



Wyniki badań własności mechanicznych skał w aspekcie metody urabiania

The results of rock mechanical properties testing with respect to mining methods

Dr inż. Łukasz Bołoz^{*)}

Treść: W artykule przedstawiono tematykę związaną z często pomijanym wpływem kierunku urabiania na generowane opory urabiania skał. Na etapie prac związanych z rozpoznaniem złoża lub doбором sposobu eksploatacji przeprowadzane są badania określające własności mechaniczne calizny. Najczęściej przeprowadza się badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz czasami urabialności skał. Bardzo często wyniki tych badań silnie zależą od kierunku ich realizacji. Ponadto w zależności od sposobu urabiania (frezowanie, struganie, wiercenie) oraz miejsca pobierania próbek (ocios ściany, czoło lub ocios chodnika) kierunek skrawania zazwyczaj nie jest zgodny z kierunkiem realizacji badań. W artykule zwrócono uwagę na występujące w praktyce kierunki skrawania oraz przedstawiono, opracowane w tym celu dla górnictwa podziemnego, zalecenia dotyczące kierunku prowadzenia badań w celu prawidłowego określenia własności calizny. Zaprezentowano również autorskie wyniki badań węgla kamiennego, soli kamiennej oraz piaskowców, łupków i dolomitów, przeprowadzonych w trzech prostopadłych kierunkach. Ponadto dokonano przeglądu literatury w tym aspekcie, prezentując wybrane badania. Wyniki badań potwierdzają występowanie kilkukrotnych, czasami prawie pięciokrotnych, różnic wartości własności mechanicznych w zależności od kierunku obciążania. Wiedza dotycząca planowanego kierunku skrawania oraz kierunku realizacji badań jest warunkiem koniecznym prawidłowej interpretacji wyników i doboru techniki urabiania, rodzaju narzędzi, parametrów procesu oraz spodziewanej efektywności i energochłonności.

Abstract: The paper is concerned with the influence of cutting direction on rock cutting resistance, which is a frequently neglected issue. Investigations into the mechanical properties of unmined rock are carried out at the stage of works involving deposit identification or mining method selection. The most frequently performed tests include uniaxial compressive strength and, sometimes, mineability of the unmined rock. The results of these tests are strongly correlated with the direction in which they have been carried out. Additionally, depending on the method of mining (cutting, planning, drilling) and the site of sampling (sidewall, face), the direction of cutting is usually inconsistent with the direction of testing. In the article, the author has drawn attention to the commonly applied directions of cutting and presented recommendations on the direction of testing to be followed in underground mining plants in order to properly determine the unmined rock properties. The results of author's research into hard coal mine, rock salt and sandstones, shales and dolomites, conducted in three perpendicular directions have also been quoted. Furthermore, the subject literature in this field has been reviewed and selected investigations presented. The research results confirm that depending on the cutting direction, there may be considerable, even fivefold differences in the value of mechanical properties. Knowing the planned cutting direction and the direction of testing is a necessary condition for interpreting the results in a proper way, choosing a suitable mining technique, the type of tools and process parameters, as well as achieving the projected efficiency and energy consumption.

Słowa kluczowe:

własności mechaniczne skał, dobór metody urabiania, anizotropia skał, mechaniczne urabianie skał, frezowanie, struganie, wiercenie

Keywords:

mechanical properties of rocks, selection of a mining method, rock anisotropy, mechanical cutting of rocks, cutting, planning, drilling

1. Wstęp

Eksploatacji kopaliny użytecznej towarzyszy również urabianie skał płonnych. Tak kopalina użyteczna, jak i skała płonna może być urabiana różnymi metodami. Kopalina użyteczną w kopalniach podziemnych najczęściej jest węgiel kamienny; rudy metali, zwłaszcza miedzi, żelaza, cynku i ołowiu; sole kamienne i potasowe; siarka i inne. W górnictwie odkrywkowym urabiany jest również węgiel brunatny czy też skały budowlane jak marmur czy granit.

Najprostsze, ale stosowane nadal w niewielkiej skali, jest urabianie ręczne, na przykład kilofami czy młotkami. Jednak

zdecydowana większość procesów urabiania jest zmechanizowana. Maszyny urabiające w górnictwie podziemnym wykorzystują najczęściej frezowanie, struganie i wiercenie. Sole oraz skały trudno urabialne i abrazyjne, takie jak rudy, urabia się często materiałem wybuchowym. Na efektywność urabiania maszynami, a tym samym na efektywność eksploatacji największy wpływ mają własności mechaniczne urabianej calizny, które określa się szeregiem parametrów. Wygodnym do wyznaczenia oraz posługiwania się jest wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie R_c , podawana w megapaskalach (MPa). Wytrzymałość ta jednak nie opisuje w wystarczający sposób skały. Znajomość jedynie wartości wytrzymałości na ściskanie nie umożliwia określenia oporów urabiania (Białý 2014, Białý 2015). Skały o wysokiej wytrzymałości R_c mogą

^{*)} AGH w Krakowie, Katedra Inżynierii Maszyn i Transportu

być łatwo urabialne oraz na odwrót, mimo stosunkowo niskiego R_c skała może być trudno urabialna. Dlatego też, niejednokrotnie określa się urabialność skał przez wyznaczenie wskaźnika skrawalności A , podawanego w niutonach na centymetr oraz kąta bocznego rozkruszania ψ podawanego w stopniach. Wszystkie trzy wartości pozwalają na wybór metody urabiania, odpowiednich narzędzi i głowicy oraz oszacowanie oporów urabiania (Bołoz i in. 2018). Ma to kluczowe znaczenie zwłaszcza w przypadku najpopularniejszych i najefektywniejszych maszyn, czyli zmechanizowanych kompleksów ścianowych oraz kombajnów chodnikowych.

Wyznaczenie wytrzymałości oraz urabialności skał przeprowadza się zazwyczaj w warunkach laboratoryjnych. Próbka poddana badaniom może być zorientowana w różny sposób w stosunku do jej orientacji w złożu. Badania własności skał przeprowadzane w warunkach laboratoryjnych zazwyczaj dotyczą tylko jednego kierunku. Typowe maszyny urabiające stosowane w górnictwie podziemnym realizują proces skrawania skał w różny sposób. Analizując typowe maszyny wykazano, że opory urabiania zależą od różnych kierunków, najczęściej niezgodnych z kierunkiem, dla którego wyznaczono własności mechaniczne calizny. Natomiast wyniki badań własności mechanicznych przeprowadzone w trzech prostopadłych kierunkach wskazują na duże zróżnicowanie uzyskiwanych wyników, czyli na anizotropię skał. Anizotropia wskazuje w ogólnym przypadku na wpływ kierunku na własności skał. Jednak przeprowadzenie badań w trzech prostopadłych kierunkach, jest tak de facto badaniem ortotropii, która jest szczególnym przypadkiem anizotropii. Dla analizowanego problemu nie ma potrzeby wyznaczania kierunków, w których własności są najbardziej zróżnicowane, gdyż kierunki narzucone są przez kierunki skrawania oraz usytuowanie w złożu.

W związku z tym zaleca się rozważne określanie kierunku, dla którego zostaną wyznaczone własności mechaniczne skały, przy uwzględnieniu planowanej metody lub metod eksploatacji złoża. Określenie kierunku ma kluczowe znaczenie, zwłaszcza gdy mamy możliwość wykonania badań tylko w jednym, wybranym kierunku.

W publikacjach związanych z mechanicznymi własnościami skał tak z punktu widzenia górnictwa i geologii, jak i mechanizacji eksploatacji pojawiają się informacje o anizotropii. Jest to temat znany i oczywisty. Poniżej przytoczone zostaną wybrane wyniki badań i wnioski z tego zakresu.

