

*przeróbka rud, rozdrabianie,
modernizacja, ekonomika*

Jerzy MALEWSKI, Gabriela PASZKOWSKA¹
Marcin ŻREBIEC²

EKONOMICZNA OCENA MODERNIZACJI UKŁADU KRUSZENIA RUDY W ZWR LUBIN

Przedstawiono wyniki analizy efektów ekonomicznych modernizacji układu kruszenia rudy w ZG Lubin. Podstawą tej analizy są wyniki badania efektywności zmian technologii i techniki rozdrabiania i klasyfikacji tego układu opisane w publikacji (Malewski 2015). W niniejszym artykule dokonano oszacowania kosztów inwestycyjnych i operacyjnych tych zmian. Wyniki analizy pokazują opłacalność realizacji takiego projektu. Koszt produkcji (nadawy do młynów prętowych) może być obniżony nawet o 28% w stosunku do stanu zerowego. W szczególności efekt ten jest widoczny, jeśli koszty te powiązane zostaną z uzyskaniem większym stopniem rozdrobienia kruszonej rudy, co ma poważny wpływ na efektywność kolejnych operacji rozdrabiania.

1. WSTĘP

Proces technologiczny rozdrabiania rudy w Zakładzie Wzbogacania Rudy kopalni Lubin realizowany jest w układzie w kilku stadiach:

0. urabianie MW i dokruszenie wstępne „na kracie” odstrzelonej rudy do wielkości poniżej 400 mm,

¹ Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej,
jerzy.malewski@pwr.edu.pl, gabriela.paszowska@pwr.edu.pl

² marcos1989@o2.pl

1. kruszenie pierwotne w układzie zamkniętym (ruszt) w kruszarkach młotkowych do 40 mm,
2. kruszenie wtórne w układzie otwartym w kruszarce stożkowej do ok. 30 mm,
3. mielenie w młynach prętowych do ziaren ok. 2 mm,
4. mielenie w młynach kulowych do ziaren ok. 200 μm ,
5. domielanie w młynach cylpebsowych w układzie zamkniętym do wielkości ziaren ok. 40 μm .

Przedmiotem analizy jest układ kruszenia w stadiach 1–2, którego produktem jest nadawa do stadium mielenia grubego w młynach prętowych. Praktycy produkcyjni uważają, że zmniejszenie wielkości ziaren w produkcie tego układu (w nadawie mły na prętowego) do 15 mm może poprawić sprawność operacji mielenia. W artykule (Malewski 2015) na ten temat pokazano, że jest to możliwe przez modernizację technologii (zastosowanie obiegu zamkniętego) i wymianę maszyn podstawowych (kruszarki i przesiewacze). W tym artykule zostaną oszacowane efekty ekonomiczne takiej modernizacji. Przyjęto przy tym założenie, że porównywane systemy traktowane są jak nowe, co pozwala na obiektywną wycenę efektów przedmiotowej modernizacji.

2. STAN OBECNY I KONCEPCJA MODERNIZACJI

Nadawa do ZWR pochodzi w całości z kopalni „Lubin”. Jest to mieszanina skał miedzionośnych: węglanów, łupka i piaskowca. Produkt urabiania wydobywany jest na powierzchnię szybem skipowym i kierowany na układ dwóch równolegle pracujących przesiewaczy wibracyjnych, dwupokładowych (PWR1-2)³, o średnicach oczek pokładów 15 i 40 mm. Głównym zadaniem operacji przesiewania jest separacja urobku pod względem litologicznym oraz eliminacja zawartości drobnych frakcji (głównie piaskowcowych) z nadawy do kolejnego stadium kruszenia. Układ rudy dolomitowej nazywany jest ciągiem I, a układ rudy piaskowcowej – ciągiem II (rys. 1).

Produktem dolnym przesiewaczy PWR1-2 jest łatwo wzbogacalna frakcja piaskowcowa. Stanowi ona nadawę do młynów przerobowych II ciągu technologicznego.

