

Daniel Saramak*

UWARUNKOWANIA PRODUKCJI DROBNYCH FRAKCJI ZIARNOWYCH W PROCESACH ROZDRABNIANIA W WYSOKOCIŚNIENIOWYCH PRASACH WALCOWYCH

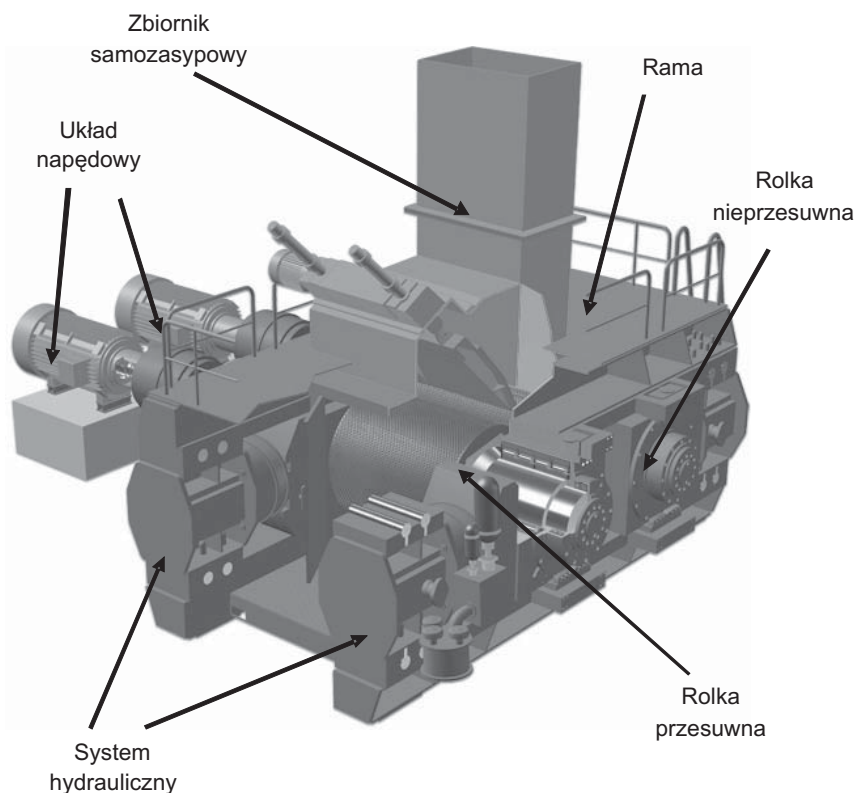
1. Zastosowanie pras walcowych w układach rozdrabniania rud

Technologia wysokociśnieniowego rozdrabniania jest obecnie jedną z najefektywniejszych pod względem energochłonności metod rozdrabniania rud, a przemysłowe aplikacje wysokociśnieniowych pras walcowych (HPGR) są światowym trendem w sektorze górniczo-przeróbczym [1, 4]. Znaczne obniżenie zużycia energii w procesie rozdrabniania uzyskuje się dzięki zastosowaniu pras walcowych z reguły na drugim stopniu rozdrabniania w układzie technologicznym, zastępując nimi młyny bębnowe, ewentualnie łącząc prasy walcowe z procesami domielania ich produktu w młynie kulowym [2].

