



# Analiza techniczno-ekonomiczna mechanicznego urabiania skał na przykładzie złoża „Raciszyn”

Tomasz BĘDKOWSKI<sup>1)</sup>, Zbigniew KASZTELEWICZ<sup>2)</sup>,  
Maciej ZAJĄCZKOWSKI<sup>3)</sup>, Mateusz SIKORA<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Mgr inż.; WKG Sp. z o.o. Sp. k. w Raciszynie; email: t.bedkowski@wkg.pl

<sup>2)</sup> Prof. dr hab. inż.; AGH University of Science and Technology, Kraków, Mickiewicza 30, 30-059, Poland; email: kasztel@agh.edu.pl

<sup>3)</sup> Dr inż.; AGH University of Science and Technology, Kraków, Mickiewicza 30, 30-059, Poland; email: maciejz@agh.edu.pl

<sup>4)</sup> Mgr inż.; AGH University of Science and Technology, Kraków, Mickiewicza 30, 30-059, Poland; email: sikoram@agh.edu.pl

DOI: 10.29227/IM-2016-02-12

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki analizy techniczno-ekonomicznej procesu mechanicznego urabiania skał za pomocą młota hydraulicznego, zrywaka wibracyjnego, kombajnu frezującego typu Wirtgen oraz spycharki z osprzętem zrywakowym. W tym celu wykonano próby eksploatacyjne tych maszyn na złożu wapieni jurajskich „Raciszyn”. Określono średnią wydajność poszczególnych maszyn, jednostkowe zużycie paliwa oraz krzywe składu ziarnowego. Dane te stanowiły dane wejściowe do analizy ekonomicznej poszczególnych sposobów mechanicznego urabiania skał dzięki czemu wskazano sposób charakteryzujący się najmniejszym jednostkowym kosztem urabiania

Słowa kluczowe: mechaniczne urabianie skał, skały węglanowe, złożo „Raciszyn”, zrywanie, frezowanie

## Wprowadzenie

W ostatnim czasie coraz częściej odnotowuje się brak możliwości stosowania urabiania skał związanych z wykorzystaniem techniki strzelniczej. Wynika to najczęściej z ograniczeń środowiskowych i potencjalnych konfliktów ze społecznością lokalną. Zjawisko to związane jest z rozwojem budownictwa mieszkaniowego, które swoim zasięgiem terytorialnym zbliża się do granic złóż surowcowych, szczególnie tych udokumentowanych, ale jeszcze niezagospodarowanych.

Brak spójnej polityki w zakresie zagospodarowania przestrzennego dotyczącej ochrony terenów udokumentowanych złóż powoduje niejednokrotnie bezpośrednie sąsiedztwo nowo uruchamianych kopalń odkrywkowych z terenami mieszkaniowymi. Tworzone przez gminy plany w zakresie kształtowania przestrzennego, pomimo uwzględnienia w nich zalegających złóż, często nie uwzględniają minimalnych stref oddziaływania robót wiertniczo-strzałowych na sąsiednie zabudowania. W efekcie, postępowanie formalno-prawne w celu uzyskania koncesji na wydobycie kopaliny wiąże się z koniecznością akceptacji przez przedsiębiorcę górniczego zaostrzonych norm prawnych związanych z oceną wpływu takiej działalności na środowisko, co niejednokrotnie eliminuje możliwość stosowania materiałów wybuchowych do urabiania złoża.

Wzrost konkurencyjności krajowych podmiotów zajmujących się górnictwem odkrywkowym w coraz większym stopniu wymaga od przedsiębiorcy górniczego poszukiwania najbardziej efektywnych ekonomicznie sposobów wszelkich proce-

sów wewnętrznych, które w rezultacie wpływają na koszt wytworzenia 1 Mg surowca [5].

