*Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN*
Tom 10, nr 1-4, (2008), s. 45-53
© Instytut Mechaniki Górotworu PAN

# Zintegrowanie metod pomiarowych opartych na algorytmach morfologii matematycznej oraz na profilometrii laserowej w celu wyznaczenia korelacji pomiędzy parametrami strukturalno-teksturalnymi skał a geometrią ich przełamów rozdzielczych

Mariusz Młynarczuk

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

**Streszczenie**

Prowadzone badania miały na celu wykazanie czy i w jakim stopniu struktura skały, a szczególnie wielkość jej uziarnienia, wpływa na ukształtowanie jej przełamu rozdzielczego. W ich wyniku otrzymano wysoką korelację pomiędzy wielkościami ziarn wyznaczonymi w poprzez wykonanie automatycznych pomiarów stereologicznych struktur skalnych pod mikroskopem optycznym a niektórymi parametrami wyznaczonymi na przełamach skalnych odwzorowanych przy wykorzystaniu profilomierza laserowego. Dzięki przeprowadzeniu ilościowej analizy przebiegu śladu szczeliny z jej podziałem na część międzykrystaliczną i śródkrystaliczną wykazano, że na niektóre parametry opisujące ukształtowanie przełamu, wpływ ma nie tylko wielkość ziarn skały, ale również sposób pękania tej skały. Prowadzone badania pozwoliły więc stwierdzić, że podczas badania zależności pomiędzy właściwościami skały a ukształtowaniem jej powierzchni przełamu należy brać pod uwagę nie tylko jej cechy strukturalne, ale także jej podatność na pękanie śród- względnie międzykrystaliczne.

**Słowa kluczowe**: przełam skalny, chropowatość powierzchni, morfologia matematyczna

## 1. Wstęp

Radykalny postęp techniczny ostatnich lat doprowadził do pojawienia się na rynku przyrządów mogących odwzorowywać powierzchnię przełamów skalnych z dużą dokładnością a przede wszystkim z dużą szybkością dochodzącą do kilku tysięcy pomiarów na minutę. Można zatem przyjąć, że rozwój techniczny rozwiązuje w znacznej mierze problem czasochłonności pomiarów. Pozostawia natomiast otwartym problem interpretacji olbrzymiej ilości danych pomiarowych. Prowadzone w ostatnich latach w IMG PAN prace wychodzą naprzeciw temu problemowi i proponują wykorzystanie nowej metodyki interpretacji tych wyników (Młynarczuk, 2008b). Podczas prowadzenia tych badań przyjęto hipotezę, że ukształtowanie powierzchni przełamu skalnego zależy od własności strukturalnych i wytrzymałościowych skały. Weryfikacji tego założenia poświęcone są opisywane w niniejszej pracy badania. W swej zasadniczej części koncentrują się one na ilościowej analizie struktur skalnych. Na bazie metod automatycznej analizy obrazu zaproponowano w nich algorytmy pomiaru wielkości śladów ziarn w badanych skałach. Pewną oceną własności wytrzymałościowych skał może być analiza przebiegu pęknięcia rozdzielczego. Praca prezentuje więc również wyniki pomiarów stereologicznych dotyczących śródkrystalicznego względnie międzykrystalicznego przebiegu szczelin w badanych skałach.

## 2. Pomiary ukształtowania powierzchni przełamów

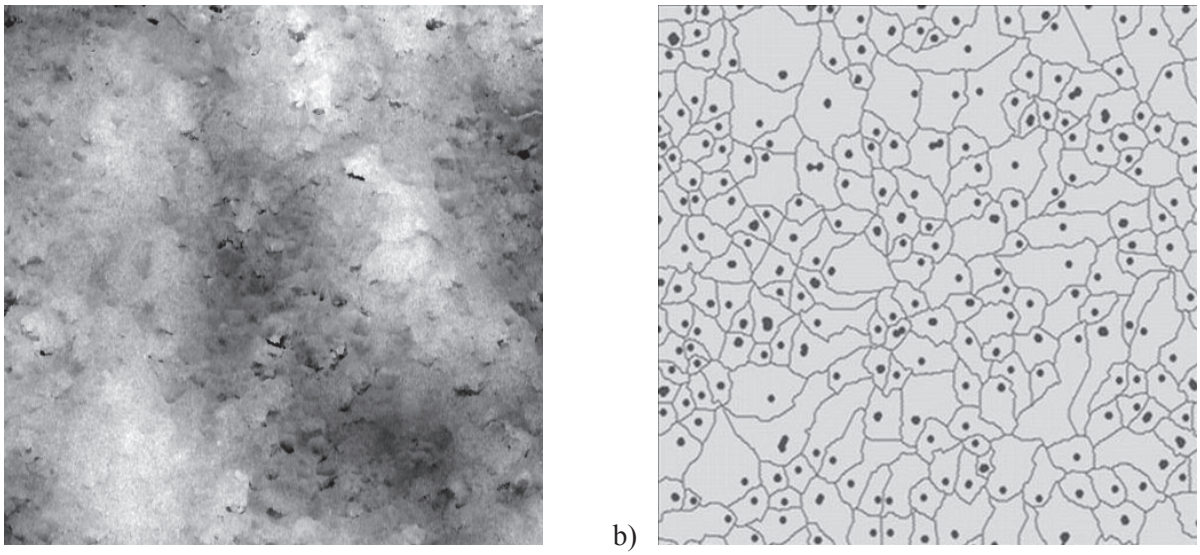
W wyniku pomiaru profilomierzem (np. laserowym) otrzymujemy tabelę współrzędnych XYZ punktów zmierzonych na analizowanej powierzchni obiektu (np. przełamu skalnego). Dane z tej tabeli możemy wizualizować na wiele różnych sposobów. Jednym z nich jest przedstawienie otrzymanych danych w formie *obrazu*. W komputerowej analizie obrazu, obraz rozpatrywany jest jako zbiór pikseli. Każdemu z nich przypisuje się położenie oraz, w przypadku analizy obrazów szarych, pewną wartość zwaną poziomem szarości. Jest on podawany najczęściej przy pomocy liczby całkowitej z przedziału $[G_{min},G_{max}]$. Jeżeli odwzorowanie powierzchni przełamu prowadzone jest na obszarze prostokąta o wymiarach X na Y i odbywa się przy użyciu stałych (niezmiennych w czasie pomiaru) kroków pomiarowych *dx* i *dy* (dla prostoty obliczeń przyjmujemy, że $dx = dy$), to otrzymane rezultaty możemy zapisać w postaci obrazu szarego w taki sposób, że każda dana pomiarowa reprezentowana będzie na obrazie przy użyciu jednego piksela. Jego położenie wynosić będzie $x_c/dx$ w kierunku X oraz $y_c/dy$ w kierunku Y, gdzie: $x_c$ i $y_c$ są zmierzonymi współrzędnymi punktu *c* na przełamie ($0 \le x \le X$; $0 \le y \le Y$). Stopień szarości tego piksela będzie zaś równy wartości $z_c$ zmierzonej dla punktu *c*.

