

Opis powierzchni przełamów wybranych skał metodami morfologii matematycznej

MARIUSZ MŁYNARCZUK, TERESA RATAJCZAK, JAROSŁAW AKSAMIT

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

W publikacji przedstawiono wyniki prac mających na celu zbadanie możliwości wykorzystania metod analizy obrazu i morfologii matematycznej do opisu ukształtowania powierzchni przełamów skalnych. Prace te były rozwinięciem metodyki zaproponowanej w latach 2001-2002 i doprowadziły do częściowej jej modyfikacji oraz uzupełniły ją o nowe parametry.

Badania prowadzono na 25 rodzajach przełamów skalnych. W szczególności zbadano zależność proponowanych parametrów od:

- rodzaju skał różniących się zdecydowanie cechami strukturalno-teksturalnymi (dolomit z Rędzin, piaskowiec z Tumlina, kwarcyt z Wiśniówki, wapień z Czatkowic oraz dolomit z Laskowej Góry),
- różnic strukturalno-teksturalnych w ramach skał tego samego typu (12 próbek dolomitów z poziomu wapienia cechsztyńskiego z obszaru kopalni rud miedzi),
- sposobu wymuszania przełamów (drobnoziarniste granity ze Strzelina podgrzewane do temperatur 100°, 300° i 500° zostały poddane jednoosiowemu i trójosiowemu ściskaniu).

Prowadzone badania wykazały przydatność zaproponowanej metodyki badawczej oraz pozwoliły postawić tezę, że metodyka ta może odpowiedzieć na pytanie czy badana próbka skalna ma podobne cechy strukturalno-teksturalne jak próbka wzorcowa.

Słowa kluczowe: morfologia przełamu, chropowatość, morfologia matematyczna, analiza obrazu

1. Wstęp

Prowadzone w IMG PAN w latach 2001-2002 wstępne badania nad zastosowaniem analizy obrazu i morfologii matematycznej do analizy ukształtowania powierzchni przełamów skalnych doprowadziły do zaproponowania nowych metod opisu tej powierzchni [Młynarczuk i in., 2001, 2002a, 2002b, Młynarczuk, 2002, 2004]. Jednakże w celu pełniejszego zbadania poprawności oraz przydatności proponowanych metod niezbędne okazały się pomiary na większej ilości przełamów. Dodatkowo, dokonano modernizacji stanowiska pomiarowego oraz zakupiono specjalistyczny program do analizy obrazu Aphelion. Powyższe fakty pozwalają dogłębniej spojrzeć na zaproponowaną metodykę pomiarową, po części ją modyfikując, a po części uzupełniając o nowe parametry.

2. Aktualny stan badań

Opis chropowatości powierzchni skalnych opiera się często na odczuciach subiektywnych, np. na subiektywnym wyczuciu jakości przełamu (szorstkiego lub gładkiego) [Chmura, 1970]. Takie, intuicyjne i nieznormalizowane podejście wydaje się dalece niezadowolające. Z drugiej strony, prace prowadzone w IMG PAN przez Bodzionego [Bodziony et al., 1998] wykazały niezbyt dużą użyteczność parametrów chropowatości zestawionych w PN (PN-87/M-04256/01) do opisu powierzchni przełamów skalnych. Powyższe fakty były punktem wyjścia do rozpoczęcia badań mających na celu opracowanie metodyki pomiarowej umożliwiającej jednoznaczny i jak najpełniejszy opis powierzchni przełamu. W IMG PAN prace takie

zainicjowane zostały przez Kraja i Bodzionego [Kraj, 1994] i w efekcie doprowadziły do zaproponowania szeregu parametrów geometrycznych mogących służyć do tego celu [Bodziony, 1997]. Kontynuacja tej tematyki badawczej pozwoliła na zaproponowanie przez Młynarczuka [Młynarczuk i in., 2001] metodyki polegającej na wykorzystaniu do opisu powierzchni przełamów przekształceń analizy obrazu i morfologii matematycznej.

Badania dotyczące opisu ukształtowania powierzchni przełamów skalnych prowadzone są w świecie na szeroką skalę. Z polskich autorów wspomnieć należy badania prowadzone przez Kwaśniewskiego [Kwaśniewski i Wang, 1997]. Wydaje się jednak, że proponowane w niniejszej pracy podejście do tej problematyki jest nowatorskie.

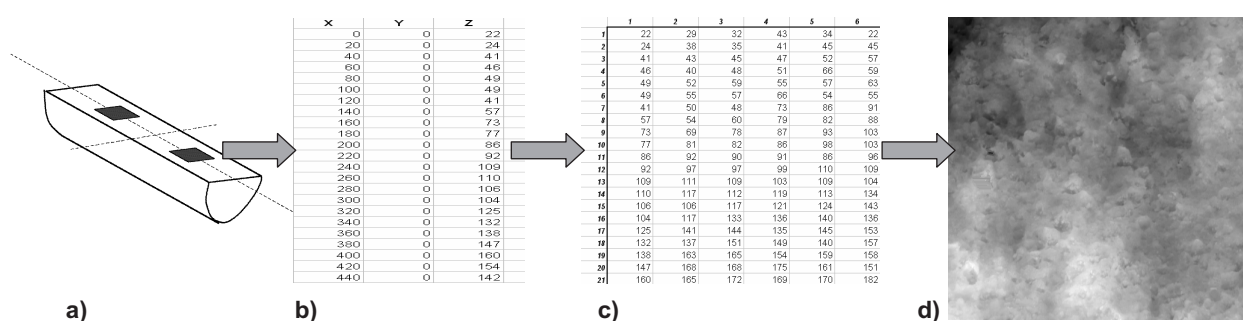
Szeroki zakres badań prowadzonych nad tą tematyką świadczy o randze tego zagadnienia. Wspomnieć należy, że rodzaj przełamu mówi, w jaki sposób skały będą tworzyć powierzchnię spękań podczas ich urabiania w kopalni i jak w związku z tym będą się one zachowywać w czasie eksploatacji kopaliny użytecznej [Chmura, 1970]. Niesie on też informację o tym, jak zachowywać się będzie skała podczas procesów rozdrabniania, traktowanych jako operacja podstawowa, poprzedzająca procesy wzbogacania, względnie klasyfikacji [Kraj, 1994]. Dodatkowo, znajomość morfologii przełamu skalnego jest również przydatna w badaniach nad przepuszczalnością skał [Konečný et al., 2003].

Prowadzone w IMG PAN prace mają również na celu odpowiedź na pytanie, czy i jak ukształtowanie przełamu skalnego skorelowana jest z uziarnieniem badanych skał, oraz czy i jak skorelowana jest ona ze sposobem wymuszenia tego przełamu. Podobne prace podejmowane były dotąd sporadycznie [Gentier, 1987; Gentier i Riss, 1987; Gentier i Riss, 1989; Wang, 1994] i nie dały jednoznacznego wyniku.

3. Proponowana metodyka badawcza

U podstaw proponowanej metodyki pomiarowej leży idea, że macierz wartości XYZ, otrzymaną w wyniku skanowania powierzchni przełamu skalnego (w prezentowanych badaniach odbywało się to przy użyciu profilomierza firmy Micro-Epsilon [Młynarczuk, 1994]), można przedstawić jako standardowy obraz (mapę bitową). Na obrazie tym, piksele o współrzędnych XY odpowiadają położeniu odpowiedniego punktu pomiarowego w macierzy, a poziom szarości danego piksela odpowiada wysokości danego punktu w mikrometrach. Rys. 1 przedstawia sposób „przejścia” od pomiarów na przełamem do otrzymania obrazu szarego.

Metodyka ta pozwala na wykorzystanie do analizy geometrii przełamu skalnego aparatu matematycznego stosowanego w standardowych metodach analizy obrazów, a w szczególności w morfologii matematycznej.



