

Dariusz ZAŁOCHA\*

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

## METODA TRAWERSOWA A METODA PUNKTOWA W OCENIE STRUKTURY PORÓW BETONU NAPOWIETRZONEGO

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono porównanie ocen struktury porów w napowietrzonym betonie, uzyskanych z pomocą dwóch odrębnych metod: trawersowej i punktowej. Omówiono zastosowanie automatycznego analizatora obrazu w tego typu badaniach. Przedyskutowano wpływ metody na otrzymywane wyniki oraz na opłacalność mechanizacji systemów pomiarowych.

## LINEAR TRAVERSE AND POINT-COUNT METHODS IN EVALUATION OF AIR-VOID STRUCTURE IN AIR ENTRAINED CONCRETE

**Summary.** In the paper compared are two methods of evaluating air-void structures in air entrained concrete: linear traverse method and modified point-count method. Presented is application of automatic image analysis systems in this kind of investigation. Discussed are effects of these methods on results and economy of exploitation of the measurement system.

### 1. Wstęp

Niszczący wpływ działania mrozu na beton związany jest z rozszerzaniem się wody przy zamarzaniu. Zamarzający w mikroporach lód w sposób nieodwracalny uszkadza strukturę stwardniałego zaczynu cementowego. Uzyskanie betonu, w którym możliwe jest łatwe wydośtawianie się nadmiaru wody do możliwie gęsto rozmieszczonych pustek powietrznych, stanowi główny cel napowietrzania betonu.

Efektywność zabiegu napowietrzania zależy nie tylko od zawartości pustek powietrznych, ale przede wszystkim od sposobu ich rozmieszczenia, tzn. od struktury napowietrzenia, skróto – od struktury porów.

Ocenę struktury porów można uzyskać na podstawie tzw. powierzchni właściwej oraz współczynnika rozstawu porów. Stwierdzono, że w betonie napowietrzonym o zadowalającej jakości powierzchnia właściwa porów powietrznych powinna kształtować się na poziomie ok.  $16-24 \text{ mm}^{-1}$ . Wartość ta niekiedy dochodzi do  $32 \text{ mm}^{-1}$ , [1].

---

\* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Janusz Kasperkiewicz.

Współczynnik rozstawu porów (ang. *Spacing factor*), oznaczany tradycyjnie jako  $\bar{L}$ , interpretowany jest jako średnia odległość dowolnego punktu w zaczynie cementowym od najbliższej pustki powietrznej. Obecnie zaleca się zazwyczaj aby współczynnik ten wynosił poniżej 200  $\mu\text{m}$ , [1].

## 2. Opis metod oceniania struktury porów powietrznych

Powszechnie znanym dokumentem dotyczącym pomiaru i oceny struktury porów powietrznych jest amerykańska norma ASTM C-457, [2], zaakceptowana także w wielu innych krajach poza USA. Norma amerykańska zawiera opis dwóch podstawowych metod pomiaru, tzw. metodę trawersy liniowej (ang. *linear traverse method*) i zmodyfikowaną metodę punktową (ang. *modified point-count method*), a także opisy aparatury, sposobu przygotowania próbek betonowych i procedury realizacji pomiaru. W dalszej części artykułu, dla uproszczenia, metodę trawersy liniowej nazwano metodą trawersową, a zmodyfikowaną metodę punktową – metodą punktową.

Metoda trawersowa polega na przesuwaniu odpowiednio przygotowanego zglądu betonowego pod mikroskopem wzdłuż wirtualnych równoległych linii, rozmieszczonych na całej powierzchni próbki. Całkowita długość wszystkich linii pomiarowych nie może być mniejsza niż wymagana przez normę minimalna długość trawersy, [2]. Zliczaniu podlega liczba oraz łączna długość przecięć trawersy (tzw. cięciw) z porami powietrznymi. Podstawowe parametry struktury porów określane są za pomocą wzorów:

$$\bar{L} = \frac{P}{400n} \quad \text{gdy} \quad \frac{P}{A} \leq 4,342$$

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

$$\alpha = \frac{4}{\bar{l}}, \quad A = 100n\bar{l}, \quad \bar{l} = \frac{T_a}{N}, \quad n = \frac{N}{T}$$

