

MIROŚLAWA BUKOWSKA\*, URSZULA SANETRA\*\*

## **Badania konwencjonalnego trójosiowego ściskania granitu i dolomitu w aspekcie ich własności mechanicznych**

### **Wprowadzenie**

Pionierskie prace w zakresie badania skał w trójosiowym ściskaniu przeprowadzone były z początkiem XX wieku przez Karmana. Historia badań trójosiowych szczegółowo opisana została przez Kwaśniewskiego (2002).

W Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach prowadzi się testy konwencjonalnego trójosiowego ściskania, głównie skał formacji karbonu produktywnego Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (Bukowska, Sanetra, Szedel 1998; Bukowska 2002, 2003, 2005a; Krzyszoń, Sanetra 2003, 2004, 2005, 2006, 2007; Bukowska, Sanetra, Wadas 2007), ale również badania skał z innych formacji geologicznych. Przykładem są eksperymenty przeprowadzone dla granitu z rejonu Szegomia i dolomitu ze złoża Ząbkowice Będzińskie, których wyniki są przedmiotem zainteresowań autorek niniejszego artykułu w aspekcie nie tylko krytycznego naprężenia różnicowego (wytrzymałość graniczna), resztkowej wytrzymałości różnicowej i parametrów odkształceniowych, ale również pod kątem różnic w wartościach parametrów oporu ścinania – spójności i kąta tarcia wewnętrznego dla skał zwiezłych i spękanych.

### **1. Metodyka badań w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania**

Eksperymenty w trójosiowym stanie naprężenia, w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania, prowadzono w maszynie wytrzymałościowej MTS-810 NEW z serwo-

---

\* Doc. dr hab., \*\* Dr, Główny Instytut Górnictwa, Katowice; e-mail: m.bukowska@gig.katowice.pl

mechanizmem, w której ciśnienie pionowe wynika z obciążenia płytą prasy a ciśnienie okólne z oddziaływania oleju. Sterowanie maszyną wytrzymałościową odbywało się za pomocą prędkości odkształcenia podłużnego rzędu  $10^{-5}\text{s}^{-1}$ , mierzonej w systemie pomiarowym prasy przemieszczeniem tłoka. W badaniach stosowano komorę ciśnieniową typu KTK firmy UNIPRESS, a eksperymenty prowadzono przy maksymalnym ciśnieniu okólnym 70 MPa. Integralną częścią wyposażenia do badań skał w komorze ciśnieniowej jest pompa umożliwiająca utrzymanie ciśnienia bocznego na zadanym, stałym poziomie.

Badania w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$ ) prowadzono zgodnie z zaleceniami Międzynarodowego Towarzystwa Mechaniki Skał (Ulusay, Hadson red. 2007) na próbkach walcowych o średnicy 30 mm i smukłości 2, w kierunku prostym do uwarstwienia. Badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej na 56 próbkach dolomitu i 60 próbkach granitu.

## **2. Własności mechaniczne dolomitu i granitu w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania**

### **2.1. Charakterystyka złoża dolomitu w Ząbkowicach Będzińskich i złoża granitu w Strzegomiu**

Złoże dolomitu „Ząbkowice Będzińskie” występuje w obrębie jednostki tektonicznej zwanej garbem tarnogórskim położonym na Wyżynie Śląsko-Krakowskiej, który tworzy płytę wapienia muszlowego o powierzchni około 1010 km<sup>2</sup>, wzniesioną średnio 340–380 m n.p.m. i opadającą na południe progiem tektoniczno-denudacyjnym w stronę GZW. Eksploatowane złożo obejmuje dolomity kruszczośne i diploporowe, reprezentujące wapień muszlowy dolny i środkowy. Dolomity kruszczośne leżą na warstwach gogolińskich wykształconych w postaci wapieni. W stropie dolomitów występuje rumosz w różnym stopniu zagliniony. Grubość nadkładu jest zmienna w granicach od 0,2 do 12,7 m. Seria złożowa zapada pod kątem do 12°, w kierunku NE.

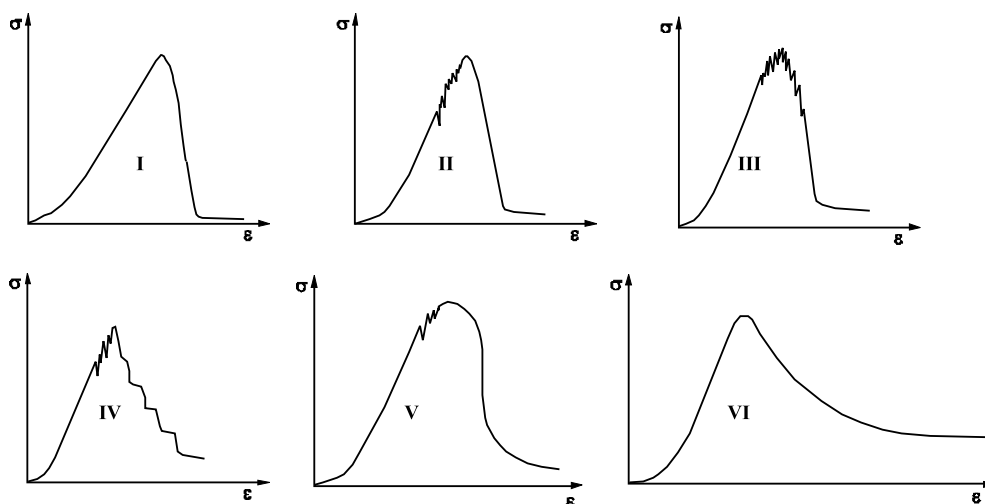
Dolomity powstają w wyniku bezpośredniej krystalizacji minerału dolomitu w silnie zasolonych zbiornikach wodnych w obecności CO<sub>2</sub> i substancji organicznej lub w wyniku dolomityzacji – procesu, który polega na zastępowaniu w osadach wapiennych wapnia magnezem. Zbudowane są z podwójnego węglanu wapnia i magnezu – minerału dolomitu CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, w skład którego wchodzi ponad 21% MgO, 30% CaO i ponad 47% CO<sub>2</sub>. Takie proporcje składników czynią dolomit skałą monomineralną. Jednakże dolomity kruszczośne zawierają sfaleryt, wurcyt, galenę, piryty i markasyt. Są drobnokrystaliczne, zbite oraz porowate i kawerniste, barwy szarej, szarobeżowej i żółtoszarej (Bukowska i in. 2000).

