ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1983

Seria: GÓRNICTWO z. 128 Nr kol. 778

Marek KWAŚNIEWSKI
Jacek PACHA
Stanisław OLEKSY

Instytut Projektowania, Budowy Kopalń
i Ochrony Powierzchni
Politechniki Śląskiej

WYTRZYMAŁOŚĆ TRÓJOSIOWA DWU MINERALOGICZNO/DIAGENETYCZNYCH ODMIAN DROBNO - ŚREDNIOZIARNISTYCH PIASKOWCÓW KARBOŃSKICH PNIÓWEK I ANNA

Streszczenie. W pracy przedstawiono opis i wyniki badań eksperymentalnych na konwencjonalne trójosiowe ściskanie drobno/ średnioziarnistego piaskowca polimiktycznego z warstw rudzkich PNIÓWEK oraz drobno- średnioziarnistego piaskowca arkozowego z warstw jaklowieckich ANNA. Oznaczono wpływ ciśnienia okólnego (do ok. 61 MPa w przypadku piaskowca PNIÓWEK i do ok. 34 MPa w przypadku piaskowca ANNA) na następujące parametry odkształceniowe i wytrzymałościowe badanych skał: typ zniszczenia, kąt zniszczenia, kąt tarcia wewnętrznego i granica wytrzymałości. Przyporządkowano im również odpowiednie kryteria wytrzymałościowe. Starając się dobrać równanie wytrzymałościowe, które najdokładniej aproksymuje dane doświadczalne, rozważono i poddano analizie dwadzieścia kryteriów empirycznych, matematycznych i fizykalnych wyrażonych w konwencji naprężeń głównych oraz szesnaście kryteriów w konwencji naprężeń oktaedrycznych.

1. Wprowadzenie

Wyniki badań nad mechanicznymi własnościami skał w jednoosiowych stanach naprężenia w ograniczonym tylko zakresie pozwalają sądzić o rzeczywistym zachowaniu się skał w masywie, in situ. Skały występują bowiem w górotworze w stanach naprężenia złożonych i poddawanie ich badaniom tzw. trójosiowym jest prawdziwą, chociaż bezsprzecznie pod względem technicznym i metodologicznym bardziej skomplikowaną, kosztowniejszą i bardziej pracochłonną koniecznością.

Badania takie prowadzone są od kilku już lat w laboratorium mechaniki skał Instytutu Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej w ramach problemu resortowego Ministerstwa Górnictwa i Energetyki "Metody i środki eksploatacji na dużych głębokościach", a następnie "Wybrane problemy eksploatacji złóż na dużych głębokościach" oraz problemu międzyresortowego MR.I-16 "Geodynamika obszaru Polski".

Badania te mają na celu oznaczenie odkształceniowych i wytrzymałościowych własności różnych petrograficznych typów, w tym zaś rozmaitych mineralogicznych, genetycznych, strukturalnych i teksturalnych rodzajów i od-

mian skał w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania. Zmierza się do opracowania generalnej teorii odkształcania się i zniszczenia skał ze szczególnym uwzględnieniem kruchego zniszczenia oraz określeniem warunków przejścia skał ze stanu kruchego w stan ciągliwy. Wiele uwagi poświęca się pracom nad teorią wytężeniową i kryteriami zniszczenia dla różnych rodzajów skał. W analizie wyników badań zmierza się do wykrycia zależności pomiędzy własnościami mechanicznymi (cechy sprężystości, cechy plastyczności, ciągliwość, granica wytrzymałości) a własnościami petrograficznymi skał, w tym ich cechami strukturalnymi i teksturalnymi (wielkość i kształt ziaren, uwarstwienie, porowatość) oraz składem mineralnym.
Poniżej przedstawimy opis i wyniki badań eksperymentalnych na konwencjonalne trójosiowe ściskanie dwu mineralogiczno/diagenetycznych odmian drobno- średnioziarnistych piaskowców z kopalń Rybnickiego Okręgu Węglowego. Przedstawimy także wyniki poszukiwań teoretycznych zmierzających do przyporządkowania tym piaskowcom odpowiedniego kryterium wytrzymałościowego.

2. Miejsce i sposób pobrania prób skalnych

Badaniom eksperymentalnym na konwencjonalne trójosiowe ściskanie przy ciśnieniach okólnych do ok. 60 MPa poddano dwie mineralogiczno/diagenetyczne odmiany piaskowców:

- drobno/ średnioziarnisty piaskowiec polimiktyczny z warstw rudzkich PNIÓWEK (warstwa 401/2-B),
- drobno- średnioziarnisty piaskowiec arkozowy z warstw jaklowieckich ANNA (warstwa 703/1-2-B).

Materiał do badań stanowiły rdzenie skalne o średnicy ok. 42 mm, pochodzące z otworów badawczych dołowych odwierconych przez Zakład Odmetanowania Kopalń za pomocą wiertnicy TORAM z wyrobisk kopalń węgla kamiennego "XXX-lecia PRL" i "ANNA".

Próby piaskowca PNIÓWEK pochodzą z otworu BDK 6/1979 o długości 250,1 m odwierconego (-90°) z przekopu S-1 na poziomie 705 KWK "XXX-lecia PRL". Próby piaskowca ANNA pochodzą z otworu B 52/1978 o długości 269,4 m odwierconego (-90°) z przekopu rydułtowskiego (II pętla) na poziomie 700 m KWK "Anna".

3. Podstawowe petrograficzne, strukturalno-fizyczne i mechaniczne własności badanych skał

Wyniki analiz mineralogiczno-petrograficznych badanych piaskowców zestawione są w tablicy 1. Analizy te zostały wykonane w Pracowni Mineralogiczno-Petrograficznej Katowickiego Przedsiębiorstwa Geologicznego.

Tablica 1

Własności mineralogiczno-petrograficzne wybranych do badań trójosiowych dwu mineralogiczno/diagenetycznych odmian piaskowców PNIÓWEK i ANNA

Rodzaj skały	Skład mineralny ilościowy (% obj.)						Rozkład wielkości ziaren (% obj.)			
					Spoiwo					
	Kwarc	Skalenie	Okruchy skał	Łyszczyki	ilaste	węglanowe	0,05 ÷ 0,1 mm	0,1 ÷ 0,25 mm	0,25 ÷ 0,5 mm	0,5 ÷ 1,0 mm
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Drobno / średnioziarnisty piaskowiec polimiktyczny PNIÓWEK (warstwa 401/2-B)	70,0	4,0	2,0	0,9	20,2	2,9	2,32	44,23	46,83	6,62
Drobno- średnioziarnisty piaskowiec arkozowy ANNA (warstwa 703/1-2-B)	44,7	16,5	2,7	10,5	19,7	5,9	4,36	39,33	53,63	2,68

Tablica 2

Podstawowe własności strukturalno-fizyczne i mechaniczne wybranych do badań trójosiowych drobno- średnio-ziarnistego piaskowca polimiktycznego z warstw rudzkich PNIÓWEK i drobno- średnioziarnistego piaskowca arkozowego z warstw jaklowieckich ANNA