Poszczególne symbole oznaczają tu:

$p$  – procentowa zawartość zaczynu cementowego w betonie;

$A$  – całkowita zawartość powietrza w [%];

$\alpha$  – powierzchnia właściwa porów powietrznych w [ $\text{mm}^{-1}$ ];

$\bar{l}$  – średnia długość przecięcia trawersy z porami powietrznymi w [mm];

T – całkowita długość linii trawersowej w [mm];

T<sub>a</sub> – całkowita długość linii pomiarowej przechodzącej przez pory powietrzne w [mm];

n – średnia liczba porów przypadająca na jednostkę długości w [mm<sup>-1</sup>];

N – liczba zauważonych cięć.

W metodzie punktowej procedura postępowania jest podobna, a specyficznym elementem jest siatka punktów rozmieszczonych w równej odległości od siebie na całej długości trawersy. Zliczaniu podlega, podobnie jak w poprzedniej metodzie, liczba przecięć trawersy z porami powietrznymi oraz liczba punktów przypadających na pory powietrzne. Obie te wielkości nie są równoważne, gdyż np. na przecięciu pora z linią trawersową może znajdować się więcej niż jeden punkt siatki pomiarowej. Współczynnik rozstawu i powierzchnię właściwą porów wyznacza się za pomocą tych samych wzorów, co w metodzie trawersowej, zmianie ulega jednakże sposób wyznaczania niektórych danych pomocniczych:

$$A = 100 \frac{S_v}{S_t}, \quad \bar{l} = \frac{A}{100n}.$$

Dwa nowe symbole oznaczają tu:

S<sub>v</sub> – liczba punktów siatki pomiarowej przypadających na pory powietrzne;

S<sub>t</sub> – całkowita liczba punktów siatki pomiarowej.

Pomimo stosowania podobnych procedur, wyniki badań tej samej próbki betonowej otrzymywane za pomocą obu opisanych metod mogą się różnić. Celem niniejszego artykułu jest porównanie i wykazanie różnic w uzyskiwanych wynikach. W Polsce dopiero w ostatnich latach przystąpiono do prac nad dokumentem opisującym sposób badania struktury porów. Wynikiem tych prac jest norma PrPN EN 480-11, będąca tłumaczeniem normy europejskiej EN 480-11. Metoda badań zawarta w PrPN EN 480-11 opiera się na metodzie trawersowej, nie jest przewidywana możliwość stosowania metody punktowej, [3].

### 3. Opis systemu pomiarowego i przygotowanie próbek

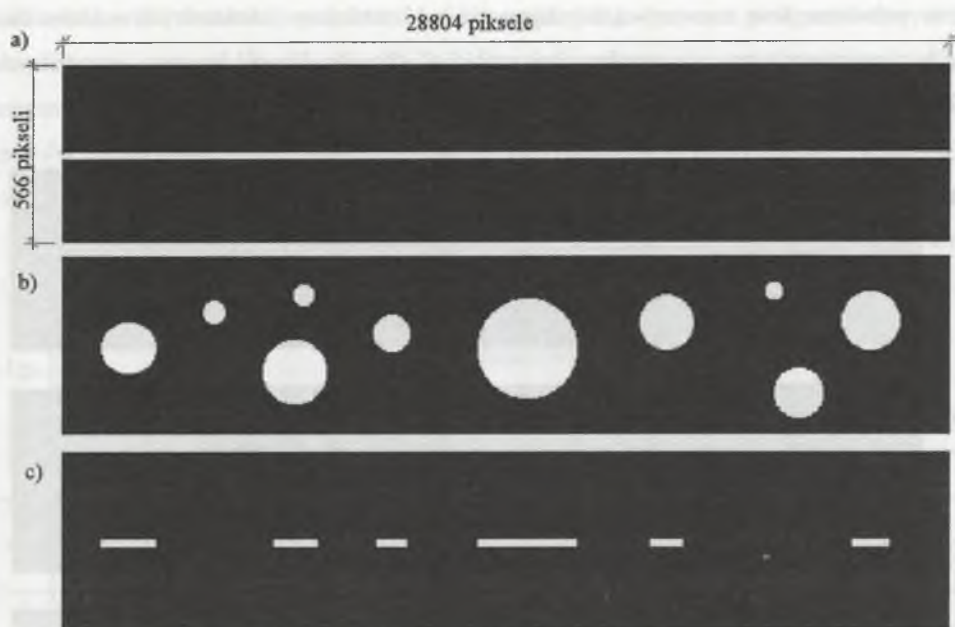
Do pomiarów zastosowano system analizy obrazu wykorzystujący mikroskop stereoskopowy, kolorową kamerę CCD oraz automatyczny stolik skaningowy. Dokładny opis systemu znajduje się w pracy [4]. Przydatność stosowania automatycznych analizatorów obrazu do tego typu badań wykazano w wielu ośrodkach badawczych na całym świecie i poświęcono im wiele publikacji, np. [5, 6].

