

MIROSLAWA BUKOWSKA\*

**WŁASNOŚCI POKRYTYCZNE SKAŁ KARBOŃSKICH  
GÓRNOŚLĄSKIEGO ZAGŁĘBIA WĘGLOWEGO W WARUNKACH ZMIENNYCH  
PRĘDKOŚCI ODKSZTAŁCENIA I CIŚNIEŃ OKÓLNYCH**

**POST-CRITICAL PROPERTIES OF CARBONIFEROUS ROCKS  
IN THE UPPER SILESIA COAL BASIN UNDER VARYING STRAIN RATE  
AND CONFINING PRESSURE CONDITIONS**

Określono wpływ prędkości odkształcenia w zakresie  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> i ciśnień okólnych w zakresie 0–50 MPa na niektóre własności geomechaniczne skał, takie jak naprężenie krytyczne  $\sigma_{cr}$ , naprężenie resztkowe  $\sigma_r$ , i moduł osłabienia  $M$ . Badania prowadzono w maszynie wytrzymałościowej MTS-810 NEW, przy wymuszeniu kinematycznym, za pomocą prędkości odkształcenia podłużnego, w zakresie  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  s<sup>-1</sup>. Badano skały karbońskie: piaskowiec drobnoziarnisty, iłowiec i węgiel półbłyszczący. Ogółem przebadano 162 próbki o średnicy 30 mm i wysokości 60 mm. Dla określenia wpływu prędkości odkształcenia i ciśnienia okólnego na parametry pokrytyczne zastosowano analizę statystyczną przy uwzględnieniu populacji próbek dla określonego typu skały. Określono zależności danego parametru jako funkcję prędkości odkształcenia i logarytmu prędkości odkształcenia oraz jako funkcję ciśnienia okólnego. Zależności te wraz ze współczynnikami korelacji przedstawiono na rysunkach 1–7.

**Słowa kluczowe:** naprężenie krytyczne, naprężenie resztkowe, moduł osłabienia, prędkość odkształcenia, ciśnienia okólne, zależności funkcyjne

The influences of the strain rate ranging from  $10^{-5}$  to  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup> and of the confining pressure ranging from 0 to 50 MPa on certain geomechanical properties of rocks such as critical stress,  $\sigma_{cr}$ , residual stress,  $\sigma_r$ , and the moduls of softening  $M$ , have been determined. The tests were carried out using the MTS-810 NEW testing machine with a kinematic control by means of longitudinal strain rates of  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  s<sup>-1</sup>. Confining pressures in the range of 10–50 MPa were applied. The following Carboniferous rocks have been tested:

- fine-grained sandstone — 72 specimens;
- siltstone — 39 specimens;
- semi-bright coal — 51 specimens.

---

\* GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA, 40-166 KATOWICE, PLAC GWARKÓW 1; e-mail: btxmb@gig.katowice.pl

A total of 162 rock specimens were tested. To determine the effects of the strain rate and confining pressure on the post-critical parameters, a statistical analysis allowing for the sample population of a particular rock type has been performed. Relations between a given parameter and the following factors:

- strain rate or logarithm of the strain rate,
- confining pressure

were determined.

These relations and their correlation coefficients are shown in Fig. 1–7.

The following are the conclusions from the analysis of the results of a study performed to investigate the influence of the strain rate and confining pressure on the post-critical parameters:

- The magnitude of critical stress as a function of the strain rate for sandstone, siltstone and coal increases in accordance with the power function for all the confining pressures used. Relations between the critical stress and the logarithm of the strain rate for different values of confining pressure are of the rectilinear shape with very high values of correlation coefficient.
- The values of residual stress for the confining pressure of  $p = 0$  MPa are low, which is typical of the uniaxial compression, and decrease with the increase in strain rate. However, the residual stress for the values of confining pressure ranging from 10 to 50 MPa increases with the increase in strain rate. The relation between residual stress and confining pressure in the range of 0–50 MPa at strain rates of  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  s $^{-1}$ , can best be defined by the power function having the correlation coefficients indicating very high values of correlation at confining pressures ranging from 0 to 10 MPa for siltstone and coal and from 0 to 20 MPa for sandstone. For the higher values of confining pressure (in excess of 20 MPa), lower values of the correlation coefficient can be distinguished. The relations between the strain rate for different values of confining pressure have been described by the linear functions.
- There is a relationship between the critical stress and the confining pressure and between the residual stress and the confining pressure. The relation  $\sigma_{cr} = f(p)$ ,  $\sigma_r = f(p)$  for sandstone, siltstone and coal can best be defined by a linear function.
- The investigation of the influence of strain rates of  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  s $^{-1}$  on the values of modulus of softening  $M$  for Carboniferous rocks have not indicated any regular variation of modulus of softening  $M$  with strain rate. However, the relation between the modulus of softening and the confining pressure is clear, i.e. the modulus of softening decreases with the increase in confining pressure for sandstone and coal according to the polynomial of the second degree or the exponential function. At the same time, a greater scatter of the values of modulus of softening  $M$  for coal relative to strain rates for the lower values of confining pressure can be observed. For the higher values of confining pressure in the range of 20–50 MPa, the differences between values of modulus of softening  $M$  for the corresponding strain rates decrease. For siltstone, no relation between modulus of softening  $M$  and confining pressure  $p$  in the range of 0–50 MPa, at strain rates of  $10^{-4}$ – $10^{-1}$  s $^{-1}$ , has been found. The extensive studies performed to investigate the influence of the strain rate and confining pressure on the values of modulus of softening for the Carboniferous rocks have confirmed the validity of the test results presented in papers by Bukowska (1996, 2000, 2002a).
- Taking into account the influences of the strain rate in the range of  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  s $^{-1}$  and of the confining pressure in the range of 0–50 MPa can be of use for analysing the stability of underground mine workings and for predicting the loss of stability leading to rockburst potential and occurrence.