Masyw strzegomski położony jest w obrębie jednostki geologicznej zwanej blokiem przedsudeckim, która od południa graniczy z Sudetami strefą uskoku sudeckiego brzeźnego, a od północy z monokliną przedsudecką i monokliną śląsko-krakowską linią uskoku środkowej Odry. Złoże granitu Strzegom występuje w obrębie masywu granitoidowego

Strzegom-Sobótka ciągnącego się na długości około 50 km pomiędzy NW stokami masywu Ślęży a brzegiem Sudetów w okolicy Jawora. Masyw ukształtował się w górnym karbonie w czasie waryscyjskich ruchów górotwórczych. W rejonie Strzegomia przebiega granica dzieląca masyw na dwie części: północno-zachodnią i południowo-wschodnią, w której krystalizacja magmy odbywała się na znacznie większych głębokościach. Oś intruzji granitoidów przebiega zgodnie z kierunkiem NNE-SSW. Granit strzegomski jest jedną z kilku odmian petrograficznych występujących w głównej masie granitoidu – granit biotytowy miejscami z hornblendą. Cechuje się strukturą fanerytową, równoziarnistą i teksturową masywną, bezładną Osłonę granitoidów masywu Strzegom-Sobótka stanowią staropaleozoiczne utwory metamorficzne, a dalej na północ prekambryjskie gnejsy z żyłami kwarcowymi. Granity i skały osłony są przecinane bazaltami trzeciorzędowymi.

## 2.2. Kształt charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych przebadanego dolomitu i granitu

Sterując przebiegiem badania za pomocą sygnału całkowitych odkształceń próbki wyrażających się przemieszczeniem tłoka, Bukowska (2005b), wyróżniła VI typów krzywych niszczenia próbek skalnych (rys. 1). Krzywe naprężeniowo-odkształceniowe różnią się kształtem zarówno w części przedkrytycznej, jak i pokrytycznej. Różnice te wyrażają się, między innymi długością fazy zamykania się mikroszczelin w części przedkrytycznej,



Rys. 1. Typy charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych skał karbonu górnego GZW wg Bukowskiej (2005b) przy sterowaniu eksperymentem za pomocą sygnału całkowitych odkształceń próbki wyrażających się przemieszczeniem tłoka:  $\epsilon$  – odkształcenie,  $\sigma$  – naprężenie

Fig. 1. The types of upper GZW Carboniferous rocks stress-deformation characteristic according to Bukowska (2005b) while the experiment was controlled by means of signals on the overall deformation of sample, expressed by dislocation of a piston:  $\epsilon$  – deformation,  $\sigma$  – stress

występowaniem lokalnych spadków naprężeń odwzorowujących długość spękań w części przedkrytycznej i pokrytycznej, „gładkim” lub „schodkowym” przebiegiem krzywej pokrytycznej (odkształcenia plastyczne), możliwością aproksymacji części pozniszczeniowej zależnością liniową lub hiperboliczną zmierzającą do naprężenia resztkowego.

Przebadane dolomity i granity należą do dwóch, spośród 6 typów krzywych niszczenia próbek skalnych.

Próbki dolomitów ściskane przy  $p = 0$  MPa wykazują w przebiegu swoich krzywych naprężeniowo-odkształceniowych cechy charakterystyczne dla IV typu krzywej zniszczenia, sporadycznie zniszczenie przebiega zgodnie z krzywą typu III. W przebiegu krzywych naprężeniowo-odkształceniowych (typ IV) odcinek odkształceń sprężystych kończy się lokalnymi spadkami naprężenia. W części krzywej pokrytycznej zaznaczają się „schodkowe” zmiany naprężenia aż do wartości naprężenia resztkowego.

Krzywe zniszczenia przebadanych granitów (typ III) wykazują przedkrytyczny prostoliniowy odcinek odkształceń sprężystych zakończony lokalnymi spadkami naprężenia, które występują również w górnym odcinku krzywej pokrytycznej. Następnie krzywa pozniszczeniowa przechodzi w odcinek prostoliniowy o wysokim module pokrytycznym, w wyniku gwałtownego zmniejszania się naprężenia do bardzo małej wartości, często bliskiej zera.

### 2.3. Wyniki eksperymentu

W obrębie każdego z dwóch typów skał – osadowych (dolomitów) i magmowych (granitów), z uwagi na zróżnicowanie wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, wyodrębniono dwie grupy:

- 1) dolomit I, granit I,
- 2) dolomit II i granit II.

