

Badania *in-situ* szczelinowatości i chropowatości ścian skalnych przy wykorzystaniu analizy obrazu i profilometrii laserowej

MARIUSZ MŁYNARCZUK, TERESA RATAJCZAK, JAROSŁAW AKSAMIT

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

Streszczenie

Badania *in-situ*, prowadzone w kopalniach porfiru w Miękini oraz wapienia w Czatkowicach miały na celu opracowanie i zweryfikowanie metod pomiarowych pozwalających na odwzorowanie morfologii ścian skalnych oraz opisanie występujących na nich śladów spękań. Do prowadzenia badań zestawiono stanowisko profilometrii laserowej. Zaproponowano również, oparte na przekształceniach morfologii matematycznej, metody detekcji sieci spękań uwidocznionych na fotografiach odsłoneń skalnych. Połączenie dwóch metod pomiarowych doprowadziło do odwzorowania w pamięci komputera trójwymiarowej struktury badanej ściany skalnej oraz pozwoliło na opisanie analizowanych spękań w przestrzeni 3D. Efektem badań było również opisanie chropowatości ścian skalnych przy użyciu parametrów zaproponowanych w poprzednich latach do laboratoryjnych badań próbek skalnych.

Słowa kluczowe: morfologia ścian skalnych, spękania skał, profilometria laserowa, analiza obrazu

Wstęp

Szczelinowatość górotworu jest jedną z podstawowych cech, wpływających m.in. na jego wytrzymałość, odkształcalność i przepuszczalność. Stanowi też jeden z podstawowych elementów decydujących o zachowaniu się górotworu w procesie wykonywania budowli podziemnej (Gałczyński, 2001). Fakty te powodują, że pomiary spękań zajmują kluczowe miejsce w geotechnicznej ocenie masywów skalnych. Niestety, ze względu na trudność i pracochłonność wymaganą przy wykonywaniu ilościowych pomiarów sieci spękań, wiele parametrów opisujących szczelinowatość górotworu ma charakter jakościowy, oparty w pewnej mierze na subiektywnych odczuciach obserwatora. Do parametrów takich można zaliczyć niektóre wskaźniki geoinżynierskiej oceny masywów skalnych, w tym np. wskaźniki: Q zaproponowany przez Barton i innych (1974) oraz wskaźnik RMR podany przez Bieniawskiego (1974) (w szczególności punktowa ocena orientacji szczelin i charakteru spękań).

Rozwój nowoczesnych metod pomiarowych a zwłaszcza komputerowej analizy obrazu sprawia, że żmudne pomiary ilościowe mogą być częstokroć (w pełni lub w znacznym stopniu) zautomatyzowane. Dzieje się tak w wielu dziedzinach badań, np. w medycynie, biologii, metalurgii, ceramice, itp. Niestety, stopień zautomatyzowania pomiarów w geologii i mechanice skał nie jest dotychczas zadawalający (Bodziony, 1993).

U podstaw prezentowanych badań jest założenie, że przy wykorzystaniu metod analizy obrazu istnieje możliwość automatycznej detekcji (wyszukania) spękań a w konsekwencji możliwość ich automatycznego pomiaru. Doprowadzi to do nowoczesnego, kompleksowego i automatycznego opisu spękań widocznych na ścianie skalnej. Opis ten może być oparty zarówno o standardowe wskaźniki szczelinowatości masywu (wskaźniki zagęszczenia szczelin, porowatości szczelinowej, wskaźnik RQD, IBG, i tym podobne) oraz o parametry wynikające bezpośrednio z pomiarów automatycznych (długości i szerokości spękań, ich rozkłady, maksymalne i minimalne średnice Fereta, róże spękań, itp.).

Celem utylitarnym badań jest opracowanie nowoczesnych, szybkich i zautomatyzowanych metod pomiarowych mogących w sposób kompleksowy opisać wybrane cechy górotworu. Dążono zarówno do opracowania metodyki opisu śladów spękań widocznych na odsłoniętych ścianach skalnych jak i do opisu morfologii ich powierzchni.

Ze względu na swoją wagę, problem szczelinowatości górotworu, jego pomiaru, opisu i wpływu na parametry masywu skalnego, jest często poruszany w pracach badaczy zajmujących się badaniami właściwości fizykomechanicznych górotworu (por. Borecki i Chudek, 1972; Hobler, 1977; Kidybiński, 1982; Kłeczek 1985; Ryncarz, 1993; Gałczyński, 2001). Same zaś badania śladów spękań są regularnie wykonywane np. przez geologów (Pinińska, 2003). Jednakże stosowane powszechnie parametry oparte są często na jakościowym opisie spękań górotworu (np. niektóre wskaźniki geoinżynierskiej oceny masywów skalnych) 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. Do takich pomiarów zaliczyć można np. opisane przez Hoblera (1977) metody planimetryczne i fotoplanimetryczne, lub metodę siatki pomiarowej (Pinińska, 2001). Niewątpliwą wadą wspomnianych technik pomiarowych jest konieczności prowadzenia manualnych zliczeń, oraz możliwość subiektywnej oceny szczelinowatości.

Pewne aspekty automatyzacji pomiarów szczelinowatości *in-situ* zauważyć można np. w pracy Lemy i Hadjigeorgiu (2005), w której analizowano sfotografowane na odsłonięciu masywu skalnego ślady spękań. Analizując bibliografię poruszającą problematykę automatycznej analizy śladów spękań w skałach, należy także zwrócić uwagę na pojawiające się w ostatnich latach prace dotyczące analizy nieciągłości obserwowanych pod mikroskopami optycznymi i skaningowymi. Można tu wymienić prace (Kushuda i in., 1995) oraz (Chung i in., 1985) przy czym w tej ostatniej analiza automatyczna wspomaganą była „ręczną” korektą obrazu wynikowego. Podobnie postępowano w badaniach opisanych przez Młynarczuka i in. (2003) oraz Nowakowskiego i in. (2003). Próby automatyzacji pomiarów spękań opisano natomiast w pracach Liu i in. (2004), Młynarczuka i in. (2003) oraz Obary i Młynarczuka (2004).

Obserwowany w ostatnich latach intensywny wzrost zainteresowania problemem pęknięcia materiałów wymógł potrzebę opracowania nowych technik pomiarowych dotyczących wyznaczania parametrów charakteryzujących morfologię powierzchni pęknięć (chropowatości). Dzieje się tak w szczególności w badaniach metalurgicznych (Gokhale i Underwood 1990, Wojnar, 1990). Również w pracach geologicznych da się zauważyć zainteresowanie tym tematem (Gentier i Riss 1987, 1988, Wang 1994, Xie i in., 1999, Młynarczuk 1994). Niemniej jednak, większość tych prac koncentruje się jedynie na pewnych, wybranych zagadnieniach związanych z powstawaniem i morfologią przełamów skalnych (np. własnościach fraktalnych). Wśród badań poświęconych problematyce pomiarów chropowatości ścian skalnych *in situ* wymienić należy pracę Fenga i in. (2003), w której przedstawiona została metoda odwzorowania ścian miernikiem laserowym. Pomiar chropowatości próbek skalnych w warunkach laboratoryjnych są m.in. przedmiotem prac Chaea i in (2004), w których analizowane są przełamy próbek granitu przy wykorzystaniu skaningowego laserowego mikroskopu konfokalnego. W pracy Develiego i in., (2001), Powera i Durhama (1997) oraz Młynarczuka (1994, 2004) do badań laboratoryjnych wykorzystywany jest natomiast profilometr laserowy.

Ocena 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. Dlatego też niezwykle istotne jest prowadzenie badań mających na celu opracowanie metodyki pomiarowej umożliwiającej jednoznaczny i jak najpełniejszy opis powierzchni przełamu. Szczególnie, 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). Morfologia powierzchni przełamu wywiera również znaczny wpływ na przemieszczenia poprzeczne do kierunku ścinania (Kidybiński, 1982) i decyduje o oporach poślizgu na kontaktach powierzchni podzielności (Pinińska, 2003).

