

## Wyznaczanie odporności skał na pękanie na przykładzie granitu ze złoża Grabina Śląska

Aleksandra Korzec<sup>1</sup>



**Determination of rock fracture toughness based on measurements of the Grabina Śląska granite.** Prz. Geol., 61: 576–582.

*A b s t r a c t.* This paper discusses some aspects of rock fracture mechanics which should be considered in the design of excavations and slopes stability analyses in jointed rock masses. Fracture toughness is a key parameter in a fracture criterion commonly used to predict crack initiation and propagation. Such a criterion is widely known but still not applied in practical geo-engineering calculations because of the inherent complexity of rock masses. A review of tensile fracture toughness measurement methods of rocks is presented, with a detailed description of the chevron bend method employed to determine the tensile fracture toughness of the Grabina Śląska granite with consideration of the material micro-structure. Noticeable differences in the magnitude of this parameter in

three orthogonal directions have been observed, as their three values are equal to  $0.78 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,  $1.24 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  and  $1.43 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , with variations of about 10%.

**Keywords:** fracture criterion, rock fracture toughness, granite, chevron bend method

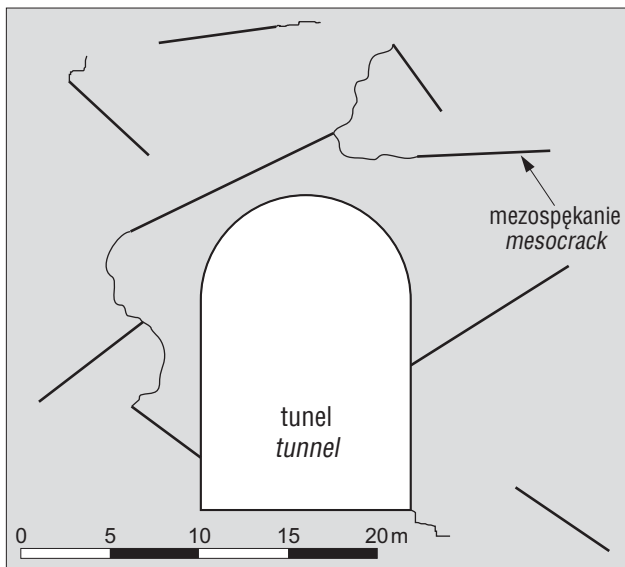
Jedną z istotnych cech masywów skalnych jest szczelinowatość (Liszkowski & Stochlak, 1976), czyli występowanie w nich sieci mikro-, mezo- i makrospekkań. Spośród wielu przyczyn ich powstawania można wymienić m.in. chłodzenie magmy, ruchy tektoniczne i odprężenie masywu wynikające z prowadzonych robót górniczych. Obecność spekkań oraz ich orientacja w przestrzeni mają zasadniczy wpływ na zachowanie się zarówno skały, jak i masywu skalnego. Ze względu na ilość i różnorodność spekkań, a także problemy z opisem ich właściwości, w analizie każdego zagadnienia praktycznego wprowadza się pewne uproszczenia. Jedne z nich polegają na zupełnym pominięciu zjawisk zachodzących w mniejszej skali, inne zaś na wprowadzeniu do obliczeń jednorodnego materiału o uśrednionych parametrach. Parametry te można uzyskać z badań laboratoryjnych, rozwiązań analitycznych (Aydan i in., 1995), obliczeń numerycznych (Lehner & Kachanov, 1995; Tang i in., 2000) lub metodą inżynierską na podstawie wskaźnikowej oceny właściwości skał i spekkań (Hoek & Brown, 1997). O ile stosowanie takich uproszczeń dla mikrospekkań wydaje się słuszne w odniesieniu do zagadnień budownictwa podziemnego, o tyle bezkrytyczne uśrednianie w skali mezospekkań budzi już pewne wątpliwości, szczególnie w przypadku niepełnego spekkania masywu. Główną przyczyną tych obiekcji jest pomijanie koncentracji naprężeń w wierzchołkach mezospekkań oraz warunków ich propagacji. Na rycinie 1 przedstawiono schemat przykładowego obiektu inżynierskiego wykonanego w spekkanym masywie skalnym, w którego analizie należałoby uwzględnić możliwość obwału stropu w wyniku propagacji istniejących mezospekkań. Opiszem odpowiedzi obciążonego ośrodka ze spekaniem zajmuje się mechanika pęknięcia, która wprowadza współczynnik intensywności naprężenia jako parametr wyteżenia materiału oraz kryterium pęknięcia wraz z wyznaczonym doświadczalnie parametrem granicznym – odpornością na pękanie. Oczywiście w przypadku skomplikowanej geometrii konieczne jest zastosowanie wybranej teorii mechaniki pęknięcia w połączeniu z metodą

numeryczną, która pozwala na modelowanie ewolucji nieciągłości w ośrodku skalnym.

### PODSTAWOWE KONCEPCJE MECHANIKI PĘKANIA

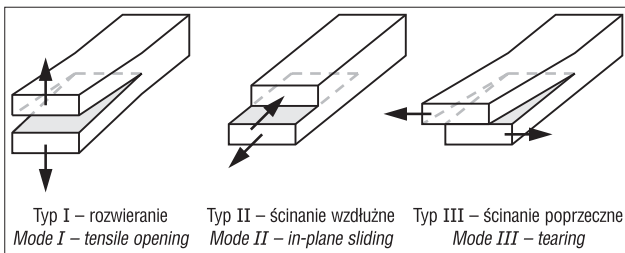
Punktem wyjścia klasycznej mechaniki pęknięcia były rozważania Inglisa z 1913 r. (Bochenek, 1998) dotyczące spiętrzenia naprężeń w materiale sprężystym wokół otworów eliptycznych. Elipsa, której długość jednej z półosi dąży do zera, może być modelem matematycznym spekkania. Jednak dla takiego przypadku rozwiązania teorii sprężystości prowadzą do osobliwości pola naprężeń. Pierwszym zabiegiem ułatwiającym analizę zjawiska koncentracji naprężeń w wierzchołku spekkania było rozłożenie dowolnego trójwymiarowego stanu naprężenia w wierzchołku spekkania na trzy podstawowe stany naprężenia związane z trzema niezależnymi względem siebie ruchami powierzchni spekkania (ryc. 2). Są to: rozwieranie spekkania, ścinanie wzdłużne oraz ścinanie poprzeczne, oznaczane kolejnymi cyframi rzymskimi: I, II, III. Dominującym sposobem obciążenia spekkania w wielu konstrukcjach jest jego rozwieranie. Również w przypadku obciążenia spekkania I/II typu w skałach, których wytrzymałość na rozciąganie jest dużo mniejsza niż na ścinanie, I typ obciążenia spekkania okazuje się najistotniejszy. Pionierskie rozwiązanie problemu naprężenia krytycznego ciała idealnie sprężystego z rozwieranym spekaniem przedstawił Griffith w 1921 r., opierając się na bilansie energetycznym przed wzrostem spekkania i po nim (Wnuk, 2008). Kolejnym ważnym etapem rozwoju mechaniki pęknięcia było spostrzeżenie, że w rzeczywistych materiałach w obszarach koncentracji naprężeń uruchamiają się mechanizmy zmierzające do ich relaksacji, np. dyslokacje w sieci krystalicznej lub mikropęknięcie (Neimitz, 1998). Obszary te są nazywane strefami plastycznymi (ang. *plastic zone*) lub procesowymi (ang. *fracture process zone*). W zależności od mikrostruktury materiału i charakteru zniszczenia wyróżnia się materiały kruche,

