

*Jerzy Cieślak\**, *Mariusz Młynarczuk\*\**

## WYNIKI WSTĘPNYCH ANALIZ ZMIAN STRUKTURY PRÓBEK DOLOMITU Z LGOM W TEŚCIE JEDNOOSIOWEGO ŚCISKANIA NA PODSTAWIE BADAŃ STEREOLOGICZNYCH I REJESTROWANYCH TRWAŁYCH ODKSZTAŁCEŃ\*\*\*

---

### 1. Wstęp

W referacie zaprezentowano wyniki wstępnych analiz dotyczących zmian pierwotnej struktury dolomitu z LGOM. Analizy dokonano na podstawie wyników badań stereologicznych naturalnej i naruszonej obciążeniem struktury oraz makroskopowego pomiaru trwałych odkształceń osiowych i poprzecznych rejestrowanych w trakcie testu jednoosiowego ściskania z odciażaniem. Na obecnym etapie badań przy wykorzystaniu narzędzi stereologicznych nie było możliwe ilościowe ujęcie rozwoju spękań, zaprezentowano jedynie jakościowe różnice pomiędzy stanem pierwotnym i odpowiadającym pewnej fazie rozwoju spękań (na progu dylatacji bezwzględnej). Niemniej uzyskane wyniki badań wyraźnie wskazują na anizotropię zniszczenia, tzn. na anizotropowy rozwój spękań w trakcie obciążenia [2].

### 2. Podstawowe informacje o przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych

Poddane badaniom walcowe próbki dolomitu o wymiarach  $h = 80$  mm  $d = 40$  mm, zostały wycięte z próby skały pobranej z wyrobiska eksploatacyjnego ZG „Polkowice”. Analiza petrograficzna przeprowadzona na szlifach cienkich wykonanych z próbek skały wykazała, że próbę stanowił drobno, nierówno krystaliczny dolomit ilasty, o zbitej strukturze, którego

---

\* Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

\*\* Instytut Mechaniki Górnotworu, Polska Akademia Nauk, Kraków

\*\*\* Praca została wykonana dzięki finansowaniu z badań własnych AGH, nr 10.10.100.301

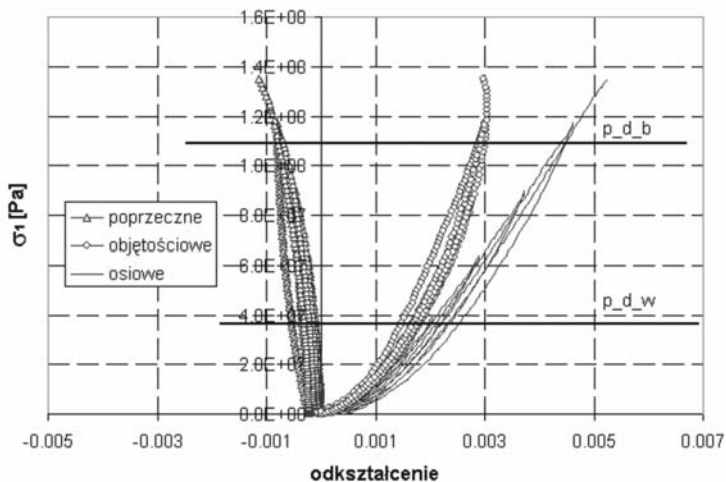
drobne nieprzekraczające wielkości 0,06 mm kryształły (stanowiące 90% skały), spojone były drobnokrystaliczną masą ilasto-węglaną.

Wytrzymałościowe badania laboratoryjne wykonane zostały w Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH, za pomocą tzw. sztywnej maszyny wytrzymałościowej MTS-815, z systemem sterowania TestStar. Odształcenia osiowe mierzono za pomocą czujników analogowych umieszczonych pomiędzy płytami obciążającymi próbkę, zaś odształcenia obwodowe za pomocą ekstensometru łańcuszkowego.

