

Jerzy MALEWSKI<sup>1</sup>

## **ANALIZA UKŁADU KRUSZENIA RUDY W ZWR LUBIN**

Przedstawiono wyniki analizy efektywności technologicznej układu kruszenia w instalacji rozdrabiania rudy kopalni Lubin. Efekt rozdrabiania mierzono średnim ziarnem produktu kruszenia w tzw. ciągach węglanowym (I) i piaskowcowym (II). Badano m.in. wpływ zamknięcia obiegu nadziarna oraz zastąpienie kruszarek młotkowych kruszarkami stożkowymi. Obliczenia symulacyjne pokazały, że zamknięcie obiegu nadziarna pozwala zmniejszyć średnie ziarno w produkcie I-ciągu niemal dwukrotnie.

### **1. WSTĘP**

Proces technologiczny w Zakładzie Wzbogacania Rudy kopalni Lubin realizowany jest w układzie kilku (makro)operacji:

I – rozdrabianie (kruszenie i mielenie),

II – wzbogacanie (flotacja),

III – odwadnianie koncentratu (zagęszczanie, filtracja i suszenie).

Rozdrabianie jest podstawowym procesem technologii przygotowania rudy miedzi do wzbogacania. Celem tej operacji jest uwolnienie minerałów miedzi przez pomniejszenie cząstek od wielkości metrowych do  $\mu$ -metrowych, co jest możliwe w następujących po sobie stadiach kruszenia i mielenia. W ZWR stosuje się sześciostadialny układ rozdrabiania:

0. kruszenie wstępne „na kracie” odstrzelonej rudy do wielkości poniżej 0,4 m,

1. kruszenie pierwotne w układzie zamkniętym (ruszt) w kruszarkach młotkowych do 40 mm,

<sup>1</sup> Wydział Techniczno-Przyrodniczy Politechniki Wrocławskiej, jerzy.malewski@pwr.edu.pl

2. kruszenie wtórne w układzie otwartym w kruszarce stożkowej do ok. 30 mm,
3. mielenie w płynach prętowych do ziaren ok. 2 mm,
4. mielenie w młynach kulowych do ziaren ok. 200  $\mu\text{m}$ ,
5. domielanie w młynach cylpebsowych w układzie zamkniętym do wielkości ziaren ok. 40  $\mu\text{m}$ .

Orientacyjny stopień rozdrabiania tego *n*-stadijalnego systemu kruszenia i mielenia wynosi ok. 10 000.

Ponieważ energochłonność rozdrabiania jest ściśle zależna od stopnia rozdrobienia, więc redukcja liczby stopni albo poszczególne ich wielkości wpływają mocno na efektywność energetyczną całego procesu (Krzemińska i Malewski, 2011).

Praktycy produkcyjni uważają, że zmniejszenie wielkości ziaren w produkcji układu kruszenia (w nadawie młyna prętowego) do 15 mm może poprawić sprawność operacji mielenia. Nie jest to takie oczywiste, jakkolwiek pewną poprawę można osiągnąć jednocześnie przez lepszą kontrolę składu ziarnowego w produkcji rozdrabiania pojedynczych maszyn, jak i konfiguracji układu rozdrabiająco-przesiewającego. Weryfikacja tej hipotezy jest głównym celem tego artykułu.

## 2. STAN OBECNY

Nadawa do ZWR pochodzi w całości z kopalni Lubin. Jest to mieszanina skał miedzionośnych: węglanów, łupka i piaskowca, w proporcjach procentowych 25:17:58. Po wstępnym kruszeniu na dole kopalni produkt urabiania wydobywany jest na powierzchnię szybem skipowym, a następnie przenośnikami taśmowymi i kierowany na układ dwóch równolegle pracujących przesiewaczy wibracyjnych, dwupokładowych (PWR1-2)<sup>2</sup>, 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).

Produkt dolny przesiewaczy PWR1-2 stanowi łatwo wzbogacalną frakcję piaskowcową o zawartości Cu ~1,0%. Jest ona transportowana przenośnikami taśmowymi do zbiorników nad halą młynowni o łącznej pojemności 9000 Mg, magazynujących nadawę do młynów przerobowych II ciągu technologicznego.

