

Urszula Sanetra*

WPLYW GŁĘBOKOŚCI ZALEGANIA WĘGLI W GÓRNOŚLĄSKIM ZAGŁĘBIU WĘGLOWYM NA ICH PRZEDKRYTYCZNE I POKRYTYCZNE WŁASNOŚCI

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania konwencjonalnego trójosiowego ściskania $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$ węgla pochodzących z różnych warstw karbońskich GZW oraz przedstawiono zależności między parametrami wytrzymałościowymi i odkształceniowymi a ciśnieniem okólnym ($p = 0-70$ MPa). Ciśnienie zastosowane w eksperymencie odpowiadało warunkom wydobywania złóż w rejonie GZW, gdzie obecnie prowadzi się eksploatację do głębokości około 1200 m.

Na podstawie wyników uzyskanych z badań stwierdzono, że istnieją zależności funkcyjne między ciśnieniem okólnym a krytycznymi i pokrytycznymi własnościami węgla. Wykazano, że wzrost ciśnienia okólnego powoduje wzrost maksymalnego (krytycznego) naprężenia i odkształcenia krytycznego oraz znaczny wzrost naprężenia resztkowego i odpowiadającego mu odkształcenia resztkowego. Szybkość wzrostu wartości badanych parametrów zależy od zakresu stosowanego ciśnienia okólnego i zawartości poszczególnych grup macerałów w węglach.

Impact of the occurrence depth on pre-critical and post-critical properties of coals in the Upper Silesian Coalfield

Abstract

The article presents tests of conventional triaxial compression $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$ of coals originating from different Carboniferous layers of the Upper Silesian Coalfield. Moreover, relationships between strength and deformation parameters and circular pressure ($p = 0-70$ MPa) were presented. The pressures applied in the experiment matched the deposit mining conditions in the Upper Silesian Coalfield areas, where at present mining exploitation is conducted up to the depth of about 1200 m.

On the basis of test results it has been ascertained that there exist functional relationships between the circular pressure and critical as well as post-critical coal properties. It has been pointed out that the growth of the circular pressure causes increase in the maximum (critical) stress and critical deformation as well as considerable growth of residual stress corresponding to the residual deformation. The velocity of growth of the values of tested parameters depends on the scope of applied circular pressure and content of individual maceral groups in coals.

WPROWADZENIE

Projektowanie oraz prowadzenie podziemnej działalności górniczej i budowlanej wymusza konieczność poznania wartości parametrów charakteryzujących własności górotworu oraz zmian, jakim ulegają one wraz ze zmianą głębokości. W rejonie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW), szczególnie podczas prowadzenia podziemnej eksploatacji, jest istotne poznanie wartości parametrów mechanicznych węgla i skał płonnych. Stan naprężenia górotworu ze względu na trudności w wykonywaniu

* Główny Instytut Górnictwa

badan w warunkach *in situ* może być określony laboratoryjnie na próbkach skał poddawanych trójosiowemu ściskaniu. Pierwsze takie badania były prowadzone już w 1880 roku przez Gumbela, ale za klasyczne w doświadczalnej mechanice skał uważa się badania wykonane w 1911 roku przez T. von Kármána. Historia badań w trójosiowym stanie naprężenia szczegółowo została opisana w pracy Kwaśniewskiego (2002). Badania skał formacji karbonu produktywnego w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania są prowadzone również w Głównym Instytucie Górnictwa (Sanetra 1994; Sanetra, Szedel 2000; Sanetra 2002, 2004, 2005, 2006, 2007; Krzysztoń i in. 2002; Krzysztoń, Sanetra 2003; Bukowska, Sanetra, Wadas 2007; Bukowska, Sanetra 2008).

1. METODYKA BADAŃ W WARUNKACH KONWENCJONALNEGO TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA

Badania wytrzymałości skał były prowadzone w sztywnej maszynie wytrzymałościowej, ze sterowaniem kinematycznym za pomocą prędkości odkształcenia podłużnego badanej próbki.

Głębokość zalegania skał symulowano za pomocą ciśnienia pionowego wywieranego na próbkę przez płyty maszyny wytrzymałościowej, a ciśnienie poziome (okólne) za pomocą hydrostatycznego ciśnienia oleju, działającego w komorze wysokociśnieniowej.

Zastosowanie sztywnej maszyny wytrzymałościowej typu MTS-810 NEW z serwomechanizmem umożliwiło określenie własności skał w fazie przedkrytycznej i pokrytycznej.

W badaniach stosowano komorę ciśnieniową 70 MPa, typu KTK produkcji UNIPRESS w Warszawie oraz kompresor typu U2 umożliwiający utrzymywanie stałego ciśnienia okólnego podczas wykonywania badań.

1.1. Opis badań

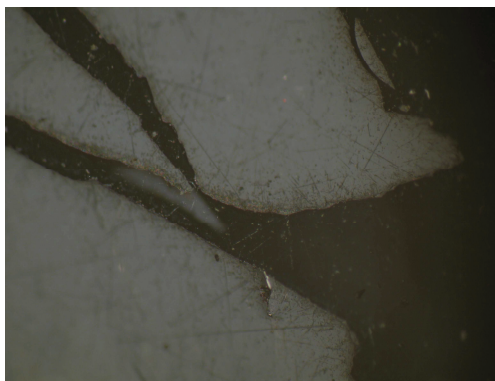
Badania w trójosiowym stanie naprężenia prowadzono metodą konwencjonalnego ściskania w warunkach $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = p$, na próbkach walcowych o średnicy 30 mm i smukłości 2, wykonanych zgodnie z normą PN-G-04303:1997. Stosowano kilka wartości ciśnienia okólnego $p = 0, 5, 10, 15, 20, 30, 50$ i 70 MPa. Każdorazowo próbkę obciążano osiowo prostopadle do uwarstwienia za pomocą płyt maszyny wytrzymałościowej, która jest wyposażona w oprogramowanie umożliwiające prowadzenie badań przy stałej prędkości odkształcenia podłużnego próbki, mierzonego przemieszczeniem tłoka. Przyjęto stałą prędkość odkształcenia wynoszącą $10^{-5} \cdot s^{-1}$, która odpowiada odkształcaniu się skał w sąsiedztwie wyrobisk eksploatacyjnych oraz przygotowawczych (Kwaśniewski 1986). Podczas prowadzenia badań obciążanie osiowe próbki zwiększano do uzyskania wartości maksymalnej (krytycznej), a następnie w dalszym ciągu obciążano ją, prowadząc rejestrację przebiegu procesu, aż do całkowitego zniszczenia próbki.

