

Zastosowanie metod analizy obrazu i profilometrii laserowej do ilościowej oceny nieciągłości występujących w skałach analizowanych w skali mikro i makro

MARIUSZ MŁYNARCZUK, TERESA RATAJCZAK, JAROSŁAW AKSAMIT

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

Streszczenie

Ocena chropowatości zajmuje kluczowe miejsce w geotechnicznym opisie masywów skalnych. Dostarcza ona informacji o jego wytrzymałości, odkształcalności, przepuszczalności, itp. Niestety, stosowane do tego celu parametry oparte są często na opisie jakościowym lub bazują na podstawowych pomiarach ilościowych, które co prawda są proste w realizacji, ale niosą ze sobą ograniczoną ilość informacji i nie zawsze podążają za postępem technik badawczych. Opisywane prace są rozszerzeniem badań prowadzonych w IMG PAN w latach 2004 i 2005 i koncentrują się na przydatności przekształceń morfologii matematycznej, a w szczególności metod filtracji morfologicznej do analizy powierzchni przełamów skalnych. W wyniku zastosowania sekwencyjnych filtrów przemiennych wyróżniono składowe odpowiadające chropowatości oraz faliści. Wykorzystanie funkcji madogramu do analizy składowych chropowatości wskazało na związek pomiędzy parametrami tej funkcji a wielkością ziarn badanych skał. Proponowane metody zastosowano m.in. do analizy powierzchni próbek węgla typu brekcji tektonicznej, pobranych z okolic szczeliny uskokowej w KWK „Zofiówka”.

W pracy opisano również modyfikację urządzenia do analizy ścian skalnych w skali makro i oraz zaprezentowano wstępne wyniki pomiarów.

Słowa kluczowe: przełam skalny, chropowatość powierzchni, morfologia matematyczna, filtracja danych pomiarowych

1. Wstęp

Morfologia powierzchni przełamu rozdzielczego częstokroć niesie informację o właściwościach fizyczno-mechanicznych górotworu. Wywiera ona znaczny wpływ na przemieszczenia poprzeczne do kierunku ścinania (Kidybiński, 1982) oraz decyduje o oporach poślizgu na kontaktach powierzchni podzielności (Pinińska, 2003). Znajomość morfologii powierzchni spękań w skałach może również odgrywać istotną rolę w zrozumieniu problemów związanych z przepuszczalnością górotworu i migracją w nim płynów. Zwracają na to uwagę m.in. Power i Durham (1997) oraz Konecny i Młynarczuk (2003).

W praktyce, ocena chropowatości powierzchni skalnych opiera się częstokroć na odczuciach subiektywnych (Chmura, 1970). Takie, intuicyjne podejście wydaje się dalece niezadowolające. Z drugiej strony, prace prowadzone przez Bodzionego i in. (1998) wykazały niezbyt dużą użyteczność parametrów chropowatości zestawionych w PN-EN ISO 4287 (dawniej: PN (PN-87/M-04256/01) do opisu powierzchni przełamów skalnych. Podobnie wypowiadają się Kwaśniewski i Wang (1998) na co zwraca uwagę Pinińska (2003). Twierdzą oni, że parametry te są zmienne i przypadkowe a dla oceny chropowatości skał mało przydatne. Dlatego też niezwykle istotne jest opracowanie metodyki pomiarowej umożliwiającej jak najpełniejszy opis powierzchni przełamu.

Na przestrzeni ostatnich lat problematyka ta coraz częściej poruszana jest w pracach związanych z geologią i mechaniką skał (Gentier i Riss, 1987; Wang 1994; Xie i in., 1999; Kulatilake i Um, 1999). Należy podkreślić coraz powszechniejsze wykorzystanie do celów pomiarowych profilometrów lasero-

wych. W przypadku badań laboratoryjnych postępują tak m.in. Develi i in. (2001), Power i Durham (1997), Lanaro (2000), Renard i in. (2004) oraz wielu innych. Podobna tendencja da się zauważyć wśród badań poświęconych problematyce pomiarów chropowatości ścian skalnych in situ. Wymienić tu można pracę Fenga i in. (2003), w której przedstawiona została metoda odwzorowania ścian miernikiem laserowym, Renarda i in. (2006), którzy przy pomocy szybkich skanerów laserowych analizują uskoki tektoniczny Vauche, oraz pracę Fardin i in. (2004), którzy przyrządem laserowym odwzorowują odłamki skalne kilkumetrowych rozmiarów.

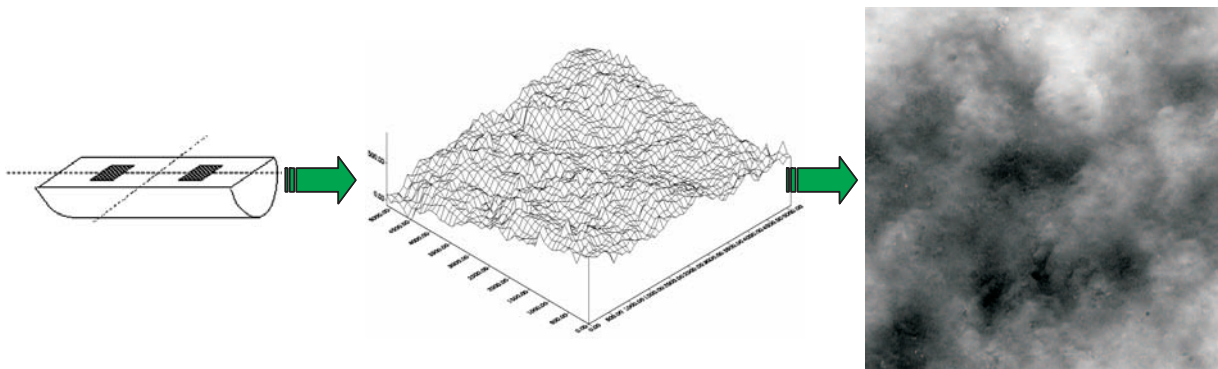
Tematyka opisu morfologii przełamów skalnych obecna jest od wielu lat w pracach IMG PAN (por. Bodziony i in., 1998; Młynarczuk 1994, 2004). Badania te dotyczą wykorzystania profilometrii laserowej oraz analizy obrazu zarówno do opisu przełamów skalnych obserwowanych w warunkach laboratoryjnych (Młynarczuk i in., 2001) jak i do opisu odsłoniętych ścian skalnych obserwowanych w warunkach in situ (Młynarczuk i in., 2005). Celem prowadzonych badań jest próba wyznaczenia korelacji pomiędzy morfologią przełamu a cechami strukturalno-teksturalnymi skał. Przedstawione w niniejszym artykule badania są kontynuacją tych właśnie prac.

2. Analiza powierzchni przełamów skalnych

2.1. Opis metodyki badawczej i materiału pomiarowego

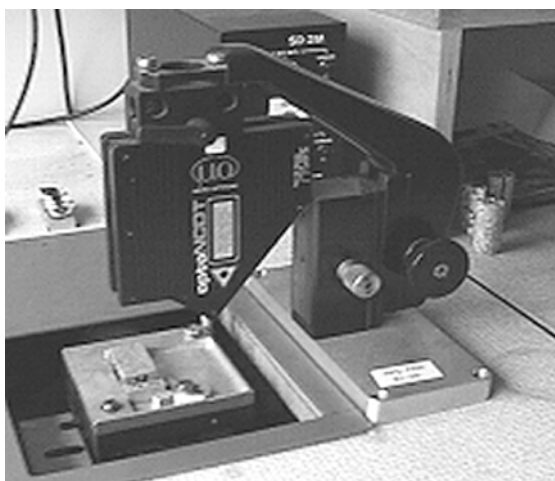
W pracach Młynarczuka (2004) oraz Młynarczuka i in. (2001, 2004) zaproponowano wykorzystanie metod morfologii matematycznej i analizy obrazu do opisu ukształtowania powierzchni przełamów skalnych. Opisywane w niniejszym rozdziale wyniki są efektem dalszych prac nad rozwojem tej metodyki badawczej.