Rys. 1. Analizowane pole na przełame (a) zapisywane jest w pamięci komputera w formie tabeli wartości XYZ (b). Tabele tę można przedstawić jako dwuwymiarową macierz (c) oraz jako mapę bitową – czyli standardowy obraz (d)

4. Opis analizowanych skał

Badania prowadzone były w 3 obszarach problemowych. Miały one na celu zbadanie zależności zaproponowanych parametrów opisujących morfologię przełamu od:

- rodzaju skał różniących się zdecydowanie cechami strukturalno-teksturalnymi,
- różnic strukturalno-teksturalnych w ramach skał tego samego typu,
- sposobu wymuszania przełamów.

Badania dotyczące każdego z tych problemów prowadzone było na innych typach skał. Wybór tych skał przedstawia się w sposób następujący:

- a) dolomit z Rędzin, piaskowiec z Tumlina, kwarcyt z Wiśniówki, wapień z Czatkowic oraz dolomit z Laskowej Góry,
- b) 12 odmian dolomitów z poziomu wapienia cechsztyńskiego z obszaru kopalni rud miedzi,
- c) drobnoziarniste granity ze Strzelina wygrzewane do temperatur 100°, 300° i 500° [Nowakowski et al., 2003] oraz poddane jednoosiowemu oraz trójosiowemu ściskaniu.

Poniżej przedstawiony został krótki opis tych skał.

Zadanie a)

Kwarcyt z Wiśniówki (k. Kielc) – górny kambr – jest to skała monomineralna, drobnoziarnista, złożona prawie wyłącznie z kryształów kwarcu o wielkości rzędu 0.08-0.2 mm. Poszczególne ziarna kwarcu są zregenerowane i łączą się ze sobą ściśle obwódkami kwarcowymi. Proces regeneracji spowodował zmianę pierwotnego kształtu i wielkości ziarn kwarcu oraz wpłynął na własności techniczne (duża wytrzymałość).

Piaskowiec z Tumlina (obrzeżenie Gór Świętokrzyskich) – dolny trias – jest to skała o strukturze psamitowej, o wielkości ziarn kwarcu 0.04-0.4 mm. Niekiedy spotyka się w nim okruchy ziarn krzemionkowych o średnicy dochodzącej do 0.8 mm. Ziarna kwarcu miejscami ostrokrawędziste spojone są spoiwem krzemionkowo-żelazistym lub krzemionkowo-ilastym (kaolinit). Ilość spoiwa do 15%. Miejscami ziarna kwarcu stykają się ze sobą.

Dolomit z Rędzin (k. Kamiennej Góry) – dolny karbon – jest to skała metamorficzna, monomineralna, dość równokrystaliczna, zbudowana wyłącznie z kryształów dolomitu o wielkości rzędu 0.1-0.3 mm. Kontakty ziarn ze sobą są przeważnie równe, rzadziej ząbczaste z zupełnym brakiem spoiwa. Kryształy dolomitu wykazują w świetle spolaryzowanym charakterystyczne żywe barwy interferencyjne i proste ściemnianie światła. Na większych ziarnach zaznacza się dobrze widoczna łupliwość równoległa lub romboedryczna.

Wapień z Czatkowic (k. Krzeszowic) – dolny karbon – jest to skała zbudowana w przeważającej części z pelitycznego kalcytu o strukturze drobnogruźelkowej wielkości rzędu 0.03-0.05 mm. Znaczna część pelitu wapiennego uległa rekrytalizacji tworząc afanokrystaliczne (skrytokrystaliczne) spoiwo. Spotyka się bardzo liczne szczątki pochodzenia organicznego, słabo zachowane i trudne do identyfikacji, tworzące monokryształy kalcytu o wielkości rzędu 0.2 mm. Większe szczeliny i pęknięcia wypełnione są wtórnie krystalicznym kalcytem.

Dolomit z Laskowej Góry (Góry Świętokrzyskie) – dewon – jest to skała osadowa, monomineralna, nierównokrystaliczna, zbudowana wyłącznie z kryształów dolomitu o wielkości rzędu 0.06-0.45 mm. Kryształy reprezentujące grubsze frakcje kontaktują się ze sobą wzdłuż linii prostych, wyjątkowo zaś ząbczastych. W zasięgu powierzchni mikroskopowej preparatu widać pewną prawidłowość w ułożeniu ziarn różniących się wielkością (skupienie ziarn drobno lub grubokrystalicznych).

Używane w badaniach przełamy opisywanych skał uzyskano w wyniku testu brazylijskiego.

Zadanie b)

Dolomity z poziomu wapienia cechsztyńskiego (makroskopowo) to skały zwięzłe o strukturze afanitowej (skrytokrystalicznej), lub drobnokrystalicznej i na ogół teksturze masywnej. Są to dolomity wtórne powstałe na drodze dolomityzacji wapieni. Barwa ich jest przeważnie szara, od jasnej do ciemnoszarej w zależności od domieszek substancji węglanowej i ilastej. Niekiedy, w obrębie serii, obecne są wkładki skał węglanowych o teksturze porowato-kawernistej. Mikroskopowo, dolomity te zbudowane są z kryształków dolomitu, często o formie romboedrycznej i wielkości od 0.01 do 0.15 mm. Substancja ilasta i bitumiczna obecna jest na ogół w niewielkich ilościach w formie rozproszonej, lub nieregularnych smużek. Widoczne na szlifach cienkich okruszczenie siarczkami Cu i Pb występuje w formie rozproszonej lub drobnych, nieregularnych skupień, soczewek i krótkich żyłek. Na szlifach cienkich widoczne są także minerały gipsu ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) i anhydrytu (CaSO_4) o szeregu odmian litologicznych różniące się strukturą i teksturą. Przeważają jednak krytokrystaliczne o teksturze masywnej.

Używane w badaniach przełamy dolomitów uzyskano w wyniku testu brazylijskiego.

Zadanie c)

Drobnokrystaliczny granit ze Strzelina jest skałą magmowa o teksturze zbitej i bezładnej. Struktura pełno- i drobnokrystaliczna. W składzie mineralnym dominują skalenie, którym towarzyszą kwarc oraz biotyt. Skalenie są reprezentowane zarówno przez odmiany alkaliczne jak i plagioklasy. Przeważają kryształy plagioklazów reprezentowanych przez oligoklaz (0,2-1,5 mm). Nieco rzadziej spotykane są skalenie alkaliczne reprezentowane przez ortoklaz i mikropertyt. Minerale te tworzą zazwyczaj duże (0,3-2 mm), ksenomorficzne kryształy, niekiedy słabo zsercytyzowane i często zbliżone. Kolejnym składnikiem skały jest kwarc. Tworzy on ksenomorficzne ziarna o zróżnicowanej wielkości (0,2-1 mm) połączone w agregaty wyróżniające się typowym dla tego minerału falistym znikaniem światła. Listę głównych składników skały uzupełnia biotyt tworzący przeważnie drobne (0,05-0,4 mm), hipautomorficzne ziarna o pokroju blaszkowym. Niekiedy spotyka się osobniki do 1 mm.

5. Wpływ struktury skały na parametry opisujące morfologię przełamania

Wyniki badań pilotażowych, opisanych w pracach [Młynarczuk i in., 2001, 2002; Młynarczuk, 2004] sugerują, że najciekawsze wyniki dotyczące korelacji pomiędzy parametrami opisującymi morfologię przełamania a uziarnieniem badanych skał otrzymuje się stosując przekształcenia, które analizują obraz w sposób lokalny, nie zaś globalny. Uściślając, dobre wyniki otrzymano analizując lokalne nachylenia „zboczy”, lokalne gradienty lub funkcje wariogramu; nieco gorsze, analizując objętość obrazu, różnice między globalnymi maksimumami a minimumami, itp. Dlatego też, w niniejszych badaniach postanowiono skoncentrować się tylko na tych metodach, które w pilotażowych badaniach dały najlepsze rezultaty.

