

Daniel Zbroński*

ANALIZA MECHANIZMU ROZDRABNIANIA ZIAREN W MŁYNIU STRUMIENIOWO-FLUIDYZACYJNYM

1. Wprowadzenie

Choć nastąpił wzrost przemysłowego zastosowania technologii mielenia materiałów ziarnistych w warstwie fluidalnej [3, 4, 8], jednak podstawy mechanizmu rozdrabniania w tego typu młynach nie są nadal dostatecznie wyjaśnione. Zapewne podyktowane jest to dużą trudnością równoczesnego określenia wpływu wszystkich parametrów na omawiany proces mielenia. Złożoność zjawisk, wynikająca z chaotycznego ruchu ziaren i przypadkowego charakteru ich zderzeń, powoduje nieustanną zmianę układu sił i naprężeń w ziarnach — w praktyce trudną do wyznaczenia — celu prawidłowego opisu mechanizmu rozdrabniania ziaren. W młynach strumieniowo-fluidyzacyjnych ten złożony mechanizm rozdrabniania stał się przedmiotem analiz teoretycznych i badań doświadczalnych [1, 2, 5, 7, 9]. Berthiaux i Dodds [1] stwierdzili, że rozpoznanie rzeczywistego mechanizmu rozdrabniania wymaga poznania struktury ziaren nadawy. W przypadku typowego ziarna hydrargilitu rozdrabnianie odbywa się w wyniku rozdzielenia ziarna macierzystego na kilka większych fragmentów, które ulegają dalszemu rozbiciu na drobne ziarna produktu. Hogg [2] stwierdził, że rozdrabnianie ziaren może zachodzić w różny sposób zależny od charakterystyki materiału i zastosowanego poziomu obciążenia. Najczęściej rozpad ziaren następuje w wyniku pęknięcia lub ścierania.

Pęknięcie ma miejsce, gdy całkowita siła działająca na ziarno przewyższa pewną wartość krytyczną, powodując rozkruszenie ziarna na większą ilość mniejszych fragmentów.

Ścieranie ziarna występuje natomiast przy mniejszej sile, dla której wartość krytyczna osiągana jest jedynie lokalnie na krawędziach ziarna. Dzięki temu ziarno macierzyste, zachowując nadal swój wejściowy kształt, podlega powolnej utracie masy, przy równoczesnym wzroście liczby ziaren o wiele mniejszych od niego.

Korzeń *et al.* [5] stwierdzili, że część ziaren ulega rozbiciu w wyniku wzajemnego zderzenia, a część — uderzenia o powierzchnię ścian bocznych komory mielenia. W zależ-

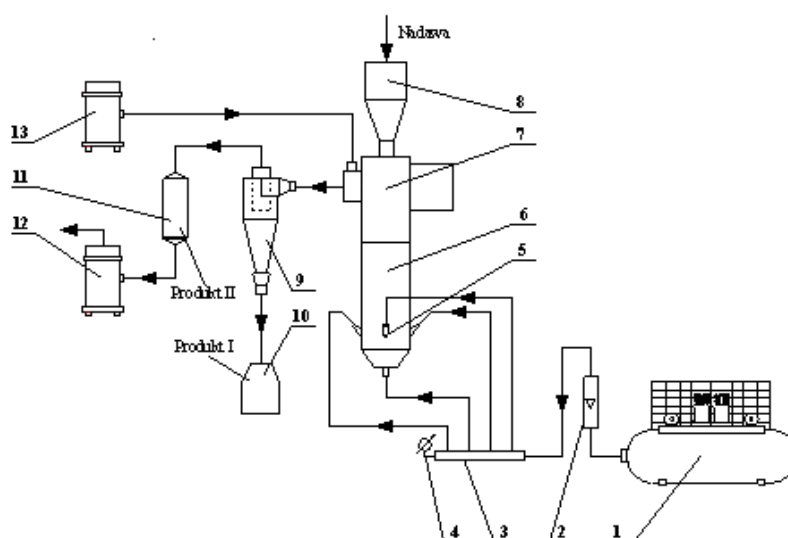
* Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska, Częstochowa

ności od przyjętych parametrów procesu ziarna nadawy mogą też ulegać ścieraniu. Tasirin i Geldart [7] stwierdzili, że duże ziarna rozpadają się głównie w wyniku pęknięcia w początkowych etapach przeróbki. Drobne ziarna natomiast zmniejszają rozmiary w wyniku ścierania, gdyż zawierając mało uszkodzeń powierzchniowych są trudniejsze do rozbicia niż ziarna większe.