U podstaw proponowanej metodyki leży idea, że macierz wartości XYZ, otrzymaną w wyniku skanowania powierzchni przełamu skalnego można przedstawić jako 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). Takie podejście pozwala na wykorzystanie do analizy przełamu skalnego aparatu matematycznego stosowanego w standardowych metodach analizy obrazów, a w szczególności w morfologii matematycznej.

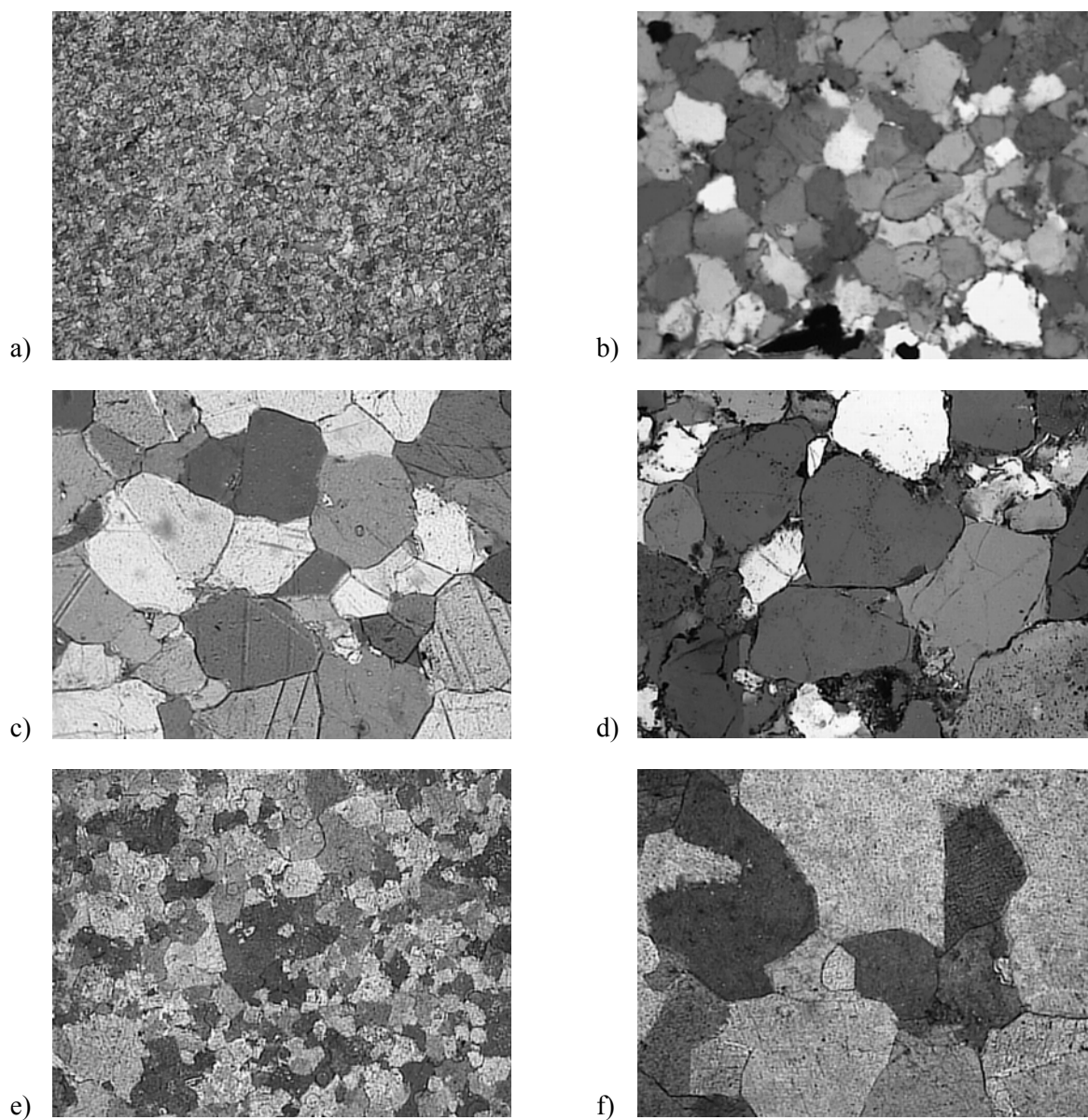


Rys. 1. Analizowane pole na przełame zapisywane jest w pamięci komputera w formie tabeli wartości XYZ, którą można interpretować jako wykres 3D oraz jako standardowy obraz

Pomiary do badań wykonane zostały przy użyciu profilomierza laserowego (rys. 2), którego opis można znaleźć w pracy Młynarczuka (1993). W badaniach skoncentrowano się na analizie pięciu rodzajów skał o zróżnicowanej strukturze petrograficznej i odmiennych właściwościach fizyko-mechanicznych. W szczególności skały te charakteryzowały się różną wielkością ziarn (tab. 1). Skałami tymi były: wapień z Czatkowic (3a), kwarcyt z Wiśniówki (3b), dolomit z Rędzin (3c), piaskowiec z Tumlina (3d) oraz dolomit z Laskowej Góry (3e, 3f).



Rys. 2. Profilomierz laserowy

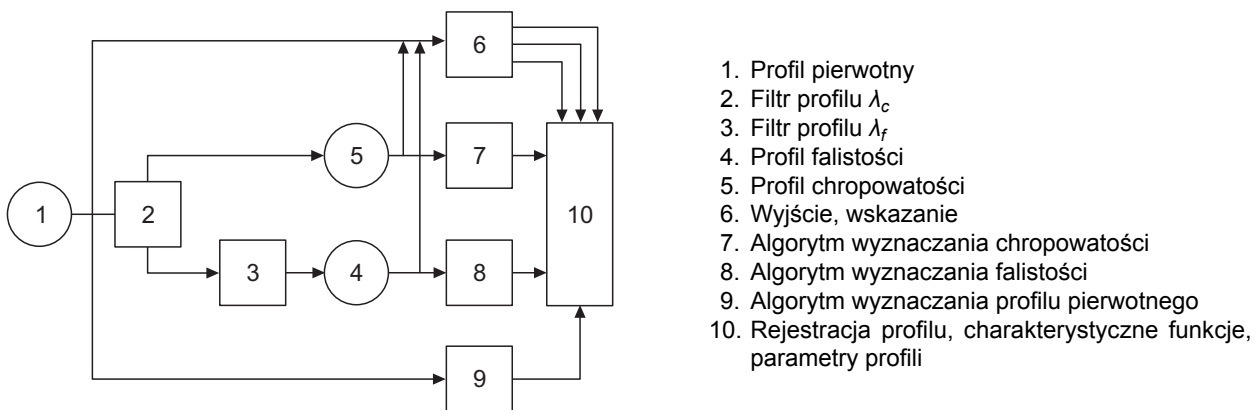
Rys. 3. Przykładowe obrazy analizowanych skał: wapień z Czatkowic (a), kwarcyt z Wiśniówki (b), dolomit z Rędzin (c), piaskowiec z Tumlina (d), dolomit z Laskowej Góry (e, f). (pow. $\times 100$, nikole \times)

Tab. 1. Średnie wielkość ziarn dla analizowanych skał

Skala	Wapień z Czatkowic	Kwarcyt z Wiśniówki	Dolomit z Rędzin	Piaskowiec z Tumlina	Dolomit z Laskowej Góry
wielkość ziarn [μm]	30-50	80-200	100-300	40-400	60-450
średnia wielkość ziarn [μm]	40	110	160	270	60
uwagi	skała równoziarnista			skała nierównoziarnista	

2.2. Filtracja obrazu w celu eliminacji wpływu falistości na wynik obliczeń

Profil powierzchni można interpretować jako złożenie falistości oraz chropowatości. Czyni tak wielu badaczy zajmujących się opisywaną problematyką. Podobnie zaleca postępować PN ISO (patrz rys. 4). Przy czym norma ta definiuje 3 rodzaje filtrów wyodrębniających składowe krótkofalowe i długofalowe profilu powierzchni: λ_s – filtr profilu wyznaczający przejście od chropowatości do składowych o jeszcze mniejszych długościach fal występujących na powierzchni, λ_c – filtr profilu wyznaczający przejście od chropowatości do falistości oraz λ_f – filtr profilu wyznaczający przejście od falistości do składowych o jeszcze większych długościach fal występujących na powierzchni.