Dla celów badawczych, na każdej z 3 próbek, pięciu badanych skał zeskanowano przy użyciu profilomierza laserowego, po 2 pola pomiarowe o wielkości 512×512 punktów pomiarowych, odległych od siebie o 20 μm.

5.a. Wariogram

Ze względu na ograniczenia programu do analizy obrazu, którym posługiwano się w badaniach pilotażowych (MicroMorph), obliczany w nich wariogram nieco odbiegał od przyjętej powszechnie definicji [Młynarczuk, 2002]. Dzięki zakupowi nowszego oprogramowania (Aphelion) jesteśmy obecnie w stanie wyliczyć wariogram $\gamma(h, \alpha)$ opierając się na powszechnie przyjętej definicji obowiązującej dla analizy obrazów szarych [Serra, 1981; Ahmed et al., 1995]:

$$2\gamma(h, \alpha) = \frac{1}{N(h)} \sum_{n=1}^{N(h)} (Z(x_n) - Z(x_n + h))^2 \quad (1)$$

gdzie:

- h – odległość (w kierunku α) pomiędzy dwoma punktami,
- $Z(x_n)$ oraz $Z(x_n + h)$ – wartości funkcji (poziomów szarości) w tych punktach,
- $N(h)$ – ilość punktów na analizowanym obrazie.

Należy podkreślić, że przyjęta metoda obliczeniowa powoduje, że ilość punktów N jest zmienna, i zależna od wielkości h . Jest to związane z faktem, że analizowany obraz jest ograniczony swym brzegiem, i dla punktów x_n , które leżą przy brzegu w odległości mniejszej niż h nie jest możliwe wyznaczenie wartości $Z(x_n + h)$.

Ilość punktów pomiarowych dla opisywanych pomiarów zależna jest więc od wielkości h oraz od ilości linii pomiarowych N_y , i wynosi:

$$N(h) = N_y (L - h) \quad (2)$$

gdzie:

- L – maksymalna ilość punktów pomiarowych na linii.

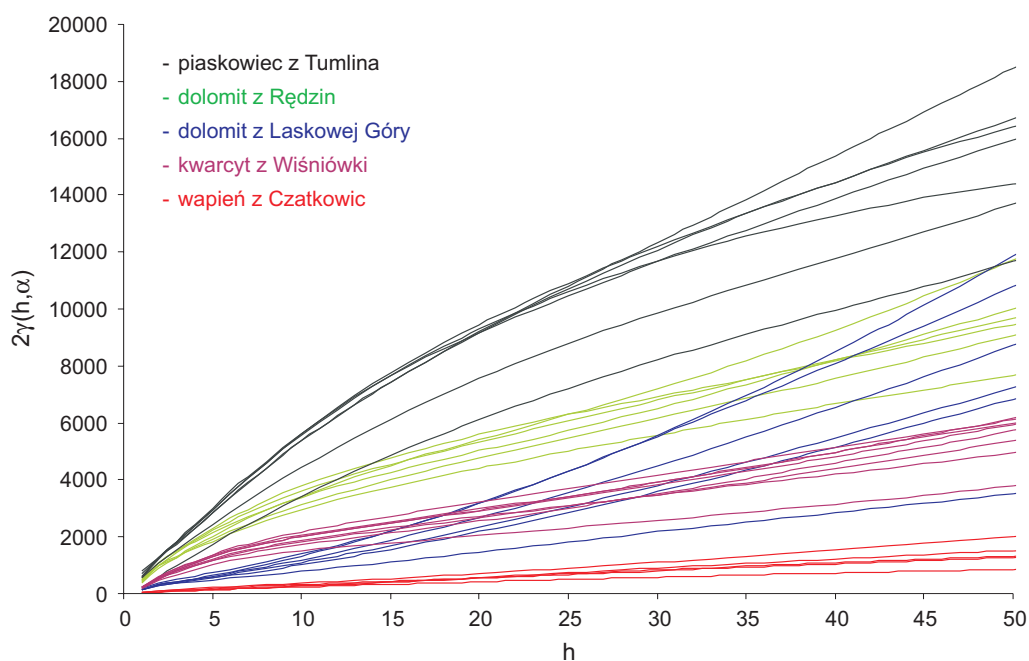
Z powyższego wzoru wynika, że w prezentowanym na rys. 2 wariogramie maksymalną liczbę punktów pomiarowych otrzymujemy dla $h = 1$ i wynosi ona:

$$N(h = 1) = N_y (L - h) = 512 (512 - 1) = 261\,632.$$

Minimalną zaś liczbą punktów pomiarowych otrzymujemy dla $h = 50$ i wynosi ona:

$$N(h = 50) = N_y (L - h) = 512 (512 - 50) = 236\,544.$$

Na rys. 2 przedstawiono wykresy wariogramów dla 5 analizowanych skał. W porównaniu z pracami prezentowanymi przez Młynarczuka i in. [2001] ilość pól pomiarowych na każdej z tych skał zwiększono dwukrotnie. Porównując wariogramy z otrzymanymi w poprzednio prowadzonych pracach można stwierdzić, że przyjęta wtedy, lekko zmodyfikowana definicja wariogramu (użycie modułu zamiast kwadratu), nie wpłynęła w sposób znaczący na jakościowe zachowanie się krzywych. Zwiększenie ilości pól pomiarowych na analizowanych skałach nie spowodowało zasadniczej zmiany wyników. Można stwierdzić, że w zachowaniu się każdej ze skał widać podobne trendy. Prawie bezpostaciowy wapień z Czatkowic przyjmuje wartości najmniejsze. Krzywe wariogramów dla kwarcytu z Wiśniówki, dolomitu z Rędzin i (w mniejszym stopniu) piaskowca z Tumlina grupują się ze sobą. Zachowanie się wariogramów obliczonych dla dolomitu z Laskowej Góry sugerować może, iż skałą ta jest wybitnie różnoziarnista (patrz opis skały w rozdziale 4).



Rys. 2. Wariogramy dla 5 badanych skał (h podane w pikselach (1 piksel = 20 μm))

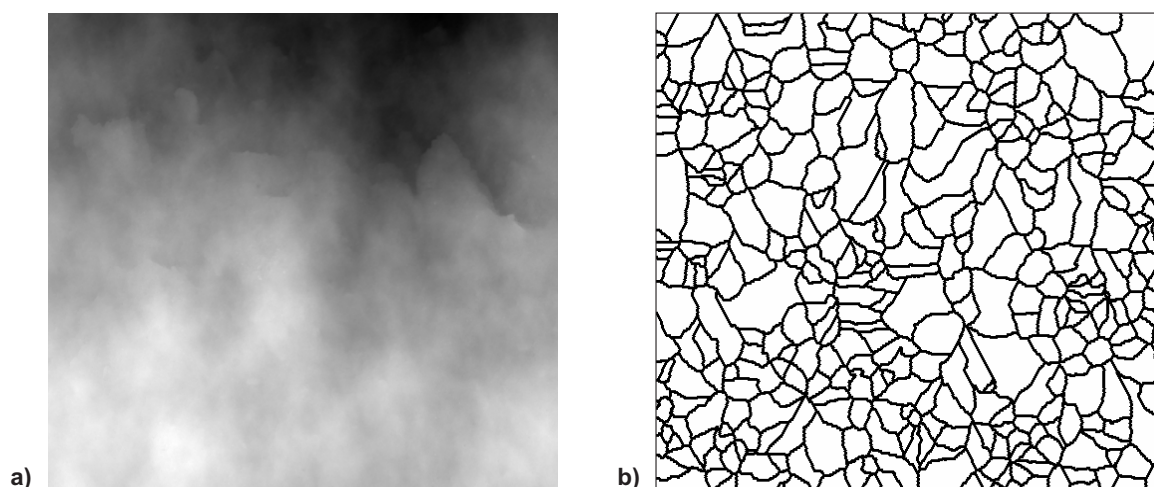
Analizując wzór (1) oraz odnosząc go do własności przełamów skalnych nasuwa się wniosek, że dla pewnej wartości h funkcja wariogramu powinna osiągać kres górny (np. w postaci asymptoty, względnie falistości). Ogląd rys. 2 może sugerować, że nie jest to zawsze spełnione (np. dla przełamów dolomitu z Rędzin). Niemniej jednak, dokładniejsza analiza tych przypadków (np. poprzez zwiększenie maksymalnego zakresu h do 400 pikseli (800 μm), oraz ogląd profili wysokości) doprowadziła do stwierdzenia, że zaprezentowane wyniki są poprawne, a świadczą jedynie o istnieniu różnic wysokości, np. związanych falistością przełamów. Wynika z tego, że najprawdopodobniej, badania prowadzone były na pochylonej powierzchni (np. na powierzchni większych agregatów). Dodatkowo, wpływ tego pochylenia nie został zniwelowany mimo wcześniejszego przeliczenia wyników pomiarów w odniesieniu do płaszczyzny regresji. Sądzymy, że bardziej wnikliwą analizę tego problemu będzie można przeprowadzić analizując większe niż w niniejszej pracy pola pomiarowe. Przeprowadzenie tego typu pomiarów planowane jest w najbliższym czasie.