Rodzaj skały	Parametry strukturalno-fizyczne				Parametry wytrzymałościowe		
	Gęstość masy	Gęstość objętościowa	Nasiąkliwość objętościowa / porowatość	Nasiąkliwość wagowa	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie	Wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie	Wskaźnik kruchości
	δ g/cm^3	γ g/cm^3	n_o %	n_w %	σ_C MPa	σ_T MPa	$z = \sigma_C/\sigma_T$
1	2	3	4	5	6	7	8
Drobno / średnioziarnisty piaskowiec polimiktyczny PNIÓWEK (warstwa 401/2-B)	2,57 (ϑ_5=1,1%)	2,39 (ϑ_5=1,0%)	6,8 (ϑ_5=2,9%)	2,9 (ϑ_5=2,9%)	115,3 (ϑ_8=12,2%)	(10,0) (ϑ_5=10,6%)	(11,5)
Drobno- średnioziarnisty piaskowiec arkozowy ANNA (warstwa 703/1-2-B)	2,72 (ϑ_4=0,57%)	2,60 (ϑ_4=0,70%)	4,6 (ϑ_4=4,1%)	1,8 (ϑ_4=4,6%)	115,6 (ϑ_8=6,7%)	(11,7) (ϑ_6=9,5%)	(9,9)

W tablicy 2 zestawione są oznaczone w laboratorium mechaniki skał Instytutu Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej podstawowe własności strukturalno-fizyczne (gęstość masy, gęstość objętościowa, porowatość, nasiąkliwość wagowa) i mechaniczne (wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie (metoda brazylijska)) wybranych do badań trójosiowych piaskowców PNIÓWEK i ANNA. Warto zwrócić uwagę, że obie skały charakteryzują się dużą i przy tym niemal identyczną co do wartości wytrzymałością graniczną na jednoosiowe ściskanie. Silniej zdiagenezowany jaklowiecki piaskowiec ANNA cechuje się stosunkowo dużą gęstością i mniejszą - od tej właściwej rudzkiemu piaskowcowi PNIÓWEK - porowatością. Okazuje się także być skałą o mniejszej niejednorodności większości oznaczanych tu cech strukturalno-fizycznych i wytrzymałościowych.

4. Sposób przygotowania próbek do badań; kształt, wymiary oraz dokładność obróbki próbek

Z otrzymanych z badawczych wiertniczych otworów dołowych rdzeni skalnych o średnicy 41,45 mm (piaskowiec PNIÓWEK) i 41,8 mm (piaskowiec ANNA) wykonywano próbki walcowe o długości ok. 86-87 mm przez odcięcie jednocześnie dwiema tarczami diamentowymi w zmodyfikowanej przecinarce do skał typu PR-400B. Jako ciecz chłodzącą stosowano wodę. W dalszej kolejności powierzchnie czołowe próbek szlifowano za pomocą zmodyfikowanej szlifierki do płaszczyzn typu DURA z tarczą diamentową i, w razie potrzeby, docierano ręcznie na płytach szklanych przy zastosowaniu miałkiego proszku korundowego.
Dokładność mechanicznej obróbki i przygotowania próbek (o smukłości 2) do badań spełniała zalecenia Międzynarodowego Biura Mechaniki Górotworu (por. Pfarr, 1973) i wynosiła:

- maksymalne odchylenie od równoległości płaszczyzn czołowych próbek nie przekraczało 0,05 mm,
- maksymalne odchylenie osi podłużnej próbki od pionu nie przekraczało 0,05 mm,
- maksymalna wypukłość powierzchni czołowych nie przekraczała 0,03 mm.

Obrobione już i przygotowane próbki przechowywano w szczelnie zamkniętych pojemnikach szklanych. Badaniom poddawano próbki w stanie powietrzno-suchym; wilgotność próbek wynosiła:

- próbki piaskowca PNIÓWEK - 0,62%,
- próbki piaskowca ANNA - 0,41%.

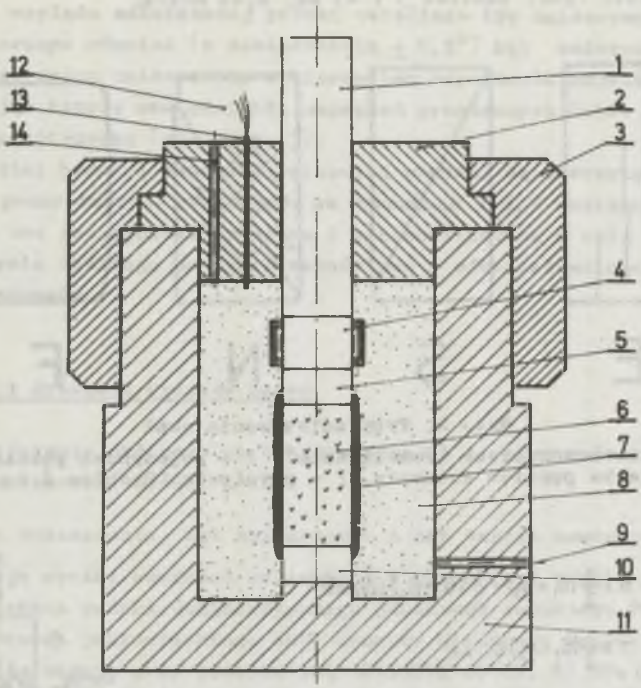
5. Opis komory trójosiowej KTK-60; technika i metodyka badań

Badania nad mechanicznymi własnościami polimiktycznego piaskowca rudzkiego PNIÓWEK i arkozowego piaskowca jaklowieckiego ANNA w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania zostały przeprowadzone w laboratorium mechaniki skał Instytutu Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej za pomocą aparatury, w skład której wchodzi własnego pomysłu i konstrukcji komora trójosiowa typu von Kármána KTK-60, wysokociśnieniowa pompa ręczna i prasa hydrauliczna EDB-60 produkcji Kombinatu im. F. Heckerta, NRD. Aparatura ta przeznaczona jest do badania odkształceniowych i wytrzymałościowych własności skał na próbkach walcowych w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) przy ciśnieniach okólnych p ($p = \sigma_2 = \sigma_3$) do 60 MPa.

Schemat komory KTK-60 przedstawiony jest na rysunku 1 (por. także Borecki i in., 1980a, 1982a,b; Kwaśniewski i in., 1981, 1982; Kwaśniewski, 1983a). Zasadniczymi częściami komory są: korpus (cylinder grubościenny) 11, pokrywa 2, tłok (nurnik) 1 i nakrętka dociskowa pokrywy 3.
Aby umożliwić realizowanie pomiarów obciążeń działających na próbkę i odkształceń próbki za pomocą czujników elektrycznych (np. elektrooporowych) umieszczonych wewnątrz komory, pokrywę 2 wyposażono w przepust elektryczny (z elementem stożkowym) z 10 przewodami miedzianymi.