W przypadku braku możliwości zastosowania techniki strzelniczej pojawia się więc pytanie, jakie inne sposoby urabiania kopalin związanych można wziąć pod uwagę przy kryterium minimalizacji jednostkowych kosztów eksploatacji. Alternatywą mogą być mechaniczne sposoby urabiania, charakteryzujące się jednak większą energochłonnością, a co za tym idzie wzrostem kosztów jednostkowych w granicach 30–100% [3]. Wśród alternatywnych sposobów urabiania skał związanych można wymienić zrywanie spycharkami z osprzętem zrywakowym, urabianie kombajnami frezującymi, młotem hydraulicznym czy zrywakiem wibracyjnym. Można jeszcze znaleźć inne sposoby urabiania np. głowicą frezującą czy materiałami pęczniącymi, jednak ich wykorzystanie z uwagi na bardzo ograniczony zakres wydajności nie znalazło szerszego zastosowania w górnictwie odkrywkowym i nie mogą one stanowić alternatywy dla wyżej wymienionych sposobów mechanicznego urabiania.

## Przeprowadzone próby eksploatacyjne mechanicznego urabiania skał

Z uwagi na ograniczenia wynikające z zakazu stosowania technik strzelniczej dokonano prób eksploatacyjnych różnych sposobów mechanicznego urabiania skał. Próby te zostały przeprowadzone na złożu wapieni jurajskich „Raciszyn”, zlokalizowanym w południowej części województwa łódzkiego.

Pozyskiwana kopalina cechuje się małym i średnim stopniem zwięzłości oraz wytrzymałością na

Tab. 1. Średnia wydajności poszczególnych sposobów mechanicznego urabiania skał [opracowanie własne]

Tab. 1. Average capacity of different types mechanic rock extraction [own study]

Badana technologia	Uzyskana średnia wydajność [Mg/h]
urabianie młotem hydraulicznym,	65
urabianie zrywakiem mimośrodkowym,	87
urabianie kombajnem frezującym typu Wirtgen	193
urabianie spycharką z osprzętem zrywakowym	82

Tab. 2. Średnie jednostkowe zużycie paliwa w procesie urabiania [opracowanie własne]

Tab. 2. Average unit fuel consumption of extraction process [own study]

Parametr	Koparka +młot	Koparka + zrywak	Kombajn Wirtgen	Spycharka
Średnie jednostkowe zużycie paliwa przy [litr/h]	43	43	87	45
Średnia wydajność [Mg/h]	65	87	193	82
Średnie jednostkowe zużycie paliwa na 1 Mg urobku [litr/Mg]	<b>0,66</b>	<b>0,49</b>	<b>0,45</b>	<b>0,55</b>

ściskanie na poziomie 50-60 MPa. Oznaczenia próbek urobku będącego reprezentatywnym dla badanej części złoża dokonano w akredytowanym Laboratorium Surowców i Wyróbów Budowlanych Instytutu Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego w Warszawie. Średnia wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie urabianej części złoża wyniosła 57 MPa. Uzyskany materiał charakteryzował się stabilnymi i powtarzalnymi właściwościami fizyko-mechanicznymi.

W celu uzyskania najbardziej obiektywnej oceny wyników pomiarowych, testy eksploatacyjne dokonano w zbliżonych warunkach geologicznych złoża wapieni jurajskich „Raciszyn” w jednorodnym geologicznie obszarze o powierzchni ok. 3 ha [2].

Wyniki przeprowadzonych badań „in situ” stanowiły podstawę do przeanalizowania wpływu sposobów mechanicznego urabiania skał węglanowych na parametry techniczno-ekonomiczne procesu produkcji kruszywa.

Jednym z kluczowych parametrów, będącym przedmiotem analiz było określenie poziomu wydajności rzeczywistej wybranej technologii. Ponadto dokonano oceny kosztów bezpośrednich procesu urabiania takich jak: zużycie paliwa, części zamiennych, serwisu czy kosztów obsługi. Następnie przeprowadzono analizy krzywych składu ziarnowego uzyskanej nadawy.