Parametry fizyczne, w tym mechaniczne, uzyskane w badaniach w jednoosiowym ściskaniu przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Parametry fizyczne dolomitu i granitu

TABLE 1

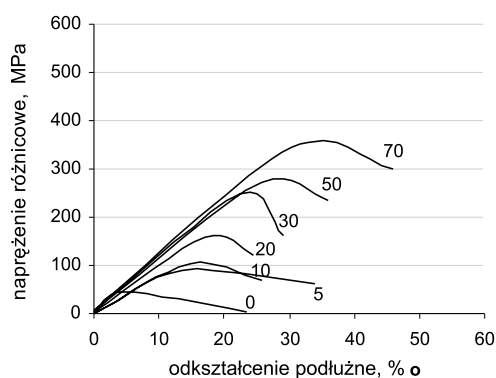
The physical parameters of dolomite and granite

Skala	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł Younga [GPa]	Moduł pokrytyczny [GPa]	Gęstość objętościowa [g/cm <sup>3</sup> ]
dolomit I	44,4	4,70	17,5	26,1	2,47
dolomit II	78,4	6,64	17,9	93,4	2,39
granit I	66,7	6,06	16,7	43,9	2,60
granit II	91,8	8,84	21,5	35,0	2,62

Poniżej przedstawiono zmiany naprężenia różnicowego, które wyraźnie korelują ze zmianą wartości ciśnień okólnych  $p$  w zakresie od 0 do 70 MPa. Tendencje te przedstawiono dla dolomitu na rysunku 2, a dla granitu na rysunku 3. Naprężenie różnicowe osiąga maksymalną wartość dla poszczególnych ciśnień okólnych przy większych odkształceniach w przypadku granitu w stosunku do dolomitu. Szczególnie dotyczy to wyższych wartości ciśnień okólnych stosowanych w eksperymencie.

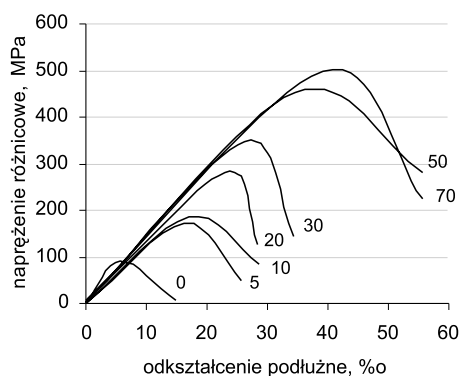
Wartości parametrów naprężeniowych uzyskane w wyniku badań w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania opracowano jako zależności funkcyjne od ciśnienia okólnego ( $p$ ). Przyjęto oznaczenia:

- $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$  – krytyczne naprężenie różnicowe (wytrzymałość graniczna),
- $\sigma_{\text{res}} - \sigma_3$  – reszkowa wytrzymałość różnicowa,
- $\varepsilon_{\text{kr}}$  – odkształcenie krytyczne wyznaczone przy maksymalnym naprężeniu,
- $\varepsilon_{\text{res}}$  – odkształcenie reszkowe odpowiadające wytrzymałości reszkowej w podkrytycznej części krzywej naprężeniowo-odkształceniowej.



Rys. 2. Zależność naprężenie różnicowe – odkształcenie podłużne – dolomit I

Fig. 2 The dependence differential stress – axial strain – dolomite I

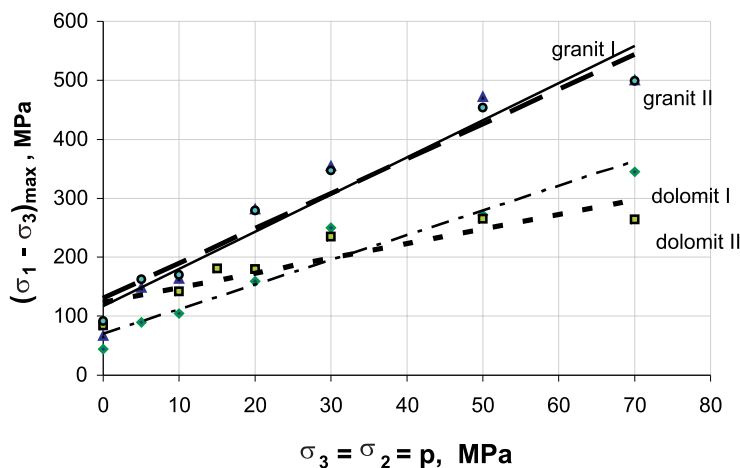


Rys. 3. Zależność naprężenie różnicowe – odkształcenie podłużne – granit II

Fig. 3. The dependence differential stress – axial strain – granite II

Na rysunkach 4–8 przedstawiono zależności pomiędzy ciśnieniem okólnym stosowanym w eksperymentach a wybranymi parametrami geomechanicznymi. Dla zależności  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ ,  $\sigma_{\text{res}} - \sigma_3$ ,  $\varepsilon_{\text{kr}}$ ,  $\varepsilon_{\text{res}} = f(p)$  dopasowano funkcje o wysokich współczynnikach korelacji, których postać i wartość współczynników  $r$  dla badanych skał przedstawiono w dalszej części artykułu. Zależność pomiędzy ciśnieniem okólnym do 70 MPa a różnicowym naprężeniem krytycznym (rys. 4) opisano funkcją liniową o współczynnikach korelacji od 0,91 do 0,97.