Próbki używane do pomiarów na analizatorach obrazu muszą zostać poddane wcześniejszej obróbce, w celu wyodrębnienia na powierzchni zglądu interesujących obserwatora obiektów, w tym przypadku porów powietrznych. Pożądany efekt uzyskuje się poprzez wielokrotne szlifowanie powierzchni próbki i wypełnienie porów środkiem kontrastującym. Opis metody przygotowania próbek znajduje się w normie [3], alternatywny przyjęty w badaniach sposób jest zwarty w pracy [4]. Należy podkreślić szczególną wagę staranności w procesie przygotowywania próbek betonowych. Jakość wykonanego zglądu ma zasadniczy wpływ na uzyskane wyniki, [4,7,8].

#### 4. Opis algorytmu

Wykorzystując język programowania wbudowany w system Image Pro Plus stworzono aplikacje pozwalające na automatyczną analizę systemu porów metodami trawersową i punktową. Zasada działania systemu polega na uchwyceniu obrazu pasma próbki betonowej i następnie poddaniu go takim przekształceniom, aby uzyskać obraz przecięć trawersy z porami powietrznymi. W metodzie punktowej odpowiednie operacje służą uzyskiwaniu obrazu zbioru punktów siatki pomiarowej przypadających na pory powietrzne. Pobieranie obrazu odbywa się przy powiększeniu 30 $\times$ , co pozwala przy dostępnej rozdzielczości kamery na rejestrację obiektów o wielkości powyżej 2,76  $\mu\text{m}$ . Na obraz pojedynczego pasma próbki składa się 38 klatek obrazu, każda o rozmiarze 566 $\times$ 758 pikseli, sklejonych ze sobą. Całkowity rozmiar przetwarzanego obrazu wynosi 566 $\times$ 28804 piksele.

Procedura postępowania jest następująca: pobrany obraz kolorowy przekształcany jest na obraz w 8-bitowej skali szarości, a następnie na obraz binarny czarno-biały. Na obrazie binarnym kolor czarny odpowiada wartości piksela 0, natomiast kolor biały – wartości 1. Wynikiem tych operacji jest wyodrębnienie z całości obrazu badanych obiektów, w tym przypadku porów. Na tak uzyskanym obrazie wykonywana jest operacja iloczynu logicznego „AND” z obrazem trawersy liniowej, w wyniku której otrzymujemy obraz cięciw przechodzących przez pory powietrzne – rys. 1. Cięciwy automatycznie poddajemy pomiarom długości i ich liczebności. Dane te stanowią podstawę do wyznaczenia zawartości porów powietrznych, powierzchni właściwej i współczynnika rozstawu porów w metodzie trawersowej.