1.2. Charakterystyka petrograficzna węgla

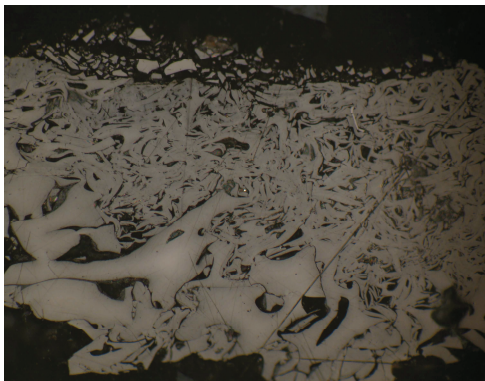
Próbki węgla do badań laboratoryjnych dobrano w taki sposób, aby pochodziły z różnych warstw karbońskich, charakteryzowały się dużą zmiennością pod względem petrograficznym i zróżnicowanymi własnościami wytrzymałościowymi. Były to węgle z warstw rudzkich, siodłowych, jakłowieckich i gruszowskich występujących w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym.

W celu zobrazowania zróżnicowanej budowy petrograficznej badanych węgla, dla przykładu została przedstawiona analiza petrograficzna dwóch z nich, a mianowicie węgla błyszczącego z kopalni „Zofiówka”, charakteryzującego się małą wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie i węgla półbłyszczącego z kopalni „Marcel” cechującego się średnią wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie. Analiza petrograficzna węgla została wykonana w Zakładzie Oceny Jakości Paliw Stałych GIG.

Węgiel z pokładu 406/1 w kopalni „Zofiówka” charakteryzował się dominującą zawartością macerałów grupy wityrynytu, a dokładniej kolinitu, który występował w postaci czystych regularnych ziaren (fot. 1). Drugim pod względem ilości macerałem był fuzynit, który występował zarówno w postaci struktur pustokomórkowych (fot. 2), jak i w formie ziaren z komórkami wypełnionymi substancją ilastą oraz węglanami. Ogólnie można stwierdzić, że badany węgiel wykazywał budowę wityrytowo-inertynitową. Taka budowa została potwierdzona również na podstawie analizy zawartości mikrolitotypów, wskazującej na wityryt (czyste ziarna kaolinitu) jako dominujący mikrolitotyp. Drugim pod względem ilości mikrolitotypem był wityrynertyt, który składał się z kaolinitu i macerałów grupy inertynitu (głównie mikrynytu i fuzynitu). Substancja mineralna występowała najczęściej w formie wtrąceń w kaolincie lub wypełnień macerałów grupy inertynitu.



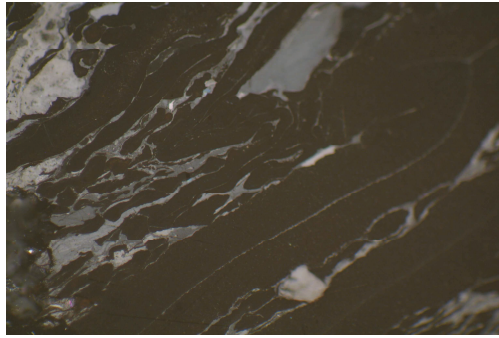
Fot. 1. Kolinit
Fot. 1. Kolinit



Fot. 2. Fuzynit
Fot. 2. Fuzynit

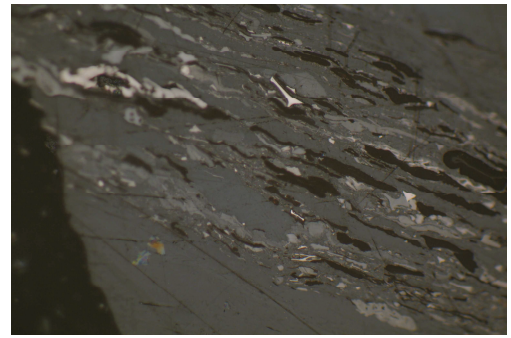
Węgiel z kopalni „Marcel” z pokładu 707/2 charakteryzował się dominującą zawartością macerałów grupy wityrynytu i liptynytu. Duża zawartość tych macerałów wynikała ze składu mikrolitotypów, w których zauważono obecność znacznych ilości wityrytu, występującego w postaci czystych ziaren kaolinitowych i wityrynertoliptyt (fot. 3).

Zwiększona zawartość wityryny i liptynytu była związana również z występowaniem trimacerytu, głównie duroklarytu, w budowie którego przeważał kaolinit (fot. 4).



Fot. 3. Wityrertoliptyt z licznymi makro- i mikrosporami

Photo. 3. Vitrinertoliptite with numerous macro- and microspores with liptinite and inertinite inclusions



Fot. 4. Duroklaryt, w budowie którego przeważa kolonit z wtrąceniami liptynytu i inertynyty

Photo. 4. Duroclarity, in the structure of which predominates kolonite with liptinite and inertinite inclusions

Inertynit rzadko występuje w formie pustokomórkowej. Najczęściej jego komórki impregnują węglany.

Do mikrolitotypów o podrzędnym udziale w budowie badanego węgla (do kilku procent) zalicza się: duryt, klaryt i inertyt. Liptytu w badanej próbce nie stwierdzono. Na podstawie przedstawionego składu petrograficznego węgiel zaliczono do odmiany półbłyszczącej. W składzie substancji mineralnej przeważały węglany, współwystępujące z inertynytem oraz karboargilit (minerały ilaste), który występował głównie w formie przesyczeń kaolinitu i duroklarytu.

