

## **Zastosowanie stereologii w inżynierii materiałów budowlanych**

**Maciej Szelaǳ, Andrzej Szewczak**

*Katedra Budownictwa Ogólnego, Wydział Budownictwa i Architektury, Politechnika Lubelska,  
e-mail: maciej.szelaǳ@pollub.pl, a.szewczak@pollub.pl*

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia dane literaturowe dotyczące zastosowania stereologii oraz analizy obrazu do ilościowej oceny struktury materiałów budowlanych. Na wstępie opisano rozwój metod stereologicznych i technik komputerowej analizy obrazu w badaniach materiałów budowlanych. Następnie zdefiniowano ilościowe parametry struktury oraz przedstawiono sposób ich określania. W artykule zrelacjonowano dotychczasowe zastosowanie analizy obrazu do określania właściwości kompozytów cementowych, w tym: ocena porowatości stwardniałego betonu, określenie rozkładu kruszywa w matrycy cementowej, analiza spękań. Stwierdzono, że wiodącym problemem analizy obrazu jest proces przygotowania próbki w celu prawidłowej ekstrakcji badanej fazy oraz metodologia automatyzacji pomiarów.

**Słowa kluczowe:** analiza obrazu, stereologia, ilościowe parametry struktury, materiały budowlane.

### **1. Wprowadzenie**

Jakościowe oraz ilościowe zależności pomiędzy strukturą i właściwościami materiałów, podobnie modyfikacje warunkują ich racjonalne i uzasadnione wykorzystanie. Obecne możliwości i uwarunkowania techniczne pozwalają na skuteczną kontrolę procesów technologicznych podczas wytwarzania materiałów, co gwarantuje uzyskanie produktów o oczekiwanych właściwościach (strukturze). Sytuacja ta pozwala na projektowanie zupełnie nowych produktów spełniających obecne potrzeby i coraz bardziej zaostrzone wymagania w zakresie jakości i trwałości. W momencie gdy wyniki badań strukturalnych można ściśle przedstawić za pomocą liczb i jednostek miary, powstaje możliwość skutecznego ich wykorzystania w praktyce, a w rezultacie mogą być wykorzystane do określania zależności pomiędzy strukturą materiału, a parametrami procesu technologicznego [1].

Na przestrzeni ostatnich dwudziestu lat zaobserwowano silny rozwój badań dotyczących analizy struktury. Do lat 90-tych ubiegłego wieku powszechnie stosowano metody opisowe, które nie są miarodajne ze względu na subiektywny charakter pomiarów [2, 3]. Polegają one na wyodrębnieniu określonego zjawiska lub parametru z dotychczas znanej całości, jego opisaniu, porównaniu z podobnymi zjawiskami lub parametrami, i wyróżnieniu czynników wspólnych i różnicujących. W związku z tym dokładność i złożoność oceny warunkowana jest czynnikiem ludzkim. Wraz z rozwojem technik komputerowych nastąpiło przejście do w pełni ilościowych obiektywnych metod [3], polegających na określeniu parametrów liczbowych (w odpowiednich jednostkach), charakteryzujących badane zjawisko lub obiekt badań.

Do w pełni ilościowych metod oceny struktury materiałów należy zaliczyć metody stereometryczne, odnoszące się do badań w przestrzeni [1, 4]. Dawniej (pod koniec XX

wieku) metody te cechowała duĝa pracochłonnoŝć pomiarów. Wraz z rozwojem stereologicznych, komputerowych analizatorów obrazu trudnoŝci te zaczęły być stopniowo pokonywane, a obecnie problem został wyeliminowany poprzez zastosowanie odpowiedniego oprogramowania komputerowego.

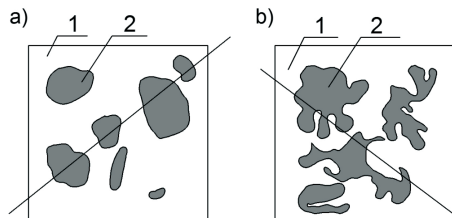
## 2. Iloŝciowy opis struktury materialów budowlanych

W przypadku obszaru badawczego związanego z budownictwem pierwsze próby oceny iloŝciowej struktury dotyczyły metali [1, 4, 5]. Metody te rozwijały siê jednoczeŝnie z rozwojem mikroskopowej analizy metalograficznej. Były to metody porównawcze, w których badaną strukturę porównywano ze skalą wczeŝniej zdefiniowanych wzorców. Badania te mimo iĝ sà proste do przeprowadzenia majà szereĝ wad, głównie wynikajàcych z trudnoŝci w procesie konstruowania wzorców oraz z samej zasady oceny polegajàcej na porównaniu. Dokładnoŝć takiej oceny zaleĝała od badacza i jego zdolnoŝci do obiektywnej interpretacji danych. Mimo wszystko wynik badañ były subiektywne i mógł siê zmieniać wraz z osobà dokonujàcà porównania. Skalę wzorców w przypadku stali stanowiła seria fotografii mikroskopowych, ułożonych i ponumerowanych w porzàdku stopniowego wzrostu zawartoŝci rozpatrywanego skłàdnika strukturalnego (np. wydzieleñ węĝlowych czy niemetalicznych w stalach). Analizowanie przestrzennych struktur na podstawie płaskiego obrazu obserwowanego pod mikroskopem jest zasadniczà wadà oceny struktury skalami wzorców [5, 6]. Metody te jednak odchodzà juĝ do przeszłoŝci na rzecz nowoczesnych i ciàĝle rozwijajàcych siê technik komputerowych.

