

ZASTOSOWANIE ANALIZY STRUKTURY DO OCENY WŁAŚCIWOŚCI BETONÓW

Janusz Konkol

Zakład Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa, Politechnika Rzeszowska

1 WPROWADZENIE

Dążenie do wytwarzania materiałów (w tym betonów) o coraz to lepszych właściwościach powoduje, że analizowanie jedynie tradycyjnej zależności między technologią i właściwościami okazuje się być niewystarczające. Celowe jest włączenie analizy struktury betonu i powiązanie jej z technologią i właściwościami. Włączenie analizy struktury do tradycyjnego pojmowania zagadnienia projektowania (technologia – właściwości) jest podstawowym celem inżynierii materiałowej.

W konstrukcjach z betonu niezbrojonego istnieje możliwość zniszczenia kruchego, z uwagi na występujące naprężenia rozciągające i mikro-pęknięcia. Zagadnieniami kruchego zniszczenia zajmuje się mechanika pękania, a wskaźnikami odporności na pęknięcie są, m. in.: krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{Ic}^S i praca jednostkowa zniszczenia J_{Ic} . Defekty w postaci mikropęknięć są istotnym elementem struktury i mają zasadniczy wpływ na cechy wytrzymałościowe betonu. W wierzchołku każdej szczeliny następuje koncentracja naprężeń, w efekcie czego, nieciągłości zwiększają swoją objętość, łączą się i w ten sposób wyznaczają płaszczyznę przebiegu przyszłego pęknięcia.

Powstająca w procesie pęknięcia geometria powierzchni przełomów jest funkcją zarówno struktury, jak i wielu złożonych, zależnych od siebie mechanicznych i fizycznych uwarunkowań procesu zniszczenia.

Możliwość opisu powierzchni przełomów zapewnia zastosowanie fraktografii ilościowej, w której podstawę ilościowej analizy powierzchni przełomów stanowią rzuty tych

powierzchni na główną płaszczyznę pęknięcia lub na płaszczyzny do niej równoległe, zwane popularnie profilami lub pionowymi przecięciami. Najczęściej określanymi parametrami fraktografii ilościowej są: współczynnik rozwinięcia linii profilowej R_L i współczynnik rozwinięcia powierzchni przełomu R_S [8].

Miarą stopnia skomplikowania powierzchni przełomu betonu jest również wymiar fraktalny D , a prowadzone w ostatnich latach badania dowodzą przydatność geometrii fraktalnej do opisu powierzchni przełomów betonowych [14, 15]. Opublikowane prace zagraniczne i krajowe, z zakresu zastosowania geometrii fraktalnej i fraktografii w badaniach betonów i zapraw, wskazują na istnienie zależności między wymiarem fraktalnym D oraz parametrami R_L i R_S a właściwościami betonów (wytrzymałością na ściskanie f_c , odpornością na pęknięcie wyrażoną krytycznym współczynnikiem intensywności naprężeń K_{Ic} , czy energią pęknięcia G_c) [12, 14, 15] i jego strukturą zależą, m.in. od rodzaju i wielkości ziaren kruszywa grubego oraz stosunku wodno-cementowego [2].

Defekty i niejednorodności struktury mają wpływ na właściwości betonów i sam proces pęknięcia. W istotny sposób wpływa tu porowatość powietrzna betonu, jej udział w objętości betonu, wielkości porów, ich rozkład i liczność. Sposobem oceny porowatości powietrznej betonu na próbkach utwardzonych jest zastosowanie metod stereologicznych w połączeniu z komputerową analizą obrazu [4-6, 9, 11].

Prowadzenie badań mających na celu poznanie mechanizmów niszczenia betonu jest celowe ze względu na niedostateczny stan wiedzy w tym zakresie, a dokonane w pracy połączenie

analizy struktury, w ujęciu jakościowym (badania mikrostrukturalne) i ilościowym (badania fraktograficzne, fraktalne i stereologiczne), z badaniami wytrzymałościowymi betonu uzupełnia tradycyjną zależność technologia–właściwości, o analizę struktury betonu. Wyniki takich badań mogą w efekcie doprowadzić do uzyskania modelu materiałowego, który będzie mógł być wykorzystany do projektowania i optymalizacji składu betonów.

2 PRZEDMIOT, PLAN I ZAKRES BADAŃ

2.1 Przedmiot badań

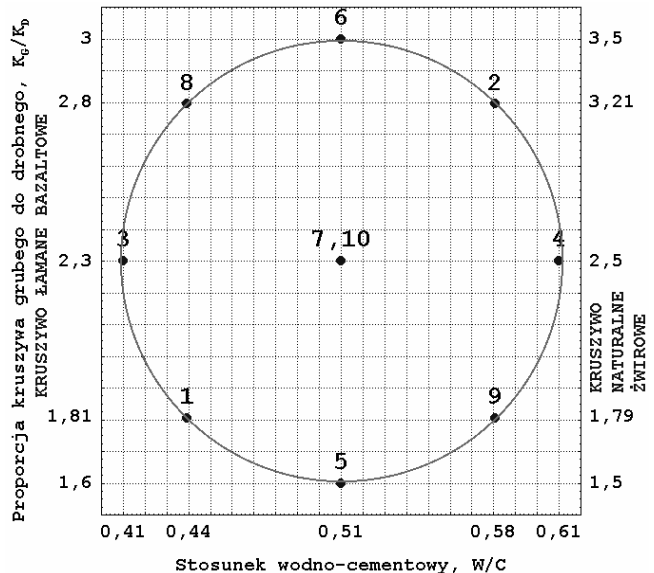
Przedmiotem pracy jest zbadanie wpływu stosunku wodno-cementowego W/C i proporcji kruszywa grubego do drobnego K_G/K_D w mieszance betonowej na cechy wytrzymałościowe betonów na kruszywie łamanym (bazaltowym) i naturalnym (żwirowym) w ujęciu mechaniki pęknięcia oraz na strukturę i morfologię powierzchni przełomów próbek betonowych.

Badania przeprowadzono na betonach wykonanych z kruszywa: łamanego (bazaltu) i naturalnego, otczakowego (żwiru). Do badań zastosowano cement portlandzki CEM I 32,5 R z cementowni Chełm, kruszywo bazaltowe frakcji 2-5 mm (Lubań Śląski), kruszywo bazaltowe frakcji 5-8 i 8-16 mm (Wilków), żwir otczakowy do 16 mm (Gniewczyzna) oraz piasek 0-2 mm (Zdżary).

