

*Tomasz Gawenda\**

## GLÓWNE ASPEKTY ROZDRABNIANIA TWARDYCH SUROWCÓW MINERALNYCH W WYSOKOCIŚNIENIOWYCH PRASACH WALCOWYCH

---

### 1. Wstęp

Rozdrabnianie jest procesem energochłonnym i niezbędnym w wielu technologiach inżynierii mineralnej. Jest ono przedmiotem wielu badań naukowych i przemysłowych prowadzonych na całym świecie w celu właściwego doboru nowoczesnych urządzeń rozdrabniających do przerabianych surowców mineralnych i utylizacji odpadów oraz eliminacji przestarzałych maszyn pod kątem uzyskiwania jak najlepszych produktów oraz korzyści technologicznych, ekonomicznych i ekologicznych.

W dzisiejszych czasach wydaje się niemożliwe prowadzić kompleksową przeróbkę surowców mineralnych bez innowacyjnych technologii. W ostatnich latach w zakładach przeróbczych pojawiły się udoskonalone, a także nowoczesne urządzenia rozdrabniające o znakomitych możliwościach technologicznych. Do nich możemy zaliczyć kruszarki udarowe z wałem pionowym (kubizery) służące do poprawy jakości kształtu ziaren kruszywa mineralnych, granulatory stożkowe pracujące na końcowym etapie rozdrabniania, kruszarki rewersyjne młotkowe, młyny kulowe wieżowe z wałem pionowym typu Vertimill i przede wszystkim wysokociśnieniowe prasy walcowe (HPGR).

Technicznym hitem lat 90. XX wieku w budowie obiegów zamkniętych dwuetapowego domielania, zwłaszcza klinkieru cementowego i wapienia, stało się opracowanie i wprowadzenie pras walcowych drugiej generacji. Pierwsza generacja pojawiła się w przemyśle na początku lat 70. Problemy techniczne ułożyskowania walców a zwłaszcza szybkiego zużywania się ich roboczej powierzchni w sposób deformujący kształt i wymiar szczeliny, sprawiły, że prasy walcowe nie uzyskały większego znaczenia praktycznego. Pierwsze egzemplarze pras walcowych drugiej generacji pojawiły się w 1985 roku, w których ciśnienie prasowania warstwy klinkieru wynosiło 40÷100 MPa. W 1989 roku pojawiła się konstruk-

---

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

cja trzeciej generacji prasy zdolnej zgniatać warstwę materiału ciśnieniem przekraczającym 200 MPa, dlatego urządzenia te nazywane są wysokociśnieniowymi prasami walcowymi (HPGR) [8].

W polskim przemyśle wydobywczym i przeróbczym rud metali nieżelaznych nie istnieje żadna instalacja technologiczna rozdrabniania z prasami HPGR, natomiast znane są tylko dwie aplikacje pras walcowych w układach rozdrabniania w przemyśle wapienniczym i jedna w przemyśle cementowym. Są to przemiałownie firm Nordkalk i Lafarge.

Na świecie takie prasy z powodzeniem wykorzystuje się w przeróbce rud miedzi, molibdenu, platyny, złota, niklu czy żelaza. Prasy HPGR najbardziej są rozpowszechnione w m.in. w zakładach przeróbczych w Australii, Kanadzie, Afryce, Azji i Europie Zachodniej.

Światowi producenci pras walcowych to firmy niemieckie Koeppern, Humboldt Wedag oraz Krupp-Polysius.

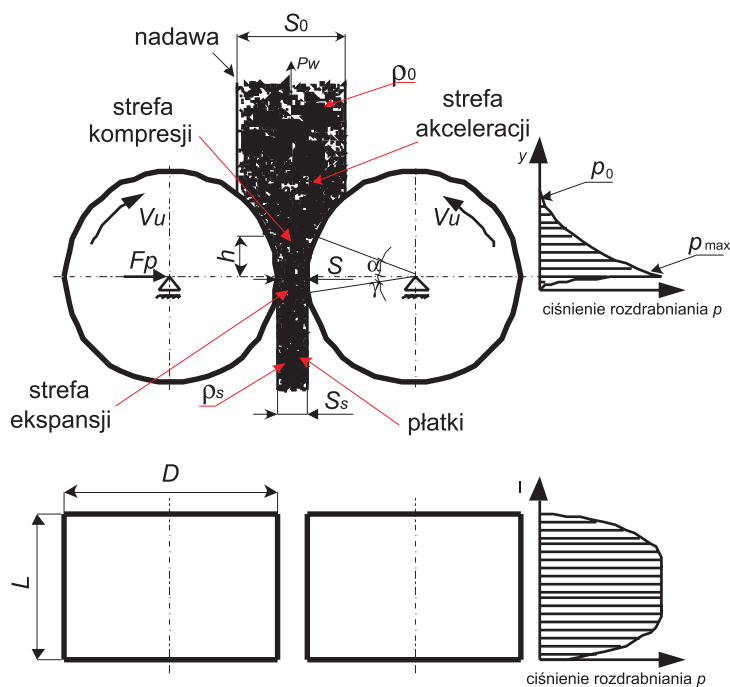
## **2. Przebieg procesów rozdrabniania w wysokociśnieniowych prasach walcowych**

