

WYTYCZNE WYBORU EFEKTYWNYCH UKŁADÓW WYDOBYWCZYCH DO PRODUKCJI KRUSZYW ŁAMANYCH

GUIDELINES FOR SELECTION OF EFFICIENT EXTRACTION SYSTEMS TO THE PRODUCTION OF CRUSHED AGGREGATES

Lukasz Machniak, Wiesław Kozioł, Adrian Borcz - AGH w Krakowie, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

W artykule przedstawiono problem eksploatacji zwięzłych surowców skalnych metodami mechanicznego urabiania, jako alternatywy dla urabiania materiałami wybuchowymi. Zaprezentowano algorytm doboru odpowiedniej metody urabiania mechanicznego, uwzględniający szereg charakterystycznych parametrów fizyko-mechanicznych, który stanowi podstawę klasyfikacji i wyboru odpowiednich sposobów urabiania. Zaznaczono również jaki wpływ mają wybrane sposoby mechanicznego urabiania na otoczenie.

Słowa kluczowe: górnictwo odkrywkowe, trudno urabialność, urabianie mechaniczne

This paper presents the problem of exploitation of hard to mine rock materials with mechanical excavation methods, as an alternative to explosives, or in cases where their use in urban areas may be limited due to their adverse impact on the neighbourhood. Furthermore, an algorithm to select proper mechanical excavation method is presented, where a number of characteristic physical and mechanical parameters are included, which are the basis of classification methods. The impact of some ways of mechanical excavation on the environment is also presented.

Key words: surface mining, difficult workability, mechanical excavation

Wprowadzenie

Spośród wielu problemów decyzyjnych w procesie projektowania i kierowania eksploatacją, a równocześnie jednym z najważniejszych, jest odpowiedni wybór wyposażenia technicznego do realizacji głównych procesów technologicznych wydobywania, do których zalicza się między innymi urabianie oraz transport, zapewniając jednocześnie odpowiednie powiązanie (ilościowe, technologiczne) pomiędzy tymi procesami, dla zapewnienia pełnej efektywności układu wydobywczego.

Dobór końcowego (finalnego) rozwiązania technologicznego w urabianiu złóż surowców skalnych można podzielić na kilka etapów, do których należy zaliczyć głównie określenie:

- metody urabiania,
- sposobu urabiania w ramach przyjętej metody.

Z kolei dobór rozwiązania technologicznego transportu urobku ograniczony jest, w zdecydowanej większości przypadków, do zastosowania transportu kołowego. O efektywności transportu decyduje głównie właściwe dopasowanie układu załadowczo-transportowego w ścisłym powiązaniu z wydajnością zakładu przerobczego.