5.b. Lokalne nachylenia na powierzchniach analizowanych przełamów skalnych

Niewielkiej modyfikacji uległa proponowana w pracy Młynarczuka et al. [2001] metoda pomiaru lokalnych nachyleń na analizowanych powierzchniach. Wykorzystany w niniejszej pracy algorytm przedstawia się w sposób następujący:

- obraz I_1 (otrzymany w wyniku pomiaru powierzchni profilomierzem – rys. 3a) poddawany jest filtracji filtrem przemiennym wykorzystującym rekonstrukcję (otwarcie przez rekonstrukcję + zamknięcie przez rekonstrukcję). W efekcie otrzymujemy obraz I_2 .
- na obrazie I_2 wyznaczane są maksima lokalne I_{\max} ,
- maksima te są markerami do wyznaczania obrazu linii działów wodnych (I_{wshed}) na odwróconym obrazie I_2 . Otrzymujemy w ten sposób obszary będące otoczeniem lokalnych maksimów – rys. 3b,
- na każdym z tych obszarów (I_{wshed}) znajdujemy punkty o najniższych wartościach (I_{\min}),
- dla każdego z obszarów (I_{wshed}) otrzymujemy funkcję dystansu I_{dyst} , wyliczaną poprzez dylację geodezyjną maksimów,
- naniesienie na obraz funkcji dystansu I_{dyst} informacji o położeniu minimów (I_{\min}) pozwala otrzymać informację o odległościach pomiędzy maksimami lokalnymi a odpowiadającymi im minimami,
- bazując na obrazach I_{\max} oraz I_{\min} posiadamy również informację o różnicy wysokości pomiędzy maksimami lokalnymi a odpowiadającymi im minimami; możemy więc wyznaczyć kąt pod jakim nachylony jest odcinek łączący te dwa ekstrema.

W tabeli 1 zestawiono wartości otrzymane w wyniku działania opisanego powyżej algorytmu. Zastosowano w niej następującą notację: cz – wapień z Czatkowic, dr – dolomit z Rędzin, lg – dolomit z Laskowej Góry, pt – piaskowiec z Tułmina, kw – kwarcyt z Wiśniówki. Pierwsza cyfra oznacza numer próbki skalnej, druga numer pola na tej próbce (gdy było to możliwe mierzono dwa pola na jednej próbce).



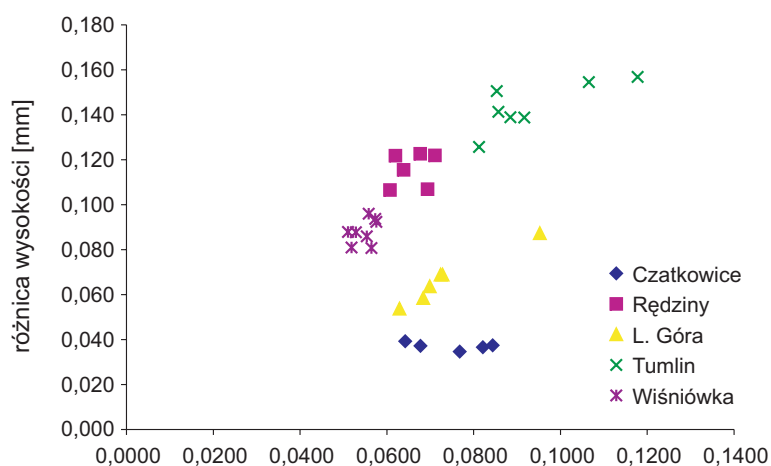
Rys. 3. Obraz wejściowy oraz otoczenia jego lokalnych maksimów. W granicach tych obszarów wyliczane są wszystkie lokalne wielkości opisane w tym rozdziale

5c. Przestrzeń cech

Każdy rozpatrywany w niniejszej pracy obraz może być opisany przy użyciu wielu różnorodnych parametrów. Parametrami tymi mogą być np. pola powierzchni występujących na nim obiektów, długości ich obwodów, ich barwy, jasności, itp. Mogą nimi być również wielkości umieszczone w tabeli 1. W oparciu o wybrane parametry możemy zdefiniować przestrzeń wielowymiarową, w której każda z osi reprezentować będzie jeden z tych parametrów. Przy takim postępowaniu, każdy obraz, będzie opisany jednym punktem. W teorii rozpoznawania obrazów tak zdefiniowana przestrzeń nosi nazwę przestrzeni cech [Tadeusiewicz i Flasiński, 1991]. Rys. 4 przedstawia przykładową przestrzeń cech zdefiniowaną przez średnie różnice wysokości (patrz: tab. 1, kolumna 4) oraz średnie kąty nachylenia (patrz: tab. 1, kolumna 6).

Tabela 1. Uśrednione parametry wyliczone przy zastosowaniu proponowanego algorytmu

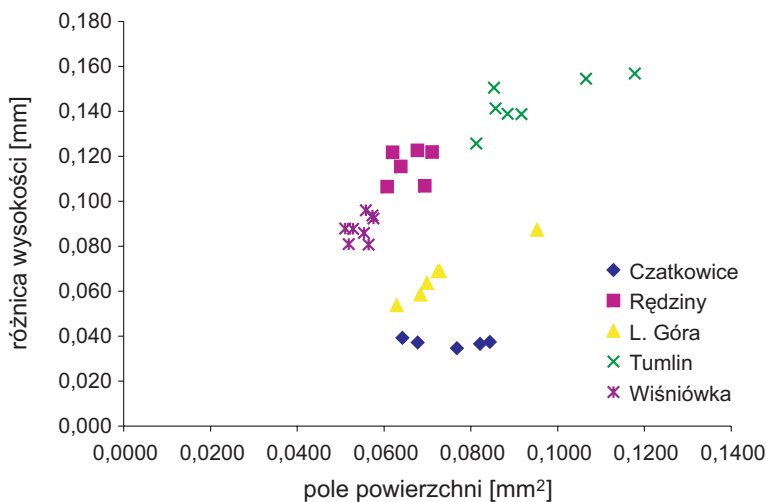
Nazwa próbki	Ilość obszarów	średnia wielkość obszaru [mm ²]	średnia różnica wysokości [mm]	średnia odległość max-min [mm]	średnie nachylenie [°]
1	2	3	4	5	6
cz2_1	1271	0,0642	0,039	0,168	15,57
cz3_2	986	0,0821	0,037	0,208	11,71
cz3_3	973	0,0844	0,037	0,231	10,86
cz7_1	1217	0,0677	0,037	0,170	11,40
cz7_2	1072	0,0768	0,035	0,194	11,64
dr12_1	1156	0,0710	0,122	0,171	36,97
dr12_2	1164	0,0694	0,107	0,158	35,64
dr24_1	1261	0,0638	0,116	0,166	36,89
dr24_2	1331	0,0607	0,107	0,156	35,94
dr36_1	1199	0,0677	0,123	0,167	37,96
dr36_2	1300	0,0620	0,122	0,156	39,09
lg1_1	1100	0,0728	0,069	0,202	21,42
lg1_2	1162	0,0699	0,064	0,191	21,22
lg3_1	1136	0,0724	0,069	0,172	24,53
lg3_2	858	0,0952	0,087	0,228	22,91
lg5_1	1297	0,0629	0,054	0,173	20,32
lg5_2	1175	0,0684	0,058	0,185	20,30
pt12_1	536	0,0885	0,139	0,214	35,05
pt12_2	912	0,0916	0,139	0,214	34,22
pt21_1	1010	0,0812	0,126	0,195	34,24
pt21_2	899	0,1465	0,165	0,262	34,76
pt61_1	954	0,0857	0,141	0,196	37,04
pt61_2	761	0,1065	0,155	0,221	36,84
pt72_1	685	0,1178	0,157	0,219	37,77
pt72_2	955	0,0853	0,151	0,199	38,54
kw2_1	1584	0,0510	0,088	0,136	35,07
kw2_2	1535	0,0529	0,088	0,137	35,03
kw4_1	1414	0,0573	0,094	0,147	35,15
kw4_2	1426	0,0564	0,081	0,148	31,40
kw5_1	1557	0,0518	0,081	0,140	32,93
kw5_2	1477	0,0554	0,086	0,137	34,46
kw7_1	1454	0,0558	0,096	0,150	35,28
kw7_2	1418	0,0576	0,092	0,153	33,63