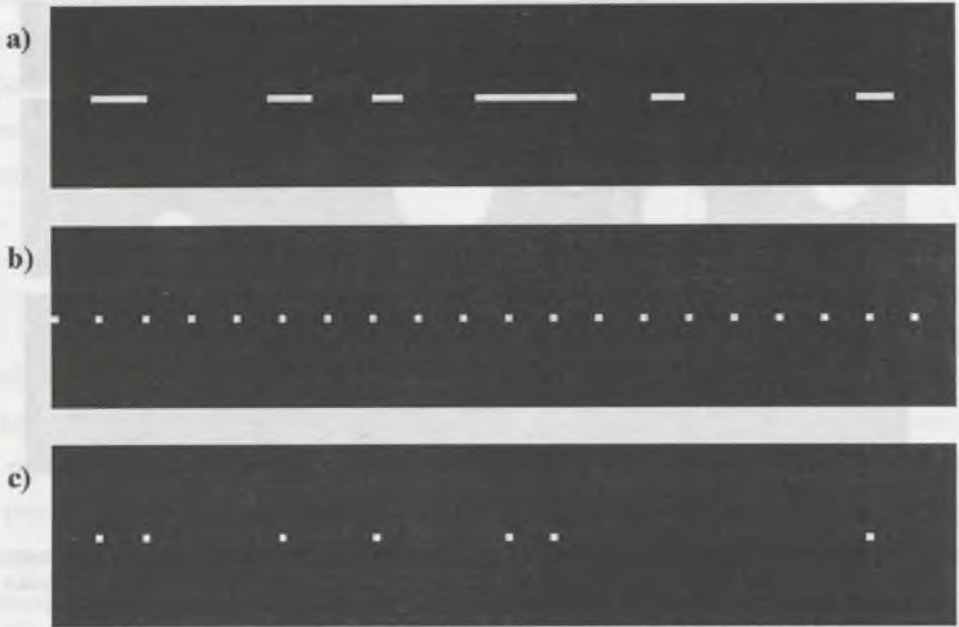


Rys. 1. Procedura generowania obrazu cięciw przecinających pory powietrzne (na rysunku nie zachowano skali): a) obraz linii trawersowej T, b) obraz porów powietrznych P, c) obraz cięciw uzyskany w wyniku przeprowadzenia operacji iloczynu logicznego:  $T \cap P$ . Faktyczna grubość linii trawersowej – 1 piksel

Fig. 1. Procedure of generation of image of chords intersecting air-voids (arbitrary scale) a) image of traverse T, b) image of air-voids P, c) image of chords obtain by logical product:  $T \cap P$ . Actual thickness of the chord line – 1 pixel

W celu zastosowania metody punktowej obraz cięciw przecinających pory poddawany jest również operacji „AND” z obrazem siatki punktów pomiarowych rozmieszczonych wzdłuż trawersy. Wynikiem operacji jest uzyskanie obrazu punktów przypadających na pory powietrzne – rys. 2. Liczba przecięć trawersy przez pory powietrzne uzyskana w wyniku wcześniejszych operacji (rys. 1) i liczba punktów siatki pomiarowej przypadających na pory stanowi podstawę do stosowania wzorów metody punktowej. W celu usunięcia z obrazu szumów zastosowano operację tzw. „otwarcia” za pomocą prostokątnego elementu strukturalnego o rozmiarze 2x2 piksele. Operacja otwarcia usuwa obiekty mniejsze lub równe elementowi strukturalnemu nie zmieniając wymiarów obiektów większych. Wyniki uzyskane w pomiarach eksportowane są do arkusza kalkulacyjnego Excel. Procedurę zbierania i przetwarzania obrazu należy wykonywać aż do osiągnięcia wymaganej łącznej długości trawersy lub wymaganej liczby punktów siatki pomiarowej, [2]. W opisywanych tu badaniach stosowano w każ-

dym pomiarze linię trawersową składającą się z 15 odcinków pomiarowych rozmieszczonych równomiernie na całej powierzchni próbki. Całkowita długość trawersy wynosiła ok. 1200 mm, a liczba punktów siatki pomiarowej wynosiła 1455.



Rys. 2. Procedura generowania obrazu punktów siatki pomiarowej przypadających na pory powietrzne (na rysunku nie zachowano skali): a) obraz cięciw przecinających pory powietrzne C, b) obraz punktów siatki pomiarowej na trawersie S, c) obraz punktów przypadających na pory powietrzne uzyskany w wyniku przeprowadzenia operacji iloczynu logicznego:  $C \cap S$

Fig. 2. Procedure of generation of image of points in air-voids (arbitrary scale) a) image of chords intersecting air-voids C, b) image of points of measurement grid on traverse S, c) image of points in air-voids obtain by logical product:  $C \cap S$

## 5. Opis i wyniki badań

Do pomiarów użyto próbek betonowych o porach wypełnionych pastą cynkową, przygotowanych wg procedury opisanej w [4], oraz próbkę betonową, w której pory wypełniono białym polimerem.