<sup>1</sup> Instytut Budownictwa Wodnego Polskiej Akademii Nauk, ul. Kościarska 7, 80-328 Gdańsk; a.korzec@ibwpan.gda.pl.



Ryc. 1. Schemat propagacji spękań w masywie skalnym spowodowanych budową tunelu

Fig. 1. A scheme of propagation of cracks in the jointed rock mass due to the construction of the tunnel



Ryc. 2. Podstawowe typy obciążenia spękania  
Fig. 2. Basic crack opening modes

quasi-kruche i plastyczne. Większość skał w warunkach niskich naprężeń okólnych uznaje się za materiały kruche lub quasi-kruche.

Do modelowania materiałów kruchych stosuje się na ogół teorię liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia (LEFM), której podstawą jest założenie liniowo-sprężystego zachowania się materiału z wyjątkiem pomijalnie małych obszarów w sąsiedztwie wierzchołków spękania. Wiele z kryteriów LEFM opiera się na koncepcji współczynnika intensywności naprężenia  $K$  jako miary wyężenia materiału, która jednoznacznie opisuje pole naprężeń i przemieszczeń w bezpośrednim sąsiedztwie wierzchołka spękania. Z perspektywy mechaniki pęknięcia skał najważniejszym kryterium LEFM jest lokalne kryterium maksymalnych naprężeń obwodowych (Atkinson, 1989). Jego parametrem granicznym jest odporność na pęknięcie przy rozwieraniu  $K_{IC}$ , wyrażana w  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , którą w warunkach płaskiego stanu odkształcenia traktuje się jako stałą materiałową. Wyznaczeniu tego parametru poświęcono niniejszy artykuł.

Inną często stosowaną miarą wyężenia wyprowadzoną na podstawie bilansu energetycznego jest prędkość uwalniania energii  $G$ , a stałą materiałową jest krytyczny współczynnik uwalniania energii  $G_F$  (ang. *specific energy release rate*), nazywany również krytyczną właściwą energią pęknięcia. W przypadku rozwierania spękania stałą materiałową oznaczamy  $G_{IF}$ . Wartość ta najczęściej podawana jest w  $\text{J/m}^2$ . Irwin wyprowadził, obowiązującą w ramach

teorii liniowej, korelację parametrów krytycznych kryterium naprężeniowego i energetycznego w płaskim stanie odkształcenia jako:

$$G_{IF} = (1 - \nu^2) \cdot \frac{K_{IC}^2}{E} \quad [1]$$

gdzie  $E$  oznacza moduł sprężystości Younga (np. Wnuk, 2008), a  $\nu$  współczynnik Poissona.

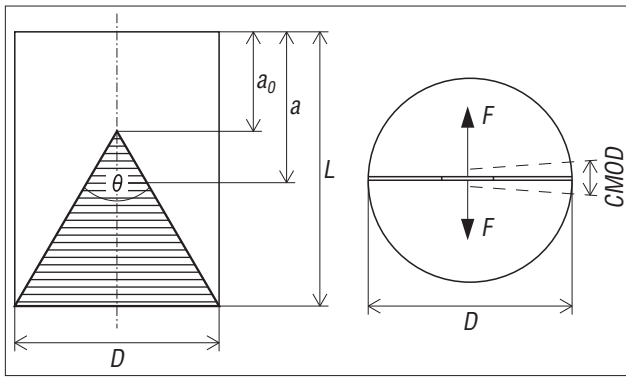
Bardziej złożone mechanizmy zniszczenia, np. uplastycznienie małego zasięgu, wymagają stosowania rozwiązań nieliniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia. Tworzy się je na podstawie założeń dotyczących modelu strefy uplastycznionej i wykorzystania rozwiązań dla pól naprężeń i przemieszczeń dla ciała sprężystego. Przykładem może być model spękania kohezyjnego, który często jest stosowany w modelowaniu konstrukcji betonowych (Elices i in., 2002).

### PRZEGLĄD LABORATORYJNYCH METOD WYZNACZANIA ODPORNOŚCI NA PĘKANIE $K_{IC}$

Doświadczalne metody mechaniki pęknięcia rozwijały się przede wszystkim za sprawą badań metali i tworzyw sztucznych, co wynikało z rozpoznania zjawiska kruchego pęknięcia jako głównej przyczyny wielu katastrof statków, samolotów, mostów i gazociągów. Metody te w latach 60. XX w. zaadaptowali badacze materiałów o niejednorodnej strukturze, takich jak beton, ceramika czy skały.