Publikowane badania najczęściej dotyczą własności określonych skał lub wpływu różnych parametrów (stosunek

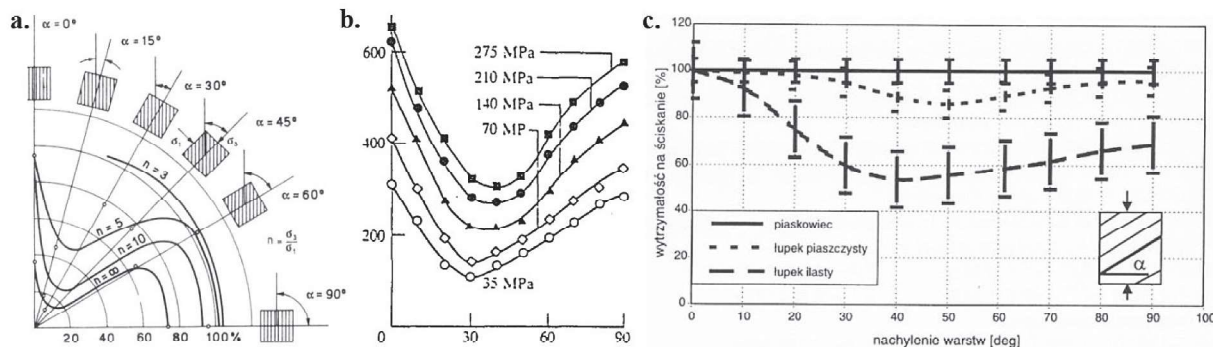
długości próbki do średnicy, wilgotność, wietrzenie itp) na wytrzymałość (Agustawijaya 2007). Już kilkadziesiąt lat temu stwierdzono, że anizotropia skał może powodować różnice w własnościach mechanicznych w stosunku 1:5 (Muller, Pacher 1965). Autorzy tych badań zaznaczyli, że anizotropia jest typowym zjawiskiem. Opracowany przez tych autorów, a przedstawiony na rys. 1a wykres dotyczy przypadku skał uwarstwionych.

W jednym z opracowań (Nasseria i in. 2003) przedstawiono szczegółowe wyniki badań kilku rodzajów łupka dla pełnego zakresu kątów. Wyniki wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wykazały prawie trzykrotne różnice wartości w zależności od orientacji warstw łupka podczas badań. Podobne wyniki uzyskano dla innych materiałów, w tym łupka (rys. 1b), (Shuxin 1992).

Do doboru sposobu urabiania czasami wykorzystuje się jedynie informacje o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie uzyskane z badania rdzeni pozyskanych na etapie prac poszukiwawczych. W sytuacji takiej do dyspozycji jest tylko wartość R_c i jedynie w jednym kierunku (rys. 1c). W jednych badaniach zwrócono uwagę na różnice w wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie dochodzące do 50%, w zależności od kąta nachylenia wiercenia otworu rdzeniowego (Majcherczyk, Niedbalski 2004).

W licznych pracach publikowanych w ostatnich latach, a dotyczących własności mechanicznych skał, zwracano uwagę na anizotropię (Małkowski 2015, Ozcelik, Yilmazkaya 2011, Özbek i in. 2018, Dinc i in. 2011). Oprócz typowych skał urabianych w górnictwie podziemnym, warto przytoczyć badania skał z kopalni odkrywkowych. Badaniom poddawano wapień, dolomit, iłowiec, marmur (Hoek 1980). W literaturze spotkać można wnioski stwierdzające, że sposób zalegania skały w górotworze wpływa na opory urabiania, nie przedstawiono jednak tych zależności, zwłaszcza w odniesieniu do różnych metod urabiania. Przykładem może być analiza wpływu anizotropii trawertynu na efektywność cięcia linami diamentowymi (Ozcelik, Yilmazkaya 2011). W pracy tej przedstawiono również bogaty przegląd prac z zakresu anizotropii węgla kamiennego, diatomitu, piaskowca i innych skał. W jednym z badań podjęto się wyjaśnienia, za pomocą analiz numerycznych, wpływu anizotropii skały na proces wiercenia (Schormair i in. 2006). Opracowanie to dotyczy jedynie analizy uzyskanych wyników dla wiercenia udarowego.

W artykule wykorzystano wyniki badań laboratoryjnych własności skał uzyskane podczas realizacji licznych prac z tego zakresu. Badano różne skały, jak węgiel kamienny,



Rys. 1. Efekt anizotropii skał uwarstwionych: a. na stosunek wytrzymałości σ_3 do σ_1 – łupek (Muller, Pacher 1965), b. on variation of peak principle stress difference – słać (Shuxin 1992), c. wytrzymałość na ściskanie w zależności od kąta nachylenia warstw (Majcherczyk, Niedbalski 2004)

Fig. 1. Effect of stratified rocks anisotropy: a. on σ_3 to σ_1 strength ratio – shale (Muller and Pacher 1965), b. on variation of peak principle stress difference – slate (Shuxin 1992), c. on compressive strength depending on strata inclination angle (Majcherczyk and Niedbalski 2004)

sól kamienną oraz piaskowiec, dolomit czy łupek. Zebrane wyniki badań poddano analizie i przedstawiono zaobserwowano zależności. Zalecenia dotyczące wyboru kierunku badania własności skał oraz ich interpretacji w odniesieniu do określonej metody urabiania opracowano w oparciu o teorię skrawania oraz na podstawie doświadczenia i analizy procesów skrawania realizowanych przez różne maszyny.

2. Mechaniczne urabianie złóż

Do mechanicznego urabiania surowców skalnych w górnictwie podziemnym najczęściej wykorzystywane są różne maszyny frezujące, strugające lub wierzące. W tym artykule skupiono się na wybranych, najpopularniejszych maszynach. Opracowane i przedstawione w kolejnych rozdziałach zalecenia dotyczą takich maszyn jak (numeracja maszyn taka jak na późniejszych rysunkach):

- 1, 2. kombajny chodnikowe urabiające punktowo (rys. 2 b),
3. kombajny ścianowe (rys. 2 a),
4. statyczne strugi węglowe (rys. 2 c),
5. kombajny ścianowe o pionowych osiach obrotu organów frezujących (rys. 2 d),
6. kombajny wierzące w systemie Auger Mining (rys. 2 e),
7. kombajny chodnikowe urabiające liniowo oraz maszyny Continuous Highwall Miner (rys. 2 f).

Maszyny te stosowane są w różnym stopniu na całym świecie. Kombajny chodnikowe urabiające punktowo wykorzystywane są szeroko w kopalniach węgla kamiennego, ale również w kopalniach soli, rud oraz w budownictwie. Kombajny frezujące oraz statyczne strugi węglowe stanowią podstawową i najczęściej spotykaną maszynę urabiająco-ładowującą w zmechanizowanych kompleksach ścianowych stosowanych do wybierania pokładów węgla kamiennego. Podobnie kombajny ścianowe o pionowych osiach obrotu organu frezujących stosowane są do eksploatacji pokładów węgla kamiennego. Maszyny zwiercające wykorzystywane są w kopalniach podziemnych do wybierania pokładów cienkich oraz stromo nachylonych. Natomiast kombajny urabiające liniowo pracują, podobnie jak te urabiające punktowo, w różnych kopalniach, jak kopalnie rud, węgla kamiennego, soli kamiennej (Bołoz 2018a, 2018b).