Próbka obciążana jest w kierunku pionowym przez prasę EDB-60 (maksymalny nacisk - 600 kN) za pośrednictwem tłoka (nurnika) 1 komory. W celu wyeliminowania wysokiej koncentracji naprężeń występującej zwykle na obwodzie strefy kontaktu próbki z elementami przekazującymi jej obciążenie pionowe (tłok, próg dna komory) do końców (powierzchni czołowych próbek) przyklejano za pomocą kleju epoksydowego EPIDIAN 5 podkładki stalowe (ze stali narzędziowej, ulepszane cieplnie do twardości ok. 55 HRC) o tej samej średnicy co próbka i grubości równej połowie średnicy.
Ciśnienie okólne na próbkę zadawane jest za pomocą pompy ręcznej. Medium wywierającym ciśnienie jest olej metylosilikonowy POLSIL OM-10. Do pomiaru ciśnień mniejszych od 20 MPa służy manometr typu Bourdona klasy 1 o zakresie 250 kp/cm^2, zaś większych od 20 MPa - manometr typu Bourdona klasy 1 o zakresie 1000 kp/cm^2 (prod. NRD).

Osłonki zabezpieczające próbkę przed penetracją do wnętrza skały medium wywierającego ciśnienie okólne wykonywano z kauczuku silikonowego POLASTOSIL M-60 w postaci pasty, którą dowolnie formując nakładano kilkumilimetrową warstwą na powierzchnię próbki (i podkładki). Pasta ta po upływie ok. 1 godziny twardniała w procesie wulkanizacji (sieciowania) na zimno, tworząc osłonkę elastyczną, ciągliwą i dostatecznie wytrzymałą, by nie ulegać pęknięciu (przecięciu) przy odkształcaniu się i zniszczeniu próbki.
Do pomiaru obciążenia pionowego działającego na próbkę stosowano elektrooporowy dynamometr wewnętrzny (tzn. umieszczany we wnętrzu komory, na

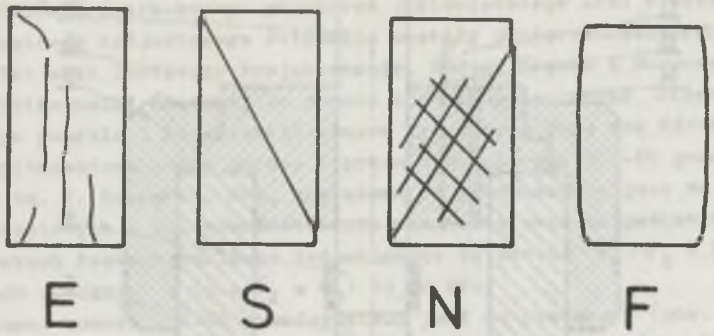


Rys. 1. Schemat komory trójosiowej KTK-60 do badania mechanicznych własności skał przy ciśnieniach do 60 MPa

1 - tłok (nurnik) przekazujący na próbkę obciążenie pionowe, 2 - pokrywa, 3 - nakrętka dociskowa, 4 - dynamometr elektrooporowy do pomiaru obciążenia pionowego działającego na próbkę, 5 - stalowa podkładka górna, 6 - próbka, 7 - osłonka z polastosilu, 8 - medium (olej silikonowy) wywierające na próbkę ciśnienie okólne, 9 - do pompy wysokociśnieniowej, 10 - stalowa podkładka dolna, 11 - korpus komory, 12 - do mostka tensometrycznego, 13 - przepust elektryczny, 14 - otwór odpowietrzający

próbce - por. rys. 1). Dynamometr taki w postaci walca o średnicy równej średnicy próbki (wykonany ze stali narzędziowej, ulepszany cieplnie do twardości ok. 55 HRC), na którego powierzchnicy naklejone są czynne i kompensacyjne elektrooporowe tensometry foliowe został zaprojektowany i skonstruowany w laboratorium mechaniki skał Instytutu. Po wycechowaniu (za pomocą mechanicznego dynamometru kabłąkowego) pracuje on w zestawie z mostkiem tensometrycznym TSA-4 (prod. MIKROTECHNA, Czechosłowacja). Obciążając próbkę skalną w komorze trójosiowej w pierwszej kolejności poddawano ją działaniu hydrostatycznego stanu naprężenia $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ odpowiadającego żądanemu ciśnieniu okólnemu $p = \sigma_2 = \sigma_3$. Następnie, utrzymując stałe ciśnienie okólne za pomocą prasy EDB-60 zwiększano (aż do granicy wytrzymałości $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$, i - zniszczenia próbki) składową pionową (σ_1)

trójosiowego stanu naprężenia. Prędkość obciążania (prędkość naprężeń) wynosiła średnio (por. tablice 3 i 4) ok. 0,46 MPa/s.

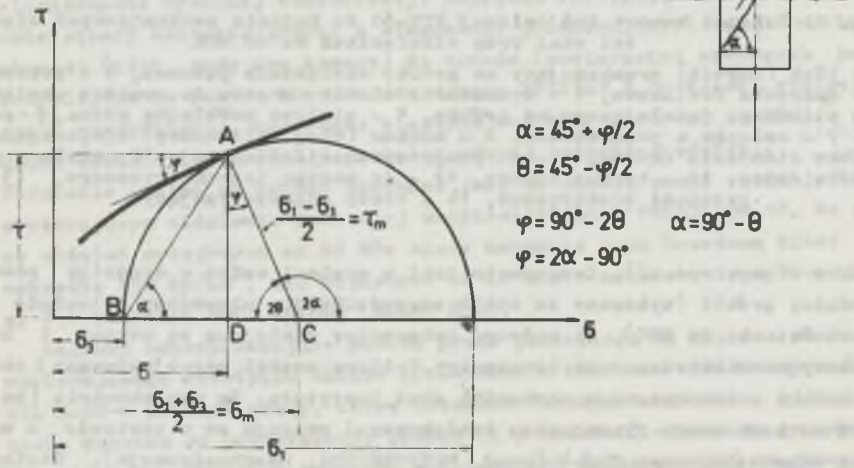


Rys. 2. Typy zniszczenia skał

E - pęknięcie rozdzielcze (rozciągania), S - pojedyncze pęknięcie ścinania, N - siatka pęknięć ścinania, F - płynięcie (Hoshino i in., 1972).

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\theta$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\theta$$



Rys. 3. Półokrąg i obwiednia Mohra określające rozkład i wielkość naprężeń granicznych w próbce poddanej trójosiowemu ściskaniu $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$.

Na podstawie wyglądu zniszczonej próbki określano typ zniszczenia (por. rysunek 2). Mierzono również (z dokładnością $\pm$ 0,5°) kąt zniszczenia (kąt pomiędzy płaszczyzną zniszczenia a kierunkiem naprężenia największego σ_1) i wykorzystując teorię obwiedni kół naprężeń granicznych Mohra oznaczano kąt tarcia wewnętrznego (por. rys. 3).
Wszystkie wyniki badań i oznaczeń opisanych powyżej są zestawione w tablicach 3 i 4 i przedstawione graficznie na rysunkach 4-6. W następnych rozdziałach zostaną one szczegółowo omówione i przeanalizowane w celu określenia wpływu ciśnienia okólnego na wytrzymałościowe i odkształceniowe własności badanych piaskowców.

