

*Jerzy Cieślak**

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

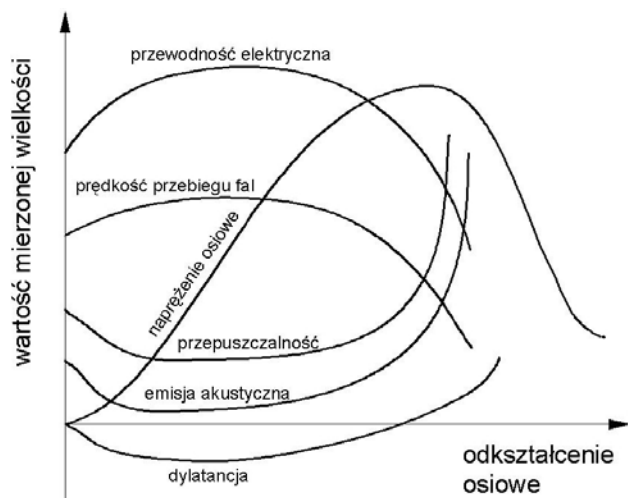
1. Fenomenologiczny opis procesu zniszczenia skał w próbie jednoosiowego ściskania

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 proggu 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.

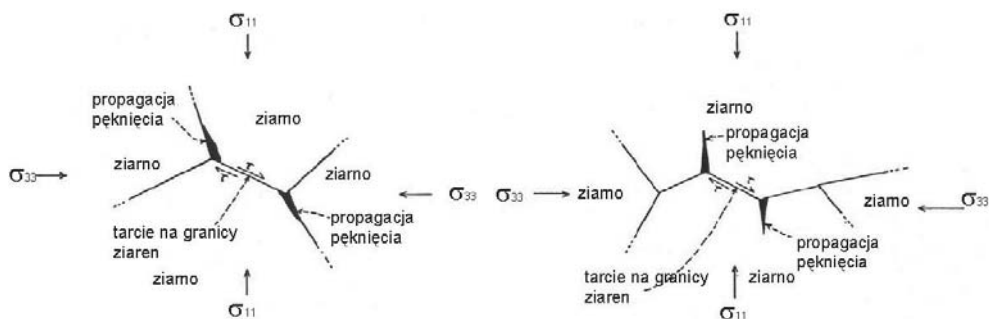
** Praca powstała w ramach badań własnych (nr 10.10.100.301) prowadzonych w Katedrze Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH.



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]

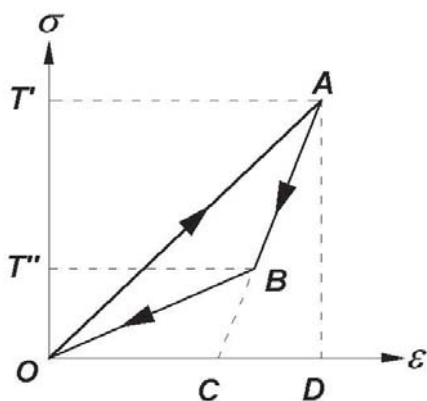
Proces nukleacji i propagacji spękań może przebiegać śródziarnowo lub międzyziarnowo i jest różny dla różnych typów skał [2, 6, 12, 13]. Dominującą rolę w procesie propagacji pęknięć odgrywają pierwotne spękania i szczeliny zorientowane na kierunku działania obciążenia, które propagują między ziarnami 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.

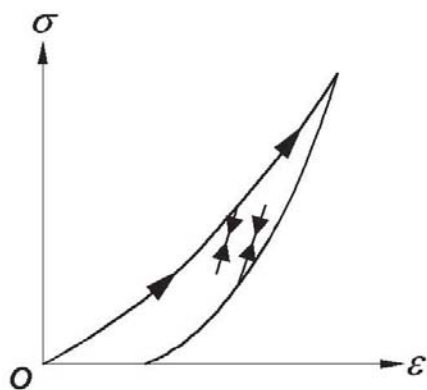
2. Pomiary odkształceń trwałych oraz bilans energii w próbie wytrzymałościowej jednoosiowego ściskania z odciążaniem

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° i mniejszym niż 90° 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° i mniejszym niż 90° 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 σ - ε . 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 σ - ε (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.

