

TOMASZ P. OLEJNIK

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

Kinetyka przemiału wybranych materiałów skalnych z uwzględnieniem wytrzymałości ziarn na ściskanie

Wprowadzenie

Mechanizm rozdrabniania sprowadza się do podziału ziarn ciał stałych na ziarna o mniejszych wymiarach, przy czym proces ten powodowany jest działaniem wewnętrznych lub zewnętrznych obciążeń, przekraczających granicę wytrzymałości i uszkadzających wiązania atomowe lub cząsteczkowe [1]. Ponieważ każde pęknięcie materiału w strefie działania obciążeń poprzedza odkształcenie, realizacja procesu rozdrabniania wymaga dostarczenia niezbędnych ilości energii, przy czym ilość ta uwarunkowana jest wielkością odkształcenia, właściwościami sprężystymi odkształcanego materiału oraz rodzajem obciążenia. Pęknięcie ziarn wymaga przekroczenia w płaszczyznach pęknięć sił spójności (pod działaniem sił zewnętrznych) i zwiększenia odległości między cząstkami elementarnymi. Opisane zjawisko może być spowodowane naprężeniami normalnymi – rozciągającymi lub tnącymi.

Proces rozdrabniania w młynach kulowych zdeterminowany jest przez złożony charakter oddziaływania mielników na mielony surowiec. Proces rozdrabniania odbywa się głównie poprzez złożone oddziaływanie mielników na mielony materiał, który znajduje się między nimi lub między mielnikami a wewnętrzną powierzchnią bębna. Ziarna mielonego materiału, które znajdują się w tych obszarach są głównie ścierane i ścinane z możliwością udziału mechanizmu zgniatania [2, 3]. Warunki przekazania energii od mielników na ziarna, określane są poprzez poziom energii elementów roboczych młyna. Za podstawowy poziom energii przyjmuje się energię potencjalną w warunkach grawitacji ziemskiej. Miara poziomu energii mielników jest zatem stosunek ich sił dynamicznych do sił ciężkości lub energii kinetycznej do energii potencjalnej mielników. Niska sprawność procesu mielenia zmusza technologów do poszukiwania optymalnych, z punktu widzenia nakładów energetycznych, parametrów procesu w celu uzyskania możliwie najkrótszych czasów przemiału.

Z takiego punktu widzenia przeanalizowano efekty rozdrabniania w młynie kulowym, biorąc pod uwagę wytrzymałość ziarn na naprężenia normalne.

Parametry procesowo-aparaturowe przemiału

Badania kinetyki przemiału prowadzono dla młyna półtechnicznego. Podstawowe informacje techniczno ruchowe o młynie przedstawiono w tabelicy 1.

Proces rozdrabniania przebiegał na sucho. Przemiał prowadzono dla trzech surowców skalnych, którymi były: kwarcyt, szarogłaz oraz granit. Podstawowe dane dotyczące masy nadawy oraz właściwości fizycznych mielonych materiałów zamieszczono w tabelicy 2. Do przemiału użyto surowców

Tabelica 1

Podstawowe parametry młyna półtechnicznego

Średnica wewnętrzna [m]	0,5
Pojemność całkowita [m ³]	0,112
Częstość obrotowa n [min ⁻¹]	31
n/n_{kr}	0,54

o uziarnieniu 5÷8 mm. Wypełnienie młyna mielnikami wraz z nadawą stanowiło 30% całkowitej pojemności młyna.

Tabelica 2

Podstawowe informacje o nadawie użytej do przemiału

Surowiec	Gęstość nasypowa, [kg/m ³]	Gęstość nasypowa po zagęszczeniu, [kg/m ³]	Średnia gęstość nadawy, [kg/m ³]	Masa nadawy, [kg]
Kwarcyt	1236	1298	1267	45
Szarogłaz	1268	1324	1296	45
Granit	1394	1410	1402	45

Proces mielenia prowadzony był przy użyciu kul stalowych, o średnicy 60 mm, w sposób okresowy. Próbkowanie nadawy wykonywano co 30 minut, pobierając masę około 0,6 kg do analizy granulometrycznej. Próbkę poddawano analizie składu ziarnowego za pomocą laserowego analizatora wielkości ziaren ANALYSETTE 22 firmy FRITSCH. Dodatkowo przeprowadzono analizę sitową.