Istotnym założeniem, będącym podstawą analizy techniczno-ekonomicznej, było określenie wydobywania rocznego w ilości 700 tys. Mg wyrobu gotowego, co odpowiadało wydajności wszystkich

procesów produkcyjnych na poziomie 190 Mg/h. Jako wyrób gotowy traktowano frakcję 0-31,5 mm kruszywa wapiennego.

Zatem wybór najbardziej efektywnego sposobu urabiania mechanicznego powinien dodatkowo uwzględniać aspekty wydajnościowe zarówno urządzenia urabiającego, jak i pozostałych urządzeń w układzie technologicznym.

#### *Analiza średniej wydajności maszyn urabiających*

Próby eksploatacyjne wykonano przy wykorzystaniu następujących sposobów mechanicznego urabiania skał:

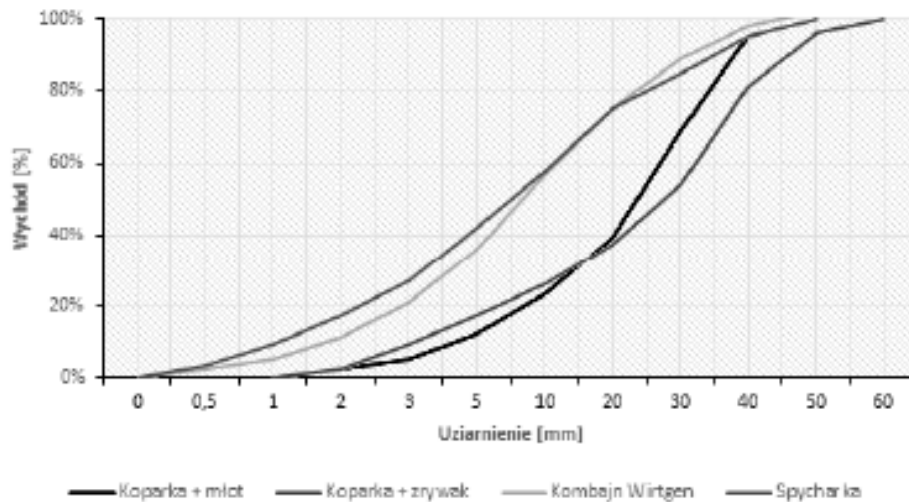
- urabianie młotem hydraulicznym (koparka jednoznaczyniowa Hitachi ZX 470 LCH z młotem hydraulicznym Atlas Copco HB4700),
- urabianie zrywakiem mimośrodkowym (koparka Volvo EC460BLC ze zrywakiem wibracyjnym Xcentric Ripper XR50),
- urabianie kombajnem powierzchniowym typu Wirtgen (Surface Miner 2200 SM),
- urabianie spycharką z osprzętem zrywakowym (CAT D9N).

Pomiary parametrów procesu urabiania dokonane zostały poprzez precyzyjne uzupełnianie paliwa w maszynach oraz bieżące pomiary masy urobku na wadze firmy Tamtron, zainstalowanej na ładownicy Komatsu WA 470.

Uzyskaną średnią wydajności poszczególnych sposobów mechanicznego urabiania skał przedstawiono w tabeli 1.

Rys. 1. Porównanie krzywych składu ziarnowego w zależności od sposobu mechanicznego urabiania skał [opracowanie własne]

Fig. 1. Comparison of size distribution curves depending on different types of mechanic rock extraction [own study]



Wyniki prób terenowych wykazały, że największą wydajność uzyskano przy urabianiu kombajnem frezującym typu Wirtgen, który wyniosła 193 Mg/h, natomiast najmniejszą młotem hydraulicznym, która wyniosła 65 Mg/h.

#### **Analiza energochłonności maszyn urabiających**

W trakcie prób eksploatacyjnych mierzono zużycie paliwa przez poszczególne maszyny. Wszystkie maszyny zasilane były tym samym źródłem paliwa, którym był olej napędowy. Zestawienie wyników średniego jednostkowego zużycia paliwa przedstawiono w tabeli 2.

