

rozdrabnianie, prasy walcowe, kruszarki walcowe

Daniel SARAMAK*

Zdzisław NAZIEMIEC**

EFEKTY ROZDRABNIANIA W KRUSZARKACH I PRASACH WALCOWYCH

Porównano technologiczne efekty rozdrabniania w wysokociśnieniowych prasach walcowych i kruszarkach walcowych. Obecnie prasy walcowe są jednymi z najefektywniejszych urządzeń rozdrabniających w układach przerobczych surowców mineralnych. Kruszarki walcowe nie są obecnie szeroko stosowane, jednak w obliczu rozwoju technologii wysokociśnieniowego rozdrabniania zastosowanie tych pierwszych może być powszechniejsze. Efektywność kruszarki walcowej została zbadana w dwóch wariantach układu technologicznego pod kątem uzyskiwania produktu końcowego o wymaganym uziarnieniu.

1. WSTĘP

Skały charakteryzują się różną wytrzymałością zależnie od sposobu przyłożenia obciążenia. Rozdrabnianie materiału skalnego może zachodzić w wyniku procesów ściskania, łamania, ścinania, udaru, ścierania itp.

Tabela 1

Mechaniczne właściwości skał karbońskich w Górnśląskim Zagłębiu Węglowym [3]

Rodzaj skały	Wytrzymałość na ściskanie R_c [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R_r [MPa]	Wytrzymałość na zginanie R_g [MPa]
dolomity	132	4,7	9,7
wapień	114	5,3	11,3
piaskowiec drobnoziarnisty	88	7,2	11,8
piaskowiec gruboziarnisty	53	5,9	7,6
granit	–	6,2	28,2
bazalt	150–300	45	–
zlepieńce	41	–	3,5
łupek dolomityczny	36	2,6	–

* AGH, Katedra Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców, dsaramak@agh.edu.pl

** Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział SiMB w Krakowie,
znaziemiec@immb.com.pl

2. ROZDRABNIANIE W KRUSZARKACH WALCOWYCH

Kruszarki walcowe należą do najprostszych urządzeń rozdrabniających. W kruszarkach tych rozdrabnianie następuje pomiędzy dwoma poziomymi walcami, obracającymi się ku sobie [1]. Walce mogą być o powierzchni gładkiej, rowkowanej lub zębatej. Walce o odpowiednio ukształtowanej powierzchni, np. zębate, zapewniają lepszy uchwyt dużych kawałków kruszonego materiału. Odległość między walcami reguluje się stosownie do pożądanego stopnia rozdrobnienia. Dla kruszarek walcowych z walcami gładkimi stopień rozdrobnienia wynosi około 4. Jeden z walców obraca się w łożyskach nieruchomych, natomiast drugi w łożyskach ruchomych, dociskanych przez sprężyny. Taki sposób zamocowania umożliwia przesuwanie się walca w kierunku poziomym, a tym samym zabezpiecza je przed uszkodzeniem w przypadku przedostania się twardych przedmiotów oraz umożliwia regulację szerokości szczeliny wylotowej. Urządzenie służące do regulacji wielkości szczeliny umożliwia jej zmianę bez zmiany ugięcia sprężyny, jak też pozwala na samą regulację wstępnego ugięcia szczeliny.

Siła docisku sprężyny P dostosowana jest do maksymalnego nacisku, jaki na zasadzie reakcji materiał może wywierać na walce i do wytrzymałości na ściskanie skały poddawanej kruszeniu. Siłę tę możemy w przybliżeniu obliczyć z wzoru:

$$P = 0,25 \cdot D \cdot L \cdot \alpha \cdot \sigma \cdot K \quad [\text{N}] \quad (1)$$

gdzie:

- D – średnica walców [cm],
- L – długość walców [cm],
- α – rzeczywisty kąt uchwytu [rad],
- σ – wytrzymałość skały na ściskanie [N/cm^2].

W kruszarkach walcowych występuje wielorakie oddziaływanie walców na rozdrabniany materiał. Gdy oba walce kruszarki obracają się z jednakową prędkością rozdrabnianie następuje w wyniku zgniatania (przy walcach gładkich i rowkowanych) lub rozłupywania (przy walcach uzębionych); obrót następuje z różną prędkością obok zgniatania występuje ścieranie, a przy walcach uzębionych rozrywanie. Przy różnych prędkościach walców w mniejszym stopniu występuje zjawisko oblepiania wilgotnym materiałem ilastym. Przy rozdrabnianiu przez zgniatanie materiału między walcami, przy małym działaniu ścierającym, uzyskiwany produkt zawiera stosunkowo mało drobnych ziaren. Najmniejszą zawartość drobnych ziaren uzyskuje się w kruszarkach z walcami uzębionymi, w których dominuje działanie ścinające. Wpływ na małą zawartość frakcji drobnych w produktach pokruszonych ma również krótki czas przebywania materiału między walcami. Skruszony materiał szybko opuszcza komorę kruszenia i nie jest poddawany dalszemu oddziaływaniu mechanicznemu, jak to ma miejsce w innych typach kruszarek. Dla zabezpieczenia równomiernej ścieralności powierzchni walców ważne jest równomierne podawanie materiału na całej długości