Otrzymane wyniki

Na podstawie analizy składu granulometrycznego obliczono szybkości rozdrabniania poszczególnych frakcji rozmiarowych w oparciu o własny program komputerowy. Do obliczeń wykorzystano równanie *Gardnera* i *Austina* [4]:

$$\frac{\Delta w_i(t)}{\Delta t} = -S_i w_i(t) + \sum_{j=1, j>i}^{i-1} S_j b_{i,j} w_j(t) \quad (1)$$

dla dyskretnych wartości udziałów, zakładając idealne wymieszanie mielonego materiału

Na podstawie znajomości składu granulometrycznego obliczono również średni wymiar ziarna ze wzoru:

$$d_s = \sum_{i=1}^n d_{si} x_i \quad (2)$$

Przykładowe współczynniki szybkości S_i równania (1) dla badanych frakcji rozmiarowych surowców przedstawiono w tabelicy 3. Wyselekcjonowane ziarna, z odpowiednich frakcji rozmiarowych, poddano próbie zniszczenia polegającej na przyłożeniu obciążenia ściskającego. Próby zgniatania wykonano za pomocą przyrządu INSTRON. Dane zawierające

Tablica 3
Szybkości rozdrabniania poszczególnych frakcji ziarn dla przemiału z udziałem kul stalowych

d_{si}	Kwarcyt	Szarogłaz	Granit
	S_{ik} [min ⁻¹]	S_{is} [min ⁻¹]	S_{ig} [min ⁻¹]
2,5	0,00267	0,00244	0,0215
1,8	0,0095	0,00221	0,0151
1,5	0,015	0,00115	0,0172
1,32	0,044	0,00372	0,017
1,13	0,045	0,00306	0,0174
0,9	0,0563	0,00291	0,0201
0,4	0,101	0,0198	0,0457

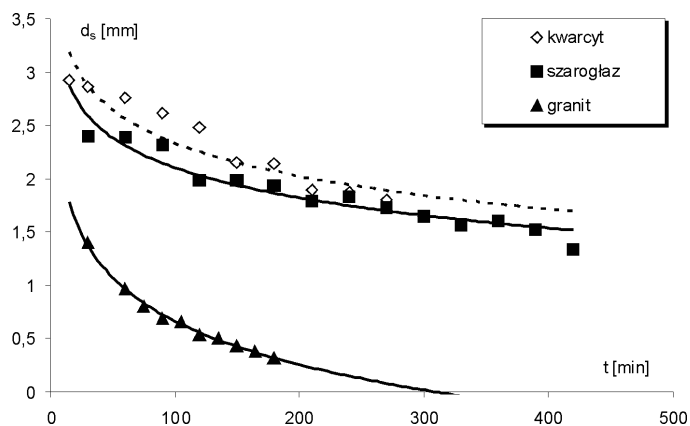
wielkości sił zgniatających oraz odkształcenia ziarn podczas prób, poddano obróbce statystycznej. Przykładowe wartości sił ściskających, oraz wywołane przez nie naprężenia niszczące, dla ziarn kwarcytu, przedstawiono w tablicy 4. Analizując proces rozdrabniania badanych surowców mineralnych, zauważyć można znaczny wpływ ich budowy na kinetykę procesu. Dla granitu, charakteryzującego się wyraźnym ciosem, oddziaływanie niszczące młynków powoduje szybką zmianę średniego wymiaru ziarn. Konsekwencją tego faktu jest uzyskanie wysokich wartości szybkości rozdrabniania (Tabl. 3). W analizowanych warunkach procesowych szybkości rozdrabniania S_i są dla granitu o rząd wielkości większe w porównaniu z kwarcytem oraz szarogłazem.

