



BADANIA I STUDIA – RESERCH AND STUDIES

**Joanna Babińska\***

## **BADANIA POROWATOŚCI W OCENIE MROZODPORNOŚCI BETONÓW NAPOWIETRZANYCH**

W artykule omówiono ogólnie zależność pomiędzy porowatością betonu a jego mrozoodpornością oraz sposoby oceny jego napowietrzenia metodą mikroskopową. Przedstawiono także wyniki badań własnych mrozoodporności betonów wykonanych na kruszywie węglanowym, ocenianej metodami bezpośrednimi, oraz skonfrontowano je z wynikami pomiarów charakterystyki porowatości metodą mikroskopową według PN-EN 480-11. Badania te wskazują, że nawet jeżeli beton nie spełnia przyjmowanych powszechnie wymagań odnośnie do struktury jego porowatości, może być mrozoodporny.

### **1. Porowatość betonu**

Podstawą mechanizmu tzw. mrozowej destrukcji betonu jest fizyczne oddziaływanie zamarzającej w porach betonu wody, zwiększającej podczas przemiany fazowej woda-lód swoją objętość o około 9%. Efektem takiego oddziaływania mogą być uszkodzenia powodujące osłabienie wewnętrznej struktury betonu, powierzchniowe łuszczenie lub odpryski (pop outs).

Na całkowitą porowatość betonu składają się trzy elementy:

- porowatość kruszywa,
- porowatość zaczynu cementowego,
- porowatość strefy kontaktowej kruszywo/zaczyn.

Porowatość kruszywa jest cechą wyrobu sprawdzaną pośrednio, poprzez badania nasiąkliwości, na etapie badań wstępnych typu. Porowatość zaczynu cementowego i strefy kontaktowej stanowi cechę wynikającą ze składu mieszanki, w tym stosunku w/c (a więc cechę niejako „projektowaną”), oraz sposobów i efektywności jej zagęszczania. Zmienia się ona stopniowo w trakcie dojrzewania betonu, zależnie od warunków środowiskowych, w jakich ono przebiega.

---

\* dr – Zakład Betonu ITB

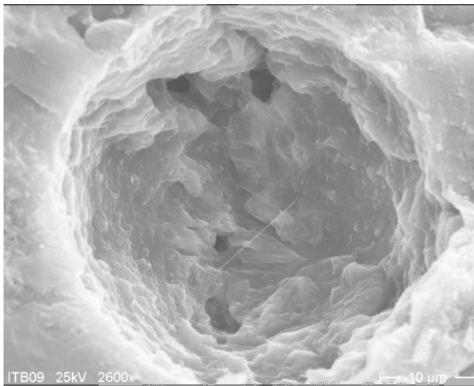
Porowatość kruszywa naturalnego, które w betonie zajmuje około 70% objętości, jest niewielka w stosunku do porowatości całego zaczynu cementowego i zazwyczaj nie przekracza kilku procent. Porowatość zaczynu cementowego może wynosić nawet kilkadziesiąt procent i jest cechą determinującą mrozoodporność betonu (przy założeniu, że mrozoodporne są kruszywa) [1].

Na właściwości betonu ma wpływ zarówno całkowita objętość porów, jak i rozkład ich wymiarów, równomierność rozłożenia oraz kształt [1–4].

Przyjmuje się, że:

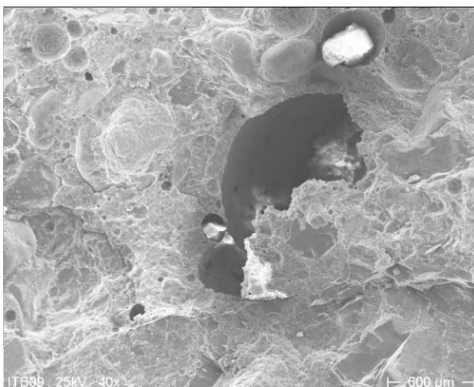
- Pory żelowe oraz małe i średnie pory kapilarne do wielkości  $0,05 \mu\text{m}$  nie wpływają na trwałość betonu w aspekcie oddziaływania mrozu, a woda w nich obecna praktycznie nie zamiera w warunkach zimowych (panujących w umiarkowanej strefie klimatycznej).

- Ciągłe kapilarne pory o wielkości do  $10 \mu\text{m}$  wpływają negatywnie na mrozoodporność. Połączone są ze sobą w system nieregularnych pustek o zróżnicowanych kształtach, przypadkowo rozmieszczonych w zaczynie cementowym [3].