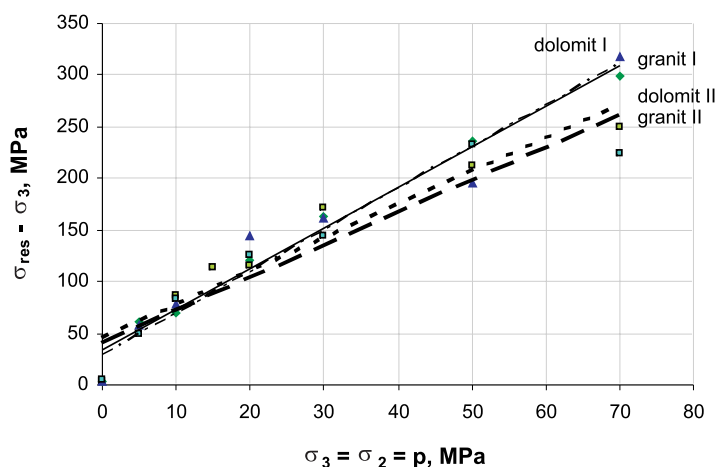
Badacze zajmujący się badaniami niszczenia skał w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskaniem podają, że przy niewielkich ciśnieniach okólnych skały wykazują „efekt wysokiej czułości ciśnieniowej wytrzymałości wywołanej spękaniami skał” (Kwaśniewski 2002), który wyraża się wypukłością krzywej naprężeniowo-odkształceniowej w kierunku osi wytrzymałości granicznej. Efekt ten wynika z obecności defektów strukturalnych w skale (zamykanie się mikroszczelin i porów w wyniku obciążania). Zatem, początkowy etap niszczenia ma przebieg nieliniowy, co również uzyskały autorki w przeprowadzonych eksperymentach. Następnie zależność krytycznego naprężenia różnicowego od ciśnienia okólnego w stosowanym zakresie  $p$  do 70 MPa dla przebadanych skał wykazuje przebieg prostoliniowy. Charakter prostoliniowego przebiegu omawianej zależności po okresie wstępnej kompaktacji próbki przy niskich ciśnieniach okólnych dla niektórych skał potwierdza również Kwaśniewski (2002). Literatura wskazuje, że przy większych wartościach ciśnienia okólnych, gdy skała przechodzi ze stanu kruchego w stan ciągliwy, podawane są częściej przebiegi krzywoliniowe (Gustkiewicz 1999; Kwaśniewski 2002).



Rys. 4. Zależność krytycznego naprężenia różnicowego od ciśnienia okólnego

Fig. 4. The dependence of differential critical stress on confining pressure

dolomit I	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} = 4,1836p + 69,975;$	$r = 0,9718$
dolomit II	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} = 2,4749p + 124,16;$	$r = 0,9065$
granit I	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} = 6,2859p + 117,73;$	$r = 0,9675$
granit II	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} = 5,8844p + 130,80;$	$r = 0,9747$



Rys. 5. Zależność resztkowej wytrzymałości różnicowej od ciśnienia okólnego

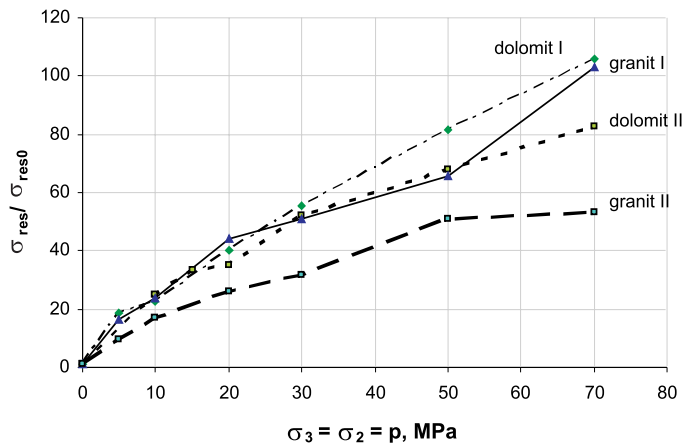
Fig. 5. The dependence of differential residual strength on confining pressure

<i>dolomit I</i>	$\sigma_{\text{res}} - \sigma_3 = 4,0303p + 29,503;$	$r = 0,9902$
<i>dolomit II</i>	$\sigma_{\text{res}} - \sigma_3 = 3,2181p + 46,64;$	$r = 0,9548$
<i>granit I</i>	$\sigma_{\text{res}} - \sigma_3 = 3,9324p + 33,157;$	$r = 0,9736$
<i>granit II</i>	$\sigma_{\text{res}} - \sigma_3 = 3,1533p + 40,259;$	$r = 0,9473$

Z analizy wyników badań wynika wzrost krytycznego naprężenia różnicowego ze wzrostem ciśnienia okólnego, przy czym wzrost ten przy  $p = 70$  MPa dla dolomitu jest 3–8-krotny w stosunku do warunków jednoosiowego ściskania, a dla granitu 5–7,5-krotny. Jednocześnie większy wzrost krytycznego naprężenia różnicowego zaobserwowano dla skał o mniejszej wytrzymałości krytycznej w jednoosiowym ściskaniu (dolomit I, granit I). Według innych badaczy wynika, że wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego wrasta wartość naprężenia różnicowego, jednakże wzrost ten dla skał osadowych jest niższy niż w przypadku skał magmowych, np. dla granitu, dla którego różnica pomiędzy wartościami naprężenia różnicowego ze wzrostem ciśnienia okólnego w przedziale wartości 20–50 MPa wynosi 100% (Li H.B., Zhao J., Li T.J. 1999).

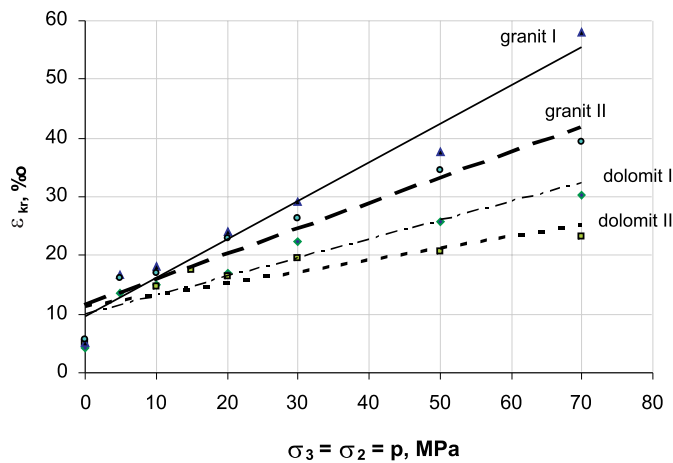
Resztkowa wytrzymałość różnicowa również ulega zmianom pod wpływem wzrostu ciśnienia okólnego. Zależność w zakresie stosowanych w eksperymentach ciśnień okólnych aproksymowano funkcją liniową, dla której uzyskano współczynniki korelacji (0,95 – 0,99) (rys. 5).