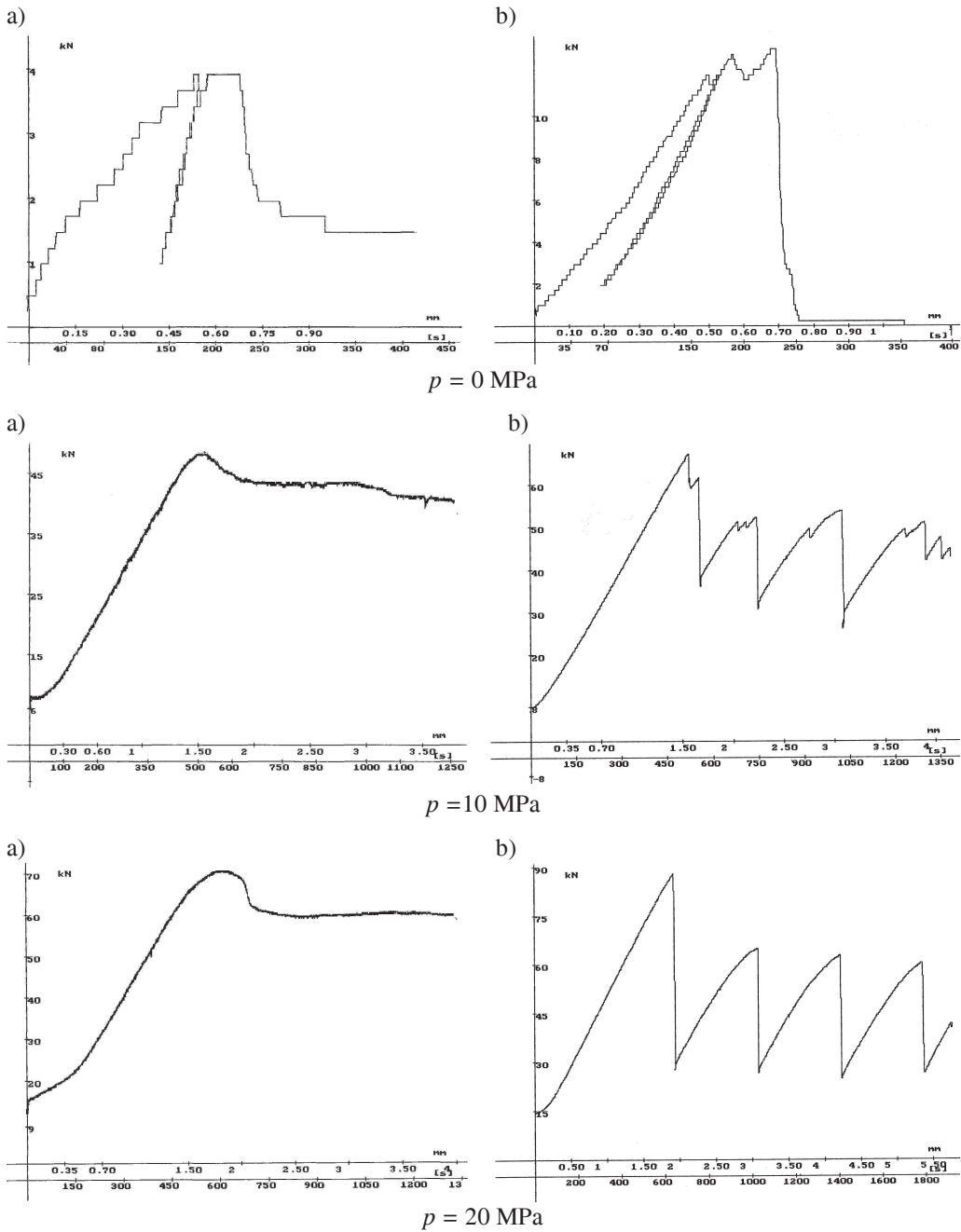
1.3. Wyznaczanie parametrów naprężeniowych i odkształceniowych

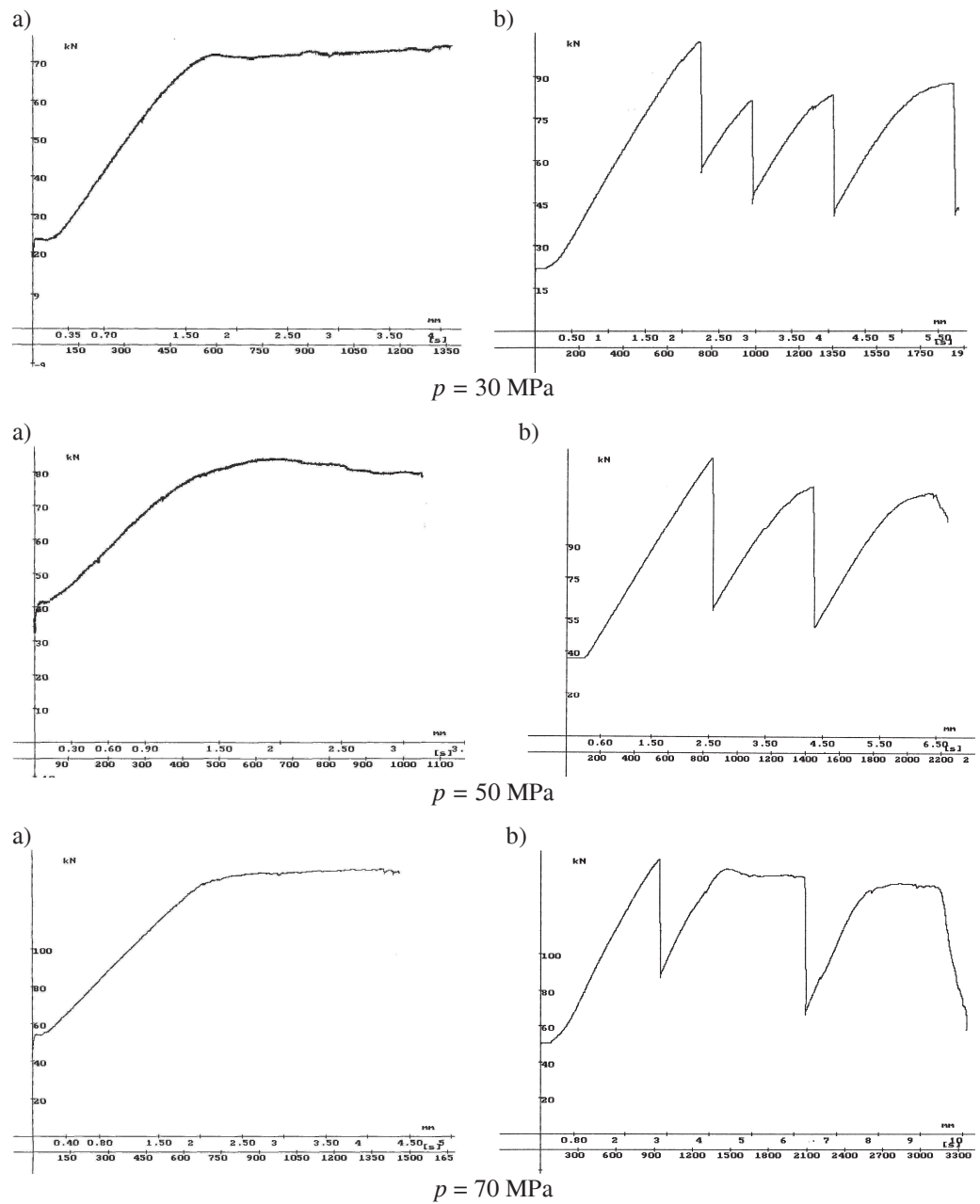
Badania własności wytrzymałościowych skał, prowadzone od wielu lat, polegają głównie na ściskaniu próbek w maszynie wytrzymałościowej. Układ: płyty maszyny wytrzymałościowej – próbka skalna stanowi najprostszy analogon układu rzeczywistego: strop – pokład – spąg. Zastosowanie do badań sztywnej maszyny wytrzymałościowej umożliwiło uzyskanie całkowitej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej z częścią wznoszącą i opadającą, opisującej stan przed- i pokrytyczny badanej próbki (Wawersik, Fairhurst 1970; Wawersik, Brace 1971).