Elementy robocze tych maszyn urabiających są przedmiotem wielu prac i badań w zakresie projektowania (Bołoz, Castaneda 2018, Bołoz, Midor 2018, Kotwica 2018), jak i doboru, zużycia i regeneracji narzędzi górniczych (Bołoz 2019, Bołoz, Midor 2019, Prokopenko i in. 2018, Ťavodová i in. 2016, Hasilová, Gajewski 2019). Przedstawione schematycznie na kolejnych rysunkach głowice urabiające zbrojone są najczęściej nożami stycznno-obrotowymi lub płaskimi. Noże płaskie, nieobrotowe stosowane są typowo jako narzędzia głowic strugowych. W przypadku organów frezujących kom-



Rys. 2. Wybrane maszyny urabiające w górnictwie podziemnym: a. kombajn ścianowy (MB12 320E TMachinery a. s.), b. kombajn chodnikowy urabiający punktowo (R-130 FAMUR S. A.), c. statyczny strug węglowy (PL 738V Ostroj a. s.), d. kombajn ścianowy z pionowymi osiami (KTB200 Corum Group), e. kombajn wierzący (VS-SEAL-625 z OKD Ostrava), f. kombajn chodnikowy urabiający liniowo (CM210 CAT)

Fig 2. Selected winning machines in underground mining: a. longwall shearer (MB12 320E TMachinery a. s.), b. roadheader (R-130 FAMUR S. A.), c. coal plough (PL 738V Ostroj a. s.), d. longwall shearer with vertical axes (KTB200 Corum Group), e. drilling shearer (VS-SEAL-625 z OKD Ostrava), f. continuous miner (CM210 CAT)

bajnów wszelkiego rodzaju, w przeważającej większości stosowane są noże styczny-obrotowe. Wyjątek stanowi, pokazany na powyższym rysunku, kombajn firmy Corum. Najbardziej energochłonnym procesem realizowanym przez te maszyny jest proces urabiania, który „konsumuje” większość mocy maszyny. Stąd dokładniejsze szacowanie zapotrzebowania na moc, na podstawie prawidłowo wyznaczonych i interpretowanych własności mechanicznych calizny skutkować będzie korzystniejszym doбором maszyn.

3. Badania własności mechanicznych skał

Własności fizyko-mechaniczne skał opisują liczbowo ich najistotniejsze cechy. Do parametrów fizycznych zaliczyć można nasiąkliwość oraz różnie definiowaną gęstość i wilgotność. Wśród parametrów mechanicznych wymienia się różnie definiowaną wytrzymałość, kąt tarcia wewnętrzznego, spójność, moduł Younga, współczynnik Poissona, wskaźnik urabialności i zwięzłości oraz ścierność i ściernalność. Dla procesu urabiania skał znaczenie mają własności mechaniczne. W praktyce najczęściej wyznacza się wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, jednak jest ona niewystarczająca dla doboru narzędzi i oszacowania oporów urabiania. Z punktu widzenia trwałości narzędzi znaczenie ma ścierność skał (Mucha 2019), która jest kluczowa dla częstości wymian noży. Natomiast parametrem, który wynikowo określa, jaki opór stawia calizna podczas urabiania narzędziem jest urabialność. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie wyznaczana jest zgodnie z normami dotyczącymi przygotowania próbek (PN-G-04301) oraz oznaczenia wytrzymałości (PN-G-04303). Natomiast urabialność skał określana jest za pomocą dwóch wartości: wskaźnika skrawalności A oraz kąta bocznego rozkruszania ψ . Według metody opracowanej w AGH wyznaczana jest empirycznie przez pomiar siły skrawania w czasie wykonywania prostoliniowego skrawu pomiarowego o określonej głębokości i zdefiniowanym nożem. Stanowisko do badania procesu strugania umożliwia wykonanie skrawu o określonej głębokości, szerokości oraz długości. Podczas skrawania rejestrowane są wartości sygnałów z układu tensometrów zabudowanych na uchwycie pomiarowym. Dzięki czemu możliwe jest określenie wartości siły skrawania, bocznej oraz docisku. Po wykonaniu skrawu mierzona jest rzeczywista głębokość i szerokość skrawu. Znając siłę oporów skrawania, głębokość skrawania oraz wartości odpowiednich współczynników wyznaczana jest skrawalność, która jest proporcjonalna do siły skrawania i odwrotnie proporcjonalna do głębokości skrawania (Krauze 2000).

4. Anizotropia własności mechanicznych skał na podstawie badań

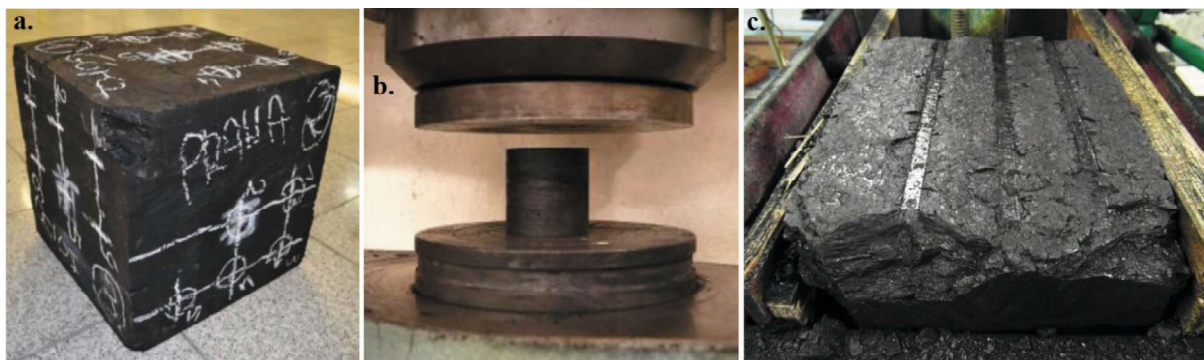
Anizotropia skał została wykazana licznymi badaniami oraz publikacjami. Poniżej przedstawione zostaną wybrane wyniki badań laboratoryjnych zrealizowanych przez lub przy udziale autora. Badania przeprowadzono w celu określenia własności mechanicznych calizny w aspekcie doboru metody urabiania. W związku z tym badania dotyczą typowych skał urabianych mechanicznie, jak węgiel kamienny, sól kamienna, rudy miedzi.

Badania węgla kamiennego przeprowadzono na podstawie próbek dostarczonych z dwóch różnych lokalizacji, z kopalni w miejscowości Ordos w Chinach. Badania przeprowadzono w celu określenia wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie oraz wskaźnika skrawalności (rys. 3). Wytrzymałość wyznaczono dla trzech prostopadłych kierunków. Wskaźnik skrawalności mierzono na trzech prostopadłych płaszczyznach w dwóch prostopadłych kierunkach.

Wyniki badań węgla z pierwszej lokalizacji zestawiono w tab. 1. Różnice pomiędzy poszczególnymi wartościami R_c dla różnych kierunków skrawania są bardzo duże. Wytrzymałość w kierunku góra-dół stanowi ponad 300% wartości dla kierunku prawa-lewa. Podobnie w przypadku wskaźnika skrawalności. Wskaźnik A dla ściany prawej stanowi około 175% wskaźnika dla ściany odpowiadającej ociosowi wyrobiska (dalej dla uproszczenia nazwanej ociosem). Zauważalna różnica występuje również dla dwóch kierunków na jednej ścianie. Na przykład wskaźnik na ścianie prawej w kierunku góra-dół stanowi prawie 150% wartości dla prostopadłego kierunku, czyli tył-ocios. W efekcie kategoria urabialności badanego węgla, pomimo że dotyczy tych samych próbek, zmienia się w zależności od kierunku od dobrze urabialnej do powyżej średnio urabialnej.