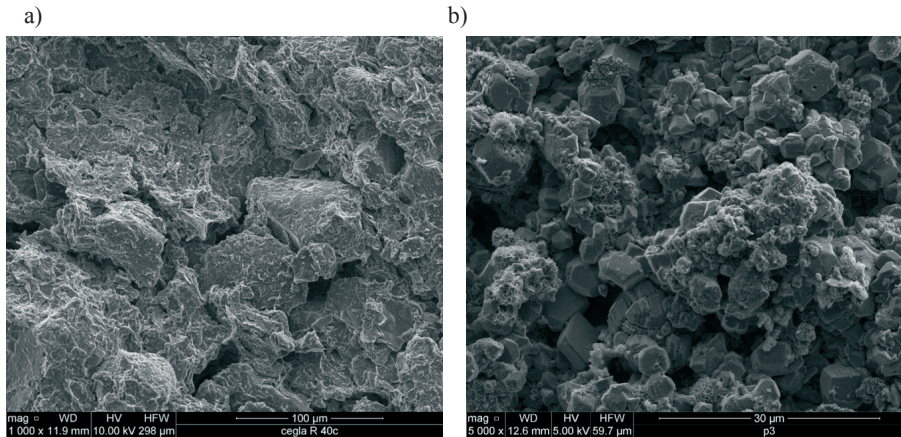
Iloŝciowy opis trójwymiarowej budowy materialów konstrukcyjnych jest kłopotliwy ze wzglêdu na ich nieprzezroczystoŝć. Jedynym obecnie rozwiązaniem jest prowadzenie badañ na płaskich przekrojach, na których widoczne sà dwuwymiarowe przekroje trójwymiarowych brył. Nauka, która zajmuje siê iloŝciowym opisem trójwymiarowych zbiorów brył za pomocà pomiarów lub zliczeñ wykonanych na dwuwymiarowych przekrojach tych zbiorów, nazywana jest stereologià lub stereometrycznà mikroskopià iloŝciowà [1, 4, 5, 7, 8].

Struktura budowlanych kompozytów konstrukcyjnych składa siê z ziaren i otaczajàcej je osnowy [1, 4], co zostało pokazane na Rys. 1. Ze wzglêdu na przewaĝnie złoĝonà geometrię ziaren, moĝna je podzielić na bryły geometrycznie wypukłe (takie, w których wszystkie odcinki łączàce dwa dowolne punkty bryły leĝà w całoŝci wewnàtrz jej objętoŝci) i na bryły geometrycznie niewypukłe, niespełniajàce w/w warunku.

Przykładem struktury płaszczyznowej (w przestrzeni  $R^{(2)}$ ) moĝe być mikrostruktura powierzchniowo hydrofobizowanej cegły ceramicznej (Rys. 2a) lub kompozytu na bazie spienionej zaprawy cementowo-wapiennej (Rys. 2b), gdzie widoczne sà, odpowiednio, elementy mikrostruktury czynnika hydrofobizujàcego oraz zaczynu cementowego z dodatkiem wapna.



Rys. 1. Kompozycja strukturalna materialów wraz z klasyfikacjà figur płaskich: a) wypukłe; b) niewypukłe; 1 – osnowa; 2 – ziarna



Rys. 2. Zdjęcia SEM mikrostruktury materiałów budowlanych: a) powierzchniowo hydrofobizowana cegła ceramiczna (powiększenie 1000x) [9]; b) kompozyt wiążący na bazie cementu i wapna (powiększenie 5000x) [10]

### 3. Parametry stereologiczne struktury

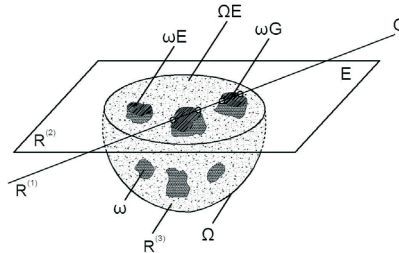
Ilościowe parametry struktury, takie jak rozmiar i kształt ziaren czy pustek powietrznych, ich liczba i zawartość w kompozycie oraz stopień rozdrobnienia struktury (stopień dyspersji) nazywane są parametrami stereologicznymi. Opisują one przestrzenną budowę zbiorów brył, których estymatory są proste do wyznaczenia na płaskich przekrojach lub rzutach budowy materiałów, przy czym estymacja ta może zakładać jedynie ich wypukłość, a nie wymaga założeń związanych z kształtem brył.