Wybór metody urabiania

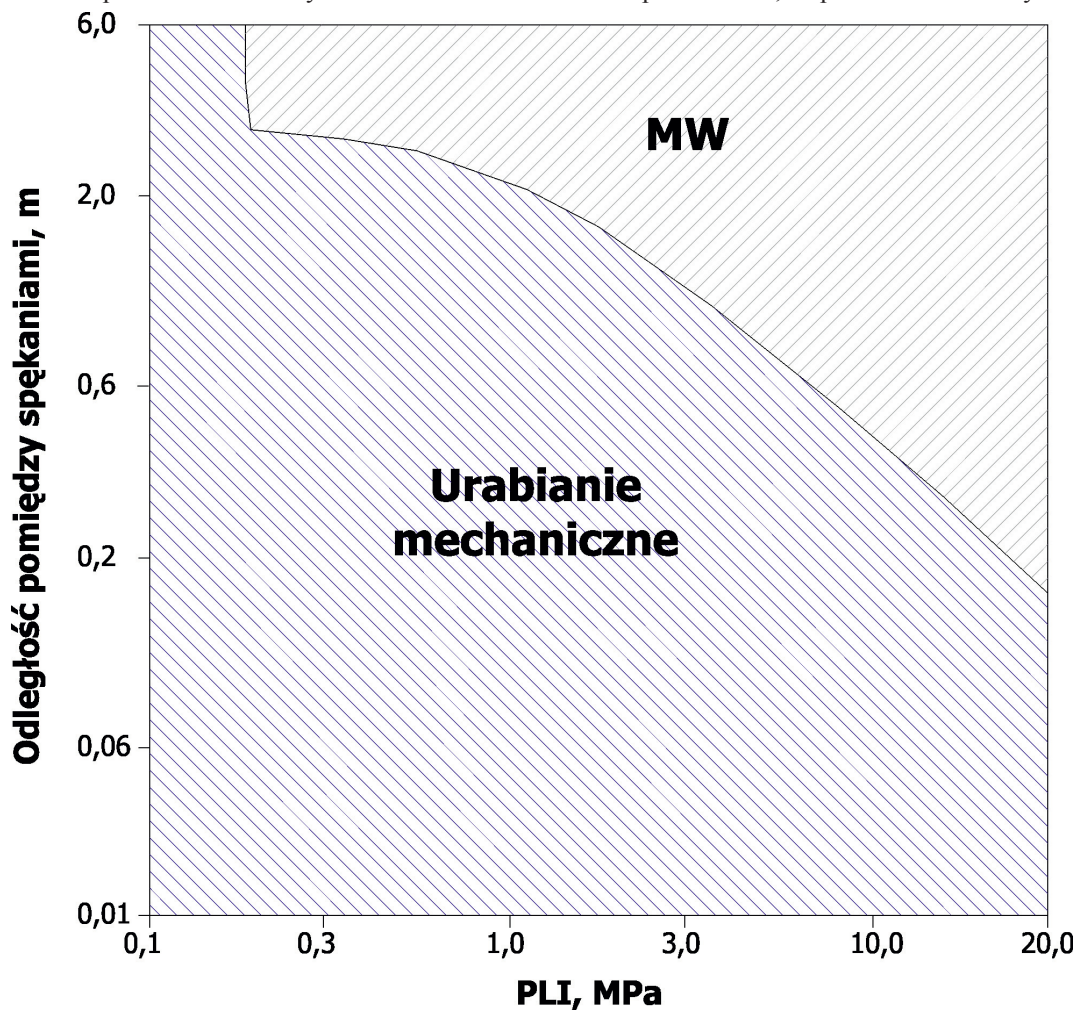
Kruszywa łamane produkowane są głównie ze średnio zwięzłych oraz zwięzłych surowców skalnych. Do eksploatacji

złóż tych surowców wykorzystuje się głównie technikę strzelniczą lub znacznie rzadziej metodę mechanicznego urabiania. Głównym kryterium decydującym o zastosowaniu jednej z tych metod jest wpływ na otoczenie kopalni. Roboty strzałowe, w bezpośrednim sąsiedztwie ich wykonywania, stwarzają dla otoczenia zagrożenia wynikające z rozrzutu odłamków skalnych, działania powietrznej fali uderzeniowej oraz drgań parasejsmicznych. Zasięgi poszczególnych stref jako rzeczywiste wyznacza się w trakcie robót wydobywczych na podstawie pomiarów i obserwacji. W przypadku projektowania kopalni, bądź wznawiania eksploatacji, zasięgi niebezpiecznych stref określa się według wytycznych zawartych w obowiązujących przepisach, które równocześnie dopuszczają możliwość ich weryfikacji na etapie rozwiniętej eksploatacji. Obecnie, aktualnym aktem prawnym jest Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 1 kwietnia 2003 r., w sprawie przechowywania i używania środków strzałowych i sprzętu strzałowego w zakładach górniczych, ogłoszone w Dzienniku Ustaw nr 72 poz. 655, z dnia 29 kwietnia 2003 r. (projekt nowego rozporządzenia jest w fazie uzgodnień międzyresortowych). Wytyczne do określania stref zagrożenia wokół miejsca wykonywania robót strzałowych zawarte są w załączniku nr 4 cytowanego Rozporządzenia.