Detekcja szczelin w masywie skalnym

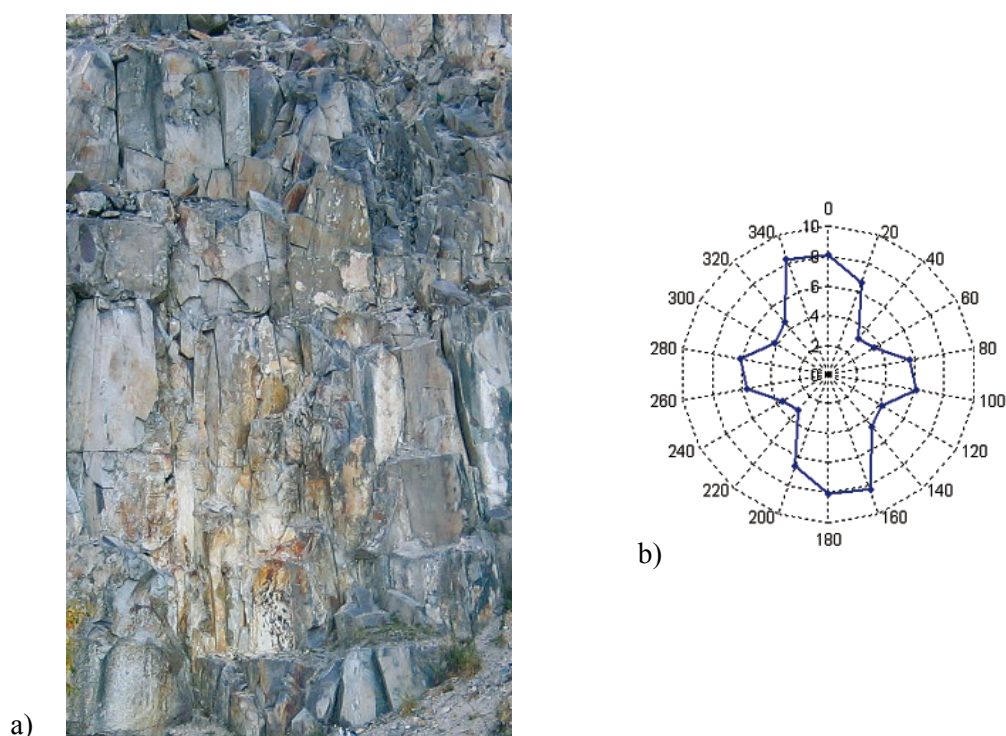
Badania opisywane w niniejszej pracy prowadzono w nieczynnej kopalni porfiru w Miękini (rys. 1) oraz w kopalni wapienia w Czatkowicach (rys. 13). Porfir z Miękini koło Krzeszowic jest skałą wylewną o barwie ciemnoczerwonej. Charakteryzuje się on tzw. strukturą „porfirową”, czyli w drobnoziarnistym cieście skalnym tkwią prakryształy skaleni (do 8 mm) oraz zwykle mniejsze osobniki kwarcu i biotyty. Silnie zdyspergowany hematyt jest przyczyną intensywnego zabarwienia, aczkolwiek jego zawartość w skale

nie jest zbyt duża (ok. 1%). Wapień z Czatkowic (k. Krzeszowic) jest skałą dolnokarbońską zbudowaną w przeważającej części z pelitycznego kalcytu o strukturze drobnogruzelkowej wielkości rzędu 0.03-0.05 mm. Znaczna część pelitu wapiennego uległa rekryształizacji 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.



Rys. 1. Fragment badanej ściany skalnej w kopalni porfiru w Miękinii

W oparciu o wyniki wcześniejszych prac prowadzonych w Pracowni Mikromerytyki, które miały na celu analizę nieciągłości obserwowanych na mikroskopowych obrazach struktur skalnych (Młynarczuk i in. 2003, Obara i Młynarczuk, 2004) podjęto próbę zaproponowania algorytmów segmentacji szczelin uwidocznionych na zdjęciach makroskopowych. Przykłady takich zdjęć zaprezentowano np. na rysunkach 2a, 3a i 4a.



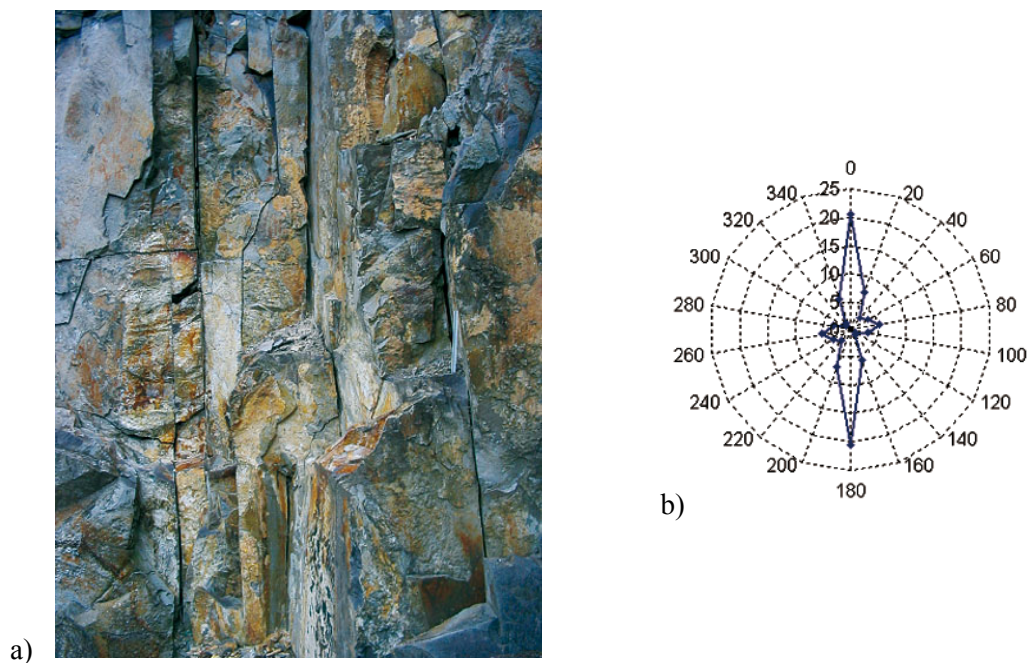
Rys. 2. Analizowana ściana skalna w kamieniołomie w Minkini oraz róża kierunków obserwowanych na niej nieciągłości

Stosunkowo najprostszym sposobem analizy, który jednocześnie dawał zadawalające wyniki, było postępowanie oparte na zaprezentowanym w pracy Młynarczyka (2005) algorytmie oszacowania kierunków nieciągłości na zdjęciach SEM (pierwotnie zaproponowana wersja algorytmu służyła analizie ułożenia minerałów ilastych). W celu przeprowadzenia analizy ukierunkowania obraz szary poddawany został filtracji filtrem przemiennym wykorzystującym rekonstrukcję. Następnie, na obrazie wyznaczono gradient morfologiczny oraz automatyczną binaryzację metodą maksymalnej entropii. Otrzymano w efekcie obraz, na którym uwidocznione są granice nieciągłości obserwowane na skale. Na obrazie tym przeprowadzono dziewięć operacji otwarcia elementem strukturalnym w postaci odcinka ułożonego kolejno w kierunkach 20° , 40° , 60° , 80° , 100° , 120° , 140° , 160° i 180° . Analizując objętości obrazów po tych operacjach otrzymano 9 wartości, które odzwierciedlały stopień ukierunkowania struktury. Otrzymany wynik prezentuje róża kierunków z rysunku 2b. Zaprezentowana metodyka powoduje, że parametrem takiego wykresu jest udział procentowy odcinków ułożonych w danym kierunku i jednocześnie w całości pokrywających się z analizowanymi szczelinami, w odniesieniu do wszystkich tego typu odcinków ułożonych we wszystkich analizowanych kierunkach.

