

*Jerzy Cieślak\**

## ANALIZA ROZWOJU USZKODZENIA I TRWAŁYCH ODKSZTAŁCEŃ PRÓBEK DOLOMITU PODDANYCH QUASISTATYCZNYM JEDNOOSIOWYM OBCIĄŻENIOM\*\*

---

### **1. Fenomenologiczny opis procesu zniszczenia skał w próbie jednoosiowego ściskania**

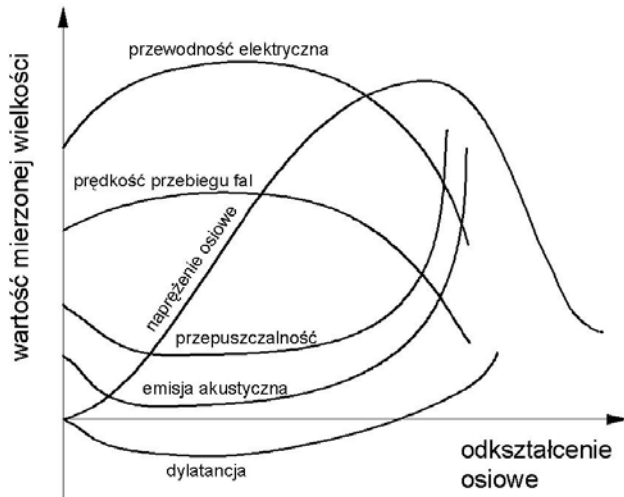
Proces deformacji i postępującego zniszczenia próbek skalnych w próbie jednoosiowego ściskania był w przeszłości tematem wielu prac i badań. Można zaryzykować wręcz stwierdzenie, że jest procesem dość dobrze zbadanym zarówno na poziomie makroskopowym, jak i mikroskopowym.

Makroskopowo proces zniszczenia można śledzić głównie na podstawie charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej. Charakterystyka ta daje możliwość wyznaczenia pewnych progów obciążenia, odpowiadających charakterystycznym cechom odkształcania się próbek skał, traktowanych zwykle jako ośrodek ciągły i jednorodny. Ze względu na obserwację procesu zniszczenia próbek najbardziej istotna wydaje się analiza trzech progów obciążenia odpowiadających zjawisku dylatacji względnej – początku procesu stabilnego rozwoju spękań, dylatacji bezwzględnej, będącej „zwiastunem zniszczenia skały” [9] początkującej proces niestabilnego rozwoju spękań oraz progu odpowiadającego granicy wytrzymałości na ściskanie. Wielkości te wyznaczane na podstawie obliczonych naprężeń osiowych i pomiaru odkształceń osiowych i poprzecznych próbek szczegółowo opisano w pracach [1, 3, 8, 9]. Innym sposobem obserwacji procesu zniszczenia jest analiza pewnych wielkości fizycznych ulegających zmianie w trakcie przeprowadzanego testu wytrzymałościowego, takich jak przepuszczalność skały, prędkości przebiegu fal sprężystych [5, 13], przewodności elektrycznej, czy emisji akustycznej [11, 15] w trakcie obciążania skał. Schematycznie zmianę mierzonych w trakcie badania wielkości fizycznych wraz z rozwojem zniszczenia próbek skalnych przedstawiono na rysunku 1 [13].

---

\* Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, AGH, Kraków.

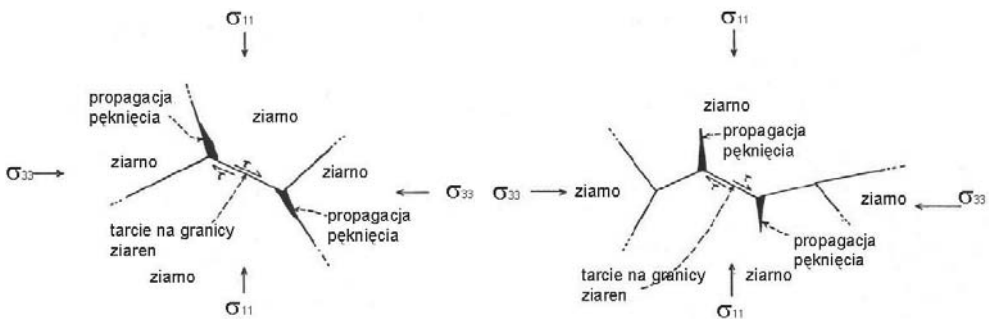
\*\* Praca powstała w ramach badań własnych (nr 10.10.100.301) prowadzonych w Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH.



**Rys. 1.** Zmiana mierzonych w trakcie badania wielkości fizycznych wraz z rozwojem zniszczenia próbek skalnych [13]

Metody te pośrednio obrazują zmiany struktury wewnętrznej, a ich istotną cechą jest również to, że uśredniają proces zniszczenia na całą objętość próbek.

W opisie mikroskopowym procesu deformacji i zniszczenia, zarówno przy obciążeniach jednoosiowych, jak i trójosiowych, skały przestają być traktowane jako ośrodek jednorodny i ciągły. Traktuje się je wtedy już jako zbiór ziaren mineralów o odpowiedniej strukturze i teksturze, spękań oraz mniejszych lub większych mikroporów. Proces rozwoju i przebiegu zniszczenia można śledzić obecnie głównie na podstawie stereologicznych analiz obrazów mikroskopowych zniszczonych próbek skalnych, bądź też przy wykorzystaniu nowoczesnej aparatury, np. tomografów komputerowych. W pracach [12, 14, 6, 13] dokonano bardzo dokładnej charakterystyki procesu powstawania i rozwoju spękań, propagacji istniejących spękań i łączenia się ich w zespoły, z których powstaje jedno lub wiele makropęknięć.



**Rys. 2.** Model propagacji spękań na granicy i wewnątrz ziaren [2]

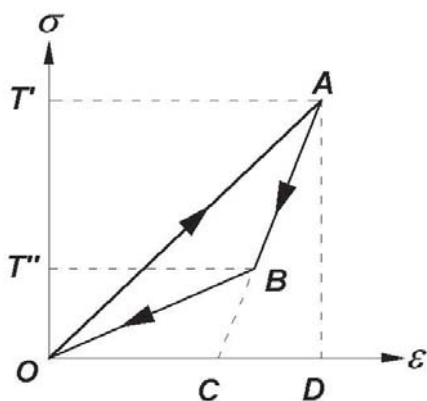
Proces nukleacji i propagacji spękań może przebiegać śródziarnowo lub międzyziarnowo i jest różny dla różnych typów skał [2, 6, 12, 13]. Dominującą rolę w procesie propagacji pęknięć odgrywają pierwotne spękania i szczeliny zorientowane na kierunku działania obciążenia, które propagują między ziarnami lub poprzez ziarna w postaci tzw. pęknięć skrzydełkowych (*wing crack*) (rys. 2).

Poza procesem powstawania i rozwoju spękań w skałach dochodzi również do mikro-poślizgów na granicach ziaren i powierzchniach nowych spękań, a przy odpowiednim poziomie obciążenia, w samych ziarnach, mogą pojawić się mikropasma ścinania (odkształcenia typowo plastyczne). Opis tych dwóch różnych procesów – z jednej strony pęknięcia, z drugiej poślizgu i uplastycznienia – wymaga rozdzielenia efektów obu zjawisk i ich ilościowej analizy.

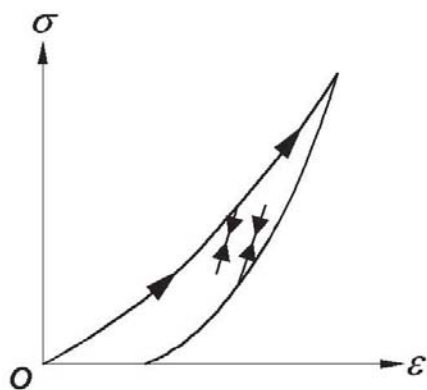
## 2. Pomiary odkształceń trwałych oraz bilans energii w próbie wytrzymałościowej jednoosiowego ściskania z odciążaniem

Można założyć, że nieodwracalne odkształcenia próbki, jak opisano to w poprzednim rozdziale, są zasadniczo efektem dwóch dominujących mechanizmów zniszczenia – poślizgu na granicach ziaren i powierzchniach spękań oraz otwierania się nowych i propagacji już istniejących pęknięć podczas obciążenia.