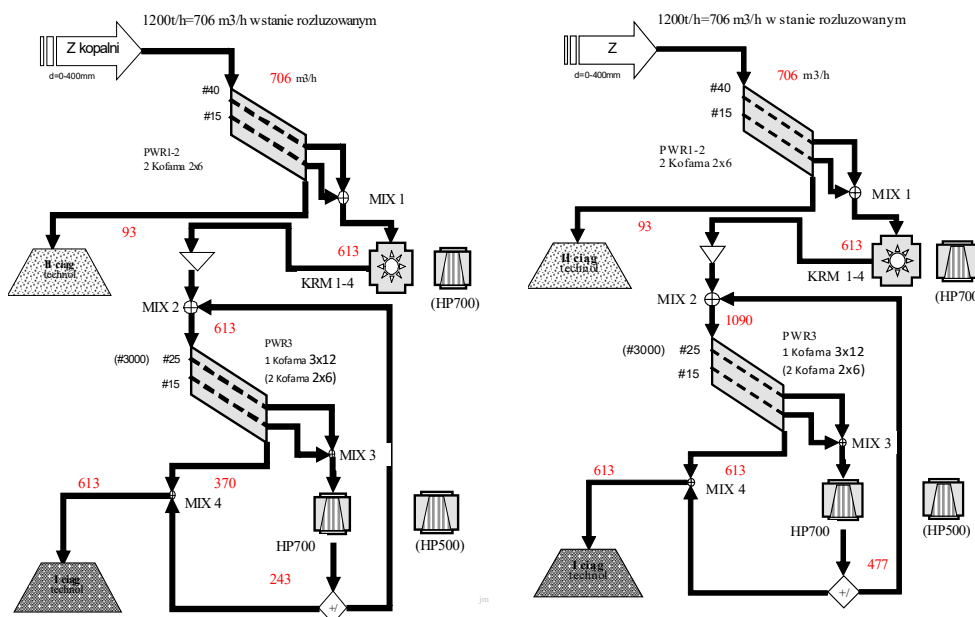
Produkt górny (frakcja łupkowo-węglanowa o średniej zawartości Cu ~1,0%) przenoszona jest przenośnikami taśmowymi do zbiorników nad kruszarkami i dalej przenośnikami członowo- płytowymi do kruszarek młotkowych KRM0-4 (Makrum), o szczelinie rusztów 40 mm. Produkt kruszenia kierowany jest do zbiornika (magazy nu) rudy pokruszonej, z którego zasilany jest 2. stopień kruszenia, poprzedzony przesiewaniem na przesiewaczu wibracyjnym, jednopokładowym (PWR3 Kofama), o oczku sita 15 mm. Produkt górny przesiewacza kierowany jest przez zbiornik zasypowy do kruszarki stożkowej (KR5 – HP700 Nordberg). Wprowadzenie drugiego stopnia kru-

³ PWR1-2 i KRM0-4, KR-5 to zakładowe oznaczenie maszyn, odpowiednio: przesiewaczy wibracyjnych, dwumasowych nr 1 i 2 firmy KOFAMA typ PZ, kruszarek młotkowych o numerach 0–4 firmy MAKRUM typ 40.80; kruszarki stożkowej KR-5 typ HP700 firmy Nordberg – Metso Minerals.

szczenia pozwoliło na zmniejszenie uziarnienia rudy I ciągu technologicznego z 40 mm do ok. 15 mm.

Produkt dolny przesiewacza PWR3, połączony z produktem kruszarki stożkowej (KR5), jest kierowany przenośnikami do zbiorników w hali młynowni, z których zasilane są młyny I ciągu technologicznego.

Technologię kruszenia i parametry maszyn pokazano na rysunku 1, z pominięciem operacji i urządzeń transportująco-magazynujących, które również nie były brane do obliczeń ekonomicznych. Rysunek zawiera elementy wszystkich wariantów. Przez wyłączenie tych elementów lub zmianę maszyn i/lub ich parametrów uzyskano potrzebną konfigurację systemu. Na przykład w układzie 1.1 i 2.1 (aktualne maszyny – tab. 1) elementami czynnymi w przesiewaczu PWR3 (Kofama 3×12 m²) będzie tylko pokład dolny z wyłączonym lub włączonym obiegiem nadziarna. Z kolei np. w wariacie 2.1 i 2.2, w miejsce przesiewacza PWR3 będą dwa przesiewacze jak PWR1-2, a także zamienione kruszarki młotkowe KRM1-4 na stożkową 1HP700 (przeniesioną z 2 stopnia kruszenia); w tym przypadku kruszarka HP700 będzie zastąpiona mniejszą 1HP500.



