



DANIEL SARAMAK*

Symulacja efektów rozdrabniania w prasie walcowej dla materiału o zmiennej zawartości ziaren drobnych

Wprowadzenie

Przemysłowe operacje rozdrabniania są niezwykle energochłonne i według różnych szacunków ocenia się, że pochłaniają one 3% światowej energii elektrycznej. Postępująca eksploatacja złóż powoduje, że wydobywane są rudy z coraz mniejszą zawartością składnika użytecznego, coraz drobniej okruszczowane. W ciągu ostatnich czterdziestu lat średnie zawartości składnika użytecznego dla wybranych typów rud kształtowały się następująco:

- ◆ miedź: obniżka z 1,5 do 1%,
- ◆ ołów: obniżka z prawie 8 do 3,5%,
- ◆ nikiel: obniżka z 4 do 1%,
- ◆ złoto: obniżka z 3,5 do 2 g/Mg.

Pomimo nieznacznych odstępstw od powyższych wartości (np. w latach 1990–2000 wzrost z średniej zawartości miedzi w nadawie do 2,5%, w latach 1980–1985 wzrost zawartości złota do 4 g/Mg) średnie zawartości składnika użytecznego w rudach na świecie sukcesywnie się zmniejszają. Powyższe aspekty wskazują na konieczność intensyfikacji procesów kruszenia i mielenia surowców mineralnych w celu zapewnienia odpowiedniego poziomu odzysku składnika użytecznego z kopaliny, co powoduje zwiększenie energochłonności tych procesów. Z drugiej strony kładzie się coraz większy nacisk na redukcję

* Dr hab. inż., prof. nadzw. AGH, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Katedra Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców, Kraków; e-mail: dsaramak@agh.edu.pl

emisji dwutlenku węgla, który jest jednym z kluczowych czynników zwiększających efekt cieplarniany, a który to związek jest głównym produktem ubocznym w procesach wytwarzania energii. Przy wysokiej konsumpcji energii podczas procesów przeróbki mechanicznej (kruszenia i mielenia) najważniejszym kryterium ekonomicznym jest obniżenie ich energochłonności. Problem ten dotyczy nie tylko rud, ale także procesu przemiału cementu oraz produkcji kruszyw mineralnych i mączek wapiennych (Gawenda 2013).

Wymienione kwestie wiążą się z poprawą efektywności przebiegu procesów rozdrabniania, na co istotnie wpływają właściwości materiału. W praktyce najczęściej odnosi się do właściwości nadawy w kontekście jej wilgotności (Fuerstenau i Abouzeid 2007). Skład ziarnowy bada się oceniając wydajność prasy, natomiast mało jest badań dotyczących wpływu frakcji drobnych na efekty rozdrabniania w HPGR.

1. Analiza uwarunkowań stosowania technologii HPGR w przeróbce rud

Wykorzystanie technologii wysokociśnieniowego rozdrabniania w przeróbce surowców mineralnych skutkuje osiągnięciem w procesie wzbogacania wymiernych korzyści mierzonych przede wszystkim obniżeniem energochłonności operacji kruszenia. Uwidacznia się to zwłaszcza na kolejnym etapie rozdrabniania – w procesie mielenia (Foszcz i Gawenda 2012) – w którym rozdrobnienie materiału w młynie przebiega szybciej niż w przypadku, gdy operacje mielenia są poprzedzone konwencjonalnymi urządzeniami rozdrabniającymi (kruszarzki, młyny prętowe, młyny SAG). Lepsza kinetyka mielenia spowodowana jest powstawaniem w procesie wysokociśnieniowego rozdrabniania mikropęknięć i mikroszczelin osłabiających wytrzymałość pojedynczych ziaren, co ma także wpływ na kształt krzywych wzbogacalności, a tym samym uzyski flotacyjne (Drzymała i in. 2010). Badania wykazują, że produkt rozdrabniania HPGR charakteryzuje się niższą wartością wskaźnika energochłonności Bonda, którego redukcja może sięgać 15–20% według różnych badań. Przykładowo, badania prowadzone na produktach rozdrabniania HPGR w przemyśle cementowym wykazały, że produkt prasy walcowej charakteryzował się wartością wskaźnika Bonda 13,05 kWh/Mg, podczas gdy dla nadawy do prasy wynosił on 16,70 kWh/Mg, co daje ponad dwudziestoprocentową jego obniżkę. Aby obliczyć energochłonność procesu mielenia wykorzystuje się powszechnie znany wzór Bonda (Bond 1952):

$$E = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{P}} \cdot \frac{10}{\sqrt{N}} \right) \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad [\text{kWh/Mg}] \quad (1)$$