Przebadano 8 próbek dolomitu według procedury, która składała się z kilku (zazwyczaj 5 lub 6) cykli obciążenia i odciążenia, o równej wartości odształcenia osiowego ( $\Delta\epsilon_1 = 0,001$ ), aż do momentu osiągnięcia granicy wytrzymałości na ściskanie. Badanie wykonano przy stałej

**TABELA 1**  
**Zestawienie parametrów mechanicznych badanych dolomitu**

Nr	$R_c$ [MPa]	$\epsilon_r(R_c)$ [‰]	$E$ [GPa]	$\nu$ [—]	Próg dylatacji bezwzględny [MPa]	Próg dylatacji względny [MPa]
1	110	5,0	28,2	0,27	82,7	29,9
2	122	5,8	27,1	0,28	92,7	36,4
3	106	5,2	26,2	0,32	76,3	23,9
4	118	5,7	23,9	0,28	90,1	30,9
5	113	5,9	21,6	0,28	83,0	24,7
6	134	5,9	26,2	0,25	100,5	30,7
7	136	3,3	32,0	0,19	115,2	33,9
8	—	—	25,6	0,21	103,2	29,2



**Rys. 1.** Przykładowa charakterystyka  $\sigma$ - $\epsilon$  uzyskana dla próbek dolomitu z odciążeniem

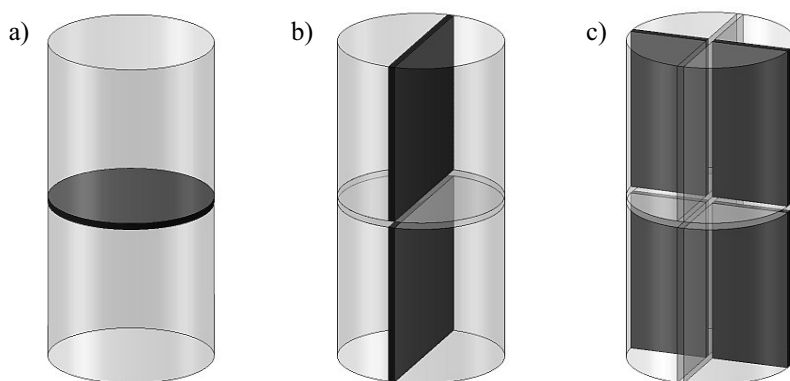
prędkości odkształcenia  $1 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Wyniki pomiarów rejestrowano elektronicznie, a następnie poddawano obróbce i analizie.

Oznaczona na podstawie wyników badań 7 próbek (jedną próbkę po osiągnięciu progu dylatacji bezwzględnej poddano analizie stereologicznej) średnia wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie  $R_c$  wynosiła 119,7 MPa (odchylenie standardowe 10,8 MPa).

### 3. Analiza stereologiczna nieobciążonej i obciążonej próbki dolomitu

Dla próbki nr 8, której obciążanie po uzyskaniu progu dylatacji bezwzględnej prze-rwano, wycięto szlify cienkie (rys. 2), po czym na ich podstawie przeprowadzono analizę stereologiczną, której celem był ilościowy opis rozwoju sieci spękań w próbkach poddanych obciążeniom. Podobne analizy przeprowadzono dla nieobciążonej próbki skały. Szlify do badań wycięto w trzech wzajemnie prostopadłych płaszczyznach i wykonano je w taki sposób, aby zachować identyczne ich ukierunkowanie dla próbki obciążonej oraz nieobciążonej.

Wszystkie analizy stereologiczne wykonane zostały w Pracowni Mikrometryki IMG PAN w Krakowie.

