

## OCENA MROZODPORNOŚCI BETONU NA PODSTAWIE KRYTYCZNEGO POZIOMU SKUMULOWANYCH USZKODZEŃ

Vadim NIKITSIN<sup>a</sup>, Beata BACKIEL-BRZOZOWSKA<sup>b\*</sup>,  
Marta KOSIOR-KAZBERUK<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Instytut Budownictwa, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej,  
ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska

<sup>b</sup> Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

**Streszczenie:** W pracy przeprowadzono analizę danych literaturowych oraz wyników badań własnych, dotyczących zmian wybranych właściwości lub wskaźników destrukcji próbek kapilarno-porowatych materiałów budowlanych w procesie zamrażania-rozmrażania do całkowitego zniszczenia. Potwierdzono, że w procesie destrukcji betonów można wyróżnić dwa etapy o zdecydowanie różnej dynamice. Stwierdzono, że przejście procesu destrukcji materiału z pierwszego do drugiego etapu wyznacza krytyczny poziom kumulowania uszkodzeń, który może być miarą mrozoodporności materiałów. Zaproponowano sposoby wyznaczenia tego kryterium. Do oceny mrozoodporności betonu zaproponowano metodę zamrażania-rozmrażania, w której rejestruje się jedynie moment „pełnego” zniszczenia próbek betonowych.

*Słowa kluczowe:* beton, mrozoodporność, metody badań.

### 1. Wprowadzenie

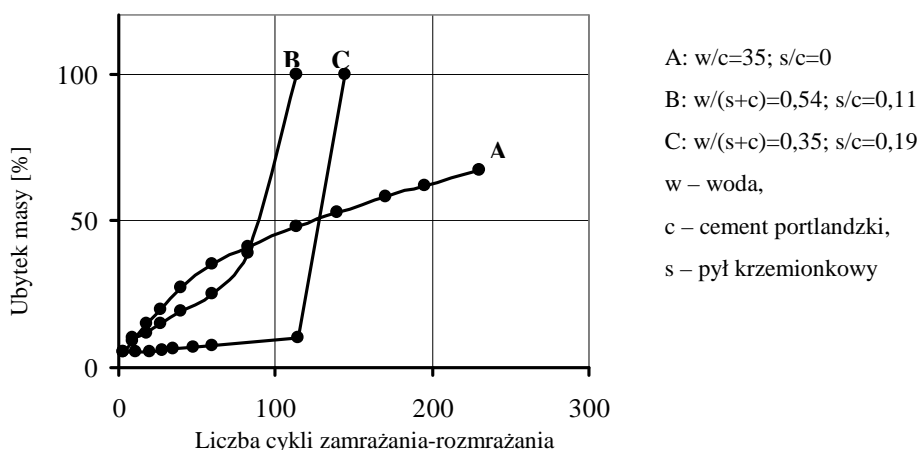
Mrozoodporność wyrobów budowlanych narażonych na działanie niesprzyjających warunków klimatycznych jest jednym z głównych mierników ich trwałości. Wiele prac badawczych poświęcono wyjaśnieniu mechanizmów degradacji zawilgoconych materiałów pod wpływem cyklicznego zamrażania-rozmrażania oraz opracowywaniu metod i kryteriów oceny ich mrozoodporności, jednakże analiza wyników tych prac prowadzi do niejednoznacznych, często nawet sprzecznych wniosków. W krajach Unii Europejskiej, do chwili obecnej, nie ukończono pracy nad wyborem jednolitej, powszechnie przyjętej normowej metody oceny mrozoodporności wyrobów budowlanych. Zdaniem autorów niniejszej pracy, na podstawie licznych badań prezentowanych w literaturze, można zaproponować prostą metodę oceny mrozoodporności betonów, ceramiki oraz innych materiałów. Procedura oceny zakłada monitorowanie procesu degradacji wyrobów podczas cyklicznego zamrażania-rozmrażania aż do pełnego zniszczenia próbek, w celu ustalenia krytycznego poziomu skumulowanych uszkodzeń, który następnie wykorzystuje się przy ocenie mrozoodporności.

