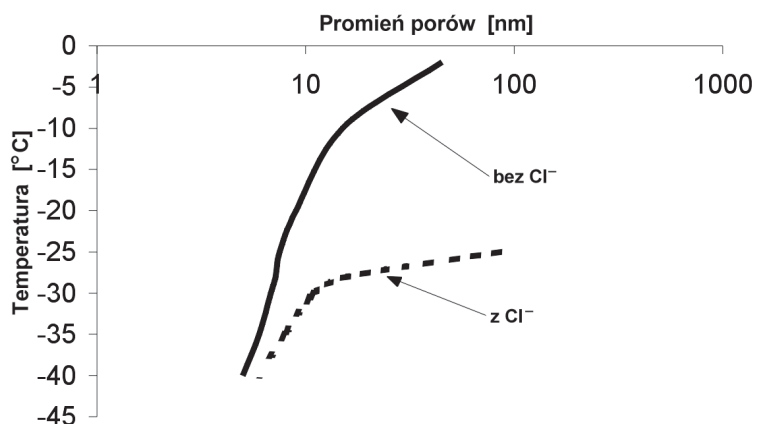


Rys.2. Efekt działania środków odladzających na rozkład temperatury nawierzchni betonowej – szok termiczny, CEB [16]

Fig.2. The effect of the de-icing agents on the temperature distribution for the concrete surface – the thermal shock, CEB [16]

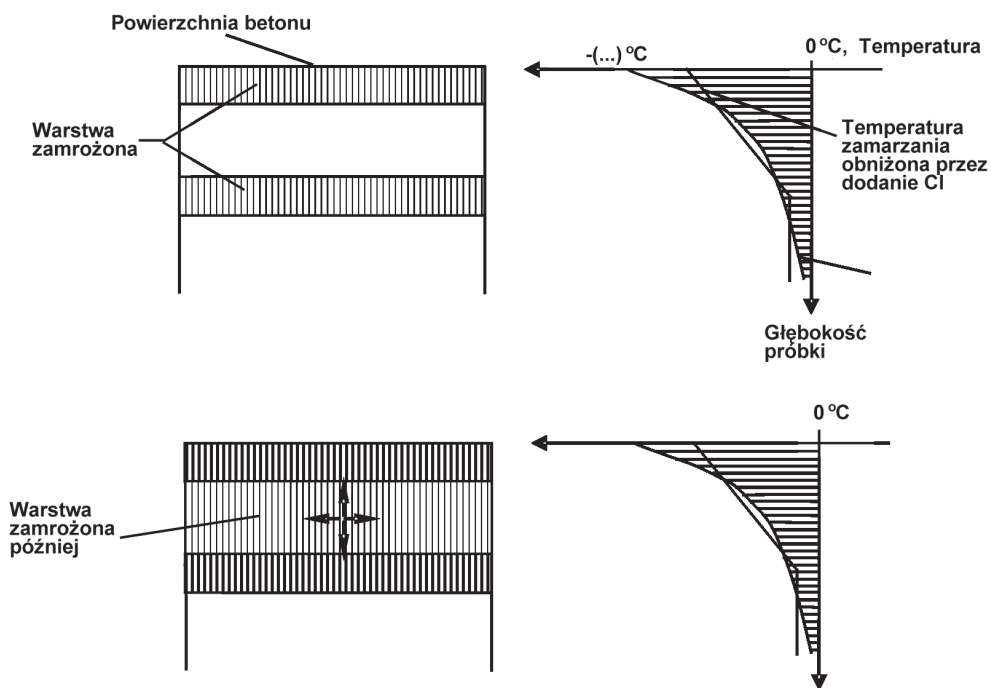
Pierwsze badania mające na celu dokładniejsze poznanie zjawiska powierzchniowego łuszczenia konstrukcji betonowych spowodowane działaniem soli odladzających przeprowadzili Arnfelt [18] oraz Verbeck i Klieger [19]. Wprawdzie nie wyjaśnili oni mechanizmów powodujących łuszczenie, ale stwierdzili, że jest to głównie proces fizyczny oraz, że relatywnie niskie stężenie soli (od 2% do 4% masowo) powoduje największe ubytki masy (rys. 5).