Z uzyskanych w wyniku badań charakterystyk σ - ϵ wyznaczono następujące parametry naprężeniowe i odkształceniowe:

- dla fazy przedkrytycznej i krytycznej:
 - naprężenie krytyczne σ_{kr} ,
 - odkształcenie krytyczne ϵ_{kr} ;
- dla fazy pokrytycznej:
 - naprężenie resztkowe σ_{res} ,
 - odkształcenie resztkowe ϵ_{res} .

Wydruk komputerowy przebiegu badania w postaci krzywej „obciążenie – odkształcenie osiowe” próbek węgla z kopalń „Zofiówka” i „Polska Wirek”, przedstawiono na rysunku 1.





Rys. 1. Przebieg niszczenia próbek węgla z kopalni „Zofiówka” (a) i „Polska Wirek” (b)
 – krzywe „obciążenie – odkształcenie osiowe”, przy zadanym ciśnieniu okólnym p
Fig. 1. Course of destruction of coal samples from the “Zofiówka” colliery (a) and “Polska Wirek” colliery (b)
 – curves “load – axial deformation” at given circular pressure p

Przeprowadzone badania wykazały różny przebieg krzywych niszczenia węgla zarówno w fazie przedkrytycznej, jak i pokrytycznej. Uzyskane charakterystyki naprę-

zeniowo-odkształceniowe należały do dwóch klas ciągliwości (Kwaśniewski 1986). Niewątpliwy wpływ na ich kształt miały własności petrograficzne węgla, w tym jego struktura.

Węgiel z kopalni „Zofiówka” (a), charakteryzujący się małą wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie, należy do skał odkształcających się przejściowo (Hoshino i in. 1972); po przekroczeniu granicy plastyczności (przy ciśnieniu około 30 MPa) charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa przyjmuje postać prostej niemal równoległej do osi odkształcenia.

Węgiel z kopalni „Polska Wirek” (b), który wykazał średnią wytrzymałość na ściskanie, jak dla węgla z obszaru GZW, należy do skał odkształcających się krucho; charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa jest liniowa niemal do samego naprężenia granicznego, po przekroczeniu którego, w fazie pokrytycznej następuje „umiarkowane” zmniejszenie naprężeń (Kwaśniewski 1986). Dla większości badanych węgli, podobnie jak w przypadku węgla z kopalni „Polska Wirek”, w części pokrytycznej obserwowano cykliczne zmiany naprężenia charakteryzujące drgania cieme (Paterson 1978).

2. WYNIKI BADAŃ

Wśród węgli będących przedmiotem analizy wydzielono trzy grupy ze względu na zróżnicowaną wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (tabl. 1):

- grupa I – węgle o małej zwięzłości $R_c \leq 8$ MPa,
- grupa II – węgle o słabej zwięzłości $R_c = 8-16$ MPa,
- grupa III – węgle o dużej zwięzłości $R_c \geq 16$ MPa.

Podział ten zaproponowany przez Konopko i Bukowską (2008) jest związany z zagrożeniem tapaniami.

Tablica 1. Zestawienie badanych próbek węgla i ich wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie

Grupa	Kopalnia	Pokład	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie R_c , MPa
Grupa I	„Zofiówka”	406/1	5,8
Grupa II	„Bielszowice”	405	10,8
	„Polska Wirek”	502/I	14,5
	„Bielszowice”	502	10,6
	„Halemba”	510A	16,1
	„Anna Rydułtowy”	713/1-2	11,4
Grupa III	„Polska Wirek”	502/II	24,4
	„Bielszowice”	507	17,6
	„Niwka Modrzejów”	510	48,0
	„Bielszowice”	510	28,5
	„Marcel”	707/2	18,2
	„Grodziec”	816	36,7

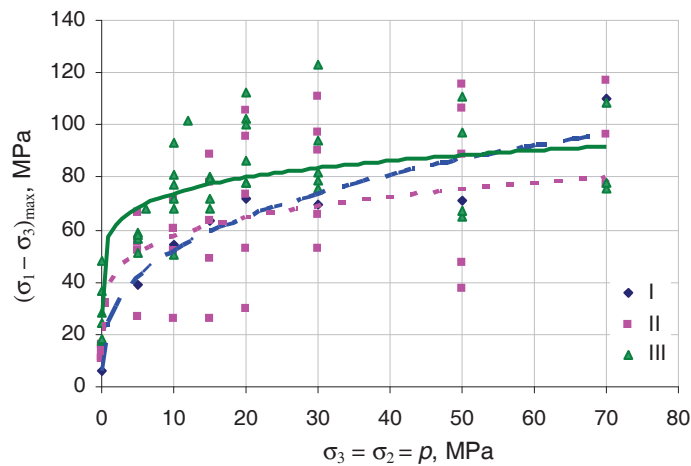
Badania wykonane w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania pozwoliły na określenie wpływu ciśnienia okólnego na parametry naprężeniowo-odkształceniowe fazy przedkrytycznej i pokrytycznej oraz zależność między parametrami przed- i pokrytycznymi węgli karbońskich.

Przyjęto następujące oznaczenia:

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

2.1. Wpływ ciśnienia okólnego na parametry naprężeniowe i odkształceniowe fazy przedkrytycznej i krytycznej

Dla badanych węgli określono zależności między parametrami naprężeniowymi i odkształceniowymi fazy przedkrytycznej i krytycznej a ciśnieniem okólnym w zakresie od 0 do 70 MPa (rys. 2 i 3).



Rys. 2. Zależność krytycznego naprężenia różnicowego od ciśnienia okólnego: I, II, III – grupy węgla o określonej zwięzłości

Fig. 2. Dependence of critical differentiated stress on the circular pressure: I, II, III – groups of coals with determined compactness

Stwierdzono, że zależność między krytycznym naprężeniem różnicowym a ciśnieniem okólnym najlepiej opisuje funkcja potęgowa (tabl. 2). Współczynniki korelacji dla zależności $(\sigma_1 - \sigma_3) = f(p)$ badanych węgli były duże, zmieniały się w granicach od 0,8446 do 0,9929, były więc większe od wartości granicznych (Volk 1973).