### 2. Wstępna analiza danych doświadczalnych

Analizując dane prezentowane w literaturze oraz wyniki badań własnych zmiany niektórych właściwości lub wskaźników destrukcji (takich jak wytrzymałość mechaniczna, porowatość lub ubytek masy, itp.) próbek kapilarno-porowatych materiałów budowlanych w procesie zamrażania-rozmrażania do całkowitego zniszczenia, potwierdzono, że w przebiegu procesu destrukcji próbek można wyróżnić dwa etapy o zdecydowanie różnej dynamice. Etap początkowy charakteryzuje się wyraźnie mniejszą szybkością procesu destrukcji materiału i trwa dłużej niż etap drugi. Dwuetapowy przebieg procesu destrukcji obserwuje się bez względu na wymiar i kształt próbek oraz warunki cyklicznego zamrażania-rozmrażania (zamrażanie jednostronne lub objętościowe, w powietrzu, w wodzie lub wodnych roztworach soli o zróżnicowanym stężeniu).

Aby zilustrować dwuetapowość procesu destrukcji, na rysunku 1 zaprezentowano dane zaczerpnięte z pracy Fagerlunda (1997), przedstawiające kinetykę ubytku masy próbek betonu zwykłego oraz betonu z dodatkiem pyłu krzemionkowego pod wpływem cyklicznego zamrażania-rozmrażania. Z zależności pokazanych na rysunku 1 wynika, że próbki betonu bez dodatku pyłu

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: b.backiel@pb.edu.pl

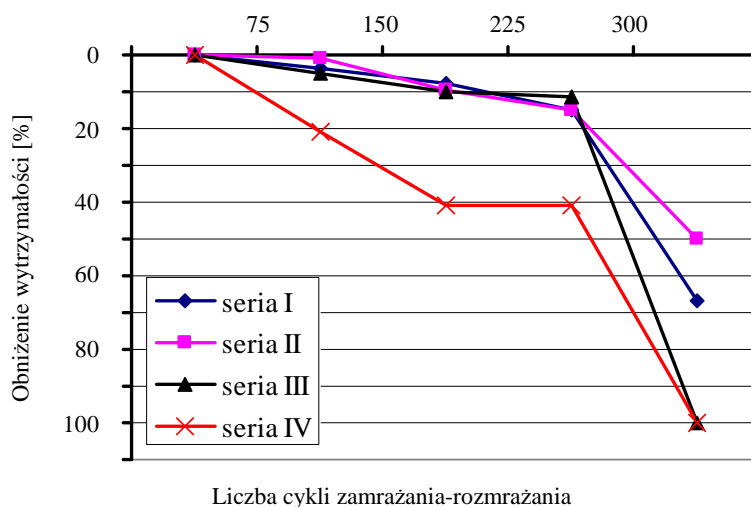


Rys. 1. Badania Petersona przedstawione przez Fagerlunda (1997) nad mrozoodpornością próbek betonu w kontakcie z roztworem soli NaCl, z dodatkiem i bez dodatku pyłu krzemionkowego

krzemionkowego nie uległy pełnemu zniszczeniu nawet po 230 cyklach zamrażania-rozmrażania (krzywa A). Natomiast próbki betonów zawierających dodatek pyłu krzemionkowego zostały całkowicie zniszczone jeszcze przed 130 cyklem (krzywe B i C). Czas trwania pierwszego etapu kumulowania uszkodzeń przekracza okres drugiego, szybkiego etapu kumulowania uszkodzeń w przybliżeniu 2,5 razy w przypadku B i 5 razy w przypadku C. Fagerlund (1997) przedstawił w postaci graficznej dużą liczbę danych dotyczących ubytku masy próbek betonowych w wyniku złączania podczas jednostronnego zamrażania-rozmrażania pod warstwą wody lub warstwą 3% roztworu NaCl. Próbki betonu zawierały różne dodatki mineralne i domieszki napowietrzające. Analizując wyniki badań prowadzonych aż do całkowitego zniszczenia próbek stwierdzono, że we wszystkich przypadkach zależność skumulowanej masy złączeń od liczby cykli zamrażania-rozmrażania ma postać krzywych B i C (rys. 1).