Według Fagerlunda [20], niszczenie powierzchni betonu jest spowodowane działaniem zarówno ciśnienia hydraulicznego jak i osmotycznego. Jego zdaniem lód powstaje najpierw w dużych porach, co generuje lokalne występowanie ciśnienia hydraulicznego i zapoczątkowuje powstawanie ciśnienia osmotycznego. Całkowite ciśnienie występujące w układzie porów betonu stanowi sumę ciśnień związanych z tymi zjawiskami, na którą wpływa również stężenie soli. Im wyższe jest stężenie roztworu soli, tym mniejsza jest ilość wody zdolnej do zamarznięcia w danej temperaturze i tym niższe jest również ciśnienie hydrauliczne. Jednak także wraz ze wzrostem gradientu stężenia roztworu soli rośnie ciśnienie osmotyczne.



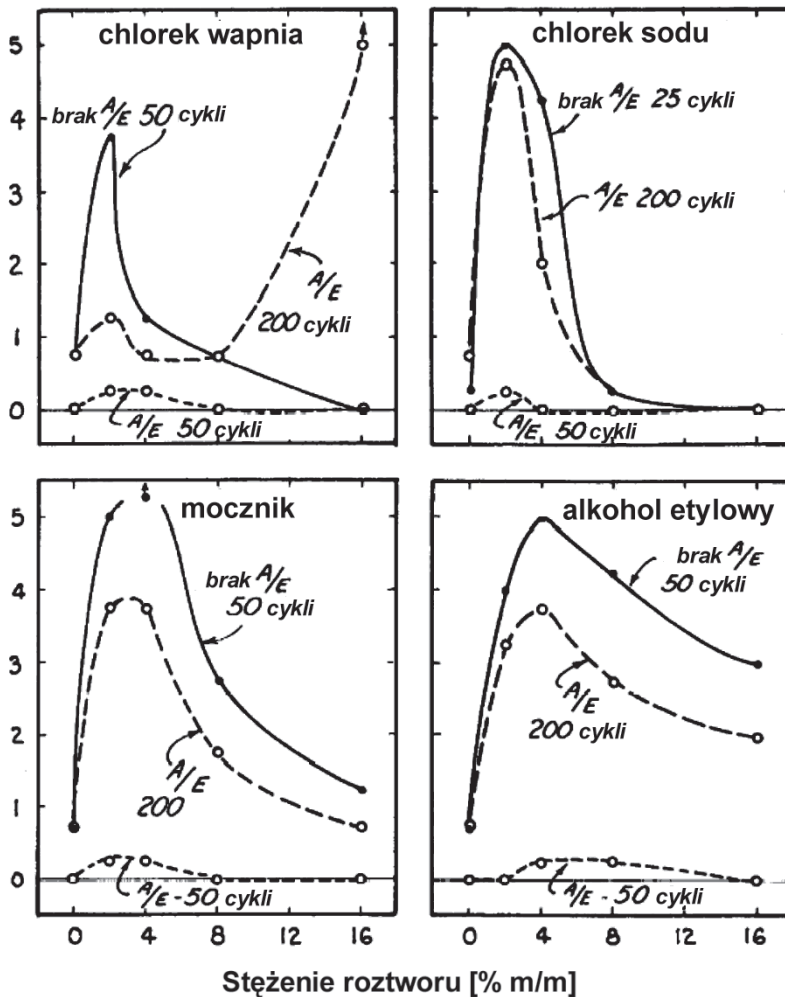
Rys.3. Wpływ rozmiaru porów na temperaturę zamarzania wody w porach bez i z dodatkiem soli, CEB [16]

Fig.3. The influences of the pore size on the water freeze temperature in the pores with and without salt, CEB [16]



Rys.4. Powstawanie naprężeń i łuszczenie w płycie betonowej podczas zamarzania w obecności soli odładzających, CEB [16]

Fig.4. The creating of the stress and the scaling problem in the concrete slab during, freezing process with the de-icing agents, CEB [16]