Największym jednostkowym zużyciem paliwa na godzinę pracy charakteryzował się kombajn frezujący Wirtgen osiągając poziom 87 litrów/h. Pozostałe maszyny charakteryzują się podobnym poziomem zużycia paliwa, który wahał się w niewielkim zakresie, od 43 do 45 litrów/h.

Ponieważ jednostkowe zużycie paliwa nie jest pełnym wskaźnikiem energochłonności procesu urabiania, porównano także średnie jednostkowe zużycie paliwa na 1 Mg urobionego materiału dla każdej maszyny urabiającej. W tym przypadku różnice były znacznie większe. Najmniejsze jednostkowe zużycie paliwa na 1 Mg urobku odnotowano przy urabianiu kombajnem frezującym, które wyniosło 0,45 litrów/Mg. Natomiast największą wartość uzyskano przy urabianiu koparką z młotem hydraulicznym gdzie zużycie to wyniosło aż 0,66 litrów/Mg.

Na tej podstawie można już stwierdzić, że najbardziej energochłonnym procesem urabiania odznacza się koparka z młotem hydraulicznym, a następnie spycharka z osprzętem zrywawkowym.

Natomiast najmniej energochłonnymi sposobami spośród badanych są kombajn frezujący oraz koparka ze zrywakiem wibracyjnym.

#### **Analiza krzywych składu ziarnowego urobku uzyskanego z poszczególnych sposobów mechanicznego urabiania skał**

Badania poszczególnych sposobów mechanicznego urabiania skał wykazały bezpośredni związek pomiędzy zastosowanym sposobem, a stopniem rozdrobnienia materiału. W celu porównania stopnia rozdrobnienia urobku najczęściej stosuje się wielkość charakteryzującą średni rozmiar ziaren po odrzuceniu 20% ziaren największych. Jest ona oznaczana jako  $P_{80}$ . Wielkość ta jest podstawowym wyznacznikiem doboru technologii kruszenia i oceny jej efektu [1, 4].

Na rysunku 1 przedstawiono porównanie uziarnienia nadawy uzyskanej różnymi sposobami mechanicznego urabiania.

Powyższa analiza wyraźnie pokazuje różnice w rozdrobnieniu urobku uzyskanego różnymi sposobami mechanicznego urabiania skał. Kombajn frezujący Wirtgen najskuteczniej rozdrabniał urobek jednocześnie generując przy tym znaczne ilości frakcji pylistych. Z drugiej strony, urabianie młotem hydraulicznym i zrywakiem wibracyjnym są technologiami wskazanymi do zastosowania kiedy potrzeba mniejszego rozdrobnienia urobku oraz eliminacji frakcji pylistych.

W tabeli 3 przedstawiono zbiorcze zestawienie wskaźnika  $P_{80}$  uzyskanego dla różnych sposobów mechanicznego urabiania skał.

Tab. 3. Zbiorcze zestawienie wskaźnika  $P_{80}$  oraz wskaźnika równomierności uziarnienia U [opracowanie własne]

Tab. 3. Summary of P80 factor and size composition uniformity U factor [own study]

Parametr	Koparka +młot	Koparka + zrywak	Kombajn Wirtgen	Spycharka
Wskaźnik $P_{80}$ [cm]	45	50	25	35
Wskaźnik równomierności uziarnienia U	4,8	10,5	6	10

Tab. 4. Zestawienie jednostkowych kosztów urabiania w zależności od sposobów mechanicznego urabiania skał [opracowanie własne]

Tab. 4. Summary of unit costs depending on different types of mechanic rock extraction [own study]

Parametr	Koparka +młot	Koparka + zrywak	Kombajn Wirtgen	Spycharka
Jednostkowy koszt urabiania [zł/Mg]	<b>6,00</b>	<b>4,61</b>	<b>4,37</b>	<b>6,13</b>
Różnica w stosunku do najniższego kosztu [%]	137	106	100	140