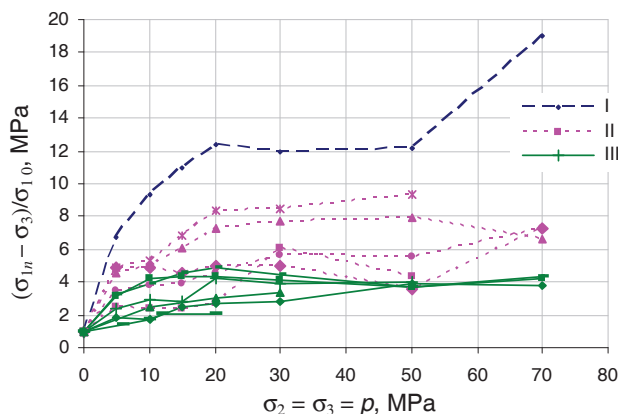
Tablica 2. Zależności funkcyjne krytycznego naprężenia różnicowego od ciśnienia okólnego

Skala	σ_1 , MPa przy $p = 0$ MPa	Równanie	Współczynnik korelacji
Węgle o małej zwięzłości	< 8	$\sigma_1 - \sigma_3 = 25,056p^{0,32}$	0,9929
Węgle o słabej zwięzłości	8–16	$\sigma_1 - \sigma_3 = 38,959p^{0,17}$	0,8446
Węgle o dużej zwięzłości	> 16	$\sigma_1 - \sigma_3 = 57,41p^{0,11}$	0,8705

Badacze zajmujący się badaniem niszczenia skał w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania najczęściej uzyskują nieliniowy przebieg omawianej zależności, szczególnie przy większych ciśnieniach okólnych, gdy skała przechodzi ze stanu kruchego w stan ciągliwy (Gustkiewicz i in. 1999; Kwaśniewski 2002).

Zaobserwowano, że już przy niewielkich ciśnieniach okólnych badane węgle wykazywały efekt wysokiej czułości ciśnieniowej wytrzymałości wywołany spękaniami skał (Kwaśniewski 2002), który wyrażał się wypukłością krzywej naprężeniowo-odkształceniowej w kierunku osi wytrzymałości granicznej (rys. 2). Efekt ten był związany z obecnością defektów strukturalnych w materiale skalnym, na które działa ciśnienie. Największy był wówczas, gdy były zamykane pierwotne szczelinki.

Zwiększanie ciśnienia okólnego powodowało wzrost maksymalnej siły niszczącej (wytrzymałości granicznej). Wielkość wzrostu krytycznego naprężenia różnicowego zależała od składu petrograficznego i cech strukturalnych (wielkości i kształtu ziaren, obecności mikropęknięć (mikroszczelin) badanych węgli. Największy wzrost ($\sigma_{1r}-\sigma_3$) w stosunku do wartości uzyskanych w warunkach jednoosiowego ściskania (σ_{10}) zaobserwowano dla węgli mało zwięzłych (grupa I). Przykładowo, ciśnienie okólne wynoszące 30 MPa (co odpowiadało zaleganiu skał na głębokości ok. 1200 m) spowodowało około 12-krotny wzrost krytycznego naprężenia różnicowego ($\sigma_{1r}-\sigma_3$). Dla węgli słabo zwięzłych (grupa II) wzrost ciśnienia do 30 MPa spowodował 5,0–8,5-krotny, a dla węgli o dużej zwięzłości (grupa III) 2,9–4,5-krotny wzrost krytycznego naprężenia różnicowego (rys. 3).

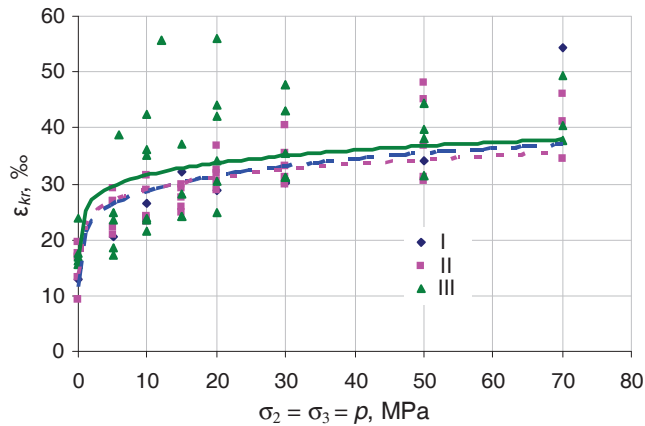


Rys. 3. Względna wartość krytycznego naprężenia różnicowego ($\sigma_{1r}-\sigma_3$)/ σ_{10} jako funkcja ciśnienia okólnego p , σ_{1r} – krytyczne naprężenie różnicowe przy różnych wartościach p , σ_{10} – krytyczne naprężenie różnicowe przy jednoosiowym ściskaniu, I, II, III – grupy węgli o określonej zwięzłości

Fig. 3. Relative value of the critical differential stress ($\sigma_{1r}-\sigma_3$)/ σ_{10} as the function of circular pressure p , σ_{10} – critical differential stress at uniaxial compression, I, II, III – groups of coals with determined compactness

Otrzymane wyniki były zgodne z wynikami wcześniejszych badań autorki (Sane-tra 2004, 2006), w których największy wzrost naprężenia krytycznego pod wpływem wzrastającego ciśnienia okólnego był obserwowany w skałach o mniejszej wytrzymałości jednoosiowej.

Na podstawie wyników badań oraz przebiegu krzywych „naprężenie–odkształcenie” można stwierdzić, że zmiana ciśnienia okólnego powodowała również zmianę wartości odkształcenia krytycznego badanych węgli (rys. 4). Zależność tę aproksymowano funkcją potęgową (tabl. 3).



Rys. 4. Zależność odkształcenia krytycznego od ciśnienia okólnego: I, II, III – grupy węgla o określonej zwięzłości

Fig. 4. Dependence of critical deformation on the circular pressure: I, II, III – groups of coals with determined compactness

Tablica 3. Zależność funkcyjna odkształcenia krytycznego od ciśnienia okólnego

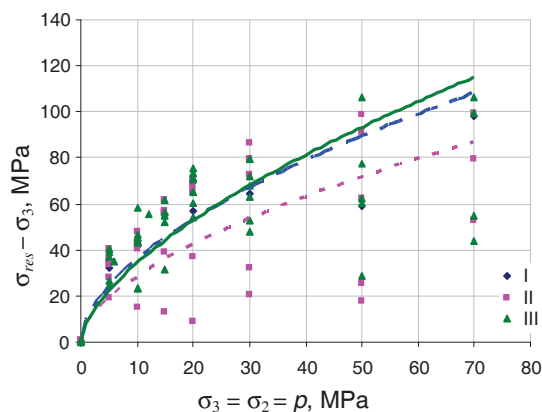
Skala	σ_1 (MPa) przy $p = 0$ MPa	Równanie	Współczynnik korelacji
Węgle o małej zwięzłości	< 8	$\epsilon_{kr} = 21,35p^{0,13}$	0,8927
Węgle o słabej zwięzłości	8–16	$\epsilon_{kr} = 22,794p^{0,10}$	0,8575
Węgle o dużej zwięzłości	> 16	$\epsilon_{kr} = 25,438p^{0,09}$	0,7196