Posiadając tak utworzony obraz jesteśmy w stanie wykorzystać do analizy ukształtowania powierzchni badanego obiektu aparat matematyczny stosowany w metodach analizy obrazu i morfologii matematycznej. Wyniki otrzymane przy zastosowaniu tej metody pomiarowej można znaleźć w pracach Młynarczuka (2004, 2008a, 2008b).

Na potrzeby prezentowanych w niniejszej pracy rozważań wykorzystane zostaną parametry, których otrzymanie wymaga zaprogramowania zaawansowanych i złożonych algorytmów morfologicznych. W rezultacie otrzymuje się jednak informacje, których wyznaczenie jest niezwykle skomplikowane lub wręcz niemożliwe przy standardowej (np. normatywnej) analizie ukształtowania powierzchni przełamu.

Na rysunku 1b zaznaczono maksima lokalne (wyznaczone na bazie przekształceń geodezyjnych zdefiniowanych w morfologii matematycznej – patrz Serra, 1982) oraz, ich *„strefy wpływu" (ang. zones of influence) w*yznaczone przy użyciu przekształcenia linii działów wodnych *(LDW)*. Strefy te w skrócie oznaczać będziemy przez *SW* a ich pole powierzchni przez OSW.

a) b)



Rys. 1. Przykładowy obrazu dolomitu z Rędzin DR1-1 (a) oraz wyznaczone dla niego maksima lokalne (k. czerwony) i ich *SW* (k. brązowy; kolorem zielonym oznaczono minima lokalne (b)

Stosując analogię z ukształtowaniem terenu, można przyjąć, że maksima są szczytami gór a granice *SW* są czymś w rodzaju przełęczy pomiędzy tymi górami. W każdej *SW* istnieje przynajmniej jedno minimum lokalne. Mając informację o maksimach i minimach leżących w granicach *SW* możemy obliczyć ich względną wysokość (HSW), odległość pomiędzy nimi w płaszczyźnie XY (DSW), oraz nachylenie łączącego je odcinka (KSW). Nachylenie to możemy z pewnym przybliżeniem traktować jako lokalne nachylenie zbocza w analizowanej SW.

Te cztery parametry zazwyczaj podawane będą jako wielkości uśrednione w ramach jednego pola pomiarowego. Będziemy je oznaczać jako: $\overline{OSW}$, $\overline{HSW}$, $\overline{DSW}$ oraz $\overline{KSW}$.

W tabeli 1 zestawiono powyższe parametry uśrednione dla 10 pól pomiarowych na zmierzonych na wybranych skałach: dolomicie z Rędzin (DR), dolomicie z Laskowej Góry (DLG), piaskowcu z Tumlina (PT) oraz kwarcycie z Wiśniówki (KW).

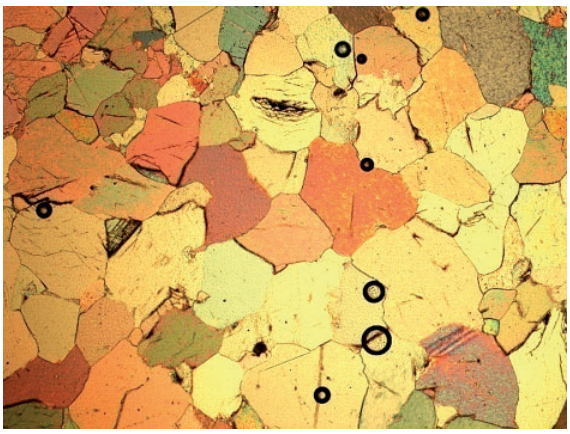
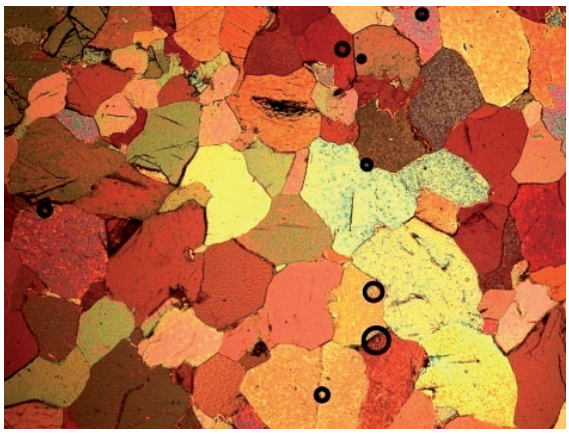
Tab. 1. Wartości średnie z 10 pól pomiarowych każdej z badanych skał dla parametrów otrzymanych w wyniku działania proponowanego algorytmu