Produkt górny (frakcja łupkowo-węglanowa o średniej zawartości Cu ~1,2%) przenoszony jest przenośnikami taśmowymi i transportowany do zbiorników nad kruszarkami, o łącznej pojemności 2000 Mg, i dalej przenośnikami członowo-płytkowymi do kruszarek młotkowych KRM0-4 (Makrum), o szczelinie rusztów

---

<sup>2</sup> 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.

40 mm. Produkt kruszenia kierowany jest przenośnikami do zbiornika (magazynu) rudy pokruszonej (25 000 Mg). Z tego zbiornika zasilany jest na II stopień kruszenia, poprzedzony przesiewaniem na przesiewaczu wibracyjnym, jednopokładowym (PWR3 Kofama), o oczku sita 15 mm. Produkt górny przesiewacza kierowany jest taśmami przez zbiornik zasypowy o pojemności 250 Mg do kruszarki stożkowej (KR5 – HP700 Nordberg). Wprowadzenie II stopnia kruszenia 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, o łącznej pojemności 6000 Mg w hali młynowni, z których zasilane są młyny I ciągu technologicznego.

### 3. STRUKTURA SYSTEMU I WARIANTY OBLICZEŃ

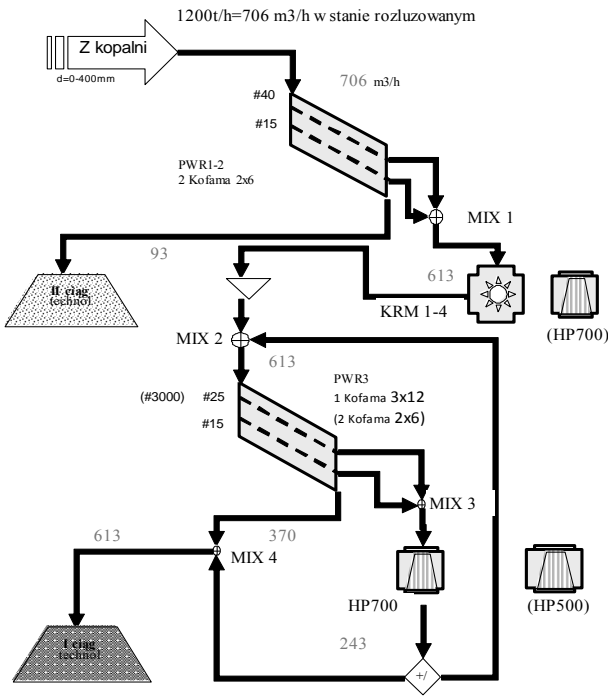
Rozpatrzmy kilka możliwych wariantów struktury, liczby i rodzaju maszyn. Dla jasności i zwięzłości publikacji ograniczymy się do czterech jak w tabeli 1.

Tab. 1. Warianty obliczeń układów operacji  
Tab. 1. Calculation of the system variants

Wariant i\j	1. Istniejące maszyny	2. Wymiana kruszarek i przesiewaczy
1. Układ otwarty	2PZ2×6 + 4 KM + 1PZ3×12 + 1HP700	2PZ2×6 + 2HP700 + 1PZ3×12 + 1HP500
2. Układ zamknięty	2PZ2×6 + 4KM + 1PZ3×12 + 1HP700	2PZ2×6 + 2HP700 + 2PZ2×6 + 1HP500

Do naszych celów posłużymy się układem jakościowo-ilościowym (rys. 1); pominęte są operacje i urządzenia transportująco-magazynujące. Rysunek zawiera elementy wszystkich wariantów. Przez wyłączenie tych elementów lub zmianę maszyn i/lub ich parametrów uzyskujemy potrzebną konfigurację systemu. Na przykład w układzie 1.1 i 2.1 (aktualne maszyny, patrz tab. 1) elementami czynnymi w przesiewaczu PWR3 (Kofama 3×12 m<sup>2</sup>) będzie tylko pokład dolny z wyłączonym lub włączonym obiegiem nadziarna. Z kolei np. w wariantcie 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 wypadku kruszarka HP700 będzie zastąpiona mniejszą 1HP500.