Wysokociśnieniowe prasy walcowe są stosowane do rozdrabniania twardych surowców mineralnych w układach przed domieleniem surowców w młynach, zastępując przy tym inne kruszarki z ostatniego stadium kruszenia i młyny prętowe lub kulowe z pierwszego stadium mielenia, lub także eliminując młyny całkowicie z instalacji (np. przy przemiale wapienia). Możliwe jest osiągnięcie oszczędności energetycznych nawet do 50% w porównaniu do konwencjonalnych procesów rozdrabniania w młynach kulowych i półsamomiających. Prasy walcowe oparte są na rozdrabnianiu kompresyjnym w łożu pod wysokim ciśnieniem dochodzącym do 250 MPa pomiędzy dwoma przeciwnie obracającymi się walcami o jednakowej średnicy  $D$  i prędkości obrotowej  $V$ . Każdy z walców ma własny napęd, a silniki obu walców są ściśle zsynchronizowane co do liczby obrotów. W regulowaną szczelinę pomiędzy walcami, od góry i równomiernie na całej długości (szerokości walców) podawany jest materiał do skruszenia przez sprasowanie. Ciśnienie prasowania ma w warstwie i tworzących ją pojedynczych ziarnach w warunkach skrzepowanych wytworzyć naprężenia przekraczające strukturalną wielkość ich oporu na rozdrobnienie (ściskanie, zgniatanie). Zagęszczane ziarna w łożu między walcami wzajemnie przekazują sąsiadnym ziarnom energię kruszenia, powodując coraz większe upakowanie materiału w jednostce objętości, dążąc do zmiany z początkowej gęstości nasypowej łoża (np.  $1,65 \text{ g/cm}^3$ ) znajdującego się w gardzieli kruszarki do nowej gęstości rzeczywistej (objętościowej) (np.  $2,45 \text{ g/cm}^3$ ) nowo powstałych brył. Takie płatki mają gęstość rzeczywistą o 10–20% mniejszą od gęstości właściwej rozdrabnianego materiału [1, 8, 12, 14].

Formowana przez podajnik warstwa materiału o grubości  $S_0$  i gęstości początkowej  $\rho_0$  po grawitacyjnym wejściu w obszar oddziaływania walców podlega najpierw zagęszczeniu (rys. 1). Stopień zagęszczenia charakteryzuje narastająca wielkość stosunku grubości  $S_0$  materiału przed wejściem w szczelinę wylotową do grubości  $S_s$ , czyli materiału po wyjściu ze

szczeliny wylotowej, a także stosunek osiągniętej w tym miejscu przez materiał gęstości  $\rho_s$  do gęstości  $\rho_0$ . Sumaryczną wielkość stopnia zagęszczenia materiału w prasie określa równanie:

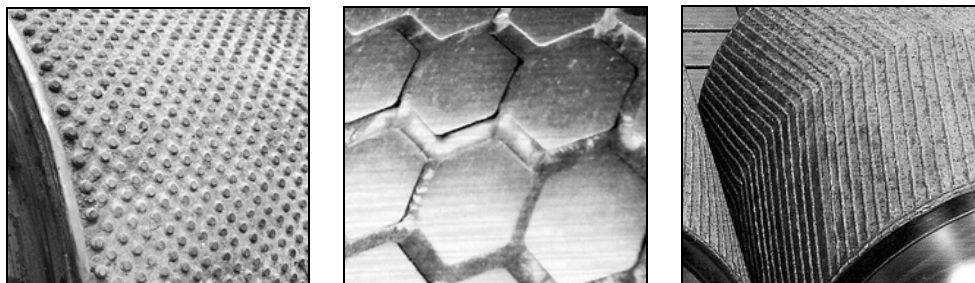
$$S_z = \frac{S_0}{S_s} = \frac{\rho_s}{\rho_0} \quad (1)$$