Kilka przykładów zastosowania powyższego algorytmu zaprezentowano na rysunkach 3b, 4b i 5b.



Rys. 3. Analizowana fragment ściany skalnej w kamieniołomie w Minkini oraz róża kierunków obserwowanych na niej nieciągłości



Rys. 4. Analizowana fragment ściany skalnej w kamieniołomie w Minkini oraz róża kierunków obserwowanych na niej nieciągłości

Uzyskane w wyniku analizy spękań różne kierunków przypuszczalnie pokrywają się z charakterystycznym dla skał magmowych (również porfiru) spękaniem, które bywają rozwinięte w dwóch, lub więcej kierunkach. Jest to tzw. cios, który w kamieniołomach ujawnia się wskutek wietrzenia oraz eksploatacji mechanicznej (Bolewski i in., 1982). Od charakteru tego ciosu zależy wartość użytkowa skał wykorzystywanych jako kamienie budowlane i drogowe. Im cios jest bardziej nieregularny, tym obróbka kamieniarska jest trudniejsza lub nawet niemożliwa.

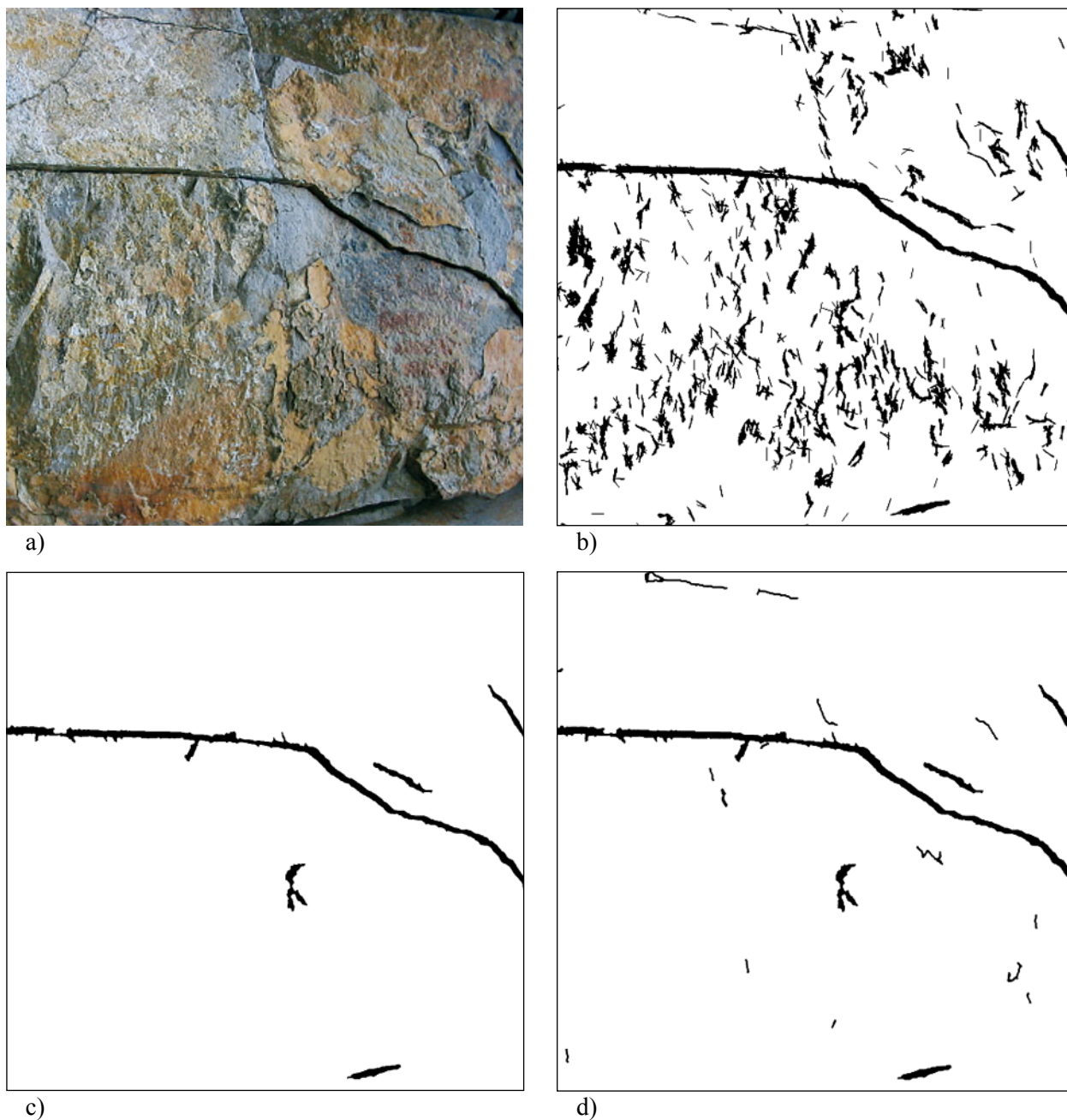
Na skałach osadowych (wapieniach) uwidaczniają się nieciągłości będące wynikiem uławicenia. Jednocześnie na wykresie widać wpływ nieciągłości (także spękań), które w analizowanym przypadku (rys. 5a) przybrały kierunek równoległy do uławicenia. Te dwa kierunki nieciągłości są dobrze widoczne na rysunku 5b.



Rys. 5. Analizowana fragment ściany skalnej w kamieniołomie w Czatkowicach oraz róża kierunków obserwowanych na niej nieciągłości

Zdecydowanie więcej informacji o szczelinowatości analizowanej ściany można otrzymać przeprowadzając segmentację poszczególnych szczelin. Niestety, struktura szczelin występujących na ścianach skalnych jest na tyle skomplikowana, że nie udało się zaproponować jednego algorytmu mogącego poprawnie segmentować wszystkie tego typu struktury. Do najważniejszych problemów, na jakie napotkano podczas badań zaliczyć należy przede wszystkim: różną rozwartość szczelin, niejednorodną barwę ściany skalnej (będącą skutkiem wietrzenia) oraz występowanie rumoszu skalnego. Powyższe problemy powodowały, że praktycznie każdy obraz musiał być analizowany indywidualnie. Przykładowy algorytm segmentacji przedstawiono na rys. 6. Proces ten przebiegał dwuetapowo. W pierwszym etapie przeprowadzono segmentację szczelin o dużej rozwartości. Obraz z rysunku 6a poddany został wstępnej filtracji otwarciem przez rekonstrukcję, następnie wyznaczono gradient morfologiczny. Na obrazie gradientu przeprowadzono serię otwarć elementem strukturalnym w postaci odcinka ułożonego w 18 kierunkach. Otrzymany w ten sposób obraz wynikowy poddano binaryzacji. Na obrazie binarnym ponownie przeprowadzono serię otwarć odcinkiem ułożonym w 18 kierunkach, z tą różnicą, że tym razem odcinek strukturalny był dwukrotnie dłuższy. W efekcie tych operacji uzyskano wynik przedstawiony na rysunku 6b. W celu segmentacji szczelin o dużej rozwartości wyliczono maksymalne średnice Fereta dla wszystkich obiektów i do dalszej obróbki wybrano tylko te, które miały największe wartości. Dodatkowo, na rysunku 6a wyznaczono najczarniejsze fragmenty. Uznano, że są one częścią szczelin i w związku z tym posłużyły one jako markery do funkcji rekonstrukcji (obrazem maski był obraz 6b po eliminacji obiektów o najmniejszych wartościach maksymalnych średnic Fereta). W rezultacie tych operacji wyznaczono obraz z rysunku 6c. Do pełnej segmentacji szczelin należało wyznaczyć jeszcze szczeliny o minimalnej rozwartości. Dlatego obraz 6a poddano binaryzacji i wyznaczono ciemnie fragmenty struktury (odpowiadające szczelinom). Był to obraz maski do późniejszej rekonstrukcji. Następnie na obrazie tym wykonano operację otwarcia kołem o promieniu 3 pikseli i do dalszej obróbki wybrano tylko te fragmenty obrazu, które zostały przez tą operację usunięte. Były to najdrobniejsze fragmenty struktury. Obraz ten poddano serii otwarć stosunkowo dużym odcinkiem ułożonym w 18 kierunkach.

