

Andrzej NOWAKOWSKI¹, Mariusz MŁYNARCZUK², Libor SITEK³, Josef FOLDYNA⁴

**WYTRZYMAŁOŚĆ SKAŁY NA ROZCIĄGANIE – PORÓWNANIE WYNIKÓW
TESTU BEZPOŚREDNIEGO ROZCIĄGANIA I TESTU BRAZYLIJSKIEGO**

**TENSILE STRENGTH OF ROCK – COMPARISON OF RESULTS OF DIRECT
TENSION TEST AND BRAZILIAN TEST**

Streszczenie

Artykuł zawiera porównanie wyników badań laboratoryjnych wytrzymałości skały na rozciąganie przeprowadzonych dwiema metodami: testem prostego jednoosiowego rozciągania i testem brazylijskim. Analizowano wartość granicy wytrzymałości na rozciąganie R_R oraz kształt powierzchni przełamów. Pokazano, że wartość R_R uzyskana w teście brazylijskim jest średnio dwukrotnie wyższa niż wartość uzyskana w teście prostego rozciągania i przedyskutowano przyczyny tego zjawiska.

Badania ukształtowania powierzchni przełamów wykazały, że morfologia przełamu próbki uzyskanego w wyniku testu prostego rozciągania nie różni się istotnie od morfologii będącej wynikiem testu brazylijskiego. Na tej podstawie przyjęto, że stan naprężenia w przekroju, w którym powstaje przełam, można uznać dla obu tych testów za identyczny. Uznano zatem, że różnice ilościowe w uzyskanych wartościach R_R są konsekwencją większej wrażliwości testu prostego jednoosiowego rozciągania na ewentualne błędy metodyczne. Z tego względu sugeruje się, że właściwszym testem do oznaczania wartości R_R jest jednak test brazylijski.

Abstract

Paper compares the results of laboratory tests on tensile strength of rocks carried out using two methods: a simple uniaxial tensile test and Brazilian test. Value of the tensile strength R_R and shape of the fracture surface are analyzed. It is shown that the

¹ dr. inż. Andrzej Nowakowski, Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk, Zakład Mechaniki Skał, Pracownia Odształceń Skał, ul. Reymonta 27, 30-059

Kraków, Polska, tel. (+48)(12) 637-62-00, e-mail: nowakow@img-pan.krakow.pl

² dr inż. Mariusz Młynarczuk, Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk, Zakład Mechaniki Skał, Pracownia Mikromerytyki, ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków,

Polska, tel. (+48)(12) 637-62-00, e-mail: mlynar@img-pan.krakow.pl

³ Ing. Libor Sitek, Ph.D., Ústav geoniky AVČR, v. v. i., Oddělení desintegrace materiálů, Studentská 1768, 708 00 Ostrava-Poruba, tel. +420 596 979 111, e-mail:

libor.sitek@ugn.cas.cz

⁴ Ing. Josef Foldyna, CSc., Ústav geoniky AVČR, v. v. i., Oddělení desintegrace materiálů, Studentská 1768, 708 00 Ostrava-Poruba, tel. +420 596 979 111, e-mail:

josef.foldyna@ugn.cas.cz

value of R_R obtained in the Brazilian test is twice the value obtained in a simple tensile test in average. Reasons for this phenomenon are discussed.

Research of fracture surface topography has shown that the samples fracture morphology obtained by a simple tensile test does not differ significantly from the morphology resulting from the Brazilian test. This suggests that the stress state in cross section, in which the fracture originates, is the same for both of these tests. Therefore the quantitative differences in R_R values obtained are due to greater sensitivity of simple uniaxial tensile test to methodological errors. Therefore, the Brazilian test is suggested as a more appropriate test for determining the value of R_R .

Wstęp

Jedną z ważniejszych właściwości skały jest jej wytrzymałość na rozciąganie (por. Franklin, 1989). Znajomość tej właściwości jest niezbędna w wielu zagadnieniach geotechnicznych, związanych na przykład z wierceniem skał, ich rozsadzaniem czy też oceną stateczności wyrobisk podziemnych. Generalnie jest ona istotna wszędzie tam, gdzie mamy do czynienia z rozrywaniem, rozłupywaniem czy nawet zginaniem skały.

Wielkością, której używamy ilościowego opisu wytrzymałości skały na rozciąganie jest tzw. granica wytrzymałości skały na rozciąganie R_R , przez którą rozumie się maksymalne naprężenie rozciągające, jakie przeniesie może próbka skalna podczas odpowiedniego testu laboratoryjnego. Eksperymenty, na podstawie których oznaczyć można wartość wielkości R_R , podzielić można na dwie grupy (Vutukuri i in., 1974, str. 87-140):

- ❑ metody bezpośrednie, podobne do stosowanych w testach rozciągania metali czy też polimerów,
- ❑ metody pośrednie, bazujące najczęściej na testach zginania lub ściskania próbek o różnym kształcie.

Przedmiotem niniejszej pracy jest porównanie wyników testów próbek skał przebadanych metodą bezpośrednią tzw. testem bezpośredniego jednoosiowego rozciągania oraz metodą pośrednią, tzw. testem brazylijskim. Porównywano nie tylko wartości granicy wytrzymałości na rozciąganie uzyskanych dla próbek tych samych skał w różnych testach, ale także wartości pewnych parametrów geometrycznych charakteryzujących powierzchnie przełamów badanych próbek.

Test bezpośredniego jednoosiowego rozciągania

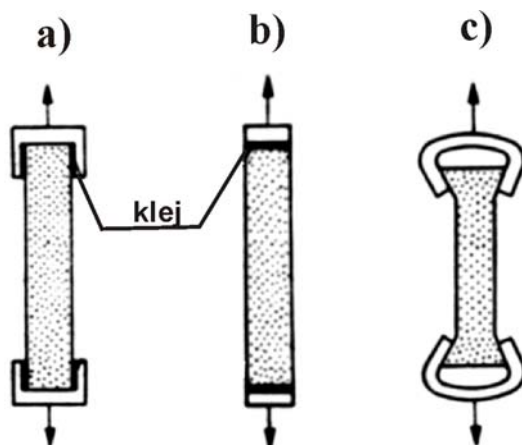
Test bezpośredniego jednoosiowego rozciągania wykonywany jest dla skał zasadniczo według tej samej metodyki, co dla metali z tym, że – z uwagi na problemy z wycinaniem próbek o kształcie takim jak dla próbek metalowych – stosuje się próbki walcowe lub prostopadłościennie. Jeśli chodzi o zalecaną smukłość próbek (λ) – rozumianą jako stosunek wysokości próbki (h) do jej średnicy (d) – to Jaeger (1972, str. 42) zaleca 8:1, co chyba należy uznać za przesadne, Kidybiński (1982, str. 21) ok. 4:1, a zalecenia ISRM - *International Society for Rock Mechanics* (Bieniawski i Hawkes, 2007) proponują $2,5:1 \leq \lambda \leq 3,0:1$. Probki takie mocowane są w odpowiednich kowadłach i następnie rozciągane w maszynie wytrzymałościowej.