Parametry stereologiczne mogą być określone poprzez pomiar lub zliczanie. Te określone przez pomiar mają charakter metryczny (np.: wielkość porów, średnica ziaren, długość pęknięć), natomiast parametry określone przez zliczanie (np.: liczba porów lub ziaren na jednostce powierzchni) mają charakter topologiczny [4, 8]. Zadaniem stereologii jest zbadanie związków parametrów o charakterze topologicznym uzyskanych z analizy przestrzeni  $n$ -wymiarowej ( $R^{(n)}$ , dla  $n=0,1,2$ ) z parametrami metrycznymi w przestrzeni  $n+1$  lub  $n+2$  zmiarowej.

Atrybuty przestrzennej struktury materiałów można określić na dwa sposoby [1, 11]:

- Poprzez stworzenie modelu, kopii struktury materiału z określeniem ilościowym właściwości tego modelu. Model taki można wykonać na drodze analizy i interpretacji serii równoległych, następujących po sobie płaskich przekrojów prowadzonych przez rzeczywistą strukturę. Aby model wiarygodnie odzwierciedlał rzeczywistą strukturę przekroje te muszą być położone blisko siebie. Wadą tego rozwiązania jest bardzo duża złożoność i czasochłonność wykonania modelu, ale uzyskana dokładność wykonania modelu pozwala na przeprowadzenie bardziej precyzyjnych pomiarów.
- Poprzez analizę polegającą na zliczaniu i mierzeniu płaskich przekrojów badanej struktury pobranych w sposób losowy. Następnie można dokonać estymacji przestrzennych parametrów struktury na podstawie wykonanej wcześniej analizy. Model ten jest tworzony z zachowaniem zasad statystycznego rozkładu i wymaga dużo mniejszego czasu realizacji niż model opisany wyżej. Ciągły rozwój i duże możliwości technik komputerowych służących analizie obrazu pozwalają na wykonanie modelu o stosunkowo dobrym odzwierciedleniu z ciałem rzeczywistym.

Aby określić przestrzenne wskaźniki struktury na podstawie analizy jej płaskich przekrojów, należy skorzystać z istniejących zależności stereologicznych [1, 4, 8, 11]. Rozważając wypukłą cząstkę  $\Omega$ , przedstawioną na Rys. 3, o regularnej powierzchni, przeciętej płaszczyzną testową  $E$  oraz prostą testową  $G$  zawierającą się w płaszczyźnie testowej można zdefiniować parametry stereologiczne struktury.



Rys. 3. Wypukła cząstka  $\Omega$  ze schematem badawczym tworzonym przez płaszczyznę testową  $E$  i prostą testową  $G$

Na dowolnym płaskim przekroju poprowadzonym przez badaną strukturę można określić [1, 8]:

- pole powierzchni przekrojów cząstek –  $A$ ,
- długość linii tworzącej obwód przekroju cząstki (fazy składające się na strukturę, np.: linie tworzące granicę występujących ziaren) –  $L$ ,
- cięciwy ziaren otrzymane na drodze ich przecięcia przez proste testowe (sieczne zawierające się w płaszczyźnie testowej) –  $I$ ,
- całkowitą krzywiznę linii obwodów –  $K$ ,

natomiast samą analizę strukturalną na płaszczyźnie można przeprowadzić w trzech przestrzeniach [1, 8]:

- $R^{(2)}$  – dwuwymiarowej (płaszczyzna), gdzie analizie poddawane są płaskie przekroje trójwymiarowych brył,
- $R^{(1)}$  – jednowymiarowej (prosta rzeczywista), gdzie analizie poddawane są płaskie cięciwy przekrojów cząstek,
- $R^{(0)}$  – przestrzeń punktowa (punkt rzeczywisty), gdzie analizie poddawane są: punkty styku na granicach ziaren płaskich – punkty węzłowe; punkty przecięcia granic ziaren płaskich z prostą testową  $G$ ; punkty testowe, które nanoszone na badaną strukturę mogą służyć w celach estymacji parametrów stereologicznych.

Jak wspomniano wcześniej, metodą pomiarów lub zliczeń na płaskich przekrojach struktury można ustalić parametry geometryczne przestrzeni  $R^{(2)}$ ,  $R^{(1)}$ ,  $R^{(0)}$ . Parametrów przestrzeni  $R^{(3)}$  (trójwymiarowej) nie można ustalić doświadczalnie ze względu na nieprzezroczystość materiału. Stereologia pozwala na ustalenie związków i zależności pomiędzy parametrami tej przestrzeni, a parametrami przestrzeni  $R^{(2)}$ ,  $R^{(1)}$ ,  $R^{(0)}$ .