Otrzymano w ten sposób obraz markerów, który po rekonstrukcji w obraz maski dał wynik końcowy – ślady słabo rozwartych szczelin. Nałożenie tego obrazu, oraz obrazu z rys 6c dało wynik końcowy – obraz przedstawiony na rysunku 6d.



Rys. 6. Kolejne etapy przykładowego algorytmu detekcji szczelin na strukturze porfiru

Z rysunku 6d wyznaczyć można parametry geometryczne opisujące spękania. Przykładowo, w tabeli 1 zestawiono parametry: powierzchni spękań, udziału procentowego spękań i długości spękań. W celu wyznaczenia długości spękań, obraz z rysunku 6c poddano operacji szkieletyzacji. Tak uzyskany obraz był podstawą do wyznaczenia tego parametru.

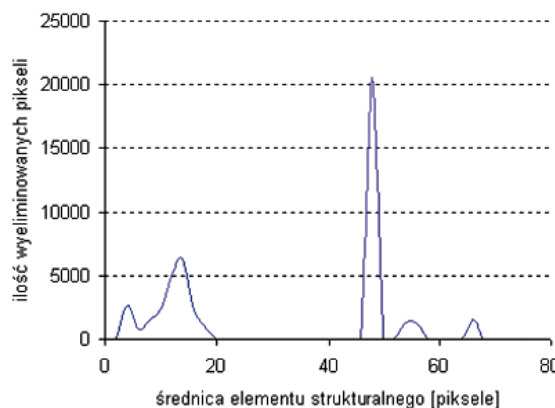
Tab. 1. Wybrane parametry geometryczne opisujące spękania na rys. 6d

Powierzchnia spękań [piksele ²]	Długość spękań [piksele]	Udział procentowy spękań [%]
23 164	5 333	4.35

Rysunek 8 przedstawia wykres funkcji granulometrii (wg Serra, 1982). Z wykresu tego wynika, że najczęściej występująca rozwartość szczeliny to 48 pikseli. Największa rozwartość wynosi natomiast 66 pikseli.



Rys. 7. Obraz 6d po szkieletyzacji



Rys. 8. Wykres funkcji granulometrii dla obrazu 6d

Przytoczone powyżej wyniki mogą być obarczone pewnym błędem. Wynikać on może z co najmniej dwóch powodów. Po pierwsze, zdjęcia dużych obiektów mogą być obarczone błędem związanym z optyką aparatu, a w szczególności z perspektywą fotografowanego ujęcia. Aby to skorygować należy przeprowadzić szereg przekształceń geometrycznych. Inną przyczyną błędów może okazać się morfologia analizowanej skały. Zwróćmy uwagę, że analizując zdjęcia rozpatrujemy jedynie dwuwymiarowe rzuty trójwymiarowej ściany skalnej. Aby wyeliminować to źródło błędu postanowiono odwzorować analizowaną ścianę skalną w przestrzeni 3D i na to odwzorowanie nanieść otrzymane szczeliny. Uznano także, że trójwymiarowe zobrazowanie ściany może być podstawą do korekcji zdjęć ze względu na właściwości optyczne aparatu oraz błędy wynikające z perspektywy ujęcia fotograficznego.

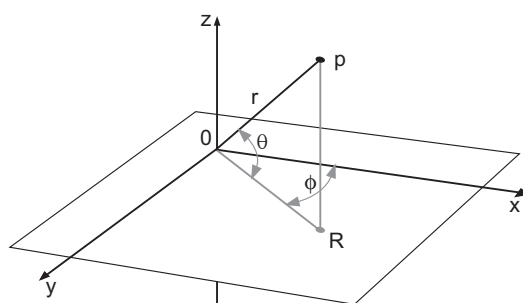
Odwzorowanie morfologii ściany skalnej

W celu odwzorowania morfologii ściany skalnej wykorzystano Laboratoryjny Profilometr Laserowy (Młynarczuk, 2004), który dostosowano do pomiarów we współrzędnych sferycznych. Stoisko pomiarowe składało się z dalmierza laserowego DISTO pro⁴ firmy Leica, zamontowanego na stoliku obrotowym napędzanym silnikiem krokowym. Całość umieszczona była na statywie fotograficznym, którego głowica wyposażona była w podziałkę kątową (rys. 9). Zarówno głowica laserowa jak i stolik krokowy sterowane były za pomocą komputera – laptopa. Parametry urządzenia pozwalały na przesuw stolika o kąt powyżej 1/50 stopnia i pomiar odległości z dokładnością ok. 1 mm w zakresie do 100 m. Niestety, brak dodatkowego silnika krokowego powodował, że obrót w drugiej płaszczyźnie 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.

W oparciu o powyższe parametry zdecydowano, że podczas prowadzonego pomiaru kąt obrotu stolika φ (patrz rys. 10) wynosić będzie 0.5 stopnia, a kąt (wykonywanego ręcznie) obrotu głowicy statywu θ 1.66 stopnia (głowicę ustawiano w 3 pozycjach na skali o podziałce 5 stopni). Zakres pomiarowy w płaszczyźnie θ zmieniał się w przedziale od -18.3 do $+18.3$ stopnia (23 położenia), a w płaszczyźnie kąta φ od 0 do 38.5 stopni (80 położenia). Dawało to w sumie 1840 punktów pomiarowych.



Rys. 9. Stoisko pomiarowe (a) oraz zbliżenie głowicy laserowej (b)



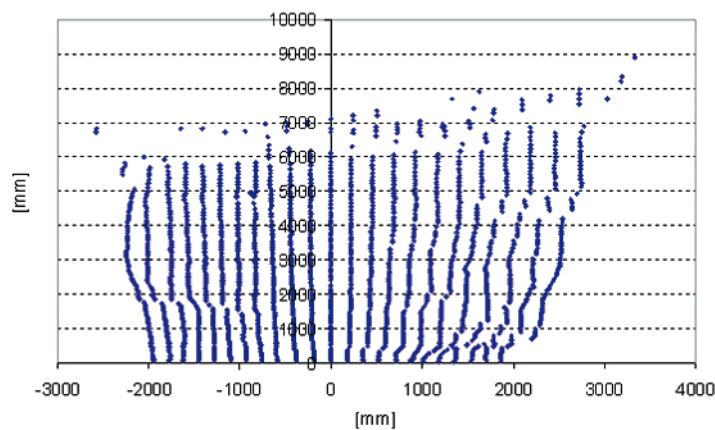
Rys. 10. Punkt pomiarowy we współrzędnych sferycznych i kartezjańskich

Po każdym dokonanym pomiarze (trwającym ok. 2 godzin) współrzędne sferyczne przeliczane były na współrzędne kartezjańskie, zgodnie z wzorem (1).