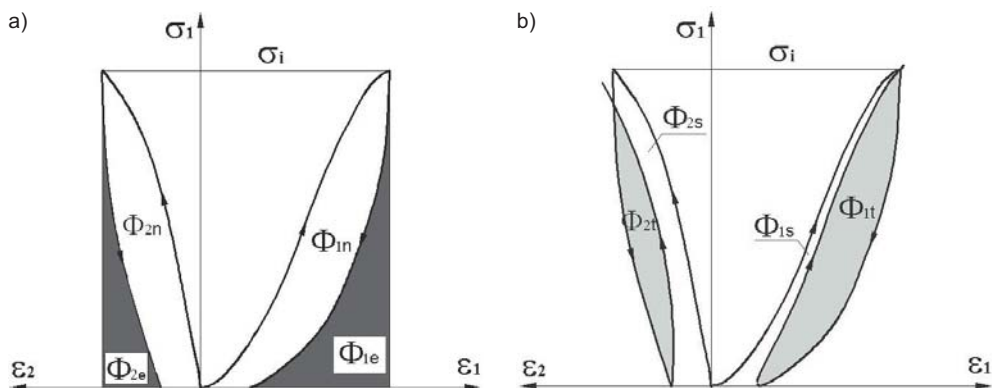
Przytoczona powyżej za Jaegerem i Cookiem analiza przeprowadzona dla pojedynczej szczeliny dobrze odpowiada zachowaniu próbki skalnej (zawierającej spękania o różnej orientacji) poddanej jednoosiowemu ściskaniu (rys. 3b).

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 Φ_1 i poprzecznego Φ_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 Φ_e oraz całkowita energia utracona na różnego rodzaju procesy zniszczenia Φ_n [8]. W tej pracy dodatkowo energię utraconą na różnego rodzaju procesy zniszczenia Φ_n , podzielono na energię zdysypowaną na tarcie wewnątrz skały [7] oznaczoną odpowiednio Φ_{1t} i Φ_{2t}^* , oraz energię utraconą na powstanie nowych spękań oznaczoną jako Φ_{1s} i Φ_{2s} :

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

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

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

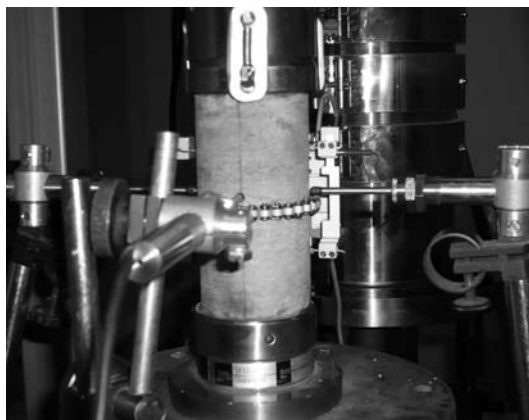
Bilans poszczególnych energii na poszczególnych poziomach obciążenia σ_i pozwala prześledzić cały proces zniszczenia postępujący w próbce z rozdzieleniem zjawisk odpowiadających tarcu wewnątrz skały i propagacji spękań zarówno przed-, jak i pokrytycznej w części.

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 Φ_{1t} oraz Φ_{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.