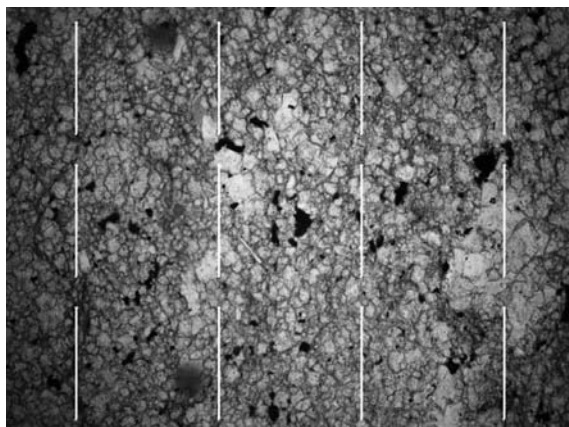


Rys. 2. Przekroje szlifów cienkich: a) płaszczyzna X, b) płaszczyzna Y c) płaszczyzna Z

Ogląd wykonanych szlifów prowadził do wniosku, że liczba dużych i wyraźnych szczelin, powstałych w wyniku stosowanych obciążeń, jest stosunkowo niewielka. Uznano także, że stosowane obciążenia prowadzą do osłabienia kontaktów między sąsiadującymi ze sobą ziarnami, co objawia się widocznymi na zdjęciach rozszerzeniami granic międzyziarnowych. Dlatego w trakcie badań analizowano zarówno ślady spękań, jak i te granice międzyziarnowe, które uznano za rozszerzone. W dalszej części rozważań mianem spękań będziemy określać te dwa typy nieciągłości.

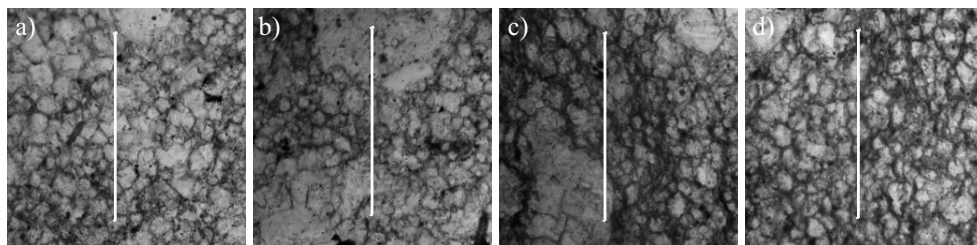
Analizę szlifów cienkich prowadzono na mikroskopie polaryzacyjnym ZEISS przy powiększeniu  $200\times$ . Na każdym ze szlifów cienkich sfotografowano 24 równomiernie rozmieszczone pola o wielkościach około  $0,87 \times 0,65 \text{ mm}$ . Pokryto nimi od około 1% do 4% powierzchni szlifów, w zależności od ich wielkości. Na każde z pól pomiarowych naniesiono

po 12 zorientowanych linii pomiarowych (rys. 3). Stosunek ilości przecięć tych linii ze śladami spękań, odniesiony do sumarycznej długości linii pomiarowych, daje parametr zwany szczelinowatością liniową [4]. Istnieje również możliwość wykorzystania różnie ukierunkowanych linii pomiarowych, co doprowadzić może do detekcji anizotropii sieci spękań.



**Rys. 3.** Przykładowe zdjęcie badanego dolomitu z naniesionymi liniami pomiarowymi

Niestety stopień skomplikowania struktury uniemożliwił wiarygodne zliczenie liczby przecięć linii pomiarowych ze śladami spękań. Dlatego też postanowiono przeprowadzić oszacowanie stopnia spękania struktury, proponując wprowadzenie do analizy wag mówiących o spękanu struktury przypadającym na pojedynczą linię pomiarową. Przyjęto, że gdy linia pomiarowa przecina strukturę niespękaną, przypisujemy jej wagę 0, gdy przecina strukturę lekko spękaną przypisujemy wagę 1, następnie wagę 2, aż do wagi 3, która świadczy o nałożeniu linii pomiarowej na strukturę bardzo spękaną. Przykłady tak zdefiniowanych wag zaprezentowano na rysunku 4. Należy podkreślić, że wagi te dotyczą przecięcia linii pomiarowej wyłącznie ze strukturą naruszoną, czyli np. z rozszerzonymi granicami ziaren, jak ma to miejsce na rysunku 4d. Nie jest oczywiście brane pod uwagę przecięcie linii pomiarowej z nienaruszonymi granicami ziaren jak ma to miejsce na rysunku 4a, dla którego waga wynosi 0.