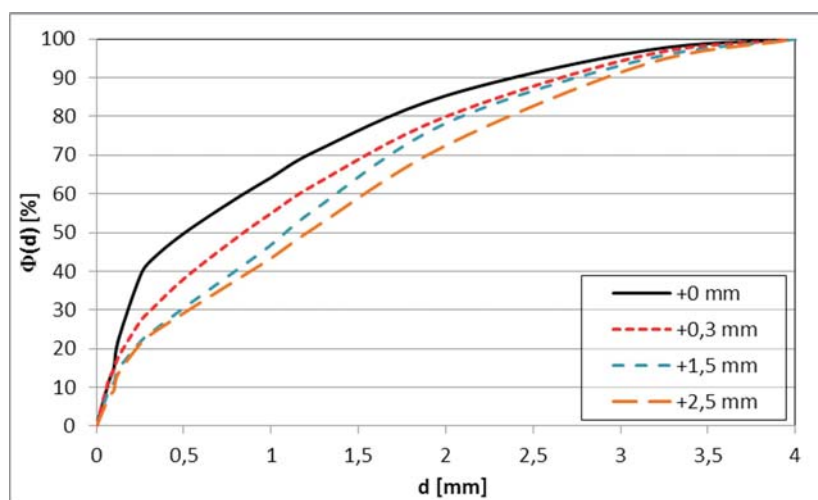
- ↳ W_i – indeks pracy Bonda dla młyna kulowego [kWh/Mg],
- P – d_{80} produktu z młyna [μm],
- N – D_{80} nadawy do młyna [μm],
- k_1 – współczynnik korekcyjny zależny od sposobu przemiału,

- k_2 – współczynnik korekcyjny drobnego przemiału,
 k_3 – współczynnik korekcyjny zależny od średnicy młyna.

Należy tutaj wspomnieć, że istnieje kilka energetycznych teorii rozdrabniania, które wiążą stopień rozdrobnienia materiału ze zużytą energią, np. teoria Rittingera lub Kicka. Oprócz wymienionych trzech teorii można wymienić jeszcze teorie Bracha i Papadakis (Tumidajski i in. 2010; Lowrison 1974), jednak dzięki opracowanym wskaźnikom pracy najbardziej rozbudowany opis metodą Bonda jest najczęściej wykorzystywany w praktyce.

2. Ocena wpływu właściwości nadawy na efektywność procesu rozdrabniania w prasach walcowych

W celu weryfikacji zależności pomiędzy wybranymi charakterystykami nadawy a efektywnością procesu rozdrabniania w HPGR przeprowadzono testy rozdrabniania rudy miedzi w skali laboratoryjnej. Testowano głównie zmienny skład ziarnowy rudy, w szczególności zawartości ziaren najdrobniejszych, poprzez usuwanie z przygotowanych do rozdrabniania próbek kolejnych najdrobniejszych klas ziarnowych. Z wyjściowego materiału o uziarnieniu 0–8 mm usuwano kolejno następujące klasy ziarnowe: 0–0,3 mm; 0–1,5 mm oraz 0–2,5 mm. Określone zostały składy granulometryczne produktów, jak również wybrane wskaźniki oceny procesu (energochłonność i wydajność).



Rys. 1. Skład ziarnowy produktów rozdrabniania w prasie walcowej przy zmiennym uziarnieniu nadawy, dla wilgotności nadawy 0%

Fig. 1. Particle sizedistribution of HPGR crushing products with various feed particle size composition, feed moisture 0%

Rysunek 1 przedstawia wyniki rozdrabniania rudy miedzi w prasie walcowej przeprowadzonego dla trzech próbek, z których dwie zostały odpowiednio pozbawione ziaren najdrobniejszych: próbka nr1 – materiał 0–8 mm, próbka nr 2 – materiał 1,5–8 mm, próbka nr 3 – materiał 2,5–8 mm.

Analizując wyniki przedstawione na rysunku 1 można zauważyć, że skład ziarnowy nadawy w pewnym stopniu może determinować uzyskiwane wyniki rozdrabniania w prasie walcowej. W analizowanym przykładzie pozbawienie materiału ziaren najdrobniejszych skutkowało obniżeniem stopnia rozdrobnienia produktu, co oznacza, że dla tego materiału zawartość ziaren najdrobniejszych w nadawie zwiększa intensywność rozdrobnienia produktu w prasie walcowej. Pozbawianie nadawy kolejnych klas ziarnowych wpływa na efektywność rozdrabniania w niewielkim stopniu, co obrazują krzywe składu ziarnowego uzyskanych produktów z nadawy +0,3 mm, +1,5 mm oraz +2,5 mm. Istotne jest tutaj podkreślenie faktu, że w zależności od typu nadawy jej skład ziarnowy może wpływać różnie na efektywność rozdrabniania w prasie. Wyniki podobnych badań (Saramak 2011) dla innych typów rud wykazywały odwrotne zależności, każdy przypadek należy więc traktować indywidualnie i przeprowadzić odpowiednie badania w celu weryfikacji tej zależności.

W celu opisu matematycznego krzywych składu ziarnowego produktów rozdrabniania (Saramak 2012) o zmiennym składzie ziarnowym wykorzystano teoretyczną dystrybuantę Weibulla, która ma swoje uzasadnienie literaturowe w aproksymacji krzywych składu ziarnowego produktów rozdrabniania:

$$\Phi(d) = 1 - \exp[-c \cdot (d^n)] \quad (2)$$

↳ n, c , – parametry rozkładu.