walców. Nierównomiernie podawany materiał powoduje nierówne zużycie powierzchni, wskutek czego szczelina wylotowa posiada zmienną szerokość, co odbija się na składzie ziarnowym produktu. Z uwagi na to, że przy gładkich walcach maksymalny wymiar ziaren nadawy powinien być ok. 20 razy mniejszy od średnicy walców, kruszarki te stosuje się do rozdrabniania średniego i drobnego, a wymiar średnicy walców nie przekracza na ogół 2000 mm. Wydajność kruszarek zależy od wymiarów walców, wielkości szczeliny i od szybkości obrotu walców. Prędkości obwodowe walców wynoszą od 1,5 do około 7 m/s. Przy dużych prędkościach obrotu występuje silne działanie ścierające, co powoduje zwiększone zużycie okładzin walców i zwiększenie ilości powstających pyłów. Zjawisku temu można częściowo przeciwdziałać stosując podawanie materiału z pewnej wysokości, nadając mu tym samym odpowiednią prędkość przed dostaniem się pomiędzy walce kruszarki.

Kruszarki walcowe przestały być stosowane w procesach produkcji kruszyw głównie z uwagi na ich małą wydajność w porównaniu z innymi kruszarkami i niewielki stopień rozdrobnienia. Znajdują natomiast zastosowanie do rozdrabniania miękkich lub kruchych surowców jak gips, węgiel. Budowane są jako jedno, dwu lub wielowalcowe. W ostatnich latach dzięki zastosowaniu nowych rozwiązań walców z powierzchnią zębatą osiągnięto zdecydowane powiększenie wydajności. Przy odpowiednim ukształtowaniu walców, ich wydajność może dochodzić nawet do kilku tysięcy ton/godz.

3. CHARAKTERYSTYKA WYSOKOCIŚNIENIOWYCH PRAS WALCOWYCH

Współczesną odmianą kruszarek walcowych, znajdującą coraz większe zastosowanie w procesach rozdrabniania, są wysokociśnieniowe prasy walcowe. Stosowane bywają do rozdrabniania w procesach produkcji kruszyw drobnych dla różnego rodzaju wypełniaczy czy sorbentów. Kruszeniu poddawane są wówczas wapienie lub dolomity. Z uwagi na niską energochłonność są coraz częściej wykorzystywane w przeróbce rud i w procesach przemiału klinkieru.

Rozdrabnianie wysokociśnieniowymi prasami walcowymi (High-Pressure Grinding Rolls) zostało opracowane w połowie lat 1980. w przemyśle wapienno-cementowym. Początkowo jednym z głównych problemów ograniczonych zastosowań tych walców była trwałości okładzin kruszących. Ich szybkie zużywanie się uniemożliwiało efektywne rozdrabnianie twardszych materiałów. W miarę rozwoju badań były możliwe przemysłowe aplikacje układów rozdrabniania do coraz twardszych materiałów. Obecnie prasy walcowe z powodzeniem można stosować także do rozdrabniania twardych rud i innych równie wymagających surowców mineralnych. Sposób rozdrabniania w prasach walcowych jest analogiczny do tego, który zachodzi w kruszarkach walcowych. Materiał jest poddawany siłom nacisku pomiędzy dwoma przeciwlegle obracającymi się walcami. Na tym w zasadzie podobieństwo się kończy, ponieważ

inny jest sposób podawania nadawy, źródło oraz wartości wywieranej siły nacisku, parametry techniczne pracy urządzenia i co z tego wynika odmienne efekty technologiczne są osiągane dla obu urządzeń.

W prasie walcowej siła nacisku wywierana jest przez system hydrauliczny, który zwykle za pomocą czterech tłoków naciska na oś jednej z rolek (rolki przesuwnej) dociskając ją w kierunku drugiej, nieprzesuwnej rolki. Przemysłowe układy hydrauliczne w prasach walcowych wywierają ciśnienie do 180 barów, co przekłada się na siły nacisku właściwego 4–5 N/mm². Najnowsze przemysłowe prasy walcowe są zdolne do uzyskiwania nacisków sięgających nawet do 300 MPa.