Zmiennymi w składzie betonów były: stosunek wodno-cementowy (W/C), w przedziale od 0,41 do 0,61 oraz ilość kruszywa grubego, podana w stosunku do piasku (K_G/K_D), w przypadku kruszywa łamanego wynosząca od 1,6 do 3,0, a w przypadku kruszywa naturalnego od 1,5 do 3,5. Przyjęto stałą proporcję cementu do piasku, wynoszącą w przypadku betonów na kruszywie łamanym 1:1,76, a w przypadku betonów na kruszywie naturalnym 1:1,38.

2.2 Plan badań

Program badań opracowano na podstawie planu dwuczynnikowego polisekcyjno rotacyjno-quasi-uniformalnego z dwukrotnym powtórzeniem doświadczenia w punkcie centralnym (rys. 1) [13]. Plan uznano za optymalny ze względu na trzy kryteria doboru, tj.: kryterium realizowalności, informatywności i efektywności.



Rys. 1. Plan badań.

Badania przeprowadzono dla pięciu pośrednich wartości wielkości wejściowych x_1 i x_2 , wyznaczonych dla wartości unormowanych \hat{x}_i wynoszących 0, ± 1 i $\pm 1,414$.

Wykonano 10 serii betonów różniących się składem mieszanki betonowej. W tabelach 1 i 2 zestawiono ilości składników w poszczególnych seriach planu eksperymentu.

W celu otrzymania funkcji obiektu badań, opisujących zależności badanych cech betonów od zmiennych planu doświadczenia, przeprowadzono statystyczną obróbkę wyników, polegającą na usunięciu błędów grubych (testy Dixona i Grubbsa), sprawdzeniu jednorodności wariancji (test Bartletta) oraz przeprowadzeniu weryfikacji istotności wpływu wielkości wejściowych x_i na wielkość wyjściową z . Dokonano tego bez uprzedniego określenia funkcji obiektu badań (analiza kwalitatywna), za pomocą testu F Snedecora (Fishera).

Funkcje regresji określono na podstawie wyników doświadczeń przeprowadzonych w punktach planu eksperymentu, drogą nieliniowej estymacji numerycznej, przy wykorzystaniu programu komputerowego *STATISTICA*. Zależności funkcyjne opisano za pomocą wielomianów stopnia drugiego (postać zalecana dla przyjętego planu):

$$\hat{z} = B_0 + B_1x_1 + B_2x_1^2 + B_3x_2 + B_4x_2^2 + B_5x_1x_2,$$

gdzie:

\hat{z} – wartość funkcji obiektu badanej cechy betonu, określona dla zmiennych rzeczywistych,

x_i – zmienne rzeczywiste w przyjętym planie badań, $x_1=W/C$, $x_2=K_G/K_D$,
 B_i – współczynniki do równania.

Tabela 1. Zestawienie zmiennych rzeczywistych i ilości składników w 1 m³ mieszank betonowych na kruszywie łamanym.

Seria	Zmienne rzeczywiste		Ilość składników na 1m ³ mieszanki betonowej			
	W/C (x1)	KG/K D (x2)	C cement	W woda	KD piasek	KG bazalt
[-]	[-]	[-]	[kg/m ³]			
1	0,44	1,81	451	198	623	1116
2	0,58	2,80	323	188	446	1430
3	0,41	2,30	391	160	540	1350
4	0,61	2,30	363	221	501	1252
5	0,51	1,60	469	239	646	970
6	0,51	3,00	315	161	434	1521
7	0,51	2,30	377	192	520	1299
8	0,44	2,80	339	149	467	1499
9	0,58	1,81	424	246	585	1049
10	0,51	2,30	377	192	520	1299

Tabela 2. Zestawienie zmiennych rzeczywistych i ilości składników w 1 m³ mieszank betonowych na kruszywie naturalnym.

Seria	Zmienne rzeczywiste		Ilość składników na 1m ³ mieszanki betonowej			
	W/C (x1)	KG/K D (x2)	C cement	W woda	KD piasek	KG żwir
[-]	[-]	[-]	[kg/m ³]			
1	0,44	1,79	451	198	623	1116
2	0,58	3,21	323	188	446	1430
3	0,41	2,50	391	160	540	1350
4	0,61	2,50	363	221	501	1252
5	0,51	1,50	469	239	646	970
6	0,51	3,50	315	161	434	1521
7	0,51	2,50	377	192	520	1299
8	0,44	3,21	339	149	467	1499
9	0,58	1,79	424	246	585	1049
10	0,51	2,50	377	192	520	1299

Weryfikację przeprowadzono na wartościach unormowanych, dla funkcji obiektu badań:

$$z = A_0 + A_1 \hat{x}_1 + A_2 \hat{x}_1^2 + A_3 \hat{x}_2 + A_4 \hat{x}_2^2 + A_5 \hat{x}_1 \hat{x}_2,$$

gdzie:

z – wartość funkcji obiektu badanej cechy betonu, określona dla wartości unormowanych,
 \hat{x}_i – wartości unormowane dobrane według przyjętego planu doświadczeń,
 A_i – współczynniki do równania.

Na podstawie analizy istotności współczynników A_i , przeprowadzonej przy wykorzystaniu testu t-Studenta, dokonano odrzucenia współczynników uznanych za nieistotne, przy pozio-

mie istotności 0,05. Eliminację współczynników nieistotnych poprzedzono sprawdzeniem adekwatności przyjętych aproksymujących funkcji regresji do wyników pomiarów. Weryfikację adekwatności funkcji regresji przeprowadzono testem chi-kwadrat.

2.3 Zakres badań

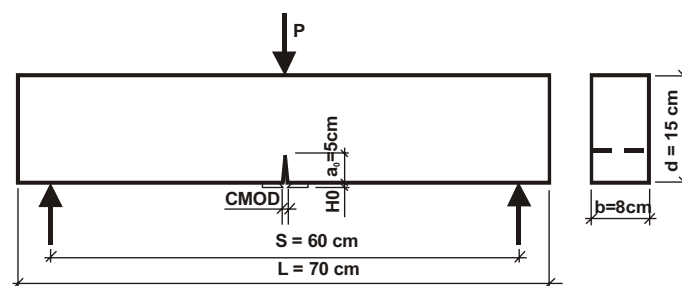
Zakres badań obejmował:

- wyznaczenie wybranych właściwości fizycznych i mechanicznych betonów,
- analizę stereologiczną, przeprowadzoną na zgładach betonów,
- analizę fraktograficzną i fraktalną powierzchni przełomów betonowych otrzymanych z badania odporności na pękanie według I modelu (rozciąganie przy zginaniu),
- wariantową optymalizację statystyczną.

2.3.1 Badania właściwości fizycznych i mechanicznych

Konsystencję mieszank betonowych określono normową metodą Vebe według PN-88/B-06250. Uzyskany wynik badania (czas Vebe) był jednocześnie czasem mechanicznego zagęszczania mieszanki betonowej na stole wibracyjnym.

