

Tadeusz CHRZAN
Instytut Górnictwa Politechniki Wrocławskiej

OKREŚLENIE WYTRZYMAŁOŚCI SKAŁ NA ŚCISKANIE I WSKAŹNIKA SKŁONNOŚCI DO TAΠΑŃ W_{ET}

Streszczenie. Omówiono wady dotychczasowych niszczących i ultradźwiękowych sposobów określania właściwości skał na próbkach. Podano nowy szybki sposób określania właściwości skał oparty na uproszczonym module akustycznym. Podano definicję modułu akustycznego i zależność pomiędzy nim a wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie. Podano wyniki badań dla uproszczonego modułu akustycznego na próbkach dolomitu z kopalni Rudna.

DETERMINATION OF COMPRESIVE STRENGTH OF ROCKS AND BURSTING LIABILITY INDEX W_{ET}

Summary. In the publication has been presented an analysis of ultrasonic and destructive methods determining mechanical properties of rock. It has been ascertained the maximum narrowness determining properties of rock is given by the acoustic moduls method. The acoustic modulus is the produkt of volume weight, velocity of propagation of longitudinal and transveral ultrasonic waves. The new method, based on the reduction of acoustical modulus enables the obtaining of compressive strength and the bursting liability index W_{ET} . This method is quick and permits the determination of the compressive strength of rocks in the "Rudna" copper mine.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА СЖАТИЕ И ПОКАЗАТЕЛЯ УДАРООПАСНОСТИ W_{ET} ДЛЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Резюме. В статье представлены недостатки проведенных разрушающих и неразрушающих исследований свойств пород на образцах. Дается новый скоростной метод определения свойств горных пород, основанный на акустическом модуле. Дана формулировка акустическово метода и показана теоретическая зависимость между ним и сопротивлением на

растяжение и сжатие. Эта зависимость была проверена опытным путем на образцах для отдельных отечественных и зарубежных месторождений. Показана зависимость между акустическим модулем и энергетическим показателем удароопасности W_{ET} .

WSTĘP

Od wielu lat prowadzone są prace nad zastosowaniem i wprowadzeniem do powszechnego stosowania nieniszczących (szybkich) metod określania właściwości wytrzymałościowych i technologicznych skał. Górują one zdecydowanie nad tradycyjnymi metodami niszczącymi głównie niższym kosztem i prostotą pomiarów. Dokładność ta zwiększa się z liczbą wykonywanych pomiarów, a przy badaniach ultradźwiękowych jest ona niczym nieograniczona. Bardzo ważną zaletą tych badań jest także możliwość wielokrotnego powtarzania pomiarów, krótki czas pomiarów i określanie z zależności korelacyjnych prawie natychmiastowy wynik.

Znajomość właściwości wytrzymałościowych i wskaźnika W_{ET} jest niezbędna do klasyfikacji skał dla potrzeb górnictwa.

Dotychczasowy sposób określania właściwości wytrzymałościowych wymaga wyspecjalizowanych laboratoriów i jest długotrwały. Opracowany sposób określania właściwości wytrzymałościowych za pomocą pomiarów ultradźwiękowych pozwolił na wyeliminowanie tych wad.

Zastosowanie przez autora do określania właściwości wytrzymałościowych skał modułu akustycznego zmniejszyło wielkość współczynnika ich zmienności z 45% do max. 20%, a także błąd względny pojedynczego pomiaru. Określanie wytrzymałości skał zwięzłych i wskaźnika W_{ET} na podstawie modułu akustycznego przeprowadza się poprzez oddzielne testowanie dla każdego rodzaju badanej skały.

1. ZALEŻNOŚĆ TECHNOLOGII GÓRNICZEJ OD MECHANICZNYCH WŁAŚCIWOŚCI SKAŁ

Właściwości wytrzymałościowe skał mają zasadniczy wpływ na efektywność ich urabiania. Na podstawie wskaźników wytrzymałościowych projektuje się i dobiera maszyny urabiające oraz oblicza się ich wydajność.

Przez skały zwięzłe w tym przypadku rozumie się skały o $f = 4$. Badania właściwości skał (metodą niszczącą) wykonuje się we wyspecjalizowanych laboratoriach, przy czym wyniki otrzymuje się z reguły po długim okresie czasu od daty ich pobrania. Nie mogą one zatem być używane do bieżącej oceny właściwości skał w danym przodku. Do szybkiego określania właściwości wytrzymałościowych skał osadowych stosuje się metody ultradźwiękowe oparte na zależnościach korelacyjnych pomiędzy wskaźnikami wytrzymałościowymi a parametrami akustycznymi.

Właściwości skał określają technikę i technologię procesu eksploatacji złoża.

W zależności od stopnia poznania wpływu właściwości skał na proces ich urabiania można wydzielić 4 poziomy stosowane przy obliczeniach projektowych:

- 1) zależności, w których nie ma żadnej charakterystyki skał,
- 2) zależności, w których stosuje się współczynniki charakteryzujące właściwości skał,
- 3) zależności, w których stosuje się parametry charakteryzujące skałę odpowiadające danemu procesowi urabiania lub rozdrabiania,
- 4) zależności, w których występuje kilka właściwości skał.

Wraz z rozwojem fizyki skał i stopnia poznania procesów urabiania i rozdrabiania następuje przejście metod obliczeniowych od niższego do wyższego poziomu.

2. NISZCZĄCE METODY BADAŃ

Właściwości wytrzymałościowe skał określa się na szlifowanych próbkach foremnych podczas ich ściskania na prasie wytrzymałościowej. Brak jest jak dotychczas szerokiego zastosowania metod ultradźwiękowych do ich określania.

Wadą dotychczas stosowanych badań niszczących jest duża pracochłonność prac przy wykonywaniu próbek do badań. Występuje duży rozrzut wytrzymałości spowodowany najczęściej nierównomiernym obciążeniem próbki wskutek nierównoległości ściskanych płaszczyzn. Brak jest powtarzalności wyników, a po jednym badaniu jednej właściwości skały próbka jest zniszczona.

Przy określaniu modułu sprężystości podłużnej i liczby Poissona występują dodatkowo czynniki i błędy związane ze stosowaniem czujników lub naklejeniem tensometrów na badaną

próbkę. Czas od pobrania próbki ze złoża do otrzymania wyników z kilku rodzajów badań dochodzi obecnie do kilku miesięcy. Błąd względny określania wytrzymałości może zaś dochodzić do 30%. Współczynnik zmienności wynosi dla [3,1]:

- a) wytrzymałości na ściskanie, uderzenie, twardości i ścieralności od 15 do 30%,
- b) wytrzymałości na rozciąganie od 20 do 45%,
- c) modułu Younga od 15 do 30%, liczby Poissona od 5 do 15%,
- d) w badaniach ultradźwiękowych opartych na module akustycznym od 7 do 20%.

Ostatnio opracowano w Instytucie Górnictwa Politechniki Wrocławskiej ultradźwiękową metodę pozwalającą szybko i tanio określić właściwości wytrzymałościowe i technologiczne skał na podstawie modułu akustycznego.

Metoda ta w ramach współpracy została zastosowana do badań naukowych w Kirgiskiej i Gruzjińskiej Akademii Nauk, a jest szczególnie przydatna do szybkiego określania szeregu właściwości skał na odłamach skał pobranych z przodka górniczego.

3. SPOSÓB ULTRADŹWIĘKOWEGO OKREŚLANIA WŁAŚCIWOŚCI SKAŁ

W procesie urabiania, jak i rozdrabiania skał następuje niszczenie ciągłości skały, wyrażające się zmianą objętości i kształtu rozdrabnianej bryły skalnej. Opór ośrodka przeciwko odkształceniom objętościowym określa wielkość modułu sprężystości podłużnej E , a przeciw odkształceniom postaciowym wielkość modułu sprężystości poprzecznej G . Na ogół procesy urabiania i rozdrabniania skał związane są z dynamicznym działaniem siły, dlatego do charakteryzowania skał w tych procesach należy stosować dynamiczne moduły sprężystości.

Dynamiczne moduły sprężystości mają funkcyjne zależności z właściwościami akustycznymi skał. Na wytrzymałość skał ma wpływ skład mineralny, struktura, tekstura, porowatość i mikroszczelinowatość. Od wyżej wymienionych czynników zależy gęstość pozorną, a także prędkość fal ultradźwiękowych.

Zgodnie z teorią Griffitha zniszczenie spójności ośrodka następuje przez wzrost naprężeń wokół znajdującej się w ośrodku niejednorodności. Gdy porowatość skały zwiększa się, to maleje jej gęstość, a wzrasta ilość por, wokół których powstają mikropełnięcia, które łącząc się w szczeliny prowadzą do zniszczenia spójności ośrodka skalnego. Wytrzymałość skały przy jej

urabianiu zależy zatem od modułów dynamicznych i gęstości pozornej. Nieuwzględnianie tych parametrów w sposób łączny wyjaśnia duże błędy określania wytrzymałości na ściskanie z zależności korelacyjnych opartych tylko na jednym z tych parametrów.

Celem uniknięcia wymienionych niedogodności dobrano grupowy parametr akustyczny uwzględniając trzy zasadnicze parametry, od których zależy wytrzymałość skał i nazwano go modułem akustycznym H. Można go szybko i tanio określać z pomiarów akustycznych jako iloczyn:

$$H = p * C_L * C_T \quad (1)$$

gdzie:

H - moduł akustyczny [MPa],

p - gęstość pozorna [kg · 10³/m³],

C_T, C_L - prędkość fali poprzecznej i podłużnej [m/s].

Z zależności funkcyjnych można go określić również parametrami sprężystości przez oznaczenie dynamicznych E, G, ν . Wówczas wzór na H ma postać:

$$H = [E * G]^{1/2} * \{[(1+\nu)(1-2\nu)/(1-\nu)]\} \quad (2)$$

gdzie:

ν - liczba Poissona.

Zgodnie z hipotezą Columba - Mohra zniszczenie ośrodka następuje przy jednoczesnym działaniu normalnych s i stycznych t naprężeń i jest rezultatem przekroczenia liniowych e i kątowych g deformacji. W czasie jednoosiowego ściskania występują także kątowe deformacje (charakterystyczne formy zniszczenia kostek - X), co świadczy o występowaniu naprężeń stycznych. Rozważając to teoretycznie dla jednoosiowego ściskania można napisać:

$$R_c = f(\sigma_x, \tau_{xy}) \quad (3)$$

ponieważ:

$$\sigma_x = E_0 \epsilon_x \quad \tau_{xy} = G^* \gamma_{xy} \quad (4)$$

a moduły sprężystości funkcyjnie związane są z parametrami akustycznymi, co uwzględniając, otrzymamy:

$$G = b p C_L C_T, \quad b = C_T / C_L \quad (5)$$

$$E = (8b - 8b^3) * C_L C_T p = a p C_L C_T \quad (6)$$

ponieważ $p C_L C_T = H$, otrzymamy:

$$G = bH, \quad E = aH \quad (7)$$

Podstawiając (7) do wzoru (3) otrzymamy:

$$R_e = f_1 (a H_x, b H_{y_{xy}}) \quad (8)$$

Tym sposobem pokazano, że wielkość naprężeń niszczących skałę jest funkcją modułu akustycznego.

W pracy [1] wykazano, że moduł akustyczny ma istotne zależności korelacyjne z wytrzymałością na ściskanie, rozciąganie, ścinanie i uderzenie. Wytrzymałość na ściskanie jest funkcją modułu akustycznego i oblicza się ją z zależności hiperbolicznej (wzór 9). Na podstawie pomiarów wytrzymałości na ściskanie, wykonanych na próbkach foremnych i ich modułu akustycznego, metodą statystycznej analizy korelacyjnej wyznacza się stałe równania, nazwane stałymi złożowymi :

$$R_c = M / (N - p C_L C_T) \quad (9)$$

gdzie:

- R_c - wytrzymałość próbki na ściskanie; MPa,
- p - gęstość pozorna próbki; $10^3, \text{kg/m}^3$,
- C_L - prędkość fali podłużnej; m/s,
- C_T - prędkość fali poprzecznej; m/s,
- M, N - stałe złożowe; 10^9 .

Wytrzymałości skał na ściskanie R_c , rozciąganie R_t , ścinanie R_s określa się z takiej samej zależności hiperbolicznej.

Dla skał plastycznych o $H < 27 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ zależność ta jest następująca:

$$(R_c, R_p, R_t) = M / (H - N) \quad (10)$$

Dla skał kruchych o $H > 27 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ zależność ta ma postać:

$$(R_c, R_p, R_t) = M / (N - H) \quad (11)$$

gdzie:

- M, N - stałe złożowe dla danego złoża i danego rodzaju wytrzymałości,
- H - moduł akustyczny badanej próbki.

Zależności (10) i (11) różnią się między sobą tylko zmianą kolejności odejmowania poszczególnych składników w mianowniku.

Raz wyznaczone stałe złożowe (skalowanie na około 90 próbkach) mogą być stosowane do określenia właściwości skał z danego złoża przez cały okres jego eksploatacji (20-30 lat). Pomiary prędkości fal wykonuje się tylko na próbkach nieforemnych pobranych ze złoża, a otrzymuje ze wzoru (10) lub (11) właściwości wytrzymałościowe odpowiadające próbkom foremnym użytym do skalowania.

Metoda ultradźwiękowa określania właściwości wytrzymałościowych została zastosowana w kopalni węgla kamiennego Wałbrzych do określania wytrzymałości na ściskanie piaskowca oraz wytrzymałości na ściskanie i energochłonności urabiania węgla kamiennego w kopalniach górnośląskich przez KOMAG - Gliwice [4].

4. UPROSZCZONY MODUŁ AKUSTYCZNY W OKREŚLANIU WSKAŹNIKA W_{ET} I WYTRZYMAŁOŚCI

Podstawą do obliczania wskaźnika W_{ET} jest bilans energetyczny sporządzony dla krzywej naprężenie-odkształcenie, otrzymany w czasie obciążenia i odciążenia próbki. Wskaźnik skłonności do tupań jest zdefiniowany jako stosunek energii sprężystej nagromadzonej w próbce do energii straconej w czasie odciążenia. Im większy W_{ET} tym większa skłonność skał do tupań. Określa się go doświadczalnie w specjalistycznym laboratorium przy próbie jednoosiowego ściskania.

Badania przeprowadzono na próbkach dolomitu szarego z kopalni Rudna o smukłości 2. Metodami tradycyjnymi określono wskaźnik tępań W_{ET} , wytrzymałość na ściskanie i statyczny moduł Younga. Mierzone na próbkach wielkości akustyczne to gęstość pozorną i prędkość fali podłużnej.

Dotychczas określano właściwości skał na podstawie wielkości modułu akustycznego. Zależności oparte na tym module dla określenia prędkości fali poprzecznej wymagały przeprowadzania pomiarów w warunkach laboratoryjnych zakładu. Nie mogły być one stosowane do bieżącej kontroli właściwości skał poprzez wykonywanie pomiarów akustycznych na odłamek skalnych na dole kopalni. Związane to było z koniecznością wykonania dwóch równoległych płaszczyzn, uniemożliwiało zastosowanie do pomiarów przenośnego testera materiałów o wadze 2 kg mierzącego czas przejścia fali podłużnej przez odłamek skalny. Dlatego wykonano badania pomiędzy wytrzymałością na ściskanie R_C , wskaźnikiem W_{ET} i statycznym modułem E Younga a uproszczonym modułem akustycznym. Uproszczony moduł akustyczny H_U jest to kwadrat prędkości fali podłużnej pomnożony przez gęstość pozorną.

Stosując H_U , tracimy na dokładności pojedynczego pomiaru, lecz dokładność pomiarów możemy zwiększyć wykonując więcej pomiarów w danym punkcie, np. zamiast 3 wykonując 6 pomiarów. Stosunek prędkości fali poprzecznej do prędkości fali podłużnej dla danego rodzaju skały i materiału jest wielkością stałą, a dla poszczególnych próbek zmienia się w niewielkim zakresie, dlatego powinniśmy otrzymać istotne zależności korelacyjne dla H_U i R_C , W_{ET} , E .

Dla celów ruchowych łatwiej posługiwać się uproszczonym modułem akustycznym H_U . Prędkość fali podłużnej łatwo zmierzyć na odłamku skalnym, ponieważ do przejścia fali przez odłamek skalny nie trzeba wykonywać dwóch gładkich powierzchni, jak tego wymaga fala poprzeczna. W wyniku pomiarów na 56 próbkach dolomitu po odrzuceniu 6 pomiarów otrzymano następującą zależność wskaźnika tępań W_{ET} :

$$W_{ET} = 146,2 / (122,1 - H_U \cdot 10^{-9}), \quad r = 0,952 \quad (12)$$

Wytrzymałość na ściskanie

Zależność wytrzymałości na ściskanie dla pomiarów na 56 próbkach dolomitu po odrzuceniu 4

pomiarów ma postać:

$$R_s = 4065,5 / (127,5 - H_U * 10^{-9}), \quad r = 0,948 \quad (13)$$

Statyczny moduł Younga określony na 56 próbkach dolomitu po odrzuceniu 11 pomiarów ma następującą zależność:

$$E = 2989,7 / (146,5 - H_U * 10^{-9}), \quad r = 0,927 \quad (14)$$

gdzie:

H_U - N / m²; R_C - MPa; E - GPa.

Z przeprowadzonych badań wynika, że wytrzymałość na ściskanie R_C , wskaźnik tępą W_{ET} i statystyczny moduł Younga E mają ściśle korelacyjne zależności z uproszczonym modułem akustycznym H_U , o czym świadczą wysokie i istotne współczynniki korelacji oraz małe odchylenie standardowe.

Określone na próbkach dla danego rodzaju skał i właściwości zależności korelacyjne oparte na uproszczonym module akustycznym mogą być stosowane do ruchowego określenia wytrzymałości na ściskanie, wskaźnika W_{ET} i modułu Younga. Otrzymane zależności są zależnościami parabolicznymi i celem ułatwienia obliczeń można przetransformować je do zależności prostoliniowych.

5. EFEKTY EKONOMICZNE

Pomiary prędkości fali podłużnej i gęstości objętościowej można wykonywać szybko i tanio na odłamkach skalnych w warunkach dołowych zakładów górniczych, a z zależności korelacyjnych równania (12-14) otrzymujemy poszukiwane wielkości W_{ET}, R_C , i E .

Koszt określenia stałych złożowych w zależnościach korelacyjnych (skalowanie) stanowi 4% kosztów dotychczasowych badań niszczących.

Ultradźwiękową metodę określania własności wytrzymałościowych skał na podstawie modułu akustycznego wdrożono w kopalni węgla kamiennego Wałbrzych, ponieważ koszt określenia pierwszego parametru z zależności korelacyjnej w porównaniu z kosztami badań niszczących był 2,85 raza mniejszy.

Koszty określania następnych właściwości fizycznych w stosunku do kosztów badań niszczących były natomiast 8,8 raza mniejsze.

W celu określenia wytrzymałości na ściskanie i mrozoodporności na podstawie modułu akustycznego opracowano i zatwierdzono Normę Zakładową ZN-88/OBRTG-20 i ZN-88/OBRTG-21 dla przedsiębiorstw geologicznych ważną od 14.12.1988 r.

6. WNIOSKI

1. Ultradźwiękowa metoda określania właściwości wytrzymałościowych skał oparta na module akustycznym zgodnie z normą może być stosowana do określania właściwości wytrzymałościowych skał nie z mniejszą niż w badaniach niszczących dokładnością.
2. Wyniki badań wstępnych pozwalają pozytywnie prognozować, że wytrzymałość na ściskanie, moduł Younga i wskaźnik W_{ET} mogą być wyznaczone w warunkach dołowych z zadowalającą dokładnością na podstawie pomiarów prędkości fali podłużnej i gęstości pozornej.

LITERATURA

- [1] Chrzan T., Fizyko-techniczne podstawy i opracowanie metody kompleksowej oceny mechanicznych własności skał dla operatywnego kierowania procesami górnictwymi, Rozpr. hab. Instytut Górnictwa, Wrocław - Moskwa 1989.
- [2] Zakowski M., Zawadzki J., Wytrzymałość materiałów, PWN Warszawa 1983.
- [3] Rzewski W., Nowik G., Osnowy fizyki gornych porod, Nauka Moskwa 1984.

- [4] Kozieł A., Badania prowadzone nad wyznaczeniem wskaźnika energochłonności urabiania w zależności od parametrów fizykochemicznych skał. Szkoła eksploatacji podziemnej, Centrum Podstawowych Problemów Gospodarki Surowcami PAN Kraków 1994.

Recenzent: Prof dr hab. inż. Zenon SZCZEPANIAK

Wpłynęło do Redakcji w maju 1994 r.

Abstract

In the paper an analysis of ultrasonic methods of determination of the mechanical properties of rocks has been presented. In 2.0 the destructive methods determination of the mechanical properties of rocks has been given.

The correlations formula between acoustic and strength properties of rock has been presented in item 3.0.

It has been found that maximum narrowness determining the properties of rock is given by the acoustic modulus method.

The acoustic modulus is the product of : volume weight, velocity of propagation of longitudinal and transversal ultrasonic waves.

The new fast method of estimation of rock mechanical properties based on the acoustic modulus is presented in item 3.0.

The correlations formulas for copper deposit and coefficient in the formulas between the reduction acoustic modulus and strength properties of rocks are presented in item 4.0 . The acoustic modulus is also a qualitative and quantitative index of drillability of rock.

The method, based on the acoustic modulus, enables the obtaining of 8 properties of rocks with the maximum error 20%.

This method is quick and 3 times cheaper than the traditional one. It was implemented in the Wałbrzych coal mine.

The new method, based on the reduction of the acoustic modulus enables the obtaining of compressive strength and bursting liability index W_{ET} . This method is speedy and permits the determination of compressive strength of rocks and coefficient of burst energy W_{ET} in the "Rudna" copper mine.