Wizualna ocena zniszczenia: 0 – nienaruszony beton,
 5 – poważne uszkodzenie,
 A/E – beton napowietrzony,

Rys.5. Wpływ zawartości środka odladzającego i liczby cykli na łuszczenie betonu bez i z napowietrzeniem, Verbeck i in. [19]

Fig.5. The influence of the de-icing agent content and the number of cycles on the concrete scaling with and without air-entrainment, Verbeck i in. [19]

MacInnis i Whiting [21] przeprowadzili badania zakładając, że sól w porach powoduje zatrzymanie większej ilości wilgoci w pewnych warunkach klimatycznych, które z kolei mogą przyczyniać się do powstawania poważniejszych uszkodzeń. Próbki 150×25×12,5 mm były suszone w 0% wilgotności względnej 2 dni i później nasycone

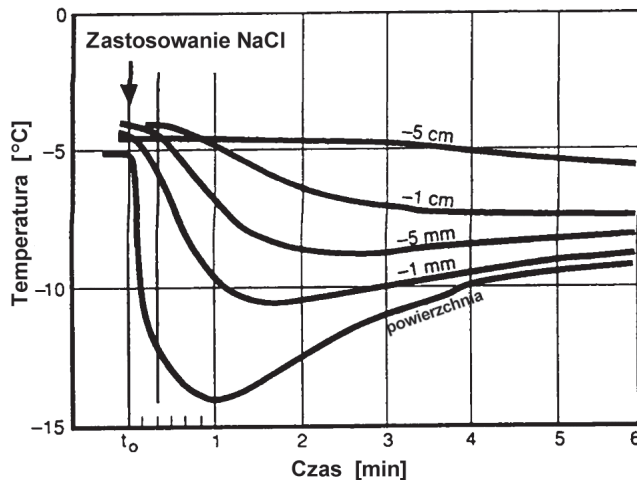
NaCl (0%, 1,5%; 3%; 10%), a następnie przechowywane w różnej wilgotności (100%, 88%, 72%, 47%, 30%) aż do zmiany masy, jeśli dzienna zmiana masy była niższa niż 0,002 g. Okazało się, że wilgoci było więcej, im większa była zawartość *NaCl* w roztworze użytym do nasycenia próbek. Niezależnie od zawartości wilgoci, wszystkie próbki podobnie nie były uszkodzone przez mróz. Autorzy potwierdzili, że 3% roztwór *NaCl* powoduje najpoważniejsze zniszczenie powierzchni betonowej.

Nie można stwierdzić, że powyższa hipoteza jest słuszna, tj. że wzrost wilgoci w betonie przy zachowaniu tego samego stężenia roztworu soli powoduje poważniejsze uszkodzenia mrozowe, ponieważ badano tylko całkowicie nasączone próbki albo nasączone w 88% lub mniej.

Sole powodują wystąpienie ciśnienia osmotycznego i wywołują ruch wody w kierunku górnej powierzchni betonu, gdzie następuje zamarzanie i powstaje ciśnienie hydrauliczne. Mather [22] podał następujący opis procesu niszczenia mrozowego: środek odladzający powoduje roztopienie się śniegu lub lodu, przy czym powstająca ciecz zbiera się w kałużach otoczonych lodem. Ciecz ta stanowi roztwór soli i ma obniżony punkt zamarzania. Część roztworu absorbowana jest przez beton. W miarę jak postępuje topnienie lodu, roztwór ulega rozcieńczeniu, do stężenia, przy którym jego punkt zamarzania zbliży się do temperatury zamarzania wody. Następuje wówczas ponowne zamarzanie.