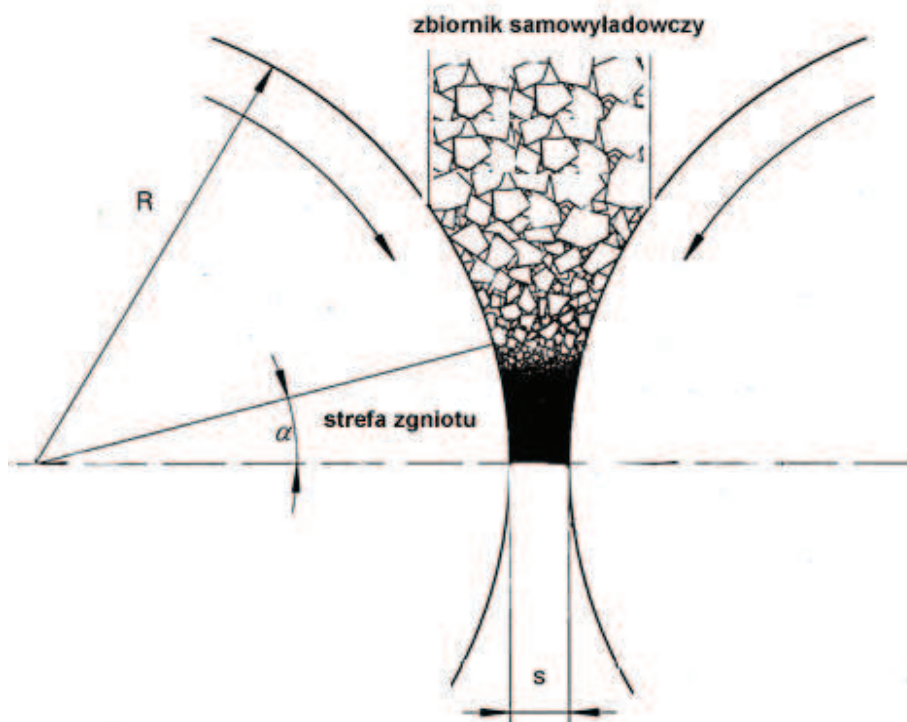
Realny maksymalny nacisk na warstwę materiału można z dużą dokładnością obliczyć ze wzoru [4]:

$$P_{\max} = \frac{F_{sp}}{\pi} \cdot \frac{360}{\alpha} \quad (2)$$

gdzie:

- P_{\max} – maksymalna siła nacisku w komorze roboczej prasy, [MPa]
- F_{sp} – nacisk specyficzny w prasie, [N/mm²]
- α – kąt strefy zgniotu, stopnie.

Oprócz źródła siły nacisku inny jest także sposób podawania nadawy. Materiał jest podawany w tzw. dławicznym systemie (choke feeding system) polegającym na umieszczeniu bezpośrednio nad prasą zbiornika samowyladowczego (Hopper).

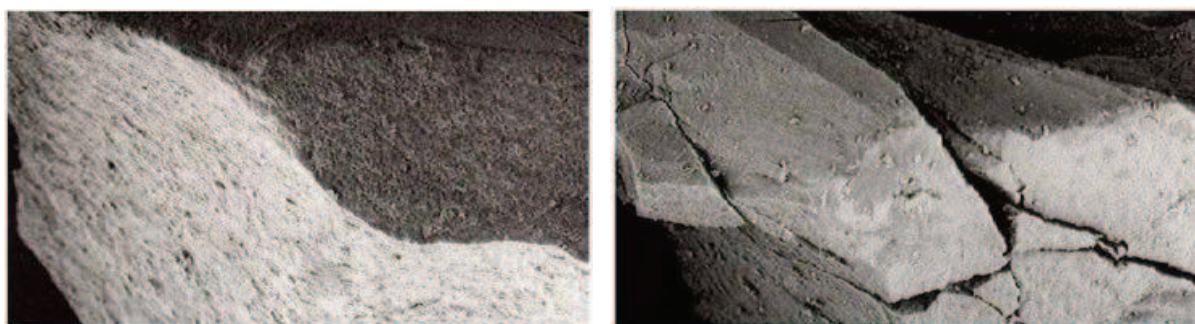


Rys. 1. Schemat rozdrabniania warstwy materiału w prasie walcowej
Fig. 1. Comminution scheme in high-pressure grinding roll

Materiał wypełnia całą przestrzeń bezpośrednio nad urządzeniem, a także samą komorę roboczą prasy. Materiał jest zagęszczony dosyć istotnie zredukowane są powietrzne przestrzenie pomiędzy ziarnami w ten sposób, że mniejsze ziarna lokują się w przestrzeniach pomiędzy większymi ziarnami. Ułatwia to przemieszczanie materiału w zbiorniku samowyladowczym w dół oraz wstępne zagęszczanie warstwy materiału już w górnej części komory roboczej (rys. 1).