Zgodnie z [1, 7, 12], uznaje się następujący podział parametrów stereologicznych na:

- lokalne (statystyczne), czyli takie, które podają uśrednioną charakterystykę jednego ziarna w rozpatrywanej przestrzeni, np.: średnia objętość ziarna  $V_{sr}$ , średni obwód przekroju cząstki  $L_{sr}$ , średnia cięciwa przekroju ziarna  $I_{sr}$ , średnia powierzchnia przekroju cząstki  $A_{sr}$ ,
- integralne (globalne), czyli takie, które charakteryzują liczbowo zbiór cząstek danego rodzaju fazy w materiale, w odniesieniu do jednostki miary rozpatrywanej przestrzeni (np.: dla  $R^{(3)}$  –  $\text{cm}^3$ ,  $R^{(2)}$  –  $\text{cm}^2$ ,  $R^{(1)}$  –  $\text{cm}$ ), np.: objętość ziaren w jedno-

stce objętości wieloskładnikowego kompozytu  $V_V$ , powierzchnia cząstek znajdujących się w jednostce objętości materiału  $S_V$ , długość obwodów ziaren na jednostce powierzchni przekroju kompozytu  $L_A$ , liczba cięciw przekroju ziarna na jednostkowej długości prostej testowej (cięciwy)  $N_L$ .

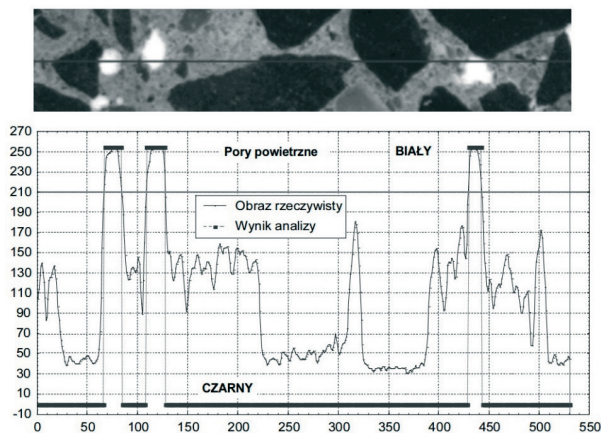
#### 4. Zastosowanie analizy obrazu do oceny właściwości kompozytów cementowych

Stereologiczne badania ilościowej charakterystyki struktury cementowych materiałów wiążących na różnych poziomach strukturalnych, w dotychczas przeprowadzanych pracach badawczych, ograniczają się głównie do pomiarów porowatości oraz rozkładu kruszywa w matrycy cementowej. Podejmowano również próby opisu i analizy spękań wykorzystując techniki analizy obrazu. Poniżej przedstawiono wybrane prace z dotychczas przeprowadzonych badań krajowych i zagranicznych w zakresie zastosowania pomiarów stereologicznych do oceny struktury kompozytów cementowych.

##### 4.1. Ocena porowatości stwardniałych betonów

Metody badania zawartości powietrza w stwardniałym betonie są znormalizowane i w tym zakresie obowiązuje norma PN-EN 480-11 [13]. Istnieją również inne normowe wytyczne pozwalające określić zawartość powietrza w świeżej mieszance betonowej (metoda ciśnieniowa [14]). Znajomość ilości powietrza w mieszance betonowej stanowi jednak tylko część informacji dotyczącej całkowitej porowatości betonu, a jej wartość służy do określania wytrzymałości projektowanego materiału. Bardziej efektywną metodą, od tych przedstawionych powyżej, jest ocena porowatości betonu z zastosowaniem narzędzi i metod stereologii oraz cyfrowej analizy obrazu.

W pracach [15, 16, 17] przedstawiono metodę stereologicznej oceny porowatości betonów przy zastosowaniu programu do analizy obrazu FRAKTAL\_Stereolog (Rys. 4) autorstwa J. Konkola. Analizie został poddany sposób zliczania liczby i powierzchni pustek (porów powietrznych powstających w trakcie mieszania i formowania betonu) w betonie, o wielkościach powyżej 0,2 mm. Metoda ta może być z powodzeniem wykorzystana do określenia zawartości dowolnej fazy w betonie po uprzednim opanowaniu preparatyki do prowadzenia obserwacji.



Rys. 4. Graficzna interpretacja miejsc uznawanych za pory powietrzne z wykorzystaniem programu FRAKTAL\_Stereolog [15]

Konkol oraz Białek w pracy [18] zaprezentowali wyniki badań stereologicznych dotyczących betonów napowietrzanych. Na płaskich przekrojach, odpowiednio przygotowanych próbek betonowych, określono parametry stereologiczne, a w szczególności współczynnik rozmieszczenia porów. Wartość tego współczynnika posłużyła do określenia odporności betonu na działanie cyklicznego zamrażania/odmrażania. Pomiary zostały uzupełnione o badania wytrzymałości na ściskanie.

Kolejnym przykładem zastosowania stereologii do oceny porowatości betonu są prace Sumanasooriya i Neithalatha [19, 20, 21]. Autorzy mierzyli wielkość porów, ich rozkład, powierzchnię właściwą oraz inne właściwości betonów o zwiększonej zawartości powietrza. Do analizy użyto matematycznych metod analizy morfologii struktury oraz technik stereologicznych, bazujących na pomiarach powierzchni, przy zastosowaniu siecznych testowych. Stwierdzono dobrą korelację pomiędzy odwrotnością powierzchni właściwej porów, a ich efektywną średnicą. Przeanalizowano trójwymiarowy profil dystrybucji porów w stwardniałym betonie, który wskazuje na istnienie współczynnika hydraulicznego pozwalającego na wstępne oszacowanie przepuszczalności badanego betonu.