*Rys.1. Regularny por powietrzny o wielkości około  $30 \mu\text{m}$  – w jego środku widoczne niewielkie pory kapilarne, o średnicy nie przekraczającej  $5 \mu\text{m}$*

*Fig. 1. Regular air pore (size about  $30 \mu\text{m}$ ) – in the middle of the pore the small capillary pores (diameter not exceeding  $5 \mu\text{m}$ ) are visible*



*Rys.2. Nieregularny por powietrzny o wielkości około  $1200 \mu\text{m}$*

*Fig. 2. Irregular air pore (size about  $1200 \mu\text{m}$ )*

- Drobne, regularnie rozmieszczone pory powietrzne o wielkości między 10  $\mu\text{m}$  a 300  $\mu\text{m}$ , podwyższają mrozoodporność (rys.1). Pory powietrzne wprowadzane celowo do zaczynu cementowego charakteryzują się zazwyczaj kształtem sferycznym, obłym i nie są ze sobą połączone. Często można je zauważyć nieuzbrojonym okiem, a do ich obserwacji wystarcza mikroskop stereoskopowy, który pozwala na powiększenie rzędu 50–100x. Swoją rolę spełniają tylko wówczas, gdy są regularnie rozmieszczone, tak aby przerywać ciągłość porów kapilarnych. Niezamrażająca woda wyciskana z porów kapilarnych jest wówczas w stanie dotrzeć do najbliższej pustki, bez generowania nadmiernego ciśnienia hydraulicznego mogącego prowadzić do zniszczenia betonu.

- Drobne pory rozmieszczone nieregularnie i duże pory o średnicy większej niż 300  $\mu\text{m}$  (rys.2) nie chronią betonu przed działaniem mrozu, ale pogarszają jego parametry wytrzymałościowe (przyjmuje się, że wzrost zawartości powietrza o 1% powoduje spadek wytrzymałości na ściskanie o około 5,5% [5]). Pory powietrzne powstałe przypadkowo, na skutek intensywnego mieszania i niewłaściwego zagęszczenia, mogą mieć wymiary nawet do kilkunastu milimetrów.

W tablicy 1 przedstawiono krótką orientacyjną charakterystykę porów, ich genezę i właściwości wody porowej w nich zawartej (wg opracowania [4]).

Tablica 1. Orientacyjna struktura porów w betonie [4]

Table 1. Indicative pore structure of concrete

Nazwa	Średnica	Geneza	Właściwości wody porowej
Pory powietrzne	>10 $\mu\text{m}$	Przypadkowo lub celowo wprowadzone pęcherzyki powietrzne, porowate kruszywo	Woda swobodna, łatwo zamarzająca i odparowująca w warunkach eksploatacyjnych
Duże pory kapilarne	0,05–10 $\mu\text{m}$	Pory powstałe w wyniku odparowania nadmiaru wody zarobowej w zaczynie, typowe pory w kruszywie ze zwartych skał naturalnych	Woda swobodna, łatwo zamarzająca i odparowująca, stosunkowo szybko przemieszczająca się wskutek sił kapilarnych
Małe pory kapilarne	10–50 nm	Pory powstałe z nadmiaru wody zarobowej w zaczynie, pory szczelinowe w kruszywie	Wzrost sił adsorpcji objawiający się tendencją do kondensacji wody i wyraźnego obniżenia temperatury zamarzania
Pory żelowe	<10 nm	Mikropory stanowiące ok. 28% objętości zhydratyzowanego cementu (od 1,5–4 nm), małe pory kapilarne, pory w strefie kruszywo/zaczyn	Silna i bardzo silna adsorpcja, zdolność do całkowitego wypełnienia się porów wodą wskutek kondensacji, obniżenie temperatury zamarzania wody poniżej $-20^{\circ}\text{C}$

Pory w zaczynie cementowym powstają jako rezultat przyjętych proporcji składników (w tym stosunku w/c), sposobu mieszania i zagęszczania oraz warunków dojrzewania betonu. Ocenia się, że w zaczynie o w/c = 0,60, w którym stopień hydratacji cementu

osiągnął około 70%, produkty hydratacji zajmują około 42%, cement niehydratyzowany około 10%, woda wypełniająca pory żelowe około 12%, woda w porach kontakcyjnych około 4,5%, a woda w porach kapilarnych około 31% [1].

Obecnie przyjmuje się, że istnieją dwie przeciwstawne drogi uzyskania betonów mrozoodpornych:

- wykonanie kompozytu o szczelnej, stosunkowo nieporowatej strukturze,
- napowietrzenie betonów w celu utworzenia matrycy z regularnie rozłożonymi drobnymi powietrznymi porami.