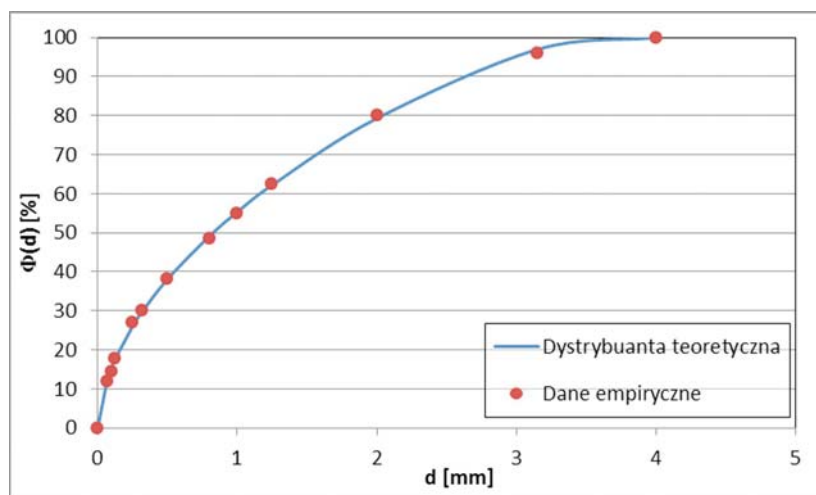
Wyniki aproksymacji przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki aproksymacji produktów rozdrabniania w prasie walcowej za pomocą teoretycznej dystrybuanty Weibulla (2)

Table 1. Results of approximation of HPGR crushing products by means of Weibull's distribution (2)

| Parametr rozkładu | Wartość parametru dla aproksymowanej krzywej o składzie ziarnowym | | | |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| | 0–6 mm | 0,3–6 mm | 1,5–6 mm | 2,5–6 mm |
| n | 0,594 | 0,612 | 0,670 | 0,647 |
| c | 2,046 | 1,581 | 1,395 | 1,223 |
| s_r [%] | 3,64 | 0,68 | 1,62 | 1,51 |

Na rysunku 2 zostało przedstawione graficznie najlepsze dopasowanie z wykorzystaniem wzoru (2).



Rys. 2. Dopasowanie krzywej składu ziarnowego produktu rozdrabniania w prasie walcowej o uziarnieniu +0,3–8 mm.

Fig. 2. Fitting of HPGR products particle size distribution curve with particle size from 0,3 to 8 mm

Wykorzystując wyniki z tabeli 1 można wyprowadzić ogólny wzór na krzywą składu ziarnowego produktów HPGR w zależności od stopnia usunięcia drobnych klas ziarnowych x :

Tabela 2. Powiązanie parametrów we wzorze aproksymującym z zawartością drobnych klas ziarnowych w nadawie

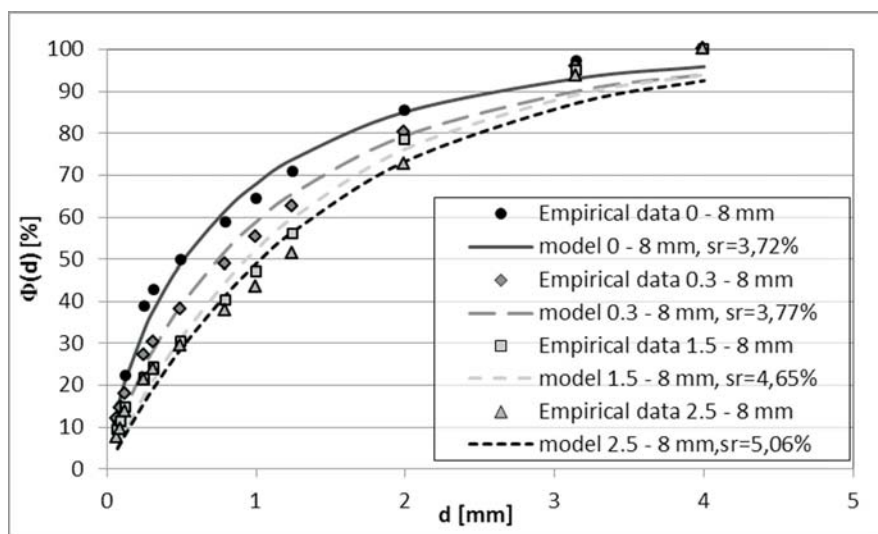
Table 2. Linking the parameters in approximation formula with the fine particle content in feed

| Parametr | Funkcja | R^2 |
|----------|----------------------------------|-------|
| n | $n = -0,029x^2 + 0,095x + 0,591$ | 0,989 |
| c | $c = \frac{1,386}{x^{0,044}}$ | 0,901 |

x oznacza górny rozmiar ziarna dla klasy ziarnowej (od 0 do x mm usuniętej z nadawy do prasy walcowej).

Dokładność aproksymacji w obu przypadkach przekracza 90%. Dzięki wzorom funkcyjnym z tabeli 2 możliwe jest, przy stałych wartościach parametrów operacyjnych urządzenia, symulowanie składu ziarnowego produktów kruszenia przy zmiennym udziale w nadawie najdrobniejszych klas ziarnowych. Wyniki symulacji wraz z błędami dopasowania przedstawione zostały na rysunku 3.

Przeanalizowano także wydajności urządzenia oraz energochłonność procesu rozdrabniania w zależności od ilości drobnych klas ziarnowych, których była pozbawiana nadawa. Wyniki zestawiono w tabeli 3.