Rys. 4. Schemat blokowy do oceny profilu powierzchni wg ISO 4287

Jednym z podstawowych problemów, na jaki napotykają autorzy prac dotyczących tematyki chropowatości jest poprawne zdefiniowanie filtru λ_c – czyli filtru wyznaczającego granicę pomiędzy chropowatością a falistością. Analizę wpływu wielkości filtracji na zmiany podstawowych parametrów chropowatości liniowej zdefiniowanych w ISO przedstawiają Gurau i in. (2006). Problematyka filtracji profilu metodami standardowymi przedstawiona jest w pracy Trumpolda i Heldta (1998), przy czym koncentrują się oni zwłaszcza na filtracji 2D. W literaturze spotyka się również filtrację przy wykorzystaniu transformaty Fouriera (Hocheng i Hsieh, 2004) oraz metody wavelet'ów (Chen i in., 1999), itp. Proponowane są również nowe metody filtracji profili. Przykładowo Chen i in. (1998) proponują własny model filtracji 3D.

W prowadzonych badaniach zaproponowano wykorzystanie do tego celu filtrów morfologicznych. Filtr morfologiczny definiowany jest jako dowolne odwzorowanie monotoniczne i niezmiennie względem translacji. Do najprostszych filtrów morfologicznych należą otwarcie (1) i zamknięcie (2) (Serra, 1988a) (Serra, Vincent, 1992). Są one prostym złożeniem erozji i dylatacji a definiowane są w następujący sposób:

$$\gamma_B(f) = \delta_B(f) \varepsilon_{B^T}(f) \quad (1)$$

$$\varphi_B(f) = \varepsilon_B(f) \delta_{B^T}(f) \quad (2)$$

gdzie:

$\varepsilon(f)$, $\delta(f)$ – erozja i dylatacja funkcji f ,

B – element strukturalny,

B_T – transponowany element strukturalny.

Złożenie dwóch filtrów morfologicznych $\varphi_B(f)$ oraz $\gamma_B(f)$ prowadzi do powstania tzw. filtrów przemennych. Filtrami takimi są:

$$\begin{aligned} &\varphi_B(f) \gamma_B(f), \\ &\gamma_B(f) \varphi_B(f), \\ &\varphi_B(f) \gamma_B(f) \varphi_B(f), \\ &\gamma_B(f) \varphi_B(f) \gamma_B(f). \end{aligned} \quad (3)$$

Należy zaznaczyć, że złożenie większej liczby niż 3 filtrów morfologicznych nie prowadzi do utworzenia nowego filtru przemennego, gdyż:

$$\begin{aligned} \varphi_B(f) \gamma_B(f) \varphi_B(f) \gamma_B(f) &= \varphi_B(f) \gamma_B(f), \\ \gamma_B(f) \varphi_B(f) \gamma_B(f) \varphi_B(f) &= \gamma_B(f) \varphi_B(f). \end{aligned} \quad (4)$$

Ilość filtrów, które mogą być uzyskane poprzez złożenie dwóch podstawowych filtrów morfologicznych jest więc ograniczona. W celu otrzymania większej ich liczby, złożenie podstawowych filtrów może być zastąpione złożeniem kilku rodzin filtrów o zmieniającym się rozmiarze elementu strukturalnego $B_n (i \geq n \geq 1)$. Prowadzi to do otrzymania tzw. sekwencyjnych filtrów przemennych (Salembier i in., 1994; Serra, 1988b):

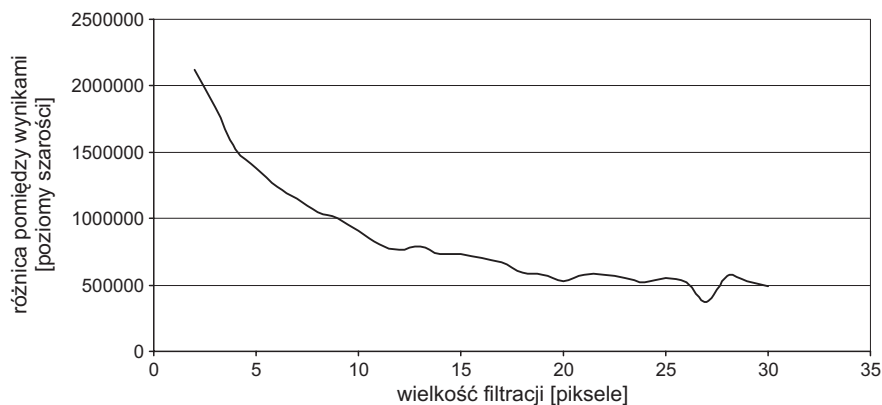
$$\begin{aligned} M_i(f) &= \varphi_{B_i}(f) \gamma_{B_i}(f) \dots \varphi_{B_2}(f) \gamma_{B_2}(f) \varphi_{B_1}(f) \gamma_{B_1}(f), \\ N_j(f) &= \gamma_{B_i}(f) \varphi_{B_i}(f) \dots \gamma_{B_2}(f) \varphi_{B_2}(f) \gamma_{B_1}(f) \varphi_{B_1}(f), \\ R_i(f) &= \gamma_{B_i}(f) \varphi_{B_i}(f) \gamma_{B_i}(f) \dots \gamma_{B_2}(f) \varphi_{B_2}(f) \gamma_{B_2}(f) \gamma_{B_1}(f) \varphi_{B_1}(f) \gamma_{B_1}(f), \\ S_i(f) &= \varphi_{B_i}(f) \gamma_{B_i}(f) \varphi_{B_i}(f) \dots \varphi_{B_2}(f) \gamma_{B_2}(f) \varphi_{B_2}(f) \varphi_{B_1}(f) \gamma_{B_1}(f) \varphi_{B_1}(f). \end{aligned} \quad (5)$$

W opisywanych badaniach skoncentrowano się na filtrach sekwencyjnych przemennych oznaczonych jako M_i oraz N_i . Przy czym jako wynik filtracji przyjęto wartość:

$$F(f) = \frac{M_i(f)}{N_i(f)} \quad (6)$$

Filtrowano obrazy szare, rozpatrywane jako funkcje 3D. W efekcie filtracji minimalizowano wpływ lokalnej chropowatości i uzyskiwano funkcję, którą traktowano jako falistość powierzchni. Rysunek 5 przedstawia zmiany falistości $\Phi(I)$ w funkcji zmiany wielkości filtracji i dla przykładowego obrazu I dolomitu z Rędzin. Relacje z rys. 5 zdefiniowano jako:

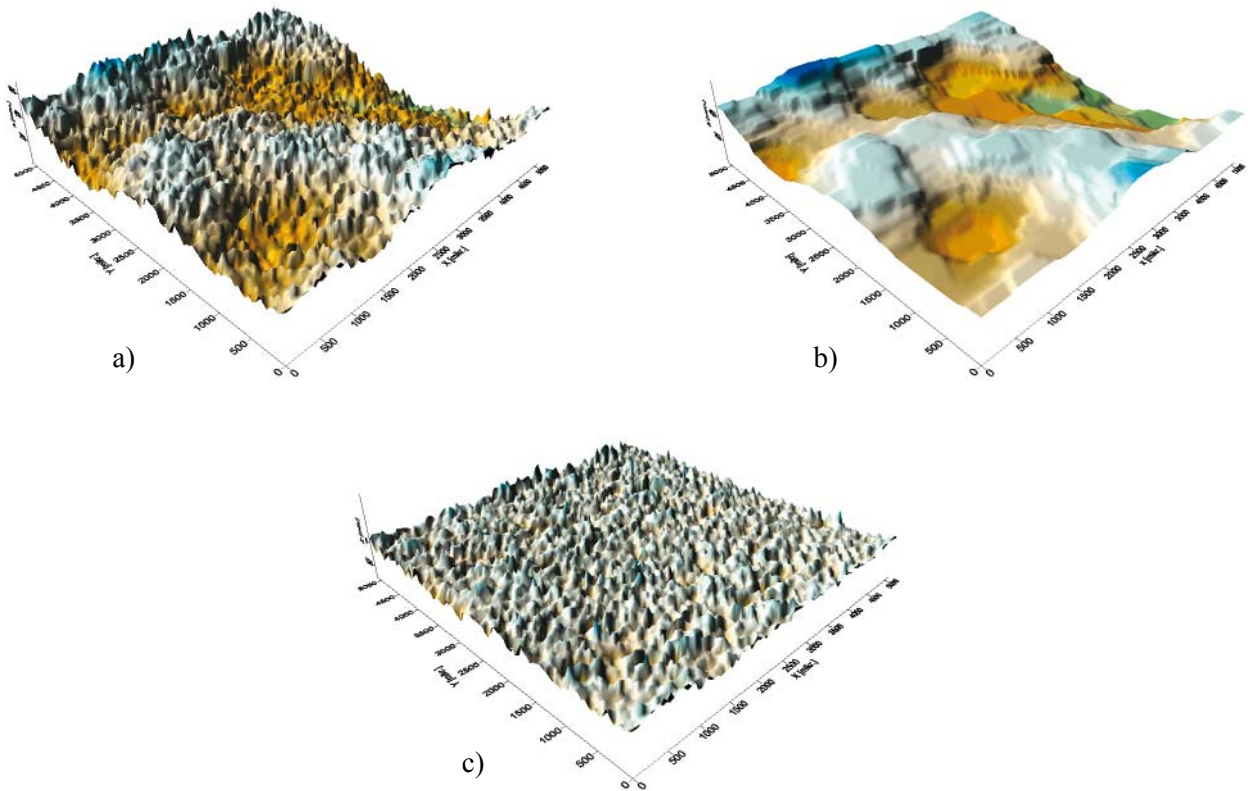
$$\Phi(I)(i) = \sum_x \sum_y \left(\frac{M_i(I(x, y)) + N_i(I(x, y))}{2} - \frac{M_{i-1}(I(x, y)) + N_{i-1}(I(x, y))}{2} \right)^2 \quad (7)$$



Rys. 5. Wpływ zwiększania rozmiaru filtracji na zmiany wyznaczonej płaszczyzny średniej (na przykładzie dolomitu z Rędzin (próbka dr36))

Otrzymany rezultat wskazuje na wpływ, jaki wywiera przyjęty rozmiar filtracji na końcowy wynik przekształcenia. Wybór rozmiaru filtracji jest więc wyborem bardzo subiektywnym, a jego poprawność może w pewnym stopniu zweryfikować jedynie jakość otrzymanych rezultatów. W prezentowanych badaniach przyjęto, że dla analizowanych próbek, wielkość filtracji zostanie ustalona na 20 [pikseli].

Rysunek 6 przedstawia wykresy 3D dla proponowanej filtracji. Przy zastosowaniu filtru sekwencyjnego przemiennego dane pomiarowe (rys. 6a) podzielono na składową falistości (rys. 6b) oraz na składową chropowatości (rys. 6c). Składowa chropowatości była punktem wyjścia do dalszych obliczeń prezentowanych w niniejszej pracy.



Rys. 6. Przy użyciu wyniku filtracji sekwencyjnym filtrem przemiennym dane pomiarowe (a) można podzielić na składową falistości (b) i składową chropowatości (c)

2.3. Wariogram

Użyteczność funkcji wariogramu (semiwariogramu) w badaniach chropowatości została zauważona przez wielu autorów (np. Roko i in., 1997). W zastosowaniach analizy obrazu wariogram jest definiowany jako:

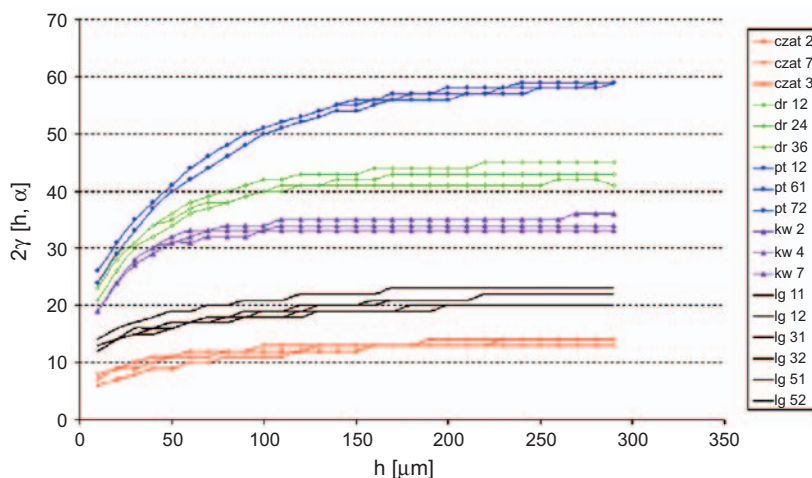
$$2\gamma(h, \alpha) = \frac{1}{\sum_N} \sum_{i=1}^N (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \quad (8)$$

gdzie h jest odległością (w kierunku α) pomiędzy dwoma punktami, $Z(x)$ oraz $Z(x+h)$ są wartościami funkcji (poziomy szarości) pomiędzy tymi punktami,

W prezentowanych badaniach (ze względów ograniczenia używanego oprogramowania) wykorzystywana była odmiana wariogramu zwana madogramem (Emery 2005). Madogram, jest funkcją zdefiniowaną podobnie jak wariogram z tą tylko różnicą, że kwadrat różnicy $Z(x)$ i $Z(x+h)$ zastąpiony zostaje modulem:

$$2\gamma_1(h, \alpha) = \frac{1}{\sum_N} \sum |Z(x) - Z(x+h)| \quad (9)$$

Na rysunku 7 zestawiono madogramy obliczone dla 18 próbek, 5 typów skał. Dolomit z Laskowej Góry, ze względu na swoje specyficzne właściwości, czyli nierównoziarnistość zgrupowaną w smugach (patrz rys. 3e i 3f) reprezentowany był przez 6 próbek.



Rys. 7. Funkcje madogramu wyznaczone dla pięciu badanych skał. Oznaczenia: czat – wapień z Czatkowic, dr – dolomit z Rędzin, pt – piaskowiec z Tumlina, kw – kwarcyt z Wiśniówki, lg – dolomit z Laskowej Góry

Na rysunku widać bardzo dobre grupowanie się funkcji dla różnych rodzajów skał. Grupowanie to jest wyraźniejsze, niż opisywane w poprzednich latach (Młynarczuk 2004; Młynarczuk i in. 2004).