Rys. 1. Schemat zasady działania prasy walcowej

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [8]

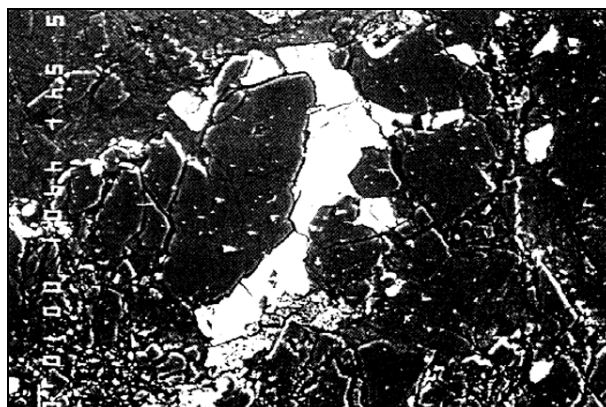
Z chwilą osiągnięcia przez materiał gęstości ograniczającej możliwość dalszego zagęszczania się przez zmianę wzajemnego położenia ziarn wobec siebie w warstwie pojawia się ciśnienie zwrotne  $P_w$ , wypychania ziarn z przestrzeni między walcami. Negatywny wpływ tego ciśnienia równoważony jest odpowiednim rozproszeniem i ukierunkowaniem przenoszenia sił nacisku z powierzchni walców do warstwy materiału. Rozproszenie i ukierunkowanie tych sił osiąga się przez odpowiednie ukształtowanie powierzchni walców (rys. 2). Dobre odpowiednio powierzchnie również eliminują poślizg, dzięki czemu unika się strat energii (zamiany na ciepło), a zwłaszcza ograniczenia zużycia okładzin walców. Optymalny układ powierzchni walców pozwala utrzymać wskaźnik zużycia okładziny na poziomie niższym od 0,15 g/Mg przerobionego klinkieru cementowego [8].



**Rys. 2.** Widok różnych okładzin walca

Źródło: [3, 4]

Autorzy prac [8, 14] wyróżniają 3 etapy w procesie zgniatania materiału w prasach walcowych (rys. 1). Na początku występuje etap (akceleracji) wstępnego zagęszczania się warstwy przy bardzo niskim zużyciu energii. Później zanik możliwości wzajemnego przemieszczania się ziarn wywołuje pojawienie się i stopniowy wzrost oporów ścinania. Warstwa ta staje się coraz bardziej stabilna i podatna na przenoszenie sił zgniatania do powierzchni walców do wewnątrz. Opór ścinania przewyższa wielkość ciśnienia wypychania i w efekcie ziarno zgniata ziarno — jest to tzw. etap deformacji w wyniku, którego kształtuje się nowy, umiarkowanie luźny skład ziarnowy zgniatanego materiału. Kolejny etap prasowania warstwy (kompresji), przebiegający w obszarze do największego narastającego zbliżenia walców, zasadniczo nie tworzy już ziarn nowych, ale wskutek wysokiego ciśnienia prasy, w ziarnach wcześniej utworzonych wywołuje defekty tekstury (mikrorysy, pęknięcia) (rys. 3), które w obszarze ekspansji (narastające oddalanie się powierzchni walców) może się objawić powstawaniem nowych ziarn. Jeżeli to nie nastąpi, defekty te ujawnią się w młynie domielającym przez poprawę mielności zgniecionego materiału.



**Rys. 3.** Obraz rozdrobnionej rudy miedzi w HPGR widoczny pod mikroskopem elektronowym

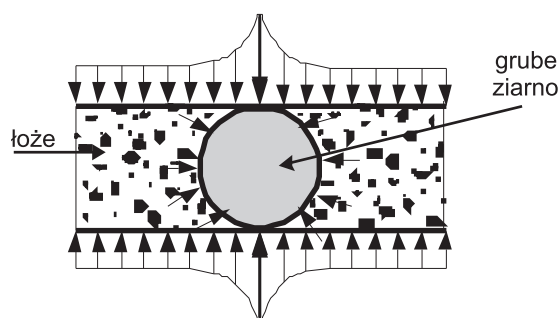
Źródło: [6]

Produkt wychodzący z pras walcowych nie jest sypki, co jest charakterystyczne dla tego procesu, lecz tworzy zwarte sprasowane agregaty ziarn w postaci płatków (rys. 4). Jeżeli prasa współpracuje z młynem domielającym, to zjawiska agregatyacji nie posiada praktycznego znaczenia. Jeżeli prasa walcowa jest urządzeniem dającym produkt przydatny do wyseparowania produktu finalnego, wówczas opuszczający ją materiał należy poddać dezagregatyacji, np. na sitach albo młynach wibracyjnych i skierować do separatora z zawrotem [8].