Drugi przykład – pokazany na rysunku 2, zaczerpnięty z pracy Jasiczaka i Kucz (2007) – przedstawia spadek

wytrzymałości na ściskanie w wyniku objętościowego zamrażania-rozmrażania czterech serii próbek, o wymiarach  $0,1 \times 0,1 \times 0,1$  m, betonu cementowego przeznaczonego do wbudowania w górną warstwę nawierzchni drogowej. Próbki w poszczególnych seriach różniły się stopniem zagęszczenia mieszanki betonowej. Jak wynika z wykresów na rysunku 2 po 225 cyklach zamrażania-rozmrażania nastąpił gwałtowny spadek wytrzymałości. Po 300 cyklach próbki serii III i IV rozpadły się w komorze zamrażającej, a uszkodzenia próbek pozostałych serii były tak duże, że uległy one zniszczeniu przy nieznacznej sile ściskającej, co wskazywało na objętościowy charakter uszkodzeń mikrostruktury betonu. O kumulacji uszkodzeń wewnętrznych warstw betonu mogą świadczyć wyniki analizy mikroskopowej przedstawione przez Lelusz (2003), pokazujące proces pojawiania się coraz to nowych mikropęknięć po kolejnych cyklach zamrażania-rozmrażania próbek betonowych. W pewnym momencie zmiany porowatości stają się tak duże, że następuje zniszczenie betonu.



Rys. 2. Średnie obniżenie wytrzymałości na ściskanie betonu drenażowego poddanego badaniu mrozoodporności metodą zwykłą (Jasiczak i Kucz, 2007)

Jasiczak i Kucz (2007) wykazali, że ubytek masy próbek tych samych czterech serii do 225 cyklu zamrażania-rozmrażania był nieznaczny i nie przekraczał założonej wartości granicznej, jednak po kolejnych 75 cyklach znacząco ją przekroczył. Przejście procesu destrukcji próbek betonu z pierwszego, powolnego etapu do drugiego, szybkiego etapu kumulowania uszkodzeń na podstawie dwóch różnych wskaźników (spadek wytrzymałości na ściskanie oraz ubytek masy) zachodzi przy jednakowej liczbie cykli. Okazało się, że w danym przypadku pierwszy etap przebiegał trzykrotnie dłużej niż drugi.

Opisany proces kumulowania uszkodzeń jest charakterystyczny również dla innych materiałów budowlanych. Dwuetapowy proces narastania uszkodzeń w postaci złuszczeń zaobserwowano również w badaniach własnych oceny mrozoodporności ceramiki ściennej z uwzględnieniem składu masy oraz warunków wypalania (Nikitsin i in., 2003). Obecność dwóch etapów kumulowania uszkodzeń potwierdzają wyniki badania kinetyki pojawiania się defektów w próbkach materiału ceramicznego o zróżnicowanych wymiarach, przygotowanych z różnych glin podczas cyklicznego zamrażania-rozmrażania do całkowitego zniszczenia próbek (Zelikin i in., 1975). Hlevčuk i Artyknaev (1979) przedstawili dane dotyczące dwuetapowej zmiany współczynnika przewodzenia ciepła niektórych polimerowych materiałów termoizolacyjnych pod wpływem cyklicznego zamrażania-rozmrażania.

Na podstawie rozpatrywanych przykładów można stwierdzić, że pierwszy etap odpowiada procesowi starzenia i kumulowania uszkodzeń w materiale, w którym liczba mikrorys w jednostce objętości nie osiągnęła jeszcze wartości krytycznej, po osiągnięciu której rozpoczyna się drugi etap szybko postępującego, nieodwracalnego niszczenia betonów i innych materiałów budowlanych. W takim przypadku można założyć, że liczba cykli zamrażania-rozmrażania, przy której rozpoczyna się przejście z pierwszego do drugiego etapu kumulowania uszkodzeń może być przyjęta, jako miara mrozoodporności betonu. Pozostaje jedynie opracować procedurę wyznaczania takiej oceny.

W dalszej części pracy przedstawiono jedną z możliwych procedur, opracowaną na podstawie analizy kinetyki ubytku masy próbek betonu w warunkach jednokierunkowego zamrażania-rozmrażania.