Rys. 4. Analizowane pola w przestrzeni cech: średnia różnica wysokości – średni kąt nachylenia

Widać, że punkty opisujące poszczególne obrazy są zgrupowane. Dotyczy to w zasadzie wszystkich skał oprócz dolomitu z Laskowej Góry (i w mniejszym stopniu dolomitu z Rędzin). Potwierdza to raz jeszcze opisane w rozdziale 5a przypuszczenia, że na skale tej analizowano pola o różnym uziarnieniu.

Inna przestrzeń cech przedstawiona została na rys. 5. W przeciwieństwie do tej z rys. 4, grupuje ona w lepszy sposób punkty opisujące dolomity z Rędzin i kwarcyty z Wiśniówki. Nieco gorzej grupuje natomiast wapienie z Czatkowic.

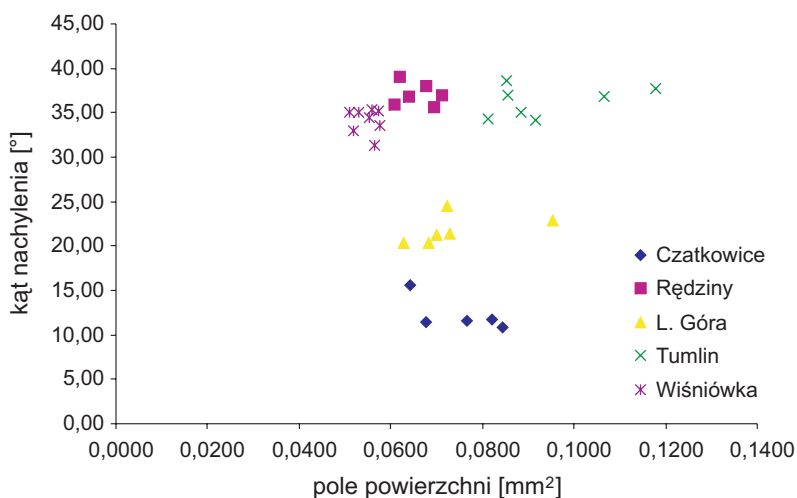


Rys. 5. Analizowane pola w przestrzeni cech: średnia wielkość pola – średnia różnica wysokości

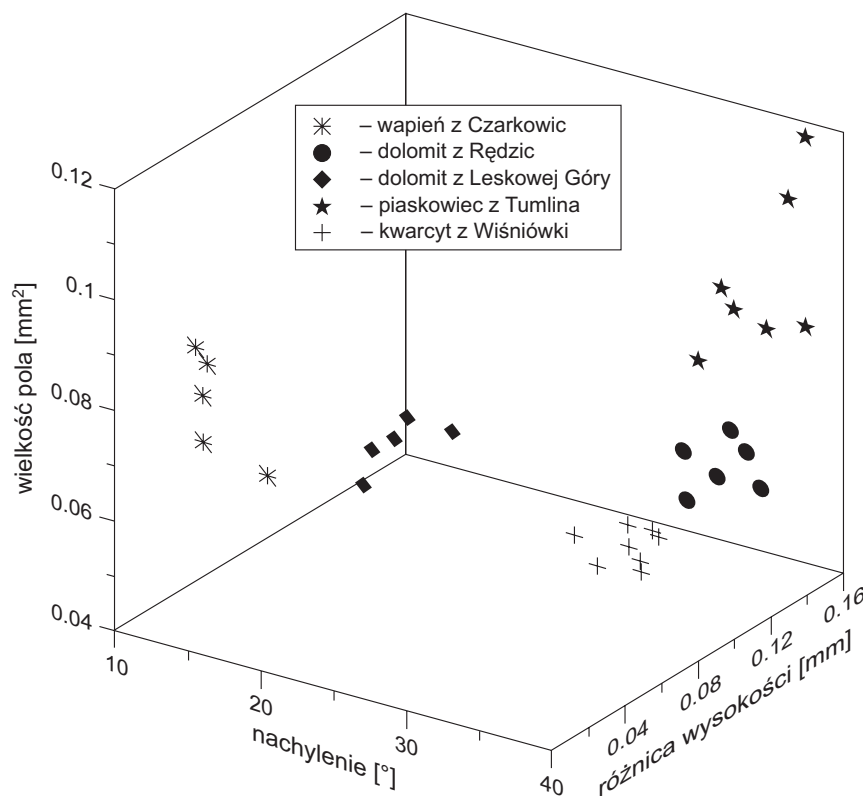
Uzupełnieniem przestrzeni cech z rysunków 4 i 5 jest przestrzeń cech zdefiniowana przez średnią wielkość pola powierzchni i średni kąt nachylenia – rys. 6. Również i na tym rysunku widać grupowanie się parametrów opisujących poszczególne skały.

Dwuwymiarowa przestrzeń cech bardzo rzadko jest wystarczająca do opisania różnic pomiędzy obiektami. Jest ona jednak prosta do wizualizacji i m.in. dlatego została tutaj szczegółowo omówiona.

Rysunek 6 przedstawia połączenie trzech dwuwymiarowych przestrzeni cech, w jedną – trójwymiarową. Grupuje ona w zdecydowanie lepszy sposób badane skały.



Rys. 6. Analizowane pola w przestrzeni cech: średnia wielkość pola – średni kąt nachylenia



Rys. 7. Analizowane skały w trójwymiarowej przestrzeni cech

6. Wpływ różnic strukturalno-teksturalnych w ramach skał tego samego typu na parametry opisujące morfologię przełamów

Dla celów badawczych, na każdym z 12 badanych przełamów skalnych (oznaczonych jako LC, LS, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11, L12, L14) zeskanowano przy użyciu profilomierza laserowego pola pomiarowe o wielkości 512×512 punktów, odległych od siebie o 20 μm. Otrzymane w ten sposób dane były punktem wyjścia do przeprowadzenia takich samych obliczeń, jak te, opisane w rozdziale 5.