6. Omówienie i dyskusja wyników badań

6.1. Wpływ ciśnienia okólnego na odkształceniowe i wytrzymałościowe własności piaskowców PNIÓWEK i ANNA

6.1.1. Typ zniszczenia, kąt zniszczenia i kąt tarcia wewnętrznego

Jak wskazują wyniki oznaczeń zestawione w kolumnie 5 tablic 3 i 4, zasadniczo wszystkie próbki polimiktycznego piaskowca rudzkiego PNIÓWEK i arkozowego piaskowca jaklowieckiego ANNA ulegały w próbach konwencjonalnego trójosiowego ściskania przy ciśnieniach okólnych do ok. 61 MPa (piaskowiec PNIÓWEK) i do ok. 54 MPa (piaskowiec ANNA) kruchemu zniszczeniu, objawiającemu się wystąpieniem efektu akustycznego - głośnego, ostrego lub głuchego (w przypadku badanych przy ciśnieniach p $\geqslant$ 47,9 MPa próbek nr nr 34, 38 i 31 piaskowca PNIÓWEK) stuku, huku i gwałtownym spadkiem naprężenia po przekroczeniu granicy wytrzymałości, przez ścięcie w pojedynczej płaszczyźnie (typ zniszczenia S - por. rys. 2). Tylko próbom jednoosiowym (i, jak w przypadku piaskowca ANNA, próbka 52R-6 - próbie trójosiowej przy niewielkim, równym 6,4 MPa, ciśnieniu okólnym) odpowiadał typ zniszczenia E+S, a więc pęknięcie rozdzielcze E, któremu towarzyszy (wtórne) pęknięcie ścinania S.

Wartości kąta zniszczenia (kąta nachylenia płaszczyzny zniszczenia względem kierunku naprężenia największego σ_1) zestawione są dla poszczególnych próbek badanych piaskowców (różnych wartości ciśnienia okólnego) w kolumnie 6 tablic 3 i 4. Jak wynika z tych danych oraz z będących ich ilustracją wykresów $\Theta = f(p)$ na rysunku 4, kąt zniszczenia generalnie rośnie od wartości równych kilkunastu stopniom dla próbek ściskanych jednoosiowo (p=0) do 38,5° (dla p = 60,8 MPa) w przypadku rudzkiego piaskowca PNIÓWEK i do 31° (dla p = 53,7 MPa) w przypadku jaklowieckiego piaskowca ANNA. Efekt ten wskazuje na pewne (szczególnie wyraźne w przypadku słabiej zdiagenezowanego piaskowca rudzkiego PNIÓWEK) uplastycznianie się badanych skał ze wzrostem ciśnienia okólnego.

Tablica 3

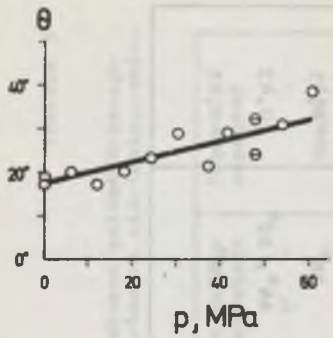
Wyniki badań nad wytrzymałościowymi własnościami drobno średnioziarnistego piaskowca polimiktycznego z warstw rudzkich PNIÓWEK w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania przy różnych ciśnieniach okólnych p

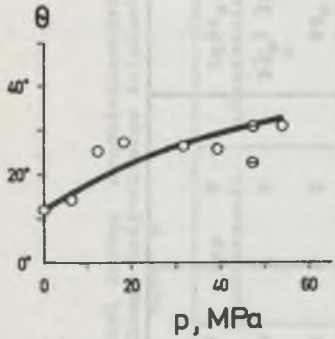
Numer próbki	Ciśnienie okólne $p = \sigma_3 = \sigma_2$ MPa	Wytrzymałość graniczna $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ MPa	Naprężenie maksymalne $\sigma_{1\,max}$ MPa	Typ zniszczenia	Kąt zniszczenia θ	Kąt tarcia wewnętrznego φ	Prędkość naprężeń MPa/s
1	2	3	4	5	6	7	8
6L-24	0	123,4	123,4	E + S	18,5°	53°	0,47
25	0	127,5	127,5	S	17°	56°	0,49
27	6,3	158,1	164,4	S	20°	50°	0,49
30	12,1	180,9	193,0	S	17°	56°	0,48
28	18,1	186,4	204,5	S	20°	50°	0,53
40	24,2	204,9	229,1	S	23°	44°	0,48
32	30,2	184,0	214,2	S	28,5°	33°	0,44
39	37,2	245,8	283,0	S	21°	48°	0,45
36	41,4	251,5	292,9	S	29°	32°	0,45
34	47,9	234,9	282,8	S	24°; 32°	42°; 26°	0,47
38	53,9	261,4	315,3	S	31°	28°	0,46
31	60,8	252,5	313,3	S	38,5°	13°	0,49

Tablica 4

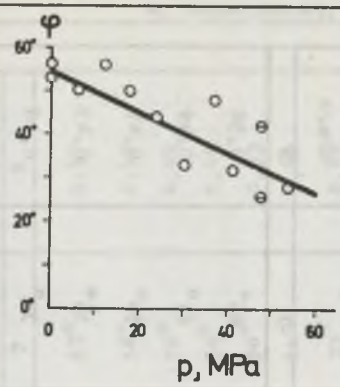
Wyniki badań nad wytrzymałościowymi własnościami drobno- średnioziarnistego piaskowca arkozowego z warstw jaklowieckich ANNA w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania przy różnych ciśnieniach okólnych p

Numer próbki	Ciśnienie okólne $p = \sigma_3 = \sigma_2$ MPa	Wytrzymałość graniczna $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ MPa	Naprężenie maksymalne $\sigma_{1\,max}$ MPa	Typ zniszczenia	Kąt zniszczenia θ	Kąt tarcia wewnętrznego φ	Prędkość naprężeń MPa/s
1	2	3	4	5	6	7	8
52R-27	0	115,4	115,4	E + S	12°	66°	0,38
6	6,4	153,1	159,5	E + S	14,5°	61°	0,49
5	12,2	150,9	163,1	S	25,5°	39°	0,47
2	18,0	161,6	179,6	S	27,5°	35°	0,43
26	31,4	201,2	232,6	S	26,5°	37°	0,46
10	39,3	213,9	253,2	S	26°	38°	0,45
25	47,1	220,9	268,0	S	23°; 31°	44°; 28°	0,43
11	53,7	248,4	302,1	S	31°	28°	0,45