**Rys. 4.** Przykładowe linie pomiarowe dla których przyjmowano następujące wagi spękań: a) = 0, b) = 1, c) = 2, d) = 3

Dla zdjęć wykonanych dla każdego ze szlifów, zarówno próbki nieobciążonej, jak i obciążonej, wykonano obliczenia, wykorzystując zaproponowaną metodykę. W wyniku pomiarów otrzymano rezultaty, które zestawiono w tabeli 2. Znajdują się w niej średnie wagi opisujące stopień spękań przypadające na jedną linię pomiarową. Analiza tabeli prowadzi do wniosku, że stopień spękania struktury uległ powiększeniu na skutek przyłożenia obciążenia. Jakkolwiek dla kierunku Z wzrost ten był niewielki, to dla kierunku X wynosił on około 27%, a dla kierunku Y: 54% w odniesieniu do spękań pierwotnych. Analizując natomiast wyniki osiągnięte wyłącznie dla próbki obciążonej, widać, że współczynnik wagi spękań był niemal identyczny dla kierunków Y i Z, oraz wyraźnie większy dla kierunku X. Uzyskane wyniki świadczą o anizotropowym charakterze rozwoju spękań.

TABELA 2

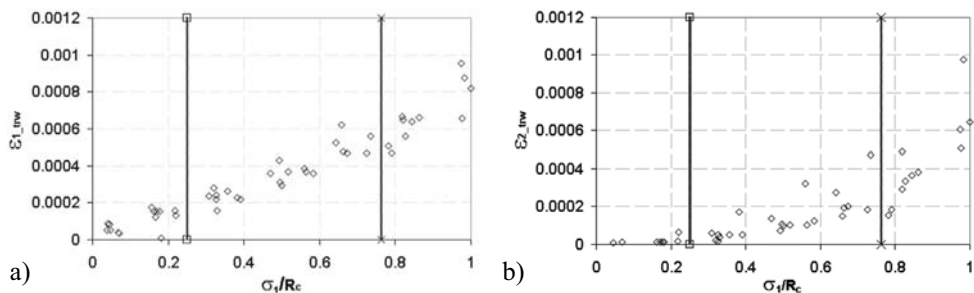
**Średnie wagi opisujące stopień spękań przypadające na jedną linię pomiarową**

		kierunek X	kierunek Y	kierunek Z
próbka nieobciążona	waga spękań	1,17	0,83	1,28
	<i>odchylenie standardowe</i>	<i>0,014</i>	<i>0,010</i>	<i>0,018</i>
próbka obciążona	waga spękań	1,49	1,28	1,30
	<i>odchylenie standardowe</i>	<i>0,016</i>	<i>0,014</i>	<i>0,013</i>
różnica procentowa wagi spękań [%]		27,3	54,2	1,6