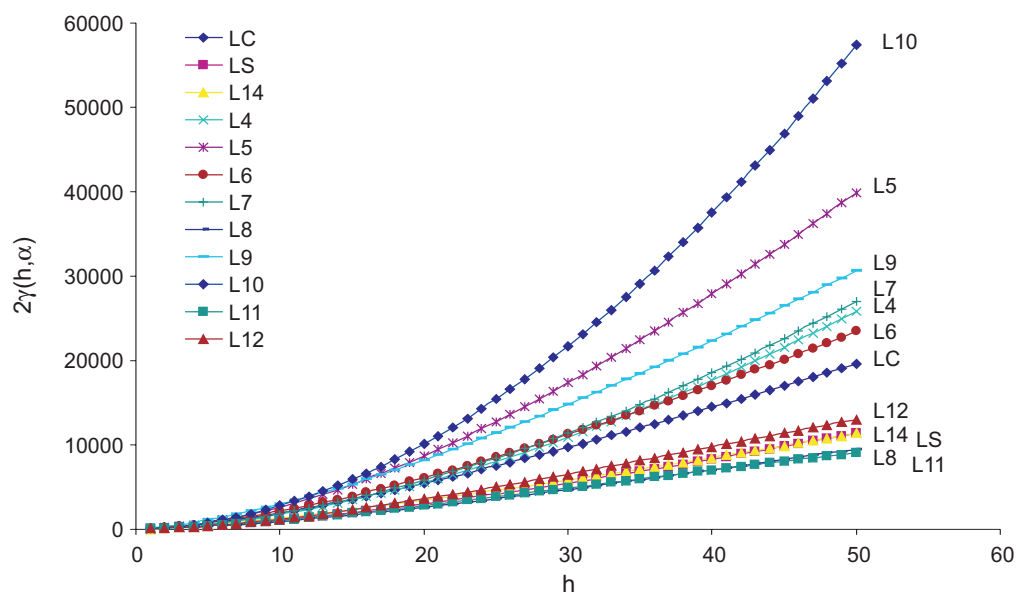
6.a. Wariogram

W celu interpretacji wariogramów otrzymanych w wyniku analizy przełamów (patrz rys. 8), wykonano szlify cienkie ze wszystkich analizowanych dolomitów. Powierzchnia szlifów była poprowadzona równoległe do powierzchni obserwowanych przełamów. Szlify te obserwowane były pod mikroskopem optycznym, przy powiększeniu 200×.

Wszystkie analizowane skały to dolomity o wielkości ziarn od 10 do 150 μm. Ogląd szlifów pod mikroskopem optycznym pozwolił stwierdzić, że położenie poszczególnych krzywych wariogramu jest logiczne i jak najbardziej uzasadnione różnicami strukturalno-teksturalnymi analizowanych dolomitów (np. porami, łączeniem się ziarn w agregaty, wtrąceniami anhydrytów, gipsów lub minerałów rudnych, itp.). Na obecnym etapie badań, porównując krzywe wariogramu, możemy z dużą dozą prawdopodobieństwa stwierdzić, że skały różnią się cechami strukturalno-teksturalnymi, jednakże nie jesteśmy w stanie jednoznacznie stwierdzić, jakimi.

6.b. Przestrzeń cech

Dla analizowanych dolomitów przeprowadzono pomiary lokalnych nachyleń na powierzchniach przełamów, które zostały szczegółowo opisane w rozdziale 5b. W tabeli 2 zestawiono otrzymane rezultaty.



Rys. 8. Wariogramy otrzymane dla 12 badanych odmian dolomitów

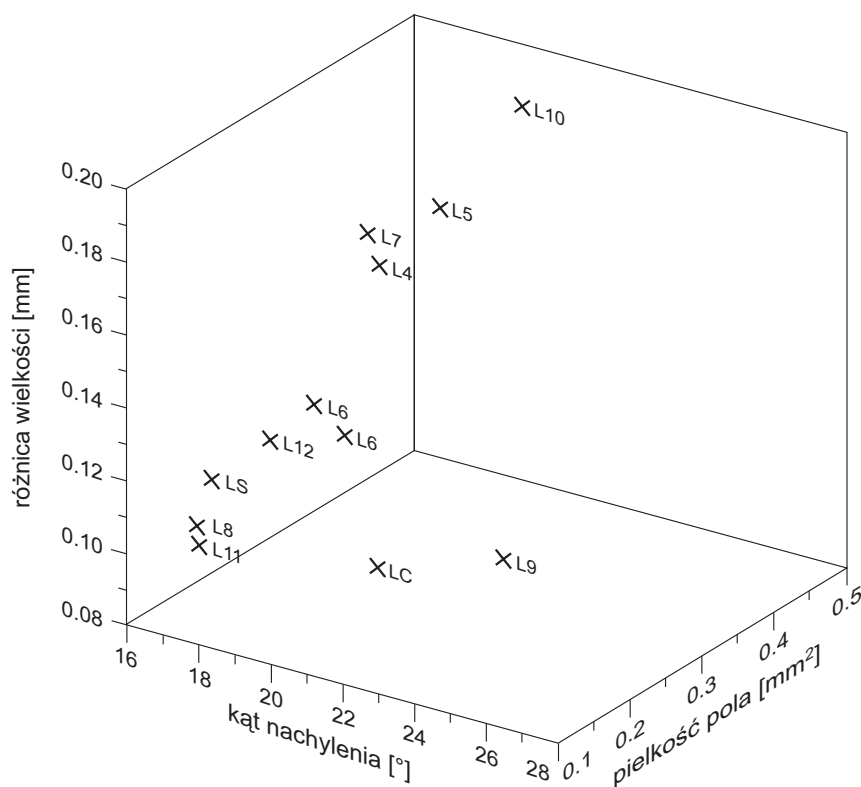
Tab. 2. Parametry badanych dolomitów wyliczone w wyniku działania proponowanego algorytmu

Nazwa próbki	Ilość obszarów	średnia wielkość obszaru [mm ²]	średnia różnica wysokości [mm]	średnia odległość max-min [mm]	średnie nachylenie [°]
1	2	3	4	5	6
LC	590	0,131	0,109	0,296	22,35
LS	405	0,200	0,109	0,380	16,36
L14	312	0,237	0,131	0,424	18,47
L4	289	0,277	0,167	0,480	19,49
L5	278	0,273	0,188	0,476	21,26
L6	403	0,198	0,132	0,374	20,10
L7	276	0,284	0,174	0,518	19,01
L8	498	0,163	0,102	0,366	16,68
L9	759	0,107	0,125	0,268	26,34
L10	147	0,426	0,196	0,556	20,49
L11	493	0,163	0,097	0,340	16,73
L12	365	0,220	0,121	0,406	17,59

Na rys. 9 przedstawiono wyniki zestawione w przestrzeni cech zdefiniowanej przez 3 parametry: średnia wielkość obszarów otaczających lokalne maksima, średnia różnica wysokości oraz średnie kąty nachylenia. Widzimy, że przełamy L11, L8, LS, L12, L14 oraz L6 przyjmują mniejsze wartości, natomiast przełamy L4, L7, L5, oraz L10 przyjmują wyraźnie większe wartości. Przełamy LC i L6 także przyjmują większe wartości, ale odbiegają od pierwszej grupy większymi wartościami kątów lokalnych nachyleń. Wyniki te są zbliżone do tych, otrzymanych w wyniku analizy wariogramów.

7. Wpływ sposobu wymuszania przełamów w ramach skał tego samego typu na parametry opisujące morfologię przełamu

W celu przebadania wpływu sposobu wymuszenia przełamu na parametry opisujące przełamy skalny przebadano próbki drobnoziarnistego granitu ze Strzelina. Próbki te poddane były obciążeniom termicznym do temperatur 100°, 300° i 500°C. Proces obciążenia termicznego polegał na tym, że po podgrzaniu pieca do zadanej temperatury wkładano do niego próbkę skalną. Próbka przebywała w piecu przez okres niezbędny



Rys. 9. Analizowane przełamy 12 dolomitów umieszczone w przestrzeni cech: wielkość pola – różnica wysokości – kąć nachylenia

do wyrównania w niej temperatur (ok. 1 godz.), po czym piec wyłączano i chłodzono go (razem z próbką) do temperatury pokojowej. Proces ten zwano szokiem termicznym, a jego dokładniejszy opis można znaleźć w pracy Nowakowski et al. [2003].