Hu and Stroeven [22, 23, 24, 25] w swoich badaniach wykorzystali i zmodyfikowali teorię lokalnej porowatości opracowaną przez Hilfera [26], która dotychczas była wykorzystywana do geometrycznej analizy porów w piaskowcach. Opracowano metodologię preparatyki i analizy stereologicznej struktury porów na płaskich przekrojach próbek zaczynu cementowego. Badane zaczyny cementowe cechowały się zróżnicowanym wskaźnikiem wody do cementu (w/c) oraz różnym stopniem hydratacji. Wykorzystano także system SPACE, który został opracowany na Uniwersytecie Technologicznym w Delft, w Holandii. Program pozwala na analizę podstawowych zjawisk związanych z aglomeracją cząstek i ziaren w matrycy, w tym przypadku porów i kruszywa w matrycy cementowej. Opracowano charakterystykę stwardniałych faz w betonie oraz sieci strukturalnej porów w przestrzeni, w aspekcie zjawisk związanych z przepuszczalnością.

Autorzy pracy [27, 28] wykorzystali zdjęcia z elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) do oceny struktury i dystrybucji porów kapilarnych w betonach wysokich wytrzymałości we wczesnych fazach dojrzewania. W celu interpretacji wyników zastosowano model hydratacji cementu opracowany przez Powersa [29]. Zauważono że w betonach zawierających pyły krzemionkowe znajduje się dużo więcej porów kapilarnych o małych średnicach niż w betonach bez dodatku pyłów krzemionkowych. Na tej podstawie wywnioskowano, że obecność gęstej siatki mało-średnicowych porów kapilarnych może być odpowiedzialna za większy skurecz autogeniczny we wczesnej fazie dojrzewania betonów z dodatkiem pyłów krzemionkowych.

#### **4.2. Analiza rozkładu kruszywa w matrycy cementowej**

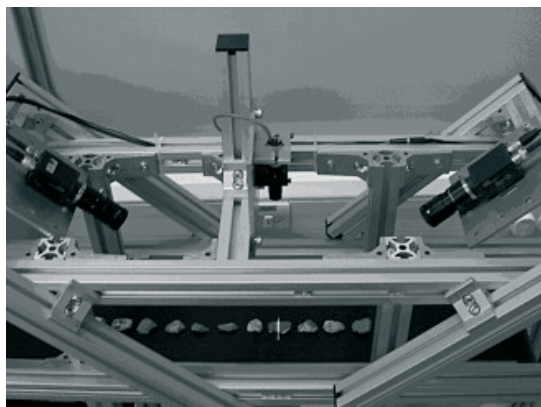
Zgodnie z obecnie obowiązującą normą PN-EN 933-1 [30] oznaczenie składu ziarnowego kruszyw mineralnych wykonuje się metodą przesiewania na sucho lub na mokro. Zasada obu metod polega na rozdzieleniu kruszywa na frakcje przez przesianie na zestawie sit kontrolnych o znormalizowanych wymiarach oczek kwadratowych, zgodnie z PN-EN 933-2 [31], a następnie ustaleniu procentowego udziału (masowego) poszczególnych frakcji w badanej próbce. Alternatywę od powyższego przedstawia Konkol [32, 33]. Wykazał przydatność i skuteczność stereologicznych metod analizy obrazu do opisu morfologii ziaren kruszywa grubego w betonie. Opisowi został poddany proces przygotowania obrazu płaskiego przekroju próbki do analizy oraz przedstawiono sposób uzyskania krzywej uziarnienia kruszywa grubego w betonie na kruszywie bazaltowym.

W pracy [34] przedstawiono propozycję oceny kształtu ziaren kruszywa, zarówno dla kruszywa otoczkowego oraz łamanego. Analiza stereologiczna dostarczyła informacji na

temat trójwymiarowego kształtu ziaren kruszywa grubego na podstawie dwuwymiarowych rzutów ziaren kruszywa na powierzchnię. Dodatkowo w pracy zastosowano analizę Fouriera do opisu ilościowej i jakościowej charakterystyki powierzchni kruszywa, w tym oceniono m.in. chropowatość ziaren.

Mora, Kwan i Chan w swoich badaniach [35, 36, 37] opracowali metodę cyfrowego przetwarzania obrazu w celu pomiarów kulistości, współczynnika kształtu oraz wypukłości kruszywa grubego stosowanego do betonów. Opracowaną metodą przeanalizowano 46 próbek kruszywa z pięciu różnych źródeł i otrzymane wyniki porównano z pomiarami przeprowadzonymi w standardowy sposób, w celu zidentyfikowania parametrów stereologicznych, które mogą posłużyć jako wskaźnik kształtu ziaren kruszywa. Stwierdzono, że dwa parametry zdefiniowane jako wskaźnik wypełnienia i stosunek wypukłości cechują się wysoką wartością wskaźnika korelacji z wynikami otrzymanymi na drodze tradycyjnych pomiarów. Podjęto się również próby określenia krzywej uziarnienia kruszywa grubego.