Analiza porównawcza efektywności badanych systemów wymaga określenia kryterium – miary efektywności. W tym przypadku posłużymy się średnią wielkością ziaren końcowego produktu rozdrabiania. Jest to bardziej reprezentatywna miara rozdrobienia ziaren niż ziarno maksymalne lub 80%, ponieważ teoretycznie możemy mieć nieskończenie wiele średnich ziaren przy takim samym ziarnie 80%.



Rys. 1. Podstawowy układ technologiczny poddany analizie i ocenie.

Przez wyłączenie lub zmianę elementów otrzymujemy struktury jak w tabeli 1.

W nawiasach alternatywne maszyny i/lub ich parametry.  
Fig. 1. Basic configuration of technological system to be analysed. By excluding or including some operation one can obtain appropriate variant of calculation.

In brackets alternative devices and/or its parameters.

Ubočnym produktem tej analizy będy sprawdzienie skuteczności modernizacji systemu kruszenia przez zastąpienie kruszarek młotkowych stożkowymi. Jest to ocena technologii, a nie ekonomii produkcji.

#### 4. OBLICZENIA SYMULACYJNE

Wszystkie obliczenia opierają się na modelach matematycznych operacji kruszenia i przesiewania, które uwzględniają wpływ obciążenia maszyn i składu ziarnowego nadawy na efekty operacji. Kruszarki generują skład ziarnowy  $F(d)$  i wydajności  $Q(d)$ , a w modelu przesiewania istotna jest funkcja sprawności przesiewania  $\varepsilon(d)$  – uzysku frakcji podsitowej:

$$F(d) = 1 - \exp \left[ -a \left( \frac{d}{e} \right)^b \right]$$

$$Q = C \cdot \sum_i q(r_i) f(d_i), \quad i - \text{klasa ziarnowa}$$

$$\varepsilon(d) = 1 - \exp[-\lambda t]$$

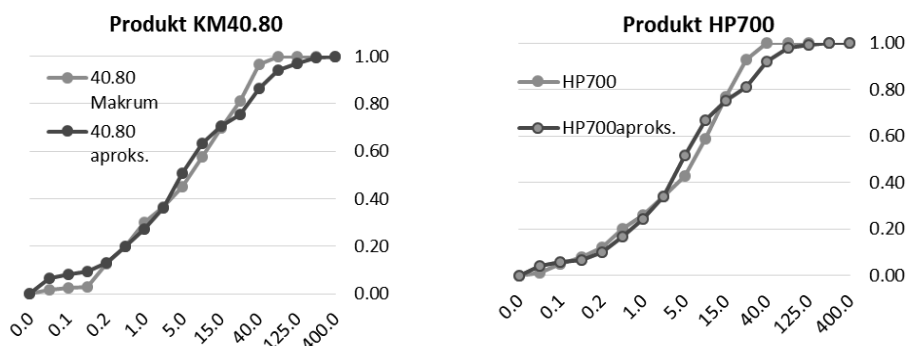
gdzie:

- $d$  – wielkość ziaren,
- $e$  – szerokość szczeliny wypustowej,
- $r_i = d_i/e$ ,
- $a, b, C$  – parametry,
- $\lambda$  – zmienna intensywności przesiewania,
- $t$  – czas przesiewania,
- $f(d_i)$  – wychód frakcji  $d_i$ .

Obciążenie i skład ziarnowy nadawy odgrywają szczególną rolę w sprawności przesiewania, co z kolei wpływa na ilościowe wyniki procesu rozdziału ziaren wg kryterium wielkości oczka sita. Podobnie wydajność kruszarek istotnie zależy od składu ziarnowego nadawy, a skład ziarnowy produktu kruszenia od szerokości szczeliny wypustowej. Wszystkie te czynniki są uwzględnione w modelach operacji przez strukturę modelu i jego parametry. Na przykład sprawność operacji jest funkcją parametrów geometrycznych i dynamicznych sita (wymiary, kąt nachylenia, obciążenie, częstotliwość i amplituda drgań rzeszota), a w przypadku kruszarek stożkowych brane są pod uwagę szerokość i skok szczeliny wypustowej, szerokość wlotu kruszarek.