Na tak wygrzanych próbkach (oraz próbkach niewygrzanych – 0°C) przeprowadzono testy jednoosiowego i trójosiowego ściskania. Zestawienie próbek użytych w badaniach, wraz z podziałem na temperatury wygrzewania oraz prowadzone testy wytrzymałościowe, umieszczono w tabeli 3. Testy te prowadzono aż do zniszczenia próbki. Tak otrzymane przełamy skalne służyły jako materiał badawczy do przeprowadzenia pomiarów morfologii powierzchni. Na każdej z tych próbek zeskanowano przy użyciu profilomierza laserowego po 2 pola pomiarowe o wielkości 256×256 punktów pomiarowych, odległych od siebie o 20 μm.

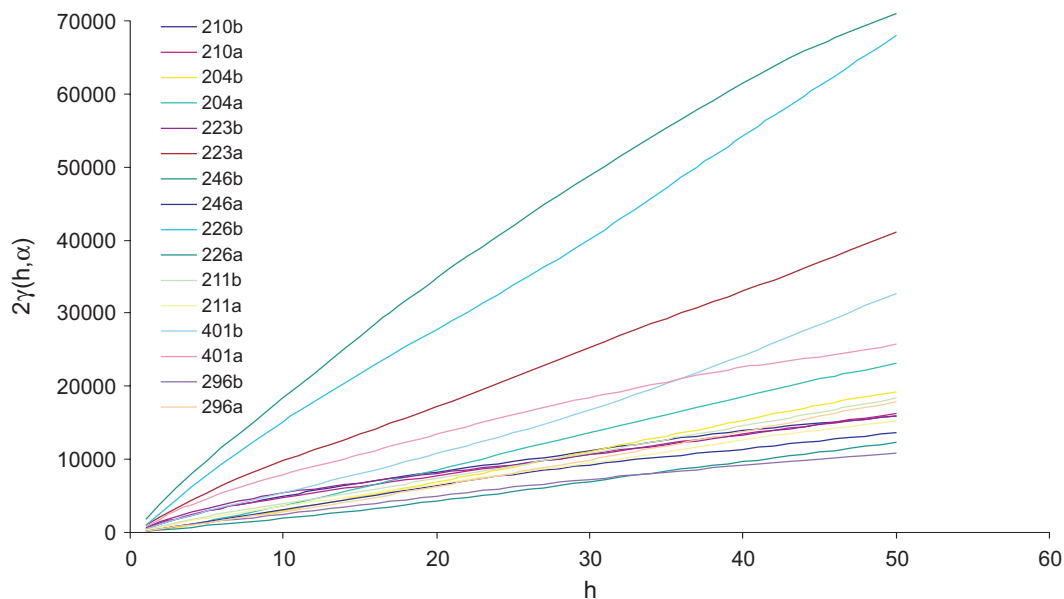
Tab. 3. Oznaczenie próbek użytych w badaniach, wraz z podziałem na temperatury wygrzewania oraz prowadzone testy wytrzymałościowe

Temperatura wygrzewania	Test jednoosiowego ściskania	Test trójosiowego ściskania
1	2	3
0°C	G 210	G 204
200°C	G 223	G 246
300°C	G 226	G 211
500°C	G 401	G 296

7.a. Wariogram i przestrzeń cech

Na rys. 10 przedstawiono wariogramy wyliczone dla badanych pól pomiarowych. W związku z tym, że dla każdej z próbek skalnych zmierzono po dwa pola, oznaczone są one jako a i b (np. 226a, 226b, itd.).

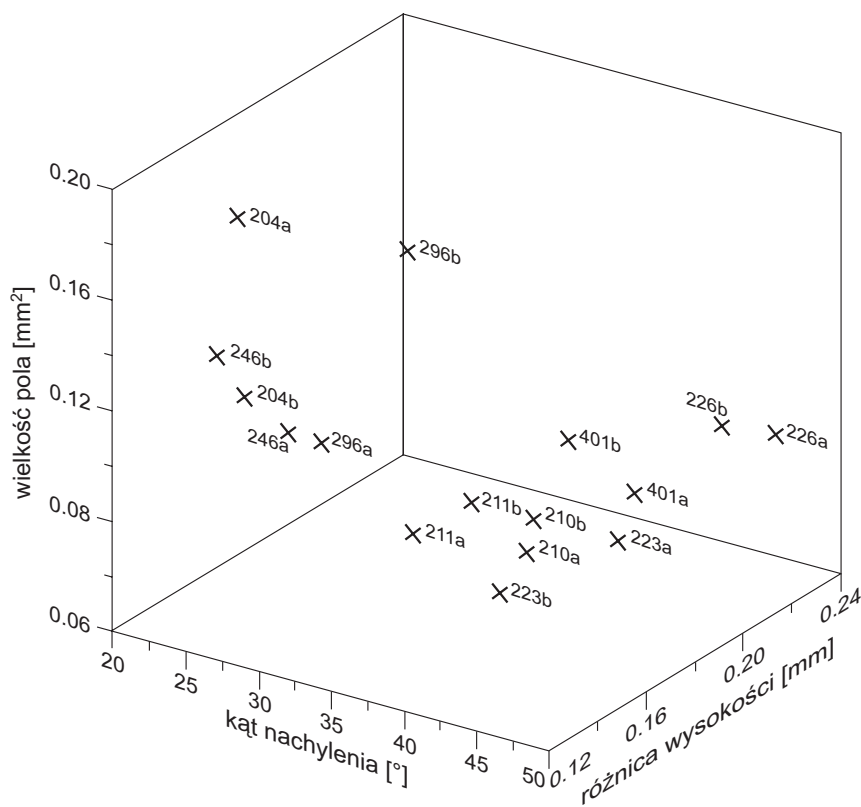
Ogląd wariogramów (rys. 10) nie pozwala na wyciągnięcie jednoznacznych wniosków, co do wpływu sposobu wygrzewania skał na parametry powierzchni ich przełamów. Natomiast widać pewną zależność pomiędzy położeniem wariogramu a rodzajem siły niszczącej. Wariogramy dla przełamów uzyskanych



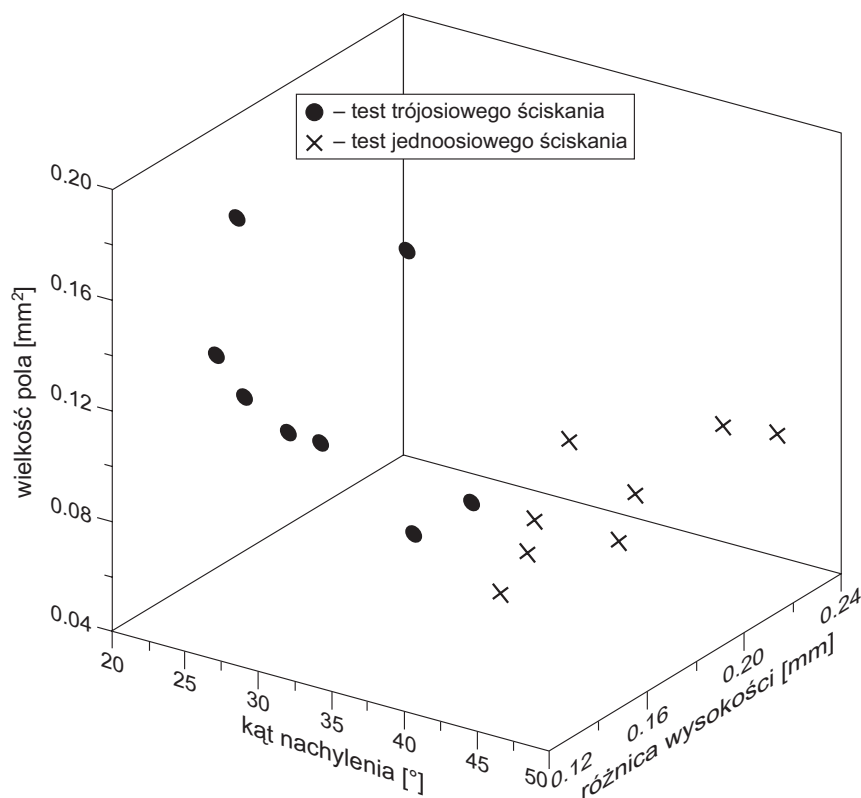
Rys. 10. Wariogramy dla drobnoziarnistych granitów ze Strzelina. Kolejność krzywych dla $h = 50$, podawane w kolejności malejącej: 226b, 226a, 223a, 401b, 401a, 204a, 204b, 211b, 296a, 223b, 210a, 210b, 211a, 246a, 246b, 296b

w teście jednoosiowego ściskania w zasadzie przyjmują większe wartości niż te, dla trójosiowego ściskania (wyjątkiem są próbki G210a i G210b). Rozróżnienie to jest zdecydowanie bardziej widoczne, gdy umieścimy otrzymane wyniki w przestrzeni cech (patrz: rys. 11 oraz rys. 12).