Rys. 3. Wyniki symulacji produktów rozdrabniania HPGR za pomocą wzoru (2) oraz zależności z tabeli 2

Fig. 3. Results of simulation for HPGR crushing products by means of formula (2) and relationships from Table 2

Analizując wyniki zawarte w tabeli 3 można zauważyć, że zawartości drobnych klas ziarnowych w nadawie wpływają na uzyskiwane rezultaty rozdrabniania w prasie walcowej. Pozbawienie nadawy najdrobniejszych klas ziarnowych skutkuje początkowo wzrostem wydajności oraz obniżeniem energochłonności. Jednak w miarę jak z nadawy są usuwane coraz grubsze ziarna, wydajność spada, a energochłonność wzrasta. Na podstawie wyników z tego testu można zauważyć, że częściowe usunięcie drobnych ziaren jest korzystne dla procesu pod kątem wydajnościowym i energetycznym, jednakże następuje obniżenie stopnia rozdrobnienia (rys. 1). Niemniej jednak można przypuszczać, że istnieje możliwość optymalnego ustalenia składu ziarnowego nadawy, zwłaszcza jeśli chodzi o ziarna najdrobniejsze, w taki sposób aby poprawić efektywność pracy prasy walcowej. Jak zostało to podkreślone powyżej należy jednak podejść indywidualnie do każdego typu materiału,

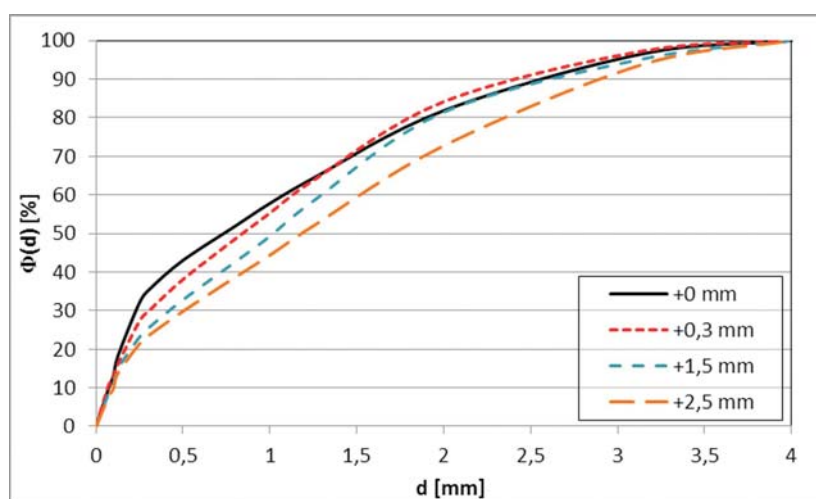
Tabela 3. Wartości wydajności prasy walcowej oraz energochłonności procesu rozdrabniania w zależności od składu ziarnowego nadawy

Table 3. HPGR throughput and energy consumption values in relationship to the feed particle size distribution

| Badany parametr | Skład ziarnowy nadawy (wilgotność 0%) | | | |
|------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|
| | 0–8 mm | 0,3–8 mm | 1,5–8 mm | 2,5–8 mm |
| Wydajność (Mg/h) | 1,44 | 1,65 | 1,63 | 1,53 |
| Esp (kWh/Mg) | 2,57 | 2,33 | 2,31 | 2,44 |

gdyż dla innej nadawy uzyskane zależności mogą mieć odmienny przebieg. Dopiero przeprowadzenie dostatecznej liczby testów przy różnych typach materiału pozwoli na formułowanie w tym zakresie ogólniejszych wniosków, natomiast dla tego typu nadawy wyprowadzone zależności są prawdziwe.

Przeanalizowany został także wpływ wilgotności nadawy na uzyskiwany stopień rozdrobnienia, wydajność procesu oraz jego energochłonność. Rysunek 2 przedstawia krzywe składu ziarnowego produktów rozdrabniania uzyskanych z nadawy o zróżnicowanym składzie ziarnowym. Przy zwiększeniu wilgotności do 2% nieznacznie zmniejszyły się stopnie rozdrobnienia, co można zaobserwować porównując krzywe składu ziarnowego na rysunku 1 oraz 4. Relatywnie największe różnice zaobserwowano dla materiału, który nie był pozbawiany drobnych klas ziarnowych, natomiast dla nadawy o uziarnieniu powyżej 1,5 mm oraz 2,5 mm wpływ wilgotności na efektywność rozdrobnienia był niewielki.