**Key words:** critical stress, residual stress, modulus of softening, strain rate, confining pressure, relation determination

## 1. Wstęp

Celem pracy było określenie własności pokrytycznych skał karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) w warunkach zmiennych prędkości odkształcenia i ciśnień okólnych. Szczególnie wykazanie wpływu prędkości odkształcenia na wartości parametrów pokrytycznych skał karbońskich w warunkach trójosiowego ściskania, w zakresie ciśnień do 50 MPa, oraz wykazanie wpływu ciśnienia okólnego na te parametry w warunkach zmiennych prędkości odkształcenia ma charakter nowatorski w skali krajowej.

Wpływ prędkości odkształcenia i ciśnień okólnych na parametry pozniszczeniowe określono na podstawie badań próbek piaskowca, iłowca i węgla w sztywnej maszynie wytrzymałościowej, przy wymuszeniu kinematycznym, w zakresie ciśnień okólnych 0–50 MPa i prędkości odkształcenia  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  s<sup>-1</sup>. Stosowana w eksperymentach prędkość odkształcenia odpowiada prędkościom odkształcania się skał w sąsiedztwie wyrobisk eksploatacyjnych i prędkościom odkształcenia charakterystycznym dla tąpnięć. Stosowane w eksperymentach ciśnienia okólne do 50 MPa odpowiadają w przybliżeniu głębokościom zalegania pokładów do 2000 m. Ostatnia wartość znacznie przekracza głębokość eksploatacji w GZW, ale z uwagi na ciągle wzrastającą głębokość eksploatacji daje możliwość prognozowania wartości parametrów skał na głębokościach powyżej 1200 m.

W stateczności wyrobisk górniczych szczególnie ważne są prędkości odkształcenia, które występują przy urabianiu skał np. metodami udarowymi oraz prędkości odkształcenia występujące w otoczeniu wyrobisk. Szereg niekorzystnych zjawisk w górotworze zachodzi z różnymi prędkościami odkształcenia. Przykładem mogą być tąpnięcia, które mają charakter dynamiczny oraz powolne zaciskanie wyrobisk górniczych (konwergencja wyrobisk) o charakterze statycznym. Stan wiedzy na temat prędkości odkształcenia charakterystycznych dla niektórych zjawisk towarzyszących podziemnej eksploatacji górniczej, np. dla tąpnięć i wyrzutów skał, podsumowane zostały w pracy Kwaśniewskiego (1986).

Wpływ prędkości odkształcenia na niektóre własności mechaniczne skał, np. na wytrzymałość na ściskanie badane w jednoosiowym ściskaniu, opisywany był w literaturze zagranicznej już w latach trzydziestych. Nowsze badania sięgają lat sześćdziesiątych (Kłeczek 1967; Bieniawski 1970; Peng 1973; Klepaczko 1983; Okubo, Nishimatsu 1985; Kwaśniewski 1986; Lis, Kijewski 1986, 1987; Bezat 1987; Chong, Turner, Borezi 1989; Krzysztóń 1988, 1990; Lajtai, Duncan, Carter 1991; Bukowska, Smółka 1994; Bukowska, Krzysztóń 1994; Gustkiewicz i in. 1999; Bukowska 1994, 1996, 2000, 2002a, b). Ogólnie można stwierdzić, iż ze wzrostem prędkości odkształcenia w jednoosiowym ściskaniu na ogół obserwuje się wzrost wartości wytrzymałości na ściskanie, wzrost wartości energii właściwych odkształcenia podłużnego i modułu sprężystości podłużnej.

Wpływ prędkości odkształcenia na własności skał bada się również w trójosiowym stanie naprężenia. Wśród badaczy zajmujących się tym zagadnieniem wymienić należy między innymi Blantona, Gustkiewicza i innych badaczy (Blanton 1981; Gustkiewicz

1985, 1999; Smołka, Sanetra 1994; Li H., Li T., Zhao 1999; Bukowska 2000, 2002a, b). Ogólnie można stwierdzić, że wraz ze wzrostem ciśnienia okólnego wrasta wartość naprężenia krytycznego, jednakże wzrost ten dla skał osadowych jest niższy niż w przypadku skał magmowych, np. dla granitu, gdzie różnica pomiędzy wartościami naprężenia krytycznego ze wzrostem ciśnienia okólnego ( $p = 20$  MPa i  $p = 50$  MPa) wynosi 100%.

## 2. Opis badań eksperymentalnych

Eksperymenty prowadzono w maszynie wytrzymałościowej MTS-810 NEW z serwo mechanizmem, przy wymuszeniu kinematycznym, za pomocą prędkości odkształcenia podłużnego, w zakresie  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  s<sup>-1</sup>, w jednoosiowym i trójosiowym ściskaniu. Badania skał w trójosiowym ściskaniu prowadzono w komorze ciśnieniowej przy ciśnieniach okólnych 10–50 MPa. Ogółem przebadano 162 próbki walcowe o średnicy  $\phi = 30$  mm i smukłości równej 2. Badano skały karbońskie formacji węglonośnej Górnośląskiego Zagłębia Węglowego: piaskowce drobnoziarniste (72 próbki), iłowce (39 próbek) i węgle (51 próbek). Zastosowanie w badaniach różnych prędkości odkształcenia umożliwiło przeanalizowanie wpływu prędkości odkształcenia na naprężenie krytyczne, naprężenie resztkowe i moduł osłabienia przy ciśnieniu okólnym w zakresie 0–50 MPa.