Pierwsze metody oznaczenia odporności skał na pęknięcie  $K_{IC}$  opierały się na idei testu brazylijskiego i założeniu pewnej relacji między wytrzymałością skał na rozciąganie a ich odpornością na pęknięcie. Mimo małej skuteczności tego rozwiązania, wynikającej z częstego niszczenia próbki poza teoretyczną płaszczyzną pęknięcia oraz dużego rozrzutu wyników, nadal prowadzi się badania nad opracowaniem skutecznego sposobu oznaczania odporności na pęknięcie na próbkach litych (Wang i in., 2004; Lakshmikantha i in., 2008). Bardziej niezawodne są metody, w których płaszczyzna pęknięcia zostaje wymuszona przez inicjator pęknięcia w postaci nacięcia próbki. Międzynarodowa Organizacja Mechaniki Skał (ISRM) opublikowała trzy zalecane sposoby oznaczania odporności na pęknięcie  $K_{IC}$  w warunkach płaskiego stanu odkształcenia. Są to metody SR (ang. *short rod*) i CB (ang. *chevron bend*), opracowane w 1988 r. przez zespół Ouchterlony'ego, polegające odpowiednio na rozrywaniu krótkiego naciętego pręta (ryc. 3) i zginaniu siłą skupioną naciętej belki swobodnie podpartej (ryc. 4), oraz metoda CCNBD (ang. *cracked chevron notched brazilian disc*), opracowana przez zespół Fowella w 1994 r., która opiera się na ścisaniu naciętego centralnie dysku (ryc. 5; Ulusay & Hudson, 2007). W literaturze podano wiele innych propozycji laboratoryjnego wyznaczania odporności na pęknięcie. Na uwagę zasługuje z pewnością metoda CNSCB (ang. *chevron notched semicircular bend*), polegająca na zginaniu połówki dysku z centralnym nacięciem (ryc. 6; Chang i in., 2002).

We wszystkich wymienionych metodach stosuje się próbki rdzeniowe, co wynika z idei używania do badań materiału pobranego podczas wierceń. Metoda CB wymaga



**Ryc. 3.** Schemat metody SR. Objasnienia:  $D$  – średnica próbki,  $L$  – długość próbki,  $F$  – siła przenoszona przez próbkę,  $a$  – długość nacięcia po wstępnym spękaniu,  $a_0$  – odległość wierzchołka klina od brzegu próbki,  $\theta$  – kąt wierzchołkowy,  $CMOD$  – rozwarcie krawędzi nacięcia

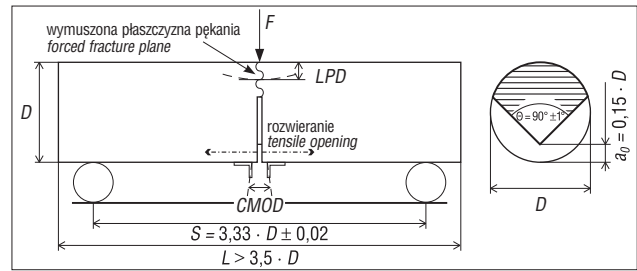
**Fig. 3.** The SR test scheme. Explanations:  $D$  – specimen diameter,  $L$  – specimen length,  $F$  – load on specimen,  $a$  – length of crack after self-precracking,  $a_0$  – chevron tip distance from specimen surface,  $\theta$  – chevron angle,  $CMOD$  – crack mouth opening displacement

smukłej próbki, którą trudno jest pozyskać podczas wierceń, a nawet podczas rdzeniowania próbek z bloków skalnych w laboratorium. W badaniach metodą CCNBD potrzebne są natomiast próbki o dużej średnicy, ponieważ dopiero dla średnicy powyżej 80 mm uzyskane wartości odporności na pęknięcie są zbliżone do tych otrzymanych innymi sposobami (Cui i in., 2010). Konieczność stosowania większych średnic próbek wynika również z trudności wykonania nacięcia inicjalnych.

Ważnym elementem proponowanych metod jest kształt przekroju próbki w miejscu jej nacięcia. Pozostawienie wypukłego/„ostrego” kształtu przekroju powoduje wstępny wzrost spęknięcia przy niewielkim obciążeniu, od długości  $a_0$  do  $a$  (ryc. 4–6), co stabilizuje proces pęknięcia oraz zaostża spęknięcie inicjalne, niwelując w ten sposób wpływ promienia zaokrąglenia wierzchołka nacięcia. W pewnym sensie jest to odpowiednik wykonywanego w badaniach metali spęknięcia zmęczeniowego.

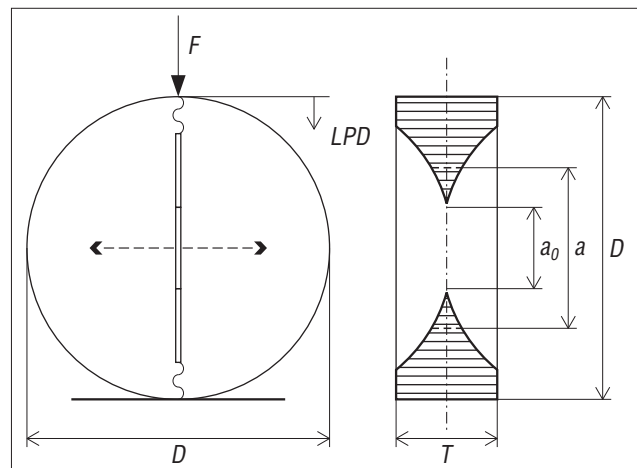
Kolejnym istotnym aspektem różniącym wymienione metody badawcze jest sposób obciążenia próbek i przeprowadzenia doświadczenia, co bezpośrednio przekłada się na wymagania dotyczące sztywności modułu obciążającego oraz oprzyrządowania. Naprężenia rozciągające materiał w wierzchołku spęknięcia inicjalnego jedynie w metodzie SR są wprowadzane za pomocą bezpośredniego rozciągania próbki. Ponieważ napotykamy poważne problemy w wykonaniu skutecznego mocowania rozciąganej próbki, w innych metodach zaproponowano takie konfiguracje, aby spęknięcie rozciągane było w wyniku ściskania lub zginania próbki. Pośredni sposób obciążenia powoduje jednak nieco inny rozkład naprężeń w materiale w wierzchołku spęknięcia, co jest widoczne przy porównaniu struktury geometrycznej powstałych powierzchni przełomów z badań SR i CCNBD (Cui i in., 2010).