Rys. 4. Skład ziarnowy produktów rozdrabniania w prasie walcowej przy zmiennym uziarnieniu nadawy, dla wilgotności nadawy 2%

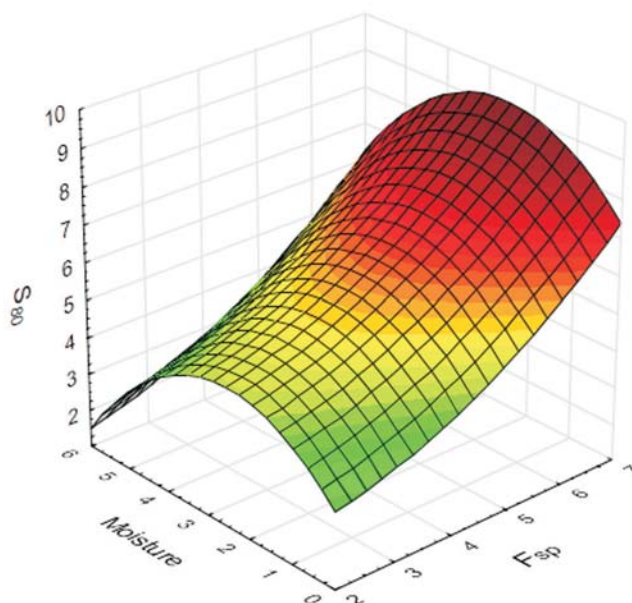
Fig. 4. Particle size distribution of HPGR crushing products with various feed particle size composition, feed moisture 2%

Poszerzona analiza wilgotności nadawy pozwala jednak na stwierdzenie, że istnieje możliwość doboru wartości tego parametru w celu uzyskiwania odpowiedniego uziarnienia produktu rozdrabniania w HPGR. Skład ziarnowy nadawy i wilgotność istotnie wpływają też na energochłonność i wydajność procesu. Ogólny model empiryczny określający stopień rozdrobnienia jako funkcję ciśnienia operacyjnego w prasie walcowej oraz wilgotności nadawy przedstawiony jest graficznie na rysunku 5 (Saramak i Kleiv 2013).

Uzyskane wyniki wskazują, że najbardziej prawdopodobną zależność pomiędzy efektywnością rozdrabniania nadawy w prasie a jej wilgotnością charakteryzuje parabola z ujemną wartością współczynnika przy kwadracie wilgotności:

$$S_x = a \cdot m^2 + b \cdot m + c \quad (3)$$

Wartości wskaźników wydajnościowych oraz energochłonności dla wilgotności nadawy 2 i 4% przedstawione zostały w tabeli 4.



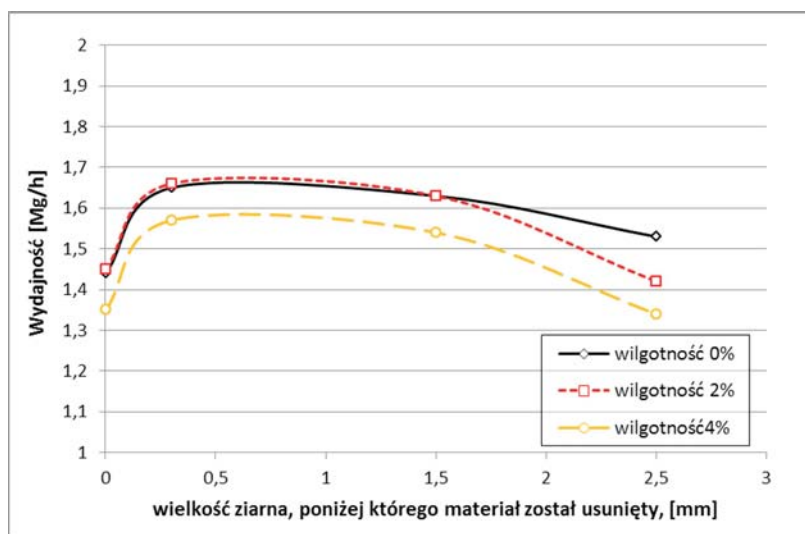
Rys. 5. Stopień rozdrobnienia (tutaj S_{80}) jako funkcja ciśnienia operacyjnego (F_{sp}) i wilgotności materiału (moisture)

Fig. 5. The S_{80} comminution ratio as a function of operating pressure (F_{sp}) and the feed material moisture

Tabela 4. Wybrane wskaźniki oceny przebiegu procesu rozdrabniania w HPGR dla materiału wilgotnego

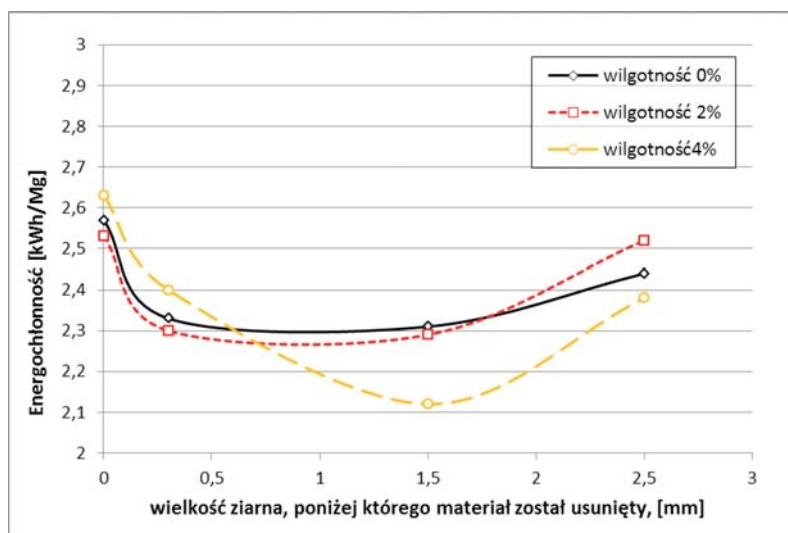
Table 4. Chosen indices of HPGR crushing proces assessment for the moisture feed material