W przypadku próbek z pastą cynkową duży wpływ na jakość wyników ma szybkość przeprowadzania eksperymentu ze względu na wysychanie środka kontrastującego. Problem ten nie występuje w przypadku próbki z polimerem. Celem skoncentrowania się tylko na zagadnieniu wpływu stosowanej metody pomiaru, wyeliminowano pozostałe czynniki, takie jak

zmiennosc oświetlenia lub położenia wyjściowego próbki poprzez wstępne uchwycenie i zapamiętanie wszystkich obrazów. Na tych obrazach wykonano następnie pomiary metodą trawersową i punktową. Badanie struktury porów odbywało się więc dla tych samych fragmentów zglądu betonowego i dokładnie tego samego położenia trawersy dla obu metod. Wyniki badań porównawczych zamieszczono w tablicy 1.

Tablica 1  
Wyniki serii badań struktury porów metodą trawersową i metodą punktową

Lp.	Metoda						Różnica		
	Trawersowa			punktowa			$\bar{L}$	A	$\alpha$
	$\bar{L}$ mm	A %	$\alpha$ $Mm^{-1}$	$\bar{L}$ mm	A %	$\alpha$ $Mm^{-1}$			
1	0,11	5,03	40	0,13	6,80	30	-18%	-35%	25%
2	0,10	5,98	41	0,11	5,98	41	10%	0%	0%
3	0,23	3,50	24	0,27	4,81	18	-18%	-37%	25%
4	0,15	3,25	37	0,19	4,60	26	-26%	-42%	30%
5	0,20	2,76	32	0,27	4,54	20	-35%	-64%	37%
6	0,21	2,96	31	0,22	3,37	27	5%	-14%	13%

gdzie:

$\bar{L}$  - Współczynnik rozstawu porów

A - Całkowita zawartość powietrza

$\alpha$  - Powierzchnia właściwa porów

W tablicy 1 określono różnicę pomiędzy wynikami z metody punktowej i trawersowej jako wartość procentową w stosunku do wyników metody trawersowej.

Tablica 2  
Wyniki badań struktury porów metodą trawersową i metodą punktową pojedynczej próbki betonowej

Lp.	Metoda trawersowa			Metoda punktowa		
	$\bar{L}$	A	$\alpha$	$\bar{L}$	A	$\alpha$
	mm	%	$Mm^{-1}$	mm	%	$mm^{-1}$
1	2	3	4	5	6	7
1	0,22	2,76	30	0,27	4,54	20
2	0,22	2,96	29	0,22	3,37	27
3	0,20	3,38	30	0,24	4,74	22
4	0,18	2,88	35	0,29	6,80	15
5	0,18	2,76	36	0,23	4,40	23

cd. tablicy 2

1	2	3	4	5	6	7
Srednia arytmetyczna	0,20	2,95	32,0	0,25	4,77	21,4
Odchylenie standardowe	0,02	0,26	3,2	0,03	1,25	4,4

Jak widać z przedstawionych wartości, wyniki badań struktury porów wzdłuż tej samej linii trawersowej wykonywane za pomocą różnych metod mogą znacznie odbiegać od siebie. W tablicy 2 przedstawiono porównanie kilku badań wykonanych na tej samej próbce betonowej przy różnym położeniu linii trawersowych. W przypadku badanej w tym eksperymencie próbki betonowej okazało się, że wynik pomiaru współczynnika rozstawu porów ma zasadnicze znaczenie ze względu na zakwalifikowanie betonu jako materiału odpornego lub nieodpornego na działanie mrozu. Wynik otrzymany za pomocą metody trawersowej (0,20 mm) pozwala na twierdzenie, iż badany beton jest mrozoodporny, przeczy jednak temu wynik otrzymany za pomocą metody punktowej (0,25 mm).