Trwałe odkształcenia pojawiają się w skałach już na początkowym etapie obciążenia, jeszcze przed osiągnięciem progu dylatacji względnej. Dzieje się tak na skutek zamykania pierwotnych mikroszczelin oraz tarcia na ich ściankach [5, 7]. Efektem tych zjawisk zarówno w przypadku jednoosiowego, jak i trójosiowego ściskania z odciążeniem jest pętla obciążenia pokazana na rysunku 3 (ścieżka obciążenia i odciążenia nie pokrywają się).



**Rys. 3a.** Pętla obciążenia i odciążenia przy jednoosiowym ściskaniu ciała (próbki) zawierającego pojedynczą szczelinę zamkniętą, nachyloną pod kątem większym niż  $0^\circ$  i mniejszym niż  $90^\circ$  względem kierunku przyłożonego obciążenia [7]



**Rys. 3b.** Pętla obciążenia i odciążenia przy jednoosiowym ściskaniu dla zespołu spękań o różnej orientacji [7]

Przyczyny i przebieg powstawania pętli towarzyszącej obciążeniu i odciążeniu dla pojedynczej zamkniętej szczeliny, w sprężystym ciele, nachylonej pod kątem większym niż  $0^\circ$  i mniejszym niż  $90^\circ$  względem kierunku przyłożonego obciążenia, zostały dokładnie przeanalizowane przez Jaegera i Cooka [7], na podstawie teoretycznych rozwiązań zaproponowanych przez Walsha [16, 17].

W trakcie jednoosiowego ściskania do wartości obciążenia  $T'$  (odcinek OA na rysunku 3a) ośrodek zachowuje się liniowo sprężysto z tzw. efektywnym modułem Younga\*. Po osiągnięciu wartości  $T'$  obciążenia i rozpoczęciu procesu odciążania (odcinek AB na rys. 3a), na skutek zmiany zwrotu siły tarcia na stykających się powierzchniach szczeliny, zmianie ulega nachylenie charakterystyki  $\sigma$ - $\varepsilon$ . Moduł sprężystości podłużnej wyznaczony z tej części charakterystyki odpowiada modułowi Younga ośrodka bez szczeliny. Przy wartości odciążenia odpowiadającej pewnej wartości  $T''$ , na skutek przekroczenia krytycznej wartości naprężenia stycznego na powierzchniach szczeliny rozpoczyna się proces poślizgu ścianek po sobie, czemu odpowiada kolejna zmiana nachylenia charakterystyki  $\sigma$ - $\varepsilon$  (odcinek BO charakterystyki).

Przeprowadzona przez Jaegera i Cooka analiza energii odkształcenia osiowego pozwoliła stwierdzić, że pole trójkąta ADC, powstałego na skutek przedłużenia prostej AB do punktu C na osi odkształcenia osiowego, odpowiada sprężystej energii zgromadzonej w ciele bez szczeliny. Pole pomiędzy linią obciążenia OA a linią ABC określa energię odkształcenia osiowego odpowiadającą procesowi deformacji szczeliny i dyssypacji na tarcie pomiędzy powierzchniami szczeliny, zaś pole pomiędzy linią obciążenia OA oraz linią odciążenia ABO określa energię utraconą wyłącznie na efekt tarcia pomiędzy powierzchniami szczeliny.

Przytoczona powyżej za Jaegerem i Cookiem analiza przeprowadzona dla pojedynczej szczeliny dobrze odpowiada zachowaniu próbki skalnej (zawierającej spękania o różnej orientacji) poddanej jednoosiowemu ściskaniu (rys. 3b).

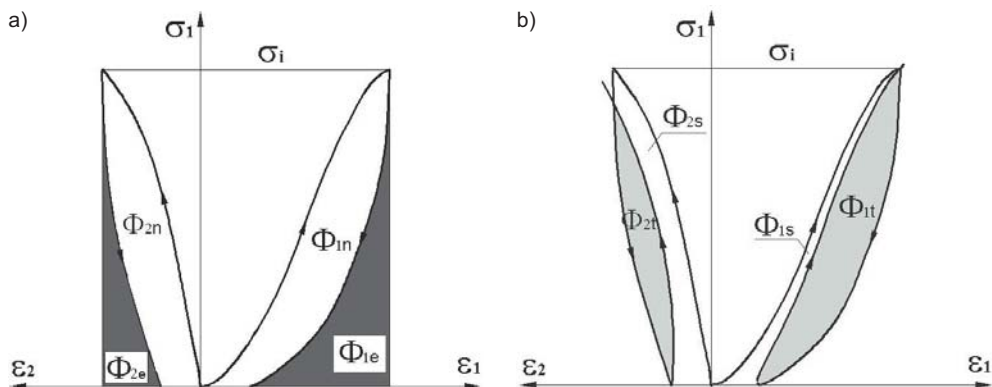
Po przekroczeniu progu dylatacji względnej w próbce skalnej następuje propagacja spękań, poślizg na istniejących i nowopowstałych powierzchniach spękań oraz ziarnach, niestabilny rozwój spękań, a następnie zniszczenie próbki w postaci makropęknięcia lub ścicia. Efektem tych zjawisk na poszczególnych poziomach obciążenia są trwałe odkształcenia, zarówno pionowe, jak i poziome próbek, rejestrowane przy odciążeniu. Badania stereologiczne obrazów mikroskopowych prowadzone przez Hallbauera [6] wykazały jednak, że objętość zliczonych spękań zarejestrowanych w przekroju poprzecznym odciążonej próbki zaledwie w małej części odpowiada poprzecznym trwałym odkształceniom.

Pojawia się więc pytanie, jaki udział w trwałych deformacjach próbek mają poszczególne mechanizmy zniszczenia (tarcie na powierzchniach spękań oraz pęknięcie)?

Pomocna w tym względzie może być analiza bilansu energii właściwej w próbce obciążenia próbki z odciążaniem (rys. 4a). Pole zawarte między odpowiednią charakterystyką i osią odkształcenia określa energię właściwą odkształcenia podłużnego  $\Phi_1$  i poprzecznego  $\Phi_2$  próbki.

---

\* Efektywny oznacza tu moduł Younga ośrodka zawierającego szczelinę i jest mniejszy od modułu Younga ośrodka bez szczeliny.



**Rys. 4.** Podział energii właściwej w przedkrytycznej części charakterystyki przy obciążeniu i odciążeniu próbki (a) oraz przy obciążeniu odciążeniu i ponownym obciążeniu (b)

W bilansie energii właściwej odkształcenia próbki biorą udział: energia sprężysta odkształcenia  $\Phi_e$  oraz całkowita energia utracona na różnego rodzaju procesy zniszczenia  $\Phi_n$  [8]. W tej pracy dodatkowo energię utraconą na różnego rodzaju procesy zniszczenia  $\Phi_n$ , podzielono na energię zdysypowaną na tarcie wewnątrz skały [7] oznaczoną odpowiednio  $\Phi_{1t}$  i  $\Phi_{2t}^*$ , oraz energię utraconą na powstanie nowych spękań oznaczoną jako  $\Phi_{1s}$  i  $\Phi_{2s}$ :

$$\Phi_{1n} = \Phi_1 - \Phi_{1e}$$

$$\Phi_{1t} = \Phi_{1obc2} - \Phi_{1e}$$

$$\Phi_{1s} = \Phi_1 - \Phi_{1obc2}$$

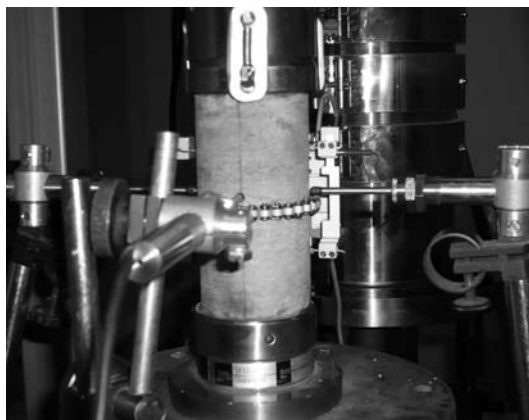
Bilans poszczególnych energii na poszczególnych poziomach obciążenia  $\sigma_i$  pozwala prześledzić cały proces zniszczenia postępujący w próbce z rozdzieleniem zjawisk odpowiadających tarcu wewnątrz skały i propagacji spękań zarówno przed-, jak i pokrytycznej w części.