**Rys. 4.** Chińska ruda złota przed rozdrobnieniem (z lewej), po rozdrobnieniu w HPGR (w środku), po ściśnięciu płatków w palcach (z prawej) (fot. T. Gawenda)

Podczas procesu rozdrabniania, na walce kierowane są mieszaniny ziarn drobnych i grubych, gdzie ziarna grube są osadzone na ziarnach drobnych. Stan „quasi-hydrostatyczny” jest tworzony wokół tych ziarn w szczelinie a otaczające ziarna, tzw. łożo, wspomagają pojedyncze ziarna podczas przykładania obciążenia (rys. 5). Efekt ten utrudnia rozdrabnianie i zapobiega przed ruchem fragmentów po rozbiciu ziarna. Ponadto, powoduje to wyższe lokalne obciążenia na powierzchni walca, a zatem większe naprężenia wewnątrz materiału walców.



**Rys. 5.** Stan „quasi-hydrostatyczny” grubego ziarna w łożu materiału

Źródło: [14]

Na skutek wyższych obciążeń pojawiają się uszkodzenia powierzchni walcowych. Jedną z przyczyn tych uszkodzeń jest przeładowanie powierzchni walcowych pojedynczymi grubymi ziarnami o średnicach większych niż szczelina. Wzrost ciśnienia wywołany obecnością grubych ziarn zależy wysoce od stosunku pomiędzy rozmiarami grubych i drobnych ziarn, stopnia wypełnienia szczeliny pomiędzy walcami, rodzaju surowca oraz zastosowanych sił rozdrabniających. W niektórych przypadkach, ciśnienie skrajnie przekracza więcej niż pięciokrotnie średnią wartość ciśnienia w łożu. Zwłaszcza ziarna o średnicy większej niż dwukrotny rozmiar szczeliny, na początku strefy rozdrabniania, powodują bardzo wysokie wartości obciążeń normalnych na powierzchni walców [14].

W przemyśle, często wykorzystuje się relatywne wymiary maszyny, aby uzyskać informacje na temat obciążeń powierzchni walca. Siła mielenia  $F_L$  jest powiązana z szerokością walca, zaś właściwa siła mielenia  $F_{sp}$  jest w relacji z powierzchnią projekcyjną walców [7, 10], przy czym:

$$F_L = \frac{F_P}{L} \quad (2)$$

gdzie:

$F_L$  — względna siła mielenia, N/mm,

$F_P$  — siła naciskająca, N,

$L$  — długość walca, mm,

a zatem właściwa siła mielenia (nacisk właściwy)  $F_{sp}$  [N/mm<sup>2</sup>]

$$F_{sp} = \frac{F_P}{DL} \quad (3)$$

gdzie:

$F_P$  — siła naciskająca, N,

$D$  — średnica walca, mm,

$L$  — długość walca, mm.

Ciśnienie maksymalne  $p_{max}$  [N/mm<sup>2</sup>] można wyliczyć ze wzoru

$$p_{max} = \frac{F_P}{DL\alpha c} \quad (4)$$

gdzie:

$F_P$  — siła nacisku,

$D$  — średnica walca,

$L$  — długość walca,  
 $\alpha$  — kąt kompresji,  
 $c$  — parametr materiału, przy czym

$$\alpha = \sqrt{\frac{2s}{D} \left( \frac{\rho_s}{\rho_0} - 1 \right)} \quad (5)$$

gdzie:

$s$  — szerokość szczeliny, mm,  
 $D$  — średnica walca,  
 $\rho_s$  — gęstość po rozprężeniu, g/cm<sup>3</sup>,  
 $\rho_0$  — gęstość nasypowa, g/cm<sup>3</sup> (oznaczenia jak na rys. 1).