Podobnie dla węgla z drugiej lokalizacji wyniki zestawiono w tab. 2. Wytrzymałość w kierunku góra-dół stanowi prawie 370% wartości dla kierunku prawa-lewa. Wskaźnik skrawalności A różni się w zależności od ściany i kierunku. Wskaźnik A na ścianie prawej w kierunku tył-ocios stanowi ponad 125% wartości dla prostopadłego kierunku, czyli góra-dół. W efekcie kategoria urabialności badanego węgla zmienia się między powyżej średnio urabialną a trudno urabialną.

W ramach realizacji jednego z projektów przeprowadzono kompleksowe badania rud miedzi w postaci dolomitów, piaskowców oraz łupków. Z kopalni pobrano odpowiednią ilość skał, z których wykonano ponad sto próbek do badania wytrzymałości i skrawalności (rys. 4, rys. 5). Badano wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie oraz skrawalność w trzech



Rys. 3. Badania węgla kamiennego: a. dostarczona próbka, b. przed badaniem R_c , c. po badaniach wskaźnika skrawalności

Fig. 3. Investigation into hard coal: a. provided sample b. before R_c tests, c. after cuttability index tests

Tabela 1. Zestawienie wyników badań węgla z pierwszej lokalizacji**Table 1. Results of tests for the coal from the first location**

Lp.	Kierunek R_c	R_c [MPa]	Ściana	Kierunek A	A [N/cm]	ψ [°]	Kategoria
1	góra-dół	14	ocios	góra-dół	1 137	44	dobrze urabialny
				prawo-lewo	1 738	45	średnio urabialny
2	prawa-lewa	5	góra	tył-ocios	1 252	49	średnio urabialny
				prawo-lewo	1 557	477	średnio urabialny
3	ocios-tył	9	prawa	góra-dół	1 982	57	powyżej średnio urabialny
				tył-ocios	1 347	47	średnio urabialny

Tabela 2. Zestawienie wyników badań węgla z drugiej lokalizacji**Table 2. Results of tests for the coal from the second location**

Lp.	Kierunek R_c	R_c [MPa]	Ściana	Kierunek A	A [N/cm]	ψ [°]	Kategoria
1	góra-dół	19	ocios	góra-dół	1 975	62	trudno urabialny
				prawo-lewo	2 367	57	powyżej średnio urabialny
2	prawa-lewa	5	góra	tył-ocios	2 113	59	powyżej średnio urabialny
				prawo-lewo	2 292	57	powyżej średnio urabialny
3	ocios-tył	6	prawa	góra-dół	1 889	59	powyżej średnio urabialny
				tył-ocios	2 395	58	powyżej średnio urabialny

**Rys. 4. Badania R_c rud miedzi: a. przygotowanie próbek, b. łupki podczas badania R_c , c. złom łupka, piaskowca i dolomitu po badaniach****Fig. 4. Investigations into R_c of copper ores: a. sample preparation, b. shale during R_c testing, c. scrap of shale, sandstone and dolomite after tests**

kierunkach. Poniżej zestawiono maksymalne zaobserwowane wartości wyznaczone na podstawie próbek pobranych z jednej bryły dla każdej ze skał (tab. 3, tab. 4, tab. 5).

Wyniki badań wytrzymałości dla piaskowca wskazują na duże zróżnicowanie wartości dla wszystkich trzech kierunków. Największe różnice, 4,5 razy zaobserwować można między kierunkami góra-dół oraz ocios-tył. Wartości dla pozostałych kombinacji kierunków są od siebie dwukrotnie większe. Podobnie wskaźnik skrawalności dla kierunku tył-

-ocios jest dwukrotnie mniejszy od wartości dla pozostałych kierunków. Ze względu na wysokie wartości, niezależnie od kierunku, piaskowiec ten został zaklasyfikowany jako szczególnie trudno urabialny. Należy jedna zaznaczyć, że w stosowanej klasyfikacji nie ma osobnych kategorii powyżej szczególnie trudno urabialny, pomimo że wartości potrafią być czterokrotnie wyższe.

W przypadku wyników wytrzymałości dla dolomitu względne różnice nie są tak duże. Największa różnica po-

**Rys. 5. Badania skrawalności rud miedzi: a. dolomit, b. piaskowiec, c. łupki****Fig. 5. Copper ores cuttability tests: a. dolomite, b. sandstone, c. shale**

Tabela 3. Zestawienie wyników badań piaskowca**Table 3. Results of tests for sandstone**

Lp.	Kierunek R_c	R_c [MPa]	Kierunek A	A [N/cm]	ψ [°]	Kategoria
1	góра-dół	16	góра-dół	22 886	39	szczególnie trudno urabialny
2	prawa-lewa	72	tył-ocios	11 716	65	szczególnie trudno urabialny
3	ocios-tył	37	góра-dół	20 610	49	szczególnie trudno urabialny

Tabela 4. Zestawienie wyników badań dolomitu**Table 4. Results of tests for dolomite**

Lp.	Kierunek R_c	R_c [MPa]	Kierunek A	A [N/cm]	ψ [°]	Kategoria
1	góра-dół	89	góра-dół	2 559	71	trudno urabialny
2	prawa-lewa	104	tył-ocios	5 252	61	szczególnie trudno urabialny
3	ocios-tył	127	góра-dół	5 303	75	szczególnie trudno urabialny

Tabela 5. Zestawienie wyników badań łupka**Table 5. Results of tests for shale**

Lp.	Kierunek R_c	R_c [MPa]	Kierunek A	A [N/cm]	ψ [°]	Kategoria
1	góра-dół	63	próbka uległa zniszczeniu			
2	prawa-lewa	61	tył-ocios	6 097	22	szczególnie trudno urabialny
3	ocios-tył	27	góра-dół	4 549	71	szczególnie trudno urabialny

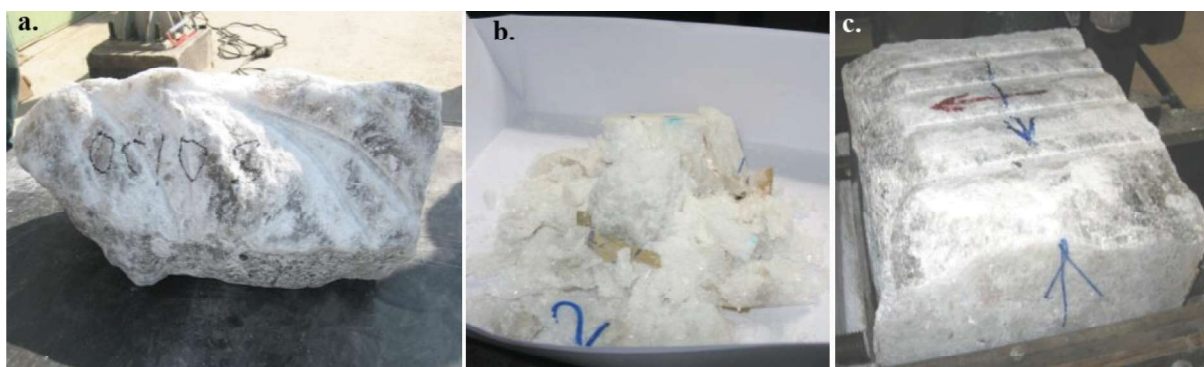
między ocios-tył, a góra-dół sięga nieco ponad 40%, co jednak przy wysokich wartościach wytrzymałości stanowi prawie 40 MPa. Natomiast różnica w wartościach wskaźnika skrawalności jest znaczna i przekracza dwukrotność. Stąd pomiędzy kierunkiem góra-dół a pozostałymi występuje różnica w kategorii urabialności.