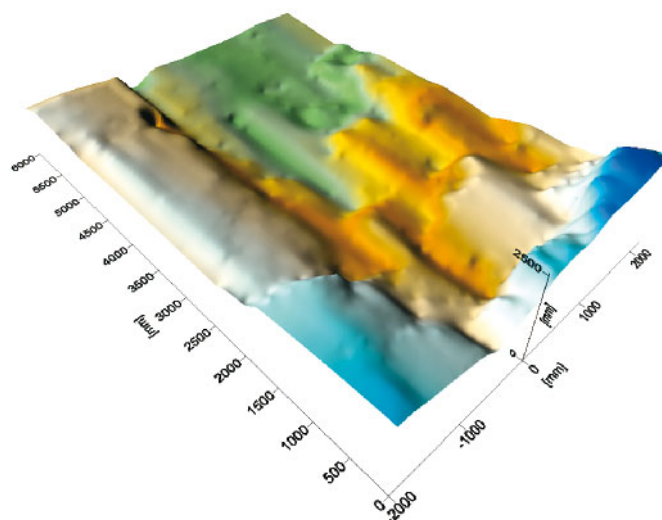
$$\begin{aligned}
 x &= r \cos \theta \cos \varphi \\
 y &= r \cos \theta \sin \varphi \\
 z &= r \sin \theta
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

W rezultacie otrzymano punkty pomiarowe, które były nieregularnie ułożone w przestrzeni kartezjańskiej (rys. 11). Jest to efektem dużych różnic „głębokości” mierzonej ściany skalnej. Wykorzystywane do analizy programy wymagały jednak, aby punkty pomiarowe ułożone były w siatce kwadratowej lub prostokątnej. W tym celu, w oparciu o posiadane dane pomiarowe, dokonano estymacji punktów leżących w siatce prostokątnej. Wykorzystano do tego celu algorytm bazujący na metodzie Krigingu (Isaaks i Srivastava, 1989). Powyższy algorytm zaimplementowany był w programie Surfer®.

Dodatkowo, do estymacji (i dalszych badań) wybrano tę część analizowanej powierzchni, która była najlepiej opróbowana. Ograniczono się więc do zakresu od -2000 mm do 2200 mm dla osi X, oraz od 0 mm do 6000 mm dla osi Y. Zdecydowano także, aby estymowane punkty odległe było od siebie o 30 mm. W wyniku tych operacji otrzymano macierz wartości XYZ. Ułożone one były w siatce kwadratowej o rozmiarze 201×141 punktów. Dane te obrazuje wykres z rys. 12.



Rys. 11. Rzeczywiste ułożenie punktów pomiarowych na ścianie skalnej



Rys. 12. Obraz 3D badanego wycinka ściany skalnej w kamieniołomie porfiru w Miękini (patrz rys. 14b)

Bazując na otrzymanej macierzy punktów wyznaczono parametr opisujący powierzchnie odsłonięcia skalnego. Został on umieszczony w tabeli 2.

Tab. 2. Powierzchnia badanego wycinka ściany skalnej w kopalni porfiru w Miękini

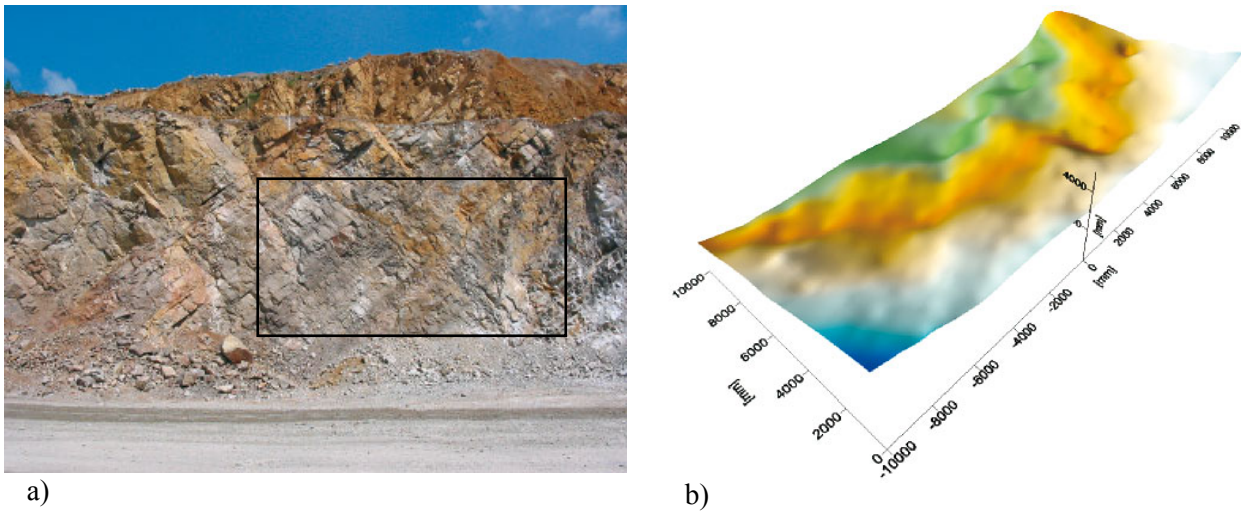
Powierzchnia rzutu wycinka ściany skalnej na płaszczyznę zdjęcia [m ²]	25,20
Rzeczywista powierzchnia wycinka ściany skalnej [m ²]	33,01
Różnica pomiędzy rzeczywistą powierzchnią ściany a powierzchnią jej rzutu na płaszczyznę zdjęcia	1,31

Wykorzystując opisaną wcześniej metodykę pomiarową wykonano badania morfologii ściany skalnej w kopalni wapienia w Krzeszowicach. Zdjęcie badanej ściany oraz jej odwzorowanie 3D przedstawiono na rys. 13. Analizowany wycinek ściany miał wielkość 20×10 m.

Podobnie jak dla analizowanego uprzednio wycinka ściany porfiru, również dla tej ściany zestawiono podstawowe parametry dotyczące powierzchni badanej ściany. Znajdują się one w tabeli 3.

Tab. 3. Powierzchnia badanego wycinka ściany skalnej w kopalni wapienia w Czatkowicach

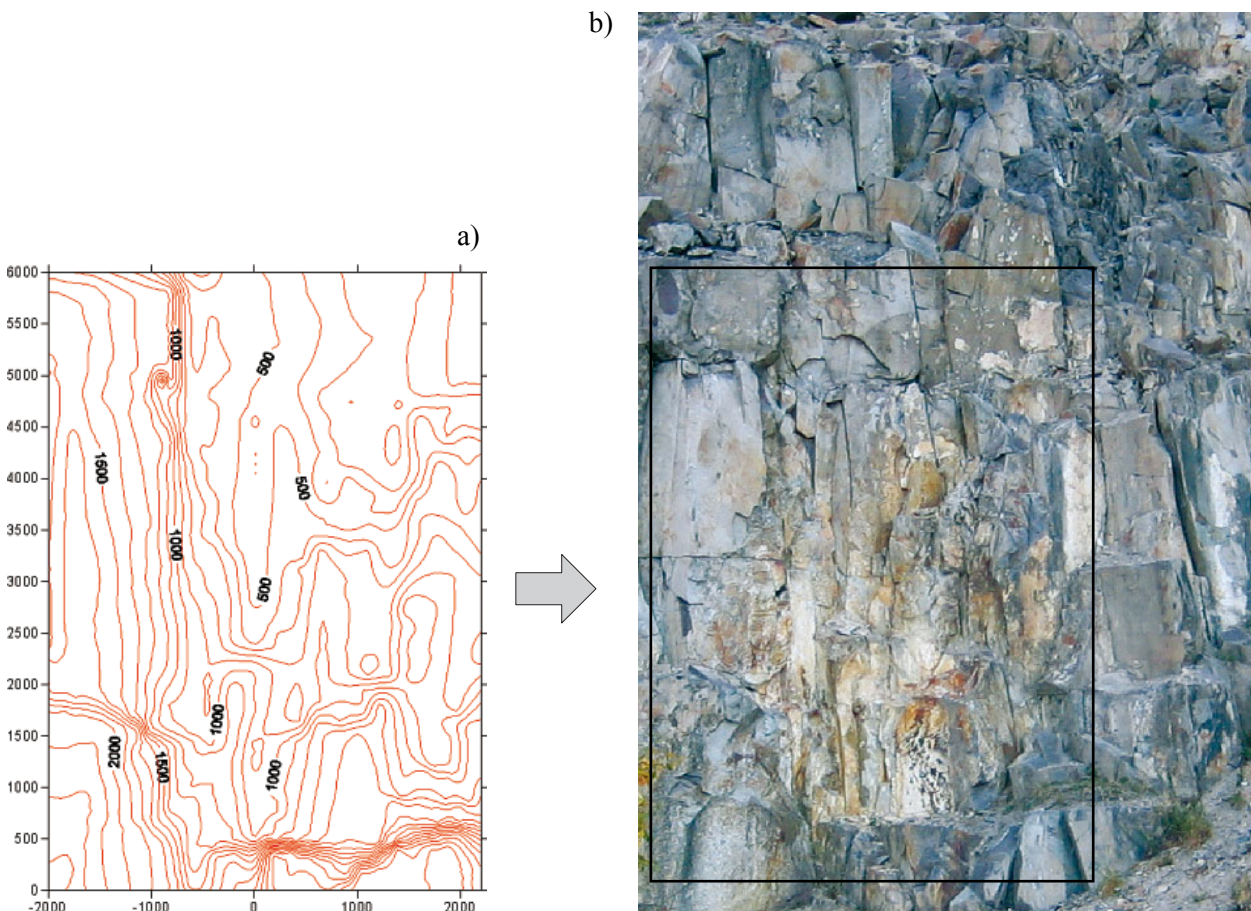
Powierzchnia rzutu wycinka ściany skalnej na płaszczyznę zdjęcia [m ²]	200
Rzeczywista powierzchnia wycinka ściany skalnej [m ²]	416
Różnica pomiędzy rzeczywistą powierzchnią ściany a powierzchnią jej rzutu na płaszczyznę zdjęcia	2.08