Rozwój w produkcji innowacyjnych materiałów wybuchowych, jak również środków strzałowych w znaczący sposób wpływają na ograniczenie negatywnego oddziaływania na

otoczenie w rejonie wykonywania robót strzałowych. Dodatkowo, istnieje możliwość przeprojektowania wysokości pięter eksploatacyjnych, co zmniejsza ilość ładunku MW przypadającego na otwór (zwłokę), a także wpływa na zwiększenie bezpieczeństwa obiektów znajdujących się w najbliższym otoczeniu. Na podstawie szeregu doświadczeń określić można umowną wielkość bezpiecznej odległości wykonywania robót strzałowych od obiektów chronionych na ok. 200 m. Poniżej tej wartości zastosowanie techniki strzelniczej staje się zazwyczaj niemożliwe i konieczne jest zastosowanie metody mechanicznego urabiania.

Drugim, równie istotnym kryterium wyboru metody urabiania są parametry fizyko-mechaniczne urabianego górotworu. Wyznaczenie przybliżonego zakresu zastosowania poszczególnych metod urabiania przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przybliżony zakres zastosowania metod urabiania w zależności od wytrzymałości na ściskanie oraz odległości pomiędzy spękaniami
Fig. 1. Estimated scope of use of excavation methods, depending on the compression strength and the distance between the cracks

Na rysunku przedstawiono graniczny zakres zastosowania metody mechanicznego urabiania, w pewnym zakresie, ze względu na osiąganie małych wydajności, ich zastosowanie może nie być ekonomiczne. Przedstawiony wykres oparty jest na wartości wskaźnika punktowego obciążenia (MPa). W celu dokonania jego transformacji na wartość wytrzymałości na ściskanie, posłużyć się można różnymi wzorami. Na podstawie badań [1,2,4], przeprowadzonych na próbkach skał średnio zwięzłych i zwięzłych, określono następującą zależność:

$$R_c = k \cdot PLI \text{ MPa}$$

gdzie:

k – wskaźnik konwersji zależny od rodzaju skał (15–50).

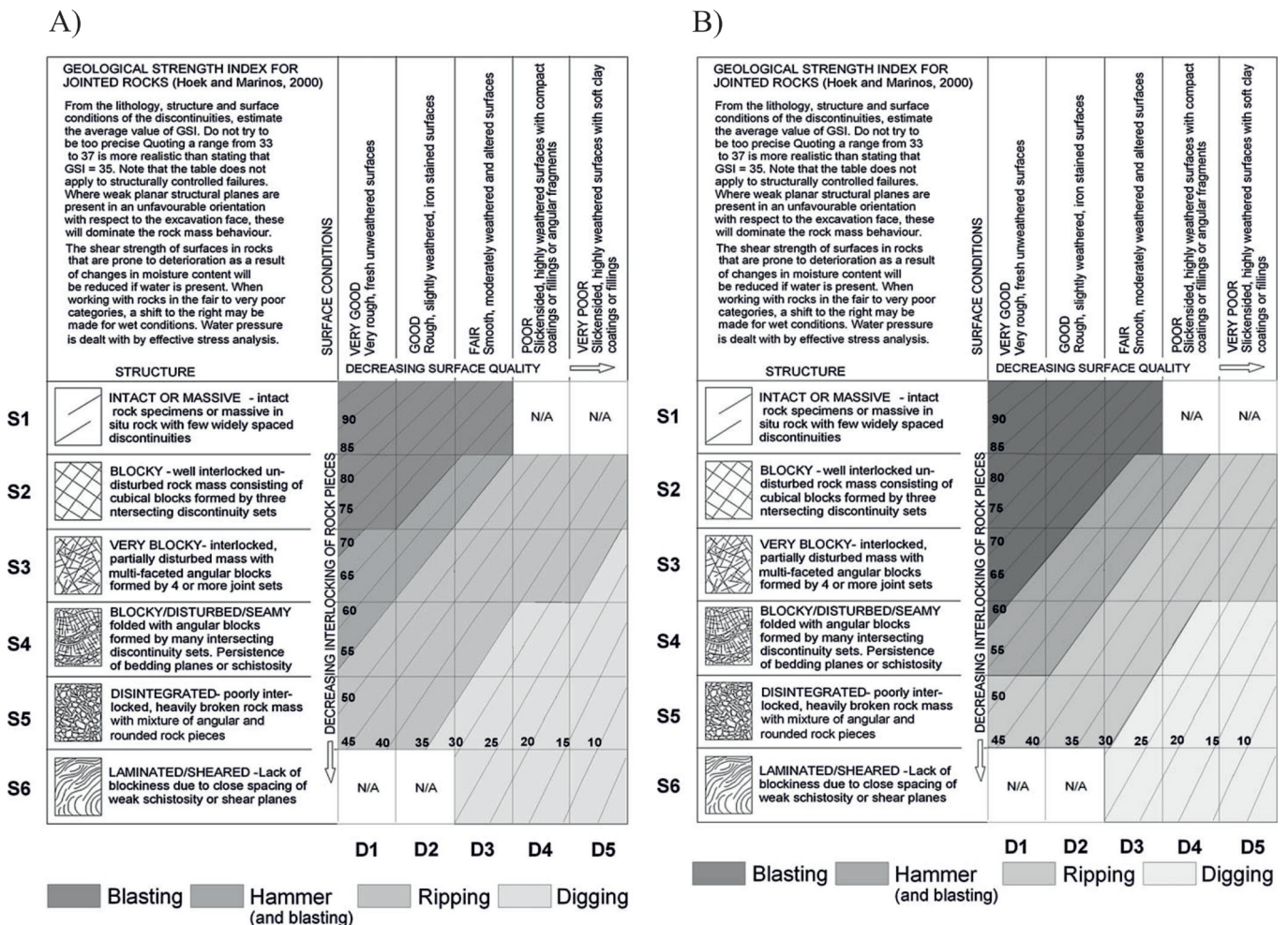
Wytrzymałość na ściskanie wynosi najczęściej 20–25 krotność wskaźnika punktowego obciążenia [6,9].