Doświadczenie wykonywane przy stałej prędkości przenoszonej przez próbkę siły  $F$  służy do zgrubnego oszacowania odporności na pęknięcie. W celu wyznaczenia stałej materiałowej  $K_{IC}$  zaleca się przeprowadzenie przy stałej prędkości rozwarcia nacięcia inicjalnego  $CMOD$



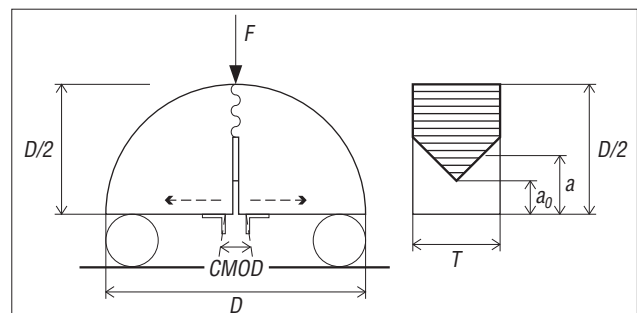
**Ryc. 4.** Schemat metody CB. Objasnienia:  $D$  – średnica próbki,  $L$  – długość próbki,  $S$  – rozpiętość podpór,  $F$  – siła przenoszona przez próbkę,  $a_0$  – odległość wierzchołka klina od brzegu próbki,  $CMOD$  – rozwarcie krawędzi nacięcia,  $LPD$  – przemieszczenie punktu przyłożenia siły

**Fig. 4.** The CB test scheme. Explanations:  $D$  – specimen diameter,  $L$  – specimen length,  $S$  – distance between support points,  $F$  – load on specimen,  $a_0$  – chevron tip distance from specimen surface,  $CMOD$  – crack mouth opening displacement,  $LPD$  – load point displacement



**Ryc. 5.** Schemat metody CCNBD. Objasnienia:  $T$  – szerokość próbki,  $D$  – średnica próbki,  $F$  – siła przenoszona przez próbkę,  $a$  – długość nacięcia po wstępnym spękaniu,  $a_0$  – odległość wierzchołka klina od brzegu próbki,  $LPD$  – przemieszczenie punktu przyłożenia siły

**Fig. 5.** The CCNBD test scheme. Explanations:  $T$  – specimen thickness,  $D$  – specimen diameter,  $F$  – load on specimen,  $a$  – length of crack after self-precracking,  $a_0$  – chevron tip distance from specimen surface,  $LPD$  – load point displacement



**Ryc. 6.** Schemat metody CNSCB. Objasnienia:  $T$  – szerokość próbki,  $D$  – średnica próbki,  $F$  – siła przenoszona przez próbkę,  $a$  – długość nacięcia po wstępnym spękaniu,  $a_0$  – odległość wierzchołka klina od brzegu próbki,  $CMOD$  – rozwarcie krawędzi nacięcia

**Fig. 6.** The CNSCB test scheme. Explanations:  $T$  – specimen thickness,  $D$  – specimen diameter,  $F$  – load on specimen,  $a$  – length of crack after self-precracking,  $a_0$  – chevron tip distance from specimen surface,  $CMOD$  – crack mouth opening displacement



w kilku cyklach obciążenie–odciążenie. Takie procedury są stosowane w metodach SR i CB. Według ich autorów taki sposób obciążenia pozwala na pełne wykształcenie się strefy mikropęknięcia i właściwe wyznaczenie odporności na pęknięcie z uwzględnieniem odkształceń trwałych powstających w wierzchołku spęknięcia.

### OPIS METODY CB

Idea metody CB, której szczegółowy opis podano w artykule Ouchterlony'ego (1988), jest zapewnienie warunków obciążenia I typu w płaszczyźnie wyznaczonej przez inicjator pęknięcia poprzez przyłożenie siły skupionej w środku rozpiętości belki swobodnie podpartej (ryc. 4). Średnica próbki  $D$  powinna być co najmniej dziesięć razy większa od maksymalnej średnicy ziarna badanej skały. Pozostałe wymiary są zależne od przyjętej średnicy próbki i zostały podane na rycinie 4 wraz z maksymalnymi odchyleniami. Przekrój próbki w miejscu wykonanego nacięcia inicjalnego ma kształt litery V o kącie prostym, którego wierzchołek powinien znajdować się na głębokości  $a_0 = 0,15D \pm 0,1D$ . Przyjmuje się, że całkowita długość spęknięcia  $a$  jest równa  $a_0 + 0,16D$ . Szerokość nacięcia powinna być mniejsza od większej z dwóch wartości:  $0,03D$  i  $1$  mm.

Aby wyznaczyć odporność na pęknięcie, należy przeprowadzić badanie w co najmniej czterech cyklach obciążenie–odciążenie ze stałą prędkością rozwarcia nacięcia  $CMOD$  i z równoczesnym pomiarem siły  $F$ . Taki wariant obciążenia oznaczono symbolem CB2. Co najmniej jeden cykl musi nastąpić przed osiągnięciem siły maksymalnej  $F_C$  i po jej osiągnięciu. Próbkę odciąża się aż do otrzymania wartości siły z przedziału 10–20% siły maksymalnej  $F_C$ . Ustalono też warunek dotyczący prędkości rozwarcia spęknięcia, definiuje się go na podstawie odporności na pęknięcie i modułu sprężystości. Zatem, aby ustalić program badania CB2, należy wykonać badanie wstępne, oznaczone symbolem CB1. Przeprowadza się je ze stałą prędkością przyrostu siły zginającej próbkę i z równoczesnym pomiarem przemieszczenia punktu przyłożenia siły lub rozwarcia spęknięcia. Odporność na pęknięcie przy rozwieraniu  $K_{IC}$  oblicza się ze wzoru:

$$K_{IC}^{CB} = \frac{A_{\min} \cdot F_C}{D^{1,5}} \quad [2]$$

gdzie:

$K_{IC}^{CB}$  – odporność na pęknięcie przy rozrywaniu wyznaczona metodą CB,

$F_C$  – maksymalna siła przenoszona przez próbkę,

$A_{\min}$  – współczynnik kształtu uwzględniający stosunek głębokości nacięcia  $a_0$  i rozpiętości próbki  $S$  do średnicy próbki  $D$  wyliczany ze wzoru:

$$A_{\min} = \left[ 1,835 + 7,15 \cdot \frac{a_0}{D} + 9,85 \cdot \left( \frac{a_0}{D} \right)^2 \right] \cdot \frac{S}{D} \quad [3]$$