Rys. 13. Badana ściana skalna w kopalni wapienia w Czatkowicach (a), oraz jej odwzorowanie 3D (b)

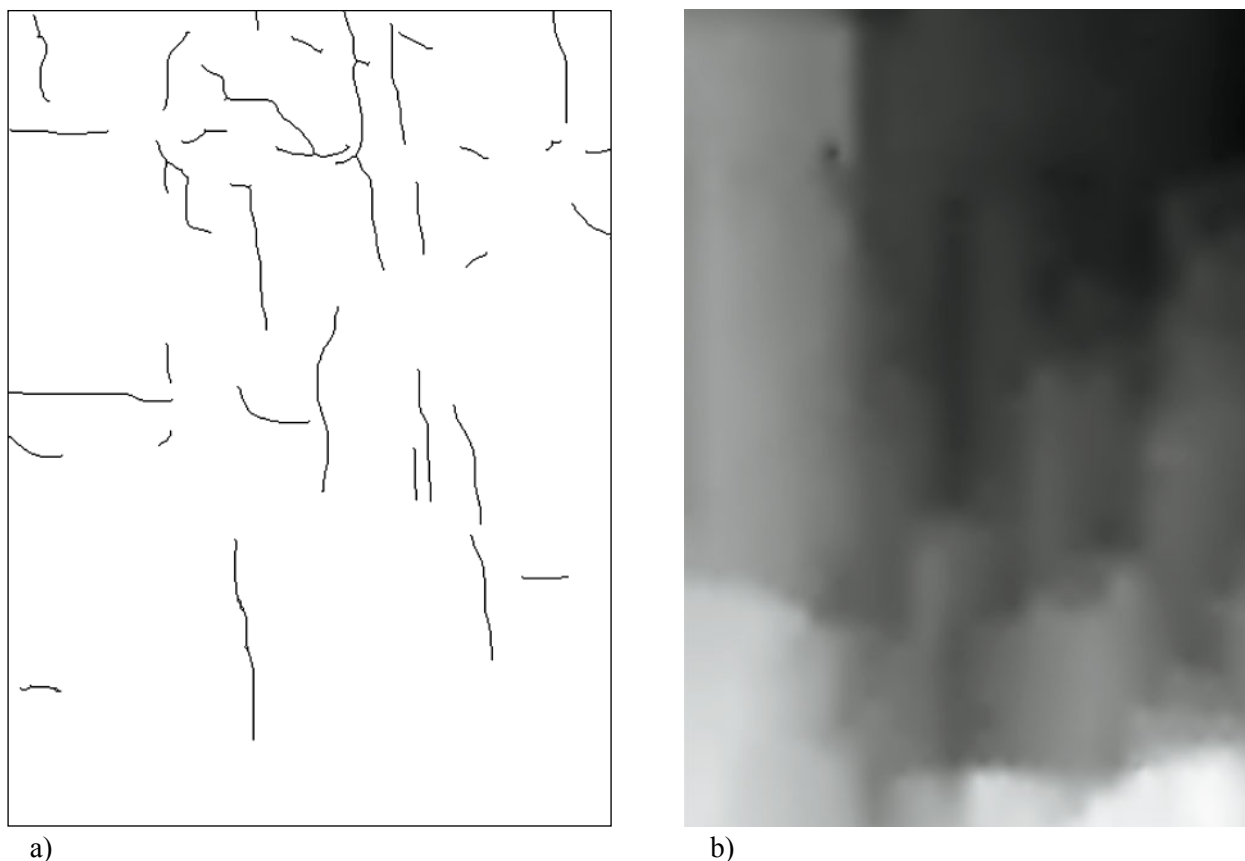
Zobrazowanie spękań w przestrzeni 3d

Przedstawiony na rysunku 12 wykres 3D obrazuje część ściany skalnej z rys. 1. Poprzez wizualne porównanie wykresu 3D oraz jego poziomicy (rys. 14a) z analizowaną ścianą wyznaczono, który fragment zdjęcia odpowiada analizowanemu obszarowi (patrz rys. 14b). Dodatkowo, poprzez „dopasowanie” zdjęcia do wykresu poziomicy zmodyfikowano jego wymiary podłużne i poprzeczne. Dzięki tej operacji zminimalizowano wpływ parametrów optycznych aparatu na niedokładność odwzorowania ściany.



Rys. 14. Wykres poziomicy dla wycinka ściany skalnej oraz zaznaczenie na ścianie analizowanego obszaru

Wykorzystując algorytm detekcji spękań opisany w poprzednim rozdziale wyznaczono spękania widoczne na rysunku 15a (w celu poprawnego odwzorowania szczelin dokonano ręcznej korekcyi otrzymanego obrazu spękań). Jest to wynik analizy ściany ze zdjęcia 14b. Rys. 15b przedstawia natomiast otrzymane w wyniku użycia profilometru laserowego dane jako obraz w skali szarości (porównaj Młynarczuk i in. 2001, Młynarczuk 2004). Poprzez nałożenie rys. 15a i 15b otrzymano obraz szczelin w poziomach szarości. Przy czym poziomy szarości odpowiadały współrzędnym Z analizowanych szczeliny. W rezultacie opisanych operacji możliwe było przedstawienie zidentyfikowanych szczelin w postaci wykresów 2D oraz 3D (patrz rys. 16). Dla szczelin tych możliwe było wyznaczenie wybranych parametrów geometrycznych.