W pierwszym przypadku szczelna struktura jest uzyskiwana dzięki niskiej wartości w/c (co umożliwiają superplastyfikatory nowej generacji) i niektórym dodatkom mineralnym typu II, w drugim przypadku pory powietrzne są wprowadzane do zaczynu cementowego w wyniku oddziaływania substancji powierzchniowo czynnych. Ich rola polega na tworzeniu molekularnej warstwy obniżającej napięcie powierzchniowe wody, dyspersji powietrza w całej mieszance i stabilizacji jego położenia. Powoduje to zmniejszenie energii potrzebnej do rozbicia większych porów powietrznych na mniejsze.

Z badań [6] wynika, że betony o szczelnej strukturze, a więc teoretycznie mrozo odporne, czasami nie przechodzą pozytywnie bezpośrednich badań trwałościowych. Związane jest to z faktem, że zmniejszony stosunek w/c powoduje nie tylko zmniejszenie liczby porów kapilarnych, ale też i ich średnicy. Pory kapilarne o mniejszej średnicy (ale większej niż  $0,05 \mu\text{m}$  –  $0,1 \mu\text{m}$ ) potrzebują mniej wody do krytycznego nasączenia, powodującego w przypadku zamarzania ciśnienie, które może przekroczyć nawet stosunkowo wysoką wytrzymałość betonu na rozciąganie [1].

## 2. Metody badania i charakteryzowania porowatości betonów

Metody badań porowatości można podzielić na dwie grupy:

- metody, które pozwalają na ocenę porowatości całkowitej lub innej cechy bezpośrednio z nią związanej,
- metody, które pozwalają również na określenie rozkładu porów.

Przydatność wyników uzyskiwanych przy stosowaniu metod z pierwszej grupy (do których można zaliczyć badania nasiąkliwości) jest dla przewidywania potencjalnej mrozoodporności betonu niewielka. Z tego względu, mimo że nasiąkliwość w kontekście trwałości jest nadal parametrem wymaganym przez specyfikujących, metody badawcze oparte na pomiarze porowatości całkowitej nie będą tu dalej omawiane.

Badania rozkładu porów w betonie ze względu na:

- szeroki zakres rozmiarów porów,
- różną porowatość jego składników (zaczynu, kruszywa, strefy kontaktowej), powodującą niejednorodność struktury,

budzą niekiedy wątpliwości od strony metodologicznej, szczególnie, jeżeli chodzi o pory najmniejsze: drobne kapilarne i żelowe, częściowo lub całkowicie wypełnione wodą. Do charakteryzowania tego typu porowatości wykorzystuje się niekiedy porozymetrię rtęciową, dzięki której można badać rozkład porów o wielkości w zakresie od

3,5 nm do 7500 nm. Badania przeprowadzane porozymetrią rtęciową na materiałach cementowych są jednak kontrowersyjne [7],[8], ponieważ:

- do interpretacji wyników badań wymagane jest przyjęcie uproszczonego obrazu porów,
- kąt zwilżania zaczynu przez rtęć jest różny, w zależności od wieku i składu próbki, co powoduje uzyskiwanie nie w pełni miarodajnych wyników badań i przesunięcie rozkładu w stronę mniejszych średnic porów.

Największy problem w badaniach porozymetrycznych wiąże się jednak z reprezentatywnością próbki – do badań może być stosowana próbka materiału o objętości nie większej niż kilka  $\text{cm}^3$ , czyli o objętości porównywalnej z objętością ziaren kruszywa grubego. Badana próbka jest więc zazwyczaj niereprezentatywna, a wyniki mogą ewentualnie charakteryzować rozkład porów w zaprawie wyizolowanej z betonu, a nie betonu.

W przeciwieństwie do drobnych porów kapilarnych i żelowych, stosunkowo łatwo można zbadać rozkład porów powietrznych, o rozmiarach większych niż  $\pm 10 \mu\text{m}$ . Badania takie przeprowadza się za pomocą mikroskopii klasycznej w połączeniu z analizą obrazu, na przykład według normy PN-EN 480-11 [9], dotyczącej badań efektywności domieszek do betonu.

### 3. Badanie porowatości według normy PN 480-11

Badanie rozkładu porów powietrznych jako metody pośredniej oceny potencjalnej mrozoodporności zaczęło być rozwijane w latach czterdziestych i pięćdziesiątych XX wieku. Do metod normowych zostało wprowadzone normą amerykańską ASTM C 457 [10] w 1990 r. W Europie badania te wprowadziła w roku 1998 norma EN 480-11, dotycząca kontrolnego badania efektywności działania domieszek, wykonywanego na betonie wzorcowym. Dokumentu normowego obejmującego badania betonów stosowanych w praktyce nie ma do dnia dzisiejszego, podobnie jak brakuje normy zawierającej wymagania odnośnie do rozkładu porów w betonie, od którego wymaga się mrozoodporności.