Zasadniczym celem tego artykułu jest analiza procesu zniszczenia na poziomie makroskopowym oraz procesów mikromechaniki, których efekt jest mierzony makroskopowo w postaci odkształceń trwałych próbek oraz obliczany w postaci poszczególnych rodzajów energii z pętli obciążenia, w przedkrytycznej części obciążenia próbek dolomitu. Analizy te wykonano dla różnych prędkości odkształcenia osiowego próbek. Badania laboratoryjne przeprowadzono na 10 próbkach dolomitu z LGOM poddanych jednoosiowemu ścisnaniu z odciążeniem, przy trzech prędkościach odkształcenia osiowego:  $1 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,  $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  oraz  $1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

\* W rzeczywistości energia utracona na tarcie na danym poziomie obciążenia równa jest połowie  $\Phi_{1t}$  oraz  $\Phi_{2t}$ .

### 3. Opis warunków przeprowadzonych badań laboratoryjnych

Badania laboratoryjne wykonane zostały w Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH. Wykorzystano do tego celu sztywną maszynę wytrzymałościową MTS-815 z systemem sterowania TestStar. Odształcenia osiowe mierzono za pomocą czujnika analogowego umieszczonego pomiędzy płytami obciążającymi próbkę (rys. 5), zaś odształcenia obwodowe za pomocą ekstensometru łańcuskowego i czujnikami analogowymi.



Rys. 5. Układ pomiarowy czujników osiowych i obwodowych w sztywnej maszynie wytrzymałościowej MTS 815

Walcowe próbki laboratoryjne o wymiarach  $h = 80$  mm  $d = 40$  mm zostały wycięte z próby skały pobranej z wyrobiska eksploatacyjnego ZG „Polkowice”. Próbę skały pocięto na mniejsze fragmenty metodą obróbki mechanicznej na sucho, za pomocą piły mechanicznej, a następnie za pomocą tokarki dokonano dokładnej obróbki próbek.

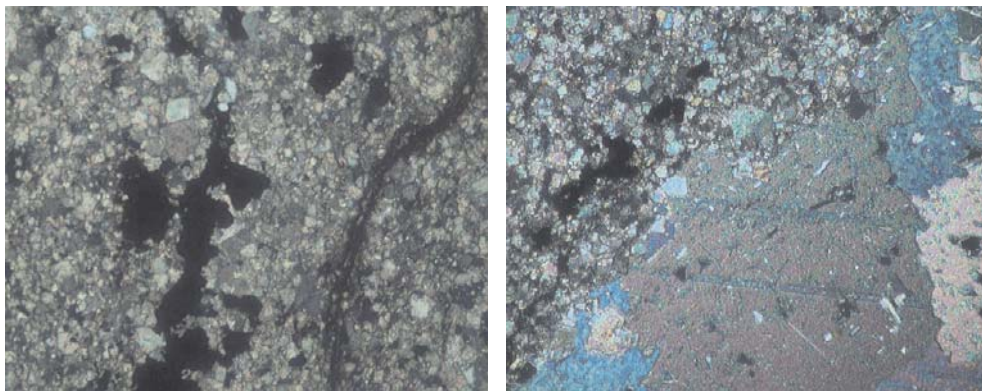
Wszystkie próbki zostały zmierzone suwmiarką oraz zważone na wadze elektronicznej, co pozwoliło wyznaczyć ich gęstość objętościową. Dodatkowo za pomocą kolby Le Chateliera wyznaczono gęstość właściwą, dzięki czemu możliwe było oznaczenie porowatości dolomitu. Wyniki tych badań zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Zestawienie wyników badań gęstości i porowatości dolomitu (wartość średnia z serii oznaczeń)

| Rodzaj skały   | $\rho_o$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | $\rho_w$<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Porowatość<br>[%] |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| Dolomit ilasty | 2761                             | 2834                             | 2,575             |

Analiza petrograficzna wykonana na wcześniej przygotowanych szlifach mikroskopowych wykazała, że próbę stanowił drobny, nierównokrystaliczny dolomit ilasty, o zbitej strukturze, którego drobne nieprzekraczające wielkości 0,06 mm kryształy (stanowiące 90% skały), spojone były drobnokrystaliczną masą ilasto-węglanową (rys. 6).



**Rys. 6.** Zdjęcia mikroskopowe szlifów dolomitu, na postawie których wykonywano analizę petrograficzną

Kontakty między drobniejszymi ziarnami były w przewadze faliste lub drobnoząbkowe, natomiast największe ziarna kontaktowały się ze sobą głównie wzdłuż linii prostych. Poza dolomitem w badanej skale występowały również w mniejszej ilości ziarna kalcytu wypełniającego wydłużone pustki i pęknięcia, oraz kwarcu i anhydrytu. Na powierzchni badanego preparatu nie stwierdzono obecności otwartych spękań.

Przygotowane do badań próbki poddawano obciążeniu w kilku (zazwyczaj 5 lub 6) cyklach o równej wartości odkształcenia osiowego próbki ( $\Delta\varepsilon_1 = 0,001$ ), do momentu osiągnięcia granicy wytrzymałości na ściskanie, na które składały się:

- proces obciążenia przy stałej prędkości odkształcenia do zadanej wartości odkształcenia osiowego  $\varepsilon_1$  próbki,
- proces odciążenia przy stałej, takiej samej jak przy obciążeniu prędkości odkształcenia,
- proces ponownego obciążenia, gdy wartość naprężeń osiowych była bliska zeru.

Wyniki pomiarów rejestrowano elektronicznie, a następnie poddawano obróbce i analizie.

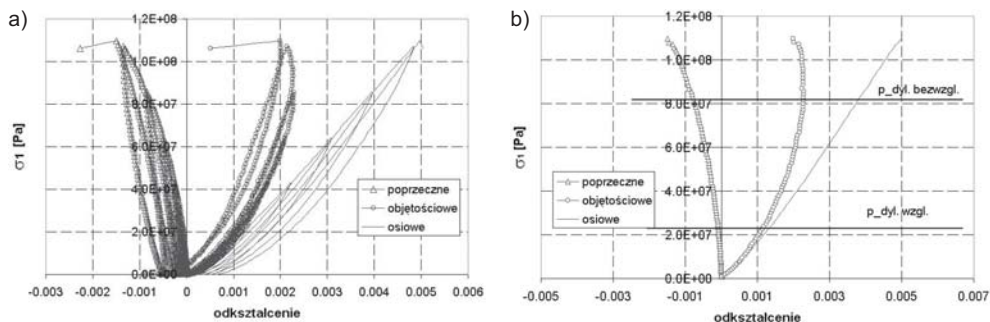
#### **4. Analiza makroskopowych cech zniszczenia próbek dolomitu**

Makroskopowe cechy zachowania się próbek wyznaczano na podstawie charakterystyki  $\sigma$ - $\varepsilon$  uzyskanej po usunięciu z wykresu części dotyczącej odciążenia próbek (rys. 7). Wyznaczono:  $R_c$  – wytrzymałość na ściskanie,  $\varepsilon_1(R_c)$  – odkształcenie podłużne na granicy wytrzymałości,  $E$  – moduł sprężystości podłużnej,  $\nu$  – współczynnik Poissona, wartości



naprężeń  $\sigma_1$  odpowiadające progom dylatacji względnej i dylatacji bezwzględnej oraz odkształcenia podłużne  $\varepsilon_1(dw)$  i  $\varepsilon_1(db)$  odpowiadające progom dylatacji względnej i dylatacji bezwzględnej (tab. 2). Moduł sprężystości podłużnej wyznaczono jako moduł ścieżny w przedziale obciążeń odpowiadających  $0,35 \div 0,65 R_c$ :

$$E = \frac{\sigma_1^{0,65} - \sigma_1^{0,35}}{\varepsilon_1^{0,65} - \varepsilon_1^{0,35}} \quad \nu = \frac{\varepsilon_2^{0,65} - \varepsilon_2^{0,35}}{\varepsilon_1^{0,65} - \varepsilon_1^{0,35}}$$



**Rys. 7.** Charakterystyka  $\sigma$ - $\varepsilon$  uzyskana dla próbek dolomitu z odciążeniem (a) oraz po usunięciu części dotyczącej odciążenia próbki (b)

Współczynnik Poissona wyznaczono na podstawie przyrostów wartości odkształcenia poprzecznego  $\varepsilon_2$  i podłużnego  $\varepsilon_1$  w przedziale obciążeń odpowiadających  $0,35 \div 0,65 R_c$ , zaś w przypadku progu dylatacji względnej przyjęto, iż próg ten wyznacza początek krzywoliniowej części krzywej naprężenie osiowe – odkształcenie poprzeczne (rys. 7b).