Inna, polecana ze względu na łatwość wyboru metody urabiania, jest klasyfikacja oparta na wskaźniku GSI (Geological Strength Index) (rys. 2). Wskaźnik ten wykorzystywany jest do szacowania zmian wytrzymałości górotworu skalnego wskutek różnych procesów geologicznych. Charakterystykę górotworu wykonuje się wzrokowo, analizując strukturę masywu (błoczność) oraz stan powierzchni spękań (nieciągłości).

Dla skał charakteryzujących się wytrzymałością na ściskanie mniejszą od 70 MPa ($PLI < 3 \text{ MPa}$) bezwzględnie wykorzystanie techniki strzelniczej określone jest wartością wskaźnika GSI na poziomie 65, co przedstawiono na rysunku 2A.

Z kolei zakresy urabiania masywu skalnego o wytrzymałości na ściskanie większej od 70 MPa ($PLI > 3 \text{ MPa}$) przedstawiono na rysunku 2B. Strefa wyznaczająca bezwzględny obszar urabiania materiałami wybuchowymi określona jest wartością wskaźnika GSI = 60. Poniżej tych wartości możliwe jest wykorzystanie mechanicznego urabiania z użyciem różnych rozwiązań technicznych.

Do wyboru sposobu mechanicznego urabiania służą ogólne klasyfikacje urabialności, z kolei do dokładniejszego określenia zakresu zastosowania wytypowanego sposobu służą klasyfikacje dedykowane [5].



Rys. 2 Propozycja wykorzystania wskaźnika GSI do określenia sposobu urabiania masywu skalnego: A) $PLI < 3 \text{ MPa}$, B) $PLI > 3 \text{ MPa}$ [10]
Fig. 2. The proposal for use of GSI indicator to determine the method of rock mass excavation: A) $PLI < 3 \text{ MPa}$, B) $PLI > 3 \text{ MPa}$ [10]

Wybór sposobu urabiania mechanicznego

Urabianie mechaniczne realizowane może być przy wykorzystaniu różnych maszyn i urządzeń. Do tej grupy maszyn zaliczyć należy:

- zrywarki gąsienicowe,
- kombajny frezujące (powierzchniowe),
- jednonaczyniowe koparki.

Z kolei do grupy urządzeń, instalowanych głównie na wysięgnikach jednonaczyniowych koparek hydraulicznych:

- młoty hydrauliczne,
- zrywaki hydrauliczne,
- głowice frezujące.