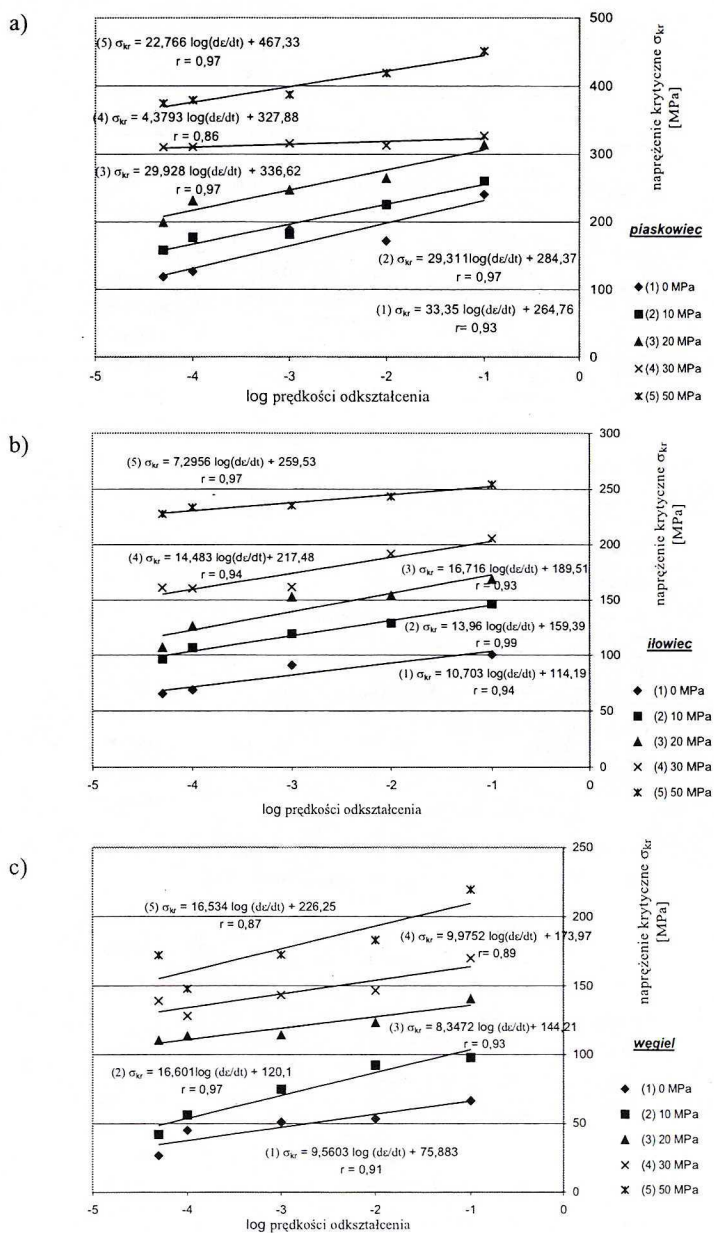
W uzyskane wyniki aproksymowano funkcje metodą najmniejszych kwadratów. Odpowiednie funkcje wraz ze współczynnikami korelacji zapisane są przy rysunkach ilustrujących wyniki.

## 3. Wpływ prędkości odkształcenia na parametry pokrytyczne skał dla różnych wartości ciśnienia okólnego

Badania skał karbońskich GZW prowadzono przy różnych wartościach prędkości odkształcenia i przy różnych wartościach ciśnienia okólnego. Uzyskane wyniki dla każdego rodzaju skał przedstawiono w postaci dwóch wiązek wykresów: zależności między badaną własnością pokrytyczną a prędkością odkształcenia, przy ciśnieniu okólnym jako parametrze i zależności między badaną własnością pokrytyczną a ciśnieniem okólnym, przy prędkości odkształcenia jako parametrze.

Wartości naprężenia krytycznego jako funkcji prędkości odkształcenia dla piaskowca drobnoziarnistego, iłowca i węgla zmieniają się zgodnie z funkcją potęgową, podobnie jak w wielu innych przypadkach ciała stałego. Ponieważ jednak prędkości zmieniają się w szerokim zakresie pięciu rzędów wielkości, bo od  $10^{-5}$  s<sup>-1</sup> do  $10^{-1}$  s<sup>-1</sup>, naprężenie krytyczne wyrażono jako funkcje dziesiętnego logarytmu prędkości odkształcenia. Wtedy przedstawia się ono w postaci prostoliniowych zależności (rys. 1).

Kolejnym parametrem prezentowanym jako funkcja prędkości odkształcenia jest parametr umownie nazwany naprężeniem resztkowym, który wyraża się wartością

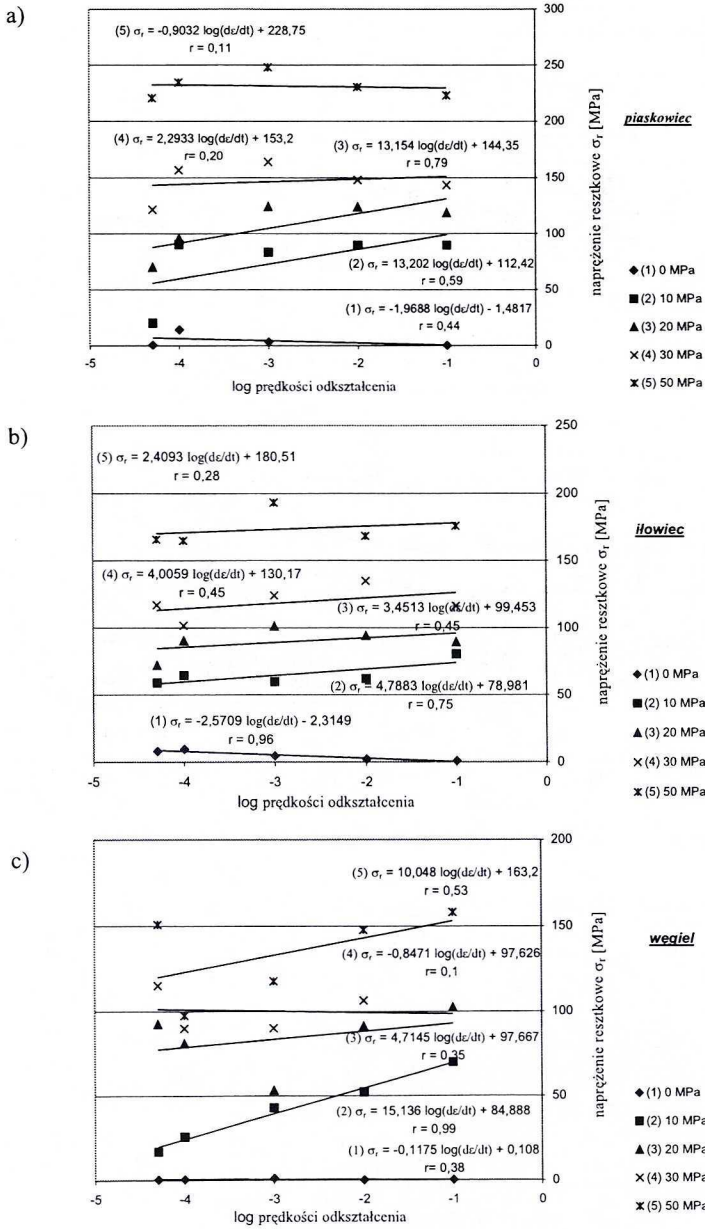


Rys. 1. Zależność  $\sigma_{kr} = f\left(\log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)\right)$  dla różnych wartości ciśnienia okólnego