Dla każdego układu planu wykonano po cztery belki o wymiarach 8×15×70 cm do badań odporności na pękanie według I modelu (rys. 2) oraz po sześć kostek o krawędzi 10 cm do badań wytrzymałości na ściskanie (f_c), pielęgnowanych w warunkach powietrzno-wilgotnych (wilgotność względna powietrza >95%) i badanych zgodnie z zaleceniami projektu zaleceń RILEM [1] i PN-88/B-06250. Badania wytrzymałościowe wykonano po 28 dniach dojrzewania betonów.



Rys. 2. Sposób obciążenia i wymiary belki z karbem stosowanej w badaniu odporności na pękanie.

Badania odporności na pękanie przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej

MTS-810. Rejestrowano jednocześnie zależność siły od przemieszczenia wylotu szczeliny CMOS oraz zależność siły od przemieszczenia punktu jej przyłożenia.

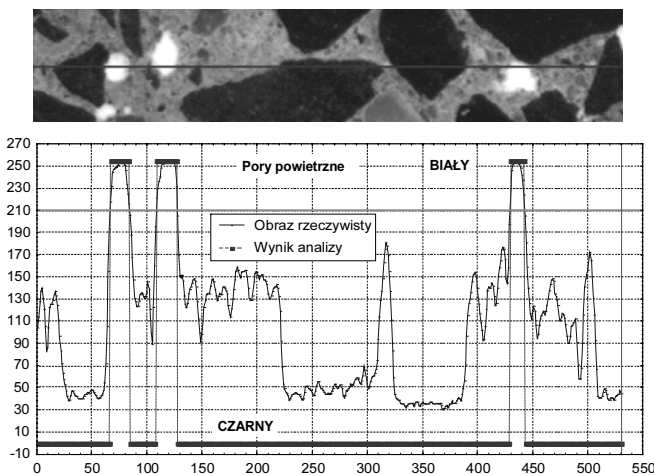
Z badań odporności na pękanie wyznaczono:

- krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{Ic}^S [1],
- pracę jednostkową zniszczenia J_{Ic} [3],
- współczynnik sprężystości wzdłużnej przy zginaniu E [1].

2.3.2 Badania stereologiczne

Badania stereologiczne przeprowadzono na zgładach o wymiarach 8×15 cm.

W przypadku analizy stereologicznej porów powietrznych preparatyka próbek polegała na przeszlifowaniu i w przypadku betonu na krużywie naturalnym wstępnym pomalowaniu powierzchni czarną farbą, a następnie wypełnieniu pustek białym gipsem.



Rys. 3. Graficzna interpretacja miejsc występowania porów powietrznych, beton bazaltowy.

Naniesienie czarnej farby wykluczało możliwość uznania jasnych ziaren żwiru za pory powietrzne oraz uniemożliwiało, w przypadku tego betonu, przeprowadzenie na tych samych próbkach analizy stereologicznej ziaren kruszywa grubego. Próbki do badań stereologicznych ziaren żwiru po wytrawieniu w roztworze kwasu solnego pomalowano czarną farbą, po czym naniesiono na nie gips, wcierając go aż do wyrównania powierzchni. Sposób interpretacji miejsc występowania porów w betonie bazaltowym, na przykładowej linii poprowadzonej przez obraz, pokazano na rys. 3. Piksele

o odcieniu szarości powyżej 210 uznano za należące do porów.

Zgłady, po zeskanowaniu przy rozdzielczości 400 dpi. poddano komputerowej analizie stereologicznej, wykonanej przy wykorzystaniu własnego programu komputerowego *FRAKTAL Stereolog*⁴⁵. Program umożliwił odpowiednie przygotowanie obrazu, przy zastosowaniu wybranych przekształceń punktowych i morfologicznych oraz przeprowadzenie obliczeń parametrów stereologicznych (tabela 3).

Badaniu poddano od 40 do 56 obszarów o powierzchni $20,54 \text{ cm}^2$ każda (łącznie od 821,6 do $1150,2 \text{ cm}^2$), a minimalne średnice analizowanych porów wynosiły około 0,2 mm.

Tabela 3. Zestawienie określanych parametrów stereologicznych.

Parametr stereologiczny	Analiza stereologiczna	
	porów powietrznych	ziaren kruszywa grubego
Objętość względna VV	+	+
Długość względną obwodów przekrojów LA	+	+
Liczność względna przekrojów NA	+	+
Powierzchnia względna SV	+	+
Średnia cięciwa	+	-

2.4 Badania fraktograficzne i fraktalne

Badania fraktograficzne i fraktalne przeprowadzono na specjalnie przygotowanych replikach gipsowych wykonanych na przełamach betonowych belek. Preparatyka próbek polegała na wykonaniu replik przełamów betonowych z gipsu białego, a następnie wylaniu, na tak przygotowane repliki, gipsu barwionego. Próbki cięto, wzdłuż dłuższego boku, na 10 pasków o grubości 5 mm, uzyskując w ten sposób, dla każdego przełomu po 20 linii profilowych. Takie przyjęcie kierunku cięcia miało na celu uzyskanie linii profilowych zgodnych w przybliżeniu z kierunkiem rozwijania się pęknięcia. Pocięte próbki poddano skanowaniu przy rozdzielczości 600 dpi., a współrzędne linii profilowych uzyskano, stosując własny program komputerowy *FRAKTAL_Digit*⁴⁶ [7].

⁴⁵ Konkol, J. (2002) *FRAKTAL_Stereolog*. Program komputerowy. Rzeszów.

⁴⁶ Konkol, J. (2001) *FRAKTAL_Digit*. Program komputerowy. Rzeszów.

Określono współczynnik rozwinięcia linii profilowej R_L (stosunek długości linii profilowej do długości jej rzutu na linię odniesienia), współczynnik rozwinięcia powierzchni przelomu R_S , określony metodą cykloid Wojnara (stosunek rzeczywistego pola powierzchni przelomu do jego rzutu na płaszczyznę odniesienia) oraz wymiar fraktalny. Obliczenia wymiaru fraktalnego D przeprowadzono metodami: cięciwy, pudełkową i wariogramu przy zastosowaniu własnego programu komputerowego *FRAKTAL Wymiar2D*⁴⁷.

3 CELE I TEZY PRACY

W pracy wytyczono trzy główne cele badań, z których pierwsze dwa odnoszą się do określenia zależności między właściwościami mechanicznymi betonów a ich strukturą i morfologią powierzchni przelomów, powstałych w procesie pęknięcia oraz porowatością betonów. Trzecim celem było skuteczne zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej do określenia zależności między właściwościami i strukturą betonów.