Powstają mikroszczeliny i mikropełnięcia (rys. 2) w pojedynczych ziarnach, co ułatwia ich rozdrabnianie w dalszych etapach, głównie na trzecim lub czwartym stopniu rozdrabniania w młynach kulowych. Osiągana wartość energochłonności mierzona wskaźnikiem Bonda ulega redukcji o około 20–30% w przypadku mniej twardych wapieni i 15–20% dla twardszych materiałów.

Cechą charakterystyczną pras walcowych jest, że pracują z zamkniętym obiegiem materiału. Krotność obiegu najczęściej wynosi około 2, a niekiedy nawet więcej.



Rys. 2. Produkt rozdrabniania w konwencjonalnych kruszarkach (po lewej) i w prasach walcowych (po prawej) [5]

Fig. 2. Comminution products in conventional Crushing devices (left) and in HPGR (right) [5]

Do najważniejszych zalet pras walcowych zalicza się:

- niskie zużycie jednostkowe energii od 0,8 do 3 kWh/tonę materiału,
- powstawanie mikropełnięć w rozdrobnionym produkcie,
- zwiększenie zawartości składnika użytecznego w produktach otrzymywanych na etapie wzbogacania chemicznego dla rud,
- poprawa wskaźnika uzysku procesu technologicznego,
- możliwość prowadzenia procesu dla naturalnej wilgotności nadawy i na mokro, nawet do wilgotności 10%,
- niski stopień zapylenia, mała emisja hałasu i wibracji,
- niewielka powierzchnia zabudowy i stosunkowo mała kubatura urządzenia w porównaniu z młynami samo- i półsamomielącymi, czy nawet pionowymi młynami rolowomisowymi.

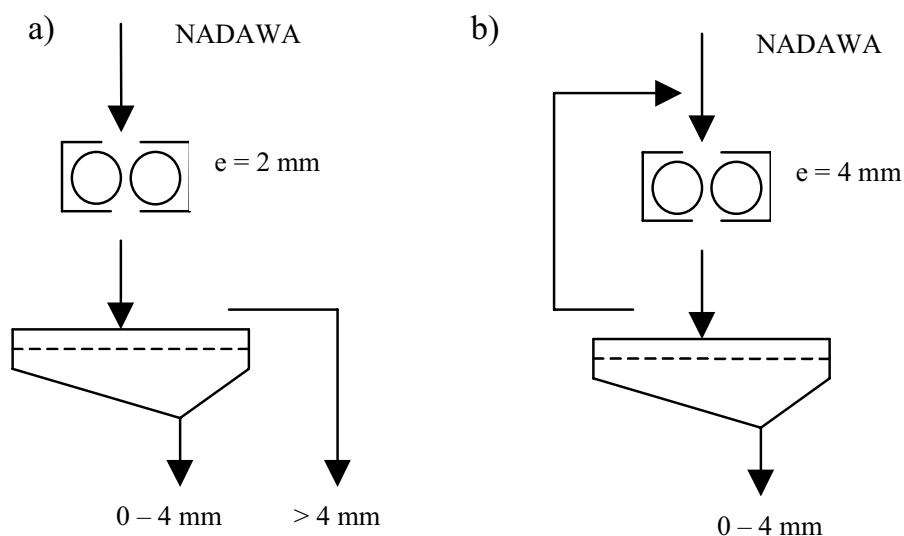
Największe aktualnie produkowane prasy walcowe mogą osiągać wydajność nawet powyżej 2000 t/h. Najmniejsze przemysłowe urządzenia mają wymiary robocze walców: średnicę 100–120 cm i długość od 50 cm, osiągając wydajność 100–150 t/h w zależności od parametrów fizyko mechanicznych materiału i warunków rozdrabniania.