Zakres wymienionej wcześniej normy obejmuje metodę oznaczania struktury porów powietrznych w próbce stwardniałego betonu wzorcowego, zawierającego wprowadzone powietrze. Struktura porów powietrznych jest charakteryzowana za pomocą następujących parametrów:

- całkowitej zawartości powietrza,
- powierzchni właściwej systemu porów powietrznych,
- wskaźnika rozmieszczenia,
- rozkładu wielkości porów powietrznych,
- zawartości mikroporów  $< 300 \mu\text{m}$ .

Wykonanie badania polega na tym, że próbki stwardniałego napowietrzonego betonu przecina się prostopadle do pierwotnej, odsłoniętej górnej powierzchni, a następnie się je szlifuje i poleruje w celu uzyskania płaskiej powierzchni zglądu, odpowiedniej do badań mikroskopowych. Po wypełnieniu występujących na powierzchni zglądu porów

substancją kontrastującą, strukturę porów powietrznych bada się, prowadząc obserwacje wzdłuż serii równoległych linii pomiarowych, rejestrując liczbę porów powietrznych przeciętych przez linie pomiarowe oraz długość każdej cięciwy poru. Analiza matematyczna zarejestrowanych danych umożliwia opisanie systemu porów powietrznych za pomocą wymaganych parametrów.

Poszczególne parametry oblicza się ze wzorów:

Całkowita długość linii pomiarowej  $T_{tot}$  (powinna wynosić co najmniej 2400 mm)

$$T_{tot} = T_s + T_a, \text{ mm}$$

gdzie:  $T_s$  – całkowita długość linii pomiarowej przechodzącej przez fazę stałą, mm,

$T_a$  – całkowita długość linii pomiarowej przechodzącej przez pory, mm

Całkowita zawartość powietrza  $A = \frac{T_a \cdot 100}{T_{tot}}$ , %

Całkowita liczba mierzonych cięciw  $N = \sum C_i$

Powierzchnia porów  $\alpha = \frac{4 \cdot N}{T_a}$ ,  $\text{mm}^{-1}$

Stosunek objętości zaczynu/objętości powietrza  $R = \frac{P}{A}$

Wskaźnik rozmieszczenia porów  $\bar{L} = \frac{P \cdot T_{tot}}{400 \cdot N}$ , mm – jeżeli  $P/A \leq 4,342$

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[ 1,4 \left( \frac{P}{A} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} + 1 \right] \text{ – jeżeli } P/A > 4,342$$

Norma dopuszcza także stosowanie innych metod analizy obrazu, na przykład metody zliczeń punktowych, pod warunkiem wykazania, że istotnie uzyska się takie same wyniki dotyczące parametrów porów powietrznych, jak za pomocą metody normowej.

Metoda opisana w PN-EN 480-11 jest odpowiednia do stosowania wyłącznie na próbkach stwardniałego betonu – gdy znany jest dokładnie skład wyjściowy mieszanki betonowej, a próbki są reprezentatywne dla tego składu – została jednak przyjęta do badania charakterystyki porowatości betonów stosowanych w praktyce. Wraz z nią przyjęto także kryteria poprawności ich napowietrzenia. Dodatkowo badania mikroskopowe pozwalają na zaobserwowanie anomalii strukturalnych, które nie mając wpływu na wynik badania, powodują brak skutecznego przeciwmrozowego działania porów powietrznych. Do takich anomalii należy na przykład nierównomierny rozkład porów lub ich „butelkowy” kształt.

Stosowanie metody rozkładu porów do pośredniej oceny potencjalnej mrozoodporności może napotykać pewne problemy:

- w badaniach betonów o nieznannej recepturze trudność stanowi oszacowanie objętości zaczynu cementowego – aby ją ocenić, trzeba stosować metody analizy chemicznej pozwalającej na odtworzenie składu,
- przygotowanie próbki – odpowiednie jej skontrastowanie oraz wypolerowanie – decyduje o jakości wyników w przypadku automatycznej analizy obrazu,
- statystyczne parametry rozkładu porów są obliczane na podstawie przyjętych uproszczonych modeli porów i na skutek tego mogą dawać wyniki obarczone błędem [1].

#### **4. Bezpośrednia ocena mrozoodporności betonu metodami normowymi**

Norma PN-EN 206-1 [11], w przeciwieństwie do normy PN-B-06250:1988 [12], nie zawiera wymagania dotyczącego badania mrozoodporności betonów narażonych na agresywne oddziaływanie czynników charakteryzujących klasy ekspozycji od XF1 do XF4. W jej ujęciu trwałość betonu powinien zapewnić odpowiedni skład (mrozoodporne kruszywa, minimalna zawartość cementu, maksymalny stosunek w/c), minimalna klasa wytrzymałości na ściskanie oraz zawartość powietrza: co najmniej 4% (dla klas od XF2). Te parametry powinny pozwolić na uzyskanie odpowiedniej struktury betonu, szczelnej w zakresie drobnych porów kapilarnych z jednej strony, ale zawierającej również odpowiednią liczbę porów powietrznych z drugiej. Wymaganie dotyczące mrozoodporności nie zostało zawarte w normie PN-EN 206-1 również z tego względu, że brak jest konsensusu wśród krajów Unii co do metody badawczej – wiadomo powszechnie, że wszystkie metody bezpośredniej oceny mrozoodporności betonu są obarczone znacznymi błędami, związanymi ze słabym odzwierciedleniem realnych warunków ekspozycji betonu i mniej lub bardziej kontrowersyjnymi kryteriami oceny wyników badań.