Wszyscy autorzy piszący o eksperymencie bezpośredniego rozciągania zwracają uwagę, iż dla jego poprawnego wykonania szczególnie istotnym jest zapewnienie bezmomentowego przekazania siły obciążającej na próbkę. Aby to osiągnąć Obert i in. (1946) używali kowadeł połączonych ze szczękami prasy za pośrednictwem przegubów kulowych, podczas gdy Hawkes i Mellor (1970) stosowali w miejsce przegubów

połączenie wiotkimi cięgnami. Podczas eksperymentów bezpośredniego rozciągania opisanych w niniejszej pracy stosowano będące modyfikacją rozwiązania Oberta i in. (1946) (por. rys. 6).

Pisząc o teście bezpośredniego rozciągania wielu autorów zwraca uwagę na fakt, że sposób przymocowania próbki do kowadeł nie pozostaje bez wpływu na wynik eksperymentu. Na rys. 1 pokazano przykłady trzech różnych sposobów mocowania próbki do kowadeł, przy czym sposoby oznaczone a) i b) wymagają użycia kleju natomiast sposób c) użycia kleju nie wymaga. W konsekwencji w próbce skalnej mocowanej do szczęk prasy na sposób a) lub b) pojawia się strefa materiału nasączona klejem, która swoimi właściwościami mechanicznymi znacząco różni się od materiału nie nasączonego. W swoim przeglądzie metod wykonywania i wyników eksperymentów jednoosiowego rozciągania Vutukuri i in. (1974) zwracają uwagę, że w przypadku zamocowań typu a) i b) zawsze zachodzi ryzyko rozerwania próbki na granicy stref nasączonej i nienasączonej.

Aby uniknąć problemów związanych z wpływem warunków zamocowania na wynik eksperymentu proponuje się stosowanie próbek o kształcie zbliżonym do stosowanego w badaniach metali i polimerów i mocowanych w prasie w podobny sposób, co schematycznie pokazuje rys. 1c (por. także Hoek, 1964). Zastosowanie takiego rozwiązania uzależnione jest jednak od możliwości wycięcia próbek o pożądanym kształcie. Uzyskanie takich próbek drogą obróbki mechanicznej (z zastosowaniem narzędzia skrawającego) jest bardzo trudne, a dla niektórych skał praktycznie niemożliwe. Satysfakcjonującego rozwiązania tego problemu dostarcza natomiast technologia cięcia wysokociśnieniowym strumieniem wodnym (ang. abrasive water jet – AWJ).



Rys. 1 Przykłady kształtu i zamocowania próbek w teście bezpośredniego, jednoosiowego rozciągania; a), b) – połączenia na kleju, c) – połączenie bezklejowe (Kidybiński, 1982, str. 21).

Przygotowanie próbek techniką AWJ

Technologia cięcia materiałów kruchych wysokociśnieniowym strumieniem wodnym bazuje na użyciu w charakterze urządzenia skrawającego wąskiego i bardzo

szybkiego strumienia mieszaniny cieczy (w naszym przypadku wody) i proszku ściernego. Procesy fizyczne zachodzące w trakcie takiego cięcia są bardzo złożone – w grę wchodzi m.in. szybka erozja, ścinanie, szybkie zmiany pola naprężeń i efekty związane z mikroszczelinowaniem – nie do końca rozpoznane i w dużym stopniu zależą od właściwości ciętego materiału. Przykładowe rozważania na ten temat znaleźć można u Kima i Labusa (1995) oraz Hashisha (1995). W omawianym przypadku procedura cięcia próbki przypomina metodę obróbki skrawaniem przy pomocy tokarki. Fragment skały, z którego wycinana jest próbka, umocowany jest w głowicy wirującej, która ma możliwość przesuwu poziomego wzdłuż osi wirowania. Natomiast rolę noża tokarskiego pełni dysza AWJ, która ma możliwość przesuwu w przestrzeni w trzech wymiarach. Metoda ta, której przykład stosowania pokazano na rys. 2, opracowana została w Instytucie Geoniki Akademii Nauk Republiki Czeskiej (ÚGN AV ČR, v. v. i.), przy czym pierwsze doświadczenia na temat jej wykorzystania do cięcia próbek skalnych opublikowali Konečný i Sitek (1998), a pierwsze wyniki testów rozciągania wykonanych na przygotowanych tą metodą próbkach próbkach pokazali Sitek i in. (2005). Z punktu widzenia przygotowywania próbek skalnych technika AWJ ma trzy podstawowe zalety:

- ❑ pozwala na wycinanie ze skał próbek o złożonej geometrii w sposób zapobiegający powstawaniu karbów czy mikrokawern będących koncentratorami naprężeń,
- ❑ minimalizuje zasięg powierzchniowej strefy próbki ulegającej zniszczeniu w skutek kontaktu z urządzeniem skrawającym; strefy takie w przypadku obróbki mechanicznej potrafią sięgać bardzo głęboko,
- ❑ eliminuje wpływ efektów cieplnych, nieuniknionych przy zastosowaniu narzędzia skrawającego pozostającego w bezpośrednim kontakcie z materiałem próbki.

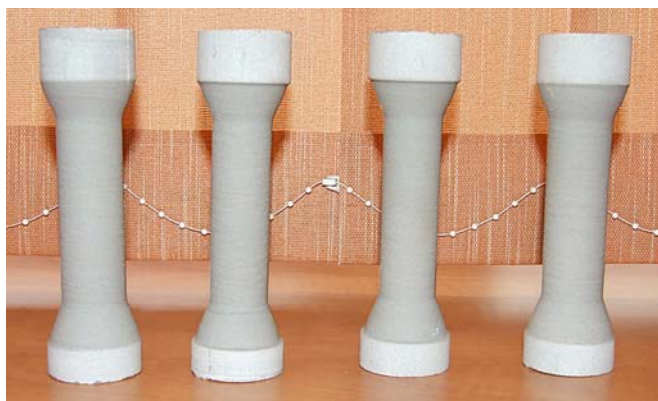


Rys. 2 Wycinanie próbki skalnej metodą AWJ (Sitek i in., 2006).