Pomimo wieloletnich badań nad urabialnością skał (od połowy XIX w.), nie udało się do tej pory opracować jednolitej ogólnej klasyfikacji mechanicznej urabialności, która by uwzględniała wszystkie istotne zmienne niezależne. Odrębny charakter procesu urabiania różnymi maszynami lub urządzeniami (nie do końca czasami poznany) oraz wpływ kombinacji różnych parametrów na proces urabiania, w sposób znaczący utrudnia rozwiązanie tego problemu. Dlatego też, w zależności od rodzaju stosowanych do urabiania maszyn górniczych, należy wyróżniać urabialność dla każdego sposobu urabiania oddzielnie [5].

Powinno się również mieć na uwadze, że każda maszyna (nawet tego samego typu) jest inna i pracuje w niepowtarzalnych warunkach. Istotny wpływ na proces urabiania ma również czynnik ludzki. Stąd też uznaje się, że najskuteczniejszym

sposobem określenia urabialności jest przeprowadzenie bezpośrednich prób eksploatacyjnych. Niejednokrotnie (np. nowe inwestycje, mała mobilność maszyny), nie ma możliwości przeprowadzenia bezpośrednich prób, stąd też wstępną ocenę opiera się zazwyczaj na podstawie parametrów fizyko-mechanicznych urabianych skał. Trudnością w ocenie urabialności skał jest wpływ, poza parametrami eksploatacyjnymi skał, innych czynników, które ogólnie można zakwalifikować do następujących grup:

- parametry techniczne maszyny,
- parametry technologiczne pracy,
- czynniki zewnętrzne.

W literaturze przedstawiono wiele klasyfikacji urabialności w zależności od różnych parametrów fizyko-mechanicznych. Syntetyczne zestawienie parametrów fizyko-mechanicznych, uwzględnianych w klasyfikacjach, przedstawiono w tabeli 1.

Najczęściej wykorzystywanymi parametrami do oceny urabialności są: (kolejność wg częstości)

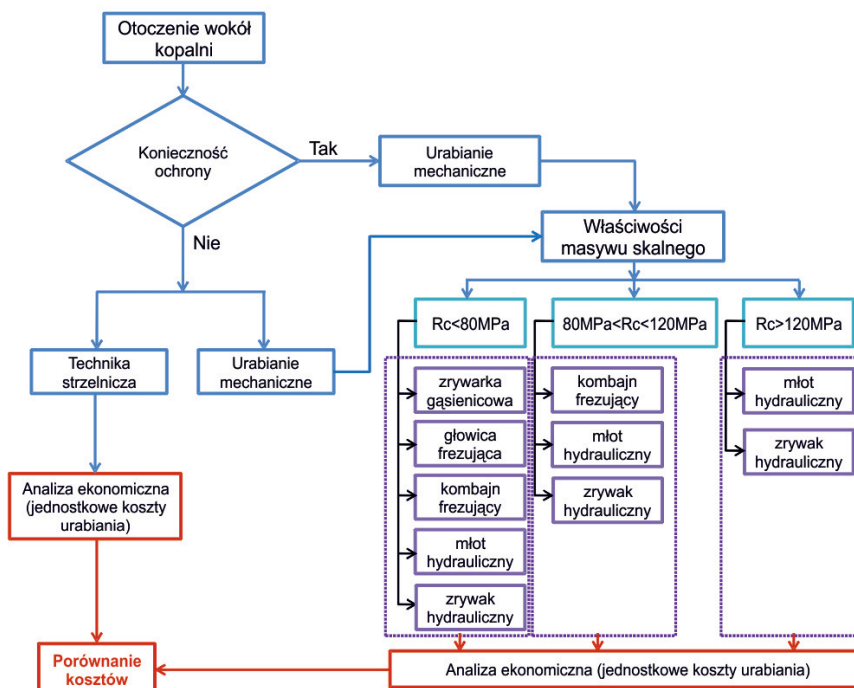
- odległość spekań,
- prędkość przemieszczania się fali sejsmicznej (lub wskaźnik punktowego obciążenia),
- wytrzymałość na ściskanie,
- stopień erozji.