Zasada działania wysokociśnieniowej prasy walcowej jest analogiczna do sposobu kruszenia w kruszarce walcowej. Dezintegracja materiału następuje pomiędzy dwiema przeciwnie obracającymi się z jednakową prędkością walcami, które napędzane są osobnymi silnikami (rys. 1). Walce osadzone są na solidnej ramie, jedna z rolek jest umocowana na stałe, bez możliwości przesuwania (*fixed roll*), natomiast druga rolka jest przesuwna (*floating roll*) i możliwy jest jej ruch w pozycji horyzontalnej. Odpowiedni system hydrauliczny powoduje ruch rolki przesuwniej, która dociskana w kierunku rolki nieprzesuwniej wywiera dodatkowe ciśnienie, wydatnie zwiększając siłę docisku na warstwę materiału poddawaną rozdrabnianiu w komorze roboczej prasy, a tym samym w zasadniczy sposób wpływa na efektywność dezintegracji nadawy. W przemysłowych maszynach można uzyskiwać siły nacisku rzędu 25,000–30,000 kN, co odpowiada naciskowi jednostkowemu około 4,5 N/mm². W urządzeniach półtechnicznych możliwe jest uzyskiwanie ciśnienia przekraczającego 8 N/mm². Tak wysokie wartości ciśnienia roboczego w urządzeniu powiększają efekt rozdrabniania przez generację tzw. mikropęknięć (*micro-cracks*)

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Kraków

w pojedynczych ziarnach, które ujawniają się na dalszych etapach rozdrabniania w młynie kulowym, redukując energię mielenia. Mikropęknięcia powiększają także powierzchnię właściwą ziarna, ułatwiając penetrację ekstrahentowi i tym samym podnosząc stopień wypłukiwania składników użytecznych w procesach ługowania. Proces rozdrabniania nadawy występuje na skutek oddziaływania na pojedyncze ziarna siły nacisku na granicy „powierzchnia robocza rolki – ziarno” oraz siły nacisku na granicy „ziarno – ziarno” wewnątrz warstwy materiału. Zapewnia to między innymi tzw. dławienny system podawania nadawy do urządzenia (*choke feeding system*), charakterystyczny dla pras walcowych. Materiał podawany jest w sposób upakowany za pomocą zbiornika samowładowczego umieszczonego bezpośrednio nad rolkami prasy. Dławienny system podawania nadawy powoduje stopniową i coraz większą kompresję warstwy materiału w miarę jej przesuwania w dół komory roboczej w wyniku ruchu obrotowego walców.



Rys. 1. Wysokociśnieniowa prasa walcowa (Materiały reklamowe firmy KHD)

Obecnie na rynku jest czterech producentów HPGR: trzech z Niemiec (KHD, Koepfer, Polysius) oraz jeden z Danii (FL Smidth). Zakres typowych parametrów technicznych urządzeń przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Przedziały wartości wybranych parametrów technicznych pras walcowych

Parametr techniczny	Min.	Maks.
Średnica robocza walca [m]	0,75	2,6
Długość robocza walca [m]	0,25	1,8
Długość × szerokość instalacji [m]	3,8 × 3,0	13,65 × 7,75
Wysokość instalacji [m]	2,0	5,2
Wydajność [t/h]	10	4200
Moc zainstalowana [kWh]	2 × 100	2 × 4000
Waga [t]	20	400

Spośród zalet technologii wysokociśnieniowego rozdrabniania w prasach walcowych można wymienić [4, 7]:

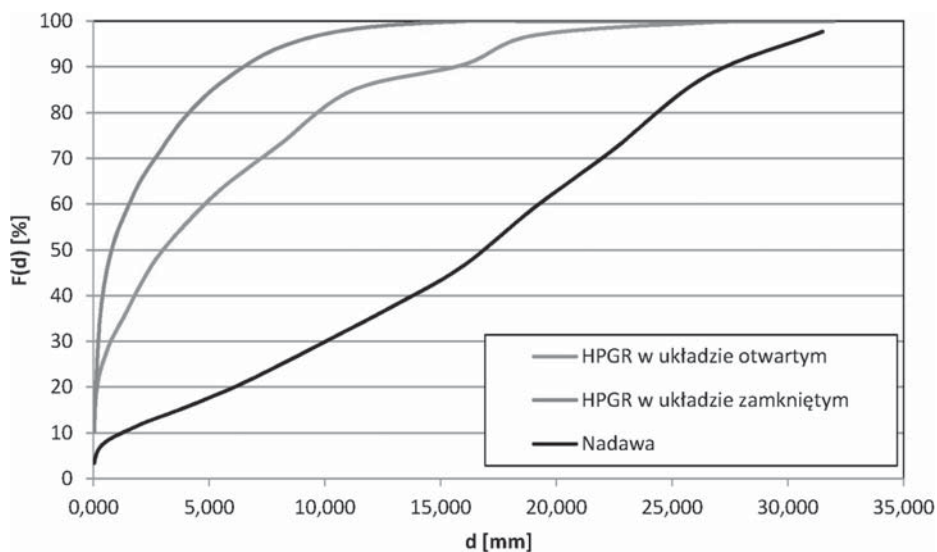
- niskie zużycie jednostkowe energii elektrycznej (0,8–3 kWh na tonę przerabianego surowca według różnych źródeł);
- powstawanie mikropęknięć, w wyniku czego następuje aktywizacja mechaniczna materiału obniżająca energochłonność procesu mielenia mierzoną wskaźnikiem energochłonności Bonda nawet do 30% według różnych badań;
- zwiększenie zawartości składnika użytecznego w produktach otrzymywanych podczas dalszych etapów wzbogacania chemicznego, poprawienie wskaźnika uzysku dla procesu,
- możliwość prowadzenia procesu na sucho i na mokro (do 10% wilgotności);
- wysoki współczynnik efektywnego czasu pracy urządzenia ($T_e > 95\%$),
- niski stopień zapylenia, mała emisja hałasu i wibracji;
- niewielka powierzchnia zabudowy i stosunkowo mała kubatura.

2. Zastosowanie pras walcowych w układach rozdrabniania rud

Prasy walcowe mogą pracować w zamkniętym lub otwartym układzie kruszenia. Oba rozwiązania mają swoje zalety i wady. Wariantem częściej występującym w aplikacjach przemysłowych jest zastosowanie zamkniętego obiegu kruszenia w HPGR. Celem porównania efektów rozdrabniania w obu wariantach przeprowadzono program eksperymentalny rozdrabniania w układzie otwartym i zamkniętym. Krzywe składu ziarnowego obu produktów oraz uzyskane wyniki technologiczne przedstawiono na rysunku 2 i w tabeli 2.

W układzie zamkniętym następuje lepsze rozdrabnianie rudy, średni stopień rozdrobnienia (S50) w układzie zamkniętym jest ponaddwukrotnie większy niż w układzie otwartym, natomiast 80-procentowy stopień rozdrobnienia prawie czterokrotnie większy w porównaniu z układem otwartym. W układzie zamkniętym następuje także większa produkcja produktu o uziarnieniu poniżej 3 mm, który jest preferowaną nadawą do młyna

kulowego, występującego z reguły w ciągu technologicznym bezpośrednio za prasą walcową. W układzie zamkniętym ponad 50% wag. produktu opuszczającego prasę walcową ma uziarnienie poniżej 3 mm, natomiast w układzie otwartym tylko 27,7%. W układzie zamkniętym zawrót materiału do prasy stanowi około 30% całkowitej nadawy do urządzenia, przez co wymagane jest zastosowanie większych maszyn w ciągu technologicznym. Z instalacją większego urządzenia wiązą się z kolei wyższe nakłady inwestycyjne oraz wyższe koszty wymiany okładzin roboczych.



Rys. 2. Krzywe składu ziarnowego produktów kruszenia w prasie walcowej w układzie otwartym i zamkniętym

TABELA 2

Porównanie wyników technologicznych układu otwartego PGR zamkniętego

Wskaźnik	HPGR w układzie otwartym	HPGR w układzie zamkniętym
E_{sp} [kWh/t]	2,23	2,45
Przerób właściwy [$Mg \cdot s/h \cdot m^3$]*	243	222
S50	2,47	5,90
S80	5,55	21,10
frakcje najdrobniejsze (poniżej 63 μm)	7,61	6,28
Produkcja netto >3 mm	27,7	50,5

* Wydajność mierzona z uwzględnieniem kubatury roboczej urządzenia; wskaźnik ten umożliwia porównanie wydajności urządzeń o różnych średnicach walców

