

Wojciech WŁODARCZYK
Kopalnia "Siewierz"

PEWNE ASPEKTY ROZDRABNIANIA W KRUSZARKACH SZCZĘKOWYCH NA PRZYKŁADZIE DOLOMITÓW SIEWIERSKICH

Streszczenie. Zarówno kinetyka procesów rozdrabniania, jak i energetyczne prawa rozdrabniania mają swoją specyfikę zależną od typu urządzenia i rodzaju surowca. Przebieg procesu rozdrabniania w kruszarkach szczękowych zależy od charakterystyk przestrzeni roboczej i rodzaju napędu. W pracy przedstawiono niektóre z tych zagadnień opierając się na wynikach doświadczeń laboratoryjnych. Wskazano także kierunki i celowość dalszych badań.

SOME ASPECTS OF THE CRUSHING IN JAW CRUSHERS BASED ON SIEWIERZ MINE DOLOMITES EXAMPLES

Summary. The kinetics of comminution processes and energetic comminution laws have their peculiarity dependent on a machine type and a material kind. The course of the comminution process in jaw crushers is dependent on characteristics of their working space and drive kind. Some of these problems based on laboratory experiments were showed in the paper. Directions and aims of next investigations were also showed.

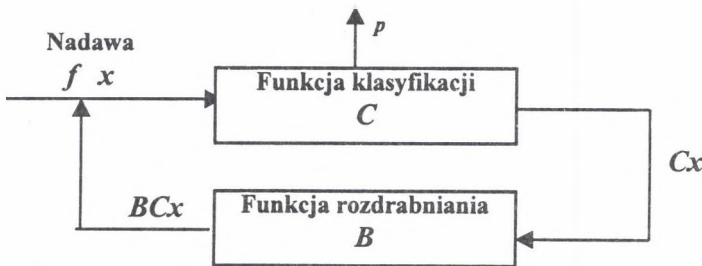
1. Wstęp

W większości badań procesów rozdrabniania dotyczących prognozowania składu produktów lub rozkładów energetycznych bazą są procesy mielenia. Rozdrabnianie grube w kruszarkach szczękowych, stożkowych, a zwłaszcza walcowych jest rozpatrywane rzadko z powodu trudności teoretycznych i pomiarowych. Należy także zauważyć, że w zakładach wzbogacania rudy koszty mielenia są głównym składnikiem kosztów wzbogacania i, z reguły są o rząd wyższe od kosztów rozdrabniania wstępnego. W przypadku surowców skalnych sytuacja ta ulega zmianie, ponieważ koszty rozdrabniania grubego i strzelania rozszczepkowego są kosztami zasadniczymi i dlatego dla tych surowców zagadnienia optymalizacji pracy będą musiały dotyczyć ocen pracy dużych kruszarek przemysłowych.

W prezentowanym artykule, który dotyczy tych kwestii, zostaną więc kolejno przedstawione problemy analizy kinetyki procesu rozdrabniania w kruszarkach szczękowych i zarazem prognoz składu ziarnowego produktu oraz przegląd tzw. energetycznych modeli rozdrabniania w tych kruszarkach. Zostaną też omówione niektóre wyniki badań kruszenia dolomitów siewierskich w kruszarce laboratoryjnej.

2. Kinetyka rozdrabniania w kruszarkach szczękowych

W literaturze powszechnie rozpowszechniony jest macierzowy model pracy kruszarki stożkowej (możliwy do zastosowania także do kruszarki szczękowej) Whitena oparty na przedstawionym na rys. 1. „myślowym” rozłożeniu procesu rozdrabniania w kruszarce na dwa podprocesy: klasyfikacji (wychodzenia ziarn z przestrzeni roboczej kruszarki) i rzeczywistego rozdrabniania materiału.



Rys. 1. Schemat modelu macierzowego rozdrabniania w kruszarce
Fig.1. A matrix model of crushing in the crusher

Z rysunku 1 mamy dwa równania bilansu

$$f + BCx = x \quad (1)$$

$$p + Cx = x \quad (2)$$

i po przekształceniach otrzymujemy

$$p = (I - BC)^{-1} (I - C)f \quad (3)$$

gdzie: I oznacza macierz jednostkową.