Wspomniane wyniki, mimo braku filtracji składowej falistości, również grupowały madogramy, jednakże w sposób mniej wyraźny (patrz rys. 8a, b). Dodatkowo brak filtracji powodował, że wyraźnie uwidaczniała się struktura Dolomitu z Laskowej Góry, polegająca na grupowaniu się w skale ziarn drobnoziarnistych i gruboziarnistych w większe obszary. Zastosowanie filtracji powoduje także, że zanika anizotropia pomiędzy wynikami uzyskanymi w dwóch, wzajemnie prostopadłych kierunkach. Anizotropia ta była zauważalna w madogramach obliczonych w latach poprzednich. Można więc domniemywać, że była ona wynikiem anizotropii falistości.

Na rysunku 9 przedstawiono zależność pomiędzy średnią wielkością ziarn badanych skał (na podstawie tabeli 1) a progiem madogramu. Otrzymany wynik wskazuje na istnienie wpływu wielkości ziarn na ten parametr, opisujący morfologię powierzchni przełamu.

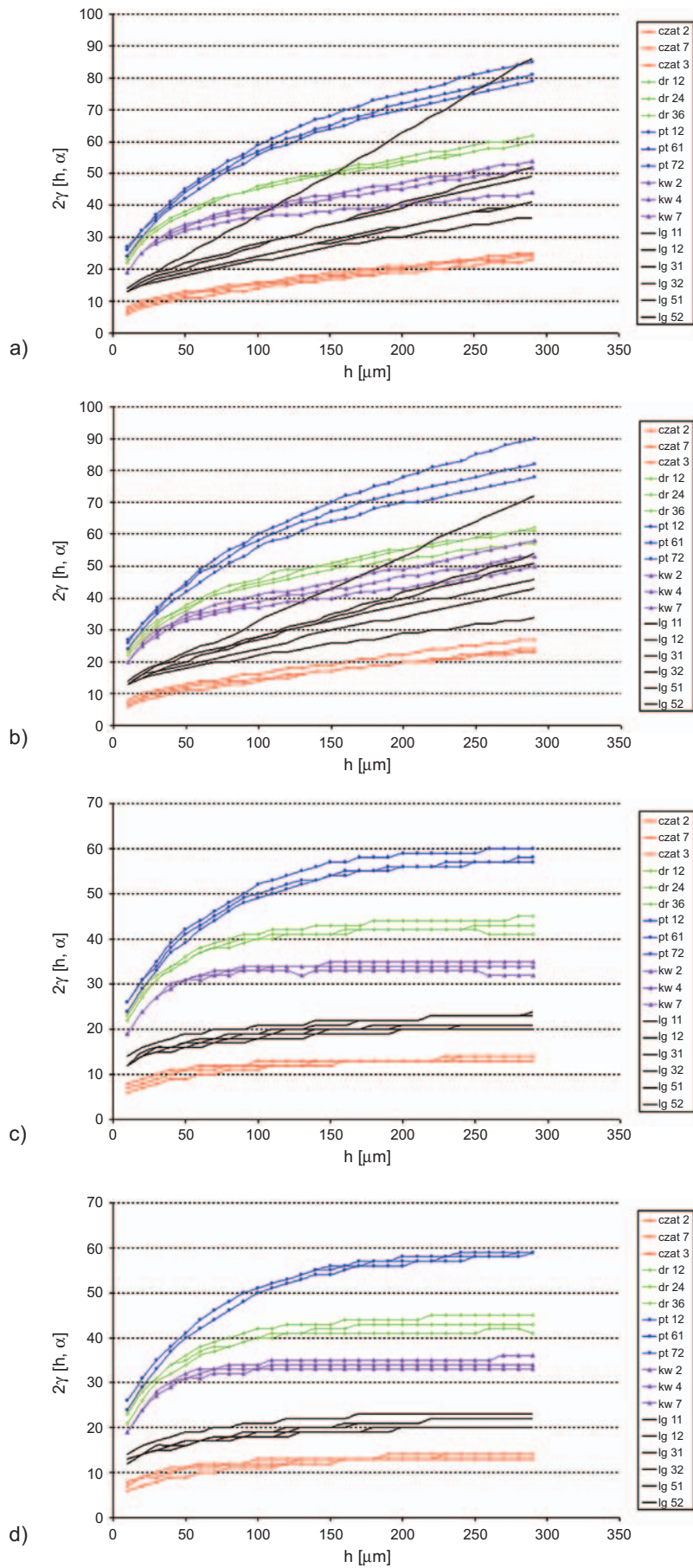
Na rysunku 10 zestawiono madogramy dla obrazów falistości (patrz rys. 6b). Na chwilę obecną nie zauważamy powiązania pomiędzy tym parametrem a rodzajem analizowanej skały.

2.4. Analiza prób węgla

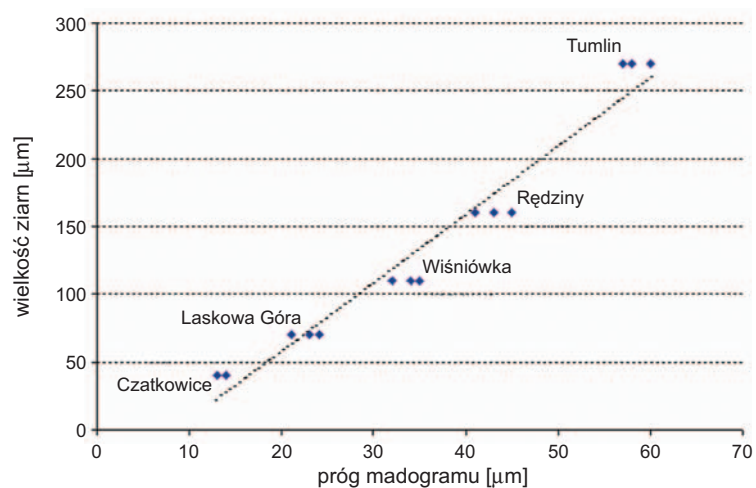
Z pokładu 409/4 KWK „Zofiówka” pobrane zostały próby kawałkowe z ociosów chodnika transportowego D-6. W miejscu tym 22 listopada 2005 r. nastąpił wyrzut skał i metanu. Próby te były przedmiotem badań opisanych w pracach Wierzbickiego i Młynarczuka (2006a, 2006b). Prace te wykazały, że węgiel sąsiadujący ze szczeliną uskokową występującą w rejonie wyrzutu miał strukturę typu brekcji tektonicznej (okruchy wityryny spojęne rozartym materiałem skalnym, w którym jest zarówno węgiel jak i skały towarzyszące) (rys. 11a). Natomiast węgle pobrane w pewnej odległości od tej szczeliny posiadały strukturę nienaruszoną (rys. 11b).

Intuicyjnie – węgiel typu brekcji (czyli b. drobnoziarnisty) powinien mieć nieco inną morfologię przełamu niż węgiel o nienaruszonej, pasemkowej strukturze. Postanowiono zbadać, czy i w jaki sposób odzwierciedla się to w ukształtowaniu powierzchni próbek.