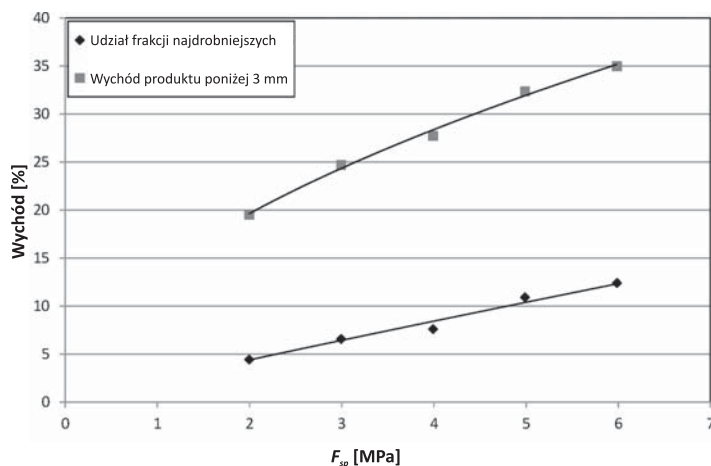
W przemysłowym układzie otwartym można zainstalować mniejszą prasę walcową, dzięki czemu uzyskuje się oszczędności dotyczące zarówno zakupu jednostki, jak i okresowych wymian okładzin roboczych. Jednak gorsze wyniki rozdrabniania uzyskane dla układu otwartego sprawiają, że korzystniejsze efekty technologiczne uzyskuje się w przemysłowych procesach walcowych pracujących w układach zamkniętych (z zawrotem).

3. Program eksperymentalny

W celu określenia wpływu wybranych wielkości sterowalnych urządzenia na zawartości frakcji najdrobniejszych w produktach rozdrabniania pras walcowych przeprowadzono serię doświadczeń, w których wykonano próby kruszenia rudy miedzi w prasie walcowej dla różnych wartości ciśnienia roboczego oraz prędkości obrotowej walców. Powstawanie frakcji bardzo drobnych jest zjawiskiem niepożądanym w procesach przeróbki rud, gdyż zbyt drobno zmielona ruda uzyskuje niższą efektywność w procesach flotacji. Ziarna najdrobniejsze (z reguły poniżej 35 μm) są zbyt małe, by flotować, zatem minerały użyteczne zmielone poniżej tej granicy przechodzą do odpadów, generując straty metalu użytecznego i pogarszając wskaźniki efektywności całego procesu wzbogacania. Przeprowadzone doświadczenia miały na celu sprawdzenie możliwości sterowania procesem kruszenia w HPGR w celu ograniczenia produkcji frakcji najdrobniejszych.

3.1. Wpływ ciśnienia roboczego na produkcję frakcji najdrobniejszych

W pierwszej serii doświadczeń wykonano testy kruszenia, przyjmując pięć różnych wartości ciśnienia roboczego w prasie walcowej, a następnie wyznaczono zależności pomiędzy ciśnieniem a poziomem generowanych frakcji bardzo drobnych oraz wydajnością urządzenia (rys. 3).



Rys. 3. Zależność pomiędzy ciśnieniem roboczym prasy a powstawaniem frakcji najdrobniejszych oraz wychodem produktu poniżej 3 mm

Ciśnienie robocze rozumiane jest jako nacisk właściwy zdefiniowany wzorem [5]:

$$F_{sp} = \frac{F}{D \cdot l \cdot 1000} = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot k \cdot P_h \cdot \frac{1}{D \cdot l \cdot 1000} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

gdzie:

- F — całkowita siła docisku rolek [kN]
- D — średnica rolki [m],
- d — średnica tłoka dociskającego rolkę przesuwaną [m],
- k — liczba tłoków w układzie (zwykle $k = 4$),
- P_h — ciśnienie hydrauliczne w cylindrach [kPa],
- l — szerokość robocza rolki [m].