| Badany parametr | Skład ziarnowy nadawy (wilgotność 2%) | | | |
|------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|
| | 0–8 mm | 0,3–8 mm | 1,5–8 mm | 2,5–8 mm |
| Wydajność [Mg/h] | 1,45 | 1,66 | 1,63 | 1,42 |
| Esp [kWh/Mg] | 2,53 | 2,30 | 2,29 | 2,52 |
| Badany parametr | Skład ziarnowy nadawy (wilgotność 4%) | | | |
| | 0–8 mm | 0,3–8 mm | 1,5–8 mm | 2,5–8 mm |
| Wydajność [Mg/h] | 1,35 | 1,57 | 1,54 | 1,34 |
| Esp [kWh/Mg] | 2,63 | 2,40 | 2,12 | 2,38 |



Rys. 6. Zależność pomiędzy wydajnością pracy prasy walcowej a wilgotnością nadawy przy różnych poziomach usunięcia drobnych klas ziarnowych

Fig. 6. Relationship between the HPGR throughput and the feed moisture content at various levels of fine particle removal



Rys. 7. Zależność pomiędzy energochłonnością procesu rozdrabniania w prasie walcowej a wilgotnością nadawy przy różnych poziomach usunięcia drobnych klas ziarnowych

Fig. 7. Relationship between the HPGR energy consumption and the feed moisture content at various levels of fine particle removal

Można zauważyć, że dla wilgotności materiału 2 i 4% zależności pomiędzy składem ziarnowym nadawy a uzyskiwanymi wskaźnikami przerobu i energochłonności kształtują się podobnie jak dla wilgotności 0%. W celu porównania wartości tych wskaźników przy zmiennych wilgotnościach przedstawiono graficznie powyższe zależności na rysunkach 6 i 7.

Analizując wyniki z tabeli 4 oraz rysunków 6 i 7 można zauważyć, że przy zwiększeniu wilgotności nadawy do 2% obserwowana jest nieznaczna poprawa wydajności, szczególnie gdy zostały usunięte najdrobniejsze klasy ziarnowe w przedziale od 0,3 do 1,5 mm. Dla tych samych warunków uzyskano niewielką obniżkę energochłonności procesu rozdrabniania, zatem oba wskaźniki osiągnęły korzystniejsze wartości. Dalsze zwiększanie wilgotności skutkowało obniżeniem wydajności, ale także stosunkowo większą obniżką energochłonności. Analiza wpływu obu czynników jednocześnie, tj. składu ziarnowego nadawy oraz jej wilgotności pokazuje, że istnieją potencjalne możliwości sterowania energochłonnością i wydajnością procesu poprzez odpowiednią ich modyfikację. W praktyce oznaczałoby to sterowanie procesem przesiewania produktu rozdrabniania prasy walcowej poprzez odpowiedni dobór wielkości ziarna podziałowego.

3. Analiza uzyskanych rozwiązań – matematyczne modele pracy HPGR

Na podstawie przeprowadzonego programu badawczego w skali laboratoryjnej udało się zweryfikować zależności pomiędzy właściwościami nadawy a przebiegiem procesu rozdrabniania rudy miedzi w wysokociśnieniowej prasie walcowej oraz jego efektywnością mierzoną wskaźnikami technologicznymi i ekonomicznymi. Wyznaczone zależności funkcyjne mają charakter nieliniowy, zatem zmiana tych właściwości przekłada się nieproporcjonalnie na uzyskiwane efekty. Część zależności dostatecznie dobrze opisują funkcje bardzo zbliżone do paraboli:

- ◆ zależność pomiędzy składem ziarnowym nadawy a energochłonnością procesu – kształt zbliżony do paraboli z ramionami skierowanymi do góry,
- ◆ zależność pomiędzy składem ziarnowym nadawy a wydajnością urządzenia – kształt podobny do paraboli z niesymetrycznie rozstawionymi ramionami skierowanymi w dół.

Zależności te są podstawą do opracowania modeli przebiegu procesu wysokociśnieniowego rozdrabniania, które mogą być następnie wykorzystane przy symulacji i optymalizacji pracy zarówno prasy walcowej (Wang i in. 2013; Saramak 2013) jak i układów technologicznych przeróbki mechanicznej opartych na prasach walcowych (Saramak 2012). Zostały w tym celu opracowane matematyczne modele krzywych składu ziarnowego produktów rozdrabniania w HPGR, które stanowią podstawę przy ustalonych kryteriach modelowania pracy układów przygotowania rudy do flotacji z wysokociśnieniowymi prasami walcowymi.

W matematycznym opisie zostały wykorzystane rozkłady cenzurowane oparte na teoretycznym rozkładzie Weibulla:

$$\Phi(d) = 1 - \exp \left[-c \left(\frac{d}{d_{\max} - d} \right)^n \right], \quad 0 \leq d \leq d_{\max} \quad (4)$$

↪ n , c , d_{\max} – parametry rozkładu.