W równaniu (4) zachowanie kompresji materiału jest charakteryzowane przez parametr  $c$ . Dla wielu popularnych materiałów, wartość  $c$  wynosi około 0,2 [13, 14]. Jeżeli elastyczna relaksacja materiału jest brana pod uwagę, wówczas równanie (5) może być zastosowane w celu określenia maksymalnego ciśnienia. Parametr  $\phi$  opisuje właściwe zachowanie kompresyjne materiału [11, 12, 14]:

$$p_{\max} = \frac{F}{DL \sqrt{\frac{s}{D}} \phi} \quad (6)$$

gdzie:

$p_{\max}$  — ciśnienie maksymalne,  
 $F$  — siła nacisku walców,  
 $D$  — średnica walca,  
 $L$  — długość walca,  
 $s$  — szerokość szczeliny,  
 $\phi$  — modelowa funkcja opisu zachowania kompresji.

Z badań eksperymentalnych i doświadczeń empirycznych wiadomo, że ciśnienie maksymalne może również wystąpić powyżej najwęższej szczeliny a rozkład ciśnienia kąto-wego nie jest stały (rys. 1). Badania przy użyciu młyna laboratoryjnego wykazały, że maksymalne ciśnienie występuje pomiędzy  $0^\circ \leq \alpha_{p,\max} \leq 2^\circ$ , kątem kompresji  $7^\circ \leq \alpha \leq 13^\circ$  oraz kątem elastycznej relaksacji  $3^\circ \leq \gamma \leq 9^\circ$ . Notuje się znaczący spadek ciśnienia w kierunku krawędzi walców (rys. 1). Dodatkowo, wspomniane badanie wykazało, że rozdrabnianie ziarn o średnicach równych mniej więcej szerokości szczeliny wywołuje maksymalne ciśnienia, które znacząco przekraczają ciśnienie wyliczone na podstawie równań (4) i (5).

Zużycie energii jednostkowej  $W_i$  [kWh/t] oblicza się ze wzoru

$$W_i = \frac{P}{Q} \quad (7)$$

gdzie:

$P$  — moc, kW,  
 $Q$  — wydajność, t/h.

Jednostkową wydajność  $Q_i$  [ts/m<sup>3</sup>h] prasy można obliczyć wg wzoru

$$Q_i = \frac{Q}{DLV} \quad (8)$$

gdzie:

$D$  — średnica walca, m,  
 $L$  — długość walca, m,  
 $V$  — prędkość obrotowa walców, m/s.

Pracę pras steruje się w zasadzie dwoma parametrami, ciśnieniem wywieranym siłownikami na walec (względny nacisk wynosi od 2 do 8,5 N/mm<sup>2</sup>) i prędkością obrotową walców od 0,5 do 2 m/s. Zmiana wielkości szczeliny wylotowej jest funkcją zmiany ciśnienia operacyjnego walców, a więc jej wielkość (grubość płatków) jest odwrotnie proporcjonalna do zastosowanego ciśnienia. Szczelinę tzw. „zerową” dobiera się do miאלkości uziarnienia nadawy, dla drobniejszego materiału przyjmuje się większą szczelinę, a dla grubszego materiału mniejszą szczelinę, co jest związane bezpośrednio z gęstością nasypowά materiału i zapotrzebowaniem na wytworzenie ciśnienia międzyziarnowego wewnątrz komory prasy.

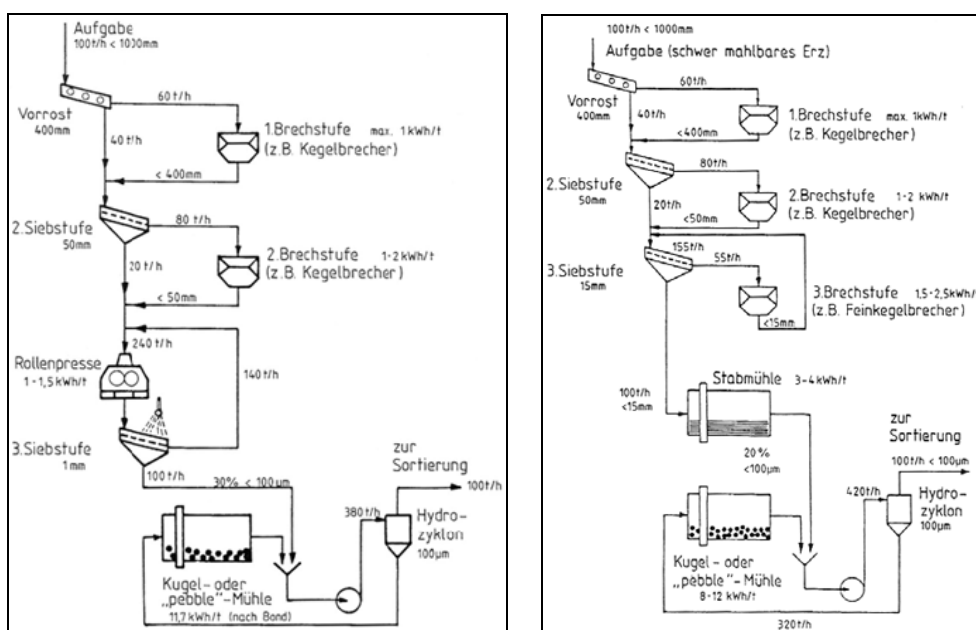
### 3. Zalety i wady wysokociśnieniowych pras walcowych