Badania łupka wykazały różnice w wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie przekraczające dwukrotność w stosunku do jednej z wartości. Znacznie mniejsza wytrzymałość w kierunku ocios-tył oraz charakterystyczna budowa łupka spowodowały, że podczas badań skrawalności w kierunku góra-dół próbka uległa zniszczeniu. Wyniki wskaźnika skrawalności dla pozostałych kierunków różnią się prawie 35%. Ciekawym, ale charakterystycznym dla łupka, wnioskiem jest ponad trzykrotna różnica w kącie bocznego rozkruszania ψ .

W ostatnich latach często przeprowadzano pojedyncze badania mające na celu określenie wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie różnych rodzajów skał, w trzech kierunkach. Należy podkreślić, że w zależności od rodzaju oraz jednorodności skały, wyniki nawet dla jednego kierunku mogły różnić się kilkukrotnie. Przykładowo znacznymi różnicami charakteryzował się dolomit graniczny, gdzie w przypadku pojedynczych próbek, dla jednego kierunku osiągnięto ponad trzykrotną różnicę wyników (158 MPa oraz 46 MPa). Jednak pojedyncze, znacznie niższe od pozostałych wartości nie mają znaczenia dla szacowania energochłonności procesu oraz dla wyboru metody urabiania. Należy się kierować wartościami

maksymalnymi. Dla wyników badań różnych próbek, dolomit oraz piaskowiec charakteryzowały się różnicami sięgającymi około 50% w zależności od kierunku ściskania, na przykład 113 MPa oraz 77 MPa dla dwóch prostopadłych kierunków ściskania.

Sól kamienna jest przykładem minerału, który z punktu widzenia mechanicznego urabiania, charakteryzuje się kilkoma ciekawymi własnościami (Mansouri, Ajalloeian 2018, He i in. 2019). Sól jest mało abrazyjna, czyli w bardzo niewielkim stopniu zużywa narzędzia. Sól charakteryzuje się dosyć dużymi oporami urabiania oraz nierzadko wysokimi wskaźnikami skrawalności. Przeprowadzono badania próbek soli kamiennej pochodzących z jednej z polskich kopalń (rys. 6). Badania własności mechanicznych soli w trzech kierunkach wykazały, że uzyskiwane wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie w mniejszym stopniu zależą od kierunku. Wyznaczona wartość wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie wyniosła kolejno dla prostopadłych kierunków 35 MPa, 33 MPa oraz 34 MPa. Czyli różnice nie przekraczają 6%. Skrajnie dla pojedynczych próbek różnice wyniosły około 17%. Ze względu na specyfikę procesu urabiania oraz zakres zlecenia, badania skrawalności przeprowadzono jedynie dla dwóch prostopadłych kierunków. Średnia wartość wskaźnika skrawalności A wyniosła kolejno 5 083 N/cm oraz 5860 N/cm. Różnica sięga więc ponad 15%, przy maksymalnych różnicach wynoszących prawie 35%.



Rys. 6. Badania soli kamiennej: a. dostarczona próbka, b. po badaniach R_c , c. po badaniach wskaźnika skrawalności
Fig. 6. Rock salt tests: a. provided sample b. after R_c tests, c. after cuttability index tests

5. Kierunek wyznaczania własności mechanicznych w aspekcie metody urabiania

W celu określenia mechanicznych własności calizny przeprowadza się badania wskaźnika skrawalności, kąta bocznego rozkruszania, zwięzłości lub wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Najczęściej badania wykonuje się dla próbek pobranych z eksploatowanego wyrobiska. Pobranie próbki do badań umożliwia wyznaczenie w warunkach laboratoryjnych jej własności w dowolnym kierunku. Należy zaznaczyć, że zwięzłość jest wskaźnikiem energetycznym i nie zależy od kierunku. Próbka może zostać pobrana z wyrobiska przeznaczonego do eksploatacji różnymi wspomnianymi wcześniej maszynami. Dla schematu przedstawionego na rys. 7 próbka może zostać pobrana z wyrobisk oznaczonych A, B lub C. Dla popularnego systemu ścianowego próbka P3 może zostać pobrana ze ściany (wyrobisko C), P2 z chodnika nadścianowego (wyrobisko B) lub P1 z chodnika podścianowego (wyrobisko A). Uwzględniono typowo zastosowanie urabiania kombajnem chodnikowym (1, 2) wyrobisk przyścianowych oraz urabianie kombajnem ścianowym (3) i strugiem węglowym (4) ściany. Przy czym oprócz klasycznych kombajnów ścianowych założono możliwość zastosowania kombajnu frezującego o pionowych osiach obrotu organów (5). Na schemat naniesiono również kombajn wierzący w systemie Auger Mining (6) oraz organ frezujący dla systemu Continuous Highwall Mining (7). Dla dwóch ostatnich systemów nie stosuje się typowych wyrobisk przyścianowych. Jednak w takiej sytuacji próbki oznaczone jako P1 oraz P2 mogą zostać pobrane z wykonanych wcześniej otworów lub chodników opisanych jako wyrobisko A i B, więc układ kierunków skrawania pozostaje zachowany. Sytuacja przedstawia się podobnie dla systemu komorowo-filarowego przy zastosowaniu kombajnu urabiającego linowo. Interpretacja dla takiego kombajnu jest tożsama z głowicą frezującą (7) (Bołoz 2020).

Przedstawiony schemat rozmieszczenia miejsc pobrania próbek z określonych wyrobisk można uogólnić również do innych wyrobisk eksploatacyjnych oraz zastosowanych maszyn, na przykład dla kombajnów wierząco-frezujących jak Ural-360, Marietta, Xcel Miners 4-Rotor czy też wrębiarek. Należy wtedy, stosując przedstawiony poniżej sposób, dokonać analizy kierunku skrawania oraz odpowiadającego mu kierunku wyznaczenia własności mechanicznych próbki.

Oznaczenia przyjęte na rys. 7:

P1 – próbka zlokalizowana w wyrobisku A,
P2 – próbka zlokalizowana w wyrobisku B,
P3 – próbka zlokalizowana w wyrobisku C,

1 – kombajn chodnikowy w wyrobisku A,
2 – kombajn chodnikowy w wyrobisku B,
3 – klasyczny kombajn ścianowy,
4 – statyczny strug węglowy,
5 – kombajn ścianowy z pionowymi osiami organów,
6 – kombajn wierzący w systemie Auger Mining (AM),
7 – kombajn Continuous Miner w systemie Continuous Highwall Mining (CMH),

v_p – wektor prędkości posuwu głowicy urabiającej kolejno dla każdej z maszyn (1-7),

v_s – wektor prędkości skrawania głowicy urabiającej kolejno dla każdej z maszyn (1-7),

V1 – widok na caliznę w wyrobisku A,

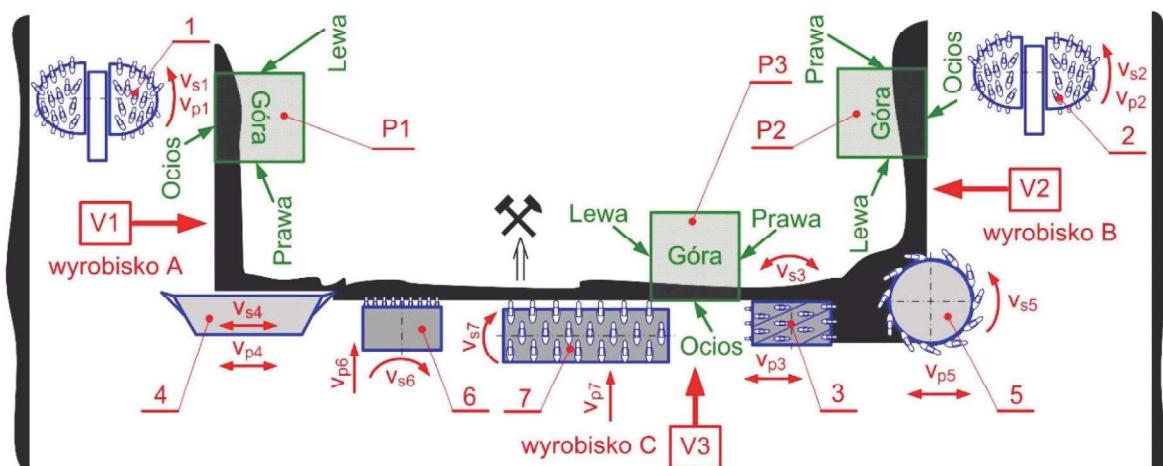
V2 – widok na caliznę w wyrobisku B,

V3 – widok na caliznę w wyrobisku C.