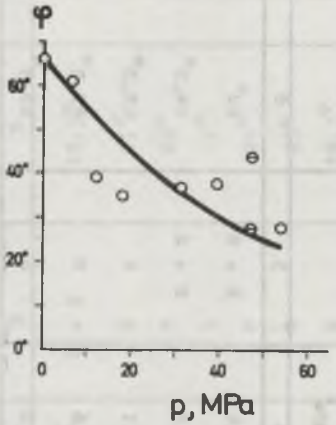




Rys. 4. Zależność kąta zniszczenia piaskowców PNIÓWEK i ANNA od ciśnienia okólnego



Piaskowiec d/s polimiktyczny (70qu) rudzki PNIÓWEK n=6,8 %



Piaskowiec ds arkozowy (45qu) jaklowiecki ANNA n = 4,6 %

Rys. 5. Zależność kąta tarcia wewnętrznego piaskowców PNIÓWEK i ANNA od ciśnienia okólnego

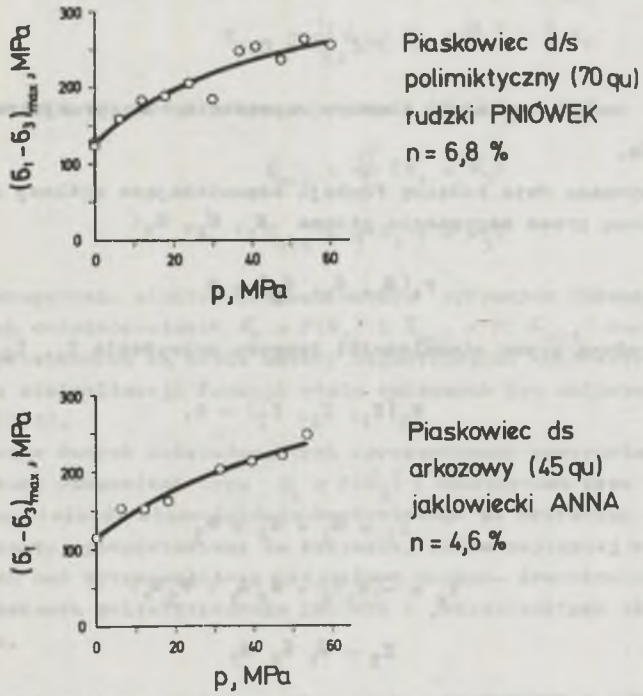
Zgodnie bowiem z teorią obwiedni kół naprężeń granicznych Mohra (por. rysunek 3) będący swoistą miarą plastyczności (duży dla skał kruchych, mały dla skał ciągliwych, plastycznych - w przypadku granicznym, dla ośrodka idealnie plastycznego równy zero) kąt tarcia wewnętrznego φ określony jest wzorem $\varphi = 90^{\circ} - 2\theta$.

Tak więc wzrost kąta zniszczenia θ w miarę zwiększania ciśnienia okólnego odpowiada zmniejszaniu się kąta tarcia wewnętrznego od średnio $54,5^{\circ}$ do 13° (dla p = 60,8 MPa) - w przypadku rudzkiego piaskowca PNIÓWEK i od 66° do 28° (dla p = 53,7 MPa) - w przypadku jaklowieckiego piaskowca ANNA (por. także rys. 5). Świadczy to tym samym, że chociaż oba badane piaskowce zachowują właściwość kruchości nawet przy ciśnieniach rzędu pięćdziesięciu, sześćdziesięciu megapaskali, to w analizowanym przedziale ciśnień zyskują jednak w pewnym stopniu na cechach plastycznych.

(Uwaga: Pojęcia "kruchość", "ciągliwość" i "plastyczność" zdefiniowane są w pracy Kwaśniewskiego, 1983b).

6.1.2. Granica wytrzymałości

Jak okazuje się z wykresów $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max} = f(p)$ na rysunku 6 (por. także dane zestawione w kolumnie 3 tablic 3 i 4) granica wytrzymałości badanych piaskowców PNIÓWEK i ANNA wyraźnie rośnie w miarę zwiększania ciśnienia okólnego od 0 do - odpowiednio - 61 MPa i 54 MPa.



Rys. 6. Zależność granicy wytrzymałości piaskowców PNIÓWEK i ANNA od ciśnienia okólnego

W przedziale ciśnień od 0 do ok. 30 MPa wzrost ten jest (szczególnie w przypadku silniej zdiagenezowanego jaklowieckiego piaskowca ANNA) niemal liniowy. Wytrzymałość graniczna piaskowca ANNA odpowiadająca ciśnieniu okólnemu p = 31,4 MPa (próbka nr 26) jest prawie 1,75-krotnie wyższa od tej właściwej próbie jednoosiowego (p = 0) ściskania. W mniej więcej tym samym przedziale ciśnień graniczna wytrzymałość rudzkiego piaskowca PNIÓWEK rośnie tylko ok. 1,5-krotnie. Przy ciśnieniach okólnych wyższych od ok. 30 (32) MPa efekt wzrostu wytrzymałości granicznej lekko słabnie - im wyższe ciśnienie, tym mniejsze przyrosty wytrzymałości odpowiadają jego dalszemu zwiększaniu.

6.2. Teoretyczne podstawy przyporządkowania badanym piaskowcom odpowiedniego kryterium wytrzymałościowego

Jednym z zasadniczych celów tej pracy było przyporządkowanie badanym skałom (dla ciśnienia porowego $p_p = 0$, temperatury pokojowej, prędkości naprężeń rzędu 10^0 MPa/s (prędkości odkształceń rzędu 10^{-5}/s), i przy założeniu, że oba piaskowce są ośrodkami izotropowymi) odpowiedniego kryterium wytrzymałościowego, a więc określenie postaci funkcji

$$F(\sigma_{ij}) = 0, \tag{1}$$

gdzie σ_{ij} oznacza składowe tensora naprężenia w przyjętym układzie współrzędnych.

Do analizy wybrano dwie rodziny funkcji odpowiadające ogólnej postaci (1). Jedną, wyrażoną przez naprężenia główne σ_1, σ_2, σ_3:

$$F_1(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \tag{2}$$

i drugą, wyrażoną przez niezmienniki tensora naprężenia I_1, I_2 i I_3:

$$F_2(I_1, I_2, I_3) = 0, \tag{3}$$

gdzie:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ I_2 &= -(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) \\ I_3 &= \sigma_1\,\sigma_2\,\sigma_3 \end{aligned} \tag{4}$$

W pierwszej grupie rozpatrzono dwadzieścia różnych (maximum trójparametrowych) empirycznych, matematycznych i fizykalnych kryteriów wytrzymałościowych wyrażonych równaniem

$$\sigma_1 = f(\sigma_3), \tag{5}$$

gdzie:

$\sigma_3 = p$.