Moduł sprężystości  $E$  jest wyznaczany na podstawie zachowania się próbki w początkowej fazie doświadczenia według wzoru:

$$E^{CB} = \frac{g_0 \cdot s_{it}}{D} \quad [4]$$

gdzie:

$s_{it}$  – nachylenie stycznej do krzywej  $F$ – $CMOD$  lub  $F$ – $LPD$  w początkowej fazie doświadczenia,

$g_0$  – bezwymiarowy współczynnik kształtu obliczany ze wzoru:

$$g_0 = 20,8 + 19,4 \cdot \frac{a_0}{D} + 142,3 \cdot \left( \frac{a_0}{D} \right)^2 \quad [5]$$

Dla wariantu CB1 również podano warunki poprawnego przeprowadzenia doświadczenia. Wymaga się zapewnienia takiej prędkości przykładania siły, aby średni przyrost współczynnika intensywności naprężenia  $K_I$  w trakcie badania nie był mniejszy niż  $0,25 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}/\text{s}$ , oraz aby czas trwania obciążenia nie był dłuższy niż 10 s od pierwszego przyrostu siły. Obliczenia prędkości siły dokonuje się na podstawie wzoru [2]. Znając już oszacowanie odporności na pęknięcie, ustala się minimalną wartość prędkości rozwarcia  $v_{CMOD}$  nacięcia z warunku:

$$v_{CMOD} > 0,006 \cdot \frac{K_{IC}^{CB1}}{E^{CB1} \cdot \sqrt{D}} \quad [6]$$

Przed przystąpieniem do analizy pomiarów należy sprawdzić odchylenia powstałej powierzchni przełomu od zakładanej płaszczyzny pęknięcia. Maksymalne dopuszczalne odchylenie powierzchni spęknięcia wynosi  $0,05D$  na długości  $0,5D$ .

Wartość  $K_{IC}^{CB}$  wyznaczoną ze wzoru [2] do badania według wariantu CB2 poddaje się korekcie uwzględniającej odstępstwa od idealnie sprężystego zachowania się materiału za pomocą tzw. stopnia nieliniowości  $p$ . Skomplikowaną procedurę wyznaczania wartości parametru  $p$  oraz wprowadzanie korekty podano w pracy Ouchterlony'ego (1988). Tak wyznaczoną wartość  $K_{IC}^{CB,C}$  oznaczono dodatkowym indeksem górnym „C”. Jeśli wartość stopnia nieliniowości nie jest większa od 0,05, to można uznać wyznaczoną odporność na pęknięcie za stałą materiałową.

### PROGRAM BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH METODĄ CB

Materiał do badań pobrano z odkrywkowej kopalni granitu w Strzegomiu na Dolnym Śląsku (ryc. 7). Złoże Grabina Śląska jest częścią granitoidowego masywu Strzegom–Sobótka, który powstał w czasie waryscyjskich ruchów górotwórczych. Złoże charakteryzuje się prostym systemem ciosu, złożonym z prostopadłych względem siebie termicznych spękań ciosowych oraz spękań pokładowych (ryc. 8). Granit ma barwę jasnoszarą, czarno plamistą, a strukturę porfirowatą. Maksymalne średnice ziaren skałenia, kwarcu i biotyту, zmierzone na płytkach cienkich, to odpowiednio 3,0 mm, 3,0 mm i 1,0 mm. Próbkę do badań pobrano z bloku granitowego o masie 18 t. Wyrdzeniowano po cztery próbki w trzech prostopadłych kierunkach (ryc. 9), ich średnie wymiary wynoszą: średnica 52,2 mm  $\pm 0,2$  mm i długość 215,5 mm  $\pm 1,4$  mm. Ze względu na brak odpowiednich tarcz wykonano nacięcia inicjalne o szerokości 2,0 mm, zamiast 1,5 mm, jak zalecane jest dla próbki o średnicy 50 mm. Uzyskana głębokość nacięcia to 7,9 mm  $\pm 0,5$  mm.



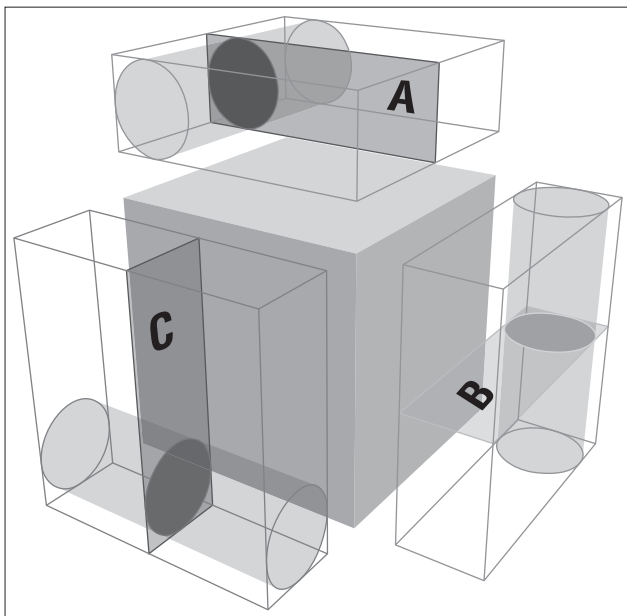
Ryc. 7. Lokalizacja odkrywkowej kopalni granitu ze złoża Grabina Śląska

Fig. 7. Location of the opencast granite mine of the Grabina Śląska deposit



Ryc. 8. Odkrywkowa kopalnia granitu. A i C oznaczają płaszczyzny spekań termicznych, B – płaszczyznę spekań pokładowych

Fig. 8. Opencast granite mine. A and C are thermal cracking planes, B – stratum cracking plane



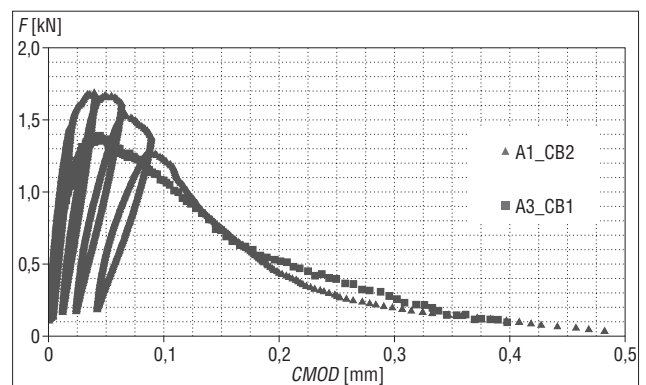
Ryc. 9. Schemat orientacji próbek rdzeniowych pobranych do badań metodą CB. A i C – płaszczyzny spekań termicznych, B – płaszczyzna spekań pokładowych