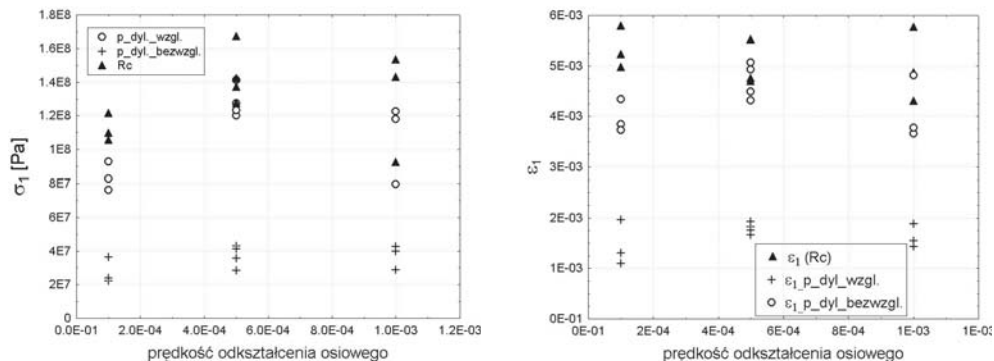
TABELA 2

**Zestawienie własności i cech zniszczenia wyznaczonych na podstawie charakterystyki  $\sigma$ - $\varepsilon$  badanych próbek dolomitu**

| Nr | Prędkość odkształc. [s <sup>-1</sup> ] | $R_c$ [MPa] | $\varepsilon_1(R_c)$ [%] | $E$ [GPa] | $\nu$ [] | Próg dyl. bezwzgl. [MPa] | Próg dyl. wzgl. [MPa] | $\varepsilon_1(db)$ [%] | $\varepsilon_1(dw)$ [%] |
|----|--|-------------|--------------------------|-----------|----------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1  | $1 \cdot 10^{-4}$                      | 110         | 5,0                      | 28,2      | 0,27     | 82,7                     | 22,6                  | 3,84                    | 1,11                    |
| 2  | $1 \cdot 10^{-4}$                      | 122         | 5,8                      | 27,1      | 0,28     | 92,7                     | 36,4                  | 4,34                    | 1,96                    |
| 3  | $1 \cdot 10^{-4}$                      | 106         | 5,2                      | 26,2      | 0,32     | 76,3                     | 23,9                  | 3,73                    | 1,31                    |
| 4  | $5 \cdot 10^{-4}$                      | 167         | 5,5                      | 23,7      | 0,22     | 141                      | 43,0                  | 4,77                    | 1,82                    |
| 5  | $5 \cdot 10^{-4}$                      | 127         | 4,7                      | 23,9      | 0,23     | 120                      | 35,7                  | 4,05                    | 1,66                    |
| 6  | $5 \cdot 10^{-4}$                      | 142         | 5,5                      | 21,4      | 0,23     | 123                      | 28,6                  | 4,93                    | 1,76                    |
| 7  | $5 \cdot 10^{-4}$                      | 137         | 4,8                      | 33,6      | 0,19     | 127                      | 41,4                  | 4,50                    | 1,93                    |
| 8  | $1 \cdot 10^{-3}$                      | 143         | 5,8                      | 31,5      | 0,24     | 118                      | 28,9                  | 5,78                    | 1,43                    |
| 9  | $1 \cdot 10^{-3}$                      | 92          | 4,3                      | 30,5      | 0,21     | 79,8                     | 42,5                  | 4,34                    | 1,55                    |
| 10 | $1 \cdot 10^{-3}$                      | 153         | 4,9                      | 29,8      | 0,21     | 122                      | 40,0                  | 4,89                    | 1,88                    |



Badany dolomit jest skałą o dużej wytrzymałości (wartość  $R_c$  zawierała się w przedziale pomiędzy 92 a 167 MPa) i małej odkształcalności ( $E$  w przedziale od 21,4, do 33,6 GPa, zaś  $\nu$  od 0,19, do 0,32). Ze względu na to, że próbki nie podlegały specjalnej selekcji pod względem jednorodności, uzyskane wyniki mają dość znaczny rozrzut (w ramach jednej prędkości odkształcenia).



**Rys. 8.** Wpływ prędkości odkształcenia osiowego próbek na wytrzymałość na ściskanie ( $R_c$ ), progii dylatacji względnej i dylatacji bezwzględnej oraz na odkształcenia osiowe odpowiadające poszczególnym progom

Jak można zauważyć na rysunku 8, prędkość odkształcenia osiowego ma istotny wpływ na wartość uzyskanych wyników. Wyniki badań nie odbiegają od ogólnie znanej zależności, iż ze wzrostem prędkości odkształcenia, wartość wytrzymałości również wzrasta. Fakt ten można również odnieść do progów dylatacji względnej i dylatacji bezwzględnej. Na uwagę zasługuje analiza odkształceń osiowych na granicy wytrzymałości na ściskanie i odkształceń osiowych odpowiadających progom dylatacji względnej i dylatacji bezwzględnej. Wartości odkształceń odpowiadające progom dylatacji względnej i dylatacji bezwzględnej nie maleją wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia tak wyraźnie, jak można to zauważyć w przypadku odkształcenia osiowego na granicy wytrzymałości.

## 5. Analiza trwałych odkształceń próbek dolomitu oraz bilans energetyczny w procesie obciążenia\*

Trwałe odkształcenia pionowe i poziome wyznaczano z charakterystyk zaprezentowanych na rysunku 9a, zaś odpowiednie energie – z tych samych charakterystyk z dodaną gałęzią następnego cyklu obciążenia (rys. 9b). Energie wyznaczono przez numeryczne całkowanie (metodą trapezów) powierzchni ograniczonych odpowiednimi krzywymi obciążenia i odciążenia. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tabeli 3. Odciążenia realizowano dla stałych wartości odkształcenia osiowego  $\epsilon_1 = 0,001$ , przy czym pierwsze odciążenie odbywało się przy odkształceniu  $\epsilon_1 = 0,0005$ .

\* Wszelkie analizy statystyczne oraz graficzną prezentację wyników wykonano za pomocą pakietu statystycznego STATISTICA 8.0.

TABELA 3

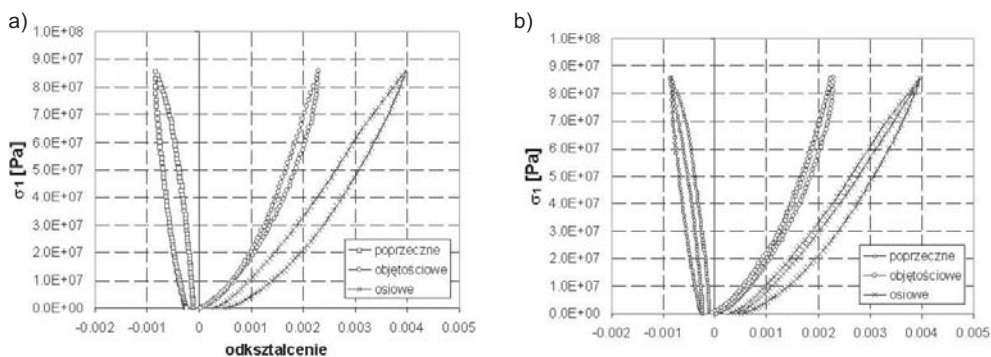
**Wyniki obliczeń energii właściwej odkształcenia i przyrostów odkształceń trwałych dla poszczególnych prędkości odkształcenia**