Na podstawie otrzymanych wyników doświadczeń można zauważyć, że wzrost ciśnienia roboczego skutkuje zwiększoną produkcją frakcji najdrobniejszych. Zależność ta jest wprost proporcjonalna do zmian wartości ciśnienia, a jej przebieg bardzo dobrze opisuje funkcja (2) (błąd dopasowania 2%):

$$\gamma(\text{frakcje najdrobniejsze}) = 2,30 \cdot F_{sp}^{0,94}, R^2 = 0,98 \quad (2)$$

Jeszcze lepsze wyniki modelowania otrzymano w przypadku wychodu frakcji poniżej 3 mm (określanej też jako wydajność netto). Wprost proporcjonalną zależność prawie idealnie opisuje model potęgowy (błąd dopasowania poniżej 0,5%):

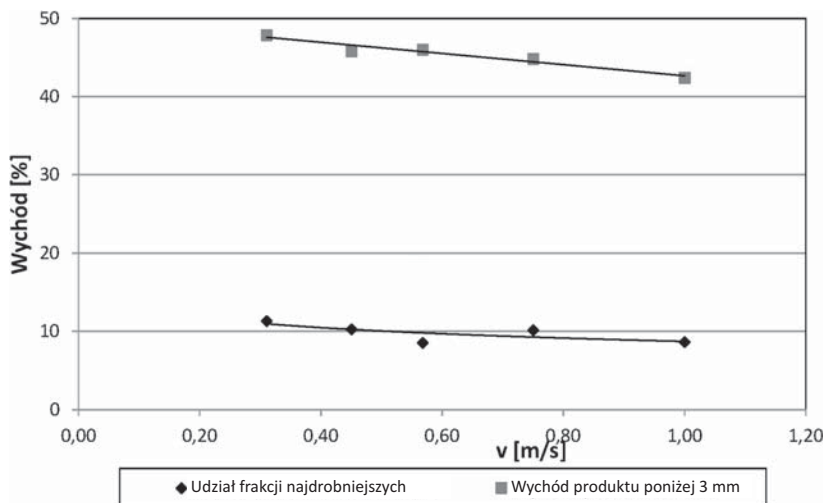
$$\gamma(>3 \text{ mm}) = 13,58 \cdot F_{sp}^{0,53}, R^2 = 0,995 \quad (3)$$

Ponieważ wartość potęgi jest mniejsza od jeden, oznacza to, że coraz większe wartości ciśnienia roboczego skutkują relatywnie mniejszymi przyrostami klasy ziarnowej poniżej 3 mm, czyli efekt się osłabia przy wysokich ciśnieniach.

3.2. Wpływ prędkości obrotowej walców na produkcję frakcji najdrobniejszych

Druga seria doświadczeń obejmowała eksperymenty kruszenia przy różnych wartościach prędkości obwodowej walców (v) wyrażonej w metrach na sekundę (rys. 4). Prędkość walców może być także podawana w obrotach na sekundę, a relację pomiędzy prędkościami wyrażonymi w obu jednostkach opisuje wzór:

$$n \left[\frac{\text{obr}}{\text{min}} \right] \cdot \frac{\pi D}{60} = v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (4)$$



Rys. 4. Zależność pomiędzy prędkością obwodową walców a powstawaniem frakcji najdrobniejszych w produkcie oraz wychodem produktu poniżej 3 mm

Analizując wyniki doświadczeń, można zauważyć, że prędkość obrotowa walców wpływa w trudny do określenia sposób na generację frakcji najdrobniejszych. Generalnie zależność ta jest odwrotnie proporcjonalna, jednakże trudno jest na podstawie tej serii doświadczeń wyznaczyć model regresyjny na satysfakcjonującym poziomie dokładności. Odwrotnie proporcjonalna zależność opisuje zjawisko zgodnie z rzeczywistością, ponieważ przy wyższych prędkościach walców materiał krócej poddawany jest naciskom rolek w komorze roboczej, przez co powstaje mniej materiału najdrobniejszego. Dokładniejsza analiza zjawiska i wyznaczenie istotnego modelu wymaga powtórzenia tej serii doświadczeń dla większej liczby różnych prędkości obrotowych. Zwiększenie prędkości ma z kolei korzystny wpływ na całkowitą wydajność prasy walcowej – dzięki temu w prosty sposób można sterować wskaźnikami wydajnościowymi urządzenia oraz układu rozdrabniania.