Najmniejszą wielkością ziaren, wg wskaźnika  $P_{80}$ , charakteryzował się urobek pochodzący z kombajnu frezującego Wirtgen. Drugim wynikiem, charakteryzował się urobek pochodzący od spycharki z osprzętem zrywakowym, dla którego  $P_{80}$  wyniosło 35 cm. Wynik ten, jest efektem nie tyle działania samego zrywaka, co kilkakrotnych przejazdów po urobionej caliznie podwozia gąsienicowego spycharki, co zwiększało rozdrobnienie urobku. Urobek uzyskany przez zrywak wibracyjny oraz młot hydrauliczny cechuje większy udział frakcji grubych. Poziom 80% uzyskanej nadawy wykazała wielkość ziaren poniżej 45 cm dla młota hydraulicznego oraz 50 cm dla zrywaka wibracyjnego.

Natomiast najmniejszy wskaźnik równomierności uziarnienia osiągnięto w przypadku urobku z młota hydraulicznego, który wyniósł 4,8. Wynik ten należy interpretować jako najbardziej jednorodny materiał w zakresie uzyskanego uziarnienia. Należy zauważyć, że taki materiał jest najbardziej pożądany do produkcji grysów budowlanych oraz grubych frakcji kruszywa. Analiza wykazała jednocześnie, że największy wskaźnik U uzyskano dla nadawy pochodzącej ze zrywaka wibracyjnego, który wyniósł aż 10,5.

### Analiza ekonomiczna

Z punktu widzenia porównywalności wyników przeprowadzonych badań istotny jest poziom uzyskiwanych wydajności poszczególnych układów technologicznych. Przeprowadzone badania wykazały znaczne różnice w ilości pozyskanego urobku w jednostce czasu. Przykładem może być tutaj kombajn frezujący Wirtgen, którego średnia wydajność godzinowa zmierzona podczas badań

na poziomie 193 Mg/h, jest trzykrotnie większa niż zestawu koparka + młot hydrauliczny.

Chcąc osiągnąć roczną zdolność produkcyjną w założonej ilości 700 000 Mg (ok. 190 Mg/h), wyrównano wydajności wszystkich badanych sposobów urabiania poprzez zwielokrotnienie niektórych zastawów roboczych maszyn.

W wyniku zwielokrotnienia zestawów maszynowych otrzymano następujące wydajności wynikowe:

- koparka z młotem hydraulicznym w trzech zestawach – 192 Mg/h;
- koparka ze zrywakiem wibracyjnym w dwóch zestawach – 174 Mg/h;
- kombajn frezujący Wirtgen – 193 Mg/h;
- spycharka z osprzętem zrywakowym w dwóch zestawach – 164 Mg/h;

Analizując poszczególne układy technologiczne należy ponadto zwrócić uwagę na proces urabiania kombajnem frezującym Wirtgen. W tym przypadku urobek ładowany jest bezpośrednio na wozidła technologiczne, bez udziału pracy ładowarki. W pozostałych przypadkach udział ładowarki jest niezbędny. W przypadku analizy techniczno-ekonomicznej procesu urabiania korzyści z tego wynikające nie zostały uwzględnione.

W analizie ekonomicznej uwzględniono następujące parametry:

- średnią wydajność maszyn urabiających uzyskaną w próbach eksploatacyjnych,
- średnie jednostkowe zużycie paliwa maszyn urabiających uzyskane w próbach eksploatacyjnych,
- nakłady inwestycyjne na zakup poszczególnych maszyn jako maszyn nowych,



- czas amortyzacji maszyn wynoszący 60 miesięcy,
- koszty serwisu i napraw maszyn urabiających wynoszących 12% nakładów inwestycyjnych rocznie,
- koszty wynagrodzeń i ubezpieczeń społecznych operatorów maszyn urabiających na 5.000 zł/m-c,
- pozostałe koszty operacyjne związane z nadzorem górniczym, oświetleniem wyrobiska, ubezpieczenia itp. wynoszące 25.500 zł/m-c.