4. PROGRAM EKSPERYMENTALNY

4.1. BADANIA W SKALI LABORATORYJNEJ

Z literatury znane są zalecenia dotyczące sposobu prowadzenia procesów rozdrabniania. Chcąc ograniczyć ilość najdrobniejszych frakcji korzystne jest zastosowanie odsiewu wstępnego przed kruszeniem i rozdrabnianie z utworzeniem nadziarna i zawracanie go z powrotem do kruszarki (kruszenie w cyklu zamkniętym). Powstaje pytanie, który sposób rozdrabniania jest korzystniejszy zarówno pod względem wydajności i łączącej się z tym energochłonności, jak i z uwagi na cechy geometryczne produktu? Na stanowisku doświadczalnym z kruszarką walcową, stanowiącą wyposażenie Katedry Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców AGH przeprowadzono eksperyment, uwzględniający ww. zagadnienia.

Do kruszarki walcowej ze szczeliną wylotową 2 mm (rys. 3) skierowano kamień wapienny zwięzły, mierząc wydajność procesu i oznaczając skład ziarnowy produktów. Następnie szczelinę wylotową powiększono do 4 mm, prowadząc rozdrabnianie w obiegu zamkniętym i zawracając do kruszarki materiał > 4 mm.



Rys. 3. Program eksperymentalny rozdrabniania w kruszarce walcowej w cyklu otwartym (a) i cyklu zamkniętym (b)

Fig. 3. Experimental comminution circuit in roller crusher in open (a) and close (b) circuit

Znając wydajność urządzenia rozdrabniającego oraz udziały wybranych frakcji A , B i C w materiałach: F (nadawa), D (produkt) i G (zwrot), można obliczyć ilość zawrotu i wielkość nadawy na przesiewacz.

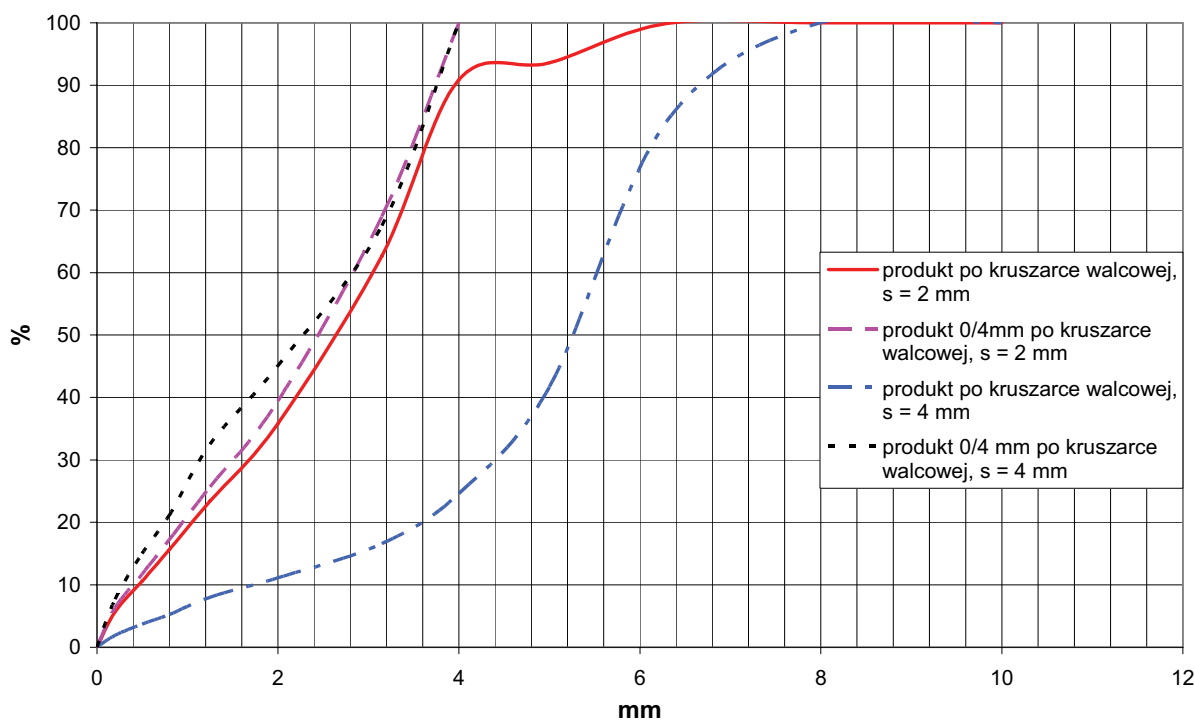
Krotność obiegu k materiału zgodnie z definicją można określić wzorem

$$k = \frac{G}{N} = \frac{G}{D} \text{ a znając zawartości frakcji: } k = \frac{C - A}{A - B} \quad (3)$$

gdzie:

- N – nadawa pierwotna [Mg/h],
- G – zwrot po klasyfikacji [Mg/h],
- F – nadawa do klasyfikacji [Mg/h],
- D – produkt gotowy [Mg/h],
- A – zawartość klasy drobnej w nadawie do klasyfikacji [%],
- B – zawartość klasy drobnej w zwrocie [%],
- C – zawartość klasy drobnej w produkcie [%].