W grupie drugiej poddano analizie szesnaście różnych kryteriów wytrzymałościowych o równaniu

$$\tau_{oct} = f(\sigma_{oct}), \tag{6}$$

gdzie:

τ_{oct} - oktaedryczne naprężenie ścinające,

σ_{oct} - oktaedryczne naprężenie normalne,

przy czym

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\right]^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{3}\left[2(I_1^2 + 3I_2)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3} I_1 \quad (8)$$

Dla osiowo-symetrycznego stanu naprężenia ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$):

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (9)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (10)$$

Przy wykorzystaniu elektronicznych maszyn cyfrowych dokonano aproksymacji danych doświadczalnych $\sigma_1 = f(\sigma_3)$ i $\tau_{oct} = f(\sigma_{oct})$ korzystając z programów opracowanych na bazie metody najmniejszych kwadratów lub na bazie algorytmu minimalizacji funkcji wielu zmiennych bez obliczania pochodnych (Brent, 1973).

Każdy zestaw danych doświadczalnych aproksymowano wszystkimi równaniami - dwudziestoma równaniami typu $\sigma_1 = f(\sigma_3)$ i szesnastoma typu $\tau_{oct} = f(\sigma_{oct})$. Przyjmując wielkość błędu średnio-kwadratowego za kryterium dobroci dopasowania, poniżej przedstawiamy te kryteria, które najlepiej aproksymują wyniki badań nad wytrzymałością trójosiową drobno- średnioziarnistych: rudzkiego piaskowca polimiktycznego PNIÓWEK i jaklowieckiego piaskowca arkozowego ANNA.

6.3. Kryteria wytrzymałościowe dla piaskowców PNIÓWEK i ANNA

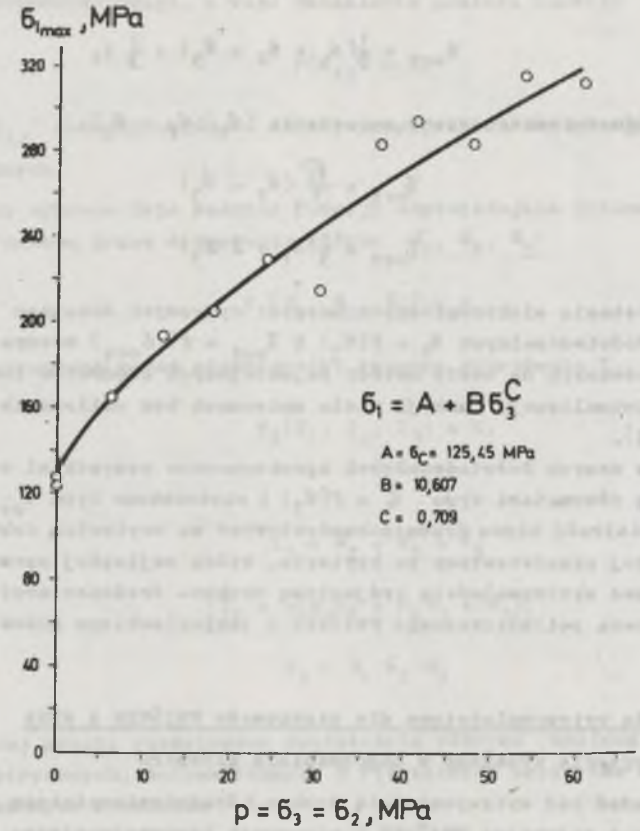
6.3.1. Kryteria wyrażone w naprężeniach głównych

Wyniki badań nad wytrzymałością drobno / średnioziarnistego polimiktycznego piaskowca rudzkiego PNIÓWEK w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania przy ciśnieniach okólnych $p = \sigma_2 = \sigma_3$ do 60,8 MPa aproksymowało najdokładniej (z najmniejszym, równym s = 13,227 MPa, błędem średniokwadratowym) empiryczne potęgowe równanie wytrzymałościowe w postaci (por. rys. 7):

$$\sigma_1 = \sigma_C + B\,\sigma_3^C, \quad \text{MPa}, \quad (11)$$

gdzie:

σ_C - granica wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,
zaś B i C - stałe empiryczne: σ_C = 125,45 MPa,
B = 10,607,
C = 0,709.

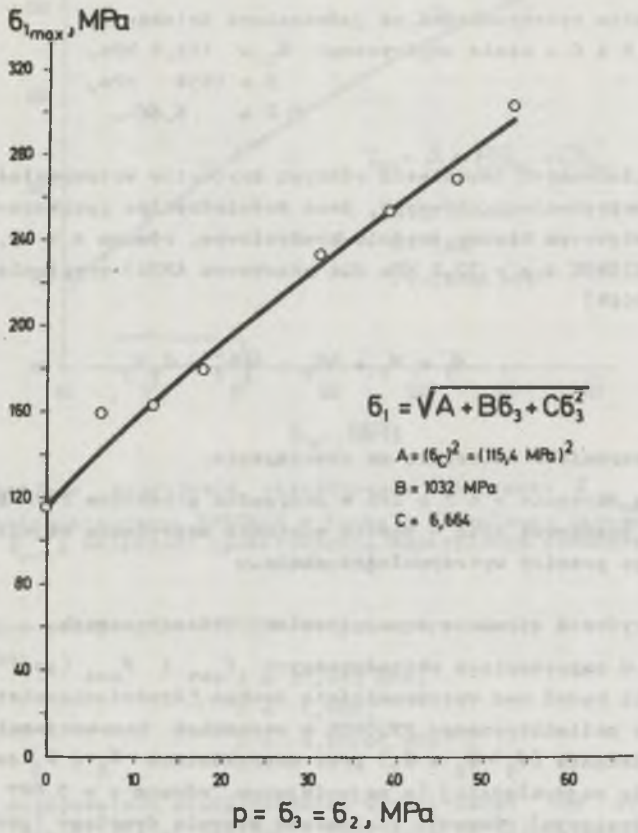


Rys. 7. Naprężenie największe niszczące σ_{1max} rudzkiego piaskowca polimiktycznego PNIÓWEK w funkcji ciśnienia okólnego; zależność $\sigma_{1max} = f(\sigma_3)$ aproksymowana równaniem empirycznego kryterium potęgowego typu Mogiego

Kryterium potęgowe (11), które jest tego samego typu co kryterium podane przez Mogiego (1966b)

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_C + B\,\sigma_3^C. \tag{12}$$

stosowane jest bardzo często - por. także Ohnaka (1973), Bieniawski (1974), Borecki i in. (1980a, 1982a) - do opisu wytrzymałości niemal wszystkich rodzajów skał badanych w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania przy ciśnieniach okólnych sięgających aż 500 MPa.



Rys. 8. Naprężenie największe niszczące $\sigma_{1_{max}}$ jaklowieckiego piaskowca arkozowego ANNA w funkcji ciśnienia okólnego; zależność $\sigma_{1_{max}} = f(\sigma_3)$ aproksymowana równaniem empirycznego trójmianu potęgowego

W przypadku drobno- średnioziarnistego arkozowego piaskowca jaklowieckiego ANNA zależność pomiędzy odpowiadającymi granicy wytrzymałości największym σ_1 i najmniejszym σ_3 naprężeniami głównymi przy ciśnieniach okólnych do, przypomnijmy, 53,7 MPa opisana jest najlepiej (z najmniejszym

równym s = 7,533 MPa, błędem średnio-kwadratowym) empirycznym równaniem trójmianu potęgowego w postaci (por. rys. 8)

$$\sigma_1 = \sqrt{\sigma_C^2 + B\sigma_3 + C\sigma_3^2}, \quad \text{MPa}. \tag{13}$$

gdzie:

σ_C - granica wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie,
zaś B i C - stałe empiryczne: σ_C = 115,4 MPa,
B = 1032 MPa,
C = 6,664.