| Prędkość odksz. [s <sup>-1</sup> ] | $\sigma_1/R_c$ | $\Phi_{1r}/2$ [J/m <sup>3</sup> ] | $\Phi_{1s}$ [J/m <sup>3</sup> ] | $\Phi_{1n}$ [J/m <sup>3</sup> ] | $\Phi_{2r}/2$ [J/m <sup>3</sup> ] | $\Phi_{2s}$ [J/m <sup>3</sup> ] | $\Phi_{2n}$ [J/m <sup>3</sup> ] | $\Delta\varepsilon_{1n}$ | $\Delta\varepsilon_{2n}$ |
|------------------------------------|----------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                                    | 0,07           | 283,9389                          | 482,8439                        | 766,78                          | 22,49797                          | 46,86304                        | 69,36                           | 3,77E-05                 | 0                        |
| 1.0E-04                            | 0,22           | 1700,914                          | 2973,048                        | 4673,96                         | 158,823                           | 667,3486                        | 826,17                          | 0,000143                 | 3,42E-06                 |
|                                    | 0,39           | 2946,299                          | 8800,818                        | 11747,12                        | 582,1985                          | 2397,851                        | 2980,05                         | 0,00014                  | 4,8E-05                  |
|                                    | 0,58           | 8287,474                          | 14479,54                        | 22767,01                        | 2997,292                          | 6564,829                        | 9562,12                         | 0,00021                  | 7,52E-05                 |
|                                    | 0,78           | 13388,7                           | 23072,91                        | 36461,61                        | 5082,784                          | 16918,12                        | 22000,90                        | 0,00021                  | 0,000133                 |
|                                    | 0,98           | 19913,16                          | 34462,1                         | 54375,26                        | 6789,452                          | 37317,75                        | 44107,20                        | 0,000261                 | 0,000243                 |
|                                    | 0,04           | 71,94684                          | 164,5832                        | 236,53                          | 0,131036                          | 0,483145                        | 0,61                            | 3,7E-05                  | 0                        |
|                                    | 0,17           | 1105,599                          | 1734,734                        | 2840,33                         | 106,2003                          | 415,0609                        | 521,26                          | 7,93E-05                 | 1,03E-05                 |
|                                    | 0,31           | 2785,014                          | 6592,572                        | 9377,59                         | 624,0158                          | 1391,389                        | 2015,41                         | 0,000159                 | 5,14E-05                 |
|                                    | 0,47           | 7018,022                          | 12254,32                        | 19272,34                        | 1795,769                          | 4570,171                        | 6365,94                         | 0,000254                 | 8,57E-05                 |
|                                    | 0,64           | 13178,77                          | 19881,78                        | 33060,55                        | 3177,447                          | 12793,99                        | 15971,43                        | 0,000288                 | 0,000144                 |
|                                    | 0,82           | 20868,48                          | 30880,94                        | 51749,42                        | 7249,137                          | 27846,09                        | 35095,23                        | 0,000312                 | 0,000223                 |
|                                    | 0,07           | 35,65071                          | 62,08315                        | 97,73                           | 19,86114                          | 27,69926                        | 47,56                           | 3,43E-05                 | 1,37E-05                 |
|                                    | 0,22           | 1200,919                          | 3057,806                        | 4258,73                         | 252,0685                          | 594,9582                        | 847,03                          | 0,0001                   | 3,09E-05                 |
|                                    | 0,38           | 3376,704                          | 7630,619                        | 11007,32                        | 610,0562                          | 2380,347                        | 2990,40                         | 0,000153                 | 7,54E-05                 |
| 0,56                               | 8721,779       | 13713,36                          | 22435,14                        | 767,4052                        | 8013,723                          | 8781,13                         | 0,000225                        | 0,000134                 |                          |
| 0,73                               | 13889,18       | 23065,29                          | 36954,47                        | 1419,9                          | 18385,02                          | 19804,92                        | 0,000296                        | 0,000203                 |                          |
| 0,90                               | 18826,24       | 37199,62                          | 56025,86                        | 5947,094                        | 31659,7                           | 37606,80                        | 0,000309                        | 0,000319                 |                          |
| 0,06                               | 223,308        | 760,2469                          | 983,55                          | 22,51662                        | 65,00006                          | 87,52                           | 2,92E-05                        | 3,42E-06                 |                          |
| 5.0E-04                            | 0,18           | 1408,404                          | 3253,485                        | 4661,89                         | 241,4117                          | 692,1207                        | 933,53                          | 3,32E-05                 | 0                        |
|                                    | 0,33           | 3369,608                          | 5699,082                        | 9068,69                         | 304,8205                          | 495,2987                        | 800,12                          | 8,78E-05                 | 1,37E-05                 |
|                                    | 0,49           | 6894,513                          | 10645,36                        | 17539,87                        | 1155,326                          | 4503,865                        | 5659,19                         | 0,000112                 | 1,37E-05                 |
|                                    | 0,66           | 12830,16                          | 16090                           | 28920,16                        | 4918,241                          | 7026,035                        | 11944,28                        | 0,000144                 | 5,13E-05                 |
|                                    | 0,83           | 18684,36                          | 33149,91                        | 51834,27                        | 6546,331                          | 27055,2                         | 33601,53                        | 0,000212                 | 0,000119                 |
|                                    | 0,05           | 138,558                           | 410,6672                        | 549,23                          | 6,863557                          | 109,9878                        | 116,85                          | 4,77E-05                 | 0                        |
|                                    | 0,20           | 1027,812                          | 2511,965                        | 3539,78                         | 20,25962                          | 192,8666                        | 213,13                          | 9,02E-05                 | 1,09E-06                 |
|                                    | 0,38           | 3064,97                           | 6626,734                        | 9691,70                         | 751,4373                          | 2238,024                        | 2989,46                         | 0,000122                 | 3,8E-05                  |
|                                    | 0,58           | 5641,583                          | 9571,213                        | 15212,80                        | 1658,227                          | 4758,703                        | 6416,93                         | 0,000143                 | 8,98E-05                 |
|                                    | 0,79           | 11188,28                          | 14720,18                        | 25908,45                        | 2402,192                          | 7437,012                        | 9839,20                         | 0,000156                 | 0,000107                 |
|                                    | 1,00           | 16997,06                          | 31073,51                        | 48070,57                        | 8108,241                          | 33820,31                        | 41928,55                        | 0,000204                 | 0,000197                 |
|                                    | 0,03           | 69,41775                          | 344,8579                        | 414,28                          | 22,27474                          | 52,95298                        | 75,23                           | 9,14E-05                 | 6,84E-06                 |
|                                    | 0,14           | 888,2976                          | 2063,587                        | 2951,88                         | 99,29988                          | 286,7569                        | 386,06                          | 0,000151                 | 3,42E-06                 |
|                                    | 0,29           | 2021,228                          | 4907,523                        | 6928,75                         | 38,24597                          | 163,7582                        | 202,00                          | 0,000231                 | 3,42E-05                 |
|                                    | 0,46           | 5433,186                          | 9157,105                        | 14590,29                        | 904,5002                          | 3584,177                        | 4488,68                         | 0,000255                 | 5,13E-05                 |
|                                    | 0,65           | 9978,762                          | 15682,23                        | 25661,00                        | 1088,863                          | 6047,51                         | 7136,37                         | 0,000296                 | 6,16E-05                 |
|                                    | 0,83           | 13499,17                          | 20036,71                        | 33535,88                        | 8327,85                           | 10126,93                        | 18454,78                        | 0,000272                 | 9,92E-05                 |
|                                    | 0,05           | 122,2122                          | 270,3946                        | 392,61                          | 27,3329                           | 93,09274                        | 120,43                          | 3,76E-05                 | 6,86E-06                 |
|                                    | 0,20           | 1071,495                          | 2028,565                        | 3100,06                         | 29,35404                          | 84,14974                        | 113,50                          | 5,92E-05                 | 0                        |
|                                    | 0,37           | 3187,766                          | 6937,753                        | 10125,52                        | 233,8666                          | 644,7422                        | 878,61                          | 0,000102                 | 3,09E-05                 |
| 0,55                               | 6203,809       | 13914,51                          | 20118,32                        | 1363,96                         | 2570,969                          | 3934,93                         | 0,000145                        | 2,74E-05                 |                          |
| 0,74                               | 7924,798       | 15918,16                          | 23842,96                        | 2222,27                         | 12533,49                          | 14755,76                        | 0,00018                         | 7,54E-05                 |                          |
| 0,93                               | 13783,93       | 20225,68                          | 34009,61                        | 2856,403                        | 7462,357                          | 10318,76                        | 0,000183                        | 9,6E-05                  |                          |

TABELA 3, cd.