| Nazwa skały | $\overline{OSW}$ | | $\overline{HSW}$ | | $\overline{DSW}$ | | $\overline{KSW}$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | średnie [mm$^2$] | CV [%] | średnie [mm] | CV [%] | średnie [mm] | CV [%] | średnie [stopnie] | CV [%] |
| DLG | 0,096 | 8,1 | 0,107 | 9,9 | 0,327 | 3,8 | 17,3 | 9,4 |
| KW | 0,042 | 4,7 | 0,086 | 15,7 | 0,185 | 4,9 | 26,3 | 12,9 |
| DR | 0,063 | 7,8 | 0,123 | 10,0 | 0,236 | 6,9 | 29,7 | 9,8 |
| PT | 0,060 | 3,5 | 0,151 | 5,3 | 0,233 | 3,8 | 34,4 | 3,1 |

## 3. Segmentacja obrazów mikroskopowych badanych skał

W badaniach weryfikowano hipotezę, że parametry opisujące ukształtowanie powierzchni przełamu skalnego są związane z właściwościami strukturo-teksturalnymi badanych skał. Jednym z podstawowych parametrów tego typu jest niewątpliwie wielkość śladów ziarn obserwowanych pod mikroskopami. W tym celu wykorzystano metody analizy obrazu i morfologii matematycznej. Do obserwacji szlifów cienkich wykonanych z próbek skalnych oraz do rejestracji ich obrazów użyto polaryzacyjnego mikroskopu optycznego Axioplan firmy Zeiss.

Celem analizy skał był pomiar wielkości śladów ziarn, co de facto sprowadzało się do detekcji ich granic. Stwierdzono, że pojedyncze obrazy często niosą zbyt mało informacji do przeprowadzenia poprawnej segmentacji. Zaobserwowano jednakże, że dodatkowe informacje o przebiegu granic ziarn można uzyskać dzięki rejestracji serii obrazów tego samego pola, rejestrowanych przy różnych kątach położenia polaryzatorów (patrz rys. 2).

a)  b) 

Rys. 2. Obrazy przykładowego pola zarejestrowanego na Dolomicie z Rędzin przy różnych kątach skrzyżowania polaryzatorów (pow. 100× , xN)

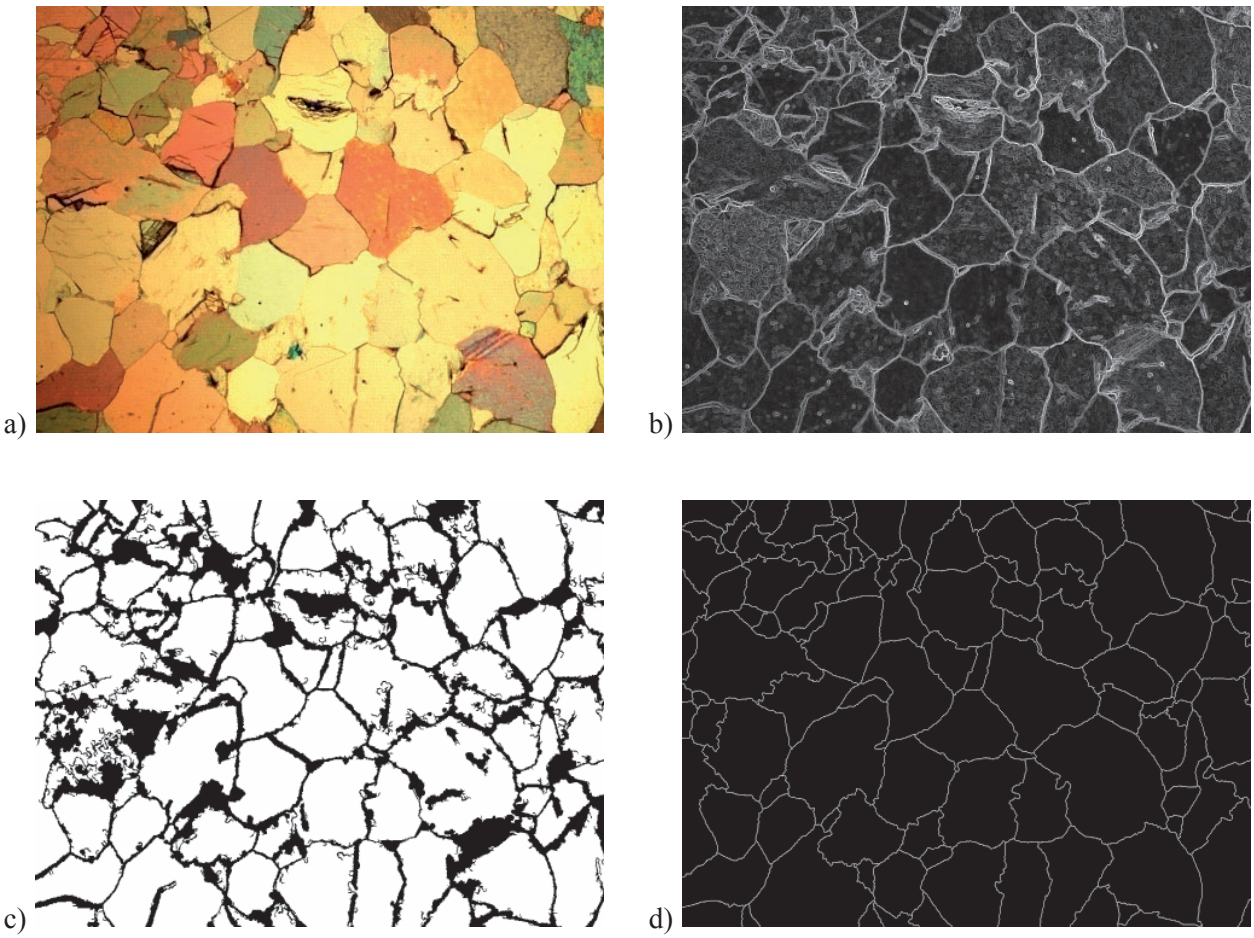
Ogląd szlifów pokazuje, że posiadają one dużą ilość „szumu pomiarowego". Pod pojęciem „szumu pomiarowego" (lub „szumu stereologicznego") rozumiemy wszystkie te fragmenty struktury, które są niepożądane z punktu widzenia prowadzonej analizy, a przede wszystkim w znaczący sposób analizę tę utrudniają. Na rysunku 2 są nimi przede wszystkim ciemne, okrągłe obiekty (bańki powietrza na szlifie cienkim), oraz w mniejszym stopniu drobne, czarne wtrącenia obserwowane na ziarnach. Algorytm minimalizacji szumu