Tablica 4
Zestawienie wartości sił oraz naprężeń niszczących ziarna kwarcytu

Klasa rozmiarowa ziarn, [mm]	Średnia niszcząca siła ściskająca, [N]	Średnie naprężenia niszczące, [MPa]
3 ÷ 2	244,1	12,44
	$Sd = 80,4; CoV = 32,95$	$Sd = 4,099; CoV = 32,95$
2 ÷ 1,6	144,8	14,24
	$Sd = 50,04; CoV = 34,55$	$Sd = 4,198; CoV = 34,55$
1,6 ÷ 1,4	94,62	13,39
	$Sd = 29,75; CoV = 31,45$	$Sd = 4,121; CoV = 31,45$
1,4 ÷ 1,25	60,71	11,01
	$Sd = 16,44; CoV = 27,08$	$Sd = 2,981; CoV = 27,08$
1,25 ÷ 1,0	45,49	11,45
	$Sd = 14,44; CoV = 31,74$	$Sd = 3,633; CoV = 31,74$
1,0 ÷ 0,8	34,46	13,55
	$Sd = 9,9; CoV = 28,73$	$Sd = 3,893; CoV = 28,73$
0,5 ÷ 0,8	26,39	19,88
	$Sd = 8,624; CoV = 32,68$	$Sd = 6,499; CoV = 32,96$

Sd – odchylenie standardowe; CoV – współczynnik zmienności

Po czasie przemiału, wynoszącym ok. 200 minut, średni wymiar ziarna wynosił poniżej 0,5 mm. Kwarcyt mający odmienną strukturę jako skała okruchowa, zbudowana z ziarn kwarcu bardzo ściśle do siebie przylegających, spojonych krzemionką charakteryzuje się niską podatnością na rozdrabnianie. W badanym zakresie wielkości ziarn (Tabl. 4) uzyskano bardzo zbliżone wartości naprężeń niszczących. Dla dużych ziarn (do 1 mm) wynosiły one 12,44 MPa, zaś dla ziarn poniżej 1 mm naprężenia niszczące wzrastały ponad 50% uzyskując wartości powyżej 19 MPa.



Rys. 1. Zmiana w czasie średniego wymiaru ziarna kwarcytu, szarogłazu i granitu

Interesujące jest stałe zmniejszanie się wartości sił niszczących. Dla największych ziarn z przedziału 2÷3 mm, siła niszcząca wynosi 244,1 N. Zmniejszenie się wymiaru ziarn powoduje zmniejszenie siły niszczącej do wartości 26,39 N dla ziarn z przedziału 0,5÷0,8 mm. Wzrost naprężeń niszczących przy jednoczesnym zmniejszaniu się wielkości obciążenia można wytłumaczyć zwiększeniem się odkształceń struktury ziarna bez utraty spoiwości materiału. Dla większych ziarn możliwe jest występowanie miękkiej osnowy, osłabiającej strukturę materiału, a dla mniejszych ziarn, poddanych procesowi rozdrobnienia uzyskuje się materiał bardzo jednorodny, który charakteryzuje się wysoką odpornością na rozdrabnianie.

Wnioski

1. Szybkość przemiału wybranych frakcji rozmiarowych może zależeć od energii jaką mają młynki, a co za tym idzie od wielkości sił niszczących wywoływanych przez oddziaływanie młynków na rozdrabniany surowiec.
2. Kinetyka przemiału zdeterminowana jest przez wytrzymałość ziarn na naprężenia niszczące, które zależą od budowy krystalograficznej mielonego surowca.

Oznaczenia

- b_{ij} – funkcja rozkładu ziarnowego,
- d_i, d_j – średnice ziarn w przedziałach rozmiarowych i i j ,
- d_{si} – średni (arytmetyczny) wymiar ziaren w przedziale rozmiarowym i
- S_i, S_j – szybkość właściwa rozdrabniania ziaren z przedziału i lub j ,
- $w_i(t), w_j(t)$ – udział wagowy frakcji ziaren i lub j po czasie mielenia t ,

LITERATURA

1. H. Blumenauer, G. Pusch: Technische Bruchmechanik, Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1981.
2. A. J. Lynch: Mineral crushing and grinding circuits, New York, Oxford, 1974.
3. P.H. Shipway, I.M. Hutchings: Phil. Magaz. A, **67**, 1389 (1993).
4. A. Heim, T. P. Olejnik: Proceedings of the Fifth World Congress on Particle Technology, Orlando, 18.13, 2006.

Badania prowadzono w ramach projektu badawczego N N208 0773 33 w latach 2007–2010.