Podejście normy PN-EN 206-1 do trwałości betonu budzi jednak nieufność opracowujących specyfikacje techniczne i wielu badaczy. Wątpliwości mają swoje źródło przede wszystkim w założeniu mrozoodporności kompozytu bez uwzględnienia kompatybilności poszczególnych jego składowych (domieszek i cementu, domieszek i dodatków, rzadkich przypadków kruszywa mrozoodpornego w badaniach, ale nie-trwałego w betonie). Wiadomo na przykład, że niektóre dodatki typu II mogą źle wpływać na sposób napowietrzenia mieszanki betonowej – dotyczy to między innymi popiołów lotnych.

Na trwałość betonu wpływa w znaczący sposób także wykonawstwo (źle zawibrowany czy pielęgnowany beton, mimo idealnego składu, nie będzie trwały).

Obecnie większość opracowujących specyfikacje techniczne w Polsce wymaga potwierdzenia jakości dostarczonego betonu w badaniach mrozoodporności:

- bezpośrednich, korzystając z metod zawartych w normie PN-B-06250:1988 (dla klasy ekspozycji XF1, XF3) i w normie PKN-CEN/TS 12390-9:2007 (Testing hardened concrete – Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling – metoda wzorcowa – slab test) [13],
- pośrednich, poprzez badania nasiąkliwości.

Jednak coraz częściej pojawia się także wymaganie badania rozkładu porów powietrznych (w betonach napowietrzonych).

W niektórych krajach metody badania metodą pośrednią mikroskopową zgodnie z PN-EN 480-11 są już wykorzystywane do ustalania wymagań dla betonów w kasach ekspozycji XF (tabl. 1) [14], [15], w innych znajdują się na etapie opracowywania. W Polsce tym zagadnieniem zajmują się pojedyncze ośrodki [16], [17], ale powoli wymagania odnośnie do rozkładu porów zaczynają być także wprowadzane do specyfikacji technicznych [18].

Tablica 2. Wymagania dotyczące mrozoodporności w różnych krajach europejskich – wg [14]  
Table 2. Requirements for frost resistance in various European countries [14]

Norma	Wymaganie	Klasa ekspozycji mrozowej			
		XF1	XF2	XF3	XF4
EN 206-1	min. zawartość powietrza w mieszance, %	–	4,0	4,0	4,0
PN-B-06265	jw.	jw.	jw.	jw.	jw.
Norma austriacka ÖNORM B 4710-1	min. zawartość powietrza w mieszance, %	–	2,5	2,5	4,0
	min. zawartość mikroporów < 300 µm	–	1,0	1,0	1,8
	max. wskaźnik rozmieszczenia $\bar{L}$ , mm	–	–	–	1,8
Norma duńska DS 2426	min. zawartość powietrza w mieszance, %	–	4,5	4,5	4,5
	min. zawartość powietrza <i>A</i> w stwardniałym betonie, %	–	3,5	3,5	3,5
	max. wskaźnik rozmieszczenia $\bar{L}$ , mm	–	0,20	0,20	0,20
	odporność betonu na zniszczenia powierzchniowe (określana metodą Boras)	–	dobra	dobra	dobra



Mimo braku wymagań w polskich normach przedmiotowych, w literaturze międzynarodowej można znaleźć informacje na temat zarówno wartości granicznych dla kluczowych parametrów rozkładu porów, jak też dyskusje na temat wpływu różnych parametrów betonu na charakter porów powietrznych [19]. Najczęściej przyjmowanym parametrem do oceny mrozoodporności betonów napowietrzanych jest rozstaw pęcherzyków  $\bar{L}$ , który – jak się powszechnie przyjmuje – powinien być nie większy niż 0,2 mm dla betonów, które mają być mrozoodporne. Równie ważnym parametrem jest minimalna zawartość mikroporów < 300  $\mu\text{m}$  – w przypadku betonów mrozoodpornych powinna ona wynosić przynajmniej 1,0%.