Uproszczony algorytm wyboru metody urabiania oraz sposobu mechanicznego urabiania

Algorytm oparto na dwóch kryteriach: ochrony otoczenia

Tab. 1. Zestawienie parametrów uwzględnianych przy ocenie urabialności
 Tab. 1. List of parameters included in assessment of workability

Autor klasyfikacji	Prędkość fali sejsmicznej	Wytrzymałość na ściskanie	Wskaźnik punktowego obciążenia	Młotek Schmidta	Wytrzymałość na rozciąganie	Wskaźnik RQD	Liczba systemów spękań	Objętość spękań	Szorstkość spękań	Orientacja spękań	Odległość spękań	Ciągłość spękań	Wypełnienie spękań	Stopień erozji
Caterpillar	X													
Atkinson	X													
Franklin		X	X								X			X
Bailey	X													
Weaver	X	X								X	X		X	X
Church	X													
Kirsten		X				X	X	X	X	X	X			
Muftuoglu		X	X								X			X
Abdul Latif et			X								X			
Smith		X								X	X	X	X	X
Komatsu	X													
Singh	X		X		X						X			X
Bozdag			X								X			
Karpuz	X	X		X							X			X
MacGregor	X	X					X		X		X			X
Pettifer and Fookes			X							X	X			X
Kramadibrata		X	X			X					X		X	
Hadjigeorgiou and Poulin			X				X	X	X					X
Basarir and Karpuz	X	X	X	X							X			
Częstość występowania	10	9	9	2	1	2	3	2	3	4	13	1	3	9



Rys. 3 Uproszczony algorytm wyboru metody i sposobu mechanicznego urabiania [5, 8]
 Fig. 3. A simplified algorithm for selection of method and the way of mechanical excavation [5, 8]

Tab. 2. Porównanie mechanicznych sposobów urabiania [Machniak, etap 4.6]

Tab. 2. Comparison of ways of mechanical excavation [Machniak, etap 4.6]

Kryteria techniczne i eksploatacyjne	Młot hydrauliczny	Zrywak hydrauliczny	Zrywarka	Kombajn odkrywkowy	
Zakres zastosowania w zależności od urabialności	R_c , [MPa]	10 ÷ 200	10 ÷ 200	do 80	10 ÷ 200
	LSE, [MJ/m ³]	3,5 ÷ 30	3,5 ÷ 30	do 15	3,5 ÷ 20
Praca w środowisku abrazyjnym (Indeks CAI)	do 4,5	do 4,5	do 3,5	do 3,5	
Wydajność techniczna, [m ³ /godz.]	100 ÷ 20	300 ÷ 20	od 150	2000 ÷ 150	
Możliwość bezpośredniej współpracy z transportem taśmowym	Nie	Nie	Nie	Task	
Możliwość załadunku	Warunkowa ¹⁾	Warunkowa ¹⁾	Nie	Tak	
Zasięg nadpoziomowy	Duży	Duży	Brak	Brak	
Zasięg podpoziomowy	Duży	Duży	Mały	Mały	
Mobilność	Duża	Duża	Duża	Średnia	
Możliwość pracy na dużych pochyleniach (>30°)	Tak	Tak	Tak	Nie	
Wymagana powierzchnia robocza	Mała	Mała	Mała	Średnia	
Adaptacja do zmiennych warunków	Duża	Duża	Duża	Średnia	
Wpływ długości frontu na efektywność	Mały	Mały	Mały	Duży	
Zdolność urabiania selektywnego warstw poziomo zalegających	Duża	Duża	Duża	Duża	
Zdolność urabiania selektywnego warstw pionowo zalegających	Duża	Duża	Mała	Mała	
Wpływ nieregularności zalegania	Mały	Mały	Mały	Duży	

¹⁾ Naprzemienna praca z łyżką

Tab. 3. Wskaźnikowa ocena wpływu sposobów urabiania na otoczenie (powyżej 300 m od miejsca urabiania) [5, 8]