Podczas wycinania próbek do eksperymentów, których wyniki zostaną przedstawione poniżej stosowana następujące parametry procedury cięcia:

- ☐ średnica dyszy AWJ – 0,30 mm,
- ☐ średnica przewodu dostarczającego ścierniwo – 0,80 mm,
- ☐ dystans między głowicą AWJ a ciętym materiałem – 2,0 mm,
- ☐ ciśnienie wody na wylocie z dyszy – 350 MPa,
- ☐ zużycie ścierniwa – $250 \text{ g} \times \text{min}^{-1}$,
- ☐ prędkość wirowania głowicy – $300 \text{ obr.} \times \text{min}^{-1}$,
- ☐ prędkość przesuwu dyszy AWJ – $0,83 \text{ mm} \times \text{s}^{-1}$,

przy czym do wycięcia próbki potrzeba było dwóch lub trzech cykli przesuwu dyszy wzdłuż ciętego materiału. Aby uzyskać większą precyzję cięcia podczas ostatniego cyklu prędkość przesuwu dyszy zmniejszano do $0,42 \text{ mm} \times \text{s}^{-1}$. Przedmiotem badań były próbki wycięte z trzech następujących skał: wapienia z Czatkowic k. Krakowa (dalej zwanego wapieniem „Czatkowice”), piaskowca z Tumlina z rejonu Gór Świętokrzyskich (piaskowiec „Tumlin”) i kwarcytu z Wiśniówki k. Kielc (kwarcyt „Wiśniówka”). Przykładowy zestaw wyciętych do badań próbek pokazano na rys. 3.



Rys. 3 Próbki do badań wycięte metodą AWJ; kwarcyt „Wiśniówka”.

Próbki po wycięciu wklejano między kowadła, a na ich powierzchni naklejano tensometry elektrooporowe służące do pomiaru odkształceń podłużnych. Widok przygotowanej do badań próbki przedstawia rys. 4.



Rys. 4 Próbka przygotowana do testu bezpośredniego, jednoosiowego rozciągania

Aparatura badawcza i metodyka badań.

Test bezpośredniego jednoosiowego rozciągania wykonywano na znajdującej się w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN sztywnej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8500 Rock Testing System (rys. 5) wyposażonej w wykonany w IMG PAN zestaw przegubów i kowadeł do bezpośredniego jednoosiowego rozciągania. Zestaw ten umożliwiał wykonywanie tego eksperymentu z zapewnieniem osiowego i bezmomentowego działania siły rozciągającej zgodnie z koncepcją zaproponowaną przez Oberta i in. (1964). Schemat systemu zamocowania próbki w prasie oraz jej widok podczas testu pokazano na rys. 6.

Eksperymenty prowadzone były ze stałą prędkością przesuwu tłoka równą $0,001 \text{ mm} \times \text{s}^{-1}$. Podczas testów rejestrowana była siła rozciągająca próbkę, pozycja tłoka oraz odkształcenia podłużne wskazywane przez tensometry. Przyjmując, że maksymalna wartość siły rozrywającej wynosiła F_{\max} a średnica przekroju w miejscu rozerwania próbki wynosiła d , wytrzymałość próbki na rozciąganie w próbie bezpośredniej $R_R = \sigma_{pt}$ wyliczano ze wzoru:

$$\sigma_{pt} = \frac{4F_{\max}}{\pi d^2} \quad (1)$$

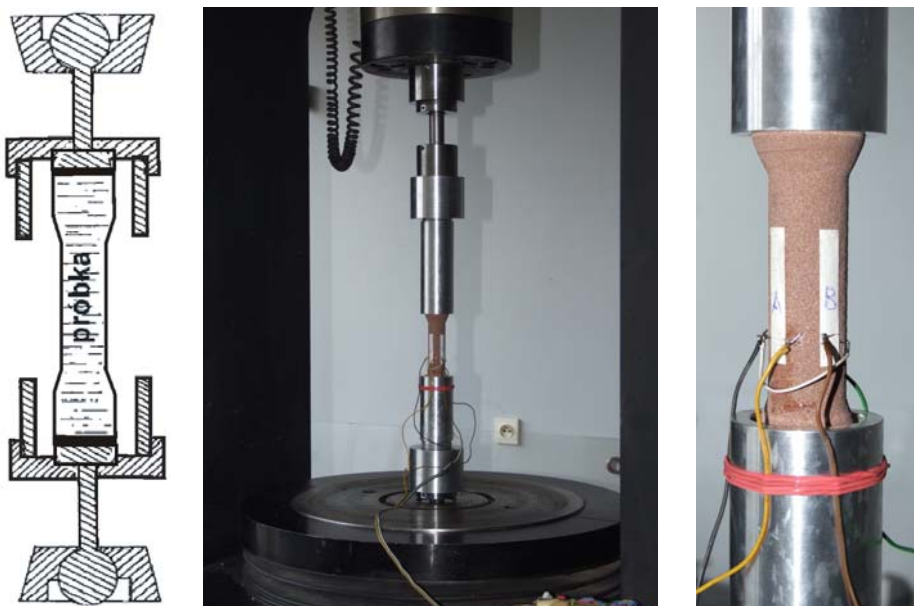


Rys. 5 Maszyna wytrzymałościowa INSTRON 8500 Rock Testing System

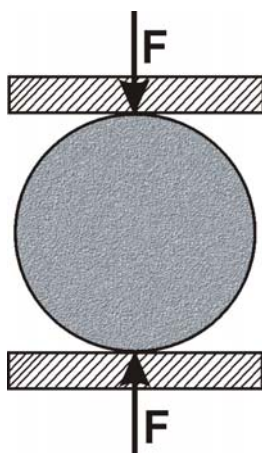
Test brazylijski

Test brazylijski został opracowany w 1943 r. przez brazylijskiego inżyniera Fernando Carneiro dla wyznaczania wytrzymałości na rozciąganie betonu. Z uwagi na łatwość przygotowania próbek oraz wykonania samego eksperymentu cieszy się dużą popularnością i jest często wykorzystywany podczas badań wytrzymałościowych skał, betonów, i innych materiałów kruchych. Wykonywany jest przy założeniu, że badany

material jest jednorodny, izotropowy oraz liniowo-sprężysty (tj. podlegający prawu Hooke'a). Próbka będąca przedmiotem eksperymentu ma postać cienkiego walca o średnicy d i wysokości h , który jest obciążony na pobocznicy siłą F . Schemat takiego testu pokazuje rys. 7



Rys. 6 Próbką podczas testu prostego jednoosiowego rozciągania; z lewej – schemat zamocowania próbki, w środku – widok próbki w prasie podczas eksperymentu, z prawej – widok próbki w prasie podczas eksperymentu (zbliżenie)



Rys. 7 Test brazylijski; schemat wykonywania.