pomiarowego bazuje na spostrzeżeniu, że niepożądane wtrącenia są wyraźnie ciemniejsze od analizowanej struktury. Po przekształceniu obrazów kolorowych na składowe RGB wykonujemy filtrację składowych przy użyciu filtru przemiennego wykorzystującego rekonstrukcję o rozmiarze 1. Następnie tworzymy obraz zdefiniowany jako maksimum ze składowych RGB z wszystkich obrazów tego samego pola. Na obrazie tym ciemne zanieczyszczenia stają się dobrze widoczne. Następnie przeprowadzamy operację zamykania otworów oraz przeprowadzamy procedurę binaryzacji przy progach od 0 do 100. W związku z tym, że na niektórych obrazach granice ziarn przyjmują również ciemne barwy, przeprowadzamy serię filtracji w celu ich wyeliminowania z obrazów (otwarciem przez rekonstrukcję o rozmiarze 4). Tak otrzymany obraz binarny stanowi maskę, określającą, które obszary uznać należy za zanieczyszczenia i je usunąć. W ich miejsce przeprowadzana jest dylatacja geodezyjna, której efektem jest obraz pozbawiony szumów pomiarowych (rys. 3a).

Uznano, że zasadniczy algorytm segmentacji ziarn dolomitu powinien bazować na przekształceniu linii działów wodnych (LDW). Idea algorytmu wykorzystującego to przekształcenie polega na tym, że obraz wejściowy, bądź serię obrazów wejściowych, przekształca się w taki sposób, aby w rezultacie otrzymać dwa obrazy: *obraz maski* oraz *obraz znaczników*. Następnie, na tych obrazach wykonywane jest przekształcenie LDW.

W przypadku struktury dolomitu z Rędzin stosunkowo prosto jest otrzymać obraz maski. Powstaje on jako maksimum z gradientów morfologicznych składowych RGB każdego z 6 obrazów tego samego pola (rys. 3b). Zdecydowanie trudniej jest uzyskać poprawny obraz znaczników (markerów).

Analiza dolomitu z Rędzin była tematem prac opisywanych m.in. w pracach Młynarczuka (1998; 2005). Zaproponowano tam algorytm tworzenia obrazu znaczników bazujący na otrzymaniu z maski obrazu przesegmentowanego, utworzeniu na jego podstawie obrazu mozaikowego, a następnie analizie zmienności barwy sąsiadujących ze sobą obiektów w celu ich ewentualnego połączenia. W opisywanych badaniach udało




Rys. 3. Wynik działania algorytmu usuwania „owalnych zanieczyszczeń stanowiący jeden z 6 obrazów wejściowych do analizy pojedynczego pola dolomitu z Rędzin (a), obraz maski (b), obraz znaczników (c), oraz wynik przekształcenia LDW – końcowy rezultat segmentacji ziarn dolomitu z Rędzin (d)

się zaproponować inny, prostszy w realizacji algorytm, który wydaje się dawać lepsze rezultaty. Otrzymany wcześniej obraz maski zostaje przefiltrowany filtrem przemiennym wykorzystującym rekonstrukcję o rozmiarze 3. Następnie wyznaczane są rozszerzone minima przy wykorzystaniu dynamiki poziomów szarości (dla wartości dynamiki poziomów szarości DPS = 15). Otrzymane minima są filtrowane otwarciem przez rekonstrukcję o rozmiarze 6 (OPR = 6). Tak otrzymany obraz (rys. 3c) jest obrazem znaczników do przekształcenia LDW. Wynik tego przekształcenia zaprezentowano na rysunku 3d.

Dostosowując parametry DPS i OPR opisana metoda może być z powodzeniem wykorzystywana do analizy pozostałych skał wykorzystywanych w badaniach, czyli kwarcytu z Wiśniówki (przy założeniu, że skałę tą traktuje się jako monomineralną), dolomitu z Laskowej Góry oraz piaskowca z Tumlina. Przy czym w tej ostatniej skale opisany algorytm uzupełniony został o procedurę wydzielenia lepiszcza na bazie analizy składowej S przestrzeni kolorów HLS obrazu rejestrowanego przy jednym polaryzatorze.