W pracy [38] opisano metodę zbierania i analizy danych 3D z powierzchni cząstek gruboziarnistych kruszyw. Technika ta wykorzystuje triangulację laserową w celu uzyskania danych z górnej powierzchni próbki kruszywa przechodzącej wzdłuż taśmy przenośnika. Prototypowe stanowisko badawcze zostało pokazane na Rys. 5. Opisano nowe podejście badawcze w celu określenia ilościowej wielkości ziaren kruszywa i kształtu we wszystkich trzech wymiarach. Zastosowany algorytm wykorzystuje matematyczną morfologię do zapewnienia geometrycznie znaczącej interpretacji kształtu cząstek. Zaprezentowano względne zalety dwu- i trójwymiarowej analizy ziaren kruszywa, a otrzymane wyniki wykazują słuszość zastosowanego podejścia.

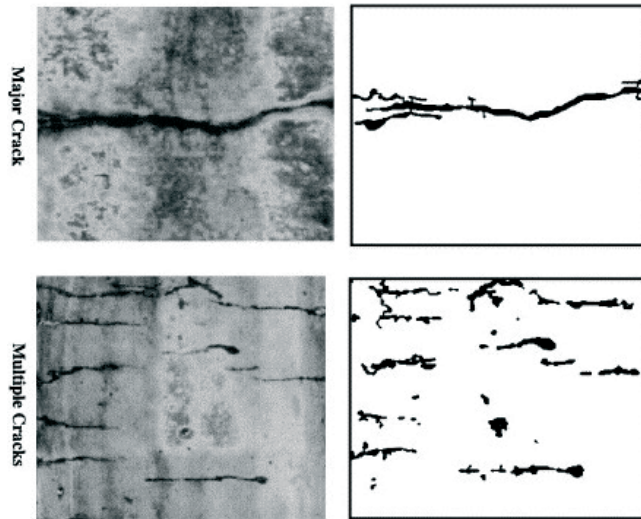


Rys. 5. Prototypowy system triangulacji laserowej do oceny właściwości geometrycznych kruszywa [38]

### 4.3. Analiza spękań struktury kompozytów cementowych

Analiza stereologiczna mikrorys w betonie, powstałych pod wpływem naprężeń ściskających była przedmiotem badań w pracy [39]. Badania zostały przeprowadzone na zdjęciach uzyskanych z SEM, które przedstawiały płaski przekrój próbek cylindrycznych z betonów wysokich wytrzymałości. Analiza stereologiczna, która interpretuje trójwymiarowe struktury na drodze badań dwuwymiarowych rzutów lub przekrojów tych struktur, posłużyła do określenia gęstości, orientacji oraz stopnia rozgałęzienia mikrorys zidentyfikowanych na badanej powierzchni. Pod wpływem dalszego wzrostu obciążenia zaobserwowano gwałtowny rozwój mikropęknięć w fazie stykowej pomiędzy kruszywem a zaczynem cementowym.

Ringot i Bascoul [40, 41] omówili możliwe do zastosowania techniki stereologiczne w analizie zarysowań i mikrozarzysowań w betonach i zaprawach. Zdefiniowano podstawowe dwuwymiarowe parametry opisujące spękania (szerokość rysy, orientacja rysy, długość właściwa rysy, powierzchnia właściwa rysy, średni odstęp pomiędzy rysami, łączność rys, chropowatość rysy, wymiar fraktalny rysy). Udowodniono, że analiza obrazu jest bardzo użytecznym narzędziem do opisu parametrów stereologicznych spękań na różnych poziomach powiększenia obrazu.



Rys. 6. Powierzchnia spękanego kręgu betonowego [42]: a) obraz oryginalny; b) obraz po obróbce graficznej

Problem automatyzacji pomiarów zarysowań powierzchniowych elementów żelbetowych był przedmiotem prac [42, 43]. Autorzy podjęli się próby identyfikacji spękań powierzchniowych na zakopanych kręgach betonowych. W celu identyfikacji spękań zastosowano dwuetapowy proces z wykorzystaniem filtrów statystycznych. Pierwszy etap pozwala na ekstrakcję w ujęciu globalnym obrazu binarnego zawierającego pixele, które mogą stanowić rysy. Drugi etap opiera się na algorytmie matematycznym, które identyfikuje spękania jako swoiste continuum i łączy lokalne struktury w jednolite pęknięcia w ujęciu globalnym. Przykładowy obraz spękanego próbki przed i po obróbce wyżej opisaną metodą został przedstawiony na Rys. 6.