Wzrost ciśnienia okólnego do 70 MPa spowodował 65–85-krotny wzrost resztkowej wytrzymałości różnicowej dla dolomitu i 40–85-krotny wzrost dla granitu w stosunku do wartości uzyskanych przy  $p = 0$  MPa ( $\sigma_{\text{res}0}$ ) (rys. 6). Wzrost ten jest wyższy w stosunku do zmian krytycznego naprężenia różnicowego z ciśnieniem okólnym i jednocześnie w pewnym sensie pokazuje dynamikę przejścia skały z fazy kruchej do ciągliwej. Jest on większy dla skał o niższej wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe (dolomit I, granit I).



Rys. 6. Względna wartość wytrzymałości resztkowej  $\sigma_{res}$  jako funkcja ciśnienia okólnego

Fig. 6. The relative value of residual strength  $\sigma_{res}$  as a function of confining pressure



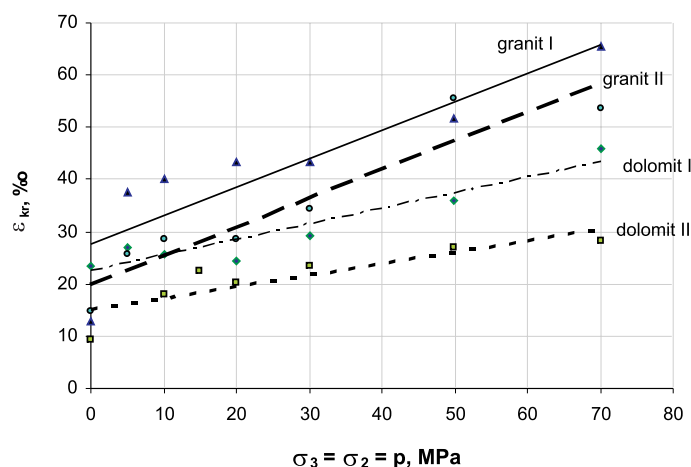
Rys. 7. Zależność odkształcenia krytycznego od ciśnienia okólnego

Fig. 7. The dependence of critical strain on confining pressure

<i>dolomit I</i>	$\varepsilon_{kr} = 0,3166p + 9,9742;$	$r = 0,9405$
<i>dolomit II</i>	$\varepsilon_{kr} = 0,1972p + 11,267;$	$r = 0,8333$
<i>granit I</i>	$\varepsilon_{kr} = 0,6549p + 9,6247;$	$r = 0,9803$
<i>granit II</i>	$\varepsilon_{kr} = 0,431p + 11,724;$	$r = 0,9598$

Wzrost wartości ciśnienia okólnego powodujący zmiany odkształcenia krytycznego i resztkowego przedstawiono na rysunkach 7 i 8. Zależność ta dla badanych skał w stosowanym zakresie ciśnienia od 0 do 70 MPa opisana jest funkcją liniową, dla której uzyskano współczynniki korelacji od 0,83 do 0,98.





Rys. 8. Zależność odkształcenia resztkowego od ciśnienia okólnego

Fig. 8. The dependence of residual strain on confining pressure

<i>dolomit I</i>	$\varepsilon_{\text{res}} = 0,2986p + 22,317;$	$r = 0,9487$
<i>dolomit II</i>	$\varepsilon_{\text{res}} = 0,2237p + 14,994;$	$r = 0,8682$
<i>granit I</i>	$\varepsilon_{\text{res}} = 0,5443p + 27,743;$	$r = 0,8754$
<i>granit II</i>	$\varepsilon_{\text{res}} = 0,5531p + 19,819;$	$r = 0,9441$

Najbardziej dynamiczny wzrost wartości odkształcenia krytycznego (3-krotny) uzyskano w zakresie ciśnienia okólnego od 0 do 10 MPa. Dalszy wzrost ciśnienia okólnego do 70 MPa powoduje maksymalnie 7-krotny wzrost  $\varepsilon_{\text{kr}}$  dla dolomitu i aż maksymalnie 11-krotny wzrost  $\varepsilon_{\text{kr}}$  dla granitu.

Wzrastające ciśnienie okólne w stosowanym zakresie w mniejszym stopniu wpływa na odkształcenie resztkowe. Przy ciśnieniu  $p = 70$  MPa nastąpił w badanych dolomitach 2–3 krotny wzrost  $\varepsilon_{\text{res}}$  i nieco większy (4–5-krotny) w granitach, w stosunku do wartości uzyskanych przy  $p = 0$  MPa.

#### 2.4. Kąt tarcia wewnętrznego i spójność

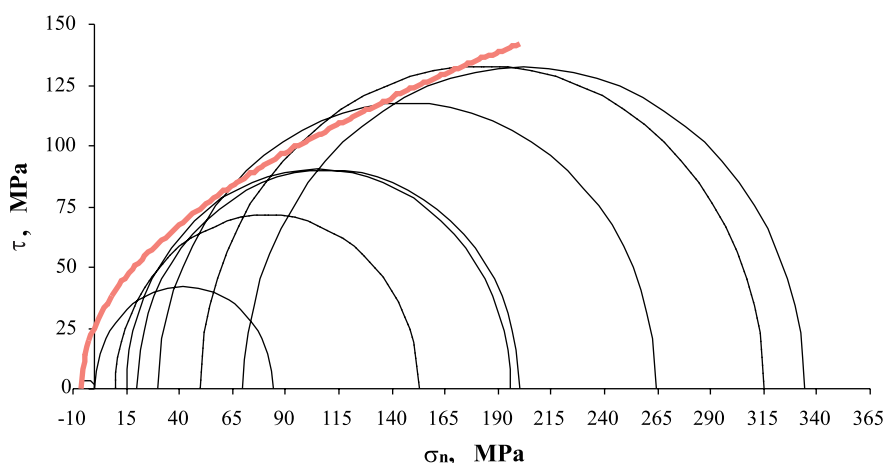
Wyniki przeprowadzonych eksperymentów w maszynie wytrzymałościowej, w konwencjonalnym trójosiowym ściskaniu dały podstawę do wyznaczenia wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego przebadanych skał, które wyznaczono na podstawie równań parabolicznych obwiedni kół Mohra dla ośrodka spękanego i niespękanego (Sanetra 2004).