### 3. Analiza wyników badań własnych i dyskusja

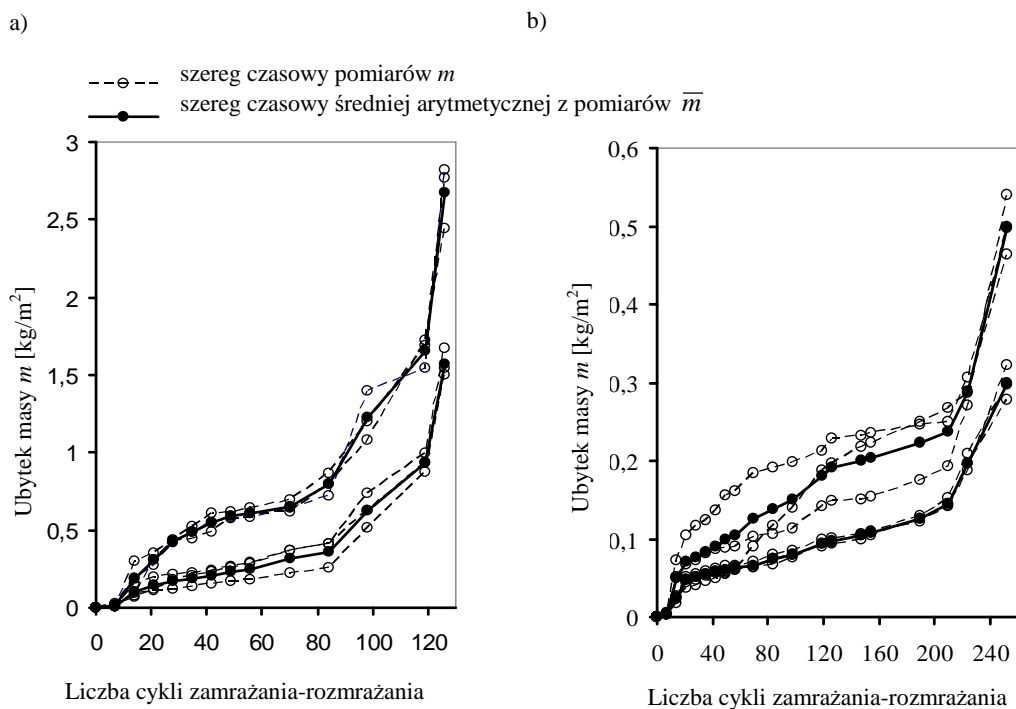
Badania nad mrozoodpornością betonu prowadzono przy wykorzystaniu metody bezpośredniego zamrażania, z uwzględnieniem zaleceń szwedzkiej normy SS137244 (metoda Boraas). Jako wskaźnik stopnia destrukcji betonu w wyniku cyklicznego zamrażania-rozmrażania zastosowano masę cząsteczek materiału, które utraciły kohezję na jednostkę powierzchni próbek betonowych. W skrócie ten wskaźnik nazwano ubytkiem masy  $m$  wyrażonym w  $\text{kg/m}^2$ . Próbki betonu, w postaci płytek o wymiarach  $15 \times 15 \times 5$  cm, nasycano wstępnie wodą.

Podczas badania powierzchnia górna ( $15 \times 15$  cm) znajdowała się pod warstwą 3% roztworu wodnego NaCl, a pozostałe powierzchnie zabezpieczono warstwą hydro- i termoizolacji. Do przygotowania próbek zastosowano dwa rodzaje cementu portlandzkiego, które warunkowo oznaczono  $C_1$  i  $C_2$ . Część próbek zawierała dodatek w postaci pasty bitumicznej będącej roztworem asfaltu w rozpuszczalniku organicznym (nafcie technicznej), który w istotny sposób ograniczał podatność betonu na łuszczenie. Dokładny opis receptur betonów, technologię przygotowania próbek do badań i warunki termiczne procesu zamrażania-rozmrażania można znaleźć w pracy Kosior-Kazberuk i Jezierskiego (2004).