Wyniki oznaczeń wydajności produktu gotowego < 4 mm, wielkości zawrotu, jak i składu ziarnowego produktów podano w tab. 2 i na rys. 4.



Rys. 4. Składy ziarnowe produktów po kruszarce walcowej
Fig. 4. Particle size distributions of roller crusher products

Z analizy wyników przedstawionych wynika, że rozdrabnianie w kruszarce walcowej przy dużej szczelinie w cyklu zamkniętym (odsiew materiału < 4 mm i zawrót nadziarna) jest niekorzystny (tab. 2). Dla cyklu zamkniętego otrzymano mniejszą wydajność produktu gotowego. Wyniki mogą mieć związek z bardzo małym stopniem rozdrobnienia dla szczeliny 4, przy kruszeniu stosunkowo drobnej nadawy. Nasuwa się stąd wniosek, że przy doborze optymalnych parametrów pracy kruszarki walcowej istotna jest relacja wielkości ziaren nadawy do wielkości szczeliny wylotowej.

Efektywność rozdrabniania w kruszarce walcowej

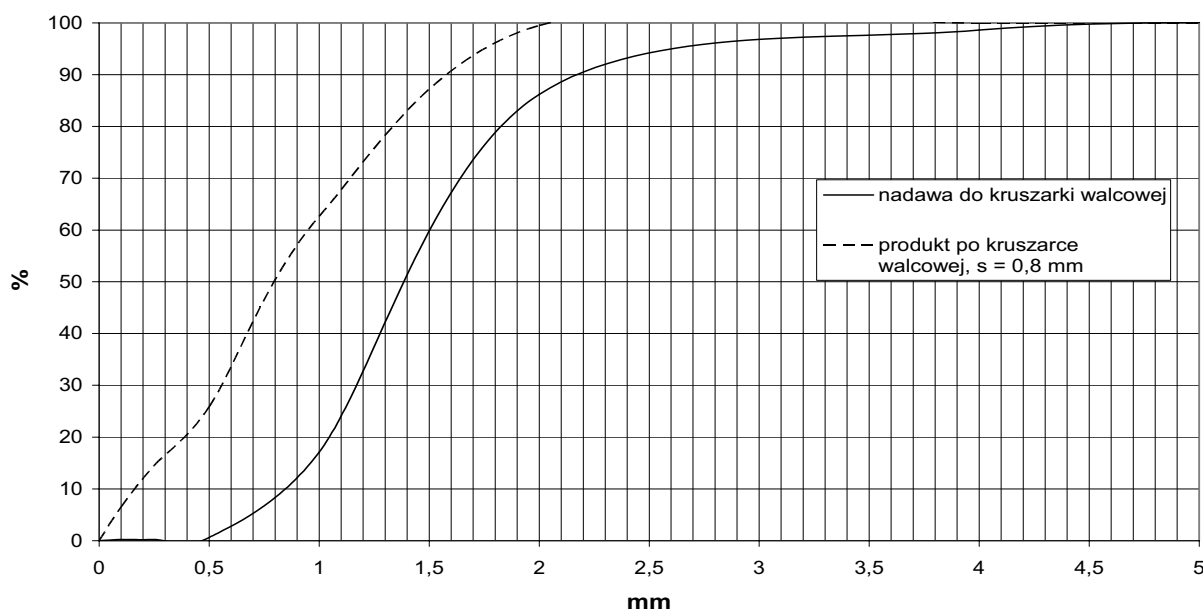
Parametr technologiczny	Produkt z kruszarki dla szczeliny wylotowej	
	$s = 2 \text{ mm}$	$s = 4 \text{ mm}$
stopień rozdrobnienia i 80	1,8	1,1
wydajność produktu gotowego 0/4 mm [Mg/h]	0,053	0,045
krotność obiegu	0	3
zawartość frakcji <0,4 [%]	10	12

Z drugiej strony wielkość ziaren nadawy jest ograniczona wielkością średnicy walców, co ma związek z kątem uchwytu ziarna nadawy. Potwierdza to opinię, że układy technologiczne z otwartym obiegiem materiału mają przewagę nad zamkniętymi cyklami pod względem wydajności, ale produkty mogą charakteryzować się większą zawartością ziaren nieforemnych i niekiedy większą zawartością pyłów.