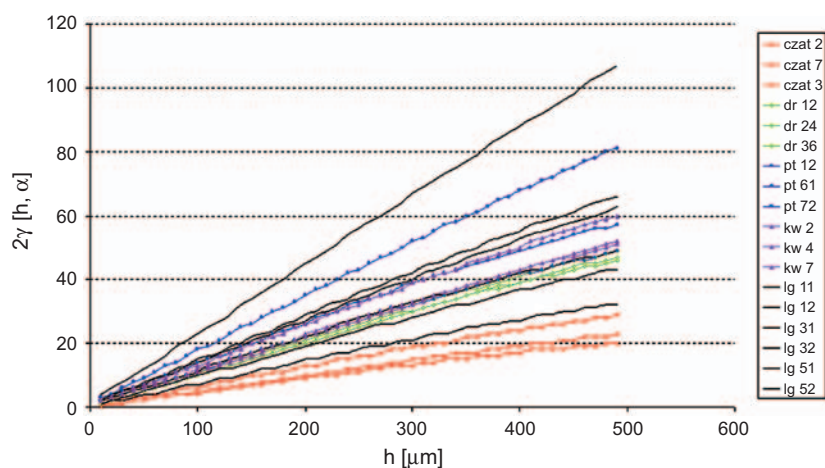
W tym celu, na każdej z 6 wybranych prób wykonano pomiary wysokościomierzem laserowym. Zmierzono macierze 256×256 punktów oddalonych od siebie o $20 \mu\text{m}$. W celu eliminacji składowej falistości otrzymane dane filtrowano filtrem sekwencyjnym przemiennym o rozmiarze 10. Stosowano mniejszy rozmiar niż w opisywanych wcześniej badaniach gdyż odległość pomiędzy sąsiednimi punktami pomiarowymi (czyli pikselami na obrazie) była dwukrotnie większa.



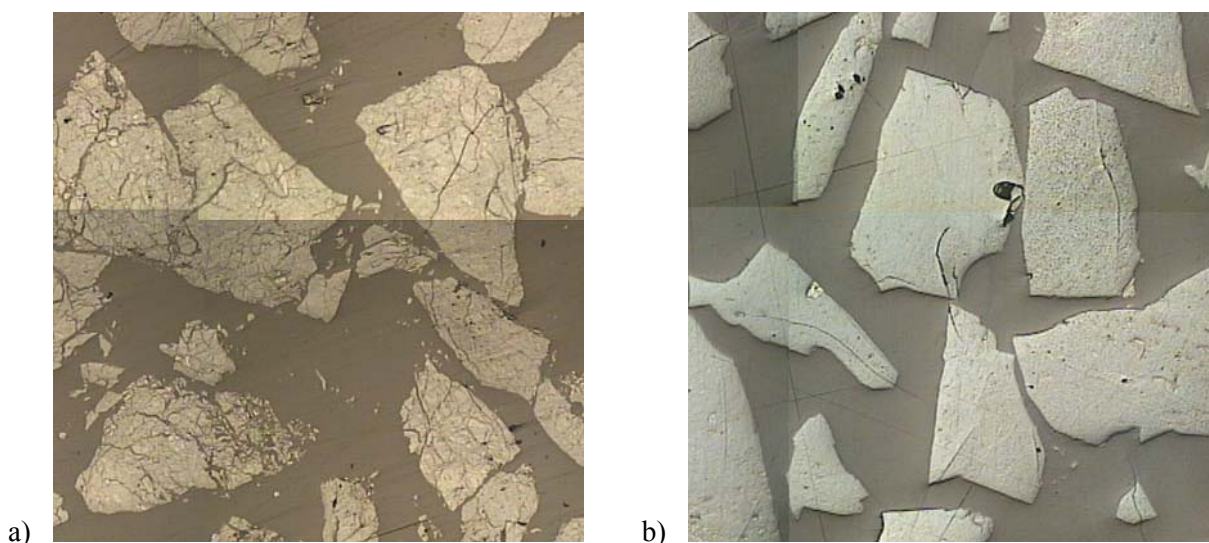
Rys. 8. Funkcja madogramu wyznaczona dla pięciu badanych skał. a) bez filtracji, $\alpha = 90^\circ$, b) bez filtracji, $\alpha = 0^\circ$, c) po filtracji, $\alpha = 90^\circ$, d) po filtracji, $\alpha = 0^\circ$; Oznaczenia: czat – wapień z Czatkowic, dr – dolomit z Rędzin, pt – piaskowiec z Tumlina, kw – kwarcyt z Wiśniówki, lg – dolomit z Laskowej Góry



Rys. 9. Zależność pomiędzy średnią wielkością ziarn badanych skał a progiem madoqramu



Rys. 10. Funkcja wariogramu wyznaczona dla składowych falistości pięciu badanych skał – widać brak wyraźnego powiązania tego parametru z rodzajem skały

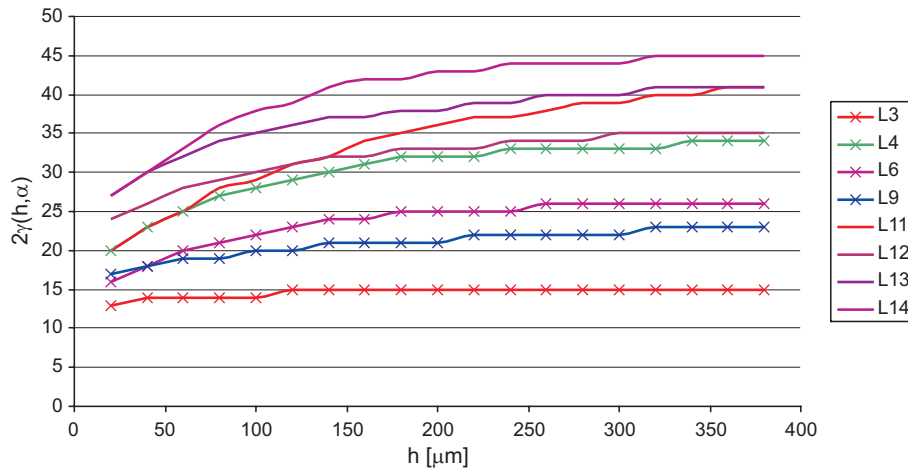


a)

b)

Rys. 11. Próba ziarnowa (przedział 0.5-1[mm]) uzyskana z rozkruszenia kawałków węgla pobranych z ociosów chodnika D-6 z rejonu wyrzutu w KWK „Zofiówka” (ze względów technologicznych niemożliwe było uzyskanie zgładów kawałkowych), a) węgiel odmieniony strukturalnie pobrany z okolic uskoku (próba L6), b) węgiel nie-odmieniony pobrany w odległości ok. 5m od uskoku (próba L12)

Na obrazie 12 pokazano wykresy madogramu dla badanych węgli. Da się zauważyć zależność pomiędzy strukturą węgli oraz otrzymanymi rezultatami (krzywe dla węgli typu brekceji plasują się poniżej węgli nienaruszonych strukturalnie).



Rys. 12. Madogramy wyznaczone dla prób węgla poprzanych w rejonie wyrzutu na KWK „Zofiówka”

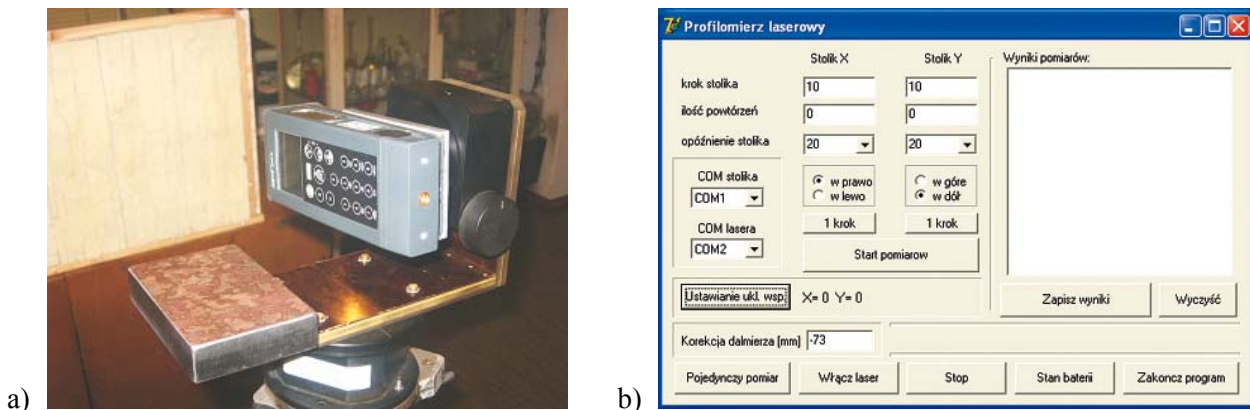
3. Odwzorowanie 3D ścian skalnych

3.1. Rozbudowa stoiska pomiarowego

Opisany w pracy Młynarczuka i in. (2005) Laboracyjny Profilometr Laserowy został dostosowany do całkowicie automatycznego pomiaru ścian skalnych w warunkach in-situ. Wykonana modyfikacja polegała na doposażeniu przyrządu w drugi silnik krokowy. Usunięto w ten sposób konieczność manualnego obrotu przyrządu w jednej z płaszczyzn pomiarowych (por. Młynarczuk i in., 2005).