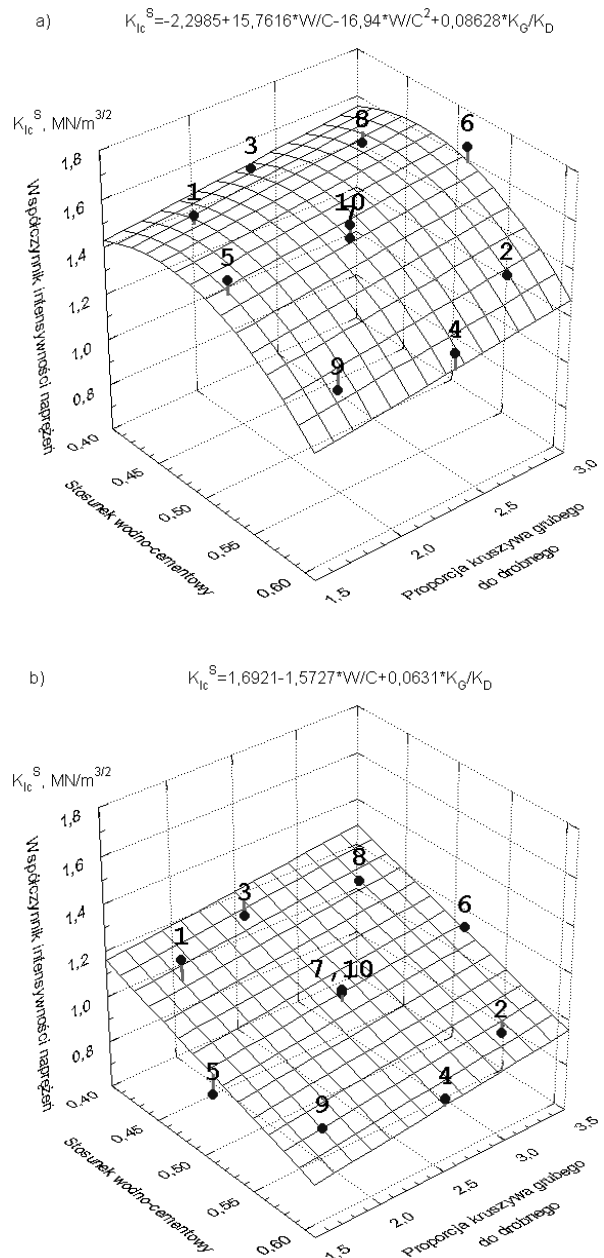
Sprecyzowano 3 tezy:

1. Możliwe jest określenie porowatości powietrznej betonów na podstawie badań stereologicznych płaskich przekrojów.
2. Istnieją statystyczne zależności między parametrami stereologicznymi struktury betonu i jego właściwościami.
3. Istnieje zależność między wymiarem fraktalnym powierzchni przelomów betonów a ich odpornością na pęknięcie, badaną według I modelu (rozciąganie przy zginaniu).

4 WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Głównym celem analizy statystycznej przeprowadzonych badań z szerokim wykorzystaniem pakietu *STATISTICA* było: wyznaczenie funkcji obiektu badań, dla każdej z cech badanego betonu oraz dokonanie optymalizacji wielokryterialnej, pozwalającej na znalezienie rozwiązania preferowanego pod względem przyjętych kryteriów.

⁴⁷ Konkół J. (2000). *FRAKTAL_Wymiar2D*. Program komputerowy. Rzeszów.



Rys. 4. Zależność krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic}^S od W/C i K_G/K_D , beton na kruszywie: a) łamanym, b) naturalnym.

Dla realizacji tych celów wykorzystano następujące moduły programu *STATISTICA*:

1 Podstawowe statystyki

- *Przekroje prosta ANOVA* – ustalanie statystyk opisowych według grup, planów badań;
- *Analiza wariancji* – określenie istotności wpływu wielkości wejściowych na wielkości wyjściowe (korelacja kwalitatywna, test F Snedecora);
- *Macierze korelacji* – ustalanie współczynnika korelacji i weryfikacja istotności korelacji;

2 ANOVA/MANOVA

- *Ogólna ANOVA* – sprawdzenie jednorodności wariancji (wybrano test Bartletta);
- 3 Estymacja nieliniowa – ustalenie funkcji obiektu badań metodą estymacji quasi-Newtona oraz weryfikacja istotności współczynników funkcji obiektu badań testem t ;
- 4 Regresja wielokrotna – określenie funkcji regresji oraz weryfikacja jej adekwatności, jak również ustalenie istotności wpływu zmiennych niezależnych.

4.1 Właściwości mechaniczne betonów

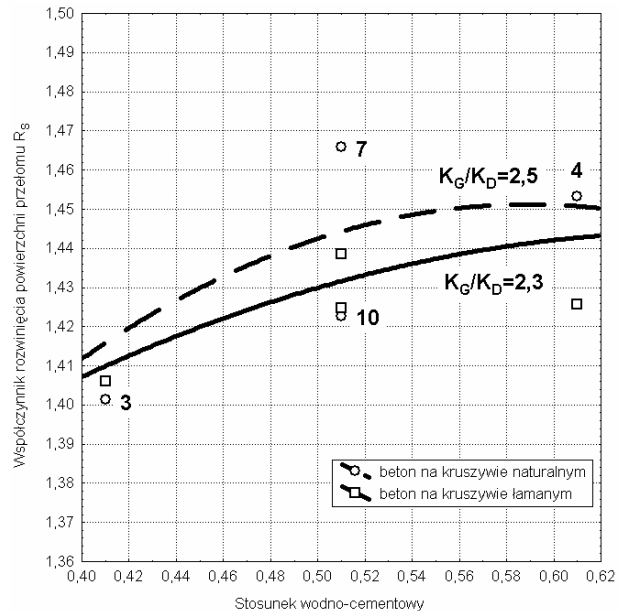
W wyniku analizy statystycznej zaobserwowano, że wzrost wartości wszystkich badanych cech wytrzymałościowych (E , K_{Ic}^S , J_{Ic} , f_c) następował przy jednoczesnym zwiększaniu się udziału kruszywa grubego i zmniejszaniu się stosunku wodno-cementowego. Przykładowe funkcje aproksymujące uzyskane w przypadku parametru K_{Ic}^S pokazano na rys. 4. Większe wartości wszystkich cech wytrzymałościowych uzyskano w przypadku betonów na kruszywie łamanym, w porównaniu do betonów na kruszywie naturalnym.