Dla każdej z próbek wyznaczono szereg wartości ubytku masy w procesie cyklicznego zamrażania-rozmrażania do momentu zniszczenia  $m_1, m_2, \dots, m_n$  zarejestrowanych po czasie  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , którym odpowiadają liczby cykli  $N_1, N_2, \dots, N_n$ . Interpretację graficzną obserwacji dla czterech serii próbek o różnym składzie przedstawiono na rysunku 3a i 3b. Wszystkie próbki przeszły dwa charakterystyczne etapy kumulowania uszkodzeń aż do ich zniszczenia. Każda seria składała się z 3 próbek o jednakowym składzie, których nie można jednak rozpatrywać jako powtarzalne jednostki doświadczalne trójelementowej próby losowej populacji generalnej z uwagi na fakt, że próbki zostały przygotowane z jednego zarobu mieszanki betonowej. Takie próbki połączone w serię należy traktować jako próbki bliźniacze, które nie mogą w pełni scharakteryzować zmiennej losowej  $m$ , niezależnie od ich liczebności.

Po uśrednieniu szeregów wyników badań  $m$  na podstawie próbek bliźniaczych wyznaczono nowy szereg, opisujący zmiany średniej arytmetycznej wartości analizowanej zmiennej  $m$  w zależności od numeru cyklu jej obserwacji  $\bar{m}_1, \bar{m}_2, \dots, \bar{m}_n$ . Obserwacje w postaci  $m$  lub  $\bar{m}$  przyjęto nazywać szeregiem czasowym. Szereg czasowy podlega pewnym prawidłowościom, a jego elementy nie spełniają podstawowych założeń przyjętych w klasycznym modelu analizy regresji lub analizy wariancji. Elementy szeregu czasowego, rozpatrywane jako zmienne losowe, nie są ani statystycznie niezależne, ani jednakowo rozłożone. W szczególności wartość zmiennej  $m$ , którą wyznaczono w dowolnej chwili czasu  $t$  może istotnie zależeć od tego, jaka wartość była zarejestrowana wcześniej. Zależność można wyjaśnić na drodze analizy fizycznej istoty procesu lub też na drodze formalnej, stosując różne metody statystyczne.

Dla zbadania szeregu  $m$  lub  $\bar{m}$  można zastosować analizę szeregów czasowych, której celem jest wykazanie i opisanie prawidłowości charakteryzujących stabilne, systematyczne zmiany wartości analizowanej zmiennej w dużym przedziale czasowym (trend szeregu czasowego), wahania periodyczne (sezonowe) oraz wahania losowe. Obraz takich prawidłowości można ustalić na podstawie analizy wykresów. Na przykład, na rysunku 3a i 3b widoczna jest stabilna tendencja dwuetapowego procesu ubytku masy w czasie  $m(N)$  (funkcja trendu), na którą nakładają się wahania losowe.



Rys. 3. Ubytek masy próbek betonowych w zależności od liczby cykli zamrażania-rozmrażania: a) beton zwykły, b) beton z dodatkiem pasty bitumicznej

Aby wydzielić funkcję trendu  $m(N)$ , należy eliminować z szeregu czasowego wahania losowe. Rozwiązując opisane zagadnienie zgodnie z teorią analizy szeregów czasowych można zastosować kilka metod statystycznych, począwszy od prostych metod wyrównywania do dowolnie skomplikowanej analizy spektralnej (Jóźwiak i Podgórski, 2001). W analizowanym przypadku (rys. 3a i 3b) sformułowanie szeregu czasowego średnich wartości zmiennej  $\bar{m}$ , na podstawie trzech próbek bliźniaczych, umożliwia rozwiązanie zagadnienia eliminacji wahań losowych z szeregu czasowego. W celu pełniejszej eliminacji wahań losowych z szeregu czasowego, dane  $\bar{m}$  można aproksymować określoną funkcją, interpretując funkcję trendu jak regresję badanej zmiennej względem czasu. Przy wyborze postaci analitycznej zależności regresji należy przede wszystkim bazować na doświadczeniu badawczym i wiedzy naukowej.