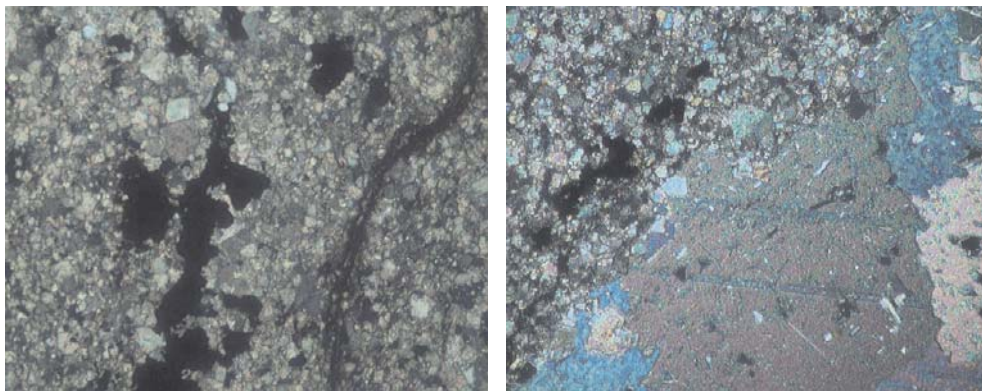
Wszystkie próbki zostały zmierzone suwmiarką oraz zważone na wadze elektronicznej, co pozwoliło wyznaczyć ich gęstość objętościową. Dodatkowo za pomocą kolby Le Chateliera wyznaczono gęstość właściwą, dzięki czemu możliwe było oznaczenie porowatości dolomitu. Wyniki tych badań zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1

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

Rodzaj skały	ρ_o [kg/m ³]	ρ_w [kg/m ³]	Porowatość [%]
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 ε_1 próbki,
- proces odciążenia przy stałej, takiej samej jak przy obciążeniu prędkości odkształcenia,
- proces ponownego obciążenia, gdy wartość naprężeń osiowych była bliska zeru.

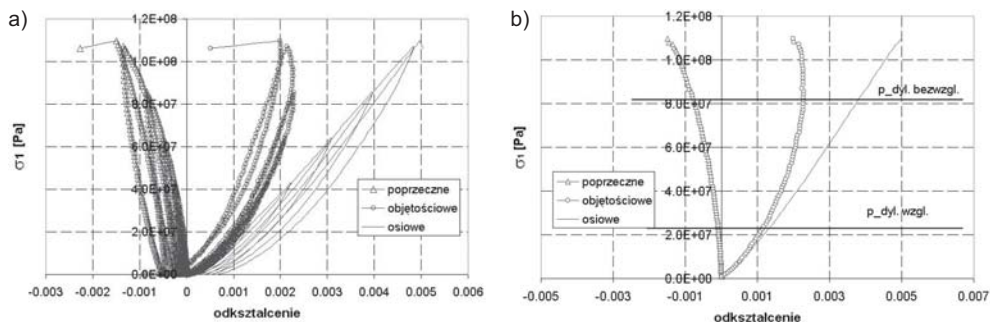
Wyniki pomiarów rejestrowano elektronicznie, a następnie poddawano obróbce i analizie.

4. Analiza makroskopowych cech zniszczenia próbek dolomitu

Makroskopowe cechy zachowania się próbek wyznaczano na podstawie charakterystyki σ - ε 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, ν – współczynnik Poissona, wartości

naprężeń σ_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 sieczny 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 σ - ε uzyskana dla próbek dolomitu z odciążeniem (a) oraz po usunięciu części dotyczącej odciążenia próbki (b)

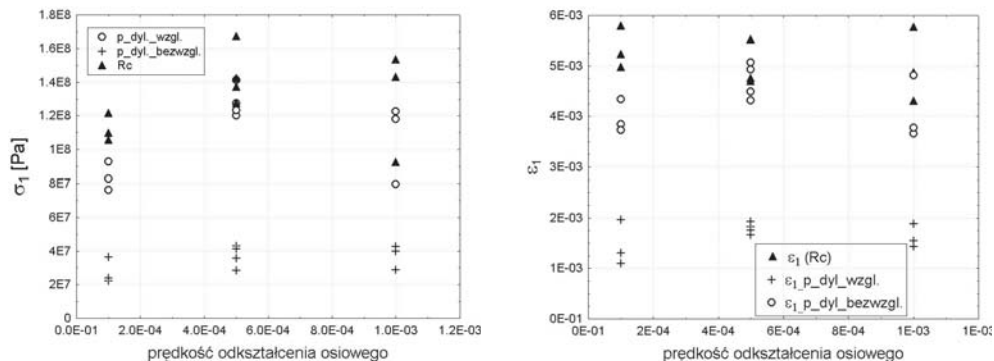
Współczynnik Poissona wyznaczono na podstawie przyrostów wartości odkształcenia poprzecznego ε_2 i podłużnego ε_1 w przedziale obciążeń odpowiadających $0,35 \div 0,65 R_c$, zaś w przypadku progu dylatacji względnej przyjęto, iż próg ten wyznacza początek krzywoliniowej części krzywej naprężenie osiowe – odkształcenie poprzeczne (rys. 7b).