Przyjmując, że wartość siły w chwili pęknięcia próbki wynosiła F_{\max} , wytrzymałość próbki na rozciąganie w teście brazylijskim $R_R = \sigma_{Ptp}$ wyznaczano na podstawie wzoru:

$$\sigma_{Ptp} = \frac{2F_{\max}}{\pi dh} \quad (2)$$

Test brazylijski wykonywano na maszynie INSTRON 8500 Rock Testing System ze stałą prędkością przesuwu tłoka równą $0,00022 \text{ mm} \times \text{s}^{-1}$. Podczas eksperymentu nie stosowano żadnych przekładek między próbką a płytami prasy. Obszerniejsze rozważania matematyczne dotyczące rozkładu naprężeń w próbce podczas testu brazylijskiego znaleźć można u Jaegera i in. (2007, str. 159, 225-227). Natomiast Lama i Vutukuri (1978, str. 51-54) podają, jak wykorzystać test brazylijski do wyznaczania stałych sprężystości: modułu Younga i współczynnika Poissona.

Wyniki badań wytrzymałościowych

Uzyskane w wyniku testów prostego jednoosiowego rozciągania oraz testu brazylijskiego wyniki wartości granicy wytrzymałości na rozciąganie zestawiono w tab. 1. W tabeli tej pokazano także, oprócz wartości granicy wytrzymałości uzyskanych w wyniku poszczególnych eksperymentów, wyliczone dla każdej ze skał wielkości wartości średnich (średnia) i odchyłeń standardowych (odch. std.). Autorzy zdają sobie sprawę, że – z uwagi na niewielką liczbę wykonanych testów bezpośredniego jednoosiowego rozciągania – prowadzenie tego rodzaju analiz statystycznych budzi wątpliwości, ale uznali je za przydatne dla celów porównawczych.

Zestawione w tab. 1 wyniki badań wskazują na dwie, interesujące prawidłowości: po pierwsze – średnie wartości granicy wytrzymałości na rozciąganie uzyskane w wyniku testu brazylijskiego są przeciętnie dwukrotnie większe od wartości tej stałej materiałowej uzyskanej w teście bezpośredniego jednoosiowego rozciągania oraz, po drugie – odchylenie standardowe wartości R_R jest znacznie wyższe dla testu bezpośredniego rozciągania niż dla testu brazylijskiego. W oczywisty sposób rodzi się w tym momencie pytanie: dlaczego tak się dzieje? Poszukiwanie odpowiedzi należy rozpocząć od zestawienia czynników, które wpływają znacząco na wynik każdego z eksperymentów.

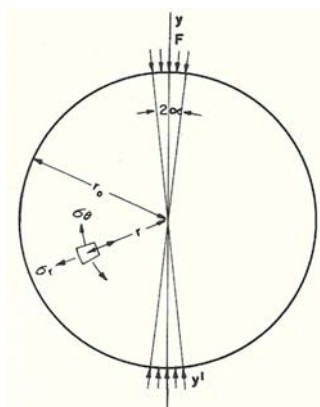
W przypadku testu brazylijskiego kluczowym dla oceny prawidłowości jego wykonania jest sposób przyłożenia obciążenia do pobocznic próbki. Jeżeli w każdym przekroju poprzecznym próbki i na całej długości jej pobocznic uda się zapewnić punktowy styk między próbką a płytami prasy (co odpowiada sytuacji na rys. 8 gdy $\alpha = 0$), to warunki poprawności wykonania testu można uznać za spełnione. W praktyce oznacza to, że:

- i) do badań należy stosować próbki dla których smukłość $\lambda \leq 1$ (polska norma PN-G-04302 narzuca nawet $\lambda = 0,5$),
- ii) pobocznic próbki powinny być idealnie równe i równoległe,
- iii) ugięcie próbki podczas obciążania powinno być na tyle małe, by nie zwiększyć znacząco powierzchni jej styku z płytami prasy (test nie nadaje się do stosowania dla próbek „miękkich”).

Tab. 1 Zestawienie wyników testów prostego jednoosiowego rozciągania i testu brazylijskiego

nazwa skały	proste rozciąganie		test brazylijski	
	nr próbki	σ_{pt} [MPa]	nr próbki	σ_{Ptp} [MPa]
wapień "Czałkowice"	R-WCz1	3,93	103	9,20
	R-WCz2	1,26	107	13,00
	R-WCz3	10,70	108	11,10
	R-WCz4	10,74	110	12,90
			111	13,4,
			117	10,30
			101	13,30
			113	8,50
			114	9,10
	średnia:	6,66	10,93	
	odch. std.:	4,82	1,94	
piaskowiec "Tumlin"	R-PT1	1,95	122	5,20
	R-PT2	2,39	128	6,80
	R-PT3	2,61	130	5,50
			135	5,80
			138	6,50
	średnia:	2,32	5,96	
	odch. std.:	0,34	0,67	
kwarcyt "Wiśniówka"	R-KW1	11,55	144	16,90
	R-KW2	15,18	148	25,90
	R-KW3	12,08	152	9,50
			155	27,60
			159	31,20
			147	29,70
			150	23,40
			154	23,90
			158	25,10
	średnia:	12,94	23,69	
	odch. std.:	1,96	6,73	

W przypadku skał, których wyniki badań są omawiane w niniejszej pracy spełnienie warunków ii) i iii) nie nastręczyło żadnych trudności. Natomiast, ponieważ z uwagi na planowane badania ukształtowania powierzchni przełamów autorom badań zależało na uzyskaniu przełamów o dużych powierzchniach, zdecydowano się odstąpić od spełnienia warunku i) i badane próbki miały $\lambda \approx 2$, co zapewne nie pozostało bez wpływu na otrzymane wyniki.