Tab. 3. Comparative assessment of impact of excavation ways on the environment (over 300 m from the excavation location) [5, 8]

Kryteria środowiskowe	Młot hydrauliczny	Zrywak hydrauliczny	Zrywarka	Kombajn odkrywkowy
Ekwiwalent SO ₂	9,2	9,8	10,5	9,4
Ekwiwalent CO ₂	30,7	32,1	34,9	31,6
Energia skumulowana (KEA)	49,5	52,3	56,1	51,1
Zapylenie	58,8	58,8	32,4	63,2
Hałas	---	---	---	---
Wibracje	---	---	---	---
Suma	148,1	153,0	133,8	155,3
Ranking	3	2	4	1

wokół kopalni oraz uproszczonej oceny jakościowej masywu skalnego, określonej wytrzymałością na ściskanie, wyróżniając trzy przedziały jakości masywu skalnego (rys. 3).

W przypadku, gdy nie zidentyfikowano konieczności ochrony obiektów znajdujących się w otoczeniu kopalni wybór metody i sposobu mechanicznego urabiania oparty powinien być na porównawczej analizie jednostkowych kosztów urabiania MW oraz wybranym sposobie mechanicznego urabiania.

W algorytmie nie uwzględniono wpływu parametrów charakteryzujących czynniki technologiczno-organizacyjne, które mają znaczenie przy wyborze jednego ze sposobów mechanicznego urabiania. Syntetyczne porównanie najważniejszych cech, w tym technologiczno-organizacyjnych, wpływających na dobór efektywnego sposobu mechanicznego urabiania przedstawiono w tabeli 2.

Aktualnie, przy doborze sposobu mechanicznego urabiania, bardzo sporadycznie uwzględnia się oddziaływanie na otoczenie (środowisko). Na podstawie danych [3, 7] o jednostkowych wartościach emisji SO₂, CO₂, wartościach: energii skumulowanej, natężenia hałasu, zapylenia oraz oceny drgań w tabeli 3 i 4 przedstawiono ocenę wskaźnikową poszczególnych technologii. W tabelach tych uwzględniono kryteria środowiskowe, które umożliwiają porównanie skumulowanego oddziaływania oraz porównanie według poszczególnych kryteriów (oddziaływań).

Z punktu widzenia uwarunkowań środowiskowych (niezależnie od odległości od miejsca urabiania), w ocenie skumulowanego oddziaływania, najkorzystniejszą technologią jest urabianie kombajnami frezującymi. Kolejne miejsca w zależności od odległości od miejsca urabiania zajmują:

Tab. 4. Wskaźnikowa ocena wpływu sposobów urabiania na otoczenie (poniżej 300 m od miejsca urabiania) [5, 8]

Tab. 4. Comparative assessment of impact of excavation ways on the environment (less than 300 m from the excavation location) [5, 8]

Kryteria środowiskowe	Młot hydrauliczny	Zrywak hydrauliczny	Zrywarka	Kombajn odkrywkowy
Ekwiwalent SO ₂	9,2	9,8	10,5	9,4
Ekwiwalent CO ₂	30,7	32,1	34,9	31,6
Energia skumulowana (KEA)	49,5	52,3	56,1	51,1
Zapylenie	58,8	58,8	32,4	63,1
Hałas	94,7	95,0	95,7	95,3
Wibracje	50,0	55,0	100,0	100,0
Suma	292,8	303,0	329,5	350,5
Ranking	4	3	2	1

- dla odległości mniejszej od 300 metrów:
 - zrywak hydrauliczny,
 - młot hydrauliczny,
 - zrywarka gaśnicowa,
- dla odległości większej od 300 metrów:
 - zrywarka gaśnicowa,
 - zrywak hydrauliczny,
 - młot hydrauliczny.

Różnice w ocenie punktowej poszczególnych technologii są nieduże, uwzględniając jednak dla technologii wymagających zastosowania odrębnej maszyny ładującej (zrywarka, zrywak, młot), różnica pomiędzy zastosowaniem kombajnów frezujących znacznie się zwiększa.

Uwarunkowania środowiskowe mogą stanowić uzupełniające kryterium wyboru lub oceny w przypadku porównywalnych cech techniczno-ekonomicznych wariantowych technologii.