Analizując łączny wpływ ciśnienia roboczego oraz prędkości na powstawanie frakcji najdrobniejszych, można wyróżnić różne warianty sterowania urządzeniem, przyjmujące za funkcję celu maksymalizację efektu technologicznego (mierzonego efektywnością rozdrabniania) lub ekonomicznego (mierzonego m.in. energochłonnością urządzenia).

4. Podsumowanie – wnioski końcowe

Przeprowadzony program badawczy pozwolił na analizę zjawiska powstawania frakcji najdrobniejszych w procesie rozdrabniania w prasie walcowej. Generowanie niepożądanego frakcji najdrobniejszych nie stanowi bardzo istotnego problemu przy ocenie efektywności pracy wysokociśnieniowych pras walcowych. W przypadku analizowanego typu rud wynosiła ona średnio 8–9%, co w porównaniu z efektami konwencjonalnych urządzeń kruszących i mielących jest wynikiem bardzo dobrym.

Jak wskazują wyniki doświadczeń w celu dalszego ograniczenia produkcji ziaren najdrobniejszych należy:

- prowadzić proces przy wyższych prędkościach obrotowych walców,
- prowadzić proces przy niższych wartościach ciśnienia roboczego,
- zainstalować prasę walcową w zamkniętym układzie rozdrabniania.

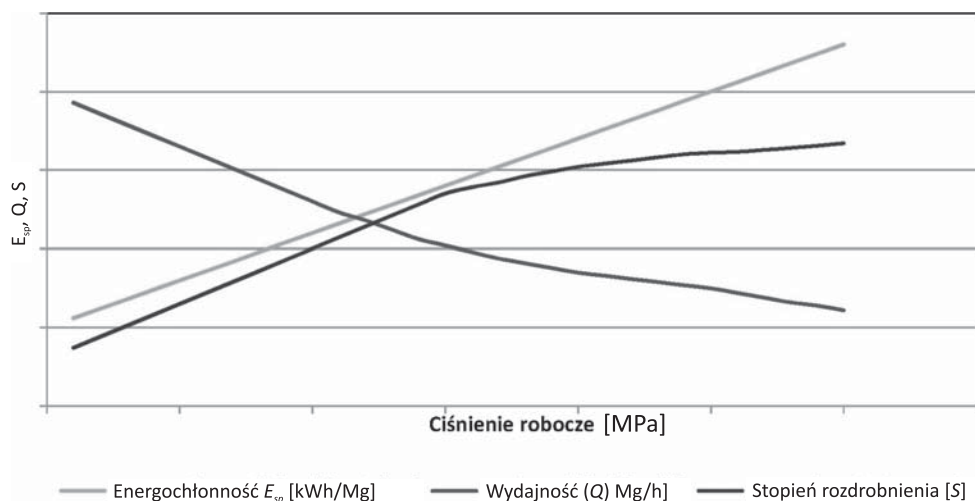
Dzięki takiej strategii dodatkowo osiągnęte będą niższe wskaźniki energochłonności procesu oraz zwiększy się wydajność urządzenia. Zwiększona wydajność może zniwelować wpływ niższego stopnia rozdrabniania w układzie osiąganego przy niższych wartościach ciśnienia roboczego, ponieważ będzie możliwa większa przepustowość urządzenia i rozdrabnianie większej ilości materiału.

Efektom uboczym będzie szybsze zużywanie się okładzin roboczych, jednak należy pamiętać, że wyniki osiągnęte w odniesieniu do danego typu rudy mogą się różnić, dlatego w każdym przypadku powinna być przeprowadzona szczegółowa analiza z uwzględnieniem specyfiki danego procesu. Niemniej jednak omawiane zależności można ująć w uogólniony sposób, przedstawiony na rysunkach 5 i 6.