Wysokie naprężenia w powierzchniowej warstwie betonu mogą być spowodowane termicznym szokiem, kiedy pokrywa lodu jest usuwana przez działanie soli, Rösli [23]. Taki mechanizm może wystąpić, gdy użyta jest sól do odladzania nawierzchni, ale nie wyjaśnia, dlaczego łuszczenie występuje, gdy roztwór soli jest już obecny na powierzchni, kiedy nadchodzi zamarzanie (jak w większości laboratoriów i w warunkach morskich). Obliczenia Rösliego [23] pokazują, że w warunkach laboratoryjnych, z warstwą lodu o grubości 2 mm i roztworem soli (więcej niż 5-cio procentowym) możliwe jest wystąpienie szoku temperaturowego, który z kolei może spowodować naprężenia rozciągające większe niż 4 MPa. Pühringer [24] badał efekt soli odladzających na mrozooporność materiałów cementowych. Formułuje hipotezę, że szkodliwe skutki soli są spowodowane zmianami w ściśliwości roztworu soli w porównaniu z wodą. Podczas odmrażania odpowiednio stężony roztwór soli może rozszerzać się bardziej niż woda (w tej samej temperaturze). Według Pühringera, wzrost stężenia soli doprowadzi do wzrostu ciśnienia podczas odmrażania, podczas gdy niższe stężenia doprowadzą do wyższego ciśnienia podczas zamrażania. Kiedy zamrażanie i odmrażanie następują cyklicznie, to istnieje średnia wartość stężenia roztworu soli, która powoduje powstanie najwyższych naprężeń. Pühringer obliczył, że następuje przy stężeniu bliskiemu 2,5% masy w przypadku dziewięciu różnych soli (m.in. *CaCl₂*, *NaCl*, *MgCl₂*). Hipoteza wymaga tego, żeby sole były obecne w układzie porów, ale nie prowadzi to do wyjaśnienia, dlaczego łuszczenie nie występuje przy braku kontaktu z solą, ani dlaczego przedłużone cykle zamrażania/odmrażania powodują większe łuszczenie.

Jako jedną z przyczyn powodujących łuszczenie powierzchni betonów wysokowartościowych przyjęto szok termiczny, [16]. Szok ten wynika z faktu pobrania ciepła z betonu przez topniejący lód. Rozkład temperatury w betonie przykrytym warstwą lodu podczas rozmrażania z NaCl jest przedstawiony na rys. 6. Znaczenie tzw. szoku termicznego nie zostało wyjaśnione, okazało się jednak, że do wystąpienia zjawiska powierzchniowego łuszczenia szok termiczny nie jest konieczny.



Rys.6. Rozkłady temperatury w betonie na różnej głębokości podczas rozmrażania przy zastosowaniu soli [17]

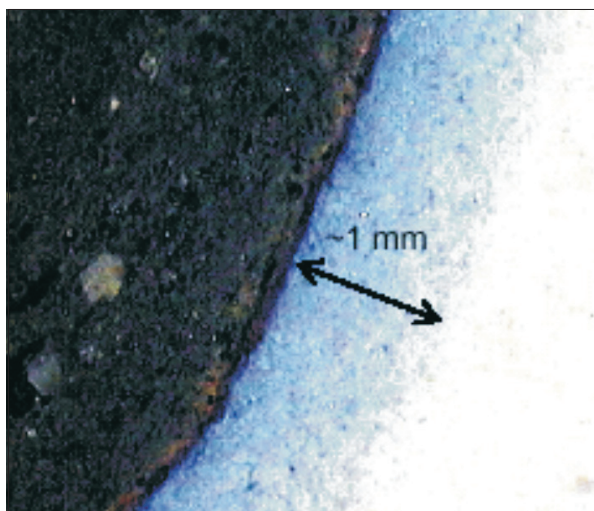
Fig.6. The temperature distribution in the concrete on the different depth during the thawing with the salt application [17]

Wyniki badań Fagerlunda [25] potwierdzają, że łuszczenie spowodowane roztworem soli jest zjawiskiem erozji powierzchni, spowodowanym jednoczesnym działaniem soli i zamarzania.