2. Badania eksperymentalne

2.1. Cel, zakres i metodyka badań

Celem badań było wyjaśnienie mechanizmu rozdrabniania ziaren w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym, na podstawie analizy wyników z eksperymentalnych prób mielenia. Badania przeprowadzono na stanowisku, którego schemat przedstawiono na rysunku 1 [12]. Do badań użyto kamienia wapiennego pochodzącego z Kopalni Wapienia „Czatkowice” w Krzeszowicach. Dzięki badaniom wstępnym [9] wyznaczono optymalne wartości parametrów procesu, przy których rozdrabnianie kamienia wapiennego w młynie odbywa się efektywnie. Badania zasadnicze pozwoliły ustalić wpływ początkowego uziarnienia nadawy na wydajność młyna i skład ziarnowy produktu mielenia, dzięki czemu możliwe było określenie mechanizmu rozdrabniania ziaren dla optymalnych parametrów procesu.

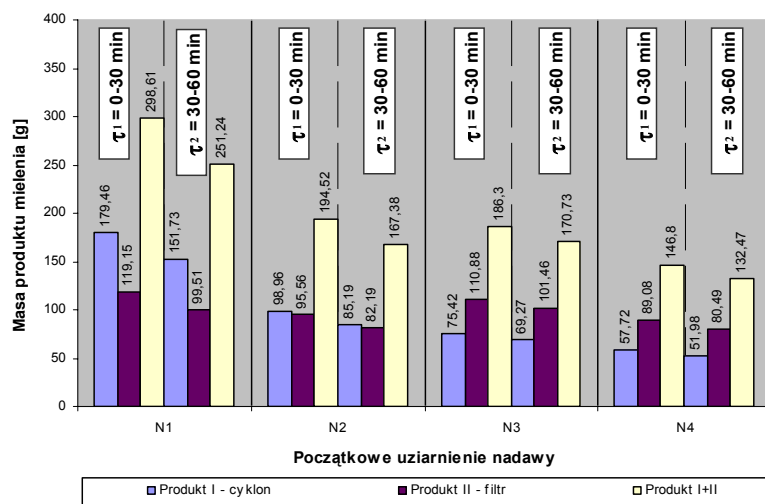


Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 — sprężarka tłokowa, 2 — rotametr, 3 — kolektor powietrza roboczego, 4 — manometr sprężysty, 5 — dysze powietrzne, 6 — komora mielenia, 7 — przepływowy klasyfikator wirnikowy, 8 — zbiornik zasypowy nadawy, 9 — cyklon, 10 — zbiornik produktu mielenia I, 11 — filtr tkaninowy (produkt mielenia II), 12 — urządzenie wyciągowe, 13 — dodatkowe urządzenie tłoczące