Parametry maszyn dostosowano do danych wziętych z pomiarów. W przypadku kruszarek, dokładność tego dostosowania pokazano na rysunku 2. Z kolei parametry w modelach przesiewania wzięto z praktyki analizy podobnych układów.

Zagadnienia modelowania zostały szczegółowo opisane we wcześniejszych publikacjach autora i nie będą tu omawiane (Malewski 1988, 2014). Zauważmy tylko, że obciążenia względne maszyn są ilorazem obciążenia (ilość nadawy) do wydajności technicznej maszyn. Wydajność techniczna jest tu oszacowana z niewielką dokładnością na podstawie danych katalogowych producentów maszyn (kruszkarki) lub metody (wydajność sit) opisanej w cytowanych pracach.



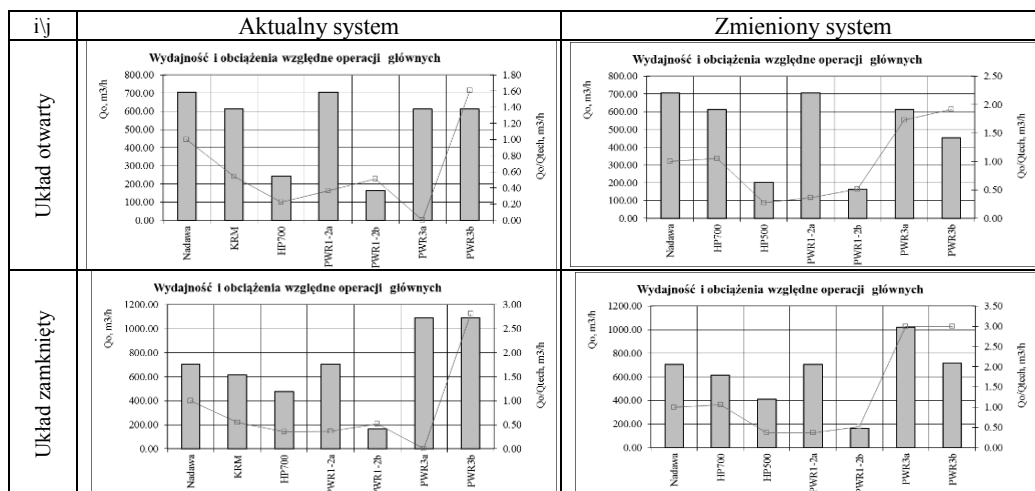
Rys. 2. Dokładność aproksymacji składu ziarnowego w modelu kruszarki

Fig. 2. Accuracy of the product size distribution approximation

Tab. 2. Przewidywane efekty zmian struktury i/lub maszyn w obecnym układzie kruszenia  
 Tab. 2. Predicted results of crushing system efficiency in actual or modified flowsheet

Wariant i\j		Aktualny system		Zmieniony system	
		I ciąg	II ciąg	I ciąg	II ciąg
Układ otwarty	Q, [m <sup>3</sup> /h]	613	93	613	93
	D <sub>Sr</sub> , [mm]	7,36	5,29	4,82	5,29
Układ zamknięty	Q, [m <sup>3</sup> /h]	613	93	613	93
	D <sub>Sr</sub> , [mm]	2,99	5,29	2,93	5,29

Tab. 3. Wydajność operacji i obciążenie względne maszyn  
 Tab. 3. Operations capacity and relative load of processing devices