W celu przeprowadzenia analizy automatycznej wykonano po dwa szlify cienkie dla każdej z badanych skał. Wykonano je na materiale pochodzącym z dwóch próbek losowo wybranych z ogólnej liczby około dwudziestu przygotowanych do badań wytrzymałościowych. Na każdym ze szlifów wyselekcjonowano po 9 równomiernie rozmieszczonych pól pomiarowych. Zarejestrowano na nich serię 6 obrazów dla różnych kątów skrzyżowania polaryzatorów (plus, w przypadku piaskowca z Tumlina, obraz przy jednym polaryzatorze). Były one punktem wyjścia do opisanej wcześniej automatycznej analizy obrazu. Wyniki pomiarów średniej długości cięciw, średniej wielkości śladów ziarn oraz średniej powierzchni właściwej zamieszczono w tabeli 2.

Tab. 2. Parametry wyznaczone w analizie automatycznej szlifów cienkich dolomitu z Laskowej Góry, dolomitu z Rędzin, kwarcytu z Wiśniówki oraz piaskowca z Tumlina

| | średnia wielkość cięciwy [mm] | średnie pole powierzchni śladów ziarn [$mm^2$] | powierzchnia właściwa [$mm^{-1}$] |
|---|---|---|---|
| DLG 1 | 0,162 | 0,0524 | 0,026 |
| DLG 2 | 0,165 | 0,0535 | 0,025 |
| DR 1 | 0,088 | 0,0158 | 0,045 |
| DR 2 | 0,086 | 0,0156 | 0,046 |
| KW 1 | 0,060 | 0,0075 | 0,070 |
| KW 2 | 0,068 | 0,0099 | 0,062 |
| PT 1 | 0,102 | 0.0234 | 0,412 |
| PT2 | 0,098 | 0,0230 | 0,412 |

## 4. Korelacja pomiędzy parametrami wyznaczonymi z analizy stereologicznej a parametrami wyznaczonymi z analizy powierzchni przełamu

Wyznaczono korelacje pomiędzy wartościami parametrów otrzymanych z automatycznej analizy szlifów cienkich oraz wyznaczonych z analizy powierzchni przełamu przy użyciu profilomierza laserowego. Parametrami tymi są:

- parametry wyznaczone w analizie automatycznej i opisane wcześniej w tabeli 2:
  - średnia wielkość cięciwy,
  - średnie pole powierzchni śladów ziarn,
  - średnia powierzchnia właściwa,
- parametry wyznaczone przy wykorzystaniu algorytmu opisu lokalnych parametrów ukształtowania powierzchni przełamu (zestawione wcześniej w tabeli 1):
  - śr. wielkość „strefy wpływu" średnie $\overline{OSW}$),
  - śr. różnica wysokości (średnie $\overline{HSW}$),
  - śr. odległość w płaszczyźnie XY pomiędzy ekstremami (średnie $\overline{DSW}$),
  - średni kąt nachylenia (średnie $\overline{KSW}$),

Wartości tych parametrów umieszczono w tabeli 3. Wyznaczano współczynnik korelacji Pearsona, którego wartości zostały zestawione w tabeli 4.

Tab. 3. Wybrane parametry wyznaczone w rezultacie analizy ilościowej ziarn (parametry oznaczone A, B, C) oraz analizy ukształtowania powierzchni (parametry oznaczone I-VII)

| Ozn. | Parametr | KW | DR | PT | DLG |
|---|---|---|---|---|---|
| *A* | *średnia wielkość cięciwy* [mm] | *0,064* | *0,088* | *0,100* | *0,164* |
| *B* | *średnie pole powierzchni ziarn* [mm$^2$] | *0,009* | *0,016* | *0,023* | *0,053* |
| *C* | *średnia powierzchnia właściwa* [1/mm] | *0,066* | *0,046* | *0,041* | *0,026* |
| I | średnie $\overline{OSW}$ [mm$^2$] | 0,042 | 0,063 | 0,060 | 0,096 |
| II | średnie $\overline{HSW}$ [mm] | 0,086 | 0,123 | 0,151 | 0,107 |
| III | średnie $\overline{DSW}$ [mm] | 0,185 | 0,236 | 0,233 | 0,327 |
| IV | średnie $\overline{KSW}$ [stopnie] | 26,3 | 29,7 | 34,4 | 17,3 |

Tab. 4. Współczynniki korelacji pomiędzy parametrami wyznaczonymi z analizy ilościowej (ozn. A, B, C) oraz parametrami wyznaczonymi z analizy ukształtowania powierzchni przełamów (ozn. I-VII)

| | średnie $\overline{OSW}$ | średnie $\overline{HSW}$ | średnie $\overline{DSW}$ | średnie $\overline{KSW}$ |
|---|---|---|---|---|
| *średnia wielkość cięciwy* | 0,98 | 0,12 | 0,99 | -0,68 |
| *średnie pole powierzchni śladów ziarn* | 0,97 | 0,00 | 0,98 | -0,76 |
| *średnia powierzchnia właściwa* | -0,94 | -0,44 | -0,95 | 0,40 |

Otrzymane rezultaty wskazują, że parametr średniej wielkości „strefy wpływu" (średnie $\overline{OSW}$) wyznaczonej na analizowanych przełamach przy wykorzystaniu przekształcenia LDW jest bardzo wyraźnie skorelowany z parametrami stereologicznymi opisującymi wielkości ziarn.

Analizując wyniki można stwierdzić, że istnieje też wyraźna korelacja pomiędzy średnią odległością pomiędzy lokalnymi ekstremami – $\overline{DSW}$ a polem powierzchni śladów ziarn wyznaczonym z analizy stereologicznej. Jest to wynik o tyle spodziewany, że parametr $\overline{DSW}$ jest silnie skorelowany (0,99) z $\overline{OSW}$, gdyż lokalne maksimum znajduje się zazwyczaj w centrum SW, a minimum na jej obrzeżach.