Należy także zaznaczyć, że grupowanie się pewnych krzywych (np. 226a-226b, 210a-210b, itp.), może być związane z faktem, że są to pory sąsiadujących ze sobą pól, mierzonych na tych samych przełamach.



Rys. 11. Analizowane przełamy granitów ze Strzelina umieszczone w przestrzeni cech: wielkość pola – różnica wysokości – kąt nachylenia



Rys. 12. Analizowane przełamy granitów ze Strzelina umieszczone w przestrzeni cech: wielkość pola – różnica wysokości – kąt nachylenia. Przełamy pogrupowano na wymuszane w wyniku testu jednoosiowego i trójosiowego

8. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki prac mających na celu zbadania możliwości wykorzystania metod analizy obrazu i morfologii matematycznej do opisu geometrii przełamów skalnych.

Badania prowadzone były w 3 obszarach problemowych. Miały one na celu zbadanie zależności zaproponowanych parametrów opisujących morfologię przełamu od: rodzaju skały, różnic strukturalno-teksturalnych w ramach skał tego samego typu oraz sposobu wymuszania przełamów.

W wyniku przeprowadzonych badań ustalono, że proponowane metody pomiarowe dobrze odzwierciedlają różnice w uziarnieniach skał. Świadczą o tym wyniki opisane w rozdziale 5. Można też na ich podstawie wnioskować o pewnych różnicach strukturalno-teksturalnych w ramach skał tego samego typu (patrz: rozdział 6). Umieszczając otrzymane rezultaty w przestrzeni cech udało się wykazać różnice wpływające ze sposobu wymuszania przełamu rozdzielczego (patrz: rozdział 7).

Reasumując można powiedzieć, że prowadzone badania wykazały przydatność zaproponowanej metodyki badawczej oraz pozwoliły postawić tezę, że metoda ta pozwala na rozróżnianie (grupowanie) badanych przełamów skalnych ze względu na cechy strukturalno-teksturalne skał, oraz na szybkie porównanie z próbką wzorcową (o ile takowa istnieje lub została wytypowana).

Autorzy serdecznie dziękują Panu dr Piotrowi Kijewskiemu za dostarczenie przełamów dolomitów z poziomu wapienia cechsztyńskiego, z obszaru kopalni rud miedzi.

9. Literatura

- Ahmed S., Sankaran S., Gupta C.P, 1995: *Variographic analysis of some hydrogeological parameters: use of geological soft data*, Journal of Environmental Hydrology, vol. 3 number 2.
- Bodziony J., 1997: *Rozwinięcie ilościowej oceny morfologii powierzchni przełamu próbek skalnych*, Sprawozdanie z działalności statutowej IMG PAN.
- Bodziony J., Ratajczak T., Aksamit J., 1998: *Ocena chropowatości w świetle polskich norm*. Sprawozdanie z działalności naukowej Instytutu Mechaniki Górotworu PAN.

- Chmura K., 1970: *Własności fizykotermiczne skał niektórych polskich zagłębi górniczych*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
- Grntier S., 1987: *Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture naturelle dans granite sous contrainte normale*, Étude experim. et théorique These, Univ. d'Orléans 1986, Documents du BRGM, Orléans.
- Gentier S., Riss J., 1987: *Natural Fractures in Rock: Stereological Estimation of Areas by Systematic Sections*, Acta Stereologica.
- Gentier S., Riss J., 1989: *Linear and areal roughness of non planar rock surface of fracture*, Acta Stereologica.
- Konecny P., Kozusnikova A., Młynarczuk M., 2003: *Filtration Properties of Discontinuities in Triaxial State of Stress*, Proc. of the 19th World Mining Conference, New Dehli.
- Kraj W., 1994: *Metoda ilościowej oceny ukształtowania powierzchni przelamu rozdzielczego próbek skalnych*, Sprawozdanie z projektu badawczego KBN.
- Kwaśniewski M.A., Wang J.A., 1997: *Surface roughness evolution and mechanical behavior of rock joints under shear*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 34.
- Młynarczuk M., 1994: *Methods of determining the fracture surface roughness of rock samples by means of laser profilometer*, Proceedings of IV International conference Stereology and Image Analysis in Material Science STERMAT.
- Młynarczuk M., 2002: *Zastosowanie wariogramu w badaniach morfologii powierzchni przelamu skalnego*, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN.
- Młynarczuk M., 2004: *Możliwości wykorzystania analizy obrazu i morfologii matematycznej do analizy stereologicznej struktur skalnych*, Archives of Mining Sciences, vol. 49.
- Młynarczuk M., Ratajczak T., Sobczyk J., Aksamit J., 2001: *Zastosowanie metod automatycznego przetwarzania obrazów do analizy morfologii powierzchni wybranych próbek skalnych*, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, t. 3, nr 3-4.
- Młynarczuk M., Ratajczak T., Aksamit J., 2002a: *Wpływ metod wymuszenia przelamu rozdzielczego na parametry opisujące jego geometrię*, Prace IMG PAN.
- Młynarczuk M., Ratajczak T., Aksamit J., 2002b: *Wpływ wielkości ziarn w skałach na morfologię ich przelamów rozdzielczych*, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN.
- Nowakowski A., Młynarczuk M., Ratajczak T., Gustkiewicz J., 2003: *Wpływ warunków termicznych na zmianę niektórych właściwości fizycznych i strukturalnych skał*, Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, Rozprawy, Monografie, nr 5.
- Polska Norma PN-87/M-04256/02 *Struktura geometryczna powierzchni. Pomiar chropowatości. Terminologia ogólna*.
- Serra J., 1982: *Image analysis and mathematical morphology*, Academic Press.
- Tadeusiewicz R., Flasiński M., 1991: *Rozpoznawanie obrazów*, PWN, Warszawa.
- Wang J., 1994: *Morphology and mechanical behaviour of rock joints*, Doctoral Thesis.

Describing of rock fracture surface by mathematical morphology

Abstract

The paper presents results of works which aim was to verify a possibility of use the image analysis and mathematical morphology to describing a rock fracture surface. Presented works are continuation of researches started in 2001-2002.

The researches were carrying out on 25 different rock samples. In particular the following features were analyzed:

- correlation between morphological parameters describing a surface and structural and textural properties of different kinds rock (dolomite from Redzin, sandstone from Tumlin, quartzite from Wisniowka, limestone from Czatkowice and dolomite from Laskowa Gora),
- correlation between morphological parameters describing a surface and small structural and textural variation of one rock (12 samples of dolomite from Lubin),
- correlation between morphological parameters describing a surface and methodology of brittle crack obtaining (granites from Strzelin heated up to the 100°, 300° and 500°C, were subject of uniaxial and triaxial loading tests).

The researches prove a usefulness of proposed methodology, and lead to the thesis that by means of proposed method it is possible to compare structural and textural properties of analyzed and model rock samples.

Keywords: fracture surface, roughness, mathematical morphology, image analysis