## 6. Wnioski

Przedstawione w pracy porównania wskazują na znaczną różnicę wyników uzyskiwanych za pomocą metody trawersowej i punktowej. W badaniach pomiary wykonywane metodą punktową z reguły dawały większą zawartość powietrza niż pomiar za pomocą metody trawersowej; tym samym pociąga to za sobą mniejsze wartości powierzchni właściwej  $\alpha$  oraz większe wartości współczynnika rozstawu porów  $\bar{L}$ .

Pomiary wykonane metodą punktową wykazują także większy rozrzut wyników niż pomiary metodą trawersową. Stąd wniosek iż badania wykonywane wg ASTM C457 [2] mogą dawać różne wyniki w zależności od stosowanej metody. W normie europejskiej i normie polskiej [3] uniknięto wpływu metody na wynik pomiarów dopuszczając do stosowania tylko jedną metodę trawersową.

Metoda punktowa jest mniej uciążliwa w przypadku pomiarów wykonywanych ręcznie, nie ma wówczas potrzeby wykonywania pomiarów długości cięciw. Natomiast w wypadku stosowania automatycznych analizatorów obrazu stosowanie metody punktowej może być rozwiązaniem bardziej złożonym i nieco wydłużającym czas pracy systemu. W porównaniu z metodą trawersową do uzyskania obrazu punktów siatki pomiarowej przypadającej na pory powietrzne konieczne jest przeprowadzenie dodatkowych operacji na obrazach. Zastosowany



w opisanych badaniach pomiar długości obiektu za pomocą analizatora obrazu po jego wcześniejszym wyskalowaniu jest znacznie prostszy i szybszy.

## LITERATURA

1. Neville A. M.: Właściwości betonu, Kraków 2000.
2. ASTM C 457-90: Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 1991, 229-241.
3. PrPN – EN 480-11: Domieszki do betonu, zaprawy i zaczynu. Metody badań. Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie, PKN, 2000.
4. Załocha D., Kasperkiewicz J.: Automatyzacja wyznaczania charakterystyki napowietrzenia betonu w świetle normy PrPN–EN 480-11, Referaty XLVI Konf. KILiW PAN i KN PZITB, Krynica, IX 2001.
5. Chermant J.L., Redon C., Dequiedt A.S., Coster M.: Automated image analysis and concrete, Brittle Matrix Composites 6, Warszawa 2001.
6. Lange D. A.: Image Analysis Techniques for Characterization of Pore Structure of Cement-Based Materials, Cement, Concrete Research vol. 24 no.5, 1994, 841-853.
7. Pleau R., Plante P., Gagne R., Pigeon M.: Practical Considerations Pertaining to the Microscopical Determination of Air-Void Characteristics of Hardened Concrete (ASTM C 457 Standard), Cement, Concrete and Aggregates vol.12 no.2, 1990, 3-11.
8. Aksamit J., Bodziony J., Zajac B.: Ocena jakości zgładów przeznaczonych do analizy stereologicznej układu pustek powietrznych w związanym betonie, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, t. 2, nr 3-4, 2000, 369-386.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stefania Grzeszczyk

## Abstract

Air entrainment has an influence on frost resistance of concrete depending on the air-voids structure that develops during hardening of concrete. Volume of the air in concrete is not a decisive parameter for efficient air entrainment, such parameters being the spacing factor

and the specific surface of the air-voids structure. Values of these two parameters, described in the American Standard ASTM C 457, can be obtained using modern image analysis systems with help of two different methods: the point-count method and the linear traverse method.

In the paper described are formulas to calculate spacing factor and specific surface used in the both methods. Proposed is a procedure to obtained appropriate images, essential for both methods.

Tested was influence of different methods on the results. A procedure was applied to avoid the effects of light and position changes during repeated measurements.

Discussed are effects of the two methods on the results and efficiency of the image analysis system.

It was found that difference between results obtained with the help of linear traverse method and modified point-count method in the case of measurement of air-void volume amounts to 64%. Also observed was increased dispersion of results obtained using modified point-count method. It was found that measurements with the help of linear traverse method are simpler and faster than when applied is the modified point-count method.