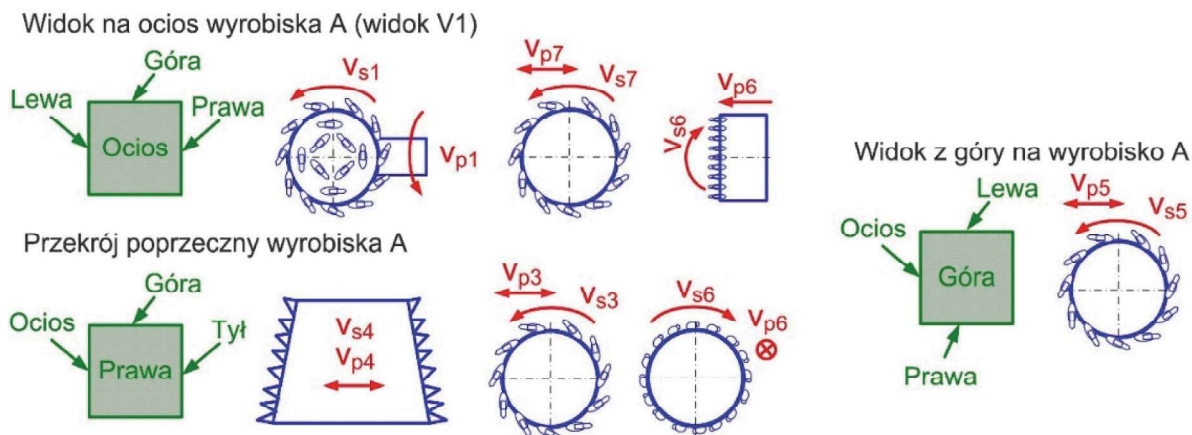
Miejsce urabiania oraz rodzaj maszyny urabiającej determinują kierunek skrawania, a tym samym kierunek, w którym należy wyznaczyć własności mechaniczne calizny. W związku z tym, dla każdego z wyrobisk (A, B, C), z których może pochodzić próbka (P1, P2, P3) opracowano schematy umożliwiające przypisanie kierunku wyznaczenia własności mechanicznych pobranej próbki do rodzaju zastosowanej maszyny urabiającej. Na schematy naniesiono próbki w trzech rzutach oraz głowice urabiające. Głowice urabiające powiązano z określonym rzutem próbki. Rysunki wykonano tak, aby umożliwić analizę kierunku skrawania oraz kierunku w jakim należy wyznaczyć własności mechaniczne próbki. Przeanalizowano kolejno trzy przypadki:

- próbka P1 – próbka pobrana z wyrobiska A – rys. 8,
- próbka P2 – próbka pobrana z wyrobiska B – rys. 9,
- próbka P3 – próbka pobrana z wyrobiska C – rys. 10.

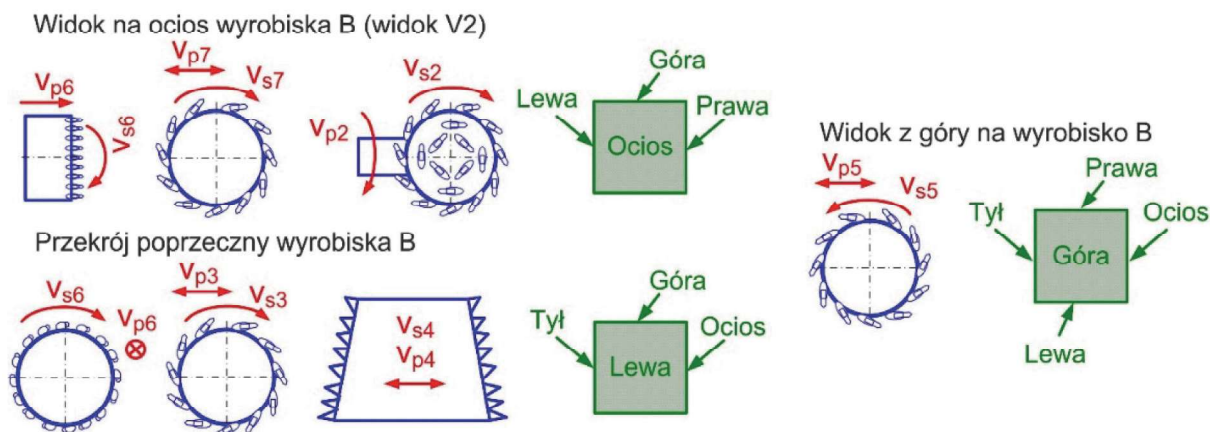
W każdej z przedstawionych sytuacji występuje zależność metody urabiania od kierunku w jakim należy wyznaczyć własności mechaniczne próbki. Dla analizowanych głowic urabiających określono kierunek, który w największym stopniu decyduje o oporach skrawania. Przez kierunek rozumie się kierunek, w którym wyznaczono własności mechaniczne próbki. Dla pobranej próbki wyznaczyć można wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w trzech prostopadłych kierunkach. Również badania skrawalności można przeprowadzić w trzech prostopadłych kierunkach na sześciu dostępnych powierzchniach próbki. Przyjęte nazwy powierzchni próbek oznaczono symbolicznie: góra (G), dół (D), prawa (P), lewa (L), ocios (O), tył (T). W związku z tym wyróżnić można trzy kierunki dla wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie: G-D, P-L, O-T. Skrawalność wykonać można w dwóch prostopadłych kierunkach na każdej ze ścian, na przykład na powierzchni ocios w



Rys. 7. Schemat rozmieszczenia próbek do badań i kierunków skrawania poszczególnych maszyn
Fig. 7. Layout of locations of test samples and directions of cutting of particular machines



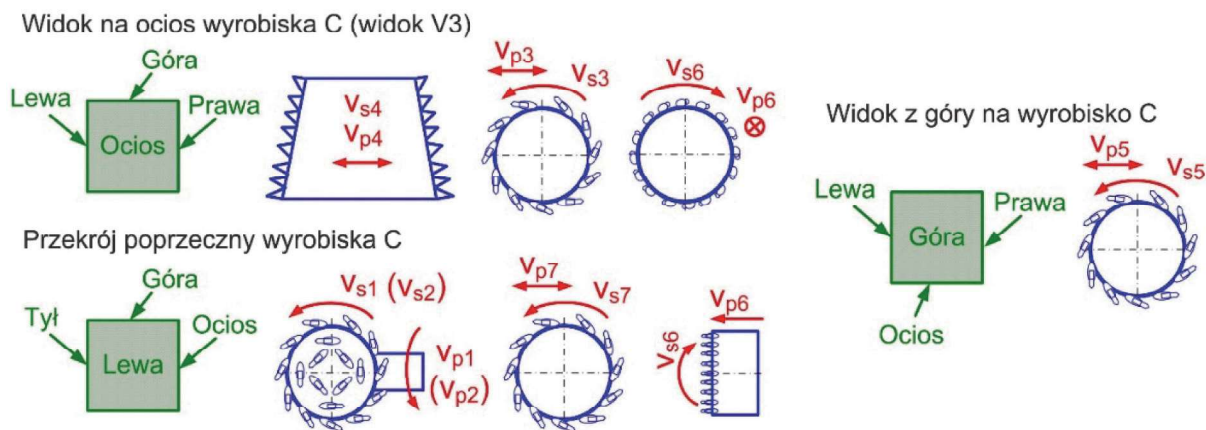
Rys. 8. Kierunki urabiania dla próbki pobranej z wyrobiska A dla próbki P1
 Fig. 8. Cutting directions for sample P1 taken from excavation A