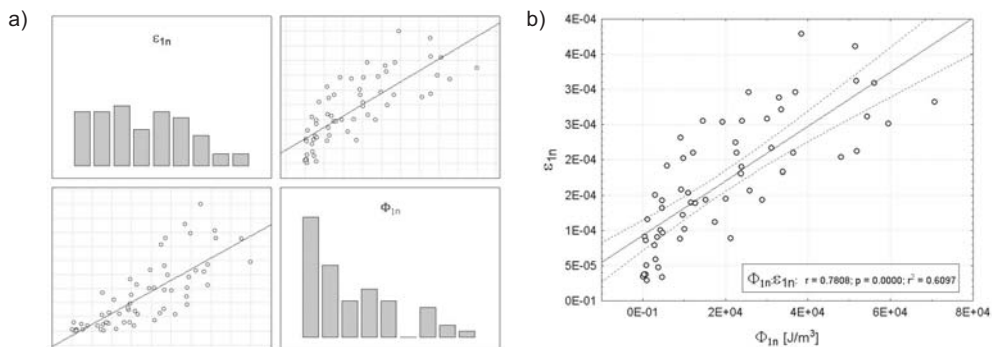
|         |      |          |          |          |          |          |          |          |          |
|---------|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.0E-03 | 0,10 | 335,5096 | 783,6721 | 1119,18  | 21,52706 | 75,49432 | 97,02    | 0,000116 | 3,61E-06 |
|         | 0,28 | 1674,223 | 4195,955 | 5870,18  | 221,1384 | 737,6712 | 958,81   | 0,000191 | 2,89E-05 |
|         | 0,49 | 3733,165 | 6094,384 | 9827,55  | 649,4555 | 2396,177 | 3045,63  | 0,000202 | 6,5E-05  |
|         | 0,70 | 7490,047 | 13794,41 | 21284,45 | 2453,742 | 7018,865 | 9472,61  | 8,87E-05 | 0,000112 |
|         | 0,91 | 13232,07 | 25240,55 | 38472,62 | 4600,396 | 18492,07 | 23092,47 | 0,000379 | 0,000238 |
|         | 0,04 | 167,3835 | 635,1632 | 802,55   | 13,90735 | 37,91367 | 51,82    | 8,6E-05  | 0        |
|         | 0,15 | 1335,427 | 3315,51  | 4650,94  | 111,7038 | 281,4672 | 393,17   | 0,000132 | 6,86E-06 |
|         | 0,26 | 2845,282 | 9321,015 | 12166,30 | 346,5974 | 2029,562 | 2376,16  | 0,00021  | 1,71E-05 |
|         | 0,39 | 5852,092 | 18161,89 | 24013,98 | 887,3166 | 3312,076 | 4199,39  | 0,000255 | 2,74E-05 |
|         | 0,53 | 11430,22 | 18719,22 | 30149,44 | 3320,106 | 6092,442 | 9412,55  | 0,000258 | 4,11E-05 |
|         | 0,85 | 19487,06 | 31987,07 | 51474,13 | 12244,68 | 20890,2  | 33134,88 | 0,000362 | 0,000226 |
|         | 0,07 | 215,7237 | 619,6373 | 835,36   | 34,06495 | 288,5784 | 322,64   | 5,08E-05 | 0        |
|         | 0,20 | 1335,421 | 3498,472 | 4833,89  | 95,02612 | 569,4879 | 664,51   | 9,62E-05 | 2,04E-05 |
|         | 0,35 | 3757,008 | 9029,028 | 12786,04 | 993,3799 | 2415,424 | 3408,80  | 0,000139 | 3,06E-05 |
|         | 0,51 | 7204,86  | 16679,38 | 23884,24 | 1416,558 | 7127,482 | 8544,04  | 0,00019  | 6,11E-05 |
|         | 0,66 | 10998,87 | 20166,44 | 31165,31 | 5248,204 | 9439,704 | 14687,91 | 0,000217 | 7,81E-05 |
|         | 0,83 | 20040,08 | 39498,13 | 59538,21 | 13223,63 | 26614,91 | 39838,54 | 0,000251 | 0,000152 |
|         | 0,99 | 31260,57 | 41402,45 | 72663,02 | 19689,76 | 35812,67 | 55502,43 | 0,000282 | 0,000278 |

Do analizy nie przyjęto całkowitych trwałych odkształceń na danym poziomie obciążenia, ale jego przyrosty w analizowanych pętlach obciążenia i odciążenia.

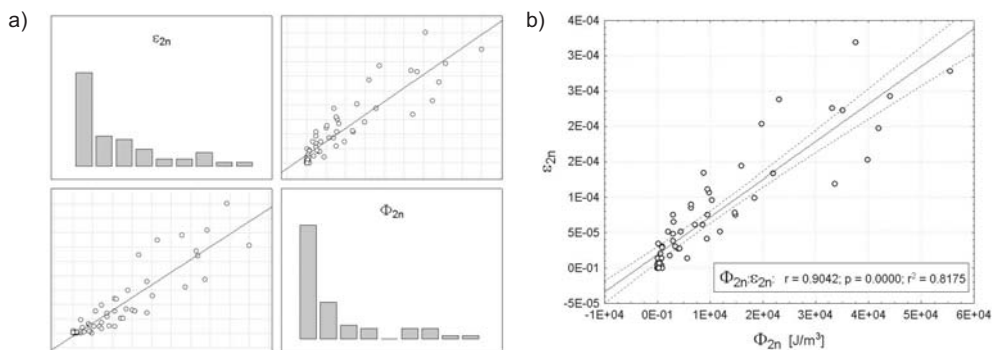


Rys. 9. Przykładowe charakterystyki obciążenia i odciążenia próbki dolomitu (a) oraz obciążenia, odciążenia i ponownego obciążenia (b)

Na wstępie tej analizy założono, że przyrosty trwałych odkształceń zarówno osiowych  $\epsilon_{1n}$ , jak i poprzecznych  $\epsilon_{2n}$ , powiązane są z energią utraconą na poszczególnego rodzaju odkształcenia ( $\Phi_{1n}$  oraz  $\Phi_{2n}$ ). Dla zweryfikowania tej tezy zestawiono obie pary wielkości, a wynik zaprezentowano na rysunku 10 i 11.



**Rys. 10.** Zależność pomiędzy przyrostami trwałych odkształceń pionowych  $\varepsilon_{1n}$  a energią utraconą na trwałe odkształcenia  $\varepsilon_{1n}$  w poszczególnych pętłach obciążenia. Macierz wykresów rozrzutu (a) oraz korelacja z pasem ufności na poziomie 0,95 (b)

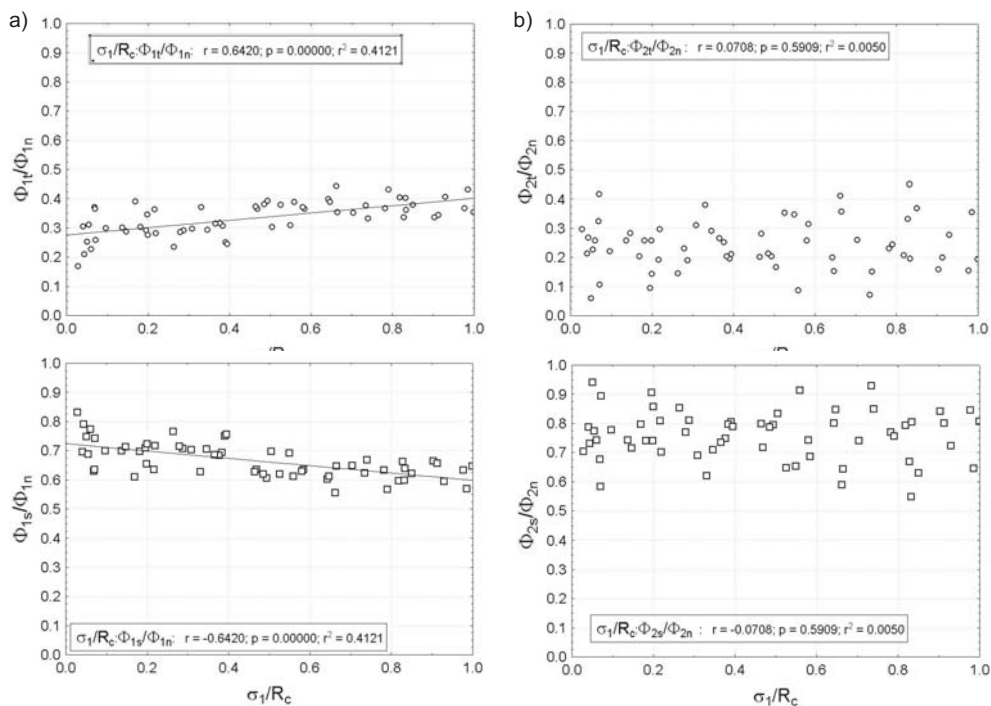


**Rys. 11.** Zależność pomiędzy przyrostami trwałych odkształceń poziomych  $\varepsilon_{2n}$ , a energią utraconą na trwałe odkształcenia  $\varepsilon_{2n}$  w poszczególnych pętłach obciążenia. Macierz wykresów rozrzutu (a) oraz korelacja z pasem ufności na poziomie 0,95 (b)

Jak można zaobserwować na rysunkach 10 i 11, istnieje silna i statystycznie istotna zależność pomiędzy przyrostami trwałych odkształceń mierzonych na kierunkach pionowym i poziomym próbek, a całkowitą energią utraconą na odpowiadające im deformacje w poszczególnych pętłach obciążenia. W obu przypadkach prawdopodobieństwo testowe jest bliskie zera, a współczynniki korelacji są wysokie i wynoszą odpowiednio 0,78 i 0,9. Wydaje się, że fizycznie zależność ta jest uzasadniona, ponieważ trwałe odkształcenia są efektem energii utraconej na zniszczenie próbki. Należy podkreślić, że wartość współczynnika korelacji dla zależności pomiędzy przyrostami trwałych odkształceń, mierzonych na kierunkach pionowym odkształceń, a całkowitą energią utraconą  $\Phi_{1n}$ , pomimo iż i tak jest wysoki, mógłby być jeszcze większy, gdyby nie trudności z uzyskaniem dokładnego pomiaru trwałych odkształceń osiowych  $\varepsilon_{1n}$  próbek.