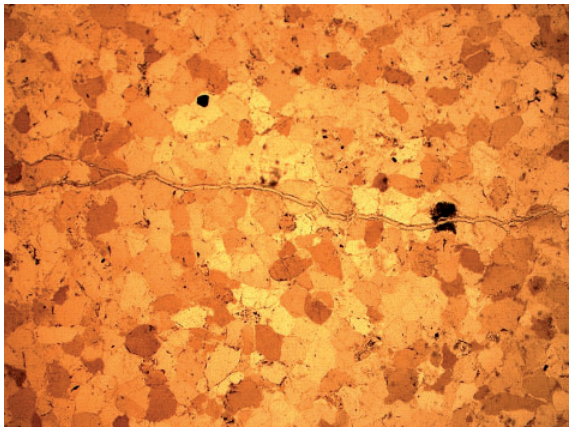
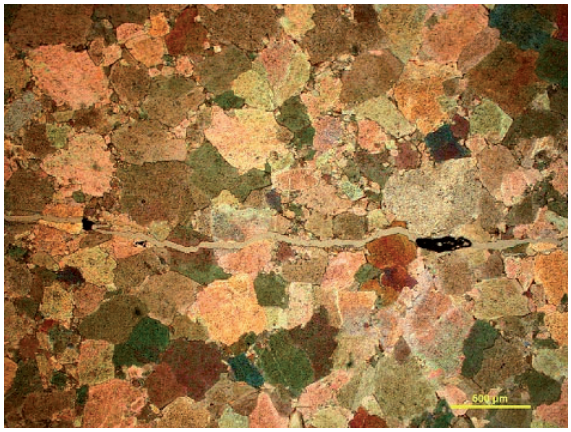
Nie stwierdzono natomiast wyraźnej korelacji pomiędzy wielkością ziarn a średnią $\overline{HSW}$. Sądzimy, że na otrzymany wynik ma wpływ rodzaj pękania ziarn sąsiadujących ze szczeliną. Niektóre ziarna pękają w sposób śródkrystaliczny, co wpływa na zaniżenie różnicy wysokości obserwowanych na SW w stosunku do takiej hipotetycznej sytuacji, gdyby ziarna te były nienaruszone. Problemowi temu poświęcony będzie następny rozdział.

## 5. Opis przebiegu pęknięcia rozdzielczego

Dotychczas zaprezentowano powiązanie parametrów opisujących ukształtowanie przełamu skalnego z cechami strukturalnymi skał, a w szczególności z wielkością śladów ziarn badanych skał. Na podstawie tych badań okazało się m.in., że korelacja pomiędzy parametrami opisującymi wielkość śladów ziarn skały z parametrem lokalnych *różnic wysokości* ($\overline{HSW}$) nie istnieje. Wydaje się jednak, że na parametr ten powinien być powiązany z ukształtowaniem śladu szczeliny a w szczególności z tym, czy propaguje ona po stykach ziarn (i pozostawia ziarna nienaruszone), czy powoduje ich rozłupanie (i w efekcie spłaszczenie powierzchni pęknięcia). Dlatego też zbadany został przebieg szczeliny ze szczególnym uwzględnieniem jej przejścia przez ziarna (pęknięcie śródkrystaliczne) lub wokół nich (pęknięcia międzykrystaliczne).

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykładowe zdjęcia przebiegu pęknięcia na szlifach cienkich analizowanych skał. Ogląd zdjęć pozwala na wyciągnięcie kilku wniosków natury jakościowej. Na strukturze kwarcytu z Wiśniówki widać, że ziarna często wymuszają ich obejście w postaci pęknięcia międzykrystalicznego, co wpływa na zmianę biegu szczeliny a w konsekwencji na kształt profilu. Jednakże ziarna tej skały są mniejsze niż w dolomitach z Laskowej Góry i Rędzin oraz piaskowcu z Tumlina, dlatego ścieżka przebiegu pęknięcia jest mniej rozwinięta.

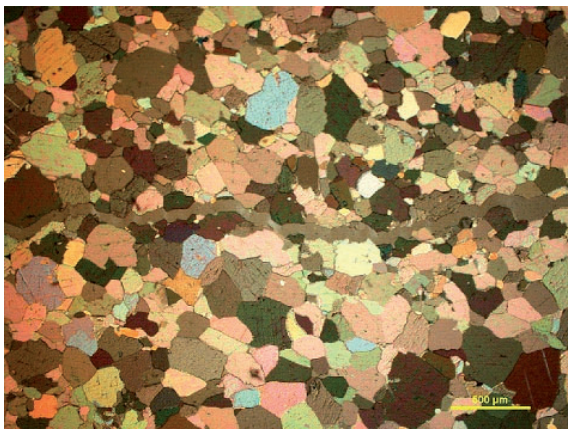
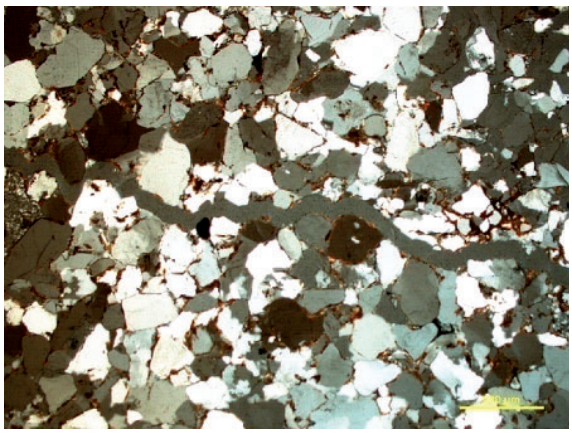
Dolomit z Laskowej Góry jest skałą różnoziarnista, aczkolwiek na obserwowanych preparatach występują przeważnie duże ziarna. Obserwacje wskazują, że szczelina przeważnie przybiera charakter śródkrystaliczny, natomiast pęknięcia międzykrystaliczne, powodujące zmianę kierunku przebiegu szczeliny występują stosunkowo rzadko, ponadto szczelina przyjmuje postać prostych odcinków lub jest słabo tylko urozmaicona.