Rys. 1. Podstawowy układ technologiczny poddany analizie i ocenie. Przez wyłączenie lub zmianę elementów otrzymujemy struktury (tab.1). W nawiasach alternatywne maszyny i/lub ich parametry. Natężenie strumieni dla układu otwartego (na lewo) i zamkniętego (na prawo)

Fig. 1. Basic configuration of technological system to be analysed. By excluding or including some operations one can obtain appropriate variant of calculation. In brackets alternative devices and/or its parameters. Yield of flows for open circuit (left) or closed circuit (right)

3. ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ

Obliczenia efektów technologicznych modernizacji układu opierają się na modelach matematycznych operacji kruszenia i przesiewania, które uwzględniają wpływ obciążenia maszyn i składu ziarnowego nadawy na efekty operacji. Obciążenie i skład ziarnowy nadawy odgrywają szczególną rolę w sprawności przesiewania, co ma wpływ na wydajność maszyn i skład ziarnowy produktów operacji, a w przypadku stosowania obiegu zamkniętego – na ilość masy krążącej w układzie. Natomiast czynniki te nie mają wpływu na ilości produktów finalnych jeśli nie zmienia się natężenie strumienia nadawy do systemu. Można to zaobserwować na rysunku 1, gdzie pokazano wyniki ilościowe dla wariantu z obiegiem zamkniętym nadziarna w układzie drugiego stadium kruszenia. Rozpatrzono kilka możliwych wariantów struktury, liczby i rodzaju maszyn. W tym artykule ograniczono się do przedstawienia czterech wariantów jak w tabeli 1.

Tab. 1. Warianty obliczeń układów operacji, gdzie: 2 PZ2×6 – 2 przesiewacze 2-pokładowe o wymiarach sit 2×6 m²; 1PZ3×12 – jeden przesiewacz 1-pokładowy o wymiarach sita 3×12 m²;

KM – kruszarki młotkowe, HP500/700 – kruszarki stożkowe Nordberg

Tab. 1. Calculation of the system variants, where: 2 PZ2×6 – 2 screens 2-deck 2×6 m²; 1PZ3×12-one 1-deck screen 3×12 m²; KM – hammer crushers, HP500/700 – Nordberg cone crushers

Wariant <i>i/j</i>	1. Istniejące maszyny	2. Wymiana kruszarek i przesiewaczy
1. układ otwarty	2PZ2×6 + 4 KM + 1PZ3×12 + 1HP700	2PZ2×6 + 2HP700 + 2PZ2×6 + 1HP500
2. układ amknięty	2PZ2×6 + 4KM + 1PZ3×12 + 1HP700	2PZ2×6 + 2HP700 + 2PZ2×6 + 1HP500

4. WYNIKI OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH TECHNOLOGICZNYCH I EKONOMICZNYCH EFEKTÓW MODERNIZACJI

Analiza porównawcza efektywności badanych wariantów konfiguracji systemu wymaga określenia kryterium – miary efektywności. Miarą technologiczną będzie średnia wielkość ziaren końcowego produktu rozdrabiania i uzyskany stopień rozdrobienia. Miarą ekonomiczną będzie różnica kosztów produkcji, odniesiona do jednostki wydajności systemu i uzyskanego stopnia rozdrobienia.

W analizowanym systemie mamy do czynienia z dwoma produktami: ciągu piaskowcowego i dolomitowego. W takim razie wynikiem syntetycznym całości będzie średnia ważona wg wydajności i uzyskanego stopnia rozdrobienia rudy w obu podsystemach (ciągach) technologicznych. Tabela 2 zawiera wyniki obliczeń technologicznych wg układu maszyn jak w tabeli 1.

Tab. 2. Przewidywane efekty zmian struktury układu operacji i maszyn w obecnym i zmienionych układach kruszenia

Tab. 2. Predicted results of crushing system efficiency in actual or modified flowsheet