Rys. 9. Kierunki urabiania dla próbki P2 pobranej z wyrobiska B
 Fig. 9. Cutting directions for sample P2 taken from excavation B

kierunku G-D oraz P-L. Ponadto skrawalność wykonać można dla dwóch zwrotów w każdym z kierunków, na przykład G-D ora D-G. Dotychczas wpływ zwrotu skrawania na uzyskiwane wyniki badań skrawalności nie był kompleksowo badany. Na podstawie doświadczeń uzyskanych podczas badań można stwierdzić, że zwrot ma wpływ, szczególnie w przypadku, gdy powierzchnia przygotowana do skrawania nie jest pro-

stopadła ani równoległa do płaszczyzny łupliwości. Poniżej podano zalecane płaszczyzny, kierunki i zwroty. W przypadku, gdy znana jest metoda urabiania, to właściwości skały należy wyznaczyć zgodnie z podanymi zaleceniami. Dla strugów węglowych oraz kombajnów ścianowych zwrot wektora prędkości skrawania zmienia się wraz ze zmianą kierunku ruchu maszyny w ścianie.



Rys. 10. Kierunki urabiania dla próbki P3 pobranej z wyrobiska C
 Fig. 10. Cutting directions for sample P3 taken from excavation C

W przypadku próbki P1 pobranej z wyrobiska A (rys. 8) występują następujące zależności:

- urabianie kombajnem chodnikowym (1) oraz CHM (7):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku G-D,
 - skrawalność na powierzchni P, zwrot G-D,
- urabianie kombajnem ścianowym (3):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku G-D,
 - skrawalność na powierzchni T lub O, zwrot G-D oraz ewentualnie D-G,
- urabianie głowicą strugową (4):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku O-T,
 - skrawalność na powierzchni P, zwrot O-T oraz T-O,
- urabianie kombajnem ścianowym z pionowymi osiami (5):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku P-L,
 - skrawalność na powierzchni T lub O, zwrot L-P,
- urabianie głowicą wierzącą (6):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku P-L,
 - zwiercalność w kierunku wiercenia P-L.

W przypadku próbki P2 pobranej z wyrobiska B (rys. 9) występują następujące zależności:

- urabianie kombajnem chodnikowym (2) oraz CHM (7):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku G-D,
 - skrawalność na powierzchni L, zwrot G-D,
- urabianie kombajnem ścianowym (3):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku G-D,
 - skrawalność na powierzchni T lub O, zwrot G-D oraz ewentualnie D-G,
- urabianie głowicą strugową (4):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku O-T,
 - skrawalność na powierzchni L, zwrot O-T oraz T-O,
- urabianie kombajnem ścianowym z pionowymi osiami (5):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku P-L,
 - skrawalność na powierzchni T lub O, zwrot P-L,
- urabianie głowicą wierzącą (6):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku P-L,
 - zwiercalność w kierunku wiercenia L-P.

W przypadku próbki P3 pobranej z wyrobiska C (rys. 10) występują następujące zależności:

- urabianie kombajnem chodnikowym (1, 2) oraz CHM (7):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku G-D,
 - skrawalność na powierzchni O, zwrot G-D,
- urabianie kombajnem ścianowym (3):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku G-D,
 - skrawalność na powierzchni P lub L, zwrot G-D oraz ewentualnie D-G,
- urabianie głowicą strugową (4):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku P-L,
 - skrawalność na powierzchni O, zwrot P-L oraz L-P,
- urabianie kombajnem ścianowym z pionowymi osiami (5):

- wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku O-T,
- skrawalność na powierzchni P lub L, zwrot T-O,
- urabianie głowicą wierzącą (6):
 - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w kierunku O-T,
 - zwiercalność w kierunku wiercenia O-T.

Klasyczny kombajn ścianowy urabiający dwukierunkowo wyposażony jest w dwie głowice urabiające, które skrawają w przeciwnych kierunkach. Zazwyczaj organ przedni skrawa w kierunku ku dołowi, a tylni ku górze. Organ przedni urabia całą średnicą, stąd najważniejsze jest określenie skrawalności G-D. Natomiast organ tylni urabia pozostawioną półkę węglową w kierunku ku swobodnej powierzchni, stąd opory urabiania są mniejsze i nie ma konieczności wyznaczania skrawalności D-G.

Kombajny ścianowe o osiach pionowych wyposażone są w dwa organy frezujące, przy czym niezależnie od kierunku ruchu kombajnu organ skrawa w tym samym kierunku, czyli w kierunku powierzchni swobodnej. Statyczny strug węglowy charakteryzuje się kierunkiem skrawania zgodnym z kierunkiem ruchu głowicy. Natomiast dla pozostałych maszyn (1, 2, 6, 7) nie występuje zmiana kierunku skrawania.

W przypadku wiercenia głowicą (6) wyposażoną w noże styczo-obrotowe, noże skrawają caliznę w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiercenia. Każdy nóż jest przez cały czas w kontakcie z calizną. Ze względu na taki charakter skrawania należałoby wyznaczyć wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w trzech kierunkach oraz skrawalność na czterech płaszczyznach. Aby uprościć określenie własności calizny dla wiercenia, zaleca się wyznaczyć zwiercalność zgodnie z kierunkiem wiercenia oraz wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie w tym samym kierunku.

Próbki P1 i P2 mogą zostać również pobrane z czoła wyrobiska A i B, przy czym przedmiotowa analiza wtedy również ma zastosowanie. Natomiast próbki P1 i P2 mogą zostać pobrane z przeciwległego ociosu wyrobiska chodnikowego w stosunku do zaznaczonego na rysunku. Należy wtedy uwzględnić w analizie odpowiednie kierunki, analogicznie z przedstawioną metodyką. Próbka P3 może zostać pobrana z czoła wyrobiska chodnikowego, przy czym interpretacja kierunków pozostanie wtedy bez zmian.

W praktyce często próbki nie są prawidłowo oznaczane lub też wycinane są zgodnie z kierunkiem zalegania warstw. W rezultacie, w zależności od rodzaju skały i metody urabiania uzyskuje się zawyżone wartości wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Maksymalna wytrzymałość danej próbki w kierunku prostopadłym do uwarstwienia może być znacznie większa, niż w kierunku wynikającym z procesu urabiania. W każdym przypadku, a w szczególności dla warstw nachylonych, należy precyzyjnie oznaczać kierunek oraz ściany próbki w odniesieniu do wyrobiska, a nie zalegania.

6. Wnioski

Przedstawione wyniki badań nie pozwalają na całościowe ujęcie problemu, ale są wystarczającym dowodem na występowanie znaczących rozbieżności, w zależności od kierunku wyznaczania własności mechanicznych skał. Różnice w niektórych przypadkach sięgają 500%. Podkreślić należy, że nie ma konieczności wykonywania badań w trzech kierunkach. Kluczowe jest jednak przeanalizowanie możliwych do zastosowania metod urabiania oraz uwzględnienie tego przy wyznaczaniu własności mechanicznych skał. Znając orientację próbki w złożu oraz stosując przedstawioną metodykę, określić można w jaki sposób należy wyznaczyć jej własności

mechaniczne, aby wyniki były jak najbardziej adekwatne do planowanego sposobu urabiania. W sytuacji, gdy brane są pod uwagę różne techniki lub maszyny, może zachodzić konieczność wykonania badań w więcej niż jednym kierunku.