Spośród analizowanych dwudziestu różnych kryteriów wytrzymałościowych wyrażonych w naprężeniach głównych, dane doświadczalne aproksymowało najgorzej (z największym błędem średnio-kwadratowym, równym s = 45,9 MPa dla piaskowca PNIÓWEK i s = 37,2 MPa dla piaskowca ANNA) oryginalne kryterium Griffitha (1924)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + 4\sigma_T + 4\sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_T\sigma_3}, \tag{14}$$

gdzie:

σ_T - wytrzymałość materiału na rozciąganie.

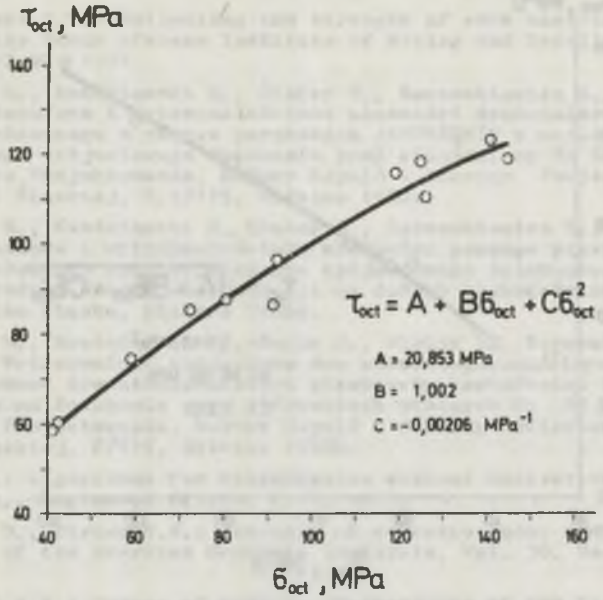
Kryterium to znacznie - o 7 ÷ 24% w przypadku piaskowca PNIÓWEK i o 9÷22% w przypadku piaskowca ANNA - zaniża wartości naprężenia największego odpowiadającego granicy wytrzymałości skały.

6.3.2. Kryteria wyrażone w naprężeniach oktaedrycznych

Wyrażone w naprężeniach oktaedrycznych τ_{oct} i σ_{oct} (por. formuły (7) i (8)) wyniki badań nad wytrzymałością drobno- średnioziarnistego rudzkiego piaskowca polimiktycznego PNIÓWEK w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) przy naprężeniach $\sigma_2 = \sigma_3$ do 60,8 MPa aproksymowało najdokładniej (z najmniejszym, równym s = 3,827 MPa, błędem średnio-kwadratowym) równanie wielomianu stopnia drugiego (por. rys. 9)

$$\tau_{oct} = A + B\,\sigma_{oct} + C\,\sigma_{oct}^2, \quad \text{MPa} \tag{15}$$

Równanie to stosowali poprzednio m.in. Bresler i Pister (1958) do opisu wytrzymałości betonu klasy 200, 300 i 400 badanego w złożonych stanach naprężenia (próbki cylindryczne ściskane i skręcane) oraz Kwaśniewski i in. (1982) do aproksymacji wyników badań na konwencjonalne trójosiowe ściskanie drobnoziarnistego granitu STRZELIN ($67,5 < \sigma_{oct} < 144,7$ MPa) oraz grubo- bardzo gruboziarnistego piaskowca kwarcowego z warstw siodłowych JASTRZĘBIE ($30,6 < \sigma_{oct} < 136,8$ MPa).



Rys. 9. Ścinające naprężenie oktaedryczne niszczące $\tau_{oct_{max}}$ rudzkiego piaskowca polimiktycznego PNIÓWEK w funkcji normalnego naprężenia oktaedrycznego σ_{oct}; zależność aproksymowana empirycznym równaniem trójmianu kwadratowego

Odpowiadające piaskowcowi PNIÓWEK stałe empiryczne A, B i C w równaniu (15) wynoszą:

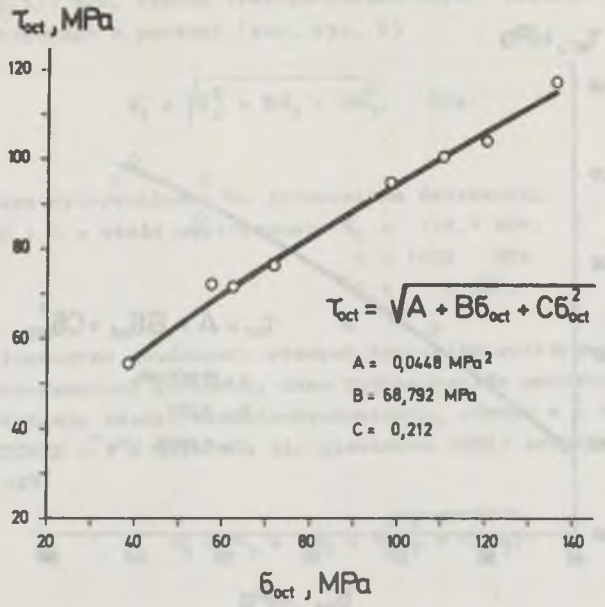
$$A = 20{,}853 \text{ MPa},$$
$$B = 1{,}002,$$
$$C = -0{,}00206 \text{ MPa}^{-1}.$$

Wyrażone w naprężeniach oktaedrycznych wyniki badań nad wytrzymałością trójosiową jaklowieckiego piaskowca ANNA opisało najdokładniej (s = 1,892 MPa) empiryczne równanie trójmianu potęgowego typu Burzyńskiego - Jagna - - Łukszy w postaci (por. rys. 10)

$$\tau_{oct} = \sqrt{A + B\,\sigma_{oct} + C\,\sigma_{oct}^2}, \text{ MPa} \tag{16}$$

Stałe empiryczne w równaniu tym wynoszą:

$$A = 0{,}0448 \text{ MPa}^2,$$
$$B = 68{,}792 \text{ MPa},$$
$$C = 0{,}212.$$



Rys. 10. Ścinające naprężenie oktaedryczne niszczące $\tau_{oct\,max}$ jaklowiecowieckiego piaskowca arkozowego ANNA w funkcji normalnego naprężenia oktaedrycznego σ_{oct}; zależność aproksymowana empirycznym równaniem potęgowym typu Burzyńskiego - Jagna - Łukszy

W przypadku obu piaskowców dane doświadczalne aproksymowało najgorzej (z największymi, równymi 50,5 MPa dla piaskowca PNIÓWEK i 45,1 MPa dla piaskowca ANNA, wartościami błędu średnio-kwadratowego), znacznie (o kilkadziesiąt procent) zawyżając wartości stanowiących o zniszczeniu ścinających naprężeń oktaedrycznych τ_{oct}, liniowe równanie wytrzymałościowe w postaci

$$\tau_{oct} = A\,\sigma_{oct}, \tag{17}$$

gdzie:

$A = \sqrt{2}$.