Prasy walcowe mogą zastępować niektóre urządzenia rozdrabniające w układzie technologicznym, (np. młyny domielające). Odznaczają się dużą wydajnością, a stopień rozdrobnienia osiąga wielkość 6÷10 dla klinkierów drobnoziarnistych i 40÷60 dla gruboziarnistych przy największych ciśnieniach prasowania. Wychód ziarn mniejszych od 0,1 mm przekracza 15%. Prasy walcowe konkurują z młynami rolkowo-misowymi. Porównanie wykazuje przewagę młynów rolkowo-misowych w zakresie ilości pozyskiwanej frakcji poniżej 0,1 mm, a przewagę pras walcowych w zakresie ograniczania udziału frakcji powyżej 8,0 mm. Osiągnięte rzeczywiste stopnie rozdrobnienia dla młynów są wyraźniej wyższe, ale wyższe jest także jednostkowe zużycie energii.

Prasy w układzie otwartym zużywają energię w ilości 2,0÷3,5 kWh/Mg rozdrabnianego klinkieru oraz 1,9÷4,5 kWh/Mg dla rud. Zmniejszenie wielkości ziarna nadawy do mły-

na domielającą oraz wywołanie naprężeń w strukturze ziarna, skutkuje w etapie domielania znaczącymi efektami w postaci wzrostu wydajności młyna i obniżenia zużycia energii nawet 3-krotnie (dla młyna kulowego) [14]. Według innych źródeł literatury w przypadku rozdrabniania rud metali jednostkowe zużycie energii elektrycznej w porównaniu z młynami jest niższe o ok. 10÷40% [6, 9].

Stosowanie HPGR to również niższe koszty eksploatacji urządzenia, niższe koszty inwestycyjne w porównaniu z tradycyjnymi instalacjami (np. układ typu: kruszarka, przesiewacz–klasyfikator, młyn prętowy, kulowy) (rys. 6).



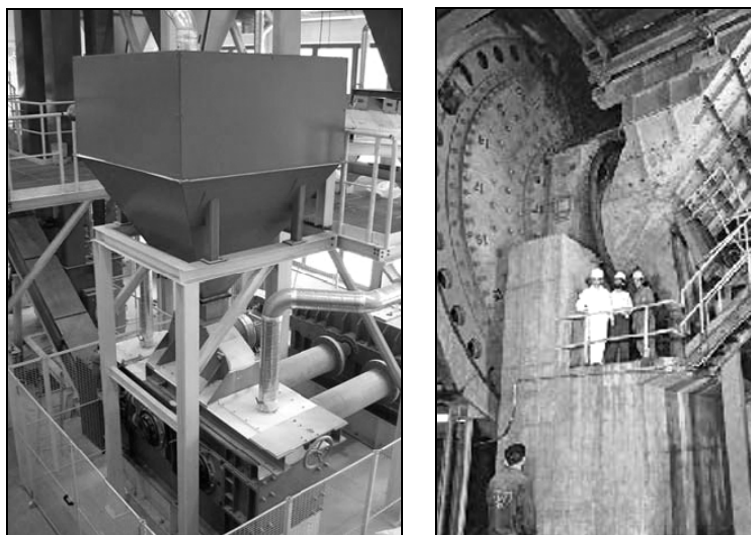
**Rys. 6.** Instalacja technologiczna procesu rozdrabniania trudno mielącej się rudy: przy wykorzystaniu tradycyjnych maszyn (lewa strona) i prasy ciśnieniowej (prawa strona)

Źródło: [14]

Według M. Pahla, (na podstawie porównania tych dwóch instalacji), wykazano, że tradycyjny układ zużywał 46 kWh/Mg, a nowy 38,6 kWh/Mg rozdrabnianej rudy; koszty zakupu samych maszyn dla tradycyjnej instalacji wyniosły 1 450 000 DM, a dla nowej o 50 000 DM mniej; natomiast stałe koszty eksploatacyjne i remontowe maszyn dla tradycyjnej technologii wynosiły 0,78 DM/Mg a dla nowej technologii były 3-krotnie niższe.