W rozkładach tych każdy parametr można powiązać z właściwościami nadawy oraz parametrami technicznymi pracy urządzenia rozdrabniającego. Parametr skali n może być bezpośrednio powiązany z wielkością ciśnienia operacyjnego, ponieważ im drobniejszy produkt, tym mniejsza wartość n we wzorze (4). Stopień rozdrobnienia z kolei jest wprost proporcjonalny do wartości ciśnienia. Kolejny parametr, c , może być powiązany z właściwościami fizykomechanicznymi nadawy. Zmiany wartości parametru c powodują zróżnicowany przebieg krzywej składu ziarnowego aproksymowanej według wzoru (4), skutkujący występowaniem na niej punktu przegięcia, który ściśle koresponduje z podatnością na rozdrabnianie materiału. Parametr d_{\max} z kolei odzwierciedla uzyskiwany stopień rozdrobnienia materiału, co można powiązać z technicznym parametrem urządzenia, jakim jest szerokość szczeliny roboczej pomiędzy walcami w prasie, a co za tym idzie z ciśnieniem operacyjnym (podobnie jak parametr n). Podsumowując, skład ziarnowy produktu rozdrabniania zależy w dużej mierze od wartości ciśnienia operacyjnego w prasie, jednakże wybrane właściwości nadawy, takie jak skład ziarnowy czy wilgotność, wstępnie determinują efektywność procesu rozdrabniania w prasie i zasadniczo wpływają na uzyskiwane wskaźniki oceny jego przebiegu. Przykładowo, dla ustalonej wartości ciśnienia operacyjnego parametry we wzorze (4) przyjmują stałe wartości (dla przyjętej wartości nacisku 6 kN, parametry wyniosły):

$$n = 0,43 \quad c = 2,14 \quad d_{\max} = 5,1 \text{ mm} \quad s_r = 1,17\% \quad (5)$$

Wartości powyższe zostały wyznaczone w wyniku aproksymacji krzywej składu ziarnowego produktu rozdrabniania z zastosowaniem metody najmniejszych kwadratów.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Na podstawie uzyskanych wyników można zauważyć, że parametry fizykomechaniczne nadawy, takie jak typ rudy, podatność na rozdrabnianie, wilgotność, skład ziarnowy nadawy, wstępnie determinują jakość produktów rozdrabniania w wysokociśnieniowych prasach walcowych oraz wydajność technologicznych układów rozdrabniania rud. Dowodzi to tezy, że efektywne sterowanie pracą układów technologicznych rozdrabniania rud z wysoko-

ciśnieniowymi prasami walcowymi jest możliwe przy przyjęciu, że fizykomechaniczne właściwości nadawy oraz sterowalne parametry operacyjne urządzenia to główne determinanty uzyskiwanych efektów rozdrabniania. Optymalizacja pracy układów przeróbki mechanicznej, będąca tego efektem, jest możliwa poprzez budowę odpowiednich modeli matematycznych pracy urządzeń rozdrabniających, wiążących charakterystyki jakościowo-ilościowe produktów rozdrabniania ze specyfiką pracy tych urządzeń. Efekty optymalizacji przekładają się na konkretne obniżki energochłonności pracy układu rozdrabniania oraz poprawienie jakości wskaźników technologicznych pracy, mierzone rozdrobieniem produktów końcowych oraz stopniem uwolnienia (odsłonięcia) minerału użytecznego w nadawie do procesów flotacji, potwierdzone wynikami flotacji. Obszar rozwiązań optymalnych osiąga się przez zastosowanie teorii programowania matematycznego i znalezienie ekstremum warunkowego funkcji celu przy istniejących ograniczeniach uwzględniających specyfikę prowadzenia procesu technologicznego.

Przedstawione zagadnienia nie wyczerpują tematyki badań nad procesami wysokociśnieniowego rozdrabniania. Problemami do dalszych dociekań pozostają m.in. badania nad efektywnością procesów flotacji w zależności od warunków prowadzenia procesu wysokociśnieniowego rozdrabniania oraz analiza wpływu właściwości fizykomechanicznych nadawy na żywotność elementów roboczych (okładzin walców) pras walcowych.

LITERATURA

- Bond, F.C. 1952. *The third theory of comminution*, Trans. AIME, vol. 193.
- Drzymała, J., Łuszczkiewicz, A. i Foszcz, D. 2010. Application of upgrading curves for evaluation of past, present, and future performance of a separation plant. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review* vol. 31, iss. 3, s. 165–175.
- Foszcz, D. i Gawenda, T. 2012. Analysis of efficiency of grinding in ball and rod mills dependably on contents of fine particles in feed (in Polish). *AGH Journal of Mining and Geoengineering* vol. 36, no. 4, s. 17–30.
- Fuerstenau, D.W. i Abouzeid, A.-Z.M. 2007. Role of feed moisture in high-pressure roll mill comminution. *International Journal of Mineral Processing*, vol. 82.
- Gawenda, T. 2013. Wpływ rozdrabniania surowców skalnych w różnych kruszarkach i stadiach kruszenia na jakość kruszyw mineralnych. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 29, z. 1.
- Lowrison, G.Ch. 1974. *Crushing and Grinding*. Butterworths, London.
- Saramak, D. i Kleiv, R.A. 2013. The effect of feed moisture on the comminution efficiency of HPGR circuits. *Minerals Engineering* vol. 43–44.
- Saramak, D. 2011. The influence of chosen ore properties on efficiency of HPGR-based grinding circuits. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* vol. 27, issue 4.
- Saramak, D. 2012. Optimizing the performance of high-pressure grinding roll based ore enrichment circuits. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* vol. 28, issue 4.
- Saramak, D. 2013. Mathematical models of particle size distribution in simulation analysis of high-pressure grinding roll operation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* vol. 4, issue 1.
- Tumidajski i in. 2010 – Tumidajski, T., Kasińska-Piłut, E., Gawenda, T., Naziemiec, Z. i Pilut R. 2010. Badania energochłonności procesu mielenia oraz podatności na rozdrabnianie składników litologicznych polskich rud miedzi. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 26, z. 1.