Wzrost wartości odkształcenia krytycznego ϵ_{kr} przy $p = 30$ MPa badanych węgli był bardzo zbliżony. I tak, dla węgla o małej zwięzłości wzrost ciśnienia powodował 2-, 3-krotny wzrost w stosunku do wartości uzyskanych przy jednoosiowym ściskaniu. Dla węgla o słabej zwięzłości wzrost ten był od 1,6- do 3,8-krotny, a dla węgla o dużej zwięzłości od 1,8- do 3,1-krotny. Największy przyrost odkształcenia krytycznego uzyskano w zakresie ciśnienia okólnego od 0 do 10 MPa. Nastąpił wówczas około 2-krotny wzrost w stosunku do wartości początkowej (przy $p = 0$ MPa). W przypadku większości badanych węgli dalszy wzrost ciśnienia okólnego nie powodował już tak znacznego wzrostu wartości odkształcenia krytycznego (Sanetra 2004). Maksymalny wzrost ϵ_{kr} , jaki uzyskano przy $p = 70$ MPa stanowił pięciokrotność wartości początkowej odkształcenia krytycznego ϵ_{kr0} .

2.2. Wpływ ciśnienia okólnego na parametry naprężeniowe fazy pokrytycznej

Badania wykonane w sztywnej maszynie wytrzymałościowej z serwomechanizmem umożliwiły określenie parametrów naprężeniowych i odkształceniowych fazy pokrytycznej, a następnie wyznaczenie zależności między nimi a ciśnieniem okólnym.

Zależność między resztkową wytrzymałością różnicową $\sigma_{res}-\sigma_3$ a ciśnieniem okólnym dla badanych węgli w zakresie stosowanego ciśnienia okólnego aproksymowano funkcją potęgową (rys. 5), dla której otrzymano duże współczynniki korelacji (tabl. 4).



Rys. 5. Zależność resztkowej wytrzymałości różnicowej od ciśnienia okólnego: I, II, III – grupy węgla o określonej zwięzłości

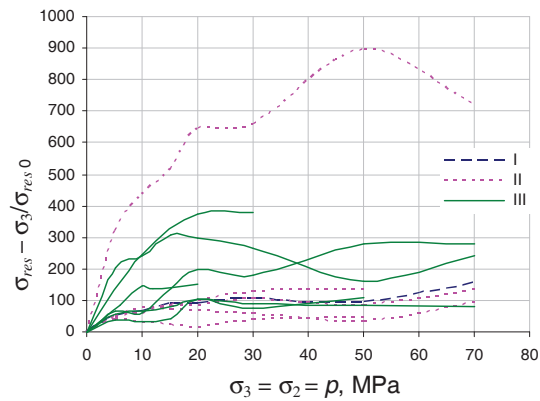
Fig. 5. Dependence of residual differential strength on the circular pressure: I, II, III – groups of coals with determined compactness

Stwierdzono, że wytrzymałość resztkowa σ_{res} jest parametrem, który najbardziej zmienia się w zakresie stosowanego ciśnienia okólnego.

Tablica 4. Zależność funkcyjna resztkowej wytrzymałości różnicowej od ciśnienia okólnego

Skala	σ_1 (MPa) przy $p = 0$ MPa	Równanie	Współczynnik korelacji
Węgle o małej zwięzłości	< 8	$(\sigma_{res}-\sigma_3) = 9,804p^{0,57}$	0,9905
Węgle o słabej zwięzłości	8–16	$(\sigma_{res}-\sigma_3) = 7,5236p^{0,58}$	0,9241
Węgle o dużej zwięzłości	> 16	$(\sigma_{res}-\sigma_3) = 8,2961p^{0,62}$	0,9700

Wzrost ciśnienia okólnego do 30 MPa powodował znaczny wzrost resztkowej wytrzymałości różnicowej $\sigma_{res}-\sigma_3$ w porównaniu z wartością uzyskaną podczas jednoosiowego ściskania. O ile w przypadku skał płonnych był to wzrost kilkudziesięciokrotny (Sanetra 2004), to dla węgla GZW, charakteryzujących się małymi wartościami wytrzymałości resztkowej przy $p = 0$ MPa (Sanetra 2007), wzrost ciśnienia okólnego do 30 MPa spowodował kilkusetkrotny wzrost resztkowej wytrzymałości różnicowej (rys. 6).



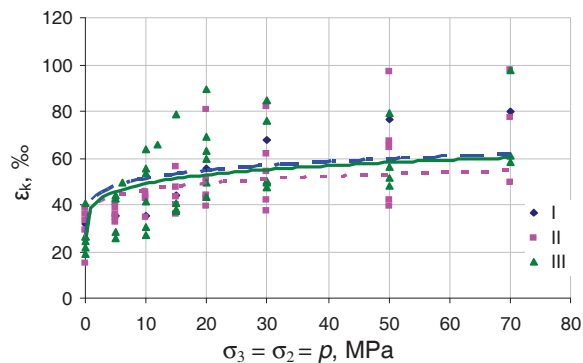
Rys. 6. Względna wartość resztkowej wytrzymałości różnicowej $(\sigma_{res\ n} - \sigma_3)/\sigma_{res\ 0}$ jako funkcja ciśnienia okólnego p : $\sigma_{res\ n}$ – resztkowa wytrzymałość różnicowa przy różnych wartościach p , $\sigma_{res\ 0}$ – resztkowa wytrzymałość różnicowa przy jednoosiowym ściskaniu; I, II, III – grupy węgla o określonej zwięzłości

Fig. 6. Relative value of residual differential strength $(\sigma_{res\ n} - \sigma_3)/\sigma_{res\ 0}$ as the function of differential pressure p : $\sigma_{res\ n}$ – residual differential strength at different values of p , $\sigma_{res\ 0}$ – residual differential strength at uniaxial compression; I, II, III – groups of coals with determined compactness

Największy wzrost resztkowej wytrzymałości różnicowej $\sigma_{res\ n} - \sigma_3$ badanych węgla zaobserwowano w przypadku węgla o słabej (grupa II) i dużej zwięzłości (grupa III), kiedy ciśnienie okólnie 30 MPa spowodowało 40–660-krotny (grupa II) i 75–380-krotny (grupa III) wzrost resztkowej wytrzymałości różnicowej w stosunku do wartości $\sigma_{res\ 0}$ uzyskanych przy ciśnieniu 0 MPa. Większy wzrost wytrzymałości resztkowej dla węgla o większej zwięzłości był związany z faktem, że węgle o znacznej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie miały wytrzymałość resztkową bliską zero.