4.2 Badania stereologiczne, fraktograficzne i fraktalne

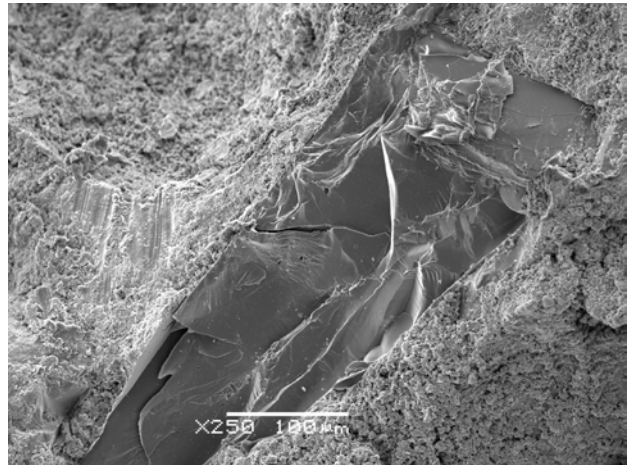
Uzyskane wyniki badań stereologicznych wykorzystano do wyjaśnienia zmiany zawartości powietrza w betonie oraz do opracowania modelu statystycznego skomplikowania powierzchni przełomu.

Stwierdzono, że powierzchni przełomów betonów charakteryzujących się gorszymi właściwościami mechanicznymi uzyskują większe wartości wymiaru fraktalnego D i parametrów R_L i R_S (na przykład wraz ze wzrostem stosunku wodno-cementowego W/C , w obu betonach obserwowano stały wzrost współczynnika rozwinięcia powierzchni przełomu R_S – rys. 5), natomiast przełomy betonów o większej odporności na pęknięcie i wytrzymałości na ściskanie są mniej skomplikowane.

Mniejsze skomplikowanie powierzchni przełomu było spowodowane zwiększeniem się wytrzymałości warstwy stykowej kruszywo/zaczyn cementowy i występowaniem przełomu międzyziarnowego (rys. 6).



Rys. 5. Współczynnik R_S w betonach na kruszywie łamanym i naturalnym w zależności od W/C przy stałej wartości K_G/K_D .



Rys. 6. Mikrostruktura betonu na kruszywie łamanym ($W/C = 0,51$ i $K_G/K_D = 3,0$, seria 6). Widoczne pęknięte na wskroś ziarno bazaltu.

Stwierdzono istotną korelację (przy poziomie istotności $p = 0,05$) między wymiarem fraktalnym D_C , określonym metodą cięciwy, a współczynnikiem sprężystości podłużnej E , pracą jednostkową zniszczenia J_{Ic} i wytrzymałością na ściskanie f_c . Wraz ze wzrostem wymiaru fraktalnego spadały wszystkie wyżej wymienione cechy wytrzymałościowe betonu na kruszywie łamanym.

Otrzymano zależności postaci:

$$E = 1850,0 - 1775,0 \cdot D_C \quad \text{przy } R = -0,740,$$

$$J_{Ic} = 4426,4 - 4294,0 \cdot D_C \quad \text{przy } R = -0,733,$$

$$f_c = 6542,5 - 6340,0 \cdot D_C \quad \text{przy } R = -0,720.$$

W przypadku K_{Ic}^S tego betonu oraz wszystkich cech wytrzymałościowych betonu na kruszywie naturalnym nie uzyskano istotnych korelacji między nimi a wymiarem fraktalnym.

Analizie poddano również wpływ na wymiar fraktalny D oraz parametry R_L i R_S : udziału zaprawy V_{ZAP} , powierzchni względnej kruszywa grubego S_{VK} oraz powierzchni względnej porów powietrznych S_{VP} . Stwierdzono, że wpływ powierzchni względnej porów powietrznych S_{VP} na wartości D , R_L i R_S jest nieistotny.

Uzyskane zależności mają postać:

– beton na kruszywie łamanym

$$D_C = 0,99200 + 0,00034 \cdot V_{ZAP} + 0,00211 \cdot S_{VK},$$

przy $R = 0,702$ i $p = 0,09$,

– beton na kruszywie naturalnym

$$D_C = 1,05327 - 0,00028 \cdot V_{ZAP} - 0,00144 \cdot S_{VK},$$

przy $R = 0,714$ i $p = 0,08$,

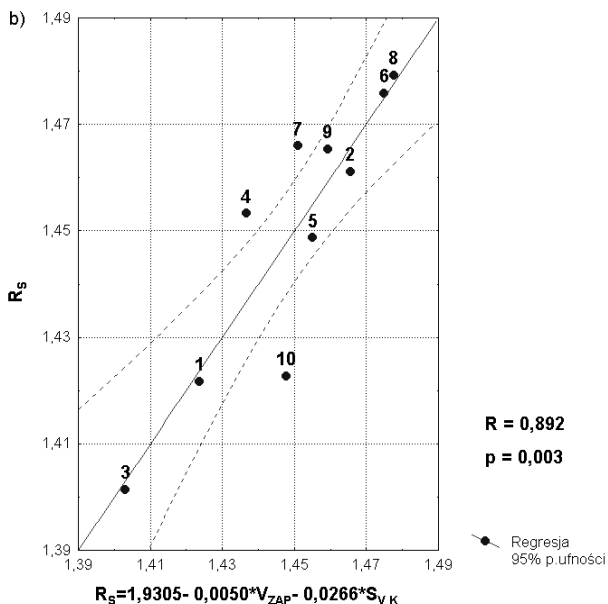
$$R_L = 1,5505 - 0,0030 \cdot V_{ZAP} - 0,0167 \cdot S_{VK},$$

przy $R = 0,896$ i $p = 0,003$,

$$R_S = 1,9305 - 0,0050 \cdot V_{ZAP} - 0,0226 \cdot S_{VK},$$

przy $R = 0,892$ i $p = 0,003$ (rys. 7).

Otrzymane funkcje regresji oraz wpływ zmiennych niezależnych można uznać za istotny, przy przyjęciu poziomu istotności $p = 0,1$.



Rys. 7. Zależność między współczynnikiem rozwinięcia powierzchni przełomu R_S a udziałem zaprawy V_{ZAP} oraz powierzchni względnej kruszywa grubego S_{VK} w betonie na kruszywie naturalnym.

Stwierdzono, że wymiar fraktalny D_C oraz parametry R_L i R_S są zróżnicowane w zależności od rodzaju kruszywa grubego, a szczególnie od jego chropowatości i kształtu ziaren. Większa powierzchnia względnej żwiru, z uwagi na gładką powierzchnię i obły kształt jego ziaren, powodowała zmniejszenie wartości tych parametrów (mniejsze skomplikowanie powierzchni przełomu), natomiast większa powierzchnia względna bazaltu, z uwagi na kształt i chropowatość ziaren bazaltu wpłynęły na ich zwiększenie.