Wang i in. 2013 – Wang, C., Nadolski, S., Mejia, O., Drozdiak, J. i Klein, B. 2013. *Energy and cost comparisons of HPGR based circuits with the SABC circuit installed at the huckleberry mine*, 45th Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference, Ottawa, Ontario, January 22–24.

SYMULACJA EFEKTÓW ROZDRABNIANIA W PRASIE WALCOWEJ DLA MATERIAŁU O ZMIENNEJ ZAWARTOŚCI ZIAREN DROBNYCH

Słowa kluczowe

rozdrabnianie, wysokociśnieniowe prasy walcowe, modele rozdrabniania

Streszczenie

W artykule przedstawione zostały wyniki badań dotyczących procesów rozdrabniania w prasie walcowej dla rud miedzi. Przeprowadzono próby kruszenia w laboratoryjnej prasie walcowej dla materiału o zmiennej zawartości najdrobniejszych klas ziarnowych, mianowicie: od 0 do 6 mm, od 0,3 do 6 mm, od 1,5 do 6 mm oraz od 2,5 do 6 mm. Próby przeprowadzono dla materiału o wilgotności naturalnej (tj. blisko 0%) oraz 2%. Uzyskane w tym zakresie wyniki pokazują, że dla materiału wilgotnego efektywność rozdrabniania nieznacznie się zmniejszyła, również pozabawianie nadawy kolejnych drobnych klas ziarnowych miało swój efekt w mniejszym stopniu rozdrobnienia produktów HPGR, jednak w miarę dalszego zwiększania wilgotności nadawy wskaźniki wydajności oraz energochłonności procesu uległy pogorszeniu.

Analizując parametry pracy wysokociśnieniowej prasy walcowej można stwierdzić, że zwiększenie wilgotności nieznacznie zwiększa wydajność procesu, również w niewielkim stopniu redukując jego energochłonność.

Jednym z praktycznych efektów była próba opisu krzywych składu ziarnowego produktów rozdrabniania HPGR o zmiennym uziarnieniu nadawy za pomocą teoretycznej dystrybuanty Weibulla oraz powiązanie parametrów we wzorze aproksymującym z poziomem usunięcia drobnych klas ziarnowych nadawy. Wyniki aproksymacji pokazują, że dystrybuanta Weibulla opisuje produkty rozdrabniania z błędem dopasowania poniżej 4%. Z kolei aproksymacja z powiązaniem parametrów wzoru aproksymującego ze stopniem usunięcia drobnych klas ziarnowych charakteryzowała się błędem dopasowania przekraczającym minimalnie 5% przy najgorszym dopasowaniu, natomiast najdokładniejsze dopasowanie miało błąd poniżej 4%. Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie zależności pomiędzy właściwościami nadawy a przebiegiem procesu rozdrabniania rudy miedzi w wysokociśnieniowej prasie walcowej oraz jego efektywnością mierzoną wskaźnikami technologicznymi i ekonomicznymi.

**SIMULATION OF COMMINUTION EFFECTS IN HPGR
FOR THE FEED MATERIAL VARIABLE CONTENT OF FINE PARTICLES**

Keywords

comminution, HPGR, comminution models

Abstract

The article presents the results of investigations over the comminution processes in HPGR for copper ore. Crushing tests were run in a laboratory HPGR device for the material with a variable content of fine particles in following size fractions: from 0 to 6 mm, from 0.3 to 6 mm, from 1.5 to 6 mm and from 2.5 to 6 mm. The tests were performed for the material with moisture content of 0 and 2%. The obtained results show that comminution effectiveness for material with an increased moisture content decreased slightly. Also the removal of individual finest particle size fractions from feed had its effect in a lower comminution efficiency, and increasing the feed moisture caused deterioration of the energy and capacity indices for the process.

Analyzing the HPGR operating parameters it can be concluded that together with increasing the moisture content the process productivity slightly increases, together with some reduction of its energy consumption.

One of the practical effects was an attempt to describe the particle size distribution curves of HPGR products with variable feed graining with using a theoretical Weibull distribution, and linking parameters in the approximation formula with the level of removal the fine particle size fractions from feed. Approximation results show that the Weibull distribution function describes comminution products with error below 4%. In turn, the approximation formula linking the model parameters with the degree of removal of fine particle size fractions had the fitting error exceeding a minimum of 5% for the worst condition, while for the most favourable case the fitting error was lower than 4%. The obtained results allowed us to determine the relationship between the feed properties and the course of the copper ore grinding process in HPGR device and its effectiveness measured by technological and economic indices.