Do określenia kąta tarcia wewnętrznego oraz spójności zastosowano program komputerowy, który szczegółowo opisano w publikacji (Sanetra, Paczeńskiowski 2006). Założono, że obwiednia kół Mohra jest parabolą wyznaczoną metodą najmniejszych kwadratów. Wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności obliczono z równania stycznej do tej paraboli w zadanym punkcie dla skał zwięzłych (faza przedkrytyczna) i spękanych (faza pokrytyczna).

Rysunek 9 przedstawia obwiednię kół Mohra dla skały zwięzłej (dolomit I), która poddana została rozciąganiu (koło Mohra po stronie rozciągania), jednoosiowemu ścisnaniu (koło Mohra styczne do osi  $\tau$ ) i trójosiowemu ścisnaniu ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) (koła Mohra przesunięte względem osi  $\tau$  o wartość ciśnienia okólnego). Z konstrukcji koła Mohra wynika, że  $\sigma_n$  i  $\tau$  jest naprężeniem normalnym i naprężeniem stycznym w płaszczyźnie ścinania.

Znając parametry paraboli obliczono kąt tarcia wewnętrzznego i spójność zwięzłych oraz spękanych skał dla różnych wartości naprężeń normalnych. W tabeli 2 przedstawiono wartości kąta tarcia wewnętrzznego  $\phi$  badanego dolomitu i granitu dla naprężenia normalnego  $\sigma_n = 60$  MPa i  $\sigma_n = 100$  MPa.

Ze wzrostem naprężenia normalnego wartość kąta tarcia wewnętrzznego ulega zmniejszeniu zarówno dla skał zwięzłych, jak i spękanych, co oznacza, że kąt tarcia wewnętrzznego



Rys. 9. Paraboliczna obwiednia kół Mohra dla skały zwięzłej – dolomit I

Fig. 9. The parabolic envelope of Mohr's circles method for intact rock – dolomite I

TABELA 2

Zestawienie wartości kąta tarcia wewnętrzznego dla skał zwięzłych i spękanych

TABLE 2

The list of values of internal friction angle and cohesion for intact and fractured rocks

Skała	$\sigma_{kr}$ przy $p = 0$ MPa	Faza przedkrytyczna		Faza pokrytyczna	
		$\sigma_n = 60$ MPa	$\sigma_n = 100$ MPa	$\sigma_n = 60$ MPa	$\sigma_n = 100$ MPa
		$\phi$ , stopnie	$\phi$ , stopnie	$\phi$ , stopnie	$\phi$ , stopnie
dolomit I	44,4	34°22'	28°16'	32°35'	26°21'
dolomit II	78,4	31°11'	25°34'	29°47'	23°55'
granit I	66,7	42°24'	35°47'	32°27'	26°13'
granit II	91,8	41°09'	34°48'	29°28'	23°38'

dla skał poddanych mniejszym ciśnieniom (zalegających na niewielkich głębokościach) jest większy w stosunku do skał zalegających na dużych głębokościach (Sanetra 2004, 2005). Spójność dolomitu wahała się od 54,2 do 58,8 MPa, natomiast granitu od 80,8 do 81,8 MPa. Wśród przebadanych skał zaobserwowano, że dolomit charakteryzuje się mniejszą wartością kąta tarcia wewnętrznego i spójności w stosunku do granitu. Podobne tendencje zmian zaobserwowała Pinińska (2007) dla skał osadowych (wapienie) i metamorficznych (granitognejsy). Autorki artykułu wykazały również, że wartość kąta tarcia wewnętrznego skał spękanych jest mniejsza niż skał zwiezłych, podobnie jak w przebadanych przez Sanetrę (2006, 2007) skałach karbonu produktywnego GZW.

### Zakończenie

Przedmiotem przeprowadzonych badań w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania były dolomity należące do jednostki tektonicznej nazwanej garbem tarnogórskim i granity z bloku przedsudeckiego.

Sterując przebiegiem pracy maszyny wytrzymałościowej za pomocą sygnału całkowitych odkształceń próbki wyrażających się przemieszczeniem tłoka wykazano, że w warunkach, gdy  $p = 0$  MPa próbki dolomitów i granitów różnią się kształtem krzywych deformacji, które – szczególnie w obszarze pokrytycznym – charakteryzują dynamikę ich niszczenia. Próbki dolomitów wykazują w przebiegu swoich krzywych naprężeniowo-odkształceniowych cechy charakterystyczne dla IV typu krzywej zniszczenia według Bukowskiej, sporadycznie zniszczenie przebiega zgodnie z krzywą typu III. W przypadku granitu dominującym typem krzywej niszczenia jest krzywa typu III.