Zmiana ciśnienia okólnego miała również wpływ na zmianę odkształcenia resztkowego, jednak był on znacznie mniejszy niż w przypadku parametrów naprężeniowych.

Z przeprowadzonych badań wynika, że zależność $\varepsilon_{res} = f(p)$ dla badanych węgla w zakresie stosowanego ciśnienia najlepiej opisuje funkcja potęgowa (rys. 7, tabl. 5).



Rys. 7. Zależność odkształcenia resztkowego od ciśnienia okólnego: I, II, III – grupy węgla o określonej zwięzłości

Fig. 7. Dependence of residual deformation on the circular pressure: I, II, III – groups of coals with determined compactness

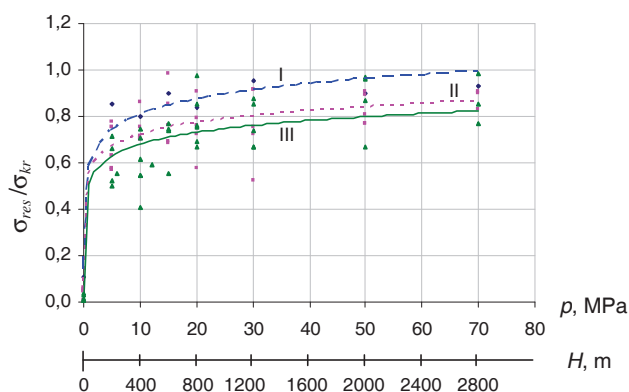
Tablica 5. Zależność odkształcenia resztkowego od ciśnienia okólnego

Skala	σ_1 (MPa) przy $p = 0$ MPa	Równanie	Współczynnik korelacji
Węgle o małej zwięzłości	< 8	$\epsilon_{res} = 41,389p^{0,09}$	0,7174
Węgle o słabej zwięzłości	8–16	$\epsilon_{res} = 38,595p^{0,08}$	0,6202
Węgle o dużej zwięzłości	> 16	$\epsilon_{res} = 38,7311p^{0,10}$	0,7068

Przy wzroście ciśnienia okólnego do 30 MPa następował około 2-krotny wzrost odkształcenia resztkowego dla węgla o małej zwięzłości, natomiast w przypadku węgla o słabej i dużej zwięzłości wzrost wartości odkształcenia resztkowego ze wzrostem ciśnienia był większy (4- i 5-krotny).

3.3. Zależności między przedkrytycznymi i pokrytycznymi własnościami naprężeniowymi a ciśnieniem okólnym

Wzrost ciśnienia okólnego powodował zmianę zarówno własności przedkrytycznych, jak i pokrytycznych, w tym najważniejszych własności wytrzymałościowych: naprężenia krytycznego ($\sigma_1 = \sigma_{kr}$) i naprężenia resztkowego (σ_{res}), mających wpływ na zachowanie się górotworu. Rozpatrując zależność między naprężeniem resztkowym a naprężeniem krytycznym, przy zadanym ciśnieniu okólnym, stwierdzono, że istnieje między tymi parametrami zależność w postaci funkcji logarytmicznej (rys. 8), dla której uzyskano duże współczynniki korelacji (tabl. 6).

Rys. 8. Zależność $\sigma_{res}/\sigma_{kr} = f(p)$ dla badanych węgla: I, II, III – grupy węgla o określonej zwięzłościFig. 8. Dependence $\sigma_{res}/\sigma_{kr} = f(p)$ for tested coals: I, II, III – groups of coal with determined compactnessTablica 6. Zależność σ_{res}/σ_{kr} od ciśnienia okólnego p (głębokość H)

Skala	σ_{kr} (MPa) przy $p = 0$ MPa	Równanie	Współczynnik korelacji
Węgle o małej zwięzłości	< 8	$\sigma_{res}/\sigma_{kr} = 0,0959\ln(p) + 0,5868$	0,9752
Węgle o słabej zwięzłości	8–16	$\sigma_{res}/\sigma_{kr} = 0,0734\ln(p) + 0,5533$	0,9385
Węgle o dużej zwięzłości	> 16	$\sigma_{res}/\sigma_{kr} = 0,0739\ln(p) + 0,5098$	0,9308

Zaobserwowano, że po początkowym wzroście wartości σ_{res} , które przy $p = 5$ MPa (co odpowiada głębokości zalegania H około 200 m) osiągnęło wartość $0,50\text{--}0,78\sigma_{kr}$, a w przypadku węgla wykazujących najmniejszą wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, naprężenie resztkowe osiągnęło wartość $0,85\sigma_{kr}$. Dalsze zwiększanie ciśnienia okólnego do 70 MPa (H ok. 2800 m) spowodowało stopniowy wzrost naprężenia resztkowego do wartości zbliżonej do wartości naprężenia krytycznego. Szczególnie dotyczyło to węgla o małej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, których naprężenie resztkowe przy $p = 70$ MPa wynosiło $0,93\sigma_{kr}$.

PODSUMOWANIE

Badania trójosiowego ściskania ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) węgla karbońskich z obszaru GZW w sztywnej maszynie wytrzymałościowej doprowadziły do istotnych wniosków, dotyczących wpływu ciśnienia okólnego na charakterystyczne wielkości naprężeniowo-odkształceniowe. Stwierdzono, że wyniki badań wytrzymałościowo-odkształceniowych własności węgla w trójosiowym stanie naprężenia mogą być wykorzystane w obliczeniach inżynierskich przy projektowaniu obiektów górniczych oraz w modelowaniu procesów deformacji górotworu podczas prowadzenia eksploatacji (np. strefy spękań w filarze). Szczególną uwagę zwrócono na pokrytyczne własności węgla charakteryzujące proces niszczenia skał na różnych głębokościach, symulowanych w badaniach za pomocą ciśnienia poziomego (okólnego). Zastosowane ciśnienia odpowiadały ciśnieniom w warunkach eksploatacji w obszarze GZW, gdzie obecnie jest prowadzone wydobywanie do głębokości około 1200 m.