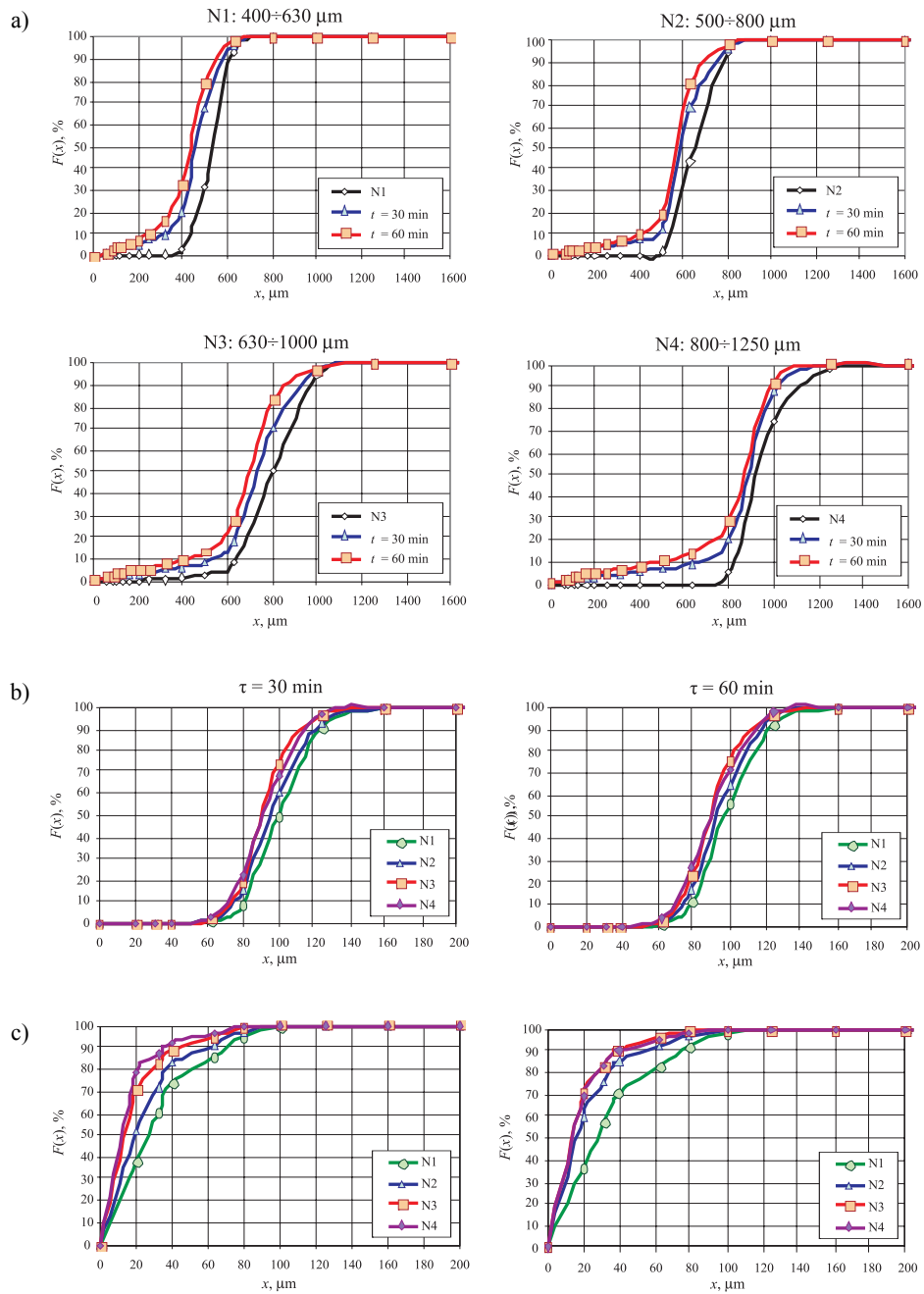
Przyjęta metodyka badań określała zakres i sposób realizacji prób rozdrabniania oraz wyznaczenia masy i składu ziarnowego produktu mielenia. W celu uzyskania wąskich klas ziarnowych nadawy kamień wapienny przesiano za pomocą zestawu sit wykorzystując wstrząsarke mechaniczną firmy Retsch. Podczas badań próbki nadawy: N1: 400÷630 μm , N2: 500÷800 μm , N3: 630÷1000 μm i N4: 800÷1250 μm poddawano kolejno rozdrabnianiu, przy zachowaniu stałych wartości następujących parametrów procesu: masa zasypowa nadawy $m_n = 3 \text{ kg}$, nadciśnienie powietrza roboczego $p_n = 0,35 \text{ MPa}$, strumień objętości powietrza roboczego $\dot{V} = 0,02 \text{ m}^3/\text{s}$, prędkość obrotowa wirnika klasyfikatora $n = 100 \text{ 1/s}$ i czas mielenia $\tau_1 = 0\text{--}30 \text{ min}$ i $\tau_2 = 30\text{--}60 \text{ min}$. Przebieg poszczególnych prób mielenia był następujący. Porcję nadawy N o znanej masie początkowej m_n wsypywano do komory mielenia młyna, uruchamiano klasyfikator wirnikowy do żądanej wartości prędkości obrotowej n i sprężarkę tłokową do ustalonej wartości nadciśnienia powietrza roboczego p_n . Na końcu włączano urządzenie wyciągowe i dodatkowe urządzenie tłoczące, uszczelniające wirnik klasyfikatora. Po każdej próbie stanowisko badawcze było wyłączane i czyszczone. Zmielony materiał z komory młyna oraz ze zbiornika pod cyklonem (produkt I) i z filtra tkaninowego (produkt II) ważono na elektronicznej wadze laboratoryjnej AD 2000 firmy Axis z dokładnością do 0,01 g, a następnie w całości poddawano analizie granulometrycznej [6] na przesiewaczu sitowym AS 200 Control firmy Retsch.

2.2. Wyniki badań

Na rysunku 2 przedstawiono wyniki pomiaru masy produktu mielenia, a na rysunku 3 wykresy dotyczące dystrybuanty składu ziarnowego $F(x)$ pozostałości w komorze mielenia oraz produktu z cyklonu (produkt I) i z filtra (produkt II).