W pracy [44] został poruszony temat prawidłowej obróbki graficznej obrazów. Obraz zawierający płaski rzut spękanego próbki betonowej zawiera dużo nieregularności w postaci występujących plam o różnym stopniu zabarwienia. Występujące graficzne defekty dodatkowo utrudniają proces prawidłowej, automatycznej identyfikacji spękań na badanym elemencie. Zaproponowano dwustopniową technikę oczyszczania obrazu z niepożądanych szumów. Pierwszy krok polegał na użyciu filtru wygładzania co pozwoliło na rozmycie defektów występujących lokalnie. W kroku drugim użyto macierzy Hessego do wyodrębnienia struktur liniowych interpretowanych graficznie jako rysy. Natomiast filtrem progowania oddzielono rysy od tła. Analizę przeprowadzono na 50 zdjęciach różnych betonów. Przeprowadzone eksperymenty dowiodły, że zaproponowana metoda jest efektywna w identyfikowaniu spękań na obrazach powierzchni betonów z występującą dużą ilością szumów.



## 5. Podsumowanie

Z przeprowadzonej analizy literatury wynika, że w największym stopniu stereologia, w tym skomputeryzowane techniki analizy obrazu mają zastosowanie do oceny porowatości stwardniałych kompozytów cementowych. Próby analizy geometrycznej struktury spękań powstałej na powierzchni elementów betonowych w głównej mierze skupiają się na problematyce prawidłowej ekstrakcji fragmentów obrazu, które mogą być interpretowane jako rysy. Przeważnie określane są tylko lokalne parametry opisujące rozpatrywaną rysę, takie jak długość czy szerokość rysy.

W większości dotychczas przeprowadzonych badań analizowana powierzchnia jest poddawana odpowiedniej obróbce w celu wyodrębnienia analizowanej fazy, jeszcze przed wykonaniem zdjęcia czy zeskanowaniem powierzchni do dalszej analizy. Autorzy niniejszej pracy są zgodni co do faktu, że wartościowym byłoby opracowanie sposobu analizy powierzchni, bez przeprowadzania jej wstępnej preparatyki lub należy ograniczyć ją do minimum przy zastosowaniu powszechnie dostępnych środków co będzie skutkowało analizą rzeczywistej powierzchni. Takie podejście może pozwolić na analizę powierzchni elementu wykonanego nie tylko w warunkach laboratoryjnych, ale także elementu wbudowanego w rzeczywistą konstrukcję, pracującą w warunkach obciążeń eksploatacyjnych.

## Literatura

- 1 Ryś J. *Stereologia materiałów*. Fotobit Design, Kraków, 1995.
- 2 Howe K., Eisenhart M. *Standards for qualitative (and quantitative) research: A prolegomenon*. Educational Researcher 19(4) (1990) 2-9.
- 3 Newman I. *Qualitative-quantitative research methodology: Exploring the interactive continuum*. SIU Press, Carbondale, 1988.
- 4 Prokopski G., *Mechanika pękania betonów cementowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2007.
- 5 Chernyavskii K.S. *Stereology in metal science*. Metallurgiya, Moscow, 1977.
- 6 Underwood E.E., Starke Jr E.A. *Quantitative stereological methods for analyzing important microstructural features in fatigue of metals and alloys*. Georgia Inst of Tech Atlanta School of Chemical Engineering and Metallurgy, Atlanta, 1978.
- 7 Carpenter A.M. *Stereology. Definition and historic background*. Journal of Histochemistry & Cytochemistry 27(11) (1979) 1535–1535.
- 8 Russ J.C. *Practical stereology*. Springer, 1986.
- 9 Fic S., Barnat-Hunek D. *The effectiveness of hydrophobisation of porous building materials by using the polymers and nanoparticles solutions*. International Journal of Materials Science and Engineering 2(2) (2014) 93–98.
- 10 Fic S., Brzyski P., Szeląg M. *Composite based on foam lime mortar with flax fibers for use in the building industry*. Ecological Chemistry and Engineering A 20(7–8) (2013) 899–907.
- 11 Underwood E.E. *Practical solutions to stereological problems*. Practical Applications of Quantitative Metallography (1984) 160–179.
- 12 Weibel E.R., Weibel E.R. *Estimation of basic stereological parameters*. Stereological methods 2 (1980) 55–139.
- 13 PN-EN 480-11: *Domieszki do betonu, zapraw i zaczynu. Metody badań. Oznaczenie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie*.
- 14 PN-88/B-06250: *Beton zwykły*.
- 15 Konkol J., Kulpiński J., Prokopski G. *Zastosowanie analizy obrazu do określania porowatości betonu na próbkach utwardzonych*. Inżynieria Materiałowa 23 (2002) 737–742.
- 16 Konkol J., Prokopski G. *Zastosowanie metody analizy obrazu do oceny struktury porów w materiałach budowlanych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2006, s. 271–276.