5. STOSOWANIE NAWILŻONEGO KRUSZYWA LEKKIEGO

Koncepcja zastosowania nawilżonego kruszywa lekkiego jako wewnętrznych zbiorników wody powstała w celu zapewnienia wymaganej ilości wody do hydratacji cementu niezależnie od intensywności pielęgnacji i dostarczenia wody z zewnątrz. Pomysł ten odnośnie do betonów zwykłych po raz pierwszy został sprawdzony i opisany w 1967 r. przez Campbella i Tobina [26], następnie zagadnieniem tym zajmowali się m.in. Philleo [27], Hammer [28], Vaysburd [29], Weber i Reinhardt [30] i Zhutovsky et al. [31]. Po rozpoczęciu procesu hydratacji w zaczynie cementowym kształtuje się system porów i wówczas wilgoć z ziaren kruszywa przedostaje się do zaczynu. Powstałe pory w zaczynie są znacznie mniejsze od tych znajdujących się w kruszywie lekkim. Uważa się, że siły kapilarne występujące w porach zaczynu cementowego są

na tyle duże, że wyciągają wodę z kruszywa lekkiego i transportują ją do suchszych części zaczynu, gdzie następuje reakcja z niezhydratyzowanym cementem (rys. 7). Powstają dodatkowe produkty hydratacji w postaci żelu *C-S-H* w porach kapilarnych lub w innych dostępnych przestrzeniach np. w mikrorysach, co powoduje wzrost gęstości struktury zaczynu cementowego (rys. 8).

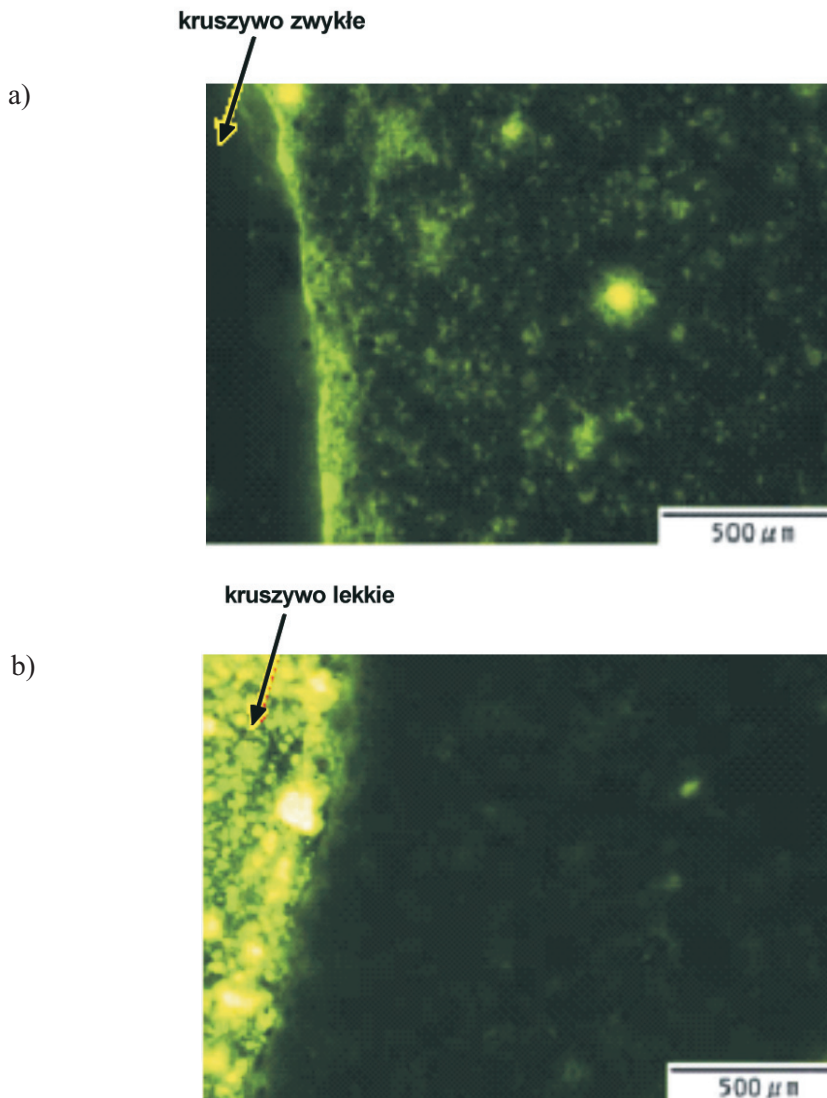


Rys.7. Kolorowa strefa dookoła kruszywa lekkiego nasączonego rozcieńczonym atramentem powstała po pobraniu cieczy z kruszywa do hydratacji cementu, $w/c = 0,3$; Laura [32]
Fig.7. Coloured corona expanding around a LWA aggregate saturated with weak ink solution and cast in white Portland cement paste of water/cement ratio 0.3, Laura [32]