W rezultacie tych zmian stoisko pomiarowe składało się z dalmierza laserowego DISTO pro⁴ firmy Leica, zamontowanego na dwóch stolikach obrotowych napędzanych silnikami krokowymi (rys. 13a). Parametry przyrządu pozwalały na przesuw stolika o kąt będący wielokrotnością 1/50 stopnia oraz pomiar odległości z dokładnością ok. 1 mm w zakresie do 100 m. Pewną wadą przyrządu była konieczność zasilania stolików krokowych energią elektryczną o napięciu 230 V. W warunkach polowych wymagane było więc korzystanie z generatora prądotwórczego. W najbliższym czasie planuje się wyeliminowanie tej niedogodności.

Zarówno głowica laserowa jak i stoliki krokowe sterowane były za pomocą komputera – laptopa. W tym celu napisane zostało specjalne oprogramowanie (rys. 13b), zapewniające pełną automatyzację badań. Program ten pozwalał m.in. na wybór pola oraz kroku pomiarowego (oddzielnie dla dwóch stolików kro-



Rys. 13. Moduł przyrządu pomiarowego (a) oraz interfejs oprogramowania (b)

kowych), a po dokonanych pomiarze pozwalał na zapis danych we współrzędnych sferycznych a następnie ich transformację i zapis we współrzędnych kartezjańskich, zgodnie z wzorem (10).

$$\begin{aligned}x &= r \cos \theta \cos \varphi \\y &= r \cos \theta \sin \varphi \\z &= r \sin \theta\end{aligned}\quad (10)$$

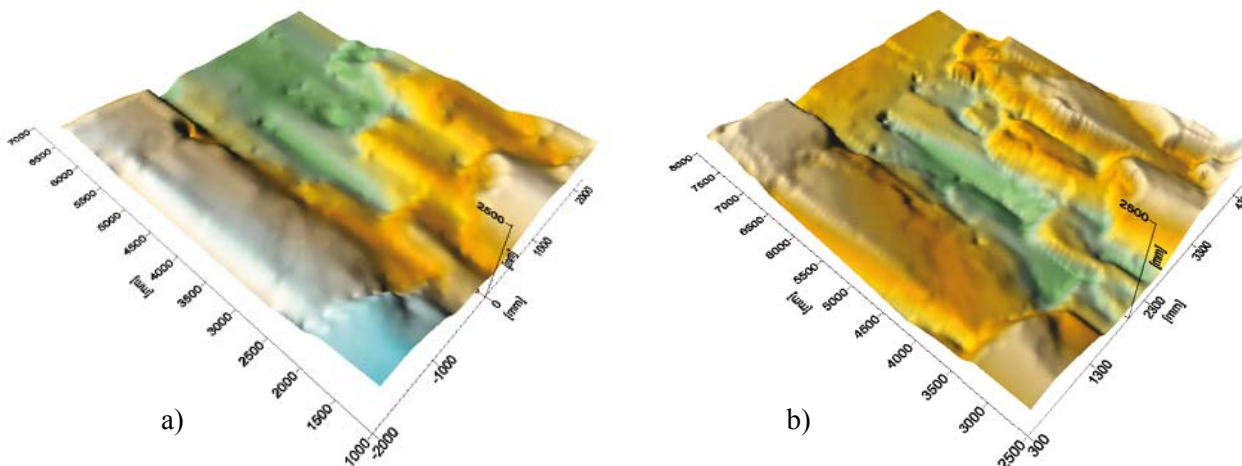
gdzie:

θ i φ – kąty obrotu stolików,
 r – zmierzona odległość.

Po przekształceniu danych pomiarowych do współrzędnych kartezjańskich nie tworzyły one regularnej siatki punktów (por. Młynarczuk i in., 2005). W celu wyeliminowania tej „niedogodności” i przygotowania danych do dalszej obróbki dokonano estymacji punktów w siatce prostokątnej przy wykorzystaniu metody Krigingu (Isaaks i Srivastavam 1989) zaimplementowanej w programie Surfer®.

Na rysunku 14 przedstawiono pomiary ściany skalnej kamieniołomu porfiru w Miękini mierzonej przy użyciu jednego (a) oraz dwóch stolików krokowych (b). Brak dodatkowego silnika krokowego w pomiarach prezentowanych na rys. 15a powodował, że obrót w jednej z płaszczyzn wykonywany musiał być ręcznie, w oparciu o podziałkę kątową naniesioną na statyw fotograficzny. Dokładność, jaką można było osiągnąć w tym obrocie wynosiła ok. 1.5 stopnia. Była to wyraźna dysproporcja w porównaniu z płaszczyzną, w której obrót odbywał się przy pomocy silnika krokowego (można było osiągnąć obrót nawet o 0.02 stopnia). Po modyfikacji urządzenia dokładność obrotu w dwóch płaszczyznach była tak samo wysoka.

Porównanie rezultatów z rys. 15a i 15b dowodzi, że użycie dodatkowego stolika pozwoliło na doprecyzowanie pomiarów i wydobywanie dodatkowych szczegółów badanej ściany skalnej. Przy czym, należy podkreślić, że pomiary te nie były wykonywane najmniejszym, możliwym krokiem. W badaniach użyto kroku pomiarowego równego 0.4 stopnia, co bezpośrednio na ścianie skalnej odzwierciedlało się przesunięciem plamki pomiarowej o około 8-10 cm.



Rys. 14. Obraz 3D badanego wycinka ściany skalnej w kamieniołomie porfiru w Miękini.
a – ściana mierzona wg Młynarczuk i in. (2005), b – ściana mierzona unowocześnionym urządzeniem

4. Podsumowanie

Zaproponowano metodę filtracji profilu powierzchni przełamów skalnych, która pozwala wyodrębnić z danych pomiarowych składowe falistości oraz chropowatości. Użyto do tego celu sekwencyjnego filtru przemienne, który wykorzystywany jest w metodach morfologii matematycznej i analizy obrazu. W wyniku użycia zaproponowanej filtracji znacznie uwidoczniła się zależność pomiędzy wielkością ziarn analizowanych skał a parametrami opisującymi morfologię powierzchni ich przełamów.

Metodę przetestowano na przykładzie pięciu skał o zróżnicowanej strukturze. Stwierdzono, że struktura tych skał, a w szczególności wielkość ich ziarn odzwierciedla się na przełamie, a proponowane metody potrafią to zmierzyć.

Analizie poddano również próbki węgla o strukturze tektonicznie odmienionej oraz nieodmienionej. Również w tym przypadku proponowana analiza chropowatości pozwala na rozróżnienie tych dwóch rodzajów węgla.