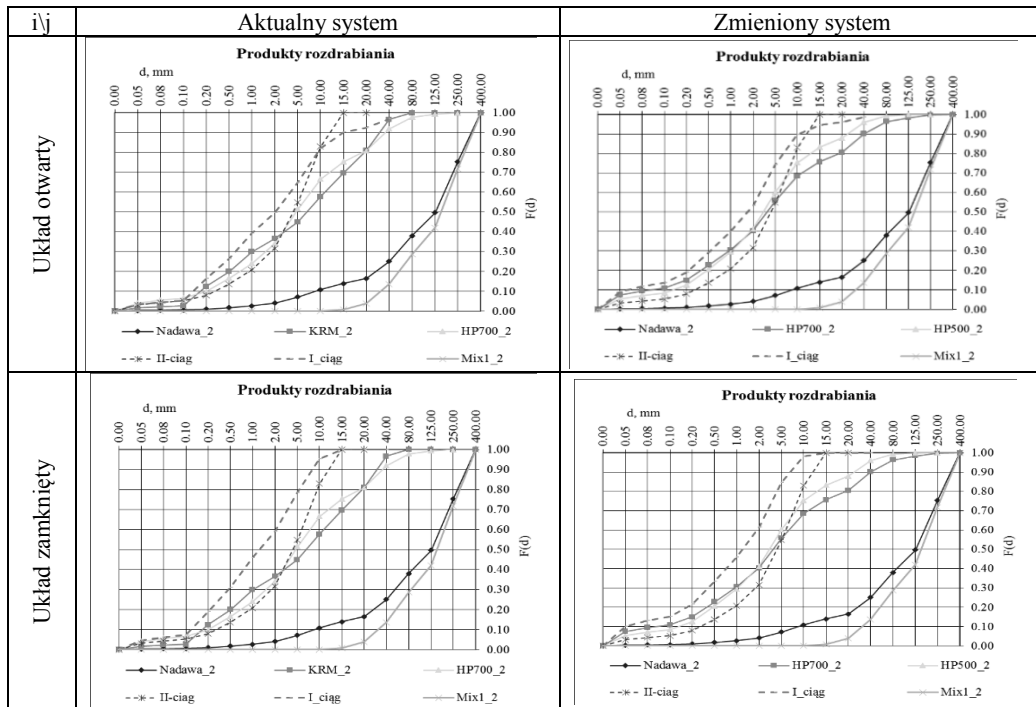


## WNIOSKI

Analiza układu kruszenia w ZWR Lubin pokazuje, że jest sens rozważać 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.

Istniejący układ jest mało skuteczny pod względem wydzielenia frakcji piaskowcowej. Sprawność wydzielenia tej frakcji dla ciągu II wynosi zaledwie 20%, a lokalizacja tej operacji przed kruszarkami 1 stopnia wydaje się być błędnym wyborem. Prawdopodobnie przyczyną takiego rozwiązania była obawa projektantów przed nadmiernym zużyciem elementów roboczych kruszarek młotkowych (większa abrazywność piaskowców).

Tab. 4. Skład ziarnowy produktów kruszenia  
 Tab. 4. Size distribution of crushing products



Obecny układ pracuje w systemie otwartym, co 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, których jest wielka różnorodność na rynku maszyn. Analiza obciążenia tych maszyn pokazuje, że wydajność jednej (wielkości HP700) jest wystarczająca do przeniesienia żadanego obciążenia. Poza tym, w miejsce kruszarki HP700 z powodzeniem może być zainstalowana mniejsza jednostka. Zauważmy, że nawet HP500 jest obciążona zaledwie w 50% (tab. 3, 4).

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

## LITERATURA

- KRZEMIŃSKA M., MALEWSKI J., 2011, *Energochłonność operacji przygotowania rud do wzbogacania w kopalniach LGOM*, Przegląd Górniczy, nr 7–8.
- MALEWSKI J., 1988, *Efektywność operacji przesiewania*, Górnictwo Odkrywkowe, nr 5–6.
- MALEWSKI J., 2014, *Dobór maszyn w układach przeróbki skal*, Mining Science – Mineral Aggregates, Vol 21(1), 139–150.
- MALEWSKI J., 2014, *Obliczanie schematów technologicznych przeróbki skal*, Surowce i Maszyny Budowlane, nr 1, 52–56.

## ANALYSIS OF THE CRUSHING SYSTEM IN THE LUBIN ORE MINE

The paper presents results of crushing system analysis, that is being 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) subsystems. Impact of the crushing circuit looping, used for 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.