Następnie prześledzono zmiany dwóch rodzajów energii (energii utraconej na tarcie wewnętrzne w skale  $\Phi_l$  oraz energii odpowiadającej procesom propagacji i otwierania się

nowych spękań  $\Phi_s$ ) w trakcie procesu obciążenia. Analizie poddano jednak nie wartości poszczególnych rodzajów energii  $\Phi_t$  i  $\Phi_s$ , a ich stosunek do całkowitej energii utraconej na trwale odkształcenia  $\Phi_s/\Phi_n$  oraz  $\Phi_t/\Phi_n$  w poszczególnych pętlach obciążenia. W taki sposób możliwe było śledzenie zmian ilościowego udziału poszczególnych rodzajów energii w procesie zniszczenia próbek.



**Rys. 12.** Zestawienie wyników analiz zmian poszczególnych rodzajów energii w całkowitej utraconej energii na kierunku osiowym i poprzecznym w trakcie procesu obciążania próbek dla wszystkich prędkości odkształcenia: a) zmiany udziału energii  $\Phi_{1t}$  i  $\Phi_{1s}$  w energii  $\Phi_{1n}$  utraconej na osiowe trwale odkształcenia – wszystkie prędkości odkształcenia; b) zmiany udziału energii  $\Phi_{2t}$  i  $\Phi_{2s}$  w energii  $\Phi_{2n}$  utraconej na poprzeczne trwale odkształcenia – wszystkie prędkości odkształcenia

Analiza przedstawionych powyżej wykresów korelacji dla zmian udziału energii  $\Phi_{1t}$  i  $\Phi_{1s}$  w całkowitej energii utraconej na odkształcenia trwale  $\Phi_{1n}$  na kierunku osiowym (rys. 12a) pozwala stwierdzić, iż zmiany udziału tych energii w trakcie procesu obciążania próbek są silne i statystycznie istotne. Uzyskane w analizie wysokie współczynniki korelacji posiadają różne znaki, co świadczy o tym, że w trakcie procesu obciążenia jedna z energii wzrasta ( $\Phi_{1t}$ ), druga zaś maleje ( $\Phi_{1s}$ ). We wstępnej fazie obciążenia dominują procesy pęknięcia ( $\Phi_{1s}$ ), po czym w dalszej fazie obciążenia rośnie udział efektów tarcia wewnątrz skały. Ostatecznie jednak w momencie zniszczenia wciąż ok. 60% energii pochłaniane jest w procesie pęknięcia, zaś ok. 40% to energia tracona na efekty tarcia wewnątrz skały.

Zupełnie inaczej wyglądają zmiany energii  $\Phi_{2r}$  i  $\Phi_{2s}$  w całkowitej energii  $\Phi_{2n}$  utraconej na trwałe odkształcenia w kierunku poziomym. Na podstawie wyników analizy (rys. 12b) można stwierdzić, że zmiany te praktycznie nie występują, o czym świadczy bardzo mały współczynnik korelacji 0,07 oraz duże prawdopodobieństwo testowe 0,59. Duży rozrzut wyników powoduje też, że trudno jest określić ilościowy udział poszczególnych rodzajów zniszczenia w procesie zniszczenia próbki. Należy jednak zaznaczyć, że do powyższych analiz zebrano wyniki uzyskane dla wszystkich trzech prędkości odkształcenia.

W kolejnych analizach (rys. 13) prześlędzono zmiany poszczególnych rodzajów energii jednak z rozbiciem na trzy prędkości odkształcenia, którym poddano badane próbki.

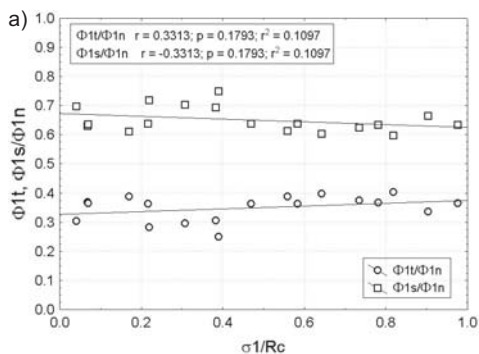
Analizując zaprezentowane powyżej wykresy korelacji dla zmian udziału energii  $\Phi_{1r}$  i  $\Phi_{1s}$  w całkowitej energii utraconej na odkształcenia trwałe  $\Phi_{1n}$  na kierunku osiowym (rys. 13a), dla różnych prędkości odkształcenia, można stwierdzić, iż prędkość odkształcenia ma duży wpływ na obserwowane zmiany. Im większa prędkość odkształcenia tym większe są zmiany udziału poszczególnych energii (ilościowe różnice w początkowej fazie obciążenia).

Na granicy wytrzymałości, podobnie jak w poprzedniej analizie (dla wszystkich prędkości na raz), przeważający udział w zniszczeniu próbek ok. 60% ma energia zdysypowana na procesy pękania, podczas gdy na tarcie przypada ok. 40% całej utraconej energii. Dla najmniejszej z analizowanych prędkości odkształcenia nie wykryto statystycznie istotnych związków pomiędzy analizowanymi wielkościami, co oznacza, że w tym przypadku udział poszczególnych energii w procesie zniszczenia jest raczej stały, choć wartość współczynnika korelacji wskazuje na pewną zmienność analizowanych energii. Wydaje się, że zwiększenie liczby pomiarów o dodatkowo przebadane próbki pozwoliłoby uzyskać statystyczną istotność tej zależności.

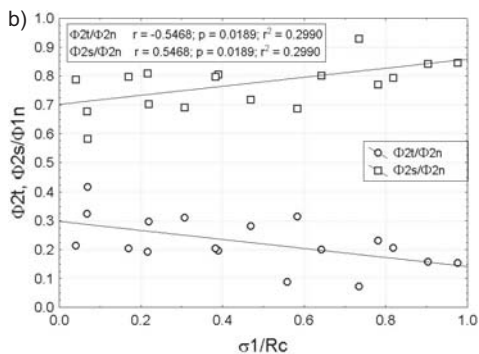
W przypadku zmian udziału energii  $\Phi_{2r}$  i  $\Phi_{2s}$  odkształceń poprzecznych w procesie zniszczenia próbek (rys. 13b), dla najmniejszej z analizowanych prędkości odkształcenia  $1 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , na wstępie procesu obciążania dominujące są procesy pękania ok. 70%, a przy dalszym obciążeniu ich udział rośnie i dochodzi do ok. 85%. W przypadku prędkości odkształcenia  $5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  udział poszczególnych energii w procesie zniszczenia jest prawie stały (nie można wykazać istotnej ich zmienności) i w ok. 75% przypada na energię propagacji spękań.

W przypadku wyników uzyskanych dla największej prędkości odkształcenia  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  tendencja zmienności udziału poszczególnych energii w procesie zniszczenia ulega odwróceniu, tym razem wraz z postępującym zniszczeniem udział energii zdysypowanej na efekty tarcia wewnętrznego wzrastają z poziomu ok. 20% w początkowej fazie obciążenia do ponad 30% na granicy zniszczenia.