## 5. Badania własne

W ramach prac nad trwałością kruszyw węglanowych w betonach wykonano badania mrozoodporności metodami bezpośrednimi i skonfrontowano je z wynikami badań porowatości metodą mikroskopową według PN-EN 480-11 (badania wykonano w Instytucie Podstawowych Problemów Technicznych). Wśród badanych betonów znajdowały się dwa, w których kruszywem grubym był dolomit (betony D2-IV i D4-IV), i jeden z kruszywem wapiennym (z wapieniem dolomitycznym W-IV). W tablicy 3 podano skład betonów, a w tablicy 4 ich wytrzymałość na ściskanie i nasiąkliwość. Betony zaprojektowano tak, aby spełniały minimalne wymagania PN-EN 206-1 dla klasy ekspozycji XF4 (stosunek w/c < 0,45, zawartość cementu > 340  $\text{kg}/\text{m}^3$ , zawartość powietrza > 4% obj.). Beton D4-IV różnił się od pozostałych stosunkiem w/c.

Tablica 3. Skład betonów

Table 3. Composition of concretes

Skład betonu, $\text{kg}/\text{m}^3$	D4-IV	D2-IV	W-IV
Cement (CEM I 42,5R+0,23% $\text{NaSO}_4$ )	360	360	360
Kruszywo drobne	706	835	835
Kruszywo grube 1	608	563	563
Kruszywo grube 2	628	604	604
Woda*	145	162	162
Superplastyfikator	1,5	0,9	0,75
Domieszka napowietrzająca	0,15	0,05	0,05–0,1
Zawartość powietrza w mieszance betonowej, %	4,6	5,1	4,9
w/c	0,40	0,45	0,45
* podczas dozowania wody wprowadzano korektę na nasiąkliwość kruszywa			

Wszystkie betony poddano badaniom mrozoodporności metodą zwykłą według PN-B-06250:1988 i mrozoodporności w obecności środków odladzających zgodnie z PKN-CEN/TS 12390-9:2007 (slab test, metoda powierzchniowego złuszczenia, odpowiadająca tzw. metodzie Borås). Badania mrozoodporności były przerywane po 200 cyklach (mrozoodporność metodą klasyczną) i 56 cyklach (mrozoodporność w soli). W przypadku betonu W-IV badania mrozoodporności metodą klasyczną przerwano wcześniej, po 150 cyklach, ze względu na stosunkowo wysoki spadek wytrzymałości. W tabelicy 5 przedstawiono wyniki badań.

Tablica 4. Wytrzymałość na ściskanie i nasiąkliwość betonów  
Table 4. Compressive strength and water absorption of concretes

Wytrzymałość na ściskanie, MPa			
	D4-IV	D2-IV	W- IV
Po 7 dniach: $f_{cm7}$	55,1	49,2	47,1
Po 28 dniach: $f_{cm28}$	60,7	56,4	59,3
Klasa	C45/55	C40/50	C45/55
Nasiąkliwość, % m			
	5,8	4,5	5,3

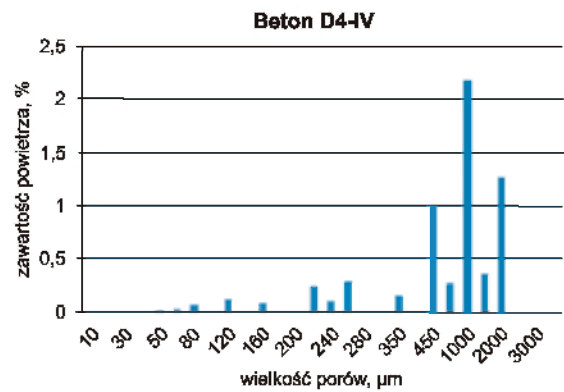
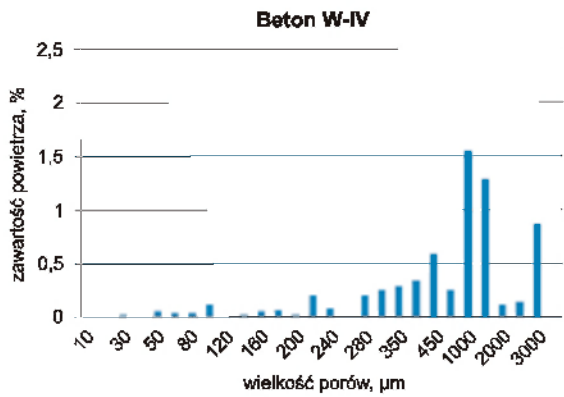
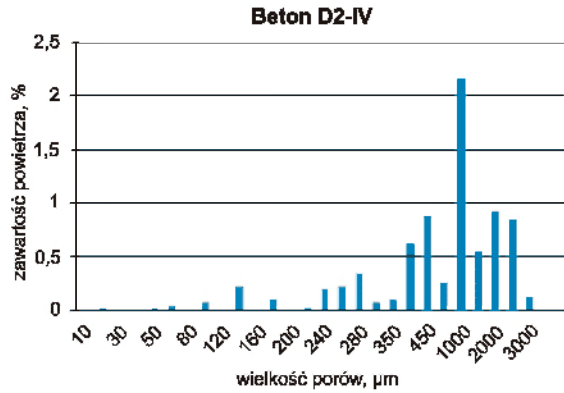
Tablica 5. Wyniki badania mrozoodporności betonów  
Table 5. The results of concretes freeze- thaw tests