Tendencje światowe wykazują trend w kierunku aplikacji do układów rozdrabniania rud z udziałem pras walcowych z eliminacją instalacji mielenia z młynami samo- lub pół-samo-mielącymi (AG lub SAG), które dotychczas na świecie uznawane były za jedne z nowo-

częściej rozwiązań. Powodem są niskie koszty inwestycyjne związane z niższą zabudową instalacji przerobczej (rys. 7) [5, 6].



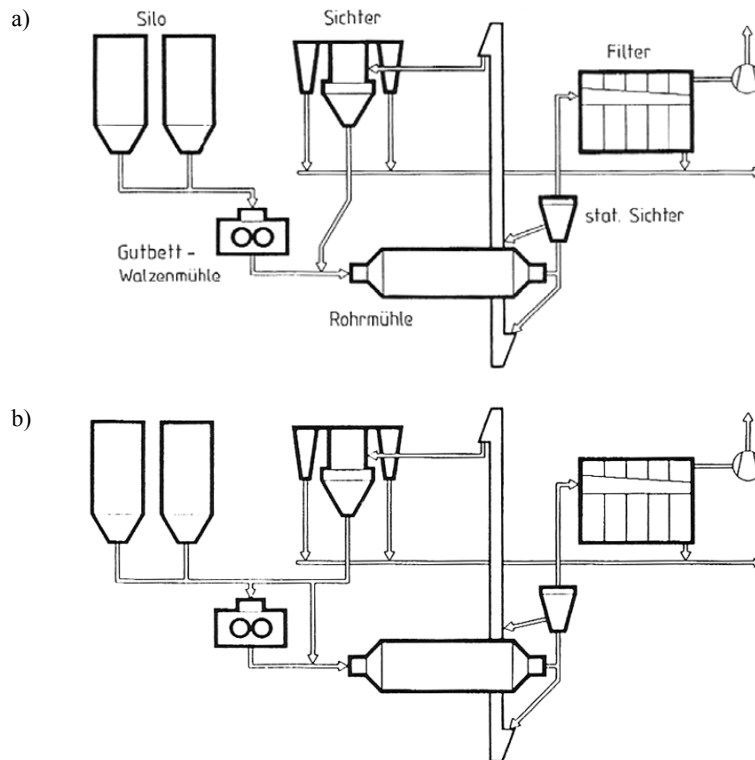
**Rys. 7.** Instalacja prasy HPGR (firmy Koeppern we Freibergu) i młyna SAG (firmy Polysius Krupp)

Wysokość samej prasy HPGR (rys. 7) (fotografia z lewej) wynosi ok. 2 m, natomiast całkowita wysokość układu zależy od konstrukcji zbiornika zasypowego, którego wysokość może dochodzić do 3,5 m. Średnica samego walczaka młyna SAG (fotografia z prawej) wynosi 5 m, a wysokość zabudowy wraz fundamentem i zbiornikiem dochodzi do 12 m.

Stosowanie HPGR w procesie rozdrabniania surowców mineralnych jest korzystne także z technologicznego punktu widzenia. Selektywne mielenie rud eliminuje możliwość przemielania surowca w przypadku grubo-wprysniętych składników użytecznych, które mogłyby się przedostać do odpadów w procesie wzbogacania. Zapobieganie przemielaniu dotyczy także surowców węglanowych w przypadku produkcji mączek np. wapiennych o wąskim zakresie uziarnienia  $0,8\div 1,2$  mm.

Wysoką skuteczność procesu przemiału na sucho (efektywniejsze rozdrabnianie materiału) można uzyskać zmieniając proces z układu otwartego na zamknięty (hybrydowy), tak jak w przypadku mielenia klinkieru (rys. 8).

Według M. Pahl'a badania wykazują, że zawrót materiału stabilizuje udział procentowy nadawy do HPGR i łatwiejsze jest uzyskanie ciśnienia między ziarnowego w gardzieli prasy. Dodatkowo w przypadku mielenia rud wzrost wilgotności materiału (np. z zawrotu po klasyfikacji hydraulicznej lub mechanicznej na mokro) może pozwolić na zwiększenie prędkości obrotowej walców a zatem wydajności całego procesu [6].