Rys. 8 Test brazylijski; schemat obciążeń (Vutukuri i in. 1974)

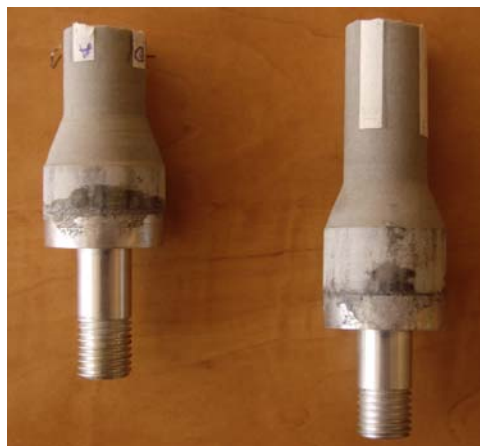
Przy ocenie prawidłowości wykonania testu bezpośredniego jednoosiowego rozciągania należy brać pod uwagę trzy podstawowe czynniki:

- i) test ten jest bardzo wrażliwy na wszelkie niejednorodności zarówno struktury próbki jak i jej tekstury i to zarówno wewnątrz próbki jak i na jej powierzchni,
- ii) najmniejsze niedokładności obróbki powierzchni próbki wywołują tzw. efekt karbu i skutkują drastycznym spadkiem uzyskanej wartości granicy wytrzymałości,
- iii) test jest wrażliwy na brak osiowości siły rozciągającej (pojawienie się momentu zginającego) przy czym nieosiowość ta może być efektem zarówno sposobu zamocowania próbki w prasie jak i np. błędów popełnionych przy klejeniu próbki do kowadeł.

Skutkiem czynników wymienionych w pkt. iv) i v) było pękanie próbek rozciąganych w taki sposób, że powierzchnia przełamu przebiegała skośnie do osi podłużnej próbki, zgodnie z kierunkiem ułożenia lokalnej niejednorodności lub nieciągłości. Przełam taki pojawiał się w różnych miejscach próbki, często nawet w pobliżu kowadeł, w obszarze zwiększonej średnicy próbki. Ostatecznie za prawidłowo wykonane uznano tylko te eksperymenty bezpośredniego rozciągania, w których płaszczyzna przełamu próbki była prostopadła do jej osi podłużnej i pęknięcie nastąpiło wewnątrz obszaru o zmniejszonej średnicy próbki. Odpowiedni przykład pokazuje rys. 9.

Warunek iv) nakazujący uzyskanie podczas eksperymentu bezmomentowego zamocowania próbki w prasie, wydaje się mieć – wbrew oczekiwaniom – nieco mniejsze znaczenie. Dowodzi tego przykład próbki wapienia „Czatkowice” oznaczonej R-WCz4. W tab. 1 próbce tej przyporządkowana jest wartość $\sigma_{pr} = 10,74\text{MPa}$, która jest praktycznie równa średniej wartości $\sigma_{pp} = 10,93\text{MPa}$. Wydawać by się zatem mogło, że dla próbki tej wszystko przebiegło w sposób optymalny: była pozbawiona defektów strukturalnych i teksturalnych oraz dobrze wykonana, a podczas całego testu powiodło się utrzymanie współosiowości próbki i siły rozciągającej. Tymczasem hipotezie o optymalnym przebiegu tego eksperymentu zaprzecza rys. 10. Pokazano na nim zależność między siłą rozciągającą próbkę F a jej odkształceniami podłużnymi pomierzonymi przez cztery tensometry elektrooporowe naklejone na obwodzie zwężonej

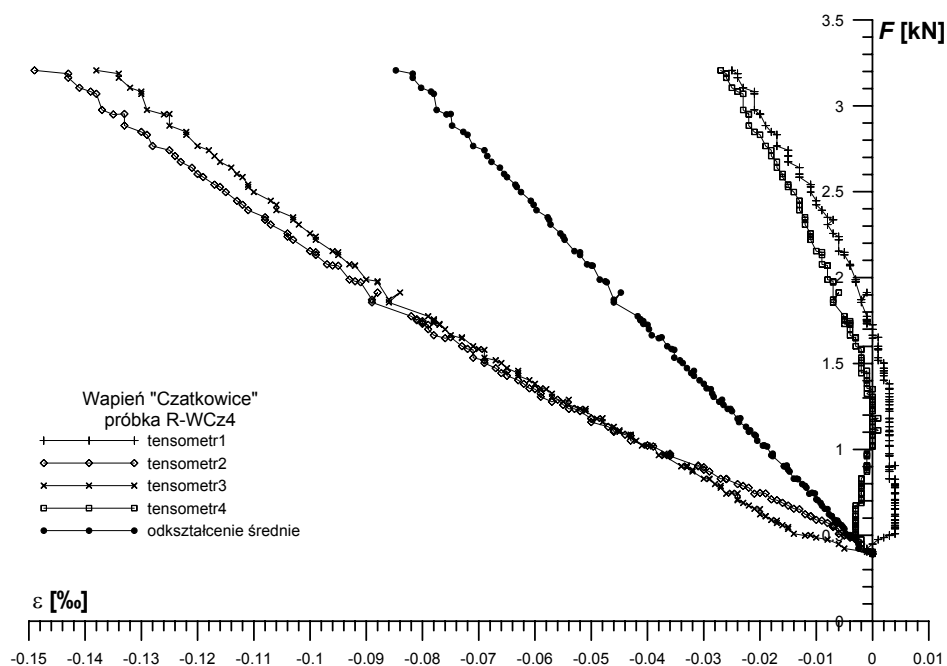
części próbki co 90° , w sposób pokazany na rys. 4; odkształcenie średnie jest średnią arytmetyczną odkształceń zmierzonych przez tensometry, znak ‘-’ oznacza w tym przypadku rozciąganie.



Rys. 9 Test prostego jednoosiowego rozciągania; próbka zniszczona prawidłowo.