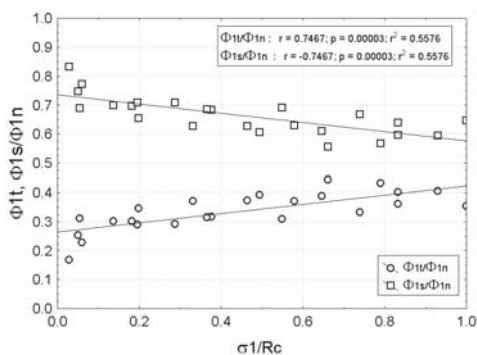
Reasumując, należy stwierdzić, że trwałe odkształcenia na kierunku osiowym i poprzecznym próbek dolomitu są efektem dwóch różnych zjawisk analizowanych na poziomie mikromechaniki. W pierwszym przypadku pochodzą one w większej części od propagacji i łączenia się spękań oraz w istotnej części z poślizgu na kontakcie ziaren i spękań. W drugim przypadku, dla małych prędkości odkształcenia, pochodzenie trwałych poprzecznych odkształceń można przypisać głównie procesom pękania. Dla większych prędkości odkształcenia udział efektów tarcia wewnątrz skały wzrasta.



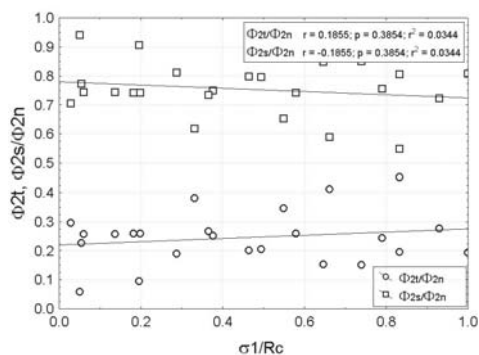
$$\dot{\epsilon} = 1,0E - 04 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$



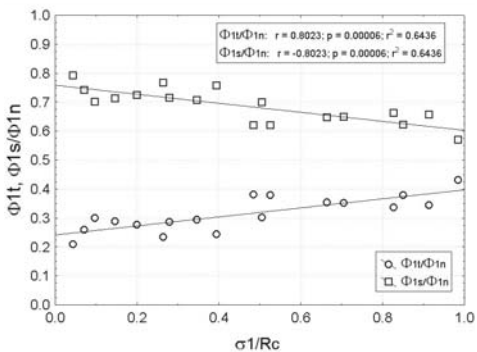
$$\dot{\epsilon} = 1,0E - 04 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$



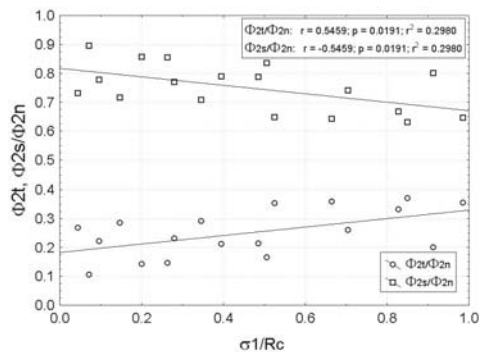
$$\dot{\epsilon} = 1,0E - 04 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$



$$\dot{\epsilon} = 1,0E - 04 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$



$$\dot{\epsilon} = 1,0E - 04 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$



$$\dot{\epsilon} = 1,0E - 04 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$

**Rys. 13.** Zestawienie wyników analiz zmian poszczególnych rodzajów energii w całkowitej utraconej energii na kierunku osiowym i poprzecznym w trakcie procesu obciążania próbek dla poszczególnych prędkości odkształcenia: a) zmiany udziału energii  $\Phi_{1t}$  i  $\Phi_{1s}$  w energii  $\Phi_{1n}$  utraconej na osiowe trwałe odkształcenia – rozbitcie na różne prędkości odkształcenia; b) zmiany udziału energii  $\Phi_{2t}$  i  $\Phi_{2s}$  w energii  $\Phi_{2n}$  utraconej na poprzeczne trwałe odkształcenia – rozbitcie na różne prędkości odkształcenia



## 6. Podsumowanie

W artykule tym zasadniczą uwagę poświęcono procesom rozwoju zniszczenia w próbie jednoosiowego ściskania, w tzw. przedzniszczeniowej części charakterystyki obciążenia próbek dolomitu, przy różnych prędkościach odkształcenia. Pomiar trwałych odkształceń oraz bilans energii właściwej odkształcenia próbek skalnych (sprężystej oraz zdysypowanej na rozwój i propagację spękań oraz tarcie wewnętrzne) pozwoliły prześledzić proces rozwoju zniszczenia w trakcie obciążania do granicy wytrzymałości na ściskanie. Dzięki przeprowadzonym analizom możliwe jest określenie udziału dwóch założonych wcześniej mechanizmów zniszczenia w całkowitej energii utraconej na trwałe odkształcenia, oraz oszacowanie, jaka część trwałych odkształceń może być przypisana do poszczególnego mechanizmu zniszczenia skały.

Trwałe odkształcenia na kierunkach osiowych i poprzecznych próbek mogą mieć różne źródła, a ich wartość zależy od udziału poszczególnych zjawisk (zarodkowania i propagacji spękań oraz tarcia wewnątrz skały) w całym procesie zniszczenia. Należy zaznaczyć, że efekty tarcia wewnętrznego w skałach rosną wraz z wzrostem prędkości odkształcenia osiowego.

Wyniki badań dolomitu na poziomie makroskopowym nie odbiegają od ogólnie znanych zależności, iż ze wzrostem prędkości odkształcenia wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wzrasta, a odkształcenie jej towarzyszące maleje. Fakt ten można również odnieść do progów dylatacji względnej i dylatacji bezwzględnej.

### LITERATURA

- [1] *Bieniawski Z.T.*: Mechanism of brittle fracture of rock, Parts I, II, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 4, 395–404, 1967
- [2] *Brady B. T.*: A mechanical equation of state for brittle rock. Part I – The pre-failure behavior of brittle rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 7, 395–404, 407–423, 1970
- [3] *Długosz M., Gustkiewicz J., Wysocki A.*: Apparatus for investigation of rocks in a triaxial state of stress, Part I i II, *Archiwum Górnictwa*, 26, 17–41, 1981
- [4] *Fairhurst C.E., Hudson J.A.*: Draft ISRM suggested methods for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 36, 279–289, 1999
- [5] *Gustkiewicz J.*: Synoptic view of mechanical behavior of rock under triaxial compression, *Rock at Great Depth*, V. Maury & D. Fourmaintraux (eds), Vol. 1, 3–10, Balkema, Rotterdam 1989
- [6] *Hallbauer D. K., Wagner K., Cook N. G. W.*: Some observations concerning the microscopic and mechanical behavior of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 10, 713–726, 1973
- [7] *Jaeger J. C., Cook N. G. W., Zimmerman R. W.*: *Fundamentals of Rock Mechanics*, Fourth edition, Blackwell Publishing 2007
- [8] *Krzysztoń D.*: Badanie energii odkształcenia podłużnego suchych i mokrych próbek piaskowca, *Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo*, z. 145, 1989
- [9] *Kwaśniewski M.*: Dylatacja jako zwiastun zniszczenia skały, Cz. 1, *Fizyka i istota zjawiska dylatacji*, *Przegląd Górniczy*, 42, 42–49, 1986
- [10] *Kwaśniewski M.*: Dylatacja jako zwiastun zniszczenia skały, Cz. 2, *Mechanizm zjawisk poprzedzających zniszczenie*, *Przegląd Górniczy*, 42, 184–190, 1986
- [11] *Labuz J. F., Cattaneo S., Chen L. H.*: Acoustic emission at failure in quasi-brittle materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 15, 225–233, 2001
- [12] *Olsson W., Peng S.*: Microcrack nucleation in marble, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 13, 53–59, 1976

- [13] *Paterson M. S., Wong T. F.*: Experimental Rock Deformation – The Brittle Field, Springer-Verlag 2005
- [14] *Tapponnier P., Brace W. F.*: Development of stress-induced microcracks in Westerly granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 13, 103–112, 1976
- [15] *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, 995–1019, 2006
- [16] *Walsh J. B.*: The effect of cracks on the compressibility of rock, *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, 381–389, 1965
- [17] *Walsh J. B.*: The effect of cracks on the uniaxial elastic compression of rocks, *J. Geophys. Res.*, Vol. 70, 399–411, 1965b
- [18] *Wawersik W.R., Fairhurst C.*: A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 7, 561–575, 1970
- [19] *Wong T. F.*: Micromechanics of faulting in Westerly granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 19, 49–64, 1982