Funkcja rozdrabniania B_{ij} określa prawdopodobieństwo przejścia materiału nadawy z klasy o wielkości x_j (średnia wielkość wąskiej klasy ziarnowej) do i -tej klasy produktu (o

średniej wielkości x_i). Przyjmuje się, że funkcja $B_{i,j}$ jest zależna od własności mechanicznych materiału, a niezależna od warunków pracy kruszarki [3,7,8]. Przy przyjęciu, że $i = 1$ reprezentuje klasę najgrubszą, dyskretne wartości $B_{i,j}$ tworzą dolną macierz trójkątną.

Do opisu wartości $B_{i,j}$ używa się rozkładu Gaudina – Schuhmanna – Andrejewa (GSA) [2,6,7,8], przy czym jak stwierdza wielu autorów [5,8], jest to mieszanina dwóch rozkładów GSA, które reprezentują dwa rodzaje rozdrabniania – tzw. rozdrabnianie płytkie (rozdzielające po zrostach, pęknięciach pierwotnych), dające grubszy produkt, oraz tzw. rozdrabnianie głębokie (gruchoczące), dające produkt drobniejszy. Używa się więc następującego wzoru

$$b_{i,j} = \alpha \left(\frac{x_i}{x_j} \right)^b + (1 - \alpha) \left(\frac{x_i}{x_j} \right)^n \quad (4)$$

gdzie α oznacza ułamek ziarn ulegających rozdrobnieniu głębokiemu. Wyrażenie to określa dystrybuantę wielkości ziarn rozdrobnionych poniżej wielkości x_i , a pochodzących z klasy nadawy o wielkości x_j . Prawdopodobieństwa $B_{i,j}$ są wyznaczone ze wzoru

$$B_{i,j} = b_{i,j} - b_{i+1,j} \quad (5)$$

Funkcja klasyfikacji określa prawdopodobieństwo wejścia materiału w rozdrabnianie czynne (rys. 1). Dla ziarn mniejszych niż k_1 (szerokość domkniętej szczeliny wypustowej) przyjmuje ona wartość 0, a dla ziarn powyżej wielkości k_2 wartość 1. Prawdopodobieństwo C_i dla ziarn materiału wejściowego o wielkościach pośrednich określane jest wzorem [1,7,8]

$$C_i = \begin{cases} 0 & \text{dla } x_i < k_1 \\ 1 - \left(\frac{k_2 - x_i}{k_2 - k_1} \right)^m & \text{dla } k_1 \leq x_i \leq k_2 \\ 1 & \text{dla } x_i > k_2 \end{cases} \quad (6)$$

Przyjmuje się, że parametry funkcji klasyfikacji zależą od warunków pracy kruszarki i tylko wielkości ziarn nadawy. Przyjęcie takich założeń odnośnie do funkcji klasyfikacji i rozdrabniania oraz ich postaci umożliwi eksperymentalne określenie ich parametrów. Dla materiałów, które nie są jednorodnie wytrzymałościowo (np. dolomitów siewierskich), może to być utrudnione [4].

Do opisu wyników rozdrabniania – składu ziarnowego produktu – stosuje się najczęściej rozkład RRB (Weibulla). Przy opisie rozdrabniania materiału grubego wprowadza się zmodyfikowaną (uciętą) wersję RRB w postaci [5]:

$$R_x = e^{-\left(\frac{x}{x_m - x}\right)^n c} \quad (7)$$

gdzie R_x oznacza pozostałość na sicie o oczku x , x_m - maksymalną wielkość ziarna, n i c - stałe wyznaczone w eksperymencie.

Jak twierdzą autorzy pracy [5], przy strzelaniu rozszczepkowym nc (0,5; 0,7), a dla produktu kruszarki szczękowej przy dobrym usuwaniu ziarn drobnych z nadawy n powinno oscylować wokół jedynki. Przy przyjęciu $u = \frac{x}{x_m}$ otrzymujemy

$$R_u = e^{-\left(\frac{u}{1-u}\right)^n c} \quad (8)$$

czyli rozkład dwuparametrowy, który w układzie funkcyjnym związanym z RRB jest prostą o nachyleniu n i $c = \ln \frac{1}{R_{u=0,5}}$.