Widoczne na rys.10 zależności między siłą obciążającą a pomierzonymi odkształceniami próbki pokazują, że w początkowej fazie testu (mniej więcej do wartości siły równej 1,7kN) tensometr1 pokazał ściskania, a choć odkształcenia pokazane przez tensometr4 „nie przeszły” na stronę odkształceń ściskających, to kształt zależności $\epsilon \sim F$ jest dla tego tensometru praktycznie identyczny jak dla tensometru1. Podobnie bliźniaczy charakter mają zależności $\epsilon \sim F$ pomierzone przez tensometr2 i tensometr3. Taki kształt uzyskanych podczas eksperymentu zależności $\epsilon \sim F$ świadczy o tym, że praktycznie podczas całego testu próbka poddana była działaniu momentu zginającego, który nie był likwidowany przez obecne w układzie przeguby kulowe. Pomimo tego otrzymana podczas eksperymentu wartość $R_R = \sigma_{pt}$ nie odbiegała znacząco od wartości uzyskiwanych w testach brazylijskich.

Pokazany na rys. 10 wynik dostarcza dwóch istotnych wskazówek metodycznych. Pierwsza z nich mówi, że układ przekazywania siły rozciągającej za pośrednictwem przegubów kulowych wg schematu pokazanego na rys. 6 jest mało skuteczny i należałoby go zastąpić układem ciągnowym np. wg propozycji Hawkesa i Mellora (1970). Przyczyną jest tu najprawdopodobniej tarcie na powierzchni przegubów, którego nie da się wyeliminować żadnym smarowaniem. Druga, to ostrzeżenie przed ograniczeniem się do rejestracji podczas eksperymentu tylko odkształcenia średniego, co często robi się poprzez odpowiednie (szeregowe) łączenie tensometrów i rejestrację sygnału będącego sumą sygnałów z poszczególnych czujników. W pokazanym na rys. 10 przykładzie odkształcenie średnie jest praktycznie idealnie liniową funkcją siły rozciągającej i gdyby nie rejestracja odczytów poszczególnych tensometrów, fakt wystąpienia momentów zginających pozostałby niezauważony. Wydaje się, że bezpieczniej jest rejestrować odczyty z każdego z tensometrów (czy jakichkolwiek innych przetworników deformacji) oddzielnie i dopiero na etapie analizy wyników wyznaczać odkształcenie średnie.

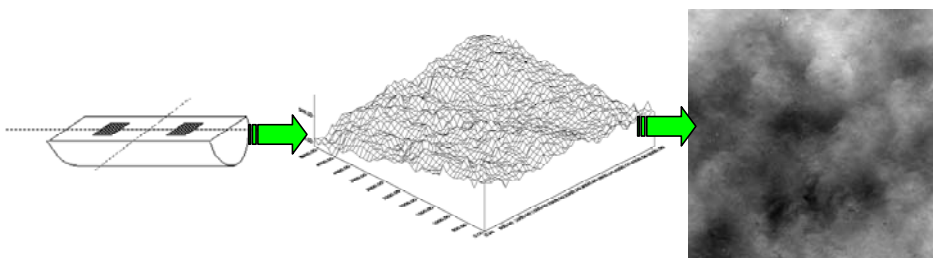


Rys. 10 Pomierzone tensometrami odkształcenia próbki ε jako funkcje siły rozciągającej F (znak '-' oznacza rozciąganie).

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 $[Gmin, Gmax]$. 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 , 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 przełame ($0 \leq x \leq X$; $0 \leq y \leq Y$). Stopień szarości tego piksela będzie zaś równy wartości z_c zmierzonej dla punktu c .

Rysunek 11 przedstawia przykładowy przełam wraz z zaznaczonymi na nim polami pomiarowymi, graficzną wizualizację wyników (w postaci wykresu 3D) uzyskanych dla jednego z nich, oraz obraz uzyskany w rezultacie opisywanego postępowania.



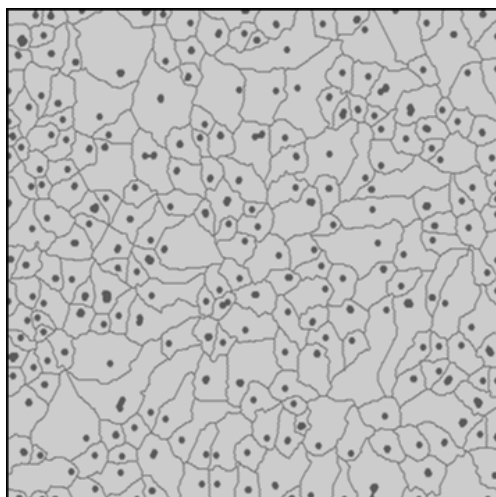
Rys. 11 Analizowany fragment przełamu zapisywane jest w pamięci komputera w formie tabeli wartości XYZ, którą można interpretować graficznie jako wykres 3D ale również jako obraz.

Posiadając tak utworzony obraz jesteśmy w stanie wykorzystać do analizy ukształtowania powierzchni badanego obiektu aparat matematyczny stosowany w metodach analizy obrazu i morfologii matematycznej (Serra, 1982). Wyniki otrzymane przy zastosowaniu tej metody pomiarowej można znaleźć w pracach Młynarczuka (2004, 2008). Na potrzeby prezentowanych w niniejszej pracy rozważań wyznaczone zostały parametry, których otrzymanie wymagało zaprogramowania zaawansowanych i złożonych algorytmów morfologicznych. W rezultacie otrzymano jednak informacje, których wyznaczenie byłoby skomplikowane lub wręcz niemożliwe przy standardowej analizie ukształtowania powierzchni przełamu.

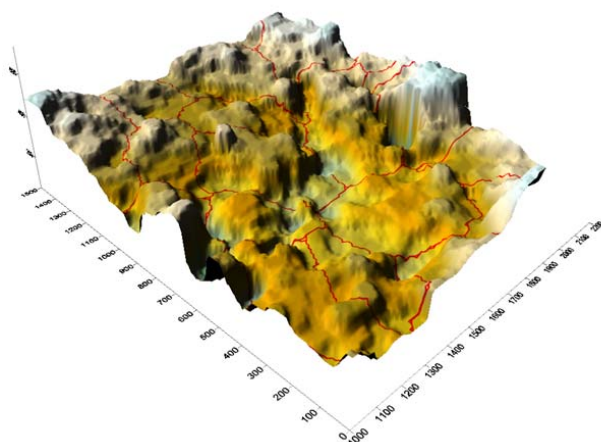
Na rys. 12 zaznaczono maksima lokalne analizowanej powierzchni wyznaczone na bazie przekształceń geodezyjnych oraz ich „strefy wpływu” (ang. zones of influence), które w skrócie oznaczać będziemy SW. Wyznaczono je przy użyciu przekształcenia linii działów wodnych (LDW) (Beucher, 1990). Stosując analogię z ukształtowaniem terenu, można przyjąć, że maksima są szczytami gór a granice SW są czymś w rodzaju przełęczy pomiędzy tymi górami (rys. 13). 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 wtedy oznaczać jako: **OSW**, **HSW**, **DSW** oraz **KSW**.