4.2. BADANIA PRZEMYSŁOWE

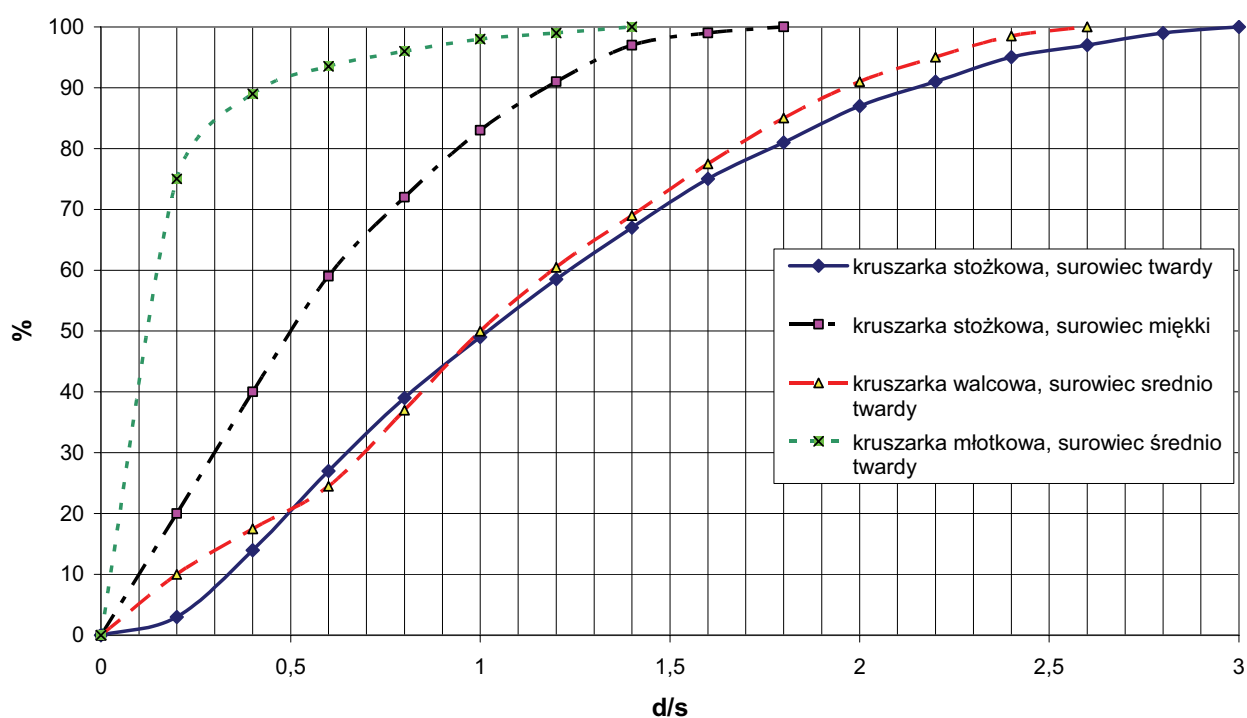
Kolejnym etapem badań była ocena efektywności procesu rozdrabniania w kruszarkach walcowych w warunkach przemysłowych. W tym celu pobrane zostały próby nadawy i produktu rozdrabniania dolomitu w krajowym zakładzie przerobczym przy ustalonych parametrach pracy kruszarki i dla ustabilizowanych warunków przebiegu procesu. Wyniki zostały przedstawione na rysunku 5.

Zastosowanie kruszarki walcowej wynikało z potrzeby dokruszenia frakcji 0,5/4 mm w celu otrzymania kruszywa drobnego 0/1,5 mm. Stopień rozdrobnienia S80 dla tej próby wynosi 1,4 i jest on wyższy niż uzyskany w warunkach laboratoryj-



Rys. 5. Skład ziarnowy nadawy i produktu rozdrabniania w przemysłowej kruszarce walcowej
Fig. 5. Particle size distribution of feed and product crushed in industrial roller crusher

nych dla szczeliny $s = 4$ mm (tab. 2). Analizując wyniki obu eksperymentów można stwierdzić, że istotny wpływ na osiągane efekty rozdrabniania ma relacja szerokości szczeliny wylotowej kruszarki do uziarnienia nadawy. Dla zbyt dużej szczeliny wylotowej zachodzi mniej dokładny proces rozdrabniania, a drobniejszy materiał przelatuje przez komorę roboczą nie rozdrabniając się. Analizowane powyżej zastosowanie kruszarki walcowej o niskim stopniu rozdrabniania, chociaż mało efektywne, wynikało ze specyficznych warunków technologicznych. Zastosowanie innego urządzenia do rozdrabniania tak drobnej nadawy albo nie było możliwe z uwagi na brak możliwości ustawienia tak małej szczeliny (kruszarki szczękowe i stożkowe), albo spowodowałoby powstanie nadmiernej ilości pyłów (kruszarki udarowe i młotkowe). Powyższe zależności ilustruje rys 6, na którym przedstawiono składy ziarnowe produktów uzyskiwanych z różnych kruszarek, w układzie $\gamma = f(d/s)$, gdzie d oznacza wielkość ziarna, a s wielkość szczeliny wylotowej kruszarki.