a)  b) 

Rys. 4. Przebieg szczeliny rozdzielczej widoczny na szlifie cienkim kwarcytu z Wiśniówki (a) oraz dolomitu z Laskowej Góry (b). Pow. 50× polaryzatory skrzyżowane

W przypadku dolomitu z Rędzin szczelina, podobnie jak w kwarcycie z Wiśniówki, biegnie często w sposób międzykrystaliczny. Jednakże zdecydowanie większe ziarna dolomitu z Rędzin niż kwarcytu z Wiśniówki powodują, że profil pęknięcia jest zdecydowanie bardziej urozmaicony.

Dla ostatniej badanej skały, piaskowca z Tumlina, szczelina często biegnie poprzez spoiwo, które jest słabszym składnikiem skały. Powoduje to w konsekwencji dużą ilość pęknięć natury międzykrystalicznej, co w powiązaniu z dużymi wymiarami ziarn kwarcu tego piaskowca, prowadzi do bardzo urozmaiconego kształtu szczeliny.

a)  b) 

Rys. 5. Przebieg szczeliny rozdzielczej widoczny na szlifie cienkim dolmitu z Rędzin (a) oraz piaskowca z Tumlina. Pow. 50× polaryzatory skrzyżowane

W celu ilościowej weryfikacji opisanych powyżej spostrzeżeń postanowiono przeprowadzić analizę stereologiczną bazując na badaniach opisanych w pracach Bodzionego (1994) oraz Bodzionego i in. (1993), który na bazie analizy stereologicznej definiuje bezwymiarowe ilorazy charakteryzujące rozdział rzutu powierzchni przełamu na części biegnące w sposób śródkrystaliczny $\lambda_s$, względnie międzykrystaliczny $\lambda_m$.

Analizę stereologiczną wykonano na szlifach cienkich uzyskanych po złożeniu dwóch części przełamu rozdzielczego. Wykorzystywano próbki, które zostały uprzednio zmierzone przy użyciu profilomierza laserowego. Pomiary wykonywano przy użyciu stereologicznej analizy liniowej. Linie pomiarowe były od siebie odległe o $d = 0{,}25$ mm. Ilość linii pomiarowych, dla których wyznaczano przecięcie ze śladem szczeliny była różna i zależna od wielkości szlifu. Wahała się ona od 110 do 170. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 5.

Tab. 5. Rozdział rzutu powierzchni przełamów wybranych skał na części pochodzące z pękania międzykrystalicznego i części pochodzące z pękania śródkrystalicznego

| Nazwa skały | Pękanie międzykrystaliczne $\lambda_m$ | Pękanie śródkrystaliczne $\lambda_s$ |
|---|---|---|
| kwarcyt z Wiśniówki | 0,45 | 0,55 |
| dolomit z Laskowej Góry | 0,20 | 0,80 |
| dolomit z Rędzin | 0,45 | 0,55 |
| piaskowiec z Tumlina | 0,73 | 0,26 |

Zwraca uwagę bardzo duża ilość spękań typu śródkrystalicznego dla dolomitu z Laskowej Góry. Skała ta ma stosunkowo duże ziarna, jednak proponowane uprzednio parametry opisu ukształtowania powierzchni nie odzwierciedlają tego faktu. Jest to zapewne związane z dużą ilością spękań śródkrystalicznych i z faktem, że w wyniku takiego pękania szczelina rozdzielcza przybiera formę prostych odcinków. W przeciwny sposób zachowuje się natomiast szczelina w piaskowcu z Tumlina. Duża ilość spękań międzykrystalicznych mówi o tym, że szczelina „omija" ziarna kwarcu. Jeżeli przyjmiemy, że na profil pęknięcia ma wpływ zarówno wielkość ziarn jak i rodzaj pęknięcia (tzn. duże ziarna wpływają na „urozmaicony" profil szczeliny natomiast pęknięcie śródkrystaliczne go „wygładza") to możemy zbadać zależność pomiędzy tymi parametrami a lokalną różnicą wysokości $\overline{HSW}$ lub lokalnymi kątami nachylenia $\overline{KSW}$ wyznaczonymi z analizy ukształtowania powierzchni (parametry te zestawiono w tabeli 6).