Wyniki uzyskane z analizy ukształtowania powierzchni przełamów

Na wszystkich przełamach rozdzielczych otrzymanych w wyniku omawianych wcześniej testów (patrz tab. 1) wybrano po dwa pola pomiarowe, których ukształtowanie zostało odwzorowane przy użyciu profilomierza laserowego. Pomiary odbywały się w siatce kwadratowej 512×512 punktów o odległościach oczek wynoszących 10 μm (czyli zmierzono wysokości 262 144 punktów). Dane otrzymane w wyniku wykorzystania proponowanego algorytmu analizy lokalnego ukształtowania powierzchni przełamu zaprezentowano na rys. 14. Otrzymane zbiory danych oznaczone zostały, jako: (R) dla wyników uzyskanych z przełamu wymuszonego poprzez proste rozciąganie oraz (TB) dla wyników uzyskanych z testu brazylijskiego. Na rys. 14 widać wyraźnie, że wartości parametrów **OSW**, **HSW**, **DSW** i **KSW** wyznaczone dla przełamów tej samej skały otrzymanych różnymi metodami, nie różnią się ilościowo.



Rys. 12 Wyznaczone na obrazie otrzymanym z pomiaru morfologii przełamu maksima lokalne i ich SW



Rys.13 Linie działów wodnych rozdzielające poszczególne wzniesienia (fragment).

Prezentowane rezultaty świadczą o tym, że główny wpływ na ukształtowanie powierzchni przełamu ma rodzaj skały. Natomiast – biorąc pod uwagę fakt, że różnice ilościowe w wartościach parametrów opisujących uzyskane różnymi metodami przełamy są praktycznie niemierzalne – sposób wymuszenia przełamu wydaje się mieć znaczenie drugorzędne. Sugeruje to, że stan naprężenia w próbce w miejscu, w którym powstaje przełam nie różni się w analizowanych testach na tyle, aby sprowokować różne sposoby pęknięcia rozdzielczego badanych skał. Wynika z tego, że na opisywane parametry przełamu w zdecydowanie większym stopniu wpływają strukturalne i/lub wytrzymałościowe cechy skały niż sposób wymuszenia przełamu.

Podsumowanie

Przedstawione powyżej wyniki badań nad dwoma sposobami oznaczania wytrzymałości skały na rozciąganie pozwalają na sformułowanie pewnych sugestii dotyczących poprawności stosowanej metodyki badań. Przede wszystkim należy zwrócić tutaj uwagę na zawarte rozdz. 6 wyniki badań nad ukształtowaniem przełamów próbek. Sugerują one, że podczas obu testów stan naprężenia w przekroju, w którym powstał przełam był identyczny. Oznacza to, że w przypadku obu analizowanych eksperymentów uzyskana wartość R_R może być wiarygodnie uznana za wartość wytrzymałości na rozciąganie, oczywiście pod warunkiem, że podczas ich wykonywania spełniono odpowiednio warunki i) – iii) (rozdz. 4) dla testu prostego jednoosiowego rozciągania, lub też warunki iv) – vi) (rozdz. 4) dla testu brazylijskiego.

W tym miejscu należy jednak zwrócić uwagę na pewną istotną różnicę, która zachodzi między próbką rozciąganą bezpośrednio, a próbką badaną testem brazylijskim. Otóż podczas testu brazylijskiego płaszczyzna pęknięcia próbki jest narzucona warunkami eksperymentu, a wyznaczają ją proste styku między pobocznicami próbki a płytami prasy. Płaszczyzna ta wcale nie musi się pokrywać z płaszczyzną, w której wytrzymałość próbki jest najmniejsza! W konsekwencji uzyskana podczas testu brazylijskiego wartość $R_R = \sigma_{p/p}$ wcale nie musi być najniższą możliwą wartością tej wytrzymałości. Jest to raczej pewna umowna „wartość średnia”. Tymczasem podczas testu bezpośredniego rozciągania o płaszczyźnie pęknięcia próbki decydują wyłącznie lokalne właściwości materiału, ergo można uznać, iż w teście tym uzyskuje się dla danej próbki najniższą możliwą wartość („wartość minimalną”) granicy wytrzymałości na rozciąganie. O różnicy tej trzeba pamiętać szczególnie wówczas, gdy otrzymane w wyniku badań laboratoryjnych wartości R_R mają być następnie podstawą obliczeń statycznych dla projektowanych konstrukcji i to zarówno podziemnych jak i naziemnych.

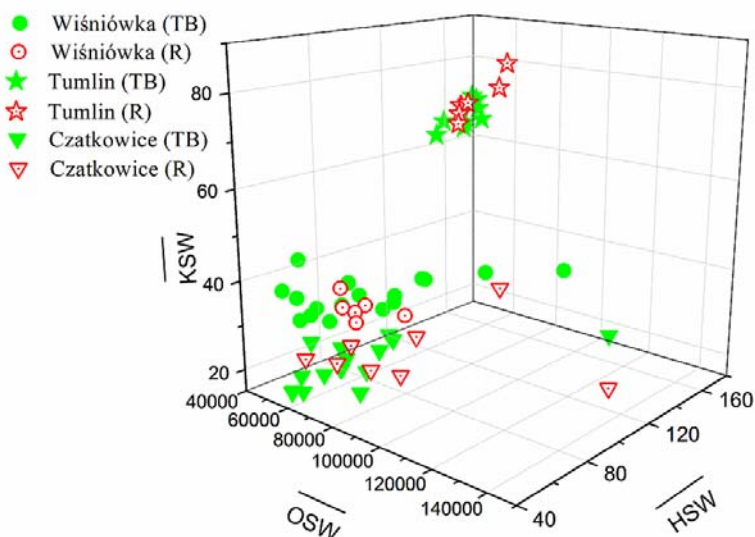
Jeżeli natomiast przyjąć, że wyborze testu laboratoryjnego dla wyznaczania wartości R_R powinno obowiązywać kryterium prostoty testu i jego odporności na ewentualne błędy metodyki, to niewątpliwie prostszym do wykonania i stwarzającym mniejsze możliwości popełnienia błędu metodycznego jest test brazylijski. Pokazane w rozdz. 4 wyniki badań, gdzie wartości granicy wytrzymałości na rozciąganie uzyskane na podstawie testu brazylijskiego są średnio dwukrotnie wyższe od wartości tejże granicy uzyskanych na podstawie testu bezpośredniego rozciągania nakazują jednak dużą ostrożność przy interpretacji wyników testu brazylijskiego i ich wykorzystywaniu do obliczeń statycznych.