Przedstawione powyżej wyniki badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych stanowią po pracach Boreckiego i in. (1980a, 1982a), Kwaśniewskiego i in. (1981, 1982) oraz Kwaśniewskiego (1983a) kolejny krok w kierunku poznania mechanicznych własności skał karbońskich Rybnickiego Okręgu Węglowego w złożonych stanach naprężenia. Badania te będą kontynuowane i rozszerzane na kolejne, coraz to inne mineralogiczne, genetyczne, strukturalne i teksturalne rodzaje i odmiany tych skał.

7. Literatura

[1] Bieniawski Z.T.: Estimating the strength of rock materials. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 74, No.8, 312-20, 1974.

[2] Borecki M., Kwaśniewski M., Oleksy S., Berszakiewicz Z., Pacha J.: Odkształceniowe i wytrzymałościowe własności drobnoziarnistego piaskowca arkozowego z warstw porębskich JASTRZĘBIE w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania przy ciśnieniach do 60 MPa. Prace Instytutu Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej, 2.1/115, Gliwice 1980a.

[3] Borecki M., Kwaśniewski M., Oleksy S., Berszakiewicz Z., Pacha J.: Odkształceniowe i wytrzymałościowe własności pewnego piaskowca JASTRZĘBIE w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania. W monografii: Metody i środki eksploatacji na dużych głębokościach, 55-76. Politechnika Śląska, Gliwice 1982a.

[4] Borecki M., Kwaśniewski M., Pacha J., Oleksy S., Berszakiewicz Z., Guzik J.: Wytrzymałość trójosiowa dwu mineralogiczno/diagenetycznych odmian drobno- średnioziarnistych piaskowców karbońskich PNIÓWEK i ANNA badanych na ściskanie przy ciśnieniach okólnych do 60 MPa. Prace Instytutu Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej, 2/119, Gliwice 1982b.

[5] Brent R.: Algorithms for Minimization without Derivatives. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1973.

[6] Bresler B., Pister K.S.: Strength of concrete under combined stresses. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 30, No.3, 321-45, 1958.

[7] Griffith A.A.: Theory of rupture. Proceedings of the First International Congress of Applied Mechanics, 55-63, Delft 1924.

[8] Hoshino K., Koide H., Inami K., Iwamura S., Mitsui S.: Mechanical properties of Japanese tertiary sedimentary rocks under high confining pressures. Geological Survey of Japan, Report No. 244, 1972.

[9] Kwaśniewski M.: Deformational and strength properties of the three structural varieties of carboniferous sandstones. Proceedings of the 5th International Congress on Rock Mechanics, Melbourne, April 1983a.

[10] Kwaśniewski M.: Kryteria przejścia skał ze stanu kruchego w stan ciągliwy i plastyczny. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 745, Górnictwo z. 123, 161-81, 1983b.

[11] Kwaśniewski M., Pacha J., Berszakiewicz Z., Oleksy S.: Odkształceniowe i wytrzymałościowe własności drobnoziarnistego granitu STRZELIN i trzech strukturalnych odmian piaskowców karbońskich PNIÓWEK i JASTRZĘBIE w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania przy ciśnieniach do 60 MPa. Prace Instytutu Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej, 183/MR.I-16, Gliwice 1981.

[12] Kwaśniewski M., Pacha J., Oleksy S.: Odkształceniowe i wytrzymałościowe własności średnioziarnistego granitu STRZEBLÓW i mikrytowego wapienia DĘBNIK w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania przy ciśnieniach do 48 MPa. Prace Instytutu Projektowania, Budowy Kopalń i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej, 183/MR.I-16, Gliwice 1982.

[13] Mogi K.: Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Vol. 44, 215-32, 1966b.

[14] Ohnaka M.: The quantitative effect of hydrostatic confining pressure on the compressive strength of crystalline rocks. Journal of Physics of the Earth, Vol. 21, 125-40, 1973.

[15] Pforr K.: IBG-Richtlinien zur Ermittlung von geomechanischen Kennziffern der Gesteine und des Gebirgsmassivs. Freiberger Forschungshefte, A 502 Geotechnik und Ingenieurgeologie, Leipzig 1973.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Henryk FILCEK

Wpłynęło do Redakcji w maju 1983 r.

ТРЕХОСНАЯ ПРОЧНОСТЬ ДВУХ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ И ДИАГЕНЕТИЧЕСКИХ РАЗНОВИДНОСТЕЙ МЕЛКО-СРЕДНЕЗЕРНИСТЫХ КАРБОНСКИХ ПЕСЧАНИКОВ ПНЮВЕК И АННА

Р е з ю м е

В работе представлено описание и результаты экспериментальных испытаний мелко/среднезернистого полимиктического песчаника ПНЮВЕК из рудзкой угленосной толщи и мелко-среднезернистого аркозового песчаника АННА из якловецкой угленосной толщи (Рыбницкий угольный район) в условиях конвенционального трехосного сжатия. Изучено влияние всестороннего давления (до около 61 МПа в случае песчаника ПНЮВЕК и до около 54 МПа в случае песчаника АННА) на следующие деформационные и прочностные параметры испытаемых горных пород: тип разрушения, угол разрушения, угол внутреннего трения и предел прочности. Исследованным песчаникам приporядочено также подходящие критерии прочности. Стараясь подобрать уравнение прочности, которое лучше всего аппроксимирует экспериментальные данные, обсуждено и подвергнуто анализу двадцать эмпирических, математических и физических критериев выраженных в конвенции главных напряжений и шеснадцать критериев выраженных в конвенции октаэдрических напряжений.

TRIAXIAL STRENGTH OF TWO MINERALOGIC/DIAGENETIC VARIETIES OF FINE - MEDIUM-GRAINED CARBONIFEROUS PNIÓWEK AND ANNA SANDSTONES

S u m m a r y

In the paper are presented a description and results of conventional triaxial compression tests conducted on fine/medium-grained polymictic PNIÓWEK sandstone from the Ruda assize and fine - medium-grained arkosic ANNA sandstone from the Jaklovéc assize (the Rybnik Coal Region). The effect of confining pressure (up to about 61 MPa in the case of PNIÓWEK sandstone and up to about 54 MPa in the case of ANNA sandstone) on the following deformational and strength parameters of the tested rocks: type

of failure, angle of fracture, angle of internal friction and ultimate strength has been determined. The suitable strength criteria are also given. Trying to find a strength equation which would approximate most accurately the experimental data, twenty empirical, mathematical and physical criteria expressed in the convention of principal stresses as well as sixteen criteria expressed in the convention of octahedral stresses have been considered and analyzed.