Na podstawie wyników uzyskanych z badań, około 350 karbońskich próbek węgla poddanych ciśnieniu okólnemu w zakresie od 0 do 70 MPa stwierdzono, że istnieją zależności funkcyjne między ciśnieniem okólnym a krytycznymi i pokrytycznymi własnościami węgla. Wykazano, że wzrost ciśnienia okólnego powoduje wzrost maksymalnego (krytycznego) naprężenia i odkształcenia krytycznego oraz znaczny wzrost naprężenia resztkowego i odpowiadającego mu odkształcenia resztkowego. Szybkość wzrostu wartości badanych parametrów zależy od zakresu stosowanego ciśnienia okólnego i zawartości poszczególnych grup macerałów w węglach. Nadmienić należy, że empiryczne równania zmian wytrzymałości na ściskanie węgla matowych i błyszczących z głębokością ich zalegania opracował Kidybiński (1982). Badaniem zależności między składem petrograficznym węgla, głębokością zalegania pokładu a wytrzymałością na ściskanie zajmowała się Bukowska (2004, 2005).

Stwierdzono także, że naprężenia krytyczne badanych węgla zwiększały się ze wzrostem stosowanego ciśnienia okólnego kilka do kilkunastokrotnie w stosunku do wartości naprężenia krytycznego występującego podczas jednoosiowego ściskania ($p = 0$ MPa).

Największy wpływ wzrostu ciśnienia okólnego obserwowano w przypadku naprężenia resztkowego, które odzwierciedla nośność pokrytyczną górotworu (np. nośne strefy spękanych filarów). Wzrost wartości ciśnienia okólnego do 70 MPa powodował nawet kilkusetkrotny wzrost wartości naprężenia resztkowego w stosunku do prawie zerowych wartości σ_{res} , występujących przy $p = 0$ MPa; szczególnie dotyczyło to węgla o dużej zwięzłości.

Parametry odkształceniowe również ulegały zmianom pod wpływem zwiększającego się ciśnienia okólnego, ale wpływ ten był znacznie mniejszy niż w przypadku parametrów wytrzymałościowych.

Porównując wartości naprężenia krytycznego i resztkowego, przy skrajnych wartościach ciśnienia okólnego (od 0 do 70 MPa) wykazano, że naprężenie resztkowe przy ciśnieniu okólnym 70 MPa osiągało wartość około 0,90 naprężenia krytycznego przy $p = 0$ MPa.

Literatura

1. Bukowska M. (2004): Wytrzymałość na ściskanie wytypowanych węgla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego na tle ich budowy petrograficznej. Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko nr 4.
2. Bukowska M. (2005): Prognozowanie skłonności do tępań górotworu metodą wskaźnikowej oceny geologiczno-geomechanicznej w warunkach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Prace Naukowe GIG nr 866.
3. Bukowska M., Sanetra U., Wadas M. (2007): The Post-peak Failure Properties and Deformational Structures of Rocks under Conventional Triaxial Compression Conditions. *Archiwum Górnictwa* Vol. 52, issue 3.
4. Bukowska M., Sanetra U. (2008): Badania konwencjonalnego trójosiowego ściskania granitu i dolomitu w aspekcie ich własności mechanicznych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 24, z. 2/3.
5. Gustkiewicz J. i in. (1999): Własności fizyczne wybranych skał karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Skały warstw siodłowych. Kraków, IGSMiE PAN.
6. Hoshino K., Koide H., Inami K., Iwamura S., Mitsui S. (1972): Mechanical properties of Japanese tertiary sedimentary rocks under high confining pressures. Geological Survey of Japan, Report No. 244.
7. Kidybiński A. (1982): Podstawy geotechniki kopalnianej. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.
8. Konopko W., Bukowska M. (2008): Parametr $\tan \beta$ jako miara skłonności górotworu do tępań. *Górnictwo i Geoinżynieria* t. 32, z. 1.
9. Kwaśniewski M. (1986): Wpływ stanu naprężenia, temperatury i prędkości odkształcania na mechaniczne własności skał. *Archiwum Górnictwa* t. 31, z. 2.
10. Kwaśniewski M. (2002): Zachowanie się skał izo- i anizotropowych w warunkach trójosiowego ściskania. *Zeszyty Politechniki Śląskiej* z. 247.
11. Krzysztoń D., Bukowska M., Sanetra U., Gawryś J., Wadas M. (2002): Pokrytyczne własności skał w trójosiowym stanie naprężenia sygnalizowane emisją akustyczną. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* nr 5.
12. Krzysztoń D., Sanetra U. (2003): Investigations of rocks triaxial compression at confining pressure from 0 to 70 MPa. *Archiwum Górnictwa* t. 48.
13. Paterson M.S. (1978): *Experimental Rock Deformation. The Brittle Field*. New York, 1978, Berlin, Heidelberg Springer-Verlag.
14. Polska norma PN-G-04301:1996. Skały zwięzłe. Pobieranie i przygotowanie próbek do badań własności mechanicznych i technologicznych.
15. Sanetra U. (1994): Wpływ ciśnienia bocznego na własności mechaniczne skał Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w warunkach trójosiowego ściskania. *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej* nr 65, Seria Konferencje nr 33.
16. Sanetra U., Szedel D. (2000): Zastosowanie kryterium wytrzymałościowego Hoeka-Browna do wyników trójosiowego ściskania próbek skalnych. *Konferencja Naukowo-Techniczna Budownictwo Podziemne 2000*. Kraków, Uczelniane Wydaw. Naukowo-Dydaktyczne AGH.

17. Sanetra U. (2002): Kąt tarcia wewnętrznego i spójność skał zwięzłych i spękanych. Warsztaty górnicze nt. Problematyka inżynierska z zakresu ochrony terenów górniczych. Sympozja i konferencje nr 55. Kraków, Wydaw. IGSMiE PAN.
18. Sanetra U. (2004): Określenie nośności filarów oporowych w stanie pokrytycznym na podstawie badań trójosiowego ściskania karbońskich próbek skalnych. Katowice, GIG (Praca doktorska).
19. Sanetra U. (2005): Kąt tarcia wewnętrznego skał zalegających na różnej głębokości. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie nr 6, s. 54–56.
20. Sanetra U. (2006): Krytyczne i pokrytyczne własności różnoziarnistych piaskowców karbońskich GZW badanych w trójosiowym ściskaniu. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie nr 6.
21. Sanetra U. (2007): Wytrzymałość resztkowa różnych typów litologicznych skał. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie nr 6.
22. Volk W. (1973): Statystyka stosowana dla inżynierów. Warszawa, Wydaw. Naukowo-Techniczne.
23. Wawersik R., Fairhurst C. (1970): A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* No 6, Vol. 7, s. 561–575.
24. Wawersik W.R., Brace W.F. (1971): Post-failure behaviour of granite and diabase. *Rock Mechanics and Rock Engineering* No. 3.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Mirosława Bukowska