- 17 Konkol J., Prokopski G. *Zastosowanie stereologii do oceny porowatości betonu*. *Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce* 2 (2007) 137–140.
- 18 Konkol J., Białek J. *Zastosowanie metod stereologicznych do oceny mrozoodporności betonów napowietrzanych*. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 57(4) (2010) 285–292.
- 19 Sumanasooriya M.S., Neithalath N. *Stereology-and morphology-based pore structure descriptors of enhanced porosity (pervious) concretes*. *ACI Materials Journal* 106(5) (2009) 429–438.
- 20 Neithalath N., Sumanasooriya M.S., Deo O. *Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction*. *Materials characterization* 61(8) (2010) 802–813.
- 21 Sumanasooriya M.S., Neithalath N. *Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction*. *Cement and Concrete Composites* 33(8) (2011) 778–787.
- 22 Hu J., Stroeven P. *Local porosity analysis of pore structure in cement paste*. *Cement and Concrete Research* 35(2) (2005) 233–242.
- 23 Hu J., Stroeven P. *Depercolation threshold of porosity in model cement: approach by morphological evolution during hydration*. *Cement and Concrete Composites* 27(1) (2005) 19–25.
- 24 Hu J., Stroeven P. *Application of image analysis to assessing critical pore size for permeability prediction on cement paste*. *Image Analysis & Stereology* 22(2) (2003) 97–103.
- 25 Hu J., Stroeven P. *Size effect in structural analysis of cementitious materials*. *Proceedings of 9<sup>th</sup> European Congress on Stereology and Image Analysis, Polish Society for Stereology, Kraków 2005*, s. 23–30.
- 26 Hilfer R. *Geometric and dielectric characterization of porous media*. *Physical Review B* 44(1) (1991) 60–75.
- 27 Igarashi S., Watanabe A., Kawamura M. *Evaluation of capillary pore size characteristics in high-strength concrete at early ages*. *Cement and Concrete Research* 35(3) (2005) 513–519.
- 28 Igarashi S., Kawamura M., Watanabe A. *Analysis of cement pastes and mortars by a combination of backscatter-based SEM image analysis and calculations based on the Powers model*. *Cement and Concrete Composites* 26(8) (2004) 977–985.
- 29 Powers T.C. *Physical properties of cement paste* *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington 1960*, s. 577–613.
- 30 PN-EN 933-1:2000 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczanie składu ziarnowego. Metoda przesiewu*.
- 31 PN-EN 933-2:1999 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Oznaczenie składu ziarnowego. Nominalne wymiary otworów sit badawczych*.
- 32 Konkol J. *Analiza stereologiczna kruszywa w betonie - sposób uzyskania krzywej uziarnienia*. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 47 (2008) 185–192.
- 33 Konkol J. *Oznaczenie składu ziarnowego kruszywa w betonie metodami analizy obrazu*. *Inżynieria Materiałowa* 31(6) (2010) 1409–1414.
- 34 Hu J., Stroeven P. *Shape characterization of concrete aggregate*. *Image Analysis & Stereology* 25 (2006) 43–53.
- 35 Mora C.F., Kwan A.K.H. *Sphericity, shape factor, and convexity measurement of coarse aggregate for concrete using digital image processing*. *Cement and Concrete Research* 30(3) (2000) 351–358.
- 36 Kwan A.K.H., Mora C.F., Chan H.C. *Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing*. *Cement and Concrete Research* 29(9) (1999) 1403–1410.
- 37 Mora C.F., Kwan A.K.H., Chan H.C. *Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing*. *Cement and Concrete Research* 28(6) (1998) 921–932.
- 38 Lee J.R.J., Smith M.L., Smith L.N. *A new approach to the three-dimensional quantification of angularity using image analysis of the size and form of coarse aggregates*. *Engineering Geology* 91(2–4) (2007) 254–264.

- 39 Nemati K.M., Monteiro P.J., Scrivener K.L. *Analysis of compressive stress-induced cracks in concrete*. ACI Materials Journal 95(5) (1998) 617–630.
- 40 Ringot E., Bascoul A. *About the analysis of microcracking in concrete*. Cement and Concrete Composites 23(2–3) (2001) 261–266.
- 41 Ringot E. *Automatic quantification of microcracks network by stereological method of total projections in mortars and concretes*. Cement and Concrete Research 18(1) (1988) 35–43.
- 42 Sinha S.K., Fieguth P.W. *Automated detection of cracks in buried concrete pipe images*. Automation in Construction 15(1) (2006) 58–72.
- 43 Sinha S.K., Fieguth P.W. *Segmentation of buried concrete pipe images*. Automation in Construction 15 (2005) 47–57.
- 44 Fujita Y., Mitani Y., Hamamoto Y. *A method for crack detection on a concrete structure*. Pattern Recognition 3 (2006) 901–904.

## **Application of stereology in engineering of building materials**

**Maciej Szelaĝ, Andrzej Szewczak**

*Department of General Construction, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin  
University of Technology, e-mail: maciej.szelaĝ@pollub.pl, a.szewczak@pollub.pl*

**Abstract:** The article presents the literature review about the application of stereology and image analysis for quantitative evaluation of the building materials structure. At the outset, the development of stereological methods and computer image analysis techniques in the study of building materials was provided. Then quantitative structure parameters were defined and their methods of determining were showed. In the paper, the application of image analysis for the determination of properties of the cement composites was reported, including: an assessment of the porosity of the hardened concrete, determination of the aggregate distribution in the cementitious matrix, the crack analysis. It was found that the leading problem of image analysis is the process of sample preparation in order to obtain the correct extraction of examined phase, and measurement automation process.

**Keywords:** image analysis, stereology, quantitative structure parameters, building materials.