Podziękowanie

Niniejsza publikacja powstała na podstawie wyników uzyskanych podczas badań prowadzonych w ramach następujących projektów badawczych:

- wspólnego projektu badawczego Polskiej Akademii Nauk i Akademii Nauk Republiki Czeskiej realizowanego przez Instytut Mechaniki Górotworu PAN i Instytut Geoniki AN RCz,
- projektu badawczego Akademii Nauk Republiki Czeskiej nr AV0Z30860518 realizowanego przez Instytut Geoniki AN RCz.

Autorzy dziękują za pomoc w sfinansowaniu i realizacji badań.



Rys.14 Położenie w przestrzeni cech (**OSW**, **HSW** oraz **KSW**) parametrów otrzymanych dla przełamów uzyskanych w wyniku testu brazylijskiego (TB) oraz testu prostego rozciągania (R) dla wapienia z Czatkowic, kwarcytu z Wiśniówki i piaskowca z Tumlina.

Literatura

- [1] BEUCHER, S. *Segmentation d'Images et Morphologie Mathématique*, PhD Thesis, Ecole des Mines de Paris, 1990.
- [2] BIENIAWSKI, Z. T. & HAWKES, I. Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials. In: „*The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*”. R. ULUSAY & J.A. HUDSON (eds.), Ankara, Turkey, 2007, pp. 181-183.
- [3] FRANKLIN, J.A. *Rock Engineering*. McGraw-Hill, Inc., 1989.
- [4] HASHISH, M. Abrasive Jets. In *Fluid Jet Technology: Fundamentals and Applications*. T.J. LABUS (ed.), St. Louis, WJTA, 1995, pp. 4.1-4.52.
- [5] HAWKES, I. & MELLOR, M. Uniaxial Testing in Rock Mechanics Laboratories. *Eng. Geol.*, 1970, Vol. 4, pp. 177-285.
- [6] HOEK, E. Fracture of Anisotropic Rock. *J. S. African Inst. Min. Metal.*, 1964, Vol. 64, No. 3, pp. 385-396.
- [7] JAEGER, C. *Rock Mechanics and Engineering*. Cambridge University Press, London – New York, 1972, 417 pages.
- [8] JAEGER, J. C., COOK, N. G. W. & ZIMMERMAN, R. W. *Fundamentals of Rock Mechanics*. Blackwell Publishing, Malden-Oxford-Carltojn, USA-UK-Australia, 2007, 475 pages.

- [9] KIDYBIŃSKI, A. *Podstawy geotechniki kopalnianej*. Wyd. „Śląsk”, Katowice, 1082, 516 str.
- [10] KIM, T.J. & LABUS, T.J. Influence of Basic Jet Parameters and Physics of Abrasive Water Jet Cutting. In *Fluid Jet Technology: Fundamentals and Applications*. T.J. LABUS (ed.), St. Louis, WJTA, 1995, pp. 3.1-3.45.
- [11] KONEČNÝ, P. & SITEK, L. Two Technologies of Rock Samples Cutting: Their Effect on Samples Strength Properties. In *Mechanics of Jointed and Faulted Rock MJFR-3*. Proc. 3rd intern. conf., P. ROSSMANITH (ed.), Vienna, 6-9 April 1998. Rotterdam, Balkema.
- [12] LAMA, R. D. & VUTUKURI, V. S. *Handbook on Mechanical Properties of Rocks. Testing Techniques and Results – Vol. II*. TRANS TECH Publications, Clausthal, Germany, 1978, 481 pages.
- [13] MŁYNARCZUK, M. Możliwości wykorzystania analizy obrazu i morfologii matematycznej do analizy stereologicznej struktur skalnych. *Archives of Mining Sciences*, 2004, vol 49.
- [14] MŁYNARCZUK, M. Zastosowanie metod analizy obrazu i morfologii matematycznej do ilościowego opisu ukształtowania powierzchni przełamów skalnych. *Archiwum Górnictwa*. Monografie nr 3, 2008.
- [15] OBERT, L., WINDES, S. L. & DUVALL, W. I. *Standardized tests for determining the physical properties of mine rock*. U.S.B.M.R.I. 3891, 1946, 67 pages.
- [16] PN-G-04302: *Skąły zwięzłe. Oznaczanie wytrzymałości na rozciąganie metodą poprzecznego ściskania*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, wrzesień 1997.
- [17] SERRA J. *Image Analysis And Mathematical Morphology*. Academic Press, 1982.
- [18] SITEK, L., FOLDYNA, J. & SOUČEK, K. Shaping of Rock Specimens for Testing of Uniaxial Tensile Strength by High Speed Abrasive Water Jet: First Experience. In *Eurock 2005 - Impact of Human Activity on the Geological Environment.*, P. KONEČNÝ (ed.), London, Balkema, 2005, pp. 545-549.
- [19] SITEK, L., SOUČEK, K., FOLDYNA, J. & STAŠ, L. Preparation of Rock and Geo-composite Specimens for Tensile Tests by Abrasive Water Jet. In *Proceedings of the 1st Euro-Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures - AGS'06*. DARVE, DOGHRI, EL FATMI, HASSIS, ZENZRI (eds.), LGC-ENIT, Tunisia, 2006, pp. 103-109.
- [20] VUTUKURI, V. S., LAMA, R. D. & SALUJA, S. S. *Handbook on Mechanical Properties of Rocks. Testing Techniques and Results – Vol. I*. TRANS TECH Publications, Clausthal, Germany, 1974, 281 pages.

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Petr Konečný, CSc., Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Ostrava