Z analizy krzywych (rys. 3a i 3b), zbudowanych na podstawie danych  $\bar{m}$ , wynika, że dobór funkcji aproksymującej jest trudny. Można zauważyć, że w trakcie początkowych siedmiu cykli zamrażania-rozmrażania zarejestrowano nieznaczny ubytek masy. W tym przypadku, ukryty (latentny) okres kumulowania pionowych i poziomych mikrorys, które tworzą się w wyniku działania statycznego i dynamicznego mechanizmu niszczonego wywołanego zamrażaniem wilgoci, nie powoduje utraty kohezji cząstek betonu. Pojawianie się i kumulacja poziomych mikroszczelin świadczy o początku procesu rozwarstwienia betonu. Przy kolejnych cyklach zamrażania-rozmrażania (od 7 do 30 cyklu) kumulacja mikrorys w zaprawie powoduje wyraźne rozwarstwienie betonu.

Podobne zjawisko opisali także Korenfok i Dumanova (1992). Kohezja pomiędzy warstwami słabnie i rozpoczyna się ich złuszczenie. Takie zjawisko jest potwierdzone szybką utratą masy w rozważanym okresie. Intensywność łuszczenia warstw betonu potęguje warstwa lodu zamarzająca na powierzchni próbki, która podczas obniżania temperatury redukuje swoje wymiary bardziej niż beton. W rezultacie następuje złuszczenie cząstek betonu. Taki mechanizm niszczonego działania lodu (*Frost Salt Scaling Mechanism*) opisali Valenza i Scherer (2006). Po 30 cyklach zamrażania-rozmrażania zachodzą zmiany fizyko-mechanicznych właściwości warstwy powierzchniowej betonu powodujące wyhamowanie niszczonego działania opisanego mechanizmu i na krzywych przedstawiających ubytek masy obserwuje się odcinek niemal prostoliniowy (rys. 3a i 3b). Jednocześnie wzrasta liczba szczelin, które wnikają coraz głębiej. Rozpoczyna się proces odspajania ziaren kruszywa grubego, co oznacza przejście procesu niszczenia próbek betonu z pierwszego etapu do następnego, który szybko kończy się całkowitą destrukcją próbek.

Jak już wspomniano, krytyczną liczbę cykli, której odpowiada moment zakończenia pierwszego etapu procesu destrukcji betonu, należy przyjąć jako ocenę mrozoodporności badanego materiału. Dysponując danymi  $\bar{m}$  oraz ich graficzną interpretacją (jaką przedstawiono na rys. 3a i 3b) krytyczną liczbę cykli  $N_{kr}$  można wyznaczyć za pomocą funkcji aproksymującej lub metodą graficzną. Na przykład, można aproksymować odpowiednią funkcją dane uzyskane w pierwszym etapie procesu destrukcji, a następnie wyznaczyć różnicę pomiędzy danymi z drugiego etapu i wartościami

obliczonymi za pomocą aproksymującej zależności regresyjnej. Liczbę cykli, przy których pierwsza z kolejnych różnic wyjdzie poza obszar wahań losowych, przyjmuje się jako wartość krytyczną  $N_{kr}$ .

Do wyznaczenia  $N_{kr}$  można także zastosować modele autoregresji uwzględniające statystyczną zależność (autokorelację) elementów szeregu czasowego. W związku z powyższym, hipotezę o istnieniu autokorelacji po aproksymacji danych pierwszego etapu kumulowania uszkodzeń potwierdzono za pomocą testu Durбина-Watsona (Jóźwiak i Podgórski 2001). Ponadto, jeśli istnieje potrzeba aproksymowania danych pełnego szeregu czasowego, wówczas można stosować funkcję sklejaną (ang. *spline function*), która jest bardzo skuteczną funkcją aproksymującą (Ajvazian i in., 1985). Inne znane metody wymagają dostatecznie dużej liczby elementów  $\bar{m}$  szeregu czasowego, co czyni je bardzo pracochłonnymi przy praktycznym rozwiązywaniu przedstawionego zagadnienia.