Wariant <i>i/j</i>		Aktualny i zmieniony system $Q_0 = 705,88 \text{ m}^3$ (nadawa), $D_{sr} = 151,55 \text{ mm}$			
		I ciąg	II ciąg	I ciąg	II ciąg
układ otwarty	Q [m^3/h]	613	93	613	93
	d_{sr} [mm]	7,36	5,29	4,82	5,29
	r_{sr}	20,59	28,65	31,44	28,65
	γ (udziały)	0,868	0,132	0,868	0,132
	uśredniony stopień rozdrobienia $r = \gamma_1 \cdot r_1 + \gamma_2 \cdot r_2$	22		31	
układ zamknięty	Q [m^3/h]	613	93	613	93
	d_{sr} [mm]	2,99	5,29	2,44	5,29
	r_{sr}	50,68	28,65	62,11	28,65
	γ (udziały)	0,868	0,132	0,868	0,132
	uśredniony stopień rozdrobienia $r = \gamma_1 \cdot r_1 + \gamma_2 \cdot r_2$	48		58	

Wyniki analiz technologicznych poddane zostały ocenie ekonomicznej w oparciu o dane poradnikowe (Mining & Mill Equipment Cost... 2010). Publikacja ta zawiera informacje o cenach rynkowych maszyn górniczych, przeróbczych i transportowych, a także o kosztach operacyjnych, podanych jako przeciętne wielkości dla całego przemysłu surowcowego. W tabeli 3 zestawiono wartości wykorzystane do obliczeń ekonomicznych.

Tab. 3. Koszty inwestycyjne i operacyjne przyjęte do obliczeń

Tab. 3. Capital and operating costs assumed for the calculations

Maszyna	Liczba maszyn	Koszty inwestycyjne			
		wartość zakupu i instalacji [\$]	amortyzacja	ubezpieczenia/ /licencje... [\$/h]	razem
HP 700	1	1 427 250	16,29	0,57	16,86
PZ2×6	2	95 500	1,09	0,04	1,13
PZ3×12	1	129 300	1,48	0,05	1,53
KM	4	574 600	6,56	0,23	6,79
HP500	1	917 600	10,47	0,37	10,84
przenośniki (ukł. zamkn.)	2	11 000	0,13	0,00	0,13

cd. tab. 3. / Tab. 3 continued

Maszyna	Godzinowe koszty operacyjne [\$/h]							
	przeeglądy/konserwacje		naprawy		energia	płyny/ oleje	zużycie elementów	razem
	części	praca	części	praca				
HP 700	20,81	22,89	38,65	42,51	35,51	8,16	14, 17	182,70
PZ2×6	0,72	1,08	1,33	2,01	0,00	0,55	0,00	5,69
PZ3×12	0,97	1,46	1, 80	2,72	0,00	0,74	0,00	7,69
KM	8,38	9,22	15,56	17,11	0,00	3,28	8,51	62,06
HP500	13,38	14,72	24,85	27,33	22,19	5,24	11,06	118,77
przenośniki	0,08	0,08	0,06	0,06	1,78	0,06	0,00	2,12

Tab. 4. Koszty inwestycyjne/operacyjne/eksploatacyjne/różnicowe rozpatrywanych wariantów [\$/rok]

Tab. 4. Capital/operating/running costs of analyzed variants, USD per annum

Wariant <i>i/j</i>	1. Istniejące maszyny	2. Wymiana maszyn	Koszty $K(i, j)$
1. układ otwarty	404 595	272 685	inwestycyjne $Ki(i, j)$
	4 360 906	312 2510	operacyjne $Ko(i, j)$
	4 765 501	3 395 195	eksploatacyjne $Ke(i, j) = Ki(i, j) + Ko(i, j)$
	0	-1 370 306	różnicowe $Kr(i, j) = Ke(i, j) - Ke(1, 1)$
2. układ zamknięty	406 795	274 885	inwestycyjne $Ki(i, j)$
	4 400 320	3 161 924	operacyjne $Ko(i, j)$
	4 807 115	3 436 809	eksploatacyjne $Ke(i, j) = Ki(i, j) + Ko(i, j)$
	41 614	-1 328 692	różnicowe $Kr(i, j) = Ke(i, j) - Ke(1, 1)$

Tab. 5. Efekt końcowy modernizacji obliczony jako wzrost/obniżenie kosztu produkcji

jKe na: godzinę, m³ produkcji, lub m³ i stopień rozdrobienia *r*Tab. 5. Final economical results of system reconstruction as increase/decrease of unitary production costs *jKe* expressed in \$/h, \$/m³ or \$/m³/*r*