a) piaskowiec; b) iłowiec; c) węgiel

Fig. 1. The relation  $\sigma_{kr} = f\left(\log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)\right)$  for different values of confining pressure

a) sandstone; b) siltstone; c) coal

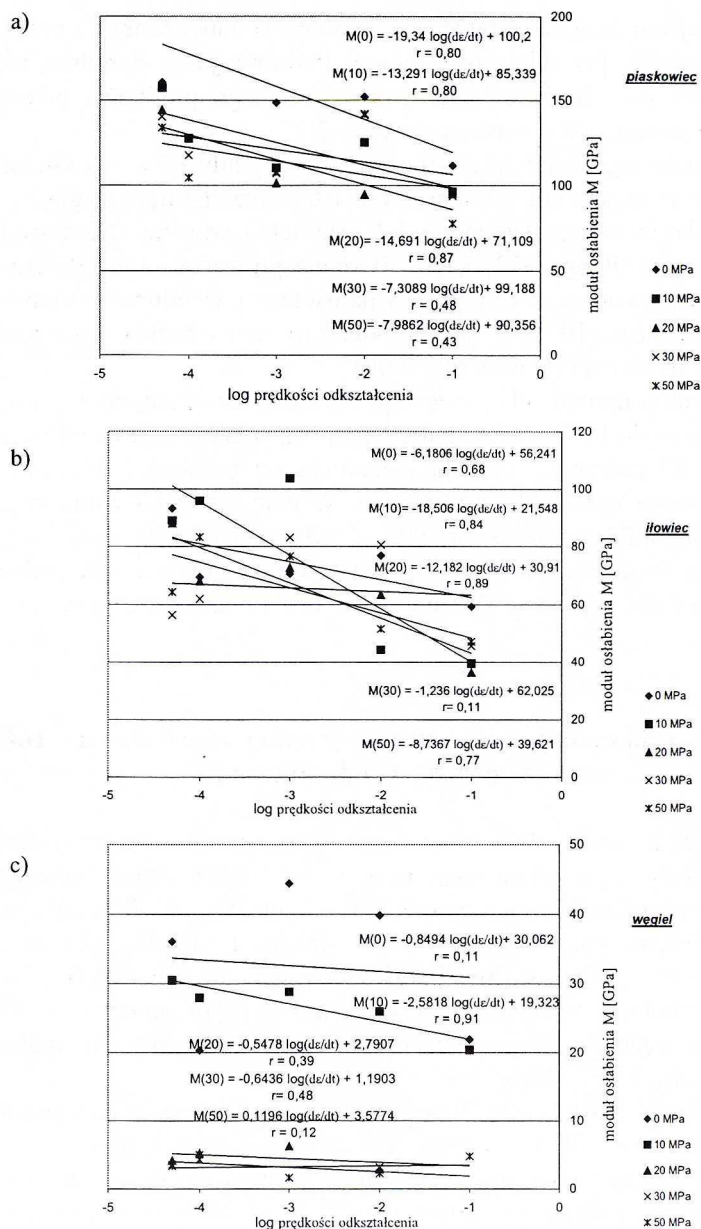


Rys. 2. Zależność  $\sigma_r = f\left(\log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)\right)$  dla różnych wartości ciśnienia okólnego

a) piaskowiec; b) ilowiec; c) węgiel

Fig. 2. The relation  $\sigma_r = f\left(\log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)\right)$  for different values of confining pressure

a) sandstone; b) siltstone; c) coal



Rys. 3. Zależność  $M = f\left(\log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)\right)$  dla różnych wartości ciśnienia okólnego

a) piaskowiec; b) iłowiec; c) węgiel

Fig. 3. The relation  $M = f\left(\log\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)\right)$  for different values of confining pressure

a) sandstone; b) siltstone; c) coal

siły odpowiadającej wartości odkształcenia całkowitego odnoszonej do przekroju poprzecznego próbki skalnej przed jej zniszczeniem. Podobnie jak poprzednio, naprężenie resztkowe wyrażono jako funkcję logarytmu dziesiętnej prędkości odkształcenia. Zależności te dla badanych skał zawiera rysunek 2.

Powszechnie znane są, często sprzeczne ze sobą poglądy na temat zmian modułu osłabienia  $M$  wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia. Istnieją poglądy, że wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia moduł osłabienia wzrasta (Bieniawski 1970) lub ulega zmniejszeniu (Peng 1973, 1978). Badania prowadzone w Głównym Instytucie Górnictwa, w sztywnej maszynie wytrzymałościowej, w jednoosiowym ściskaniu, z prędkością odkształcenia  $10^{-4}$ – $10^{-1}$  s $^{-1}$  potwierdziły niejednoznaczność zachowania się skał w fazie pokrytycznej (Bukowska 2000).

Zależność modułu osłabienia dla poszczególnych ciśnień okólnych w zakresie prędkości odkształcenia rzędu  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  s $^{-1}$  najlepiej opisuje dla piaskowca i łowca funkcja potęgowa. Natomiast zależność modułu osłabienia od prędkości odkształcenia dla węgla najlepiej opisuje funkcja logarytmiczna. W celu lepszego zobrazowania rozkładu wartości modułu  $M$ , w zakresie prędkości odkształcenia  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  s $^{-1}$ , podano zależności modułu osłabienia jako funkcje logarytmu prędkości odkształcenia. Zależność tę opisano funkcją liniową i przedstawiono dla piaskowca, łowca i węgla na rysunku 3.

#### 4. Wpływ ciśnienia okólnego na parametry pokrytyczne skał dla różnych wartości prędkości odkształcenia

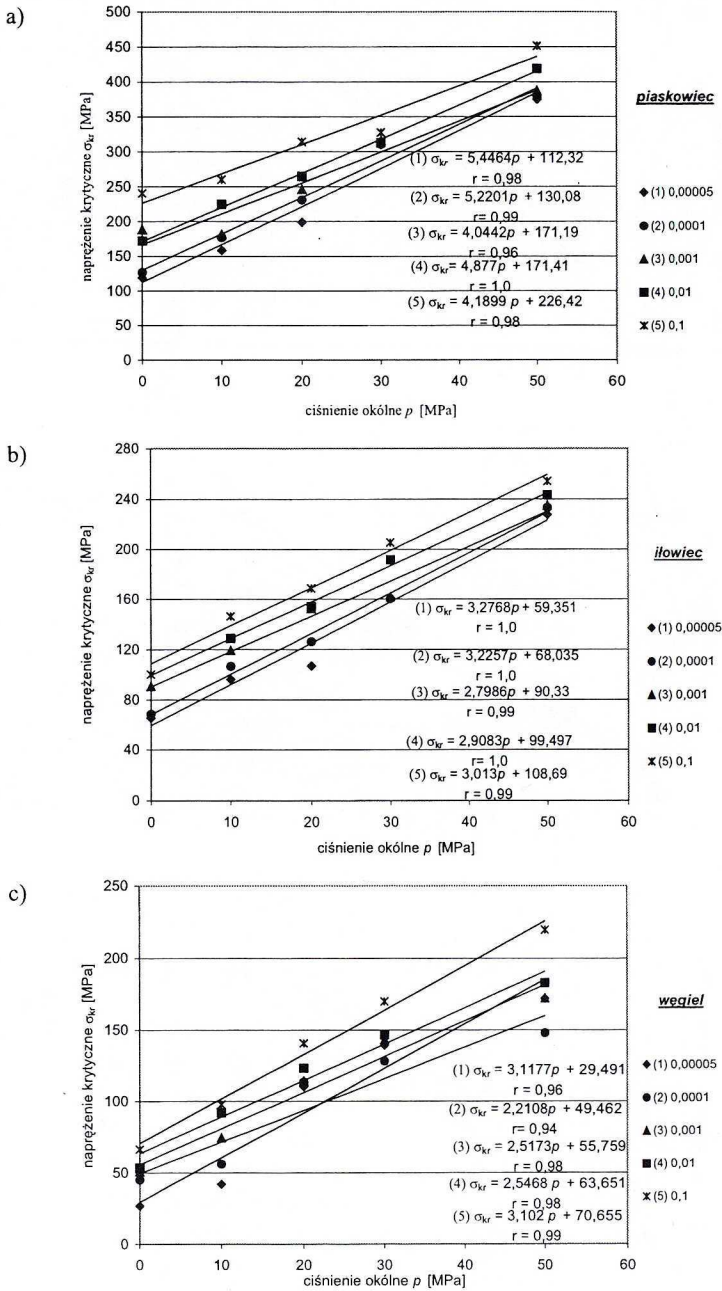
Analiza statystyczna wykazała zależność pomiędzy naprężeniem krytycznym a ciśnieniem okólnym, którą najlepiej opisać można, w przedziale wartości ciśnień okólnych 0–50 MPa odwzorowujących warunki podziemnej eksploatacji w GZW, dla piaskowca, łowca i węgla funkcją liniową, mimo iż w większym zakresie ciśnień okólnych (do 100 MPa i więcej) podaje się przebiegi krzywoliniowe (np. Gustkiewicz 1999). Jednakże według Handina i innych badaczy nie wyklucza się przebiegu prostoliniowego dla wielu skał osadowych, np. dla piaskowców, również w zakresie ciśnień okólnych do około 400 MPa (patrz Thiel 1980).

Powyższą zależność dla poszczególnych, stosowanych w badaniach prędkości odkształcenia, przedstawiono dla piaskowca, łowca i węgla na rysunku 4.

Wartości parametru umownie nazwanego naprężeniem resztkowym  $m$  zmieniają się w wyniku wzrastającego ciśnienia okólnego od 0 do 50 MPa. Naprężenie resztkowe wyznaczone z testu jednoosiowego ściskania przyjmuje niskie wartości, co jest charakterystyczne dla jednoosiowego ściskania.

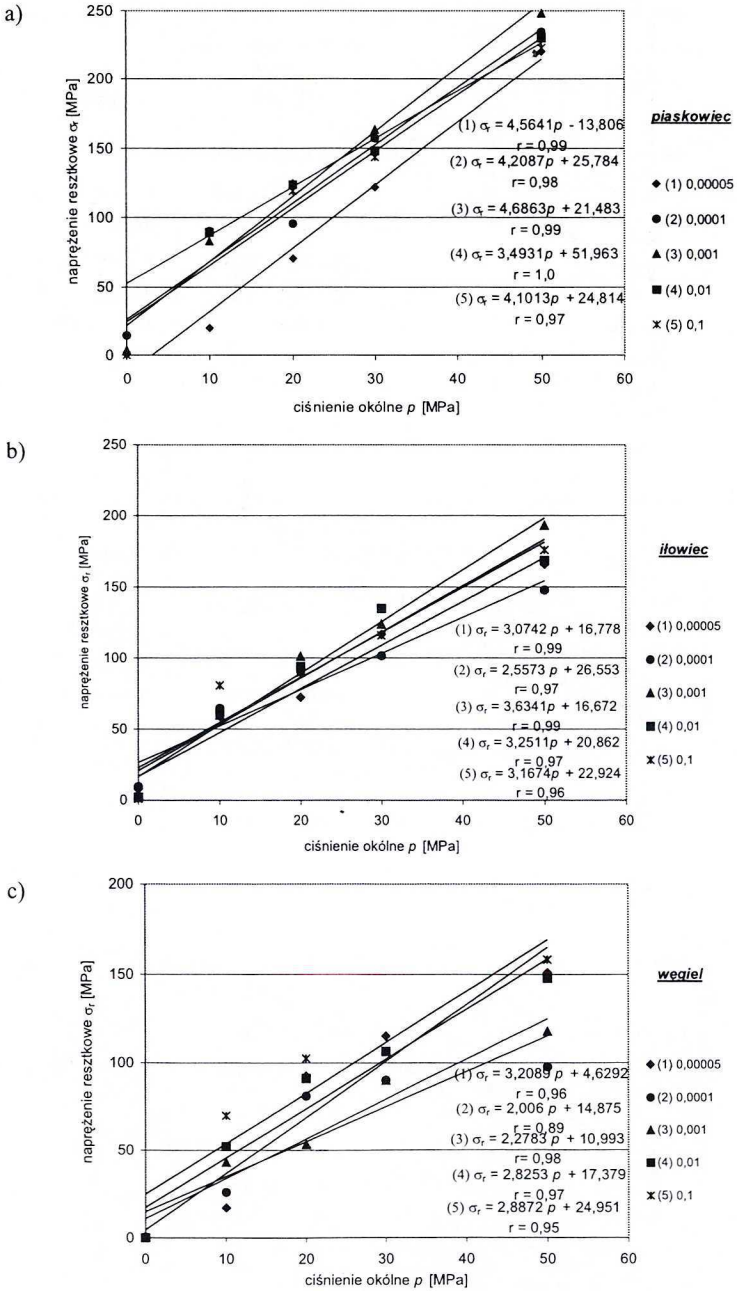
Analiza statystyczna wykazała zależność pomiędzy naprężeniem resztkowym a ciśnieniem okólnym, którą najlepiej opisać można dla wszystkich badanych skał, w zakresie ciśnień okólnych 0–50 MPa, funkcją liniową. Powyższą zależność dla poszczególnych, stosowanych w badaniach prędkości odkształcenia przedstawiono na rysunku 5.





Rys. 4. Zależność  $\sigma_{kr} = f(p)$  dla różnych prędkości odkształcenia  
 a) piaskowiec; b) iłowiec; c) węgiel

Fig. 4. The relation  $\sigma_{kr} = f(p)$  for different values of strain rate  
 a) sandstone; b) siltstone; c) coal



Rys. 5. Zależność  $\sigma_r = f(p)$  dla różnych prędkości odkształcenia  
a) piaskowiec; b) ilowiec; c) węgiel

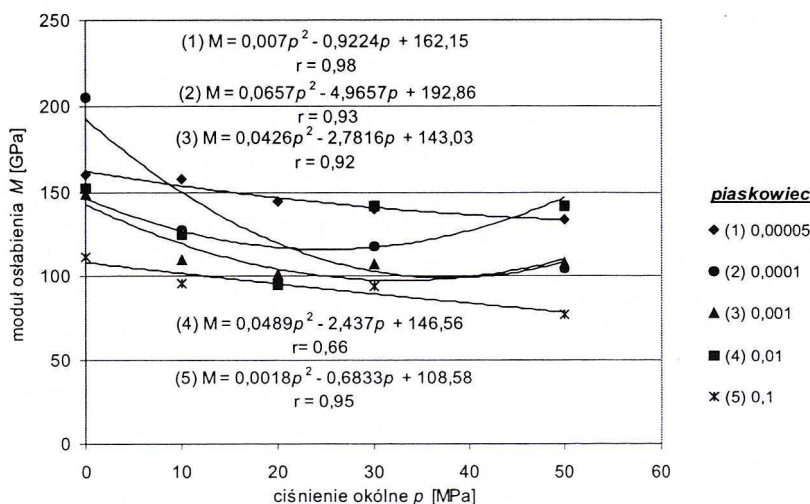
Fig. 5. The relation  $\sigma_r = f(p)$  for different values of strain rate  
a) sandstone; b) siltstone; c) coal

Zależność modułu osłabienia  $M$  od ciśnienia  $p$ , czyli  $M = f(p)$ , dla piaskowca, dla prędkości odkształcenia z przedziału wartości  $10^{-5}$ – $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  najlepiej opisać można funkcją wielomianu drugiego stopnia (rys. 6). Moduł osłabienia w zakresie ciśnień okólnych 0–50 MPa zmniejsza się od około 10 do 50% .

Iłowiec nie wykazuje jednakowych zmian modułu osłabienia dla wszystkich pięciu prędkości odkształcenia stosowanych w eksperymentach. Dla prędkości odkształcenia z przedziału wartości  $10^{-5}$ – $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  moduł osłabienia nieznacznie wzrasta w przedziale ciśnień okólnych od 0 do 10 MPa, by następnie w przedziale ciśnień 10–40 MPa zmniejszać się. Następnie obserwuje się wzrost wartości modułu osłabienia w zakresie ciśnienia 40–50 MPa. Dla prędkości odkształcenia z przedziału wartości  $10^{-2}$ – $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  moduł osłabienia nieznacznie maleje w przedziale ciśnień okólnych od 0 do 10 MPa, by z kolei w przedziale ciśnień 10–40 MPa wzrastać. Następnie obserwuje się spadek jego wartości w zakresie ciśnienia 40–50 MPa. Ogólnie można stwierdzić, że dla prędkości odkształcenia w przedziale  $10^{-4}$ – $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  nie znaleziono regularnej zależności  $M = f(p)$  dla iłowca. Jedynie  $M = f(p)$  dla prędkości odkształcenia  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  można aproksymować funkcją wielomianu drugiego stopnia, której postać jest następująca:

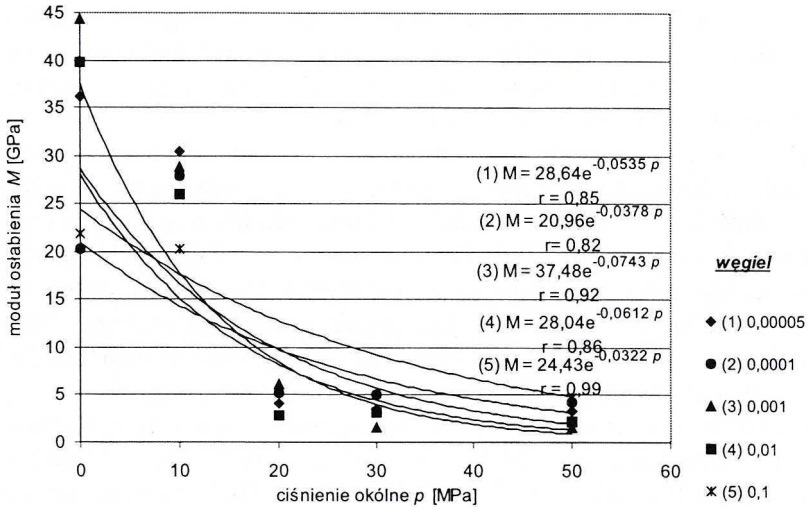
$$M = 0,01 p^2 - 1,22 p + 97,11$$

Moduł osłabienia badanego węgla maleje ze wzrostem ciśnienia okólnego zgodnie z funkcją wielomianu drugiego stopnia lub wykładniczą, a uzyskane zależności mają przebieg zgodny z zależnością wykazaną w pracy Bukowskiej (2002a) dla prędkości odkształcenia  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Z uwagi jednak na przebieg krzywych wielomianu drugiego stopnia dla prędkości odkształcenia  $10^{-3}$ – $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ , które w dolnym odcinku przecinają oś wartości ciśnienia okólnego, zdecydowano się na wybór funkcji wykładniczej.



Rys. 6. Zależność  $M = f(p)$  dla piaskowca dla różnych prędkości odkształcenia

Fig. 6. The relation  $M = f(p)$  for sandstone and different values of strain rate



Rys. 7. Zależność  $M = f(p)$  dla węgla dla różnych prędkości odkształcenia

Fig. 7. The relation  $M = f(p)$  for coal and different strain rates

Moduł osłabienia w zakresie ciśnień okólnych 0–50 MPa zmniejsza się od 124% (prędkość odkształcenia  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) do 78% (prędkość odkształcenia  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) wartości maksymalnej występującej dla ciśnienia okólnego  $p = 0$  MPa. Charakterystyczny jest około 80-procentowy spadek wartości modułu osłabienia dla ciśnienia okólnego w zakresie 10–20 MPa.

## 5. Wnioski

Na podstawie analizy wyników badań nad wpływem prędkości odkształcenia i ciśnień okólnych na parametry pokrytyczne wysunięto następujące wnioski:

1. Wartość naprężenia krytycznego jako funkcji prędkości odkształcenia dla piaskowca, łowca i węgla rośnie dla wszystkich stosowanych ciśnień okólnych w zakresie 0–50 MPa. Zależności naprężenia krytycznego od logarytmu prędkości odkształcenia dla różnych wartości ciśnienia okólnego mają postać prostoliniową (rys. 1), podobnie jak zależność naprężenia resztkowego dla poszczególnych ciśnień okólnych (0–50 MPa) w zakresie prędkości odkształcenia  $10^{-5}$ – $10^{-1} \text{ s}^{-1}$  (rys. 2). Wyjątek stanowi naprężenie resztkowe dla ciśnienia okólnego 0 MPa, gdzie wartości naprężenia resztkowego są niskie (typowe dla jednoosiowego ściskania).

2. Istnieje zależność pomiędzy naprężeniem krytycznym, naprężeniem resztkowym a ciśnieniem okólnym w stosowanym zakresie prędkości odkształcenia (rys. 4, 5). Dla piaskowca, łowca i węgla zależność  $\sigma_{kr} = f(p)$  i  $\sigma_r = f(p)$  w zakresie ciśnień okólnych 0–50 MPa, odpowiadającym warunkom eksploatacji w GZW, ma przebieg

prostoliniowy. Wielu badaczy podaje, w większym zakresie ciśnień okólnych (do 100 MPa i więcej), przebieg krzywoliniowy. Jednakże według innych nie wyklucza się przebiegu prostoliniowego dla wielu skał osadowych, np. dla piaskowców, również w zakresie ciśnień okólnych do około 400 MPa.

3. Charakterystyczne jest, że ze wzrostem ciśnienia okólnego od  $p = 0$  MPa do  $p = 50$  MPa zmniejsza się wpływ prędkości odkształcenia na wartość naprężenia krytycznego piaskowca i iłowca (rys. 4a i 4c) oraz na wytrzymałość resztkową piaskowca (rys. 5a), zwiększa się natomiast wpływ prędkości odkształcenia na wartość naprężenia krytycznego i naprężenia resztkowego węgla.

4. Badania wpływu prędkości odkształcenia na wartości modułu osłabienia skał karbońskich nie wykazały regularnych jego zmian wraz z prędkością odkształcenia (rys. 3). Natomiast zależność pomiędzy modułem osłabienia a ciśnieniem okólnym jest wyraźna — moduł osłabienia maleje ze wzrostem ciśnienia okólnego dla piaskowca (rys. 6) i węgla (rys. 7) zgodnie z funkcją wielomianu drugiego stopnia lub wykładniczą. Jednocześnie obserwuje się większy rozrzut wartości  $M$  dla węgla w zależności od prędkości odkształcenia przy niższych wartościach ciśnień okólnych (rys. 7). Dla wyższych ciśnień okólnych (20–50 MPa) różnice między wartościami modułu osłabienia dla poszczególnych prędkości odkształcenia zmniejszają się. Dla iłowca nie stwierdzono zależności pomiędzy modułem osłabienia a ciśnieniem okólnym 0–50 MPa w zakresie prędkości odkształcenia  $10^{-4}$ – $10^{-1}$  s $^{-1}$ .