Fig. 9. Schematic orientation of the core samples taken for CB method tests. A and C – thermal cracking planes, B – stratum cracking plane

Badania wykonano w laboratorium Zakładu Geomechaniki Uniwersytetu Warszawskiego. Podstawą stanowiska do badania metodą CB jest specjalnie zaprojektowany moduł obciążający sprzężony z serwosterowaną sztywną prasą wytrzymałościową firmy MTS. Do pomiaru rozwarcia spekania *CMOD* zastosowano ekstensometr 632.02F-20 firmy MTS o dokładności 0,005 mm. Badania wstępne przeprowadzono przy prędkości siły 250 N/s, natomiast badanie właściwe wykonano przy prędkości rozwarcia spekania równej 3  $\mu\text{m/s}$ , co wynikało z wartości obliczonych ze wzoru [6] oraz wniosków z pracy Dziedzica (1999). Ostatni cykl badania prowadzono aż do chwili rozłamania próbki lub zarejestrowania zerowej wartości przykładowej siły.

## WYNIKI BADAŃ

Mimo że wykonane nacięcia inicjalne miało szerokość większą niż zalecana przez autorów metody CB, we wszystkich przeprowadzonych badaniach spekania w próbkach skalnych propagowały w wymuszonych płaszczyznach w sposób stabilny i nie przekraczały dozwolonego odchylenia względem płaszczyzny nacięcia. Przykładowe wykresy *F-CMOD* otrzymane w wyniku badania wstępnego CB1 i właściwego CB2 zamieszczono na rycinie 10. Wartości odporności na pękanie  $K_{IC}^{CB2}$  i  $K_{IC}^{CB2,C}$  oraz modułu sprężystości  $E^{CB2}$  wyznaczone dla trzech płaszczyzn pękania (A, B i C) zestawiono w tabeli 1. Na podstawie porównania otrzymanych wyników z danymi literaturowymi (Atkinson, 1989) uznano, że badany granit charakteryzuje się średnią odpornością na pękanie. Na rycinie 11 znajdują się obwiednie krzywych *F-CMOD* wyznaczonych doświadczalnie, po jednym przykładzie dla każdej z trzech płaszczyzn pękania. Stwierdzono anizotropię badanego granitu, zarówno na podstawie analizy odporności na pękanie, jak i modułu sprężystości. Anizotropia jest również widoczna w obrazach struktury geometrycznej powierzchni przełamów przedstawionych na rycinie 12. Stosunki wyznaczonych wartości parametrów mechanicznych w trzech płaszczyznach pękania A, B, C to: dla odporności na pękanie to 1,8 : 1,0 : 1,6, a dla modułu sprężystości – 2,3 : 1,0 : 1,8. Źródłem anizotropii badanego granitu może być obecność mikrospekań o uprzywilejowanym kierunku wynikającym z przeszłości tektonicznej górotworu lub ze stosowanej



Ryc. 10. Przykładowe krzywe doświadczalnych *F-CMOD* otrzymane w wyniku badania wstępnego (CB1) i właściwego (CB2) dla płaszczyzn pękania A

Fig. 10. Examples of *F-CMOD* (load-displacement) curves for preliminary (CB1) and final test (CB2) for cracking planes A

strzałowej techniki wydobywania. Wartości  $K_{IC}^{CB2,C}$  wskazują, że wprowadzona korekta niweluje różnice między płaszczyznami ciosu termicznego A i C. Wartości stopnia nieliniowości  $p$  dla wszystkich trzech płaszczyzn są większe od 0,05, co świadczy o dużym rozmiarze strefy procesowej i nie daje pewności, czy wyznaczone wartości parametru można uznać za stałe materiałowe. Wskazane byłoby zatem przeprowadzenie badań dla próbek o większej średnicy, jednak próbki takie trudno jest wykonać.

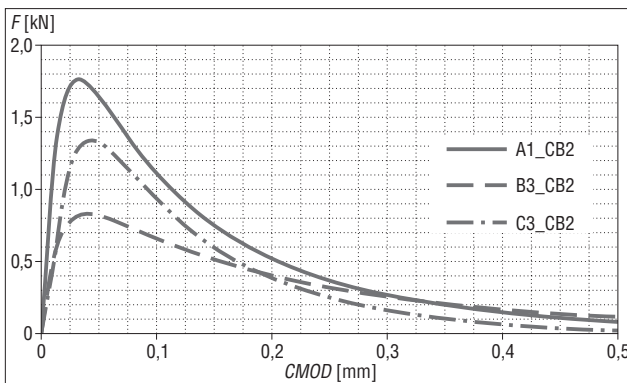
W tabeli 2 podano wartości właściwej energii pęknięcia  $G_{IF}^{CB2}$  obliczonej z zależności [1] oraz właściwej pracy pęknięcia  $R_{IF}^{CB2}$  wyznaczonej jako pole zawarte pod obwiednią krzywej  $F$ - $CMOD$  uzyskanej z pomiarów podzielone przez pole powierzchni przekroju próbki. Niezgodność wartości właściwej energii pęknięcia  $G_{IF}^{CB2}$  z właściwą pracą pęknięcia  $R_{IF}^{CB2}$  potwierdza wcześniejsze wnioski o nieliniowym zachowaniu się materiału w wierzchołku spękania. Średnia ilość energii zużytej na wykształcenie strefy pęknięcia jest podobna dla płaszczyzn ciosu termicznego A i C. Obliczono również właściwą początkową pracę pęknięcia,

**Tab. 1.** Wartości parametrów statystycznych odporności na pęknięcie  $K_{IC}^{CB2}$ ,  $K_{IC}^{CB2,C}$  i modułu Younga  $E^{CB2}$  otrzymane z badań metodą CB dla trzech płaszczyzn pęknięcia (A, B, C)

**Table 1.** Statistical parameters of fracture toughness  $K_{IC}^{CB2}$ ,  $K_{IC}^{CB2,C}$  and Young's modulus  $E^{CB2}$  from CB test for three cracking planes (A, B, C)

Parametr Parameter	A		B		C	
	$\hat{\mu}$	$\nu$ [%]	$\hat{\mu}$	$\nu$ [%]	$\hat{\mu}$	$\nu$ [%]
$E^{CB2}$ [GPa]	48,00	9,4	20,90	7,3	38,50	8,9
$K_{IC}^{CB2}$ [MPa·m <sup>1/2</sup> ]	1,43	4,3	0,78	14,0	1,24	9,4
$K_{IC}^{CB2,C}$ [MPa·m <sup>1/2</sup> ]	1,31	5,3	0,75	1,0	1,36	8,6

Objaśnienia:  $\hat{\mu}$  – średnia;  $\nu$  – współczynnik zmienności.  
Explanations:  $\hat{\mu}$  – mean;  $\nu$  – coefficient of variation.