#### 4. Trwałe odkształcenia poprzeczne jako miara rozwoju spękań w próbkach dolomitu

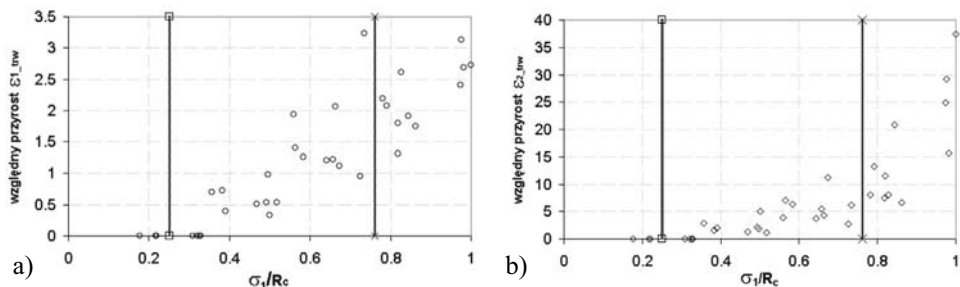
Trwałe odkształcenia pojawiające się w obciążonej próbce (praktycznie na każdym etapie obciążenia) są efektem pęknięcia oraz propagacji pierwotnych i nowo powstałych pustek i szczelin, jak również zjawiska poślizgu i tarcia (na powierzchniach spękań i ziaren) występującego wewnątrz skały. Wydaje się jednak, że odkształcenia te mierzone na kierunku osiowym i poprzecznym są wywołane innymi efektami propagujących spękań. Trwałe odkształcenia poprzeczne (przyrost pierwotnej średnicy próbki) zdominowane są poprzez otwieranie się propagujących na kierunku działania siły spękań tzw. wing crack. Spękania te mogą być wywołane poślizgami na granicach ziaren i istniejących szczelin oraz degradacją pierwotnej struktury skały [1, 5–10], które to z kolei powodują podłużne trwałe odkształcenia (skrócenie długości próbek).

Makroskopowo opisany efekt odznacza się wyraźną dylatacją i szybkim przyrostem trwałych odkształceń poprzecznych. Można to zauważyć na wykresie tych odkształceń (rys. 5) już po przekroczeniu ok. 30% wytrzymałości na ściskanie ( $\sigma_c/R_c = 0,3$ ). Wzrost ten jest efektem otwierania się szczelin i propagacji nowych spękań. Trwałe odkształcenia podłużne rejestrowane są praktycznie od początku procesu obciążenia i choć ich wzrost nie jest stały w całym przedziale obciążenia, to trudno wyznaczyć jakiś przedział szczególnie intensywnego ich przyrostu. Liniami pionowymi na rysunkach 5a i b oraz 6a i b oznaczono odpowiednie progi dylatacji względnej i bezwzględnej.



**Rys. 5.** Wykres trwałych odkształceń próbek: a) podłużnych, b) poprzecznych w całym przedziale obciążenia

Trwałe odkształcenia wyznaczone na progu dylatacji względnej zostały zaliczone jako efekt pierwotnych spękań i pustek występujących w próbce skalnej przed jej obciążeniem. Wartość tych odkształceń, jaką wyznaczono na progu dylatacji bezwzględnej, interpretowano w ten sposób, że uwzględnia ona zarówno spękania pierwotne, jak i ich przyrost na skutek obciążenia. Różnica pomiędzy wartością trwałych odkształceń pomierzonych na progu dylatacji bezwzględnej i na progu dylatacji względnej odniesiona do trwałych odkształceń na progu dylatacji względnej interpretowano jako względny przyrost spękań w trakcie obciążania próbki (rys. 6a, 6b).



**Rys. 6.** Wykres względnych przyrostów trwałych odkształceń próbek a) podłużnych, b) poprzecznych w całym przedziale obciążenia

Jak można zauważyć na rysunku 6a, w przedziale pomiędzy progiem dylatacji względnej i bezwzględnej, na kierunku osiowym odnotowano prawie dwukrotny wzrost ilości spękań w odniesieniu do wartości pierwotnej (wartość średnia wyliczona dla wszystkich próbek wyniosła 1,66). W przypadku odkształceń poprzecznych (rys. 6b) ich względny przyrost w omawianym przedziale obciążeń był prawie dziesięciokrotny, przy czym na granicy wytrzymałości na ściskanie można szacować go na dwudziestopięciokrotny. Średnie wartości przyrostów w analizowanym przedziale dla wszystkich próbek wyniosła 6,49.

## 5. Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki dwóch różnych analiz określających rozwój spękań towarzyszący procesowi obciążania próbek dolomitu.