3. Energetyczne prawa rozdrabniania

Podstawą budowy energetycznych praw rozdrabniania są następujące etapy:

- charakterystyka nadawy zawarta w pojedynczym parametrze geometrycznym – wielkości charakterystycznej A ;
- charakterystyka produktu materiału zawarta w analogicznej wielkości B ;
- charakterystyka materiałowa surowca określana parametrem c ;
- funkcja łącząca stosunek jednostkowego nakładu pracy z A i B , czyli

$$W_{net}/c = f(A, B) \quad (8)$$

gdzie: W_{net} - oznacza pracę, a f - jest „energetycznym prawem rozdrabniania”.

We wszystkich używanych prawach rozdrabniania $f(A, B)$ ma postać $f(A, B) = g(B) - g(A)$ i tak kolejno [2,5]

$$\text{prawo Rittingera} \quad W_{net} = c(1/B - 1/A) \quad (10)$$

$$\text{prawo Bonda} \quad W_{net} = c(1/\sqrt{B} - 1/\sqrt{A}) \quad (11)$$

$$\text{prawo Kicka} \quad W_{net} = c[\lg(1/B) - \lg(1/A)] \quad (12)$$

gdzie c jest współczynnikiem podatności na kruszenie skały, której wartości i wymiar zależą od stosowanego prawa i kruszonej skały.

Jeżeli wprowadzimy uogólniony stopień rozdrabniania $R = \frac{A}{B}$, to prawa rozdrabniania przyjmują postacie:

$$\text{prawo Rittingera} \quad W_{net} = c(R-1) \frac{1}{A} \quad (13)$$

$$\text{prawo Bonda} \quad W_{net} = c(\sqrt{R-1} \sqrt{A}) \quad (14)$$

$$\text{prawo Kicka} \quad W_{net} = c \lg R \quad (15)$$

Zgodnie z autorami pracy [5], mamy zależność pomocną przy wyznaczaniu empirycznym W_{net} , tzn.:

$$W = \frac{Q}{M_j} + W_{net} \quad (16)$$

gdzie: Q jest obciążeniem kruszarki (kg/s), M_j - mocą używaną przy biegu jałowym kruszarki, $\frac{Q}{M_j}$ jest więc pracą względną wykonywaną przy biegu jałowym (J/kg).

4. Wstępne badania kruszenia dolomitów siewierskich

Kopalnia „Siewierz” eksploatuje złożo dolomitu „Burdzowice”, które znajduje się w południowym tzw. brudzowickim paśmie antyklinalnego wypiętrzenia dewońskiego. Złożo zbudowane jest z utworów triasowych i dewońskich. Devon reprezentowany jest przez dolomity krystaliczne barwy popielatej lub ciemnoszarej, zwarte i bardzo twarde. Zajmuje on centralną część złoża. Tras reprezentowany jest na terenie całego złoża przez dolomity kruszonośne i dolomity diploporowe. Dolomity kruszonośne są krystaliczne, różnie ubarwione i są mocno porowate i kawerniste. Badania prowadzone przez Przedsiębiorstwo Geologiczne Kraków wykazały, że dolomity złoża brudzowickiego mają niskie zawartości domieszek przeszkadzających w procesach hutniczych, a zawartość MgO dochodzi do 20%.

Przeróbka dolomitów odbywa się zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 2. Kruszarka szczękowa jest typu Rx 1201 Svedala-Arbra o szczelinie wylotowej 175-190 mm.

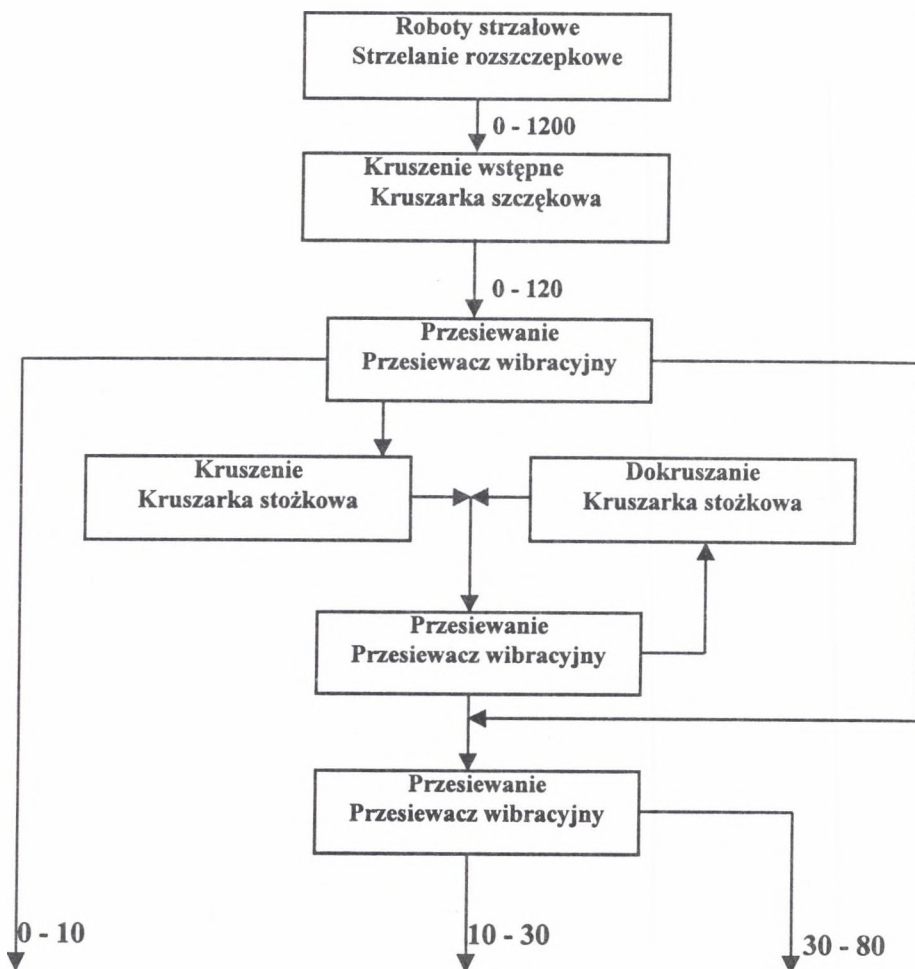
Wykonane badania przez Instytut Materiałów Ogniotrwałych w Gliwicach wykazały zmienność następujących wielkości w granicach:

- ciężar objętościowy - $2,06 + 2,43 \text{ g/cm}^3$,

- wytrzymałość na ściskanie - $22,34 \pm 71,30$ Mpa,
- porowatość otwarta - $13,36 \pm 2,43$ g/cm³,
- nasiąkliwość - $5,08 \pm 11,53$ g/cm³.

Badania rozdrabniania dolomitów siewierskich prowadzone są na laboratoryjnej jedno-rozporowej kruszarce szczękowej o ruchu prostym o wymiarach szczęki 150x120 mm i regulowanej szczelinie wypustowej w zakresie 5-60 mm.

Dla wstępnego scharakteryzowania rozdrabniania dolomitów wykonano badania wstępne – 4 rozdrabniania przy zmianie sposobu podawania materiału, rozmiaru ziarn nadawy oraz szczęk. Wyniki przedstawiono w tabeli 1. Szczelina wypustowa miała 60 mm.



Rys. 2. Schemat technologiczny produkcji dolomitu. Kopalnia „Siewierz”
Fig. 2. A technology scheme of dolomite production. “Siewierz” Mine

Tabela 1

Wyniki rozdrabniania dolomitów siewierskich

Lp.	Klasa ziarnowa [mm]	Dystrybuanty rozkładu wielkości ziarna produktu [%]			
		dośw. 1	dośw. 2	dośw. 3	dośw. 4
1	- 5	5,36	4,71	6,98	9,92
2	5 - 10	9,10	8,01	11,91	16,19
3	10 - 15	12,60	11,85	17,75	22,88
4	15 - 20	17,04	16,50	24,96	31,22
5	20 - 30	31,51	31,73	46,97	53,81
6	30 - 40	68,53	63,18	83,06	77,75
7	40 - 50	90,91	94,06	96,00	90,50
8	- 50	100,00	100,00	100,00	100,00

dośw. 1 - nadawa - pojedyncza ziarna > 100 mm, szczęki rowkowane,

dośw. 2 - nadawa - klasa 60-80 mm, 75% wypełnienia komory roboczej, szczęki rowkowane,

dośw. 3 - nadawa - klasa 60-80 mm, 75% wypełnienia komory roboczej, szczęki gładkie,

dośw. 4 - pojedyncze ziarna > 100 mm, szczęki gładkie.

Aproksymacja krzywych została przeprowadzona zgodnie ze wzorem (7), przy czym $d_{\max} = 100 \text{ mm}$ dla próbek 1 i 4 oraz $d_{\max} = 80 \text{ mm}$ dla próbek 3 i 4. Jak łatwo zauważyć (rys. 1), zgodność wyników doświadczalnych z aproksymacją jest niewielka. Wartości współczynników kierunkowych zmienia się od 1,1 do 1,3, co nie jest także zgodne z pracą [5]. Próba doboru innych wartości d_{\max} nie została przeprowadzona. Największe rozbieżności odnotowano dla próbek 1 i 2 (rozdrabnianie przy szczękach rowkowanych). Rodzaj powierzchni szczęk ma duży wpływ na wyniki rozdrabniania i to znacznie większy niż sposób podawania materiału.

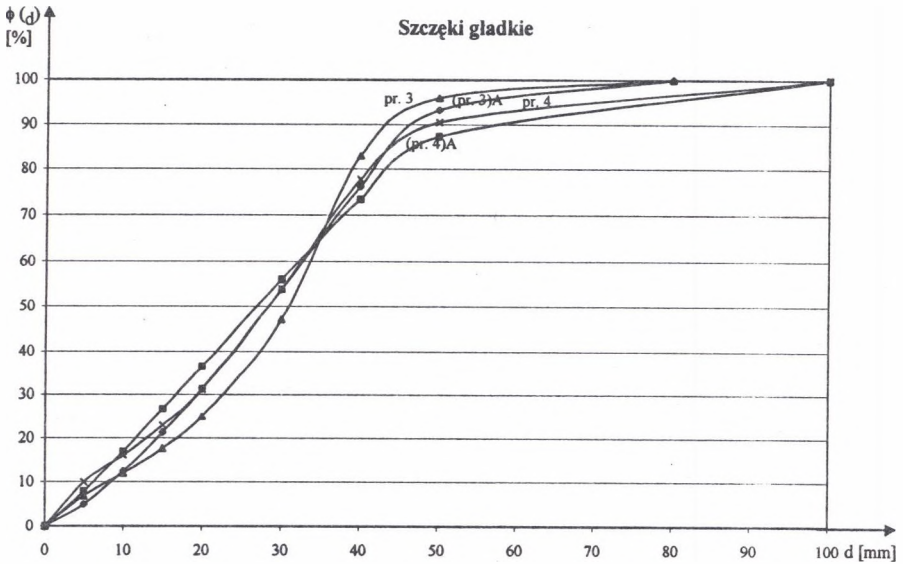
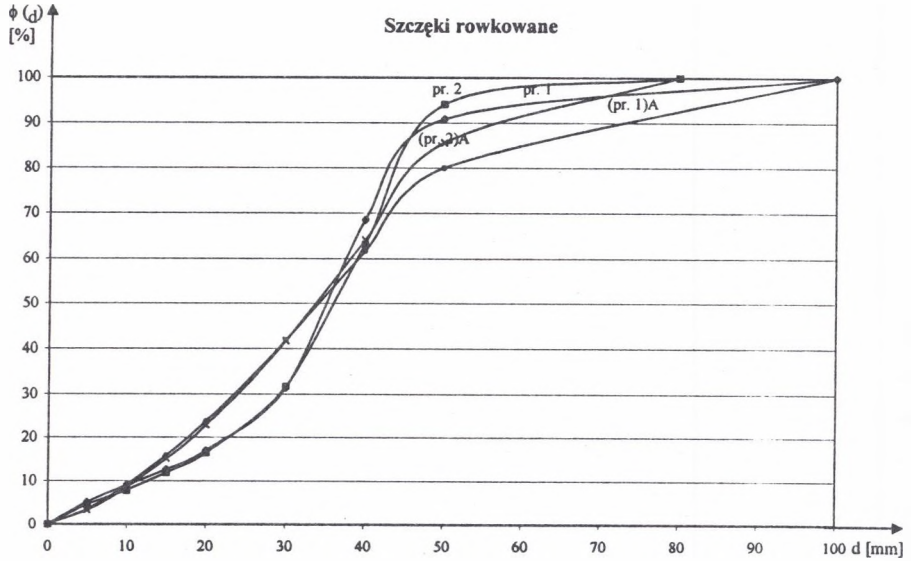
5. Zakończenie