Rys. 6. Składy ziarnowe produktów po rozdrabnianiu w kruszarce stożkowej walcowej i młotkowej
Fig. 6. Particle size distributions of products from cone crusher, roller crusher and hammer crusher

5. PODSUMOWANIE

Rozdrabnianie w kruszarkach walcowych i wysokociśnieniowych prasach walcowych zachodzi w podobny sposób, jednak urządzenia te zasadniczo się różnią ze względu na budowę i warunki prowadzenia procesu rozdrabniania. Przeprowadzone doświadczenia rozdrabniania w kruszarce walcowej pozwalają stwierdzić, że można prowadzić proces kruszenia w kruszarce walcowej przy zmiennej wartości szczeliny wylotowej s , jednak bardzo ważny jest jej dobór w stosunku do uziarnienia materiału.

Przy odpowiednio dobranych parametrach urządzenia oraz parametrach procesu można stosować dla kruszarek walcowych zamknięte układy rozdrabniania z większym udziałem zawrotu w nadawie, uzyskując analogiczną wydajność jak dla układów otwartych bez zawrotu materiału. W celu poprawienia słabszych efektów rozdrabniania w układzie z obiegiem zamkniętym należałoby dodatkowo zmodyfikować sposób podawania materiału do urządzenia. System podawania nadawy jaki występuje w prasach walcowych mógłby ograniczać przelatywanie ziaren przez komorę roboczą bez ich rozdrabniania, jednak jego zastosowanie jest ograniczone technicznymi możliwościami kruszarki walcowej.

Kruszarki walcowe z uwagi na niewielki stopień rozdrobnienia i wydajność przy małej szczelinie wylotowej, w procesach produkcji kruszyw nie są stosowane. Mogą natomiast być wykorzystywane w specyficznych przypadkach, przy małym stopniu rozdrobnienia.

Prasy walcowe zasilane systemem tzw. „dławiennym” i charakteryzujące się bardzo dużym ciśnieniem wywieranym na warstwę rozdrabnianego materiału, umożliwiają osiągnięcie korzystnych efektów rozdrabniania – skład ziarnowy produktów. Z pras walcowych podobnie jak z kruszarek walcowych uzyskuje się stosunkowo najniższą zawartość klas najdrobniejszych, np. $< 0,1$ mm, często niepożądanych w kruszywach drobnych, ale ważną zaletą jest niska energochłonność procesu kruszenia.

Artykuł jest wynikiem projektu badawczego NN 524 466 139 Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, finansowanego ze środków finansowych na lata 2010–2013.

LITERATURA

- [1] BATTAGLIA A., BANASZEWSKI T., *Maszyny do przeróbki węgla, rud i surowców mineralnych*, PWN, Warszawa–Kraków, 1972.
- [2] KRUKOWIECKI W., *Przeróbka mechaniczna rud, węgla, soli i innych kopalin*, PWN, Warszawa–Kraków 1970.
- [3] MAJCHERCZYK T., *Badanie fizycznych własności skał*, skrypt Ucz. 1175, AGH, Kraków 1989.
- [4] NAZIEMIEC Z., SARAMAK D., *Analiza zmian obciążenia materiału w strefie zgniotu pras walcowych*, ZN AGH: Górnictwo i Geoinżynieria, vol. 33, z. 4, Kraków 2009.
- [5] REESE P., *Innovation in mineral processing technology*, New Zealand Minerals & Mining Conference Proceedings, October 2000.

COMMINUTION EFFECTS IN ROLLER CRUSHERS AND HIGH-PRESSURE GRINDING ROLLS

Technological effects of comminution process in high-pressure grinding rolls and in roller crushers were compared in the article. HPGRs are one of the most effective comminuting devices in mineral processing circuits nowadays. Roller crushers are not widely applied in aggregate comminuting circuits, but through the development of the high pressure grinding technology, the application of roller crushers might be more popular. The roller crusher efficiency was investigated in two variants of the technological circuits.