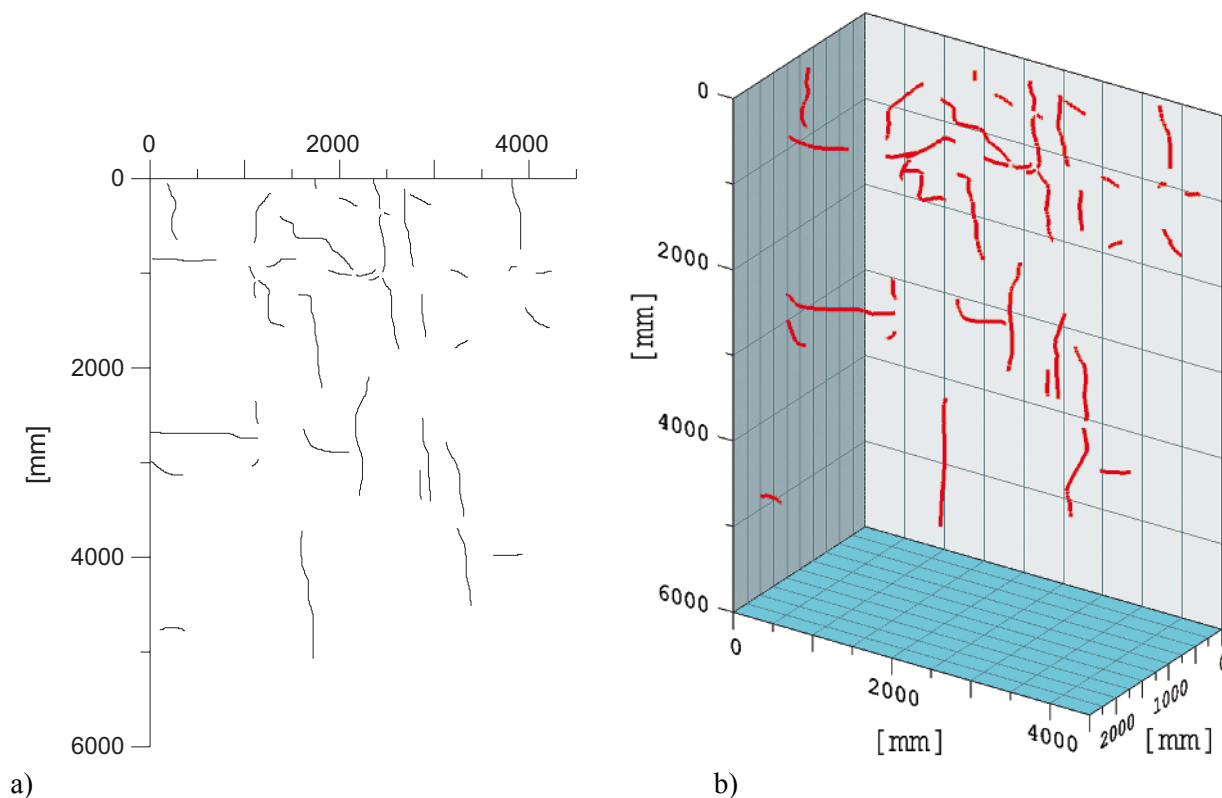


Rys. 15. Obraz spękań zidentyfikowanych na badanej ścianie (a) oraz wyniki pomiarów uzyskanych z profilometrii laserowej przedstawione jako obraz w skali szarości (b)

Tabela 3 zestawia parametr długości szczelin wyznaczonych tylko dla zdjęcia (2D) oraz dla zdjęcia 3D. Widać, że wykorzystanie dodatkowej informacji płynącej z profilometrii laserowej znacznie modyfikuje otrzymywane wyniki. Analizując dane dla pojedynczych linii spękań zauważono, że różnica ich długości pomiędzy wykresami 2D a 3D wahała się w granicach od 0,55% do 68,63%.

Tab. 3. Parametry geometryczne opisujące spękania widoczne na rysunku 16

Ilość linii	Wyznaczone z wykresu 2D		Wyznaczone z wykresu 3D		Różnica procentowa wyników [%]
	suma długości [m]	średnia długość [m]	suma długości [m]	średnia długość [m]	
40	21,37	0,534	24,35	0,609	13,94



Rys. 16. Wykres 2D i 3D sieci spękań widocznych na ścianie skalnej w kamieniołomie w Miękinii

Parametry chropowatości ściany skalnej

Posiadając odwzorowaną powierzchnię ściany skalnej, można wyznaczyć parametry opisujące jej chropowatość oraz morfologię. W IMG PAN zaproponowano w ostatnich latach metodykę pomiarów morfologii przełamów opierającą się na analizie zdjęć powstałych w wyniku przekształcenia macierzy pomiarów (patrz rys. 15b) (Młynarczuk i in., 2001, Młynarczuk, 2004, Młynarczuk i in., 2004).

Przykładowymi parametrami, dla badanej ściany skalnej z kamieniołomu w Miękinii, mogą być wielkości obliczone przy wykorzystaniu informacji o minimach i maksimach lokalnych obrazu. Zostały one zestawione w tabeli 4.

Tab. 4. Przykładowe parametry wyznaczone na podstawie obrazu ekstremów lokalnych

Ilość minimów	Ilość maksimów	Średnia wysokość minimów [mm]	Średnia wysokość maksimów [mm]	$(\max_{sr} - \min_{sr})$ [mm]
38	28	886,3	1282,3	396,0

Analizując obraz z rys 15b można także, bazując na przekształceniach morfologii matematycznej, otrzymać informację o lokalnych różnicach wysokości i lokalnych nachyleniach. Parametry te zestawia tabela 5.

Tab. 5. Średnie różnice wysokości lokalnych ekstremów, oraz średnie nachylenie łączącego je odcinka

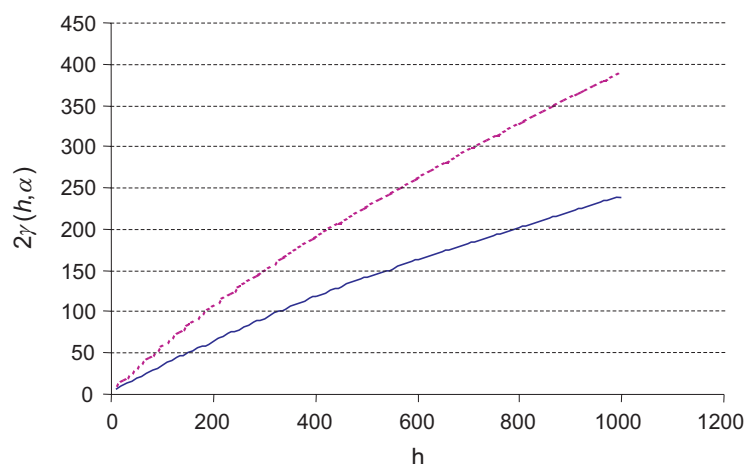
Średnia różnica wysokości ekstremów lokalnych [μm]	Średnia odległość pomiędzy ekstremami lokalnymi [μm]	Średnie nachylenie odcinka łączącego lokalne ekstrema [$^\circ$]
776.6	365,4	30.9

Innym sposobem analizy otrzymanych danych jest wyznaczenie wariogramu. Jest on wyrażony wzorem:

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

gdzie h jest odległością (w kierunku α) pomiędzy dwoma punktami, $Z(x_n)$ oraz $Z(x_n + h)$ wartościami funkcji (poziomów szarości) w tych punktach, a N ilością punktów na analizowanym obrazie.

Wykres z rys. 17 dostarcza informacji na temat morfologii ściany skalnej i zmian jej „głębokości” na dystansie h . Jednoczesne zestawienie wariogramów wyznaczonych dla dwóch osi niesie informację o anizotropii ściany. Z wykresu wynika, że wzdłuż osi Y (linia położona niżej) chropowatość jest mniejsza (różnice głębokości są mniejsze) niż wzdłuż osi X.



Rys. 17. Wariogram obliczony wzdłuż osi X i Y dla badanego wycinka ściany skalnej w kamieniołomie w Miękini

Wnioski

W pracy przedstawiono badania mające na celu opracowanie i zweryfikowanie metod pomiarowych pozwalających na odwzorowanie morfologii ścian skalnych oraz opisanie występujących na nich sieci spękań. W trakcie badań zaproponowano, bazującą na przekształceniach morfologii matematycznej, metodę automatycznego opisu śladów spękań wykorzystującą zorientowane elementy strukturalne. Prowadzi ona do wyznaczenia różny kierunków dla widocznych na ścianach nieciągłości. W pracy przedstawiono również procedurę postępowania prowadzącą do segmentacji spękań. Stopień skomplikowania struktury wymagał jednak, aby działanie algorytmu było nadzorowane i ewentualnie modyfikowane przez obserwatora.