W ramach prac udoskonalono również profilomierz laserowy do pomiarów ścian skalnych w warunkach in-situ, oraz utworzono do niego oprogramowanie sterujące. W rezultacie tych zmian profilomierz pracuje w sposób całkowicie automatyczny.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w ramach działalności statutowej IMG PAN w roku 2006.

5. Literatura

- Bodziony J., Ratajczak T., Aksamit J., 1998: *Ocena chropowatości w świetle polskich norm*. Sprawozdanie z działalności naukowej Instytutu Mechaniki Górotworu PAN.
- Chen C.C.A., Liu W.C., Duffie N.A. 1998: *A Surface Topography Model for Automated Surface Finishing*, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 38, pp. 543-550.
- Chen Q., Yang S., Li Z., 1999: *Surface roughness evaluation by using wavelets analysis*, Precision Engineering 23, 209-212.
- Chmura K. 1970: *Własności fizykotermiczne skał niektórych polskich zagłębi górniczych*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
- Develi K., Babadagli T., Comlekci C., 2001: *A new computer-controlled surface-scanning device for measurement of fracture surface roughness*, Computers & Geosciences 27, 256-277.
- Emery X. 2005: *Variograms of Order ω : A Tool to Validate a Bivariate Distribution Model*. Math. Geol., vol. 37, No. 2: 163-181.
- Fardin N., Feng Q., Stephansson O., 2004: *Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41, 329-335.
- Gentier S., Riss J., 1987: *Natural Fractures in Rock: Stereological Estimation of Areas by Systematic Sections*. Acta Stereologica.
- Gurau L., Mansfield-Williams H., Irle M., 2006: *Filtering the roughness of a sanded wood surface*, Holz als Roh- und Werkstoff 64: 363-371.
- Hocheng H., Hsieh M.L., 2004: *Signal analysis of surface roughness in diamond turning of lens molds*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44, 1607-1618.
- Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989: *Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York.
- Kidybiński A., 1982: *Podstawy geotechniki kopalnianej*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.
- Konecny P., Młynarczyk M., 2003: *Zależność pomiędzy morfologią powierzchni przełamów skalnych a ich przepuszczalnością w trójosiowym stanie naprężenia (w): Geotechnika w Budownictwie i Górnictwie*. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej. Wrocław, s.148-152.
- Kulatilake P.H.S.W., Um J., 1999: *Requirements for accurate quantification of self-affine roughness using the roughness-length method*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci, 36, pp. 5-18.
- Kwaśniewski M., Wang J., 1998: *Struktura geometryczna powierzchni i zachowanie się nieciągłości w skałach przy ścinaniu*, XXI Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu, wyd. AGH, Kraków.
- Lanaro F., 2000: *A random field model for surface roughness and aperture of rock fractures*, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 37, 1195-1210.
- Matheron G., 1987: *Random sets and integral equation*, Wiley, New York.
- Młynarczyk M., 1994: *Methods of Determining the Fracture Surface Roughness of Rock Samples by Means of a Laser Profilometer*, IV International Conference Stereology and Image Analysis in Material Science, STERMA, Wisła 1994.
- Młynarczyk M., Ratajczak T., Aksamit J., 2004: *Opis powierzchni przełamów wybranych skał metodami morfologii matematycznej*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, vol. 6, pp. 79-92.
- Młynarczyk M., 2004: *Możliwości wykorzystania analizy obrazu i morfologii matematycznej do analizy stereologicznej struktur skalnych*, Archives of Mining Sciences, vol. 49.

- Młynarczuk M., Ratajczak T., Aksamit J., 2005: *Badania in-situ szczelinowatości i chropowatości ścian skalnych przy wykorzystaniu analizy obrazu i profilometrii laserowej*, Prace IMG PAN.
- Młynarczuk M., Ratajczak T., Sobczyk J., Aksamit J., 2001: *Zastosowanie metod automatycznego przetwarzania obrazów do analizy morfologii powierzchni wybranych próbek skalnych*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Vol. 3, No. 3-4.
- Pinińska J., 2001: *Systemy geologiczno-inżynierskiej oceny skał i masywów skalnych*, Przegląd geologiczny vol. 49, nr 9.
- Pinińska J., 2003: *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Część IV. Karpaty fliszowe*, Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego. Warszawa.
- Polska Norma ISO 4287 *Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni*.
- Polska Norma PN-87/M-04256/02 *Struktura geometryczna powierzchni. Pomiar chropowatości. Terminologia ogólna*.
- Power W.L., Durham W.B., 1997: *Topography of Natural and Artificial Fractures in Granitic Rocks: Implications for Studies of Rock Friction and Fluid Migration*, J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 34, No. 6, 979-989 pp.
- Renard F., Schmittbuhl J., Gratier J.P., Meakin P., 2004: *Three-dimensional roughness of stylolites in limestones*, Journal of Geophysical Research, vol. 109.
- Renard F., Voisin C., Marsan D., Schmittbuhl J., 2006: *High resolution 3D laser scanner measurements of a strike-slip fault quantify its morphological anisotropy at all scales*, Geophysical Research Letters, vol. 33.
- Roko R.O., Daemen J.J.K., Myers D.E., 1997: *Variogram Characterization of Joint Surface Morphology and Asperity Deformation During Shearing*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 34, No. 1, pp. 71-84.
- Salembier P., Serra J., Beucher S., 1994: *Course on Mathematical Morphology and Image Processing*, Ecole des Mines de Paris/Armines.
- Serra J., 1982: *Image analysis and mathematical morphology*, Academic Press.
- Serra J., 1988a: *Introduction to Morphological Filtering, Image Analysis and Mathematical Morphology*, Volume II, Theoretical Advances, ed. J. Serra, Academic Press.
- Serra J., 1988b: *Alternating sequential Filters, Image Analysis and Mathematical Morphology*, Volume II, Theoretical Advances, ed. J. Serra, Academic Press.
- Serra J., Vincent L., 1992: *An Overview of Morphological Filtering*, Circuits System Signal Processing, Vol. 11, No. 1.
- Trumpold H., Heldt E., 1998: *Why filtering surface profiles?* Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 38, pp. 639-646.
- Vincent L., 1994: *Fast Grayscale Granulometry Algorithms*, Proc. ISMM'94 International Symposium on Mathematical Morphology Fontainebleau, France, pp. 265-272, September 1994, Kluwer Academic Publishers.
- Wang J., 1994: *Morphology and mechanical behaviour of rock joints*. Doctoral Thesis.
- Xie H., Wang J. & Kwaśniewski M.A., 1999: *Multifractal characterization of rock fracture surfaces*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36, 19-27.

Applying of image analysis and laser profilometry to quantitative analysis of discontinuities appearing in rocks in micro and macro scales

Summary

The assessment of the roughness is taking the crucial place in geotechnical description of rock outcroppings. It provides information concerning rock endurance, deformation, permeability, etc. Unfortunately, the parameters used at this target are often based on the qualitative description or they are obtained by basic measurements which bring limited amount of information. The described works are continuation of the examinations led in the Strata Mechanics Research Institute in the previous years (2004 and 2005). Current researches are concentrating on the usefulness of the mathematical morphology, in particular the morphological filtering, to the analysis of the rock surface topology. By applying the alternating sequential filters the roughness component and the waviness component of the analysed profiles have been defined. By applying the madogram function to the analysis of roughness components, the correlation between this parameter and the grain size has been examined. Proposed methods have been used to the analysis of the surface of coals taken from regions near the fault at "Zofiówka" Colliery.

A modification of the laser device dedicated to rock walls analysis on a macro scale has been also described and the results of the preliminary measurements have been presented.

Keywords: rock fracture, roughness, mathematical morphology, filtration of measuring data

Recenzent: Doc. dr. hab. inż. *Paweł Ligęza*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN