

# OKREŚLANIE WARTOŚCI PARAMETRÓW JAKOŚCI MASYWU SKALNEGO NA PODSTAWIE POMIARÓW PARAMETRÓW AKUSTYCZNYCH MASYWU ORAZ OPARTYM NA PUNKTACH RATINGOWYCH SPOSOBIE WEDŁUG BIENIAWSKIEGO

## DETERMINATION OF THE VALUES OF THE QUALITY PARAMETERS OF THE ROCK MASSIF BASED ON THE MEASUREMENTS OF THE ACOUSTIC PARAMETERS OF THE MASSIF AND THE BIENIAWSKI RATING POINT METHOD

Tadeusz Chrzan – „Poltegor-Instytut” Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław

(pl) DOI:10.5604/01.3001.0054.3019

*Przedmiotem artykułu jest możliwość określania parametrów jakości masywu skalnego na podstawie punktów ratingowych w sposobie wg Bieniawskiego i porównanie otrzymanych wartości z wynikami pomiarów akustycznych masywu. Wyznaczona i opisana została wartość krytycznego odkształcenia względnego bloczka skalnego, którego wielkość pozwala traktować jego parametry jako parametry masywu skalnego. Iloczyn wartości krytycznego odkształcenia względnego bloczka skalnego oraz jego modułu akustycznego określa wartość wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego. Podano zmodyfikowaną tabelę punktów ratingowych według Bieniawskiego i z kilku zależności korelacyjnych obliczono wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości masywu oraz wytrzymałość na ściskanie laboratoryjnej próbki skalnej.*

**Słowa kluczowe:** masyw skalny, parametry jakości masywu

*The subject of the paper is the possibility of determining parameters of rock quality on the basis of rating points in the Bieniawski method and comparison of the values obtained with the results of acoustic measurements of the massif. The value of the critical relative strain of a rock block is determined and described, the magnitude of which allows its parameters to be treated as rock mass parameters. The product of the critical relative strain of the rock block and its acoustic modulus determines the compressive strength of the rock mass. A modified Bieniawski rating point table is given and the compressive strength, modulus of elasticity of the massif, and the compressive strength of a laboratory rock sample are calculated from several correlation relations.*

**Keywords:** rock mass, rock mass quality parameters

### Wstęp

Wytrzymałość skały na ściskanie jest jednym z głównych parametrów podawanych przy urabianiu skał. Najczęściej wytrzymałość na ściskanie danej skały określana jest w laboratorium na małych próbkach skalnych. Często potrzebna jest próba wytrzymałości na ściskanie urabianego masywu skalnego, co jest fizycznie znacznie trudniej wykonać. Za masyw uważa się blok skalny o wymiarach każdej z trzech krawędzi większych, niż jeden metr [1]. Analizowany bloczek skalny o wymiarach 3,5\*3,8\*18,5 m urabiany jednym otworem ma parametry masywu. Przedmiotem artykułu jest wyznaczenie wartości wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego na podstawie pomiarów akustycznych masywu opartego na zgłoszeniu patentowym [1] oraz porównanie tak określonej wytrzymałości z wytrzymałością obliczoną na podstawie punktów ratingowych sposobie wg Bieniawskiego. Do obliczenia wytrzymałości na ściskanie urabianego masywu skalnego na danym kierunku potrzebna

jest wartość krytycznego odkształcenia względnego bloczka skalnego [2] na tym kierunku. Krytyczne odkształcenie względnego bloczka skalnego służy też do obliczania prędkości drgań i częstotliwości drgań powstających podczas strzelania [3] oraz średnicy otworu strzałowego [4]. Stosowane powszechnie strzelanie milisekundowe polega na odpalaniu kolejnych ładunków MW umieszczonych w kolejnych otworach strzałowych ze zwłoką milisekundową w stosunku do czasu odpalenia poprzedniego otworu strzałowego.

Urabianie skał ładunkami MW umieszczonymi w otworach strzałowych polega na wytworzeniu ciśnienia gazów, które pokonuje wytrzymałość na ściskanie bloczka skalnego urabianego jednym otworem strzałowym. Wykonywanie prac w górnictwie odkrywkowym z użyciem MW prowadzi do powstania drgań parasejsmicznych, które powodują drgania urabianego złoża, a następnie gruntu poza złożem. Drgania te przenoszą się poprzez propagacje fal parasejsmicznych we wszystkich kierunkach i działają szkodliwie na infrastrukturę drogową i mieszkalną. Dlatego podejmuje się kroki mające

na celu zmniejszenie niekorzystnych skutków oddziaływania detonacji materiału wybuchowego MW na otoczenie poprzez stosowanie parametrów zmniejszających wartość krytycznego odkształcenia względnego bloczka skalnego i powstającej prędkości drgań bloczka skalnego. Jednym z ważnych parametrów wytrzymałości na ściskanie masywu jest wartość krytycznego odkształcenia względnego [2] bloczka skalnego podczas strzelania milisekundowego urabianego jednym otworem strzałowym. Autor rozpatruje zmianę ww. parametrów w stosunku do kierunku pomiarów. Kierunek pomiarów X jest prostopadły do linii otworów strzałowych a kierunek Y równoległy. Oznaczenia parametrów z indeksem x i y dotyczą pomiarów i wartości dla kierunku X i Y, a indeks „m” masywu skalnego.

### Obliczenie wartości wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego na podstawie pomiarów akustycznych wykonanych podczas urabiania skał MW

W artykule przedstawiono rozwiązanie umożliwiające obliczenie wartości wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego na podstawie pomiarów akustycznych wykonanych podczas urabiania skał strzelaniem z uwzględnieniem parametrów bloczka skalnego urabianego podczas strzelania milisekundowego. Uwzględnia się przy tym wymiary urabianego bloczka skalnego, jego właściwości akustyczne, wskaźnik wielkości bloczka skalnego, prędkość detonacji materiału wybuchowego [MW] oraz gęstość objętościową MW. Podczas kolejnego przemysłowego urabiania bloku skalnego strzelaniem w polu bliskim, około 300 m od źródła drgań, umieszcza się sejsmograf, który zapisuje pomierzone wartości największych prędkości drgań i odpowiadające im częstotliwości drgań w trzech kierunkach: promieniowym X, stycznym Y, pionowym Z. Pomiar wykonuje się minimum na dwóch punktach pomiarowych położonych najlepiej na kącie kierunkowym od 70° do 90° - to pomiar prędkości drgań, od fali parasejsmicznej podłużnej. Następne dwa punkty pomiarowe położone najlepiej na kącie kierunkowym od 30° do 50° - to pomiar prędkości drgań od fali parasejsmicznej poprzecznej (Rys. 2). Kąt kierunkowy pomiaru  $\alpha$  jest to kąt zawarty między linią otworów strzałowych a linią łączącą punkt pomiarowy ze środkiem urabianego MW bloku skalnego [5,6]. Na podstawie pomierzonych w dwóch punktach pomiarowych częstotliwości drgań  $f_{xmr}$ , dla znanych odległości „r” od źródła drgań położonych na masywie skalnym, dla dwóch niewiadomych  $f_{xmm}$  i  $Cl_{xm}$  z dwóch równań oblicza się [6] prędkość parasejsmicznej fali podłużnej na kierunku X. Dla pola fali sejsmicznej [3] częstotliwość drgań zmienia się po linii sinusoidalnej i dlatego największą częstotliwość drgań masywu [6],  $f_{xmm}$  na kierunku X oblicza się z zależności (1):

$$f_{xmm} = f_{xmr} / [\sin(f_{xmr} * 360 * r / Cl_{xm})] \quad (1)$$

Z podobnego równania oblicza się też prędkość parasejsmicznej fali poprzecznej na kierunku X. Znając wartości gęstości objętościowej masywu skalnego  $\rho_m$  oraz mając obliczone z równania (1) wartości prędkości parasejsmicznej fali podłużnej  $Cl_{xm}$  na kierunku X i wartości prędkości fali poprzecznej  $Ct_{xm}$  na kierunku X w masywie skalnym oblicza się wartość sprężystego modułu akustycznego masywu  $H_{axm}$  na kierunku X. Wartości prędkości fali parasejsmicznej

podłużnej i poprzecznej jak i wartości gęstości objętościowej w bloczku skalnym i masywie skalnym są takie same [3].

Moduł akustyczny masywu  $H_{axm}$  jest to iloczyn wartości gęstości objętościowej masywu „ $\rho_m$ ”, wartości prędkości parasejsmicznej fali podłużnej w masywie skalnym  $Cl_{xm}$  na kierunku X i wartości prędkości parasejsmicznej fali poprzecznej w masywie skalnym  $Ct_{xm}$  na kierunku X, co przedstawia zależność (2):

$$H_{axm} = \rho_m * Cl_{xm} * Ct_{xm} \quad (2)$$

Następnie dokonuje się pomiarów bloczka skalnego, to jest jego wysokości H, długości „a” stanowiącej odległość między otworami strzałowymi i grubości /zabioru/, „z” stanowiącej odległość od powierzchni ściany skalnej urabianej MW do osi wypełnionego MW otworu strzałowego oraz oblicza jego objętość  $V_b$ . Dzieliąc objętość  $V_b$  bloczka skalnego przez standardową objętość  $V_p$  laboratoryjnej próbki skalnej o smukłości wynoszącej 3 i wymiarach 5\*5\*15 cm otrzymuje się wartość, której pierwiastek kwadratowy jest wskaźnikiem wielkości bloczka skalnego  $W_{wbs}$  [7].  $W_{wbs} = [V_b / V_p]^{(1/2)}$ . Następnie z charakterystyki przeznaczonego do strzelania materiału wybuchowego MW pobiera się dane o jego gęstości objętościowej  $\rho_{mw}$  i prędkości jego detonacji  $V_d$  zależnej od średnicy stosowanego otworu strzałowego. Gdy nie mamy danych MW związanych z jego średnicą otworu możemy posłużyć się wykresem umieszczonym w publikacji [4].

Wartość dynamicznego krytycznego odkształcenia względnego bloczka skalnego urabianego jednym otworem strzałowym ze względu na jego duże wymiary 3,45\*3,8\* 18,5 m równa jest krytycznemu odkształceniu [1] względnemu masywu skalnego  $\epsilon_{kxm}$ , na kierunku X i wyznacza się z zależności (3):

$$\epsilon_{kxm} = [V_d^{(2)} * \rho_{MW} * T_{px}] / [O * H_{axm} * W_{wbs}] \quad (3)$$

gdzie:

$V_d$  - prędkość detonacji materiału wybuchowego [MW] w otworze  $\rho_{MW}$  - gęstość objętościowa MW,  $T_{px}$  - współczynnik przenikania energii fali udarowej z jednego ośrodka jak MW do ośrodka skalnego dla kierunku X, O - współczynnik zależny od ciepła właściwego produktów detonacji dla MW saletrzanych ANFO=3,6, dla MW emulsyjnych 4,2 - nieuwzględniony w [7].  $W_{wbs}$  - wskaźnik wielkości bloczka skalnego.  $H_{axm}$  - moduł akustyczny masywu na kierunku X. Wartość dynamicznej wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego  $R_{cxm}$  na kierunku X oblicza się [3,7] z zależności (4):

$$R_{cxm} = \epsilon_{kxm} * H_{axm} \quad (4)$$

Prędkość drgań bloczka skalnego w źródle drgań na kierunku X oblicza się [3] z zależności (5):

$$V_{xb} = \epsilon_{kxm} * Cl_{xm} \quad (5)$$

gdzie:  $V_{xb}$  - prędkość drgań bloczka skalnego na kierunku X [m/s] w źródle drgań,  $\epsilon_{kxm}$  - wartość odkształcenia względnego masywu skalnego na kierunku X,  $Cl_{xm}$  - prędkość fali podłużnej w masywie na kierunku X. Dzięki zastosowaniu opisanego rozwiązania uzyskano możliwość dokładnego

obliczenia krytycznego odkształcenia względnego bloczka skalnego na kierunku X lub Y. Zmieniając parametry bloczka skalnego jak zabiór, odległość między otworami i jego wysokość, od których zależy wartość dynamicznego krytycznego odkształcenia względnego bloczka skalnego, mamy możliwość technicznego oddziaływania na urabiany bloczek skalny. Można tak sterować wielkością prędkości drgań powstających podczas strzelania milisekundowego, aby nie spowodować wzrostu drgań szkodliwych dla obiektów inżynierskich.

### Określanie wartości wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego na podstawie zmodyfikowanej tabeli punktów ratingowych według Bieniawskiego [11]

Tabela 1 powstała dla klasyfikacji masywów skalnych i ich wytrzymałości na potrzeby drażenia tuneli. Autor poprzez jej modyfikacje zastosował ją do określania wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego podczas jego urabiania MW. Na podstawie pięciu parametrów charakteryzujących masyw skalny opisowo według podanej w tabeli sumujemy punkty ratingowe [PR] i stosując podane literaturowe empiryczne zależności obliczamy wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości masywu skalnego oraz wytrzymałość na ściskanie próbek laboratoryjnych. Parametry charakteryzujące masyw skalny i punkty ratingowe [PR] zestawiono w Tabeli 1.

Indeks wytrzymałości punktowej jest indeksem wskaźnikowym, za pomocą którego skała jest klasyfikowana według wytrzymałości. Indeks ten można wykorzystać do oszacowania

Tab. 1. Parametry charakteryzujące masyw skalny i ich punkty ratingowe wg Bieniawskiego [11]

Tab. 1. The quality parameters of the rock massif and their rating points acc to Bieniawski [11]

A. PARAMETRY KLASYFIKACJI I ICH NOTA PUNKTOWA									
Parametr			Zakres wartości						
1	Wytrzymałość nienaruszonego materiału skalnego	Indeks wytrzymałości punktowej Jednoosiowa wytrzymałość na ściskanie próbki skalnej, $\sigma_c$	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1 - 2 Mpa	Poniżej 1 MPa stosuje się tylko test jednoosiowej wytrzymałości		
			> 250 MPa	100+250 MPa	50-100 MPa	25-50 Mpa	5-25 MPa	1-5 Mpa	< 1 MPa
	Nota punktowa	15	12	7	4	2	1	0	
2	Jakość rdzenia wiertniczego RQD		90 % - 100 %	75 % - 90 %d	50 % - 75 %	25% - 50%	< 25 %		
	Nota punktowa		20	17	13	8	3		
3	Odstęp spękań		> 2 m	0,6 m - 2,0 m	0,2 m - 0,6 m	0,06 m - 0,2 m	< 0,06 m		
	Nota punktowa		20	15	10	8	5		
4	Charakterystyka nieciągłości		Bardzo szorstkie ścianki, nieciągłe, brak podzielnosci, niezwiertzałe	Nierówne, rozwarcie do 1 mm, lekko zwiertzałe	Nierówne, podzielnosc do 1 mm, mocno zwiertzałe	Ciągłe, gładkie ścianki szczelin lub wypełnienie do 5 mm lub rozwarcie 1-5 mm	Miękkie wypełnienie szczeliny o grubości > 5 mm lub ciągłe rozwarcie > 5 mm		
	Nota punktowa		30	25	20	10	0		
5	Zawodnienie	Dopływ na 10 m wyrobiska	brak	< 10 l/min	10 - 25 l/min	25 - 125 l/min	> 125 l/min		
		Ciśnienie porowe / naprężenia głównego	0	<0,1	0,1-0,2	0,2 - 0,5	>0,5		
		Warunki ogólne	Zupełnie suche - suche otwory strzałowe	Wilgotno - woda w otworach strzałowych do 0,3 wysokości otworu	Mokro - woda w otworach strzałowych do 0,6 wysokości otworu	Wykroplenia - woda w otworach strzałowych. do 0,9 wysokości otworu	Dopływ stały - woda w całych tworach strzałowych		
	Nota punktowa		15	10	7	4	0		

innych cech nienaruszonych skał, z którymi jest skorelowany, takich jak wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie i rozciąganie. Indeks wytrzymałości punktowej jest około 25 razy mniejszy od wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie.

Ocenę jakości masywu skalnego wykonuje się na podstawie analizy rdzenia wiertniczego. Wskaźnik podzielności rdzenia wiertniczego RQD /Rock Quality Designation/ jest określany jako:

$$RQD = \sum [L_k/L] * 100 [\%] \quad (6)$$

gdzie: L<sub>k</sub> - suma długości kawałków rdzenia większych, niż 10 cm. L - długość wywierconego otworu. International Society of Rock Mechanics rekomenduje wykonywanie otworu o średnicy rdzenia 54,7 mm. Jeżeli nie mamy możliwości wykonania otworu, to RQD można wyznaczyć na podstawie Rysunku 1, lub obliczyć [9] z zależności (7 lub 8):

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \quad (7)$$

$$RQD = 100^{[-0,1B]} * (0,1B + 1) \quad (8)$$

gdzie: J<sub>v</sub> - ilość szczelin na 1 m<sup>3</sup> lub suma ilości szczelin na 1 metrze na kierunku X,Y,Z. B - ilość szczelin na 1 metrze.

Za pomocą znanej techniki, na przykład zdjęcia urabianego masywu skalnego i programu komputerowego np. Bentley Microstation, który rysuje krzywą składu ziarnowego brył w tym masywie określa się średni wymiar bryły masywu. Wymiar średniej bryły masywu odpowiada wymiarowi bryły, która stanowi 50% wartości krzywej składu ziarnowego. Jest to także średnia wartość odstepu spękań. Moduł sprężystości masywu E<sub>m</sub> według [11] obliczamy z zależności (9,10,11):

$$\text{Dla } PR > 60 \quad E_m = [2 * PR - 100] \text{ [GPa]} \quad (9)$$

$$\text{Dla } PR < 60: \quad E_m = 10^{[(PR - 10)/40]} \text{ [GPa]} \quad (10)$$

Moduł sprężystości masywu E<sub>m</sub> według [9] dla całego zakresu PR oblicza się z zależności (11):

$$E_m = 1,6 R_{cm}^{[0,75]} \text{ [GPa]} \quad (11)$$

Dla całego zakresu PR według [11] z zależności (12) oblicza się E<sub>m</sub>:

$$E_m = E_c * e^{[(PR - 100)/36]} \text{ [GPa]} \quad (12)$$

Z publikacji według [11] i zależności (13) oblicza się E<sub>m</sub>:

$$E_m = [E_c/R_c] * R_{cm} * e^{[(PR - 100)/22]} \text{ [GPa]} \quad (13)$$

$$\text{lub } E_m = E_c * [R_{cm}/R_c]^{(2/3)} \text{ GPa} \quad (14)$$

Wytrzymałość na ściskanie masywu według [11] oblicza się z zależności (15):

$$R_{cm} = R_c * [e^{[(PR - 100)/24]}] \quad (15)$$

Według [9] z zależności (16) oblicza się:

$$R_{cm} = R_c * e^{[(PR - 100)/18,75]} \text{ [MPa]} \quad (16)$$

$$\text{lub } R_{cm} = 0,5 * e^{[0,06PR]} \text{ [MPa]},$$

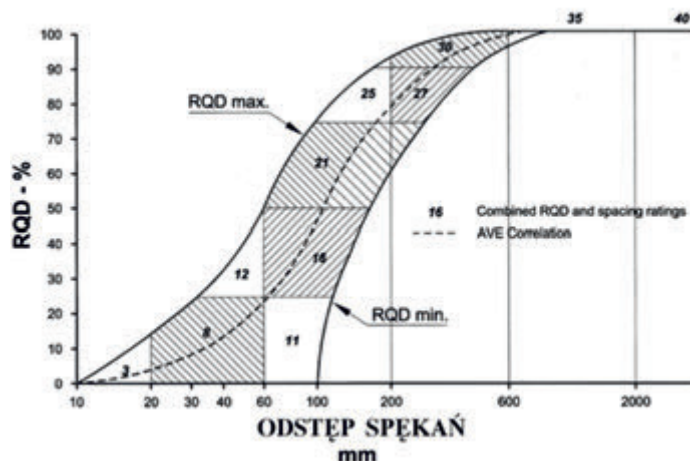
$$\text{lub } R_{cm} = R_c * 0,5 * [(PR - 15)/85] \text{ MPa} \quad (17)$$

Według [6,7] moduł sprężystości masywu na kierunku X prostopadłym do linii otworów strzałowych E<sub>mx</sub>=H<sub>ax</sub>\*E<sub>mx</sub>, na kierunku równoległym E<sub>my</sub>=H<sub>ay</sub>\*E<sub>my</sub>. Wytrzymałość na ściskanie masywu R<sub>cm</sub> według [3], na kierunku X, R<sub>cmx</sub>=E<sub>mx</sub>\*E<sub>kmx</sub>, a na kierunku Y, R<sub>cmY</sub>=E<sub>my</sub>\*E<sub>kmy</sub>.

Według [9] odkształcenie krytyczne masywu E<sub>km</sub>=R<sub>cm</sub>/E<sub>m</sub> i można je obliczyć z zależności E<sub>km</sub>=0,79 E<sub>kp</sub>, lub E<sub>km</sub>=0,52E<sub>kp</sub>^{(0,72)}, lub E<sub>km</sub>=E<sub>kp</sub>, gdzie R<sub>c</sub> - wytrzymałość na ściskanie próbek laboratoryjnych. R<sub>cm</sub> - wytrzymałość na ściskanie masywu, E<sub>c</sub> - moduł sprężystości próbek laboratoryjnych, PR - punkty rankingowe masywu, ocenionego na podstawie Tabeli 1. H<sub>ax</sub> - akustyczny moduł sprężystości na kierunku X czyli iloczyn gęstości objętościowej prędkości sejsmicznej fali podłużnej i poprzecznej na kierunku X. E<sub>kmx</sub> - odkształcenie krytyczne masywu na kierunku X. Indeks y dotyczy kierunku Y. E<sub>kp</sub> - odkształcenie krytyczne próbki laboratoryjnej. Wadą zależności określanych na podstawie punktów ratingowych jest brak ich ukierunkowania, co powoduje duże różnice w obliczanych wartościach na przykład z dwóch zależności. Obliczane wartości próbek dotyczą parametrów określanych przy małej prędkości obciążenia na próbkach niespękanych ściskanych na prasie hydraulicznej.

**Przykład realizacji sposobu określania wartości wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego i laboratoryjnej próbki skalnej na podstawie punktów ratingowych w sposobie wg Bieniawskiego [11]**

Ocena jakości masywu skalnego w złożu bazaltu. Z krzywej składu ziarnowego brył w masywie skalnym urabianym MW, dla 50%-procentowej zawartości brył odczytano, że wymiar bryły D<sub>m</sub> wynosi D<sub>m</sub>=710 mm. Przyjęto, że jest to wymiar średniej bryły w masywie i średnia wartość odstepu spękań.



Rys. 1. Zależność RQD od wielkości rozstawu szczelin w masywie [11]  
Fig. 1. Dependence of RQD on the size of crack spacing in the massif [11]



Ilość spękań przypadających na  $1\text{m}^3$  masywu  $J_v$  oceniono na  $J_v=6$ , ilość szczelin na 1 metr linii pomiarowej  $B$  wynosi  $B=2$ . Zgodnie z Tabelą 1, dla złoża bazaltu przyjęto:

**Poz. 1.** Wytrzymałość na ściskanie próbek laboratoryjnych  $R_c=160$  MPa. Wartość ta zawiera się w przedziale (100-200) MPa, co odpowiada 12 PR.

**Poz. 2.** Jakość rdzenia wiertniczego RQD, dla średniej bryły w górotworze  $D_m=710$  mm przyjęto z Rysunku 1,  $RQD=98$  PR. RQD obliczono też z zależności (7,8)  $RQD=115-3.3 J_v$ ;  $RQD=115-20=95$ .  $RQD=100 \cdot e^{(-0,1B)} \cdot [(0,1B+1)]$ ,  $RQD=100 \cdot [2,72^{(-0,2)}] \cdot [(1,2)]=100 \cdot 0,82 \cdot 1,2=98$ . Obliczone wartości znajdują się w przedziale (90-100)RQD, co odpowiada 20 PR punktom ratingowym [PR].

**Poz. 3.** Odstęp spękań wynosi 0,71 m i jest w przedziale (0,6-2,0) m, co odpowiada 15 PR.

**Poz. 4.** Charakterystyka nieciągłości, szczeliny o szerokości od (1-5) mm, co odpowiada 10 PR.

**Poz. 5.** Zawodnienie, otwory strzałowe suche, co odpowiada 15 PR. Suma  $\Sigma PR=72$  PR.

### Obliczanie parametrów masywu

Moduł sprężystości masywu  $E_m$  według [11] obliczono z zależności (9).

Dla  $PR > 60$ ,  $E_m=[2 \cdot PR]-100$  [GPa],  $E_m=[2 \cdot 72]-100=44$  [GPa].

Według [9] z zależności (15) obliczono  $R_{cm}=0,5 \cdot e^{[0,06PR]}$  [MPa].

$R_{cm}=0,5 \cdot 2,72^{(0,06 \cdot 72)}=0,5 \cdot 2,72^{(4,32)}=0,5 \cdot 75,4=37,7$  [MPa].

Stąd, według [9] z zależności (11):  $E_m=1,6 R_{cm}^{[0,75]}$  [GPa].

obliczono  $E_m=1,6 \cdot 37,7^{(0,75)}=1,6 \cdot 15,2=24,3$  [GPa].

Według [9] mając wartość  $R_{cm}$  obliczono  $R_c$  z zależności (17):  $R_{cm}=R_c \cdot 0,5 \cdot [(PR-15)/85]$  [MPa] stąd  $R_c=2 \cdot R_{cm} \cdot [85/(PR-15)]=2 \cdot 37,7 \cdot [85/(72-15)]=75,4 \cdot 1,49=112,4$  [MPa].

Według [9] z drugiej zależności (16) też obliczono  $R_c$ ,  $R_{cm}=R_c \cdot e^{[(PR-100)/18,75]}$  stąd  $R_c=R_{cm}/e^{[(PR-100)/18,75]}=37,7/[2,72^{(-1,49)}]=37,7/0,225=167,5$  [MPa].

Według [11] z zależności (15) obliczono  $R_{cm}$ ,  $R_{cm}=R_c \cdot e^{[(PR-100)/24]}$ .

Dla  $R_c=112,4$  [MPa],  $R_{cm}=112,4 \cdot 2,72^{(-1,17)}=112,4 \cdot 0,31=34,8$  [MPa].

Dla  $R_c=167,5$  [MPa],  $R_{cm}=167,5 \cdot 2,72^{(-1,17)}=52$  [MPa].

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że moduł sprężystości masywu  $E_m$  złoża bazaltowego zawiera się w przedziale 24,3-44 [GPa], a wytrzymałość na ściskanie próbek laboratoryjnych  $R_c$  zawiera się w przedziale 112,4-167,5 [MPa]. Do obliczeń PR przyjęto właściwy przedział wytrzymałości na ściskanie próbek laboratoryjnych /100-200/ [MPa]. Wytrzymałość na ściskanie masywu  $R_{cm}$  zawiera się w przedziale 34,8 - 52 [MPa]. Ten rozrzut obliczonych wartości jest prawdopodobnie wynikiem nieuwzględniania kierunków pomiarów i różnego rodzaju złóż czego nie ma w sposobie obliczeń opartych na wartościach akustycznych dla złoża bazaltu. Wielkość odkształcenia krytycznego  $\epsilon_{kms}$  dla masywu obliczono jako stosunek wartości wytrzymałości na ściskanie masywu  $R_{cms}$  do wartości modułu sprężystości masywu  $E_m$ . Przedział odkształcenia krytycznego  $\epsilon_{km}$  na

podstawie punktów ratingowych dla masywu wynosi  $\epsilon_{km}=0,52/24,3$  do  $34,8/44$ , co odpowiada od 0,002 do 0,0008 i jest kilka razy większe, niż wartość odkształcenia krytycznego  $\epsilon_{kxm}$  obliczonego dla dynamicznego urabiania skał MW dla spękanego masywu na kierunku X. Wynika stąd wniosek, że obliczony na podstawie punktów ratingowych przedział wartości parametrów masywu dotyczy parametrów obliczonych na podstawie pomiarów statycznych. Potwierdza to, że przyjęto właściwe założenia do obliczania parametrów spękanego masywu na podstawie dynamicznych pomiarów akustycznych.

### Przykład realizacji sposobu określania wartości wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego na podstawie pomiarów akustycznych wykonanych podczas urabiania skał strzelaniem milisekundowym

Strzelanie milisekundowe polega na urabianiu ze zwłoką milisekundową jednym otworem strzałowym kolejnego jednego bloczka skały. W podanym przykładzie realizacji stosuje się strzelanie milisekundowe w złożu bazaltu podczas urabiania bloków skalnych zawierających po kilka bloczków skalnych. Wibracje wywołane wybuchem monitorowano za pomocą sejsmografu w wyznaczonych punktach pomiarowych. Na sejsmografie zapisano wartości pomiarów prędkości drgań w trzech kierunkach: promieniowym X, pionowym Z i stycznym Y. Sejsmograf zarejestrował również częstotliwość drgań dla: szczytowej prędkości drgań cząstek ośrodka. Mapa złoża [10] pokazuje istniejące domy oraz miejsce urabiania skał, linię otworów strzałowych, punkty pomiarowe w terenie chronionych domów. Z mapy złoża z przodu urabianego bloku skalnego na złożu bazaltu, zmierzono kąty kierunkowe  $\alpha$  kolejnych punktów pomiarowych [5,6,7]. Wyniki pomiarów szczytowych poziomych radialnych prędkości  $V_x$  drgań w warunkach przemysłowych odstrzałów przy eksploatacji górniczej złoża bazaltu dla różnych wartości kątów kierunkowych zestawiono w Tabeli 2 i przedstawiono na Rysunku 2. Prędkość szczytowa drgań cząstek ośrodka odpowiada za rodzaj uszkodzeń budynków, w dużej mierze zależy ona od ładunku maksymalnego na jedno opóźnienie milisekundowe, odległości pomiędzy źródłem drgań, a punktem pomiarowym oraz od właściwości fizycznych MW i wydobywanej skały [3].

Tab. 2. Pomiary wartości drgań podczas urabiania na złożu bazaltu [10]

Tab. 2. Measurements of vibration values during mining on a basalt deposit [10]

Nr punktu pomiarów	$f_{xm}$ Hz	r m	$\alpha^\circ$ kąt kierunkowy pomiaru	Rodzaj fali
1	2	3	4	5
499	L-9,7	266	67	L
473	L-5,8	252	86	L
133	T-13,5	362	29	T
465	T-13,7	302	49	T

Objaśnienia do Tabeli 2: poz. 1 - nr punktu pomiarowego; poz. 2 -  $f_{xm}$  - częstotliwość drgań, odpowiadająca największej prędkości drgań masywu dla fali podłużnej L i poprzecznej T; poz. 3 - r - odległość punktu pomiarowego na masywie od źródła drgań, [m]; poz. 4,  $\alpha$ -kąt kierunkowy punktu pomiarowego odczytany z mapy złoża i pomierzony kątomierzem, [°]; poz. 5 - rodzaj fali parasejsmicznej określony na podstawie Rysunku 2; L - podłużna, T - poprzeczna.

### Obliczenia prędkości fali podłużnej i jej największej częstotliwości na kierunku X w masywie

Obliczono  $Cl_{xm}$  na kierunku X w masywie z równania (1). Z pozycji 473 i 499 Tabeli 2 obliczono dla pomierzonej na masywie w odległości od źródła drgań  $r = 252$  m i częstotliwości  $fL_{xm}=5,8$  Hz największą częstotliwość masywu na kierunku X,  $fl_{xmm}$ ,  $fl_{xmm}=9,98$  Hz, a prędkość fali podłużnej  $Cl_{xm}=3641$  m/s. Szczegółowy sposób obliczeń podano w [5,6,7].

### Obliczenia prędkości fali poprzecznej i jej największej częstotliwości na kierunku X w masywie

Obliczono  $Ct_{xm}$  na kierunku X w masywie z równania (1). Z pozycji 133 i 465 Tabela 1 obliczono dla pomierzonej na masywie w odległości od źródła drgań  $r = 302$  m i częstotliwości  $ft_{xm}=13,7$  Hz największą częstotliwość drgań masywu dla fali poprzecznej na kierunku X,  $ft_{xmm}$ ,  $ft_{xmm}=22,4$  Hz, a  $Ct_{xm}=2578$  m/s. Szczegółowy sposób obliczeń podano w [5,6,7].

### Obliczanie wartości akustycznego modułu sprężystości i wskaźnika wielkości bloczka skalnego

Mając powyższe wartości oblicza się wartość akustycznego modułu sprężystości masywu na kierunku X,  $H_{axm}$  [4,7] według zależności:  $H_{axm}=\rho_m*Cl_{xm}*Ct_{xm}$ . W niniejszym przykładzie wykonania

$H_{axm}=3,0 * 1000*3641*2578=28,15*10^9=28,15$  [GPa]. Następnie dokonuje się pomiarów bloczka skalnego o długości otworów strzałowych H, gdzie  $H=19,5$  m, odległość między otworami strzałowymi - a, gdzie  $a=3,8$  m i grubości z/za-biór/  $z=3,5$  m. Po czym oblicza się objętość bloczka skalnego  $V_b$ , gdzie  $V_b=259,35$  m<sup>3</sup>. Kolejno oblicza się wskaźnik wielkości bloczka skalnego  $W_{wbs}$ , który stanowi pierwiastek kwadratowy ze stosunku objętości  $V_b$  bloczka skalnego do objętości  $V_p$  standardowej laboratoryjnej próbki skalnej.  $W_{wbs}=[V_b/V_p]^{(1/2)}$ . Standardową objętość  $V_p$  ściskanej laboratoryjnej próbki skalnej obliczono dla wyciętego z odłamka skalnego prostopadłaścianu o smukłości próbki  $Sp$  wynoszącej  $Sp= 3$  i wymiarach

$5*5*15$  cm, stąd  $V_p=375$  cm<sup>3</sup>. Wskaźnik wielkości bloczka skalnego wyniósł 832. Szczegółowe obliczenia podano w [4,5,6,7].

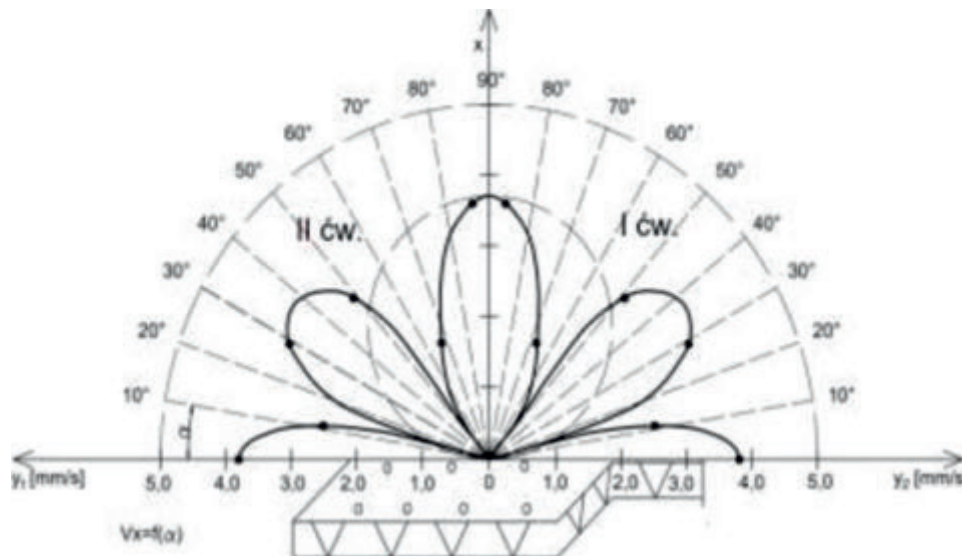
Z Rysunku 2 wynika, że oś główna elipsoidy prędkości drgań od fali podłużnej, to kąt kierunkowy  $\alpha=90^\circ$ , oś główna elipsoidy prędkości drgań od fali poprzecznej, to kąt kierunkowy  $\alpha=38^\circ$ , oś główna elipsoidy prędkości drgań od fali powierzchniowej, to kąt kierunkowy  $\alpha=0^\circ$ .

### Zestawienie pomierzonych i obliczonych parametrów bloczka skalnego urabianego jednym otworem strzałowym jako parametrów masywu skalnego

D - średnica otworu,  $D=102$  mm. Materiał wybuchowy emulsyjny, [MW];  $V_t$  - prędkość detonacji dla średnicy  $D=102$  mm - 4 cale,  $V_t=4850$  m/s,  $\rho_{mw}$  - gęstość objętościowa MW,  $1,2 * 1000$  kg/m<sup>3</sup>.  $Cl_{xm}$  - prędkość fali podłużnej w masywie na kierunku X,  $Cl_{xm}=3641$  m/s, na kierunku Y,  $Ct_{ym}=3161$  m/s.  $Ct_{xm}$  - prędkość fali poprzecznej w masywie skalnym na kierunku X,  $Ct_{xm}=2578$  m/s, na kierunku Y,  $Ct_{ym}=2839$  m/s,  $\rho_m$  - gęstość objętościowa masywu skalnego,  $\rho_s=2,8 * 1000$  [kg/m<sup>3</sup>],  $Z_1$  - impedancja akustyczna masywu,  $Z_1x=\rho_m * Cl_{xm}=10,2*1000$  000 [kg/(m<sup>2</sup>s)],  $Z_1y=2,8*3161=8,7*1000$ [kg/(m<sup>2</sup>s)],  $Z_2$  - impedancja akustyczna MW,  $Z_1=\rho_{mw} * V_t=5,8*1000$  000[kg/(m<sup>2</sup>s)],  $H_{axm}$  - moduł akustyczny masywu na kierunku X,  $H_{axm}=26,3$  [GPa], a na kierunku Y,  $H_{ay}=25,13$  [Gpa],  $U_{bl}$  - objętość jednego bloczka,  $U_{bl}=a*H*z=3,8*19,5*3,5= 259,35$ m<sup>3</sup>,  $W_{wBS}$  - wskaźnik wielkości urabianego bloczka skalnego w stosunku do objętości standardowej próbki laboratoryjnej,  $W_{wbs} =0,832*1000$  [-]= 832.  $T_p$  - współczynnik przenikania energii fali z jednego ośrodka ( $Z_1$ ) MW do drugiego czyli masywu skalnego ( $Z_2$ ), dla kierunku X [4].  $T_{px}=1-R$ , stąd nowa wartość;  $T_{px}=0,95$ , [-],  $T_{py}=0,96$ .

### Obliczenie wartości dynamicznego krytycznego odkształcenia względnego masywu skalnego oraz dynamicznej wartości wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego

Na podstawie powyższych danych wyznaczono wartość dynamicznego krytycznego odkształcenia względnego masywu



Rys. 2. Charakterystyka kierunkowa poziomej składowej radialnej parasejsmicznej prędkości  $V_x$  drgań w funkcji kąta kierunkowego „ $\alpha$ ”, dla złoża bazaltu.

Kąt  $\alpha=60^\circ-90^\circ$ -fala podłużna, kąt  $\alpha=20^\circ-50^\circ$ -fala poprzeczna, kąt  $\alpha=0^\circ-19^\circ$ -fala powierzchniowa (opracowanie własne)

Fig. 2. Directional characteristics of the horizontal radial component of the seismic velocity  $V_x$  as a function of the directional angle „ $\alpha$ ”, for a basalt deposit.

Angle  $\alpha=60^\circ-90^\circ$ -longitudinal wave, Angle  $\alpha=20^\circ-50^\circ$ -transverse wave, angle  $\alpha=0^\circ-19^\circ$ -surface wave (own preparation)

skalnego  $\epsilon_{kxm}$  na kierunku X [7], którą oblicza się z zależności (18):

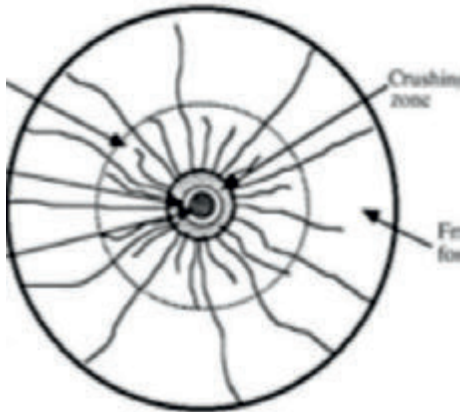
$$\epsilon_{kxm} = [Vd^2 \cdot \rho MW \cdot T_{px}] / [O \cdot H_{axm} \cdot W_{wBS}] \quad (18)$$

gdzie: O - współczynnik zależny od ciepła właściwego produktów detonacji dla MW saletrzanych ANFO=3,6 dla MW emulsyjnych 4,2 - nieuwzględniony w publikacji [7]  $\epsilon_{kxm} = [4850^2 \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot 0,95] / [4,2 \cdot (26,3 \cdot 10^9) \cdot (832)] = [26,8 \cdot 10^9] / [91,9 \cdot 10^{12}] = 0,000292$ .

Podobnie dla kierunku Y oblicza się  $\epsilon_{kym}$ :  $\epsilon_{kym} = [4850^2 \cdot 1,2 \cdot 1000 \cdot 0,96] / [4,2 \cdot (25,13 \cdot 10^9) \cdot (832)] = [27,1 \cdot 10^9] / [87,7 \cdot 10^{12}] = 0,00031$ .

### Obliczenie wartości dynamicznej wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego

Wartość dynamicznej wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego  $R_{cxm}$  na kierunku X oblicza się z zależności  $R_{cxm} = \epsilon_{kxm} \cdot H_{axm} = 0,000292 \cdot 26,3 \cdot 10^9 = 7,7$  [MPa]. Dla kierunku Y,  $R_{cym} = \epsilon_{kym} \cdot H_{aym} = 0,00031 \cdot 25,13 \cdot 10^9 = 7,8$  [MPa]. Wartość wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego na kierunku X –  $R_{cxm}$  i na kierunku Y –  $R_{cym}$  jest od



Rys. 3. Przedstawia powstawanie spękań w czasie detonacji MW w bloku skalnym, co wyjaśnia około 7-krotnie mniejsze, niż w próbkach ścisanych na prasie wartości krytycznego odkształcenia [3]

Fig. 3. Shows the formation of cracks during MW detonation in a rock block, which explains the approximately 7 times lower critical strain values than in press-compressed specimens [3]

4,5 do 6,7 poniżej przedziału od 34,8-52 [MPa] obliczonym z zależności empirycznych opartych na punktach ratingowych według Bieniawskiego [11]. Błoczek skalny jest podzielony szczelinami a dodatkowo powstające wskutek wybuchu ładunku MW spękania wokół otworu strzałowego uzasadniają jego mniejszą wytrzymałość na ściskanie, niż podczas ściskania próbki bez spękań na prasie (Rys. 3).

Natomiast moduły dynamiczne masywu  $H_{axm} = 26,3$  [GPa] na kierunku X,  $H_{aym} = 25,13$  [GPa] na kierunku Y, znajdują się w przedziale  $E_{cm}$  od 24,3 do 44 [GPa] obliczonym z dwóch zależności empirycznych opartych na punktach ratingowych. Z zależności (5)  $V_{xb} = \epsilon_{kxm} \cdot CL_{xm}$  można obliczyć prędkość drgań bloczka skalnego, gdzie  $V_{xb}$  - prędkość drgań bloczka skalnego na kierunku X [m/s] w źródle drgań, wyznaczona na podstawie iloczynu wartości dynamicznego krytycznego odkształcenia względnego masywu skalnego  $\epsilon_{kxm}$  na kierunku X i prędkości fali podłużnej  $CL_{xm}$  na kierunku X obliczonej z pomiarów dla różnych odległości „r” na masywie złoża. Prędkość drgań bloczka skalnego, źródła drgań jest równa prędkości drgań bloku