5. Uwzględnienie wpływu prędkości odkształcenia w zakresie  $10^{-5}$ – $10^{-1}$  s $^{-1}$  i wpływu ciśnienia okólnego w zakresie 0–50 MPa może mieć zastosowanie przy analizie stateczności podziemnych wyrobisk górniczych i przy przewidywaniu utraty stateczności. Ponadto badania własności skał w zakresie ciśnień okólnych 0–50 MPa umożliwiają przewidywanie ich zachowania się na głębokościach, które odpowiadają rzeczywistym głębokościom eksploatacji w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym.

Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2000–2002 jako projekt badawczy nr 9T12A 033 18

#### LITERATURA

- Bieniawski Z.T., 1970: Time-dependent behaviour of fractured rock. *Rock Mechanics* vol. 2, nr 3, pp. 123–137.
- Bezaf F.A., 1987: Recent developments in the application of closed loop servohydraulic control technology to post failure testing of uniaxially loaded cylindrical rock specimens. *Górnictwo* nr 129, Kraków, pp. 31–36.
- Blanton T.L., 1981: Effect of strain rates from  $10^{-2}$  to  $10$  sec $^{-1}$  in triaxial compression tests on three rocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* vol. 18, no. 1, pp. 47–62.
- Bukowska M., 1994: Wpływ prędkości odkształcenia na własności wytrzymałościowo-odkształceniowe skał karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Prace GIG, Sympozjum Nauk.-Tech. Tapania'94 nt. Rozwiązania inżynierskie w problematyce tapani*, s. 11–18.
- Bukowska M., Smółka J., 1994: Intensywność rozpraszania energii węgla i skał płonnych wybranych pokładów GZW według badań laboratoryjnych. *Mat. V Konf.: Problemy geologii i ekologii w górnictwie podziemnym*, ś. 103–109, Katowice.

- Bukowska M., Krzysztóń D., 1994: Wpływ przedkrytycznych własności naprężeniowo-odkształceniowych na proces niszczenia próbek skalnych. Symposium Nauk.-Tech. Tapania'94 nt.: Rozwiązania inżynierskie w problematyce tapani. Ustroń, s. 19–28.
- Bukowska M., 1996: Wpływ prędkości odkształcenia skał na wskaźniki skłonności do tapani. Praca doktorska. GIG, Katowice.
- Bukowska M., 2000: The influence of strain rate on indices of rock bump susceptibility. Archives of Mining Sciences 45,1, pp. 23–45, Kraków.
- Bukowska M., 2002a: Geomechanical properties of rocks from the rockburst hazard point view. Archives of Mining Sciences vol. 47/2, pp. 111–138. Kraków.
- Bukowska M., 2002b: Własności naprężeniowe i energetyczne skał karbonu produktywnego GZW w warunkach zmiennych prędkości odkształcenia i ciśnień okólnych. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. Sym. I Konf. Nr 55 nt. Problematyka inżynierska z zakresu ochrony terenów górniczych. s. 305–312. Kraków.
- Chong K.P., Turner J.P., Borese A.P., 1989: Strain rate effects on the mechanical properties of western and eastern oil shales. Balkema, Rotterdam, pp. 611–623.
- Gustkiewicz J., 1985: Transition of the rocks from the brittle to ductile state: Strain at failure as a function of confining pressure. Acta Geoph. Pol. 33, pp. 169–181.
- Gustkiewicz J. i in., 1999: Własności fizyczne wybranych skał karbońskich Górnoląskiego Zagłębia Węglowego, Skały warstw siodłowych. Kraków.
- Klepaczko J.R., 1983: On the rate sensitivity of coal. Rozprawy Inżynierskie t. 31, z. 3. PWN, Warszawa, pp. 341–359.
- Kłeczek Z., 1967: Wytrzymałość skał karbońskich w świetle badań reologicznych. Zeszyty Problemowe Górnictwa PAN t. 5, z. 2.
- Krzysztóń D., 1988: Pre- and post failure behaviour of rock samples. Proceedings of the 10th Plenary Scientific Session of the International Bureau of Strata Mechanics (World Mining Congress), Balkema, pp. 37–43.
- Krzysztóń D., 1990: Wpływ prędkości odkształcenia na własności wytrzymałościowe skał suchych i nasyconych wodą. Górótwór jako ośrodek wielofazowy, t. I, Wyd. AGH, Kraków, s. 137–156.
- Kwaśniewski M., 1986: Wpływ stanu naprężenia, temperatury i prędkości odkształcania na mechaniczne własności skał. Archiwum Górnictwa t. 31, z. 2, s. 383–415, Kraków.
- Lajtai E. Z., Duncan E. J. S., Carter B. J., 1991: The effect of strain rate on rock strength. Rock Mech. and Rock Eng. vol. 24, no. 2, pp. 99–109.
- 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, pp. 1057–1063.
- Lis J., Kijewski P., 1986: Wpływ prędkości obciążenia na wytrzymałość i deformacje skał z obszaru LGOM, Cuprum nr 2, s. 6–9.
- Lis J., Kijewski P., 1987: Wpływ prędkości deformacji modeli skalnych na ich zachowanie w stanach przed i późniszczeniowych. Zeszyty Naukowe AGH nr 1117, seria: Górnictwo, z. 129, s. 191–197.
- Okubo S., Nishimatsu Y., 1985: Uniaxial compression testing using a linear combination of stress and strain as the control variable. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. vol. 22, nr 5, pp. 323–330.
- Peng S.S., 1973: Time-dependent aspects of rock behaviour as measured by servocontrolled hydraulic testing machine. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. nr 3.
- Peng S.S., 1978: Coal Mine Ground Control. John Wiley and Sons, New York.
- Smołka J., Bukowska M., Sanetra U., Wadas M., 1994: Badania własności węgla i skał w zróżnicowanych układach obciążeniowych. Projekt badawczy KBN nr 900779101, GIG, Katowice.
- Thiel K., 1980: Mechanika skał w inżynierii wodnej. PWN, Warszawa.

REVIEW BY: PROF. DR HAB. INŻ. JERZY GUSTKIEWICZ, KRAKÓW

Received: 12 March 2003