**Ryc. 11.** Przykładowe obwiednie krzywych doświadczalnych  $F$ - $CMOD$  (badanie CB2) dla trzech płaszczyzn pęknięcia (A, B, C)

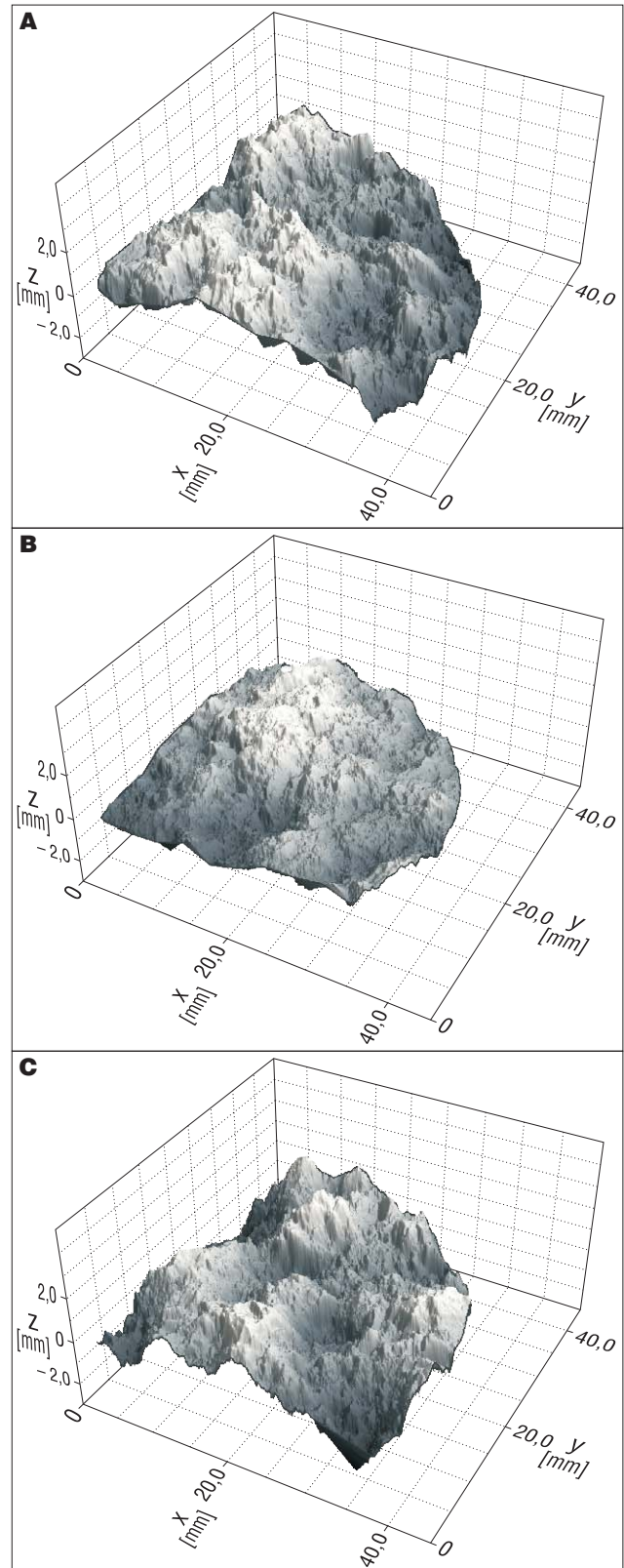
**Fig. 11.** Examples of envelope  $F$ - $CMOD$  curves (CB2 test) for three cracking planes (A, B, C)



**Ryc. 12.** A–C – przykładowe powierzchnie przełomu powstałe w wyniku przeprowadzonych badań metodą CB dla trzech płaszczyzn pęknięcia. Badania wykonano w laboratorium Katedry Geomechaniki Politechniki Śląskiej

**Fig. 12.** A–C – examples of fracture surface from CB test for three cracking planes. Tests were done in the laboratory of the Silesian University of Technology, Department of Geomechanics

oznaczoną symbolem  $R_{IF}^{CB2}$ , związaną z wykształcaniem się strefy procesowej w wierzchołku spękania. Zakończenie tej fazy następuje, gdy siła przenoszona przez próbkę osiąga wartość maksymalną. Uwagę zwraca sięgający aż 40% współczynnik zmienności wartości energii zużytej w pierwszej fazie dla płaszczyzn ciosu termicznego, co świadczy o dużej niejednorodności w skali ziarna. Porównanie właściwej pracy pęknięcia w dwóch fazach





**Tab. 2.** Wartości parametrów statystycznych początkowej i całkowitej pracy pęknięcia  $R_{IF}^{CB2}$ ,  $R_{IF}^{CB2}$  oraz właściwej energii pęknięcia  $G_{IF}^{CB2}$  otrzymane z badań metodą CB dla trzech płaszczyzn pęknięcia (A, B, C)

**Table 2.** Statistical parameters of initial and total specific work of fracture  $R_{IF}^{CB2}$ ,  $R_{IF}^{CB2}$  and specific fracture energy  $G_{IF}^{CB2}$  from CB test for three cracking planes (A, B, C)

Parametr Parameter	A		B		C	
	$\hat{\mu}$	$\nu$ [%]	$\hat{\mu}$	$\nu$ [%]	$\hat{\mu}$	$\nu$ [%]
$R_{IF}^{CB2}$ [J/m <sup>2</sup> ]	32,9	42,5	25,3	14,0	33,8	38,0
$R_{IF}^{CB2}$ [J/m <sup>2</sup> ]	102,3	8,8	56,3	12,7	78,0	1,8
$G_{IF}^{CB2}$ [J/m <sup>2</sup> ]	43,5	15,0	29,1	18,0	41,1	23,0

Objaśnienia:  $\hat{\mu}$  – średnia;  $\nu$  – współczynnik zmienności.