TABELA 2

Zestawienie własności i cech zniszczenia wyznaczonych na podstawie charakterystyki σ - ε badanych próbek dolomitu

Nr	Prędkość odkształc. [s ⁻¹]	R_c [MPa]	$\varepsilon_1(R_c)$ [%]	E [GPa]	ν []	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 ν 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

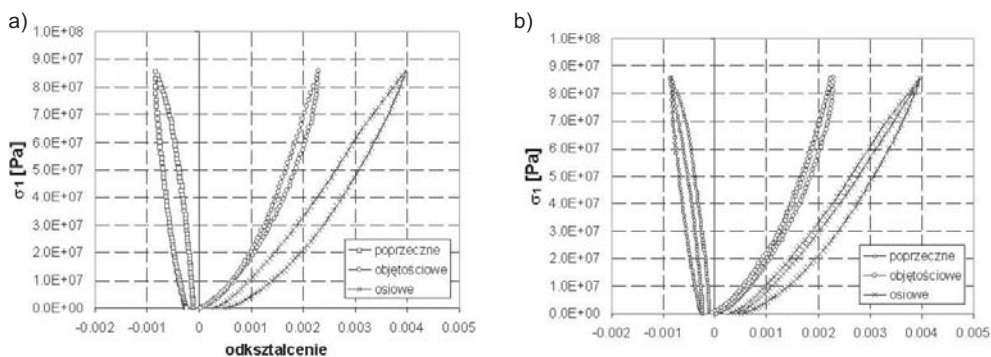
Wyniki obliczeń energii właściwej odkształcenia i przyrostów odkształceń trwałych dla poszczególnych prędkości odkształcenia

Prędkość odkształc. [s ⁻¹]	σ_1/R_c	$\Phi_{1r}/2$ [J/m ³]	Φ_{1s} [J/m ³]	Φ_{1n} [J/m ³]	$\Phi_{2r}/2$ [J/m ³]	Φ_{2s} [J/m ³]	Φ_{2n} [J/m ³]	$\Delta\varepsilon_{1n}$	$\Delta\varepsilon_{2n}$
	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.

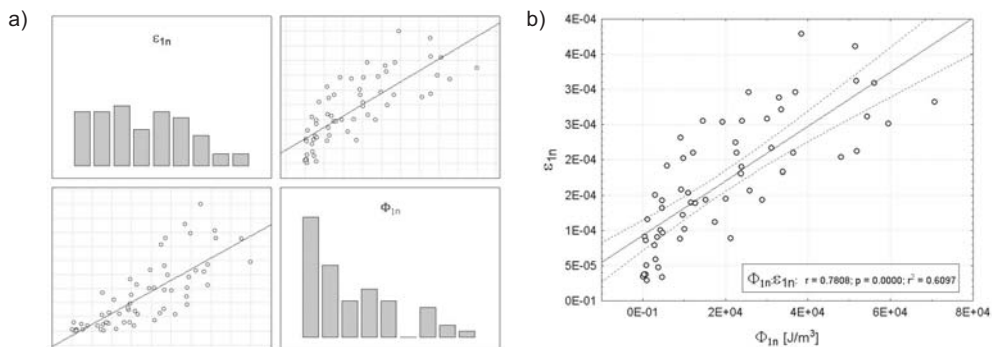
1.0E-03	0,10	335,5096	783,6721	1119,18	21,52706	75,49432	97,02	0,000116	3,61E-06
	0,28	1674,223	4195,955	5870,18	221,1384	737,6712	958,81	0,000191	2,89E-05
	0,49	3733,165	6094,384	9827,55	649,4555	2396,177	3045,63	0,000202	6,5E-05
	0,70	7490,047	13794,41	21284,45	2453,742	7018,865	9472,61	8,87E-05	0,000112
	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.