Stosowane przez autorki artykułu w eksperymentach trójosiowego konwencjonalnego ściskania ciśnienia okólne maksymalnie do 70 MPa dają podstawę prognozowania zachowania się górotworu na głębokościach do około 3000 m. Daje to ogólną wiedzę o tendencjach zachowań się skał na dużych głębokościach i możliwościach wnioskowania dla celów projektowania bezpiecznej eksploatacji złóż różnych surowców. Dotyczy to również surowców energetycznych, których eksploatacja schodzi na coraz to większe głębokości w związku ze stopniowym wyczerpywaniem się złóż bilansowych i postępującą restrukturyzacją kopalń w największych zagłębiach europejskich.

W eksperymentach wykazano nie tylko tendencje zmian parametrów naprężeniowych i odkształceniowych wynikające z ciśnienia okólnego, ale również przedstawiono dla przebadanych skał, w zakresie stosowanych ciśnień okólnych do 70 MPa, liniowe zależności funkcyjne, których nie wyklucza Kwaśniewski (2002) w procesie niszczenia skał po „zamknięciu pierwotnych mikroszczelin”.

Potwierdzona została również prawidłowość wykazana wcześniej przez autorki, że wzrost wartości przedstawionych w artykule parametrów w wyniku wzrostu ciśnienia okólnego jest większy dla skał o niższej wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe ( $p = 0$  MPa).

Spośród parametrów geomechanicznych najbardziej „wrażliwym” na zmiany ciśnienia okólnego jest wytrzymałość reszkowa, która odzwierciedla nośność pokrytyczną górotworu w rejonach eksploatacji (np. nośne strefy spękanych filarów). Odnotowano blisko 90-krotny wzrost jej wartości w przedziale ciśnień okólnych od 0 do 70 MPa.

Ustalenie wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego skał jest podstawą rozwiązywania wielu zadań inżynierskich z obszaru szeroko rozumianej geoinżynierii. Dotyczy to między innymi obliczeń stateczności skarp, zboczy i masywów skalnych, co ma pierwszorzędne znaczenie, obok pomiarów szczelinowatości, dla prowadzenia bezpiecznej eksploatacji w odkrywkowych zakładach górniczych. Odnosi się to również do projektowania bezpiecznej eksploatacji w podziemnych zakładach górniczych na dużych głębokościach w aspekcie stateczności wyrobisk górniczych – powstawanie stref spękań górotworu wokół wyrobisk.

Badaniami wykazano, że dolomit charakteryzuje się mniejszą wartością kąta tarcia wewnętrznego i spójności w stosunku do granitu. Poprzez analizę krzywych niszczenia w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania potwierdzono ogólną zasadę, że wartość kąta tarcia wewnętrznego skał spękanych, które przedstawia krzywa pokrytyczna jest mniejsza niż skał zwiezłych (krzywa przedkrytyczna).

#### LITERATURA

- Bukowska M., Sanetra U., Szedel D., 1998 – Wyznaczanie kąta tarcia wewnętrznego i kohezji dla próbek skalnych badanych w konwencjonalnym trójosiowym ściskaniu w sztywnej maszynie wytrzymałościowej. Prace Naukowe GIG, seria: Konferencje nr 26, 7–14. Katowice.
- Bukowska M., Gawryś J., Sanetra U., Szedel D., Wadas M., 2000 – Parametry fizyczne surowców skalnych a ich przydatność w budownictwie i drogownictwie. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kwartalnik, t. 16, z. 2, 43–59.
- Bukowska M., 2002 – Geomechanical properties of rocks from the rock burst hazard point view. Archives of Mining Sciences 47, 2, 111–138. Kraków.
- Bukowska M., 2003 – Post-critical properties of Carboniferous rocks in the Upper Silesian Coal Basin under varying strain rate and confining pressure conditions. Archives of Mining Sciences 48, 4, 561–575. Kraków.
- Bukowska M., 2005a – Mechanical properties of Carboniferous rocks in the Upper Silesian Coal Basin under uniaxial and triaxial compression tests. Journal of Mining Science. No. 2, vol. 41, 129–133. Springer New York.
- Bukowska M., 2005b – Prognozowanie skłonności do tupań górotworu metodą wskaźnikowej oceny geologiczno-geomechanicznej w warunkach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Prace Naukowe GIG nr 866. Katowice.
- Bukowska M., Sanetra U., Wadas M., 2007 – The post-peak failure properties and deformational structures of rocks under conventional triaxial compression conditions. Archives of Mining Sciences, Vol. 52, No 3, 297–310. Kraków.
- Gustkiewicz J., i in., 1999 – Własności fizyczne wybranych skał karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, Skały warstw siodłowych. Kraków.
- Krzysztoń D., Sanetra U., 2003 – Investigations of rocks under triaxial compression at confining pressure from 0 to 70 MPa. Archiwum Górnictwa 48, 2, 231–253. Kraków.
- Kwaśniewski M., 2002 – Zachowanie się skał izo- i anizotropowych w warunkach trójosiowego ściskania. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo, z. 247. Gliwice.

- Li H.B., Zhao J., Li T.J. 1999 – Triaxial compression tests on a granite at different strain rates and confining pressures. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.* Vol. 36, No. 8, 1057–1063.
- Pinińska J., 2007 – Potrzeba wysokociśnieniowych badań skał dla głębokiego rozpoznania geologicznego. *Archiwum Górnictwa*, vol. 52, Nr 3, 281–296. Kraków.
- Sanetra U., 2004 – Określenie nośności filarów oporowych w stanie pokrytycznym na podstawie badań trójosiowego ściskania karbońskich próbek skalnych. Praca doktorska. GIG. Katowice.
- Sanetra U., 2005 – Kąt tarcia wewnętrznego skał zalegających na różnych głębokościach. *Miesięcznik WUG* 6(130), Warsztaty Górnicze, 54–46. Katowice.
- Sanetra U., Pacześniowski K., 2006 – Obliczanie kąta tarcia wewnętrznego i spójności metodą stycznej do obwiedni kół Mohra w postaci paraboli. *Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko, Kwartalnik* 2, Katowice, 23–34.
- Sanetra U., 2006 – Krytyczne i pokrytyczne własności różnoziarnistych piaskowców karbońskich GZW badanych w trójosiowym ściskaniu. *Miesięcznik WUG* 6(142), Warsztaty Górnicze, 42–44. Katowice.
- Sanetra U., 2007 – Wytrzymałość resztkowa różnych typów litologicznych skał. *Miesięcznik WUG. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* 6 (154)/2007, 39–41.
- Ulusay R., Hudson J.A. (red.) 2007 – The Complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey. 157–164.