Dodatkowo, w przypadku kombajnu frezującego Wirtgen uwzględniono także koszt wody niezbędnej do chłodzenia bębna frezującego w wysokości 5.000 zł/m-c.

Zbiornicze zestawienie jednostkowych kosztów urabiania w zależności od wybranych sposobów mechanicznego urabiania skał przedstawiono w tabeli 4.

Jak wynika z danych w tabeli 4, najniższym jednostkowym kosztem urabiania charakteryzuje się kombajn frezujący Wirtgen, następnie koparka ze zrywakiem wibracyjnym, którego jednostkowy koszt urabiania jest większy o 6% od kombajnu. W przypadku koparki z młotem hydraulicznym i spycharki z osprzętem zrywającym koszty te są już znacznie większe, odpowiednio o 37% i 40%.

## **Wnioski**

Mechaniczne sposoby urabiania skał stanowią alternatywę dla klasycznego urabiania z wykorzy-

staniem robót wiertniczo-strzałowych. Pomimo znacznie wyższej energochłonności, która przekłada się na koszty produkcji, sposoby te w wielu przypadkach są jedynymi dostępnymi rozwiązaniami pozyskania kopaliny. Taka sytuacja wystąpiła na złożu wapieni jurajskich „Raciszyn”, gdzie sąsiadująca zabudowa mieszkaniowa wykluczyła prowadzenie prac wiertniczo-strzałowych.

Przeprowadzona analiza techniczno-ekonomiczna określiła poziom energochłonności oraz koszt jednostkowy urabiania kopaliny ze złoża wapieni jurajskich „Raciszyn”. Uzyskane wyniki należy jednak traktować jedynie jako fragment procesu produkcji 1 Mg wyrobu gotowego, jakim jest kruszywo wapienne. Należy zaznaczyć, że urobek pozyskany przy wykorzystaniu różnych sposobów mechanicznego urabiania skał wykazywał różną krzywą składu ziarnowego. W wyniku obserwacji stopień rozdrobnienia urobku, a tym samym jego gęstość nasypowa może mieć wpływ na wielkość kosztów pozostałych procesów technologicznych, takich jak transport i kruszenie. Wielkość nadawy może zmieniać stopień wypełnienia skrzyni wozideł technologicznych oraz wydajność kruszarki. Dlatego też, w celu określenia najkorzystniejszego sposobu mechanicznego urabiania skał należy przeprowadzić analizę kosztową poszczególnych urządzeń biorących udział w pozostałym procesie produkcji kruszyw.

## Literatura – References

1. Bęben A., Maszyny i urządzenia do wydobywania kopalin pospolitych bez użycia materiałów wybuchowych, AGH Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2008
2. Będkowski T., Kasztelewicz Z., Sikora M., Raciszyn – unikatowe złożo wapieni, Kamieniarz 05/2013
3. Kasztelewicz Z., Zajączkowski M., Sikora M., Przegląd mechanicznych sposobów urabiania skał zwięzłych, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Nr 136 Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013
4. Pradhan P., Dey K., Rock cutting with surface miner: A computational approach, Journal of Engineering and Technology Research Vol. 1, 2009
5. Scoble J., Muftuoglu V., Derivation of a diggability index for surface mine equipment selection, Mining Science and Technology, Vol. 1, 1984

### *Technical and Economic Analysis of Mechanical Rock Extraction Based on ‘Raciszyn’ Deposit*

*The paper presents results of technical and economic analysis of mechanical rock extraction process using hydraulic hammer breaker, eccentric ripper, Wirtgen surface miner and dozer with ripper equipment. Performance tests have been made on ‘Raciszyn’ limestone deposit for this purpose. Average capacity, unitary fuel consumption, size distribution curves for every machine has been defined. It was an input data for economic analysis for each method of mechanical rock extraction which allowed to estimate minimal unitary extraction cost.*

*Keywords: mechanical rock extraction, carbonate rock, ‘Raciszyn’ deposit, ripping, cutting*