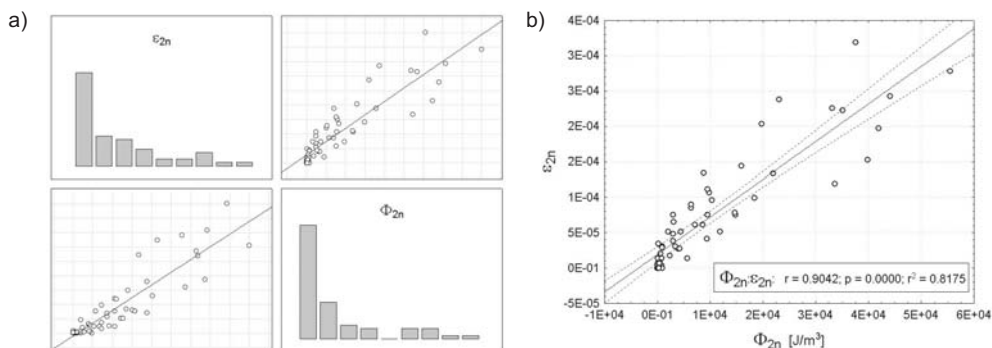


Rys. 9. Przykładowe charakterystyki obciążenia i odciążenia próbki dolomitu (a) oraz obciążenia, odciążenia i ponownego obciążenia (b)

Na wstępie tej analizy założono, że przyrosty trwałych odkształceń zarówno osiowych ϵ_{1n} , jak i poprzecznych ϵ_{2n} , powiązane są z energią utraconą na poszczególnego rodzaju odkształcenia (Φ_{1n} oraz Φ_{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 ε_{1n} a energią utraconą na trwałe odkształcenia ε_{1n} w poszczególnych pętłach obciążenia. Macierz wykresów rozrzutu (a) oraz korelacja z pasem ufności na poziomie 0,95 (b)