4.3 Optymalizacja wielokryterialna

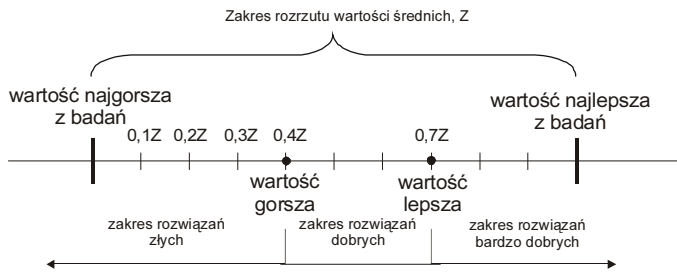
Celem optymalizacji było uzyskanie optymalnego składu betonu, ze względu na wybrane właściwości oraz wykazanie związku struktury z właściwościami mechanicznymi betonów. Jako zmienne decyzyjne przyjęto stosunek wodno-cementowy W/C oraz udział kruszywa grubego w mieszance betonowej, określony jako stosunek kruszywa grubego do drobnego K_G/K_D .

Dziedzinę eksperymentu dla punktów x_1 (W/C) i x_2 (K_G/K_D) planu eksperymentu przyjęto następująco: $\Omega = \{(x_1, x_2) : x_1^2 + x_2^2 \leq 1\}$.

Zbiór Ω stanowi obszar rozwiązań dopuszczalnych dwuwymiarowej przestrzeni zmiennych decyzyjnych.

Jako kryteria optymalizacji i wagi przyjęto:

- maksimum współczynnika sprężystości połużnej po 28 dniach, $\max E$, waga 0,10;
- maksimum krytycznego współczynnika intensywności naprężeń, badanego według I modelu zniszczenia, $\max K_{Ic}^S$, waga 0,25;
- maksimum pracy jednostkowej zniszczenia, $\max J_{Ic}$, waga 0,10;
- maksimum wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach, $\max f_c$, waga 0,25;
- minimum zawartości porów powietrznych w betonie, $\min V_V$, waga 0,20;
- minimum wymiaru fraktalnego określonego metodą cięciwy, $\min D_C$, waga 0,05;
- minimum wymiaru fraktalnego określonego metodą pudełkową, $\min D_{BC}$, waga 0,05;
- konsystencja plastyczna lub gęstoplastyczna według metody Vebe, zakres 7-27 s.



Rys. 8. Sposób określenia wartości lepszej i gorszej.

Optymalizację składu badanych betonów przeprowadzono przy wykorzystaniu metody funkcji użyteczności⁴⁸ [10]. W tym celu określono przedziały wartości zadawalających dla każdej cechy oraz przypisano cechom wagi. Zakresy rozwiązań bardzo dobrych, dobrych i złych określono, przyjmując wartości gorszą i lepszą według sposobu pokazanego na rys. 8.

Obliczenia przeprowadzono metodą funkcji użyteczności U^I i U^{III} postaci:

$$U^I(y_1, y_2, \dots, y_6) = \sum_{j=1}^6 w_j \xi_j(y_j) = \sum_{j=1}^6 w_j \frac{y_j - y_{jG}}{y_{jL} - y_{jG}}$$

$$U^{III}(y_1, y_2, \dots, y_6) = \exp \left[- \sum_{j=1}^6 w_j \exp \left(- \frac{y_j - y_{jG}}{y_{jL} - y_{jG}} \right) \right]$$

gdzie:

- y_j – wartość w danym punkcie dziedziny eksperymentu dla j-tego kryterium,
- y_{jG} – wartość gorsza dla j-tego kryterium,
- y_{jL} – wartość lepsza dla j-tego kryterium.
- w_j – wagi poszczególnych kryteriów.

Wartości funkcji użyteczności $0 \leq U^I < 1$ oznacza użyteczność zadowalającą pod względem przyjętych kryteriów optymalizacji, zaś $U^I \geq 1$ oznacza użyteczność bardzo dobrą.

W przypadku funkcji użyteczności U^{III} użyteczność zadowalającą stanowi obszar wartości U^{III} z przedziału $\langle 0,368; 0,692 \rangle$.

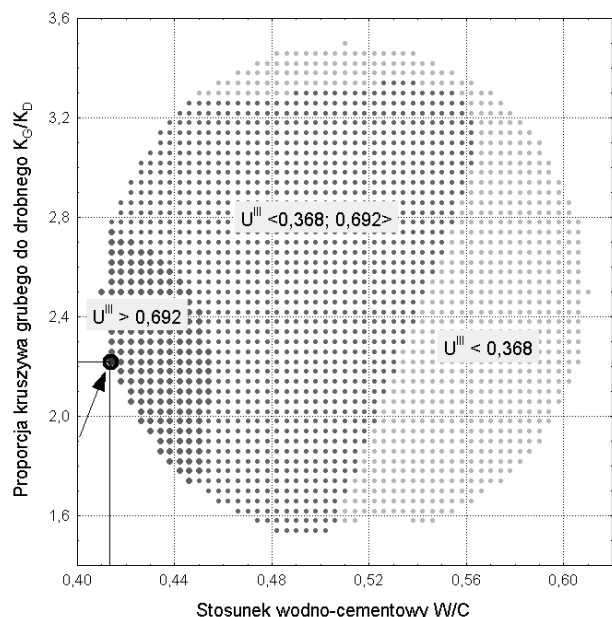
W wyniku przeprowadzonej optymalizacji uzyskano współrzędne punktów preferowanych dla funkcji użyteczności U^I i U^{III} (rys. 9 i 10, położenie punktów pokazują strzałki):

- beton na kruszywie łamanym o największej użyteczności $U^I = 1,498$ i użyteczności $U^{III} = 0,787$ zawierał 323,3 kg cementu, 570,1 kg piasku, 1566,7 kg bazaltu, 140,3 l wody przy stosunku wodno-cementowym

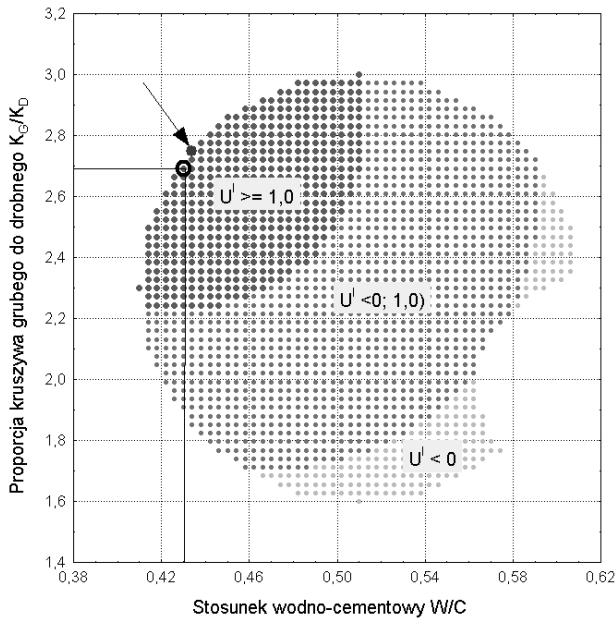
$W/C = 0,434$ i proporcji kruszywa grubego do drobnego $K_G/K_D = 2,748$.