W przypadku analizy stereologicznej, zastosowana metoda może bezpośrednio opisywać rozwój spękań poprzez ich zliczanie, bądź jak w przypadku niniejszej pracy poprzez przyjęcie do analizy wag, opisujących spękanie struktury na pojedynczej linii pomiarowej. Przedstawione wyniki obrazują jakościowo rozwój spękań w analizowanych trzech prostopadłych przekrojach. Dzięki takiej metodyce możliwe było również prześledzenie anizotropii rozwoju spękań towarzyszącej testom jednoosiowego ściskania (dominującym jest wtedy proces rozwoju spękań na kierunku działania obciążenia). W literaturze zjawisko to nosi nazwę anizotropii nabytej [2]. Niestety specyfika skały oraz zbyt mały poziom obciążenia uniemożliwiły dokładną ilościową analizę gęstości i rozkładu spękań.

W drugim przypadku, analizy trwałych odkształceń na kierunku osiowym i poprzecznym, zaproponowana interpretacja wyników, może jedynie dla odkształceń poprzecznych być bezpośrednio odniesiona do efektów związanych z rozwieraniem się istniejących, propagujących i nowo powstałych spękań i szczelin oraz opisywać rozwój spękań w przekroju poprzecznym próbki (założono tu, iż proces pęknięcia jest dominującym mechanizmem zniszczenia w przypadku jednoosiowego ściskania).

Należy zaznaczyć, iż obie z przedstawionych analiz opisują różne efekty tego samego zjawiska (rozwoju spękań). Ich wyniki jednak nie mogą być bezpośrednio ilościowo porównywane. Wydaje się, że jedynie wyniki dotyczące trwałych odkształceń poprzecznych można jakościowo odnieść do wyników w przekroju X analiz stereologicznych. Wyniki prezentowanych tu analiz znajdują zastosowanie przy definiowaniu geometrycznej miary uszkodzenia, przyjętej do opisu zjawisk zniszczenia i degradacji ośrodków w teorii kontynuualnej mechaniki zniszczenia [3]. Na obecnym etapie badań prezentowane wyniki należy jednak traktować jako wstępne.

## LITERATURA

- [1] *Bieniawski Z.T.*: Mechanism of Brittle Fracture of Rock. Parts I, II, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. vol. 4, 1967
- [2] *Ganczarski A.*: Problemy nabytej anizotropii w ujęciu sprężonej termomechaniki uszkodzeń. Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria Podstawowe Nauki Techniczne, nr 25 Kraków 2001
- [3] *Kachanov L.M.*: Time of Rupture Process under Creep Conditions. Izv. AN SSR, Otd. Tekh. Nauk, 8, 1958, pp. 26–31
- [4] *Kidybiński A.*: Podstawy geotechniki kopalnianej. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1982
- [5] *Olsson W., Peng S.*: Microcrack Nucleation in Marble. Int. J Rock Mech. Min Sci & Geomech Abstr vol. 13. 1976, pp. 53–59
- [6] *Paterson M.S., Wong T.F.*: Experimental Rock Deformation — The Brittle Field. Springer-Verlag 2005

- [7] *Tapponnier P., Brace W.F.*: Development of Stress-induced Microcracks in Westerly Granite. Int. J Rock Mech. Min Sci & Geomech Abstr vol. 13, 1976, pp. 103–112
- [8] *Thompson B., Young R.P., Lockner D.*: Fracture in Westerly Granite under AE Feedback and Constant Strain Rate Loading: Nucleation, Quasi-static Propagation, and the Transition to Unstable Fracture Propagation. Pure and Applied Geophysics, vol. 163, 2006, pp. 995–1019
- [9] *Wawersik W.R., Fairhurst C.*: A Study of Brittle Rock Fracture in Laboratory Compression Experiments. Int. J Rock Mech. Min Sci & Geomech Abstr 7, 1970, pp. 561–575
- [10] *Wong T.F.*: Micromechanics of Faulting in Westerly Granite. Int. J Rock Mech. Min Sci & Geomech Abstr vol. 19, 1982, pp. 49–64