Wyniki badania mrozoodporności próbek betonu cementowego bez dodatków modyfikujących, uzyskane zarówno przez autorów niniejszej pracy, jak i przez innych badaczy pokazują, że okres pierwszego etapu kumulowania uszkodzeń, oznaczony jako  $k_I$ , zamyka się w zakresie 0,67-0,75. Na przykład, dla danych przedstawionych na rysunku 3a krytyczna liczba cykli zamrażania-rozmrażania  $N_{kr} = 88$ . Całkowita liczba cykli zamrażania-rozmrażania do zniszczenia  $N_z = 126$ . Stąd wynika, że współczynnik  $k_I = 88 / 126 = 0,698$ .

W związku z powyższym krytyczną liczbę cykli można określić ze wzoru:

$$N_{kr} = k_I N_z. \quad (1)$$

Wzór (1) może być podstawą bardzo prostej metody oceny mrozoodporności betonu. W metodzie wystarczy zarejestrować jedynie chwilę zniszczenia próbek, którą charakteryzuje liczba cykli  $N_z$  oraz przyjęć wartość współczynnika  $k_I$ , na przykład na poziomie 0,7. Takie podejście daje możliwość oceny ilościowej wpływu czynników związanych ze składem lub technologią na mrozoodporność materiału.

Rozwiązanie tych zagadnień pokazano przykładowo na rysunku 3a i 3b. Zastosowane dwa poziomy zawartości dodatku pasty bitumicznej w stosunku do masy cementu nie wpływają na mrozoodporność betonu, gdyż mrozoodporność w obu przypadkach wynosi  $N_{kr} = 210$  cykli (rys. 3b). Włączenie dodatku modyfikującego do składu mieszanki betonowej w rozpatrywanych ilościach poprawia mrozoodporność próbek  $210 / 88 = 2,38$  razy.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, zaproponowane podejście do oceny mrozoodporności betonu na podstawie krytycznego poziomu skumulowanych uszkodzeń jest bardzo proste w realizacji i może być rozpatrzone jako metoda standardowa oceny mrozoodporności betonu, po odpowiednim dopracowaniu. Przy opracowywaniu metody należy ustalić jednolite warunki procesu zamrażania-rozmrażania próbek oraz ich rozmiar. Aby zminimalizować czas badania próbek do ich zniszczenia, należy stworzyć warunki testu

wystarczająco surowe i przyspieszone, a wymiary próbek w kierunku przenoszenia ciepła i masy możliwie jak najmniejsze, na przykład 5 cm. Jak wynika ze wzoru (1) dokładność oceny ilościowego wskaźnika mrozoodporności  $N_{kr}$  w głównej mierze zależy od wartości współczynnika  $k_I$ , a ponieważ przy wyznaczeniu liczby cykli powodujących całkowite zniszczenie próbek  $N_z$  nie można pomylić się znacząco, dlatego głównym zadaniem jest zgromadzenie danych o wartości współczynnika  $k_I$ , przy ustalonych warunkach badania i wymiarach próbek. Wydaje się, że wartości tego współczynnika będą rosły wraz ze wzrostem liczby cykli  $N_z$ .

Ocena mrozoodporności  $N_{kr}$  w warunkach przyspieszonego oddziaływania może być zastosowana do oceny tego samego materiału eksponowanego w warunkach naturalnych oddziaływań środowiska w rozpatrywanym regionie  $N'_{kr}$ . Po uwzględnieniu podobieństwa procesów destrukcji tego samego materiału w warunkach przyspieszonego i normalnego oddziaływania mrozu, a także teorii badań przyspieszonych (Kartaszov, 1980) można zapisać:

$$N'_{kr} = N_{kr} \frac{b}{b'}, \quad (2)$$

gdzie  $b$  i  $b'$  są szybkościami kumulowania uszkodzeń w warunkach przyspieszonego i normalnego oddziaływania mrozu. Jeżeli znana jest liczba cykli zamrażania-rozmrażania betonu w warunkach naturalnych przez 1 rok (wyznaczona na podstawie wieloletnich obserwacji liczby przejścia temperatury powietrza przez 0°C w danym regionie) wówczas można wyznaczyć trwałość betonu.