Przedstawiony przegląd problemów związanych z badaniami procesu rozdrabniania w kruszarkach szczękowych tworzy także pewien program badań i charakteryzuje, w pewien sposób, związane z tym trudności.

Katalog tych zagadnień jest następujący:

- aproksymacja krzywych składu ziarnowego nadawy i produktów. Jest to ważne z powodu konieczności wyznaczania wartości A i B we wzorach (8) ÷ (12), ponieważ powinny być one uzyskiwane z wykorzystaniem pełnego rozkładu wielkości ziarna,

- analiza energetycznych praw rozdrabniania. Wykorzystując możliwości pomiaru sił nacisku na szczęki w trakcie kruszenia oraz zaangażowanej mocy można na podstawie wzoru (16)



Rys. 3. Aproksymacja wyników rozdrabniania dolomitów siewierskich
Fig. 3. Approximation of the crushing results of siewierz dolomite

- oszacować wartości W_{net} , a co za tym idzie, wyznaczyć parametry c w prawach energetycznych,
- weryfikacja i identyfikacja macierzowych praw rozdrabniania (wzory (1) + (6)). Określenie parametrów α , b i m pozwoli na dokładną charakterystykę kinetyki rozdrabniania dolomitów siewierskich,
- analiza różnic w rozdrabnianiu dolomitów dewońskich i triasowych. To zagadnienie jest bardzo mocno związane z poprzednim, a oprócz tego tworzy nowy problem rozdrabniania mieszaniny materiałów o różnych własnościach (patrz - charakterystyka dolomitów siewierskich),
- wpływ parametrów konstrukcyjnych i ruchowych kruszarki na wyniki rozdrabniania.

Jak zwykle, osobnym zagadnieniem pozostaje problem skali, czyli możliwości przeniesienia wyników laboratoryjnych na warunki przemysłowe.

Zarysowana wyżej problematyka będzie przedmiotem dalszych badań.

LITERATURA

1. Apling A.C., Barrett N.B.: Method for incorporation of shape characterization into cone crusher model, Trans. IMM S.C., 104, 1995, 1-10.
2. Beke B.: Principles of comminution, Akademii Kiodo, Budapest 1964.
3. Brożek M., Mączka W., Tumidajski T.: Modele matematyczne procesów rozdrabniania. Rozprawy i Monografie nr 35, Wyd. AGH, Kraków 1995.
4. Brożek M., Tumidajski T., Włodarczyk W.: Pewne aspekty estymacji macierzy rozdrabniania w kruszarkach szczękowych, Gosp. Sur. Mineral. Tom 13, zeszyt specjalny, Wyd. CPPGSMiE PAN, Kraków 1997.
5. Cardu M., Clerici C., Morarandini A., Mancini R., Occella E.: An experimental research on the comminution law and work index concepts in jaw crushers, XVII IMPC, Sydney 1993.
6. Lawrison G.C.: Crushing and grinding, Butlerworths, London 1974.
7. Lynch A.J.: Mineral crushing and grinding circuits, Elsevier Sci. Publ. Comp., Amsterdam Oxford - New York 1997.
8. Whiten W.J.: Models and control techniques for crushing plants. Control'84 - Mineral and metallurgical processing, New York, AIME, 1984, 217-224.

Abstract

The kinetics of comminution processes and energetic comminution laws have their peculiarity dependent on a machine type and a material kind. The course of the comminution process in jaw crushers is dependent on characteristics of their working space and drive kind.

The most applied way of the description of comminution kinetics is the matrix model in which the breakage matrix B and classification matrix C are used. Forms for the approximation of B and C , methods of the description of size distribution functions are showed in the paper. Some aspects of energetic laws for jaw crushers are presented also.

Some of those problems based on laboratory experiments were showed in the paper. Directions and aims of next investigations were also showed.