- beton na kruszywie naturalnym o największej użyteczności $U^I = 1,553$ i użyteczności $U^{III} = 0,791$ zawierał 414,4 kg cementu, 571,8 kg piasku, 1269,3 kg żwiru, 171,6 l wody przy stosunku wodno-cementowym $W/C = 0,414$ i proporcji kruszywa grubego do drobnego $K_G/K_D = 2,22$.

Sprawdzono również wpływ uwzględnienia w optymalizacji parametrów stereologicznych (objętość względna V_V) i fraktalnych (D_C i D_{BC}) na położenie punktu preferowanego (udział tych parametrów w optymalizacji wynosił 30%). W tym celu przeprowadzono optymalizację tylko ze względu na dwa parametry: K_{Ic}^S i J_{Ic} (przyjmując 50% wagę każdego z nich). W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano w przypadku betonu na kruszywie łamanym punkt preferowany przy $W/C = 0,426$ i $K_G/K_D = 2,664$, a w przypadku betonu na kruszywie naturalnym przy $W/C = 0,41$ i $K_G/K_D = 2,26$. Otrzymane punkty mieszczą się w obszarach rozwiązań bardzo dobrych i są nieznacznie przesunięte względem wcześniej określonych punktów preferowanych (patrz rys. 9 i 10 punkty zaznaczone kółkiem). Uzyskana zgodność potwierdza związek parametrów stereologicznych i fraktalnych z właściwościami wytrzymałościowymi betonów.

Rys. 9. Zbiory rozwiązań optymalnych wraz z punktem preferowanym z uwagi na funkcję użyteczności U^I – beton na kruszywie łamanym.

⁴⁸ Zastosowano własny program komputerowy Optymal.



Rys. 10. Zbiory rozwiązań optymalnych wraz z punktem preferowanym z uwagi na funkcję użyteczności U^{III} – beton na kruszywie naturalnym.

5 STWIERDZENIA I WNIOSKI KOŃCOWE

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz potwierdzono przyjęte w pracy tezy oraz sformułowano następujące wnioski końcowe:

- ◆ Występuje istotny wpływ zmiennych przyjętego planu badań, tj. stosunku wodno-cementowego (W/C) i udziału kruszywa grubego w mieszance betonowej (K_G/K_D), na właściwości badanych betonów. Wzrost stosunku wodno-cementowego oraz mniejszy udział kruszywa grubego w mieszance betonowej powodowały spadek badanych cech mechanicznych obu rodzajów betonów, tj.: współczynnika sprężystości podłużnej E , krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{lc}^S , pracy jednostkowej zniszczenia J_{lc} i wytrzymałości na ściskanie f_c .
- ◆ Zastosowanie w pracy planu doświadczeń i wykorzystanie analizy regresji i wariacji przyczyniło się do wzrostu efektywności badań i pozwoliło na uzyskanie modeli statystycznych, dzięki którym możliwe było przeprowadzenie dokładnych analiz wpływu zmiennych w przyjętym planie badań na strukturę i właściwości betonów oraz umożliwiło wykorzystanie uzyskanych modeli statystycznych do przeprowadzenia wielokryterialnej optymalizacji statystycznej.
- ◆ Badania potwierdziły przydatność stereologicznych metod określania porowatości po-

wietrznej betonu na próbkach utwardzonych z wykorzystaniem analizy obrazu, a także przydatność wyznaczonych tymi metodami parametrów stereologicznych do oceny charakterystyk porów powietrznych i kruszywa grubego.

- ◆ Badania fraktograficzne potwierdziły związek między charakterem przełomu a właściwościami betonów. Im stopień skomplikowania powierzchni przełomu był większy (większa wartość R_L i R_S), tym betony miały gorsze właściwości mechaniczne. Jest to spowodowane zmniejszeniem się sił spójności na styku kruszywo/zaczyn cementowy i występowaniem przełomu poziarnowego. Powierzchnie przełomów betonów o większej wytrzymałości, na skutek pęknięcia na wskroś ziaren kruszywa (przełom międzyziarnowy), były bardziej płaskie.

Przeprowadzenie łączne badań fraktograficznych z badaniami stereologicznymi umożliwiło otrzymanie modelu statystycznego do wyznaczenia współczynników R_L i R_S , na podstawie powierzchni względnej kruszywa grubego S_{VK} oraz objętości zaprawy V_{ZAP} . Stwierdzono, że większa powierzchnia względnej żwiru, z uwagi na gładką powierzchnię i obły kształt jego ziaren, powodowała zmniejszenie wartości współczynników R_L i R_S , natomiast większa powierzchnia względna bazaltu, z uwagi na kształt i chropowatość ziaren bazaltu wpłynęły na zwiększenie wartości współczynników R_L i R_S .

W przypadku obu betonów otrzymano bardzo dobrą korelację między współczynnikiem rozwinięcia linii profilowej R_L i współczynnikiem rozwinięcia powierzchni przełomu R_S , wynoszącą w przypadku betonu na kruszywie łamanym $R = 0,988$, a w przypadku betonu na kruszywie naturalnym $R = 0,996$. Wraz ze zwiększeniem parametru R_L zwiększał się również współczynnik rozwinięcia powierzchni przełomu R_S .

- ◆ Analiza fraktalna potwierdziła, że linie profilowe przełomów betonów są fraktalami i można prowadzić na nich wszelkie operacje właściwe geometrii fraktalnej.

Stwierdzono, że najbardziej odpowiednią do określania wymiaru fraktalnego linii profilowych przełomów betonowych jest metoda cięciwy. Metoda ta okazała się czuła na zmianę rodzaju kruszywa. Większe wartości

wymiaru fraktalnego otrzymano w przypadku betonu na kruszywie naturalnym, aniżeli w przypadku betonu na kruszywie łamanym. Stwierdzono również, że większe wartości wymiaru fraktalnego uzyskiwały betony o większym W/C.