Tab. 6. Zestawienie wybranych parametrów pochodzących z analiz stereologicznych oraz z pomiaru ukształtowania przełamu

| Nazwa skały | $\lambda_m$ | średnia wielkość ziarn [mm$^2$] | średnie $\overline{HSW}$ [mm] | średnie $\overline{KSW}$ [°] |
|---|---|---|---|---|
| KW | 0,45 | 0,009 | 0,086 | 26,3 |
| DR | 0,45 | 0,016 | 0,123 | 29,7 |
| PT | 0,73 | 0,020 | 0,151 | 34,4 |
| DLG | 0,20 | 0,053 | 0,107 | 17,3 |

Obliczony został współczynnik korelacji wielorakiej. Wynikiem tej korelacji jest określenie zależności jednej zmiennej zależnej od zespołu kilku (w opisywanym przypadku dwóch) zmiennych niezależnych. Współczynnik korelacji wielorakiej pomiędzy zmienną zależną: średnią różnicą wysokości na obszarach wyznaczonymi przez LDW (średnie $\overline{HSW}$) a zmiennymi niezależnymi: $\lambda_m$ oraz średnią wielkością śladów ziarn wynosi 0,89, natomiast współczynnik ten wyznaczony pomiędzy zmienną zależną: średnim kątem nachylenia na obszarach wyznaczonymi przez LDW (średnie $\overline{KSW}$) a zmiennymi niezależnymi: $\lambda_m$ oraz średnią wielkością śladów ziarn wynosi 0,97. Otrzymane wyniki świadczą o istotnym wpływie, jaki rodzaj pęknięcia wywiera na parametry ukształtowania przełamu.

## 6. Podsumowanie

W pracy zaproponowano algorytm automatycznej analizy obrazu prowadzący do segmentacji ziarn w skałach monokrystalicznych (na przykładzie dolomitu z Rędzin). Wykazano, że po zmianie dwóch parametrów powyższego algorytmu może on służyć także do analizy innych skał monokrystalicznych, takich jak dolomit z Laskowej Góry i kwarcyt z Wiśniówki a po wzbogaceniu go o procedury detekcji lepiszcza można nim analizować piaskowiec z Tumlina. Przeanalizowano korelację pomiędzy wynikami otrzymanymi z analizy ilościowej szlifów cienkich z parametrami otrzymanymi w wyniku analizy powierzchni przełamów. Wykazano, że parametr średniego pola powierzchni „strefy wpływu" wyznaczony na analizowanych przełamach jest skorelowany na poziomie 0,97 z parametrem opisującym pole powierzchni ziarn wyznaczonym na szlifie cienkim. Nie otrzymano wyraźnej korelacji pomiędzy wielkością ziarn a średnią różnicą wysokości pomiędzy lokalnymi ekstremami powierzchni przełamu. Uznano, że może to być wpływ pękania ziarn, co w efekcie prowadzić może do zmniejszenia różnic wysokości na analizowanych przełamach. W celu weryfikacji tej hipotezy dokonano jakościowego i ilościowego opis przebiegu szczeliny ze szczególnym uwzględnieniem fragmentów biegnących w sposób śródkrystaliczny ewentualnie międzykrystaliczny. Otrzymane w wyniku badań stereologicznych rezultaty świadczą, że przebieg szczeliny jest zróżnicowany dla poszczególnych

skał. Otrzymano wysoką korelację wieloraką pomiędzy średnią różnicą wysokości a sposobem przebiegu szczeliny (śródkrystalicznie lub międzykrystalicznie) i średnią wielkością ziarn (0,89), a także pomiędzy średnim kątem nachylenia a sposobem przebiegu szczeliny i średnią wielkością ziarn (0,97). Reasumując można stwierdzić, że podczas badania zależności pomiędzy właściwościami skały a ukształtowaniem jej powierzchni przełamu należy brać pod uwagę nie tylko jej cechy strukturalne, ale także jej podatność na pękanie śród- względnie międzykrystaliczne.

Praca została wykonana w roku 2008 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## 7. Literatura

Bodziony J., 1993: *Stereology in Geosciences: Achivements, Difficulties and Limitations*, Acta Stereologica, 12, 2, p. 211-222.

Bodziony J., 1994: *Geometria międzykrystalicznego względnie śródkrystalicznego pękania skał*, Sprawozdanie z Projektu Badawczego KBN, niepubl.

Młynarczuk M., 1998: *Opis wybranych struktur skalnych przy użyciu metod morfologii matematycznej i analizy obrazu*, IMG PAN – praca doktorska, niepubl.

Młynarczuk M., 2004: *Możliwości wykorzystania analizy obrazu i morfologii matematycznej do analizy stereologicznej struktur skalnych*, Archives of Mining Sciences, vol. 49.

Młynarczuk M., 2005: *Application of Image Analysis and Mathematical Morphology in Petrography*, Przegląd Elektrotechniczny, r. 81, nr 3, s. 20-25.

Młynarczuk M., 2008a: *Zastosowanie analizy obrazu do opisu ukształtowania powierzchni przełamów skalnych*, Górnictwo i Geoinżynieria, r. 32, z. 1, s. 215-258.

Młynarczuk M., 2008b: *Zastosowanie metod analizy obrazu i morfologii matematycznej do ilościowego opisu ukształtowania powierzchni przełamów skalnych*, Archiwum Górnictwa. Monografie, nr 3.

Serra J., 1982: *Image analysis and mathematical morphology*, Academic Press.

### Integrating of the measuring methods based on the mathematical morphology and on laser profilometry in order to setting the correlation among structural parameters of rocks and the their surface fracture geometry

**Abstract**

The presented investigations was aimed at describing the relationship between the structure of the rock, and particularly the size of crystals, and the configuration of the rock surface fracture. The high correlation was received among the crystal sizes obtained from the automatic image analysis and some parameters obtained from surface fracture analysis by means of the laser profilometer. The quantitative analysis of the crack path near the crystals had been performed too. The investigations showed dependence among the structural proprieties of the rock and the geometry of the surface fracture. It was displayed that the surface fracture also depends from the rock susceptibility to inter- or through crystals cracking.

**Keywords:** rock fracture, roughness, mathematical morphology

Recenzent: Prof. dr hab. inż. *Stanisław Wasilewski*, Instytut Mechaniki Górotworu PAN