**BADANIA KONWENCJONALNEGO TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA GRANITU I DOLOMITU  
W ASPEKcie ICH WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH**

Słowa kluczowe

Napężenie, odkształcenie, ciśnienie okólne, skały

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki testów konwencjonalnego trójosiowego ściskania granitu z masywu Strzegom-Sobótka i dolomitu ze złoża Ząbkowice Będzińskie – skał należących do dwóch z trzech podstawowych typów wyznaczonych według kryterium ich tworzenia się.

Badania prowadzono w maszynie wytrzymałościowej z serwomechanizmem MTS-810 i w komorze typu Karmana przy ciśnieniach okólnych do 70 MPa. Sterowanie maszyną wytrzymałościową odbywało się za pomocą prędkości odkształcenia podłużnego rzędu  $10^{-5}\text{s}^{-1}$ , mierzonej w systemie pomiarowym prasy przemieszczeniem tłoka. Badania w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$ ) prowadzono zgodnie z zaleceniami ISRM. Do badań przygotowano próbki walcowe o średnicy 30 mm i smukłości 2. Próbki obciążano prostopadłe do uwarstwienia. Badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej.

Wykazano przy  $p = 0$  MPa, że próbki dolomitów i granitów różnią się kształtem krzywych napężeniowo-odkształceniowych, które szczególnie w obszarze pokrytycznym, charakteryzują dynamikę ich niszczenia. Próbki dolomitów wykazują w przebiegu krzywych deformacyjnych cechy charakterystyczne dla IV typu krzywej zniszczenia według Bukowskiej (2005b), sporadycznie zniszczenie przebiega zgodnie z krzywą typu III. W przypadku granitu dominującym typem krzywej niszczenia jest krzywa typu III.

Określono wartości parametrów napężeniowych i odkształceniowych: krytyczne napężenie różnicowe (wytrzymałość graniczna), resztkową wytrzymałość różnicową, odkształcenie krytyczne wyznaczone przy maksymalnym napężeniu i odkształcenie resztkowe odpowiadające wytrzymałości resztkowej.

Wyniki badań własności geomechanicznych opracowano jako funkcje ciśnień okólnych w zakresie 0–70 MPa. Przedstawiono dla przebadanych skał, w zakresie stosowanych ciśnień okólnych do 70 MPa, liniowe zależności funkcyjne o wysokich współczynnikach korelacji (rys. 2–8). Wykazano większy wzrost wartości badanych parametrów w wyniku wzrostu ciśnienia okólnego dla skał o niższej wytrzymałości przy  $p = 0$  MPa. Najbardziej „wrażliwym” na zmiany ciśnienia okólnego spośród parametrów geomechanicznych jest wytrzymałość resztkowa. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów stanowią postawę określenia wartości spójności i kąta tarcia wewnętrznego obu rodzajów skał za pomocą stycznych do obwiedni kół Mohra w postaci paraboli.

THE TESTS OF THE CONVENTIONAL TRIAXIAL GRANITE AND DOLOMITE COMPRESSION  
IN THE ASPECT OF THEIR MECHANICAL PROPERTIES

Key words

Stress, deformation, confining pressure, rocks

Abstract

The article presents the results of tests of conventional triaxial compression of granite from the Strzegom-Sobótka massif and dolomite from the Ząbkowice Będzińskie deposit – rocks belonging to two from three basic types determined according to the criterion of their formation.

The investigations were carried out using the testing machine with the servomechanism MTS-810 and chamber of Karman type in conditions of circular pressures up to 70 MPa. The testing machine steering was performed with the longitudinal deformation velocity of  $10^{-5}\text{s}^{-1}$  range measured in the press measuring system by means of piston displacement. The investigations in conditions of conventional triaxial compression ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$ ) were conducted in accordance with ISRM recommendations. Cylindrical samples with diameter of 30 mm and slenderness ratio of 2 were prepared for tests. The tests were carried out at room temperature.

It has been pointed out at  $p = 0$  MPa that the samples of dolomites and granites differ regarding the shape of stress-deformation curves, which particularly in the post-critical area characterise the dynamics of their destruction. The dolomite samples point out in the course of deformation curves features characteristic for the fourth type of the destruction curve according to Bukowska (2005b); rarely the destruction runs in accordance with the curve of third type. In case of granite the dominant destruction curve type is the curve of the third type.

The following stress and deformation parameters were determined: critical differential stress (boundary strength), residual differential strength, critical deformation determined at maximum stress and residual deformation corresponding with the residual strength.

The results of investigations of geomechanical properties were worked out as functions of circular pressures within the range of 0–70 MPa. Linear functional relationships with high correlation coefficients with respect to tested rocks in the range of applied circular pressures up to 70 MPa were presented (Figs. 2–8). A higher increase in the value of tested parameters as a result of circular pressure growth for rocks with lower strength at of  $p = 0$  MPa was pointed out. The parameter the most “susceptible” to circular pressure changes among geomechanical parameters is the residual strength. The results of the conducted tests were the base for the indicating the cohesion value and the angle of internal friction of both rocks types by the parabolic equation of the envelope of Mohr’s circles method.