Warianty <i>i/j</i>	<i>jKe</i> [\$/h]		<i>jKe</i> [\$/m ³]		<i>jKe</i> [\$/m ³ / <i>r</i>]	
	1. stary	2. nowy	1. stary	2. nowy	1. stary	2. nowy
1. układ otwarty [$jKe(i, j) - jKe(1, 1)$]	544,01	387,58	0,771	0,549	0,036	0,018
	[0,00]	[-156,43]				
2. układ zamknięty [$jKe(i, j) - jKe(1, 1)$]	548,76	392,33	0,777	0,556	0,016	0,010
	[4,75]	[-151,68]				

5. WNIOSKI

Analiza układu kruszenia w ZWR Lubin pokazuje, że warto rozważyć modernizację tego układu. Wprawdzie wykonane obliczenia oparto na bardzo prowizorycznych danych i bez weryfikacji empirycznej wyników tych obliczeń, to nawet przy takich zastrzeżeniach można z dużym prawdopodobieństwem twierdzić, że istniejący układ jest mało skuteczny, co do zakładanej funkcji jaką ma odegrać dla układu mielenia, a przy tym kosztowny w eksploatacji z powodu użytych maszyn i stopnia ich wykorzystania.

Analiza technologiczna układu pokazała, że jest on mało skuteczny pod względem wydzielenia frakcji piaskowcowej. Sprawność wydzielenia tej frakcji dla ciągu II wynosi zaledwie 20%, a lokalizacja tej operacji przed kruszarkami I stopnia wydaje się być błędnym wyborem.

Obecny układ pracuje w układzie otwartym, co nie jest rozwiązaniem ani racjonalnym (brak kontroli uziarnienia), ani optymalnym. Porównanie obliczeń wariantów 1.1 i 1.2 (tab. 1 i 2) pokazuje, że zamknięcie obiegu nadziarna w układzie powoduje dwukrotne zmniejszenie średniego ziarna w produkcie ciągu I (dolomitowym).

Kruszarki młotkowe powinny być już dawno zastąpione bardziej wydajnymi kruszarkami stożkowymi. Analiza obciążenia tych maszyn pokazuje, że wydajność jednej (HP700) jest wystarczająca do przeniesieniażądanego obciążenia. Poza tym, w miejsce kruszarki HP700, z powodzeniem może być zainstalowana mniejsza jednostka.

Zmiana maszyn w układzie (wariant 2.1 i 2.2) nie zmieni istotnie składu ziarnowego, ale poprawi wykorzystanie tych maszyn i koszty ich eksploatacji. Przy tym taki układ łatwo poddaje się regulacji parametrów i w konsekwencji – optymalizacji produkcji przy zmiennych parametrach rudy.

Ekonomiczne skutki modernizacji układu dowodzą również racjonalności takiej inwestycji. Obliczenia pokazują, że można o 28% procent zmniejszyć jednostkowe (godzinowe) koszty produkcji, ale nawet o 50% można zmniejszyć te koszty jeśli przeliczymy je na jednostkę stopnia rozdrobienia.

Wykonane obliczenia opierają się na bardzo szacunkowych danych empirycznych i być może zbyt mocnych założeniach co do wyboru maszyn i kosztów modernizacji, ale skala obliczonych efektów jest na tyle duża, że warto takie propozycje rozważać.

LITERATURA

- MALEWSKI J., 2015, *Analiza układu kruszenia rudy w ZWR Lubin*, Mining Science, vol. 22(1), 93–93.
Mining & Mill Equipment Cost, and Estimator Guide, 2010, InfoMine Inc.
ŻREBIEC M., 2015, *Koncepcja i koszty modernizacji układu pierwszego stadium kruszenia w ZWR Lubin*, Praca dyplomowa, Wydział Geoinżynierii, Górnicztwa i Geologii PWr.

ANALYSIS OF THE CRUSHING SYSTEM IN THE LUBIN ORE MINE

The paper presents results of crushing system analysis, that is used as subsystem in the Lubin ore mine processing installation. Crushing effect was measured with average particle size in final crushing product of carbonate (I) and sandstone (II) ore subsystems. Impact of the crushing circuit looping, used to avoid oversize in the final product, as well as effect of modernizing of processing machinery on system efficiency has been studied. Simulations showed that looped circuits, against unlooped, reduce twice the average grain size in the final product. Even the production cost per unit capacity $\$/m^3$ is decreased by 28%, or twice of that relating to the size reduction ratio.

Keywords: *ore processing, crushing, modernization, economics*