skalnego (3), dla niniejszego przykładu wynosi na kierunku X  $V_{xm} = CL_{xm} \cdot \epsilon_{kxm} = 3641 \cdot 0,000292 = 1,06$  [m/s], a na kierunku Y,  $V_{ym} = CL_{ym} \cdot \epsilon_{kym} = 3161 \cdot 0,00031 = 0,98$  m/s i jest wystarczająca do spowodowania spękania urabianej MW skały i utworzenia usypu urobku. Otrzymane wartości moduły dynamicznego masywu obliczone z pomiarów akustycznych na kierunku X i Y potwierdzają, że znajdują się w przedziale obliczonych na podstawie punktów ratingowych wartości moduły sprężystości masywu. Wyniki obliczeń potwierdzają, że przyjęto właściwe założenia do obliczania parametrów masywu na podstawie pomiarów akustycznych. Zmieniając wymiary urabianego bloczka skalnego mamy wpływ na wartość dynamicznego krytycznego odkształcenia względnego bloczka skalnego, a następnie na wytrzymałość na ściskanie masywu skalnego, prędkość drgań i częstotliwość drgań bloczka skalnego, tak aby jej wartość nie była szkodliwa dla chronionych obiektów inżynierskich.

### Omówienie i wnioski

Na podanych przykładach opisano zgłoszone do opatentowania sposoby obliczania wskaźnika wielkości urabianego bloczka skalnego, wartości dynamicznego krytycznego odkształcenia względnego bloczka skalnego  $\epsilon_{kxm}$  na kierunku X i  $\epsilon_{kym}$  na kierunku Y, prędkości drgań bloczka skalnego na kierunku X i Y. Wartość wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego na kierunku X –  $R_{cxm}$  i na kierunku Y –  $R_{cym}$  jest od 4,5 do 6,7 razy mniejsza, niż obliczony z zależności empirycznych opartych na punktach ratingowych według Bieniawskiego [11] przedział. Natomiast dynamiczne moduły sprężystości masywu  $H_{axm}$  na kierunku X i  $H_{aym}$  na kierunku Y, znajdują się w przedziale modułów sprężystości masywu obliczonym z zależności empirycznych opartych na punktach ratingowych. Otrzymane wartości parametrów jakości masywu potwierdzają, że obliczone na podstawie punktów ratingowych przedziały wartości parametrów masywu są bardzo szerokie. Tak duże przedziały obliczonych wartości są prawdopodobnie wynikiem nieuwzględniania kierunków pomiarów i dotyczą różnych rodzajów skał czego nie ma w przykładowym sposobie obliczeń opartych na wartościach akustycznych. Otrzymane wyniki potwierdzają, że przyjęto właściwe założenia do obliczania parametrów masywu na podstawie pomiarów akustycznych. Z przeprowadzonych na rzeczywistym złożu pomiarach wynika, że dla złoża bazaltu średnie parametry masywu, jak moduły sprężystości określone na podstawie punktów ratingowych, mogą być podstawiane dla zależności określonych na podstawie pomiarów akustycznych masywu.

1. Zmieniając wymiary urabianego bloczka skalnego czyli wielkość zabioru i odległość między otworami i długość otworów mamy wpływ na wartość dynamicznego krytycznego odkształcenia względnego bloczka skalnego, a następnie na wytrzymałość na ściskanie masywu skalnego, prędkość i częstotliwość drgań bloku skalnego, tak aby jej wartość nie była szkodliwa dla chronionych obiektów inżynierskich.

2. Obliczone na podstawie pomiarów akustycznych parametry moduły sprężystości masywu na kierunku X i Y znajdują się w przedziałach parametrów jakości masywu określonych na podstawie punktów ratingowych, co umożliwi ich wzajemne stosowanie w zależnościach obliczeniowych.

3. Podane przykłady obliczeń dla kierunku X można zastosować dla kierunku Y.



## Literatura

- [1] Chrzan T., *Sposób wyznaczania dynamicznej wartości wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego urabianego materiałem wybuchowym*. Nr zgłosz. pat..P.443680. Data zgłoszenia 03.02.2023
- [2] Chrzan T., *Sposób wyznaczania wartości dynamicznego krytycznego odkształcenia względnego bloku skalnego podczas strzelania milisekundowego*. Nr zgłosz.pat.P.443678. Data zgł. 03.02.2023
- [3] Chrzan T., *Akustyka inżynierska w ochronie środowiska przy urabianiu surowców skalnych materiałem wybuchowym*. Wyd. Poltegor Instytut IGO, Wrocław, 2021
- [4] Chrzan T., *Obliczenie optymalnej średnicy otworu strzałowego z uwzględnieniem właściwości wytrzymałościowych i akustycznych urabianej skały oraz energii zastosowanego materiału wybuchowego*. *Górnictwo Odkrywkowe* nr 1/2023
- [5] Chrzan T., *Identyfikacja kołowego rozkładu poziomej radialnej wektora prędkości drgań gruntu przy inicjowaniu ładunków materiałów wybuchowych o różnej masie*. *Górn. Odkrywkowe* nr 1/2023
- [6] Chrzan T., *Określanie maksymalnej poziomej radialnej częstotliwości drgań w złożu, spowodowanej parasejsmiczną poziomą falą radialną w polu bliskim podczas urabiania bloku skalnego strzelaniem*. *Górnictwo Odkrywkowe* nr 1/2023
- [7] Chrzan T., *Określanie wartości wytrzymałości na ściskanie masywu skalnego na podstawie pomiarów wykonanych podczas urabiania skał strzelaniem*. *Górnictwo Odkrywkowe* nr 3/2023
- [8] *Sposób wyznaczania wartości wskaźnika wielkości bloku skalnego*. Nr zgłoszenia patentowego P.443679. Data zgłoszenia 03.02.2023
- [9] Li Jianping, Villaescusa Ernesto, *Determination of rock mass compressive strength using critical strain theory*. June 2005. Conference: Alaska Rocks 2005, The 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)At: Anchorage, Alaska
- [10] *Opracowanie promienia strefy bezpiecznej względem drgań parasejsmicznych dla złoża bazaltu*. Poltegor Instytut IGO, Wrocław, 2015
- [11] Bieniawski Zdzisław T., Cała Marek., Małkowski Piotr, *Błędy w stosowaniu klasyfikacji masywów skalnych - fakty i mity*. Część 1 - *Budownictwo górnicze i tunelowe* 2/2011, część 2 nr 3/2011