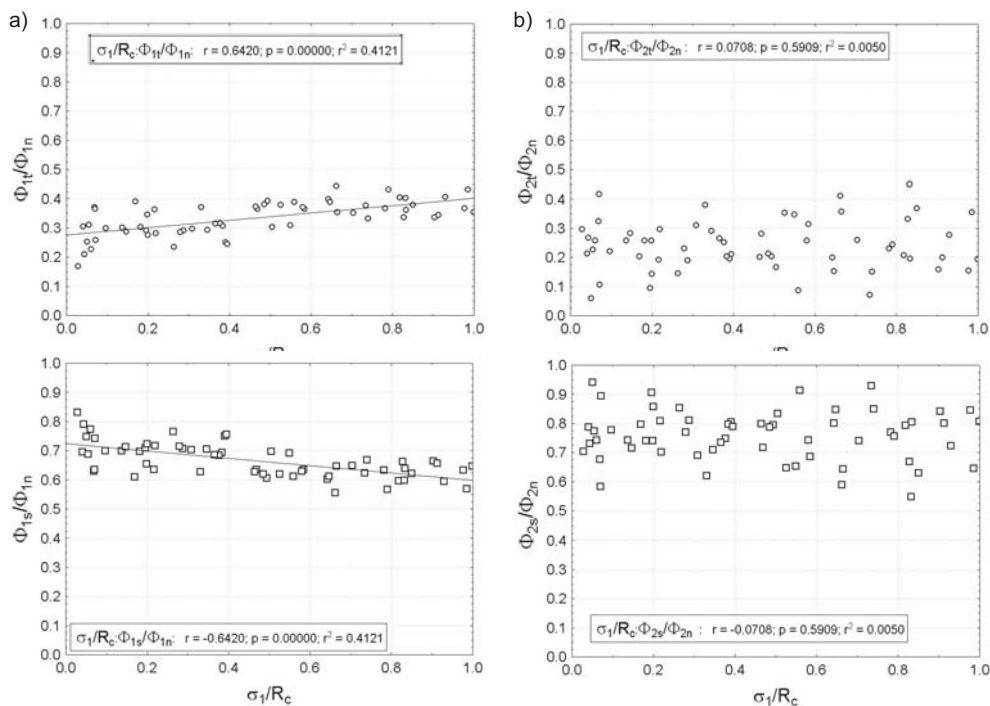


Rys. 11. Zależność pomiędzy przyrostami trwałych odkształceń poziomych ε_{2n} , a energią utraconą na trwałe odkształcenia ε_{2n} w poszczególnych pętłach obciążenia. Macierz wykresów rozrzutu (a) oraz korelacja z pasem ufności na poziomie 0,95 (b)

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 Φ_{1n} , pomimo iż i tak jest wysoki, mógłby być jeszcze większy, gdyby nie trudności z uzyskaniem dokładnego pomiaru trwałych odkształceń osiowych ε_{1n} próbek.

Następnie prześlędzono zmiany dwóch rodzajów energii (energii utraconej na tarcie wewnętrzne w skale Φ_l oraz energii odpowiadającej procesom propagacji i otwierania się

nowych spękań Φ_s) w trakcie procesu obciążenia. Analizie poddano jednak nie wartości poszczególnych rodzajów energii Φ_t i Φ_s , a ich stosunek do całkowitej energii utraconej na trwale odkształcenia Φ_s/Φ_n oraz Φ_t/Φ_n w poszczególnych pętłach 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 Φ_{1t} i Φ_{1s} w energii Φ_{1n} utraconej na osiowe trwale odkształcenia – wszystkie prędkości odkształcenia; b) zmiany udziału energii Φ_{2t} i Φ_{2s} w energii Φ_{2n} utraconej na poprzeczne trwale odkształcenia – wszystkie prędkości odkształcenia

Analiza przedstawionych powyżej wykresów korelacji dla zmian udziału energii Φ_{1t} i Φ_{1s} w całkowitej energii utraconej na odkształcenia trwale Φ_{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 (Φ_{1t}), druga zaś maleje (Φ_{1s}). We wstępnej fazie obciążenia dominują procesy pęknięcia (Φ_{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 Φ_{2r} i Φ_{2s} w całkowitej energii Φ_{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.

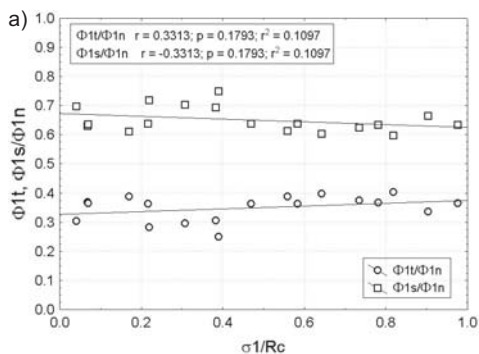
Analizując zaprezentowane powyżej wykresy korelacji dla zmian udziału energii Φ_{1r} i Φ_{1s} w całkowitej energii utraconej na odkształcenia trwałe Φ_{1n} na kierunku osiowym (rys. 13a), dla różnych prędkości odkształcenia, można stwierdzić, iż prędkość odkształcenia ma duży wpływ na obserwowane zmiany. 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.