Rodzaj betonu	Zawartość powietrza, %	PN-B 06250:1988 spadek wytrzymałości, %	PKN-CEN/TS 12390-9:2007 ubytek masy, %	
Beton W-IV	4,9	16% (po 150 cyklach)	$m_{28}$	$m_{56}$
			0,3	0,6
Beton D2-IV	5,1	1,6% (po 200 cyklach)	0,25	0,3
Beton D4-IV	4,6	9,7% (po 200 cyklach)	0,2	0,2

Do oceny wyników zastosowano kryteria PN-B-06250:1988 i wymagania metody Borås:

- beton bardzo dobrej jakości:  $m_{56} \leq 0,10 \text{ kg/m}^2$ ,
- beton dobrej jakości:  $m_{56} \leq 0,20 \text{ kg/m}^2$  lub  $m_{56} < 0,50 \text{ kg/m}^2$  i  $m_{56}/m_{28} \leq 2$ ,
- beton dopuszczalnej jakości:  $m_{56} \leq 1,00 \text{ kg/m}^2$  i  $m_{56}/m_{28} < 2$ ,
- beton niedopuszczalnej jakości:  $m_{56} > 1,00 \text{ kg/m}^2$  i  $m_{56}/m_{28} > 2$ .

Wszystkie betony były trwale w warunkach oddziaływania cykli zamrażania/odmrażania bez środków odladzających (przy założeniu F150). W przypadku oddziaływania środków odladzających beton D4-IV i beton D2-IV można było zaklasyfikować do betonów dobrej jakości, podczas gdy beton W-IV do betonów o jakości niedopuszczalnej. Należy przy tym zauważyć, że złuszczenia w przypadku betonu D4-IV zachodziły intensywnie na ziarnach kruszywa, które – jak wykazały badania nie zamieszczone w niniejszej pracy – podczas badania mrozoodporności w roztworze soli zgodnie z PN-EN 1367-1, wykazywały ubytek masy rzędu 10%.



Rys 3. Rozkład porów oznaczony metodą mikroskopową według PN-EN 480-11  
 Fig. 3. Pore size distribution of the concretes according to PN-EN 480-11

Badania rozkładu porów metodą mikroskopową (rys. 3, tabl. 6) wykazały, że wszystkie badane betony charakteryzują się bardzo złą mikrostrukturą: pęcherzyki powietrza są duże (zawartość  $A_{300}$  jest znacznie mniejsza niż wymagany w niektórych dokumentach 1%), ich powierzchnia jest stosunkowo niewielka (9–10 mm<sup>2</sup>/mm<sup>3</sup>), a wskaźnik rozmieszczenia porów ponad dwukrotnie przewyższa zalecaną wartość 0,2 mm. Uzyskane wyniki wskazują na fakt, że prawidłowe napowietrzenie betonu nie zawsze jest łatwe, mimo uzyskania całkowitej zawartości powietrza na poziomie 5–6%.

Tablica 6. Badania porowatości metodą mikroskopową  
Table 6. Results of the porosity by microscopic analysis

Rodzaj betonu	Całkowita zawartość powietrza A %	Powierzchnia właściwa porów mm <sup>2</sup> /mm <sup>3</sup>	Wskaźnik rozmieszczenia L mm	Zawartość mikroporów A300 %
Beton W-IV	5.27	10.70	0.44	0.55
Beton D2-IV	7.00	9.15	0.44	0.75
Beton D4-IV	5.17	10.83	0.43	0.45

## 6. Podsumowanie i dyskusowanie wyników

Od wielu lat toczy się dyskusja dotycząca diagnostyki betonu pod względem jego mrozoodporności. Z jednej strony norma PN-EN 206-1 takich badań nie wymaga, z drugiej – powszechne są badania mrozoodporności metodami zawartymi w nieaktualnej normie PN-B-06250:1988. Specyfikujący wycofują się powoli z żądania jednocześnie niskiej nasiąkliwości (na poziomie 4%) i napowietrzenia mieszanki betonowej. W specyfikacjach pojawia się coraz częściej wymaganie badania wskaźnika rozmieszczenia porów.