Wykazano istnienie związku między parametrami charakteryzującymi powierzchnie przełomów, tj. wymiarem fraktalnym D a współczynnikiem R_L i R_S ; wzrostowi wymiaru fraktalnego towarzyszył wzrost parametrów R_L i R_S .

- ◆ Badania fraktalne nie potwierdziły jednoznacznie istnienia zależności między wymiarem fraktalnym powierzchni przełomów badanych betonów a ich właściwościami mechanicznymi, w tym odporności na pękanie. Istotne korelacje między wymiarem fraktalnym określonym metodą cięciwy D_C a współczynnikiem sprężystości podłużnej E , pracą jednostkową zniszczenia J_{lc} i wytrzymałością na ściskanie uzyskano jedynie w przypadku betonu na kruszywie łamanym. Nie stwierdzono jednak w tym przypadku istotnych korelacji między wymiarem fraktalnym a krytycznym współczynnikiem intensywności naprężeń K_{lc}^S .

W przypadku betonu na kruszywie naturalnym stwierdzono istotną korelację między wymiarem fraktalnym D_C a udziałem zaprawy w mieszance betonowej V_{ZAP} i objętością względną kruszywa grubego V_{VK} . Wraz ze wzrostem objętości kruszywa grubego w betonie na kruszywie naturalnym zmniejsza się wartość wymiaru fraktalnego D_C . Ziarna żwiru o gładkiej powierzchni i obłym kształcie wpływały na mniejsze skomplikowanie powierzchni przełomu.

- ◆ Badania mikrostrukturalne wykazały wpływ składu mieszanki betonowej na charakter mikrostruktury betonów. W miarę zwiększania się stosunku wodno-cementowego W/C zwiększała się porowatość zaczynu cementowego, obserwowano także liczniejsze mikro-pęknięcia o większej szerokości, szczególnie na styku kruszywo/zaczyn cementowy. Obniżało to wszystkie badane parametry wytrzymałościowe betonów (f_c , K_{lc}^S i J_{lc}). Największą liczbę nieciągłości struktury zaczynu obserwowano w przypadku betonów o większym W/C i mniejszym udziale kruszywa grubego w betonie, co skutkowało

obniżeniem odporności na pękanie tych betonów.

- ◆ Zastosowanie wielokryterialnej optymalizacji statystycznej metodą funkcji użyteczności pozwoliło na uzyskanie optymalnego, ze względu na przyjęte kryteria, składu mieszanki betonowej (punktów preferowanych). W przypadku betonu na kruszywie łamanym najlepszy pod względem przyjętych kryteriów optymalizacji okazał się beton o W/C $\approx 0,43$ i proporcji kruszywa grubego do drobnego $K_G/K_D \approx 2,75$, a w przypadku betonu na kruszywie naturalnym beton o W/C $\approx 0,41$ i proporcji kruszywa grubego do drobnego $K_G/K_D \approx 2,22$.

BIBLIOGRAFIA

- 1) (1991) Fracture Mechanics Test Methods for Concrete. RILEM Report 89-FMT, edited by S.P. Shah and A. Carpinteri, Chapman and Hall.
- 2) Issa, M.A., Islam, Md.S, Chudnovsky, A. (2003). Fractal dimension – a measure of fracture roughness and toughness of concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 125-137.
- 3) Konkol, J. (2001). Praktyczne zastosowanie techniki komputerowej do precyzyjnego pomiaru pola powierzchni. Materiały konferencyjne z VI Konferencji Naukowej Lwowsko-Koszycko-Rzeszowskiej pt. „Aktualne problemy budownictwa i inżynierii środowiska”, Lwów, 12-15 września, 337-344.
- 4) Konkol, J. (2002). Stereologia i automatyczna komputerowa analiza obrazu w badaniach betonów. Część I – Przekształcenia obrazu. Materiały konferencyjne z VII Konferencji Naukowej Koszycko-Lwowsko-Rzeszowskiej pt. „Aktualne problemy budownictwa i inżynierii środowiska”, Koszyce, 22-24 maja, 13, 155-158.
- 5) Konkol, J. (2002). Stereologia i automatyczna komputerowa analiza obrazu w badaniach betonów. Część II – Analiza obrazu. Materiały konferencyjne z VII Konferencji Naukowej Koszycko-Lwowsko-Rzeszowskiej pt. „Aktualne problemy budownictwa i inżynierii środowiska”, Koszyce, 22-24 maja, 13, 159-165.
- 6) Konkol, J., Kulpiński, J., Prokopski, G. (2002). Zastosowanie analizy obrazu do określania porowatości betonu na próbkach utwardzonych. *Inżynieria Materiałowa*, 6, 737-742.
- 7) Konkol, J., Prokopski, G. (2002). Metoda odwzorowywania kształtu krzywej i jej praktyczne zastosowanie do analizy przełomów betonowych. *Przegląd Budowlany*, 11, 32-37.
- 8) Konkol, J., Prokopski, G. (2004). Analysis of the fracture surface morphology of concrete by the method of vertical section. *Computers and Concrete*, 1(4), 389-400.
- 9) Konkol, J., Prokopski, G. (2006). Ocena fraktalna struktury porów w materiałach budowlanych. I Międzynarodowa Konferencja Energii Słonecznej i Budownictwa Ekologicznego „Energia Odnawialna. Innowacyjne idee i technologie dla budownictwa”, Solina, 17-20 maja. W: *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 40(229), 263-270.

- 10) Konkol, J., Prokopski, G. (2006). Optymalizacja wielokryterialna składu betonów zwykłych z uwzględnieniem parametrów wytrzymałościowych i strukturalnych. *Przegląd Budowlany*, 2, 23-28.
- 11) Konkol, J., Prokopski, G. (2006). Zastosowanie metody analizy obrazu do oceny struktury porów w materiałach budowlanych. I Międzynarodowa Konferencja Energii Słonecznej i Budownictwa Ekologicznego „Energia Odnawialna. Innowacyjne idee i technologie dla budownictwa”, Solina, 17-20 maja. W: *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 40(229), 271-276.
- 12) Lange, D.A., Jennings, H.M., Shah, S.P. (1993). Relationship between fracture surface roughness and fracture behavior of cement paste and mortar. *Journal of the American Ceramic Society*, 76(3), 589-597.
- 13) Polański, Z. (1984). *Planowanie doświadczeń w technice*. Warszawa, PWN.
- 14) Prokopski, G., Konkol, J. (2005). The fractal analysis of the fracture surface of concretes made from different coarse aggregates. *Computers and Concrete*, 2(3), 239-248.
- 15) Saouma, V.E, Barton, C.C. (1994). Fractals, fractures, and size effects in concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 120(4), 835-854.