Jeżeli technika urabiania jest znana, na przykład stosowane wyjątkowo często urabianie kombajnem ścianowym, to problem sprowadza się jedynie do wyboru kierunku wyznaczenia własności mechanicznych, jak pokazano powyżej. Tak uzyskane wyniki pozwolą na dokładniejsze określenie zapotrzebowania na moc organów urabiających.

Podczas realizacji prac, których wyniki zamieszczono w przedmiotowym artykule, stwierdzono, że zachodzi konieczność przeprowadzenia dalszych badań, w celu określenia jednoznacznych zależności, zwłaszcza w zakresie wpływu zwrotu skrawania podczas badań skrawalności na uzyskiwane wyniki badań. Przeprowadzone badania w różnych kierunkach i w prostopadłych zwrotach dają jedynie ogólny pogląd na tę kwestię, wskazując na występowanie różnic w wynikach.

Najważniejszym wnioskiem oraz zaleceniem jest rozważny wybór kierunku określania własności skał w zależności od planowanej metody. W celu ułatwienia interpretacji wyników oraz wyboru tego kierunku stosować należy przedstawioną metodykę.

Na podstawie przeglądu literatury stwierdzić można, że problem anizotropowości skał pojawia się dosyć często. Badacze zwracają uwagę na wpływ kierunku wyznaczenia własności w stosunku do zalegania, bądź uwarstwienia próbek na uzyskiwane wyniki. Jednak do tej pory zagadnienie to nie zostało opisane kompleksowo w aspekcie mechanicznego urabiania. Przedstawione w artykule zagadnienie wraz z gotowymi zaleceniami odnośnie wyboru kierunku wyznaczenia własności skał oraz ich interpretacji w przypadku doboru sposobu eksploatacji złoża jest pierwszym tego typu opracowaniem.

Literatura

- AGUSTAWIJAYA D. S. 2007 – The Uniaxial Compressive Strength of Soft Rock. *Civil Engineering Dimension*, 9(1), pp. 9-14.
- BIAŁY W. 2014 – Coal cutting force measurement systems - (CCFM). 14th SGEM GeoConference on Science and Technologies In Geology, Exploration and Mining. SGEM2014 Conference Proceedings, Vol. III, pp. 91-98.
- BIAŁY W. 2015 – Innovative solutions applied in tools for determining coal mechanical properties. *Management Systems in Production Engineering*, 4(20), pp. 202-209.
- BOŁOZ Ł. 2018 – Longwall shearers for exploiting thin coal seams as well as thin and highly inclined coal seams, „Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering”, 2(534), pp. 59-65.
- BOŁOZ Ł. 2018 – Mining of thin coal seams using surface-underground methods, „Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering”, 3(535), pp. 59-73.
- BOŁOZ Ł. 2019 – Directions for increasing conical picks' durability, In: *New trends in production engineering*, Sciendo, 2(1), pp. 277-285.
- BOŁOZ Ł. 2020 – Interpretation of the results of mechanical rock properties testing with respect to mining methods. *Acta Montanistica Slovaca*, 25(1), pp. 81-93.
- BOŁOZ Ł., KRAUZE, K., KUBIN, T. 2018 – Mechanisation of longwall extraction of hard and abrasive rocks. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*. Sciendo, 1(1), pp. 331-337.
- BOŁOZ Ł., CASTAÑEDA L. F. 2018 – Computer-aided support for the rapid creation of parametric models of milling units for longwall shearers. *Management Systems in Production Engineering*, 26(4), pp. 193-199.
- BOŁOZ Ł., MIDOR K. 2018 – Process innovations in mining industry and effects of their implementation presented on example of longwall milling heads. *Acta Montanistica Slovaca*, 23(3), pp. 282-292.
- BOŁOZ Ł., MIDOR K. 2019 – The procedure of choosing an optimal offer for a conical pick as an element of realizing the sustainable development concept in mining enterprises. *Acta Montanistica Slovaca*, 24(2), pp. 140-150.
- DINC O., SONMEZ H., TUNUSLUOGLU C., KASAPOGLU K.E. 2011 – A new general empirical approach for the prediction of rock mass strengths of soft to hard rock masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48, pp. 650-665.
- HASILOVÁ K., GAJEWSKI, J. 2019 – The use of kernel density estimates for classification of ripping tool wear, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, pp. 29-34.
- HE M., LI N., ZHU C., CHEN Y., WUA H. 2019 – Experimental investigation and damage modeling of salt rock subjected to fatigue loading, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 114, pp. 17-23.
- HOEK E., BROWN E.T. 1980 – Empirical Strength Criterion for Rock Masses. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 106, pp. 1013-1035.
- KOTWICA K. 2018 – Atypical and innovative tool, holder and mining head designed for roadheaders used to tunnel and gallery drilling in hard rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 82, pp. 493-503.
- KRAUZE K. 2000 – Urabianie skał kombajnami ścianowymi. Wydawnictwo naukowe „Śląsk”, Katowice.
- MAJCHERCZYK T., NIEDBALSKI Z. 2004 – Wpływ nachylenia otworów badawczych na zmianę parametrów wytrzymałościowych skał, XXVII Zimowa szkoła mechaniki górotworu, Kraków, pp. 898-907.
- MAŁKOWSKI P. 2015 – The impact of the physical model selection and rock mass stratification on the results of numerical calculations of the state of rock mass deformation around the roadways, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, pp. 365-375.
- MANSOURI H., AJALLOEIAN R. 2018 – Mechanical behavior of salt rock under uniaxial compression and creep tests, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 110, pp. 19-27.
- MUCHA K. 2019 – The new method for assessing rock abrasivity in terms of wear of conical picks. In: *New Trends in Production Engineering*, Sciendo, 2(1), pp. 186-194.
- MULLER L., PACHER F. 1965 – Modellversuche zur Klärung der Bruchgefahr geklüfteter Medien, *Felsmech. u. Ing. Geol., Suppl. II*, pp. 7-24.
- NASSERIA M.H.B., RAOB K.S., RAMAMURTHYB T. 2003 – Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 48, pp. 626-636.
- OZCELIK Y., YILMAZKAYA E. 2011 – The effect of the rock anisotropy on the efficiency of diamond wire cutting machines, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40, pp. 3-23.
- ÖZBEK A., GÜL M., KARACAN E., ALCA Ö. 2018 – Anisotropy effect on strengths of metamorphic rocks, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10, pp. 165-175.
- PROKOPENKO S. A., VOROBIEV A. V., LYUDMILA A., JANOCKO J. 2018 – Waste Cutters Utilization in Underground Coal Mining, *Acta Montanistica Slovaca*, 23(1), pp. 81-89.
- SCHORMAIR N., THURO K., PLINNINGER R. 2006 – The influence of anisotropy on hard rock drilling and cutting, *The Geological Society of London, IAEG, Paper 491*, pp. 1-11.
- SHUXIN W. 1992 – Fundamental studies of the deformability and strength of jointed rock masses at three dimensional level, dissertation, The University of Arizona (<http://hdl.handle.net/10150/185923>).
- ŤAVODOVÁ M., KALINCOVÁ D., HNILICOVÁ M., HNILICA R. 2016 – The influence of heat treatment on tool properties mulcher, *Manufacturing technology*, 16(5), pp. 1169-1173.

Artykuł wpłynął do redakcji – styczeń 2021
Artykuł akceptowano do druku – 15.03.2021