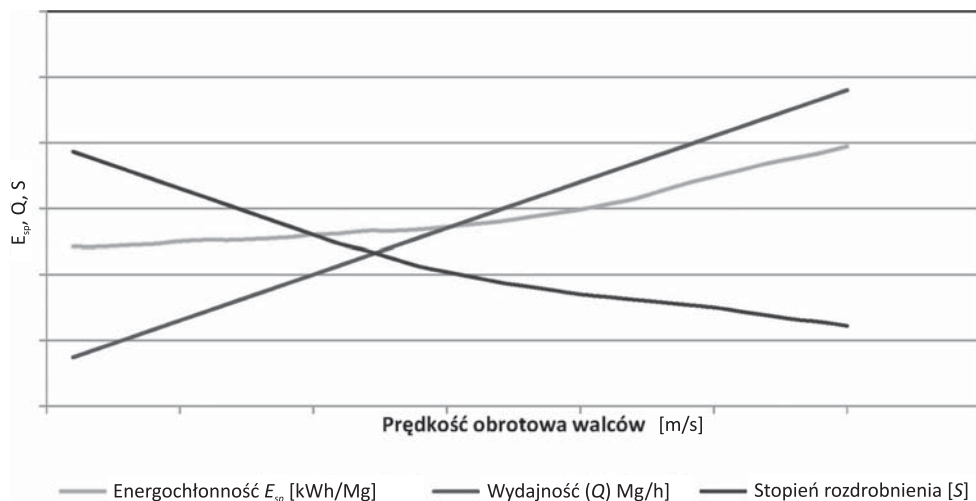
Przedstawione w artykule zagadnienia skłaniają do podjęcia tematyki optymalizacji pracy układów rozdrabniania surowców mineralnych opartych na wysokociśnieniowych prasach walcowych [9].

Wyznaczenie odpowiednich modeli technologicznych, ujmujących powstawanie frakcji najdrobniejszych jest pomocne przy opracowywaniu strategii pracy zakładu przerobczego optymalnej pod względem przyjętej funkcji widzenia, określonej jako:

- maksymalizacja odzysku składnika użytecznego,
- maksymalizacja efektów ekonomicznych.



Rys. 5. Wpływ ciśnienia roboczego na efektywność pracy HPGR



Rys. 6. Wpływ prędkości obrotowej walców na efektywność pracy HPGR

LITERATURA

- [1] Daniel M.J., Morell S.: HPGR model verification and scale-up. Minerals Engineering, vol. 17 issue 11–12, 2004, s. 1149–1161
- [2] Kalinowski W.: Modernizacja procesów przemiałowych w przemyśle cementowym w świetle wymagań najlepszych dostępnych technik. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 1, 2006, s. 12–15
- [3] Materiały reklamowe firmy KHD Humboldt Wedag: First choice for HPGR technology and service, Germany, 2010
- [4] Morley C.: HPGR in hard rock applications. Mining Magazine, September 2003, s. 118–127
- [5] Naziemiec Z., Saramak D.: Analiza zmian obciążenia materiału w strefie zgniotu pras walcowych. Górnictwo i Geoinżynieria (kwartalnik AGH), r. 33, z. 4, 2009, s. 221–234
- [6] Saramak D.: Podstawowe parametry determinujące proces rozdrabniania w prasach walcowych, Magazyn Autostrady, nr 10, 2011, s. 84–86
- [7] Saramak D.: Technologia HPGR. Magazyn Kruszywa, nr 2, 2011, s. 66–69
- [8] Saramak D.: Technological Issues of High-Pressure Grinding Rolls Operation in Ore Comminution Processes. Archives of Mining Sciences, vol. 56, issue 3, 2011, s. 517–526
- [9] Torres M., Cassali A.: A novel approach for the modelling of high-pressure grinding Rolls. Minerals Engineering, vol. 22, 2009, s. 1137–1146