Explanations:  $\hat{\mu}$  – mean;  $\nu$  – coefficient of variation.

doświadczenia  $R_{IF}^{CB2}$  i  $R_{IF}^{CB2}$  wskazuje, że na rozdzielenie dwóch powierzchni pęknięcia potrzeba co najmniej jeszcze raz tyle energii, ile jej włożono w wykształcenie strefy procesowej.

## WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań wynika, że nawet dla granitu, uznawanego za statystycznie jednorodną i izotropową skałę, pomiary należy przeprowadzać z uwzględnieniem możliwych płaszczyzn anizotropii ośrodka. W przypadku wykorzystanego w analizach granitu ze złoża Grabina Śląska dla poszczególnych płaszczyzn uzyskano wartości odporności na pęknięcie  $0,78 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,  $1,24 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  i  $1,43 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ , ze współczynnikiem zmienności wynoszącym ok. 10%. Aby zidentyfikować przyczynę anizotropii, którą mogą być mikropęknięcia o uprzywilejowanym kierunku, należy przeprowadzić badania mikroskopowe.

Z charakterystyki pomiarów funkcji  $F$ - $CMOD$  oraz z dużej wartości poprawki  $p$  wynika, że w przypadku tego granitu należy stosować któryś z modeli dla ośrodków quasi-kruchych. Konieczne jest również wykonanie badań rozmiaru strefy procesowej, np. metodą emisji akustycznej, co pozwoli wyznaczyć parametry tych kryteriów.

Ze względu na duży rozmiar ziaren skał stosowane metody badawcze wyznaczania odporności na pęknięcie  $K_{IC}$  nie dają pewności, że badania przeprowadzane są w warunkach płaskiego stanu odkształcenia, oraz nie gwarantują niezależności uzyskiwanych wyników od kształtów i rozmiarów stosowanych próbek. Badania powinny być zatem wykonane dla dwóch lub więcej rozmiarów próbek, aby wyznaczyć stałą materiałową  $K_{IC}$  z uwzględnieniem efektu skali lub efektu brzegu (Hu & Duan, 2008). W przeciwnym razie otrzymana wartość może mieć jedynie charakter orientacyjny.

Przedstawiona w artykule metoda badawcza CB wymaga specjalistycznego oprzyrządowania, dużej ilości

dotatkowego sprzętu oraz dużych umiejętności manualnych zarówno technika wykonującego próbki, jak i prowadzącego badania. Poprawnie wykonane doświadczenia pozwalają jednak uzyskać wiele użytecznych informacji o badanej skale.

## LITERATURA

- ATKINSON B.K. (red.) 1989 – Fracture mechanics of rock. Acad. Press, Geol. Ser., London, s. 548.
- AYDAN O., SEIKI T., JEONG G.C. & AKAGI T. 1995 – A comparative study on various approaches to model discontinuous rock mass as equivalent continuum. [W:] Rossmann H.P. (red.) Proceedings of Mechanics of Jointed and Faulted Rock. Balkema, Rotterdam: 569–574.
- BOCHENEK A. 1998 – Elementy mechaniki pęknięcia. Cz. 1. Podręcznik dla materiałoznawców. Wyd. Politech. Częstochow., Częstochowa: 81.
- CHANG S.-H., LEE CH.-I. & JOEN S. 2002 – Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens. Eng. Geol., 66: 79–97.
- CUI Z., LIU D., AN G., SUN B., ZHOU M. & CAO F. 2010 – A comparison of two ISRM suggested chevron notched specimens for testing mode-I rock fracture toughness. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 47: 871–876.
- DZIEDZIC A. 1999 – Nowa metoda badania kruchego pęknięcia skał. Prz. Geol., 47: 927–932.
- ELICES M., GUINEA G.V., GÓMEZ J. & PLANAS J. 2002 – The cohesive zone model: advantages, limitations and challenges. Eng. Fract. Mech., 69: 137–163.
- HOEK E. & BROWN E.T. 1997 – Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 34: 1165–1186.
- HU X. & DUAN K. 2008 – Size effect and quasi-brittle fracture: the role of FPZ. Int. J. Fract., 154: 3–14.
- LAKSHMIKANTHA M.R., PRAT P.C. & LEDESMA A. – Relation between tensile strength and fracture toughness for soils and rocks. [W:] Pereira J.M. i in. (red.) 3<sup>rd</sup> International Workshop of Young Doctors in Geomechanics. École des Ponts ParisTech, France: 75–78.
- LEHNER F.K. & KACHANOV M. 1995 – On the stress-strain relations for cracked elastic materials in compression. [W:] Rossmann H.P. (red.) Proceedings of Mechanics of Jointed and Faulted Rock. Balkema, Rotterdam: 49–61.
- LISZKOWSKI J. & STOCHLAK J. (red.) 1976 – Szczelinowatość masywów skalnych. Wyd. Geol., Warszawa, s. 312.
- NEIMITZ A. 1998 – Mechanika pęknięcia. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa, s. 434.
- OUCHTERLONY F. 1988 – Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 25: 71 96.
- TANG C.A., LIU H., LEE P.K.K., TSUI Y. & THAM L.G. 2000 – Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression – part I: effect of heterogeneity. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 37: 555–569.
- ULUSAY R. & HUDSON J.A. (red.) 2007 – The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006. ISRM Turkish Nat. Group, Ankara, Turkey, s. 628.
- WANG Q.Z., JIA X.M., KOU S.Q., ZHANG Z.X. & LINDQVIST P.-A. 2004 – The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41: 245–253.
- WNUK M. 2008 – Podstawy mechaniki pęknięcia. Wyd. Nauk. Akapit, Kraków, s. 294.

Praca wpłynęła do redakcji 9.11.2012 r.

Akceptowano do druku 1.03.2013 r.