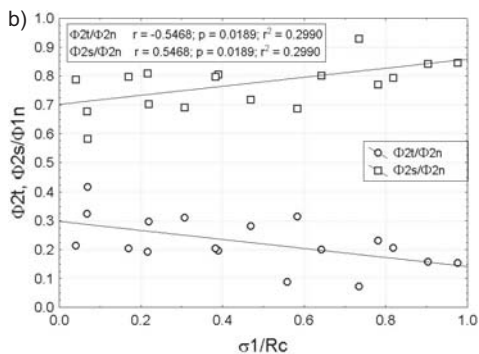
W przypadku zmian udziału energii Φ_{2r} i Φ_{2s} odkształceń poprzecznych w procesie zniszczenia próbek (rys. 13b), dla najmniejszej z analizowanych prędkości odkształcenia $1 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, na wstępie procesu obciążania dominujące są procesy pękania ok. 70%, a przy dalszym obciążeniu 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} 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.

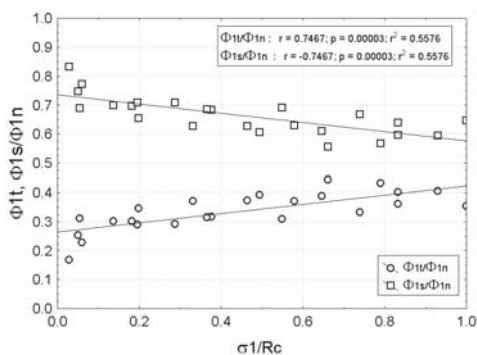
Reasumując, należy stwierdzić, że trwałe odkształcenia na kierunku osiowym i poprzecznym próbek dolomitu są efektem dwóch różnych zjawisk analizowanych na poziomie mikromechaniki. W pierwszym przypadku pochodzą one w większej części od propagacji i łączenia się spękań oraz w istotnej części z poślizgu 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.



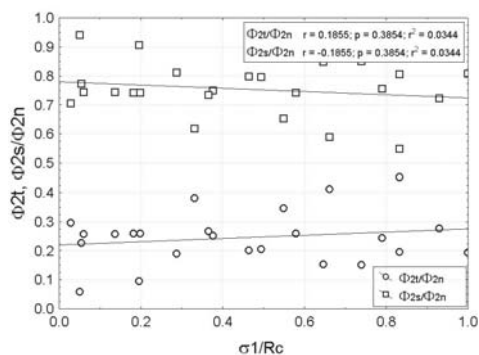
$$\dot{\epsilon} = 1,0E - 04 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$



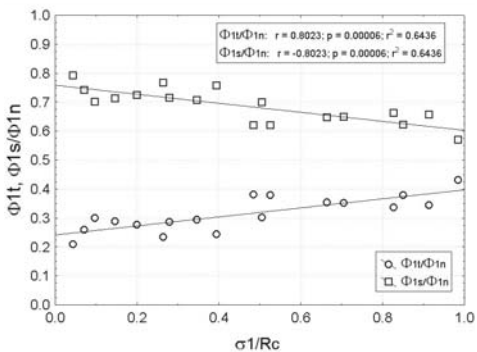
$$\dot{\epsilon} = 1,0E - 04 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$



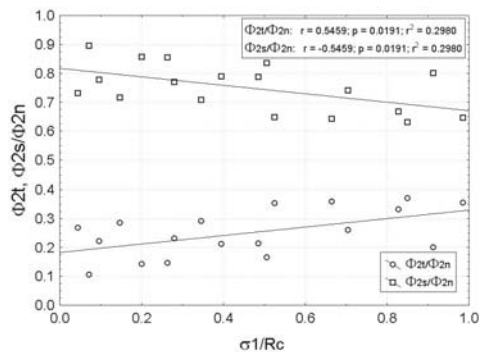
$$\dot{\epsilon} = 1,0E - 04 \text{ [s}^{-1}\text{]}$$



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



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



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

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 Φ_{1t} i Φ_{1s} w energii Φ_{1n} utraconej na osiowe trwałe odkształcenia – rozbitcie na różne prędkości odkształcenia; b) zmiany udziału energii Φ_{2t} i Φ_{2s} w energii Φ_{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