Badania rozkładu porów metodą mikroskopową, ze względu na łatwość i szybkość badania oraz potwierdzoną teoretycznie i praktycznie skuteczność, mogą być podstawą diagnostyki betonów napowietrzanych pod względem ich mrozoodporności. Aby wyniki były rzeczywiście miarodajne, badania powinno się jednak wykonywać na odwiertach – w ten sposób ocenie podlega również wykonawstwo, będące często odpowiedzialne za brak trwałości betonu.

Wyniki badań zamieszczone w niniejszej pracy wskazują na fakt, że nieprawidłowa struktura porów powietrznych niekoniecznie musi skutkować brakiem mrozoodporności betonu. Na trwałość zaczynu cementowego wpływa nie tylko struktura mikroporów powietrznych, ale także wielkość i charakterystyka porów kapilarnych, tak że nawet gdy beton nie spełnia przyjmowanych powszechnie wymagań odnośnie do struktury porowatości, może być mrozoodporny. W związku z tym zawsze powinna zostać zachowana możliwość sprawdzenia mrozoodporności betonu w badaniach bezpośrednich i to ona powinna być decydująca w przypadkach niespełnienia przez beton kryteriów strukturalnych.

## Bibliografia

- [1] Wawrzeńczyk J.: Diagnostyka mrozoodporności betonu cementowego. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2002
- [2] Glinicki M. A.: Właściwe i patologiczne napowietrzanie betonów. *Budownictwo-Technologie-Architektura*, 2, 2004, s. 37–40
- [3] Glinicki M. A., Zieliński M.: Diagnostyka mikrostruktury porów w betonie wbudowanym w konstrukcje i nawierzchnie. IV Konferencja „Dni Betonu – Tradycja i Nowoczesność”, Wisła, 9–11 października 2006, s. 331–338
- [4] Rusin Z.: Technologia betonów mrozoodpornych. Wyd. Polski Cement, Kraków 2002
- [5] Neville A. M.: Właściwości betonu, Wyd. Polski Cement, Kraków 2000
- [6] Fagerlund G.: Frost resistance of high performance concrete – some theoretical considerations, Lund Institute of Technology, 1993
- [7] Praca zbiorowa: Trwałość betonu – metody badań właściwości determinujących trwałość materiału w różnych warunkach eksploatacji. II Sympozjum Naukowo-Techniczne „Cement właściwości i zastosowanie”, Górażdże Cement S.A., Politechnika Krakowska 2008
- [8] Diamond A.: Mercury porosimetry: An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 30, 10, 2000, s. 1517–1525
- [9] PN-EN 480-11:2000 Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie
- [10] ASTM C 457 1990 Standard test method for microscopical determination of parameters of the air – void system in hardened concrete
- [11] PN-EN 206-1 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
- [12] PN-B-06250:1988 Beton zwykły
- [13] PKN-CEN/TS 12390-9:2007 Testing hardened concrete – Part 9: Freeze-thaw resistance – Scaling
- [14] Glinicki M. A.: Europejskie wymagania na beton napowietrzony w klasie środowiska XF. *Drogownictwo*, 3, 2005, s. 86-88
- [15] Glinicki M. A., Cieśla J., Fordoński K.: Zagadnienia trwałości mostów betonowych w normach europejskich, Międzynarodowa Konferencja EKO-MOST 2006, Kielce, 16–17 maja, s. 115–124
- [16] Glinicki M. A., Glinicki A. M., Mikulicki I.: Ocena napowietżenia betonów w nawierzchniach jezdni i parkingów, *Drogi i Mosty*, 1, 2004, s. 5–23
- [17] Józwiak-Niedźwiecka D., Kowalska D.: Ocena parametrów napowietżania betonów w nawierzchniach lotniskowych. Dni Betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Wisła 2008
- [18] Ogólne Specyfikacje Techniczne D-05.03.04 „Nawierzchnia betonowa” GDDKiA, Warszawa 2003
- [19] Pigeon M., Pleau R.: Durability of Concrete in cold climates. *Modern Concrete Technology*, 1995

# THE STUDY OF POROSITY IN THE EVALUATION OF FREEZE–THAW DURABILITY OF AIR-ENTRAINED CONCRETES

## Summary

The article presents a general relationship between the porosity of concrete and its freeze-thaw resistance, and ways of evaluation of the concrete air entrainment using the microscopic method. The article also presents the results of freeze-thaw resistance of concrete containing carbonate aggregates, evaluated using direct methods, which then were confronted with the results of measurements of porosity obtained by microscopic method, according to PN-EN 480-11. These studies indicate that even if the concrete does not meet generally accepted requirements for the structure of its porosity, it may be freeze-thaw resistant.

*Praca wpłynęła do Redakcji 2 XII 2011 r.*