Podczas prac uznano, że do dokładnego opisu sieci spękań niezbędna jest ich analiza w przestrzeni 3D. W tym celu zestawiono stanowisko profilometrii laserowej do badań *in-situ*. Wykorzystano je do prowadzenia pomiarów w kamieniołomach w Czatkowicach oraz w Miękini. Przyczyniło się to do uzyskania trójwymiarowego odwzorowania struktury badanej ściany skalnej. W efekcie można było analizować spękania w przestrzeni 3D. Uzyskane wyniki wskazują, że takie podejście wpłynęło na wyraźną zmianę parametrów geometrycznych analizowanej struktury.

W trakcie badań opisano również chropowatości ścian skalnych przy użyciu parametrów, które zostały zaproponowane w poprzednich latach podczas prac laboratoryjnych.

Otrzymane rezultaty wskazują na potrzebę dalszych badań w tej tematyce. W szczególności należy usprawnić metodę automatycznej segmentacji szczelin oraz przeprowadzić większą ilość pomiarów ścian skalnych przy wykorzystaniu stanowiska do profilometrii laserowej. Dodatkowo, pomiary powinny być prowadzone przy gęstszym kroku pomiarowym – wymaga to jednak modyfikacji aparatury pomiarowej. Realizacja powyższych zamierzeń pozwoli na głębszą analizę parametrów szczelinowatości i chropowatości ścian skalnych badanych *in-situ*.

Podziękowania

Autorzy serdecznie dziękują dr Czesławowi Kotowskiemu, Prezesowi Zarządu Kopalni Wapienia „Czatkowice” Sp. z o.o. w Krzeszowicach za pomoc w realizacji opisywanych pomiarów.

Prace zostały zrealizowane w ramach tematu podstawowego działalności statutowej IMG PAN pt. „Opis szczelinowatości górotworu przy wykorzystaniu metod morfologii matematycznej i analizy obrazu”.

Profilometr laserowy wykorzystywany w badaniach polowych powstał na potrzeby Projektu Badawczego KBN nr 5T12A 035 24 pt. „Profilometria automatyczna do wyrobisk podziemnych, tuneli i kanałów wentylacyjnych w celu określenia pola przekroju poprzecznego”.

Literatura

- Barton N.R., Lien R., Lunde J., 1974: *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*, Rock Mechanics, 6:189-236.
- Bieniawski Z.T., 1974: *Geomechanics classification of rock Masses and its application in tunneling*, Proc. 3rd Congr. Inter. Soc. Rock Mech., Denver, 2A: 27-32.
- Bodziony J., 1993: *Stereology in geosciences: achievements, difficulties and limitations*. Acta Stereologica 12/2; 211-222.
- Chaea B.G., Ichikawab Y., Jeongc G.C., Seod Y.S., Kimb B.C., 2004: *Roughness measurement of rock discontinuities using a confocal laser scanning microscope and the Fourier spectral analysis*, Engineering Geology, 72 (2004), 181-199.
- Chmura K., 1970: *Własności fizykotermiczne skał niektórych polskich zagłębi górniczych*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
- Develi K., Babadagli T., Comllekeci C., 2001: *A new computer-controlled surface-scanning device for measurement of fracture surface roughness*, Computers & Geosciences 27 (2001), 256-277.
- Feng Q., Fardin N., Jing L., Stephansson O., 2003: *A New Method for In-situ Non-contact Roughness Measurement of Large Rock Fracture Surfaces*, Rock Mech. Rock Engng. (2003), 36 (1), 3-25.
- Gałczyński S., 2001: *Podstawy budownictwa podziemnego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- 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.
- Gokhale A., Underwood E., 1990: *A general method for estimation of fracture surface roughness*. Metallurgical Transactions.
- Hobler M., 1977: *Badania fizykomechanicznych właściwości skał*, PWN, Warszawa.
- Isaaks E.H., Srivastava R.M., 1989: *Applied Geostatistics*, Oxford University Press, New York.
- Kabeya K.K., Legge T.F., 1997: *Relationship Between Grain Size and Some Surface Roughness Parameters of Rock Joints*, Int. J. Rock Mech. Sci. vol. 34, no. 3/4, p. 528.
- Liu H.Y., Roquete M., Kou S.Q., Lindqvist P.A., 2004: *Characterization of rock heterogeneity and numerical verification*, Engineering Geology, 72 (2004), 89-119.
- Młynarczuk 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, STERMAT, Wisła 1994.
- Młynarczuk M., 2004: *Możliwości wykorzystania analizy obrazu i morfologii matematycznej do analizy stereologicznej struktur skalnych*, Archives of Mining Sciences, vol. 49, (2004).
- Młynarczuk M., 2005: *Application of Image Analysis and Mathematical Morphology in Petrography*, Przegląd Elektrotechniczny, r. 81, nr 3/2005, s. 20-25.
- 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, t. 3, nr 3-4.
- Młynarczuk M., Ratajczak T., Aksamit J., 2003: *Zastosowanie metod stereologii i analizy obrazu do ilościowego opisu spękań wymuszonych w skałach*, Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Kraków.
- Nowakowski A., Młynarczuk M., Ratajczak T., Gustkiewicz J., 2003: *Wpływ warunków termicznych na zmianę niektórych właściwości fizycznych i strukturalnych wybranych skał*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu. Seria: rozprawy, monografie, nr 5.

- Obara B., Młynarczuk M., 2004: *Wykorzystanie metod analizy obrazu do zautomatyzowania opisu geometrii szczelin śródkrystalicznych występujących w dolomicie z Rędzin* (w:) *Geotechnika i Budownictwo specjalne*, Materiały XXVII Zimowej Szkoły Mechaniki Górniczej.
- Pinińska J., 2003: *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Część IV: Karpaty fliszowe*, Wyd. Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Pinińska J., 2001: *Systemy geologiczno-inżynierskiej oceny skał i masywów skalnych*, Przegląd geologiczny, vol. 49, nr 9.
- Power W.L., Durham W.B., 1997: *Topography of Natural and Artificial Fractures in Granitic Rock: Implication for Studies of Rock Friction and Fluid Migration*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 34, no. 6, p. 979-989.
- Ryncarz T., 1993: *Zarys Fizyki Górniczej*, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
- Serra J., 1982: *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press.
- 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.
- Wang J., 1994: *Morphology and mechanical behaviour of rock joints. Praca doktorska*, Politechnika Śląska, Gliwice
- Wojnar L., 1990: *Fraktologia ilościowa. Podstawy i komputerowe wspomaganie badań. Mechanika*, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, Kraków.

***In-situ* measurements of fractures and roughness of rock walls by means of image analysis and laser profilometry**

Abstract

Examinations *in-situ*, led in quarry of the porphyry in Miękina and quarry of the limestone in Czatkowice were aimed at developing and verifying of the measuring methods letting to mapping the morphology of rock walls and describing their cracks. A stand was juxtaposed to carrying out the profilometry research. The method for fracture detection based on mathematical morphology, were also proposed. Connection of this two measuring methods led to mapping in the computer memory the 3D rock wall structure and let describing the analysed crack in the 3D space. Attempts were made to the rock walls describing by means of roughness parameters which were previously proposed to laboratory examinations of rock samples.

Keywords: rock wall morphology, rock fractures, laser profilometry, image analysis.

Recenzent: doc. dr hab. inż. *Paweł Ligęza*, Instytut Mechaniki Górniczej PAN