Podsumowanie

Wybór efektywnej metody urabiania czy też sposobu mechanicznego urabiania oparty powinien być na wzajemnej analizie wielu czynników, które można przypisać do czterech głównych grup:

- parametry fizyko-mechaniczne górotworu skalnego,
- parametry techniczne maszyny,
- parametry technologiczne pracy,
- czynniki zewnętrzne.

W zależności od liczby uwzględnianych czynników oraz grup, stosowane klasyfikacje urabialności, które najczęściej wykorzystuje się do wyboru metody i sposobu urabiania, podzielić można na [5]:

- ogólne opisowe,

- dedykowane opisowe,
- ogólne jednoparametrowe,
- dedykowane jednoparametrowe,
- ogólne wieloparametrowe jednogrupowe,
- dedykowane wieloparametrowe jednogrupowe,
- dedykowane wieloparametrowe wielogrupowe.

Opisowe klasyfikacje nie opierają się na parametrach górotworu skalnego, a urabialność wyznaczana jest w sposób subiektywny na podstawie doświadczeń z urabiania różnego rodzaju skał i gruntów. W klasyfikacjach jednoparametrowych, urabialność określona jest na podstawie właściwości (parametru) charakteryzującej dany ośrodek (np. jednostkowy opór urabiania, prędkość przemieszczania fali sejsmicznej, wytrzymałość na ściskanie). Doświadczenia eksploatacyjne pokazują, że pomimo prostoty tych klasyfikacji są one niedokładne. Bazowanie na jednym parametrze, określanym najczęściej w badaniach laboratoryjnych, nie uwzględnia tak zwanego efektu „skali”. Problem „skali”, w ocenie właściwości masywu skalnego, w tym również urabialności, był szeroko dyskutowany i nie został dotąd w pełni rozwiązany. Nie ulega jednak wątpliwości, że wartości parametrów uzyskane z badań laboratoryjnych (na małych próbkach) nie powinny być traktowane jako wartości charakteryzujące górotwór skalny. Urabialność danego ośrodka skalnego jest pojęciem o wiele bardziej złożonym, nie dającym się opisać za pomocą jednego parametru. Dlatego też rozwinięto klasyfikacje wieloparametrowe. Oparte są one na wielu parametrach charakteryzujących górotwór skalny, jak również niektóre z nich uwzględniają parametry techniczne maszyny urabiającej, a także technologię pracy (np. kierunek urabiania). Są to, na chwilę obecną, najdokładniejsze narzędzia do wyboru metody lub sposobu urabiania.

Literatura

- [1] Bieniawski Z. T.; The point load test in geotechnical practice, Engineering Geology, September, 1975
- [2] Broch E., Franklin J.A.; The point load strength test, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 9, 1972
- [3] Drebenstedt C.; Use of environmental balance for selection of continuous or cyclic mining equipment on example of hard rock mining, Continuous Surface Mining, Freiberg, 2010
- [4] Franklin J. A. Broch E., Walton G.; Logging the Mechanical Character of Rock, Transactions of Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 80, 1971
- [5] Machniak Ł.; Metoda doboru technologii wydobywania utworów trudno urabialnych w kopalniach węgla brunatnego, Rozprawa doktorska, AGH Kraków, 2013
- [6] Rock Characterization, Testing and Monitoring – ISRM Suggested Methods, Pergamon, Oxford, 1985

- [7] Schmieder P.; Anwendung und weiterentwicklung der methodik der umweltbilanzierung beim abbau von festestein. Rozprawa, TU Bergakademie Freiberg, 2007
- [8] Strategie i scenariusze technologiczne zagospodarowania i wykorzystania złóż surowców skalnych. Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka. Zadanie 4 etap 4.6.9, AGH Kraków, 2013
- [9] Suggested Method for determining Hardness and Abrasiveness of rocks, ISRM, 1978
- [10] Tsambaios G., Saroglou H.; Excavatability assessment of rock masses using the Geological Strength Index (GSI), Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 69, 2010



Wyrobisko kopalni Łągów II

foi. S. Patla