**Rys. 8.** Układy przemiałowania klinkieru cementowego wg instalacji typu Polycorn firmy Krupp Polysius: z układem otwartym (a), z układem hybrydowym (b)

(źródło: [6])

Wpływ układu hybrydowego i rozdrabniania surowca ze zwiększoną wilgotnością na większe zużycie okładzin walców jest aktualnym problemem wielu instytutów badawczych [2].

Największą wadą pras walcowych jest wrażliwość ich na obecność metalu w nadawie. Zabezpieczenie prasy przed przedostaniem się do niej kawałków metalu jest podstawowym wymogiem dla układu jej zasilania. Również nierównomierne zasilanie nadawą wywołuje w łożu wysokie naciski na pojedyncze duże ziarna dochodzące do 1200 MPa, które są niebezpieczne dla okładziny [14].

Zastosowanie pras walcowych do rozdrabniania miękkich surowców i średnio twardych zanieczyszczonych surowcami ilastymi nie przynosi korzystnych efektów.

#### 4. Podsumowanie

Firmy produkujące maszyny dla górnictwa, w tym dla przeróbki surowców mineralnych wprowadzają na rynek coraz doskonalsze urządzenia. Prężnie działające kopalnie na

świecie wykorzystują nowoczesne technologie, aby minimalizować koszty produkcyjne i podnosić jakość produktów. Do nowoczesnych maszyn przerobczych zaliczane są wysokociśnieniowe prasy walcowe trzeciej generacji, które zdominowały przemysł górniczy w krajach wysoko rozwiniętych. Urządzenia te są stosowane do rozdrabniania twardych surowców mineralnych w instalacjach do produkcji drobno-mielonych rud przygotowywanych do wzbogacania, cementów i mączek wapiennych.

Ogólnoswiatowa tendencja modernizacji zakładów przerobczych polega na zmniejszeniu ilości stadiów mielenia w młynach kulowych lub ich całkowitym zastępowaniu ze względu na niską sprawność rozdrabniania (do 10%), poprzez głębokie rozdrabnianie w nowoczesnych kruszarkach o sprawności sięgającej 90%. Takie wysokie sprawności rozdrabniania można uzyskiwać w obecnie produkowanych prasach HPGR w prawidłowo opracowanych instalacjach przeróbki.

#### LITERATURA

- [1] *Daniel M.J., Morrell S.*: HPGR model verification and scale-up. *Minerals Engineering*, 17, 2004, s. 1149–1161
- [2] *Gudat G., Trauth M., Euglen I.*: Erfahrungen mit verschiedenen Verschleißschutzkonzepten für Gutbett-Walzenmühlen. *ZKG International* 53, 2000
- [3] KHD Humboldt Wedag, materiały reklamowe
- [4] Koeppern Machinery, materiały reklamowe
- [5] *Morrell S.*: A method for predicting the specific energy requirement of comminution circuits and assessing their energy utilization efficiency. *Minerals Engineering*, vol. 21, issue 3, 2008, s. 224–233
- [6] *Pahl M.H.*: Praxiswissen Verfahrenstechnik — Zerkleinerungstechnik. Fachbuchverlag Leipzig/Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1993
- [7] *Patzel N.*: Verschleißschutzkonzepten für die Beanspruchungsflächen von Gutbett — Walzenmühlen. *ZKG International* 47, 1994
- [8] Prace Instytutu Mineralnych Materiałów Budowlanych. Procesy przemielania i młyny w przemyśle cementowym. Procesy i urządzenia. Tom I, Nr 26, Opole, 1999
- [9] *Rule C.M., Minnarr D.M., Sauremann.*: HPGR — revolution in Platinum? Third International Conference „Platinum in Transformation”, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2008
- [10] *Russell A.*: Fine grinding — A review. *Industrial Minerals*, 1989
- [11] *Schmitz T.*: Modellierung der Zerkleinerung in der Gutbett — Walzenmühlen und Verknüpfung mit dem Schüttgutverhalten zur Voraussage kritischer Betriebszustände. Dissertation TU Clausthal, 1993
- [12] *Schönert K.*: Zur Auslegung von Gutbett — Walzenmühlen. *ZKG International* 38, 1985
- [13] *Schwechten D.*: Trocken — und Nassmahlung spröder Materialien in der Gutbett- Walzenmühlen. Dissertation TU Clausthal, 1987
- [14] *Unland G., Kleeberg J.*: The normal load on roll surfaces of high pressure grinding rolls. XXIII International Mineral Processing Congress, Vol. 1, Istanbul, Turkey, 3–8 September 2006, s. 133–138