Wzrost stopnia hydratacji w betonach z nawilżonym kruszywem lekkim sprzyja zmniejszaniu się porowatości zaczynu i przerwaniu ciągłości systemu porów kapilarnych. Jeżeli przy niskim wskaźniku w/c do zaczynu cementowego będzie miała dostęp woda z kruszywa lekkiego, to proces hydratacji może nawet następować aż do momentu, gdy kapilary zostaną wypełnione jej produktami. Spowoduje to obniżenie całkowitej porowatości zaczynu oraz jej rozdrobnienie. Nie tworzą się strefy porowate dookoła kruszywa lekkiego, więc struktura zaczynu jest bardziej zwarta niż to ma miejsce w betonach ze zwykłym kruszywem (rys. 8). Wiadomo, że strefa kontaktowa między ziarnami kruszywa a zaczynem cementowym jest składnikiem struktury betonu, wpływającym na jego trwałość, a co za tym idzie na odporność na powierzchniowe łuszczenie. Znaczenie warstwy przejściowej maleje wraz ze zmniejszeniem współczynnika w/c , Kucharska [33]. Można zatem powiedzieć, że beton z nawilżonym kruszywem lekkim jest „inteligentnym materiałem”, który „sam decyduje” o tym ile i gdzie, jeśli jest taka potrzeba, dostarczyć wody potrzebnej do hydratacji.

Powierzchnia betonu wysokowartościowego z nawilżonym LWA jest bardziej szczelna niż powierzchnia betonu wysokowartościowego bez dodatku LWA. Im niższa jest wilgotność względna otoczenia, tym większa jest różnica pomiędzy warstwą powierzchniową i warstwami położonymi głębiej. Z powodu odparowywania wody różnica

ta wzrasta i w warstwie powierzchniowej wilgoć dostarczana z kruszywa lekkiego jest transportowana do zaczynu szybciej niż do wnętrza betonu. Dzięki temu struktura na powierzchni jest szczelniejsza, powodując zmniejszenie odparowywania wody (procesy dyfuzji następują wolniej).



Rys.8. Zdjęcia w świetle UV strefy przejściowej między zaczynem i normalnym kruszywem (a) oraz zaczynem i nawilżonym kruszywem lekkim (b), Laura [32]

Fig.8. Fluorescence microscope images of interfacial transition zone between cement paste and normal weight aggregate (a) and saturated LWA (b), Laura [32]

Mniejszy moduł sprężystości LWA w porównaniu ze zwykłym kruszywem oraz lepsza przyczepność w strefie przejściowej dookoła LWA z powodu nierównej powierzchni prowadzi do zmniejszenia koncentracji naprężeń między zaczynem i kruszywem, Hoff [34]. Ponadto zastąpienie części kruszywa zwykłego przez nawilżone kruszywo lekkie powoduje lokalne zwiększenie stopnia hydratacji, a dzięki temu lokalne zwiększenie wytrzymałości na rozciąganie, Laura et al. [32].

Na powierzchni betonu, dodatkowo występuje gradient wilgotności z powodu odparowywania wody z tej powierzchni. Powoduje przyspieszenie pojawienia się lokalnego gradientu wilgoci. Woda z LWA znajdującego się blisko powierzchni jest więc wykorzystana szybciej niż ta we wnętrzu betonu, dlatego powierzchniowa warstwa betonu staje się bardziej szczelna w krótszym okresie czasu. Pozwala na obniżenie ilości wody, która wyparowałaby w normalnych warunkach i przyczynia się do poprawienia wewnętrznej pielęgnacji betonu. Pozwala to również zmniejszyć albo wyeliminować naprężenia wynikające z wysychania a także pomaga wyeliminować powierzchniowe pęknięcie, Laura et al. [32].

6. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu publikacji można sformułować następujące wnioski:

- powierzchniowe łuszczenie i pęknięcie wewnętrzne wskutek oddziaływania mrozu to dwa odmienne procesy fizyczne zależne w podobny sposób od jakości betonu i od oddziaływań środowiska,
- warunkiem wystąpienia powierzchniowego łuszczenia jest kontakt z roztworem soli i cykliczne zamrażanie i odmrażanie betonu,
- łuszczenie zależy od zawartości soli w roztworze, a nie od jej rodzaju; ok. 3% roztworu soli jest najgroźniejsze,
- z obniżeniem temperatury mrożenia w przedziale $0\text{ }^{\circ}\text{C} > \theta > -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ występuje większe łuszczenie.

W odróżnieniu od degradacji betonu, spowodowanej cyklicznym działaniem ujemnej temperatury, powierzchniowe łuszczenie jest zjawiskiem bardziej złożonym i mniej poznany. Występują niejasności opisu i sprzeczności, zwłaszcza w odniesieniu do przedstawienia mechanizmu powstawania sił wewnętrznych przy przechodzeniu wody w lód i wywoływania naprężeń rozciągających, przekraczających lokalną wytrzymałość betonu.

Systematyczne badania zjawiska łuszczenia w Polsce nie były podejmowane, a także nie zastanawiano się nad alternatywą w stosunku do tradycyjnych środków napowietrzających. W drugiej części artykułu zostaną przedstawione wyniki badań dotyczące betonów wysokowartościowych zawierających nawilżone drobne frakcje kruszywa lekkiego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Brandt A. M.*: Struktury materiałów kompozytowych o cementowej matrycy. DROGI i MOSTY, nr 3/2003, 43-72
- [2] *Powers T.C.*: The air requirement of frost-resistant concrete. Highway Research Board. Proceedings of the Annual Meeting 29, 184-211, 1949
- [3] *Krenkler K.*: Chemie des Bauwesens. Band 1, Springer, Berlin 1980
- [4] *Aitcin P.C.*: The influence of the spacing factor on the freeze-thaw durability of high-performance concrete. International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, Université de Sherbrooke, August 16 - 20, 1998, 419-433
- [5] *Marchand J., Sellevold E.J., Pigeon M.*: The Deicer Salt Scaling Deterioration of Concrete – an Overview. American Concrete Institute, SP 145-1, 1-46
- [6] *Pigeon M.*: Frost resistance. A critical look, ACI SP 145-7, 1994
- [7] *Powers T.C., Brownyard T.L.*: Studies of the physical properties of hardened portland cement paste. JACI, **18**, 934-969, 1946
- [8] *Wawrzeńczyk J.*: Diagnostyka mrozoodporności betonu cementowego. Monografie, studia, rozprawy, Politechnika Świętokrzyska, 32, Kielce 2002
- [9] *Powers T.C., Helmuth R.A.*: Theory of Volume Changes in Hardened Portland-Cement Paste during Freezing. Proceedings Highway Research Board 32, PCA Bull 46, 1953, 285-297
- [10] *Litvan G.G.*: Frost Action in Cement Paste. Matériaux et Constructions, **6**, 34, 1973, 293-298
- [11] *Litvan G.G.*: Pore Structure and Frost Susceptibility of Building Materials. RILEM Symposium, Prague 1976, 139-144
- [12] *Litvan G.G.*: Reply to S. Chatterji's Discussion on „Frost Action in Cement in the Presence of De-icers”. Cement and Concrete Research, **7**, 1977
- [13] *Setzer M. J.*: The micro ice lens pump – a new sight of frost attack and frost testing. Proceedings Third International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Edited by N. Banthia, k. Sakai and O. E. Gjorv, The University of British Columbia, Canada, Vancouver 2001, CD, 428-438
- [14] *Fagerlund G.*: The International Cooperative Test of the critical degree of saturation Method of Assessing the Freeze/Thaw Resistance of Concrete, Mater. Constr., **10**, 58, 1977, 230-251
- [15] *Fagerlund G.*: Trwałość konstrukcji betonowych. Arkady, Warszawa 1997
- [16] Durable concrete structures CEB Design Guide. Comite Euro-International du Béton, Bulletin d'information, 182, juin 1989
- [17] Method for Test of the Frost Resistance of High Performance Concrete. State of Art, HETEK, Vejdirektoratet København, Report No. 55, 1996