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie analizy wyników badania odporności próbek betonu na cykliczne zamrażanie-odmrażanie wyjaśniono, że zmiana w czasie wskaźników destrukcji, takich jak ubytek masy, obniżenie wytrzymałości następuje w dwóch etapach. Pierwszy etap charakteryzuje się mniejszą szybkością kumulowania uszkodzeń i dłuższym czasem trwania w stosunku do drugiego.

Stwierdzono, że moment przejścia procesu destrukcji materiału z pierwszego do drugiego etapu wyznacza krytyczny poziom kumulowania uszkodzeń, który może być przyjęty jako ocena mrozoodporności materiałów. Wskazano sposoby wyznaczenia tego kryterium. Zaproponowano metodę oceny mrozoodporności, w której rejestruje się jedynie moment pełnego zniszczenia próbek betonowych. Przyjęcie tej metody jako metody standardowej wymaga dopracowania, polegającego na określeniu przyspieszonych warunków zamrażania-rozmrażania próbek betonu oraz ich wymiaru, a także na ustaleniu wartości współczynnika uwzględniającego stosunek momentu pełnego zniszczenia próbki do momentu osiągnięcia krytycznego poziomu skumulowanych uszkodzeń betonu.

## Literatura

- Ajvazian S. A., Enfkov I. S., Mešalkin L. D. (1985). Prikladnaja statistika: Issledovanie zavisimostej. *Finansy i Statistika*, Moskwa.
- Fagerlund G. (1997). Trwałość konstrukcji betonowych. *Arkady*, Warszawa.
- Hlevčuk V. R., Artyknaev E. T. (1979). Teplotehničeskije i zvukoizoljacionnye kačestva ogranedeniji domov povyszennoj etažnosti. *Stroizdat*, Moskwa.
- Jasiczak J., Kucz M. (2007). Aspekt mrozoodporności w betonach drenażowych. *Materiały 57 Konferencji Naukowej „Krynica 2007”*, Krynica-Zdrój 2007, T. 3, 77-84.
- Jóźwiak J., Podgórski J. (2001). Statystyka do podstaw. *PWE*, Warszawa.
- Kartaszov G. D. (1980). Predvaritel'nye issledovanija v teorii forsirovannyh ispytanij. V *zb. seminara po nadežnosti i progressivnym metodom kontrolia kačestva promyslennyh izdelij*. Moskwa 1980, 62-104.
- Korenfok A. G., Dumanova L. S. (1992). Oteičitelnaja osobennost' morozosolevoj korrozii. *Izv, udob. Stroitel'stvo*, 4/1992, 57-60.
- Kosior-Kazberuk M., Jezierski W. (2004). Surface scaling resistance of concrete modified with bituminous addition. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. X, No. 1/2004, 25-30.
- Lelusz M. (2003). Identyfikacja zjawisk zachodzących w strukturze porowatości betonów cementowych w procesie ich cyklicznego zamrażania i rozmrażania. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budownictwo*, Białystok, Z. 23, 145-155.
- Nikitsin V., Bołtryk M., Backiel-Brzozowska B. (2003). Prognozowanie mrozoodporności ceramiki ściennej z uwzględnieniem składu masy ceramicznej oraz warunków wypału. *Ceramika/Ceramics*, Vol. 80, 593-589.
- Valenza J., Scherer G. W. (2006) Mechanism for salt scaling. *Journal of American Ceramic Society*, 89(4)/2006, 1161-1179.
- Zelikin S. I., Zemljanskij W. N., Ciwilew R. P. (1975). Issledovanie kinetyki razruszenija materialov rentgenografičeskim metodom. *Steklo i ceramika*, Nr 6, 23-24

### EVALUATION OF CONCRETE FROST RESISTANCE ON THE BASIS OF CRITICAL LEVEL OF CUMULATED DAMAGES

**Abstract:** Frost resistance of building materials is considered to be the main indicator of their durability. The analysis of degradation process of building materials subjected to cyclic freezing and thawing showed that the damages development in time runs according to two stages. The first stage is characterised by a slower damages accumulation process and a longer duration in comparison with the second stage. It was shown the time of passage the material degradation process from the first stage to the other one assigns the critical level of damages accumulation, which can be assumed for evaluation of material frost resistance. The methods to determine this criterion were proposed.