-
- [18] *Arnfeldt H.*: Damage on concrete Pavements by Wintertime Salt Treatment. Meddelande 66, Statens Vaginstitut, Stockholm 1943
- [19] *Verbeck G.J., Klieger P.*: Studies of salt scaling of concrete. Research and development Laboratories of the Portland Cement Association, Research Department, Bulletin 83, January 1956
- [20] *Fagerlund G.*: Studies of the destruction mechanisms at freezing of porous materials. Proc. VI Intern. Congress on the Problems Raised by Frost Action, Le Havre, France, 1975, 166-196
- [21] *MacInnis C., Whiting J.D.*: The frost resistance of concrete subjected to a deicing agent. Cement Concrete Research, **9**, 1979, 325-336
- [22] *Mather B.*: Concretes need not deteriorate. Concrete International, **1**, 9, 1979, 32-70
- [23] *Rösli A., Harnik A.B.*: Improving the durability of concrete to freezing and deicing salts. American Society for Testing and Materials, 1980, 464-473
- [24] *Pühringer J.*: Deterioration of materials by hydraulic pressure in salt water systems outline model. Proc. 8 International Congress on deterioration and conservation of stone, Berlin 1996
- [25] *Fagerlund G.*: The future structural stability of concrete structures exposed to frost. Third International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Edited by N. Banthia, K. Sakai and O.E. Gjörv, The University of British Columbia, Canada, Vancouver 2001
- [26] *Campbell R.H., Tobin R.E.*: Core and cylinder strengths of natural and lightweight concrete. ACI Journal, **64**(4), 1967, 190-195
- [27] *Philleo R.*: Concrete Science and reality. Materials Science of concrete II, Eds. J.P. Skalny and S. Mindess, American Ceramic Society, 1-8, USA, OH, Westerville 1991
- [28] *Hammer T.A.*: High strength LWA concrete with silica fume – effect of water content in the LWA on mechanical properties. Supplementary Papers in the 4th CANMET/ACI INT. Conf. On Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, 314-330, Turkey, Istanbul 1992
- [29] *Vaysburd A.M.*: Durability of Lightweight Concrete bridges in severe environments. Concrete International **18**(7), 1996, 33-38
- [30] *Weber S., Reinhardt H.W.*: Improved Durability of High-Strength Concrete Due to Autogenous Curing. Durability of Concrete, Proceedings of Fourth CANMET/ACI International Conference, Sydney 1997, 93-121
- [31] *Zhutovsky S., Kovler K., Bentur A.*: Efficiency of lightweight aggregate for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage. Materials and Structures, **52**, March 2002, 97-101
- [32] *Laura P., Jensen O.M., Igarashi S.I.*: Measurements of internal water curing and of its consequences. RILEM, TC-196 ICC, raport wewnętrzny, marzec 2004

- [33] *Kucharska L.*: W/C – wskaźnik wpływu warstwy przejściowej na właściwości mechaniczne betonów zwykłych i WWB i ich podział. *Cement Wapno Beton*, **2**, 1999, 39-45
- [34] *Hoff G. C.*: The use of lightweight fines for the internal curing of concrete, prepared for Northeast Solite Corporation. Hoff Consulting LLC, RILEM, TC-196 ICC, raport wewnętrzny, August 2002

THE COUNTERACTING OF THE CONCRETE SCALING PROBLEM BY MEANS OF PRE-WETTED LIGHTWEIGHT AGGREGATE Part I – State of the art

Abstract

The paper reviews the phenomenon of damage of the concrete surface - scaling - due to cyclic freezing and thawing in the presence of de-icing salts. A possibility to replace air-entraining admixtures by other techniques is considered.

The main kinds of air pores in the concrete and the process of water filling and freezing of water inside the pore structure are described. A review of publications concerning the mechanism of both internal and external deteriorations of concrete structure due to cyclic freezing and thawing is presented. The next part is devoted to characterisation of concrete with regard to scaling phenomenon.