Rys. 2. Zestawienie wyników pomiaru masy produktu mielenia kamienia wapiennego otrzymanych przy zmianie początkowego uziarnienia nadawy po czasie mielenia $\tau_1 = 0\text{--}30 \text{ min}$ i $\tau_2 = 30\text{--}60 \text{ min}$



Rys. 3. Skład ziarnowy produktu otrzymany przy zmianie początkowego uziarnienia nadawy kamienia wapiennego po czasie mielenia $\tau = 30$ min i $\tau = 60$ min:
a) pozostałość w komorze mielenia; b) produkt I (cyklon); c) produkt II (filtr)

Na ich podstawie stwierdzono, że wzrost początkowego uziarnienia nadawy wpłynął na wydajność młyna [10] oraz skład ziarnowy produktu mielenia strumieniowo-fluidalnego [11]. Zaobserwowano wyraźny spadek skuteczności separacji cyklonu, przy nieznacznej zmianie skuteczności separacji filtra (rys. 2). Prawdopodobnie wynika to z faktu zakłócenia przez dostarczoną nadawę warunków pracy burzliwej warstwy fluidalnej. Dla najdrobniejszej nadawy N1 pojawiły się typowe warunki dla zainicjowania rozwiniętej fluidyzacji fontanowej, przechodzącej miejscami w transport pneumatyczny, co w konsekwencji zwiększało liczbę wzajemnych zderzeń ziaren drobnych i grubych w górnej części komory oraz ich unos do układów separacji zewnętrznej. Dla nadawy N2 i N3 fluidyzacja burzliwa przebiegała poprawnie. Natomiast dla najgrubszej nadawy N4 pojawiły się typowe warunki dla zainicjowania mało rozwiniętej fluidyzacji burzliwej, przechodzącej miejscami w intensywną fluidyzację pęcherzową, co w konsekwencji zwiększało liczbę wzajemnych zderzeń ziaren w dolnej części komory i zmniejszało ich unos do cyklonu i filtra.

Wzrost początkowego uziarnienia nadawy wpłynął na uziarnienie pozostałości w komorze mielenia. Stwierdzono blisko 10% udział ziaren o rozmiarach poniżej 200 μm i wyraźne zwiększenie udziału masowego ziaren o rozmiarach w zakresie: dla nadawy N1: 200÷500 μm , dla nadawy N2: 200÷630 μm , dla nadawy N3: 200÷800 μm i dla nadawy N4: 200÷1000 μm (rys. 3a). Wzrost początkowego uziarnienia nadawy wpłynął także na zmianę udziału masowego ziaren poniżej 100 μm w produkcie wytrąconym w cyklonie. W przypadku nadawy N1 produkt I zawierał około 50% ziaren o rozmiarze większym od 100 μm . Produkt taki nie spełniał wymagań dotyczących żądanego uziarnienia w zastosowanej technologii ($d < 100 \mu\text{m}$), dlatego też powinien zostać skierowany do komory mielenia w celu dalszej przeróbki (rys. 3b). Wzrost początkowego uziarnienia nadawy wpłynął natomiast wyraźnie na zmianę udziału masowego ziaren poniżej 40 μm zatrzymanych w filtrze. Dla nadawy N1 stanowił on 70÷72% całego produktu II, dla nadawy N2: 81÷85%, dla nadawy N3: 89÷90%, zaś dla nadawy N4: 90÷92% (rys. 3c). Dążenie do uzyskania drobniejszego produktu mielenia wiąże się tylko pośrednio z początkowym uziarnieniem nadawy, bardziej natomiast zależy od takich parametrów procesu, jak: nadciśnienie powietrza roboczego i prędkość obrotowa wirnika klasyfikatora [12]. Stosowanie nadawy o uziarnieniu mniejszym od 400 μm wydaje się być w tym przypadku nie uzasadnione przemysłowo, ponieważ uzyskanie żądanego produktu końcowego wymagać będzie dużych nakładów energii koniecznej do efektywnego przemiału oraz dużych wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora. Ponadto na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że proces rozdrabniania przebiegał intensywniej w pierwszym okresie mielenia ($\tau_1 = 0\text{--}30 \text{ min}$), niż w drugim ($\tau_2 = 30\text{--}60 \text{ min}$), gdyż ziarna kamienia wapiennego posiadały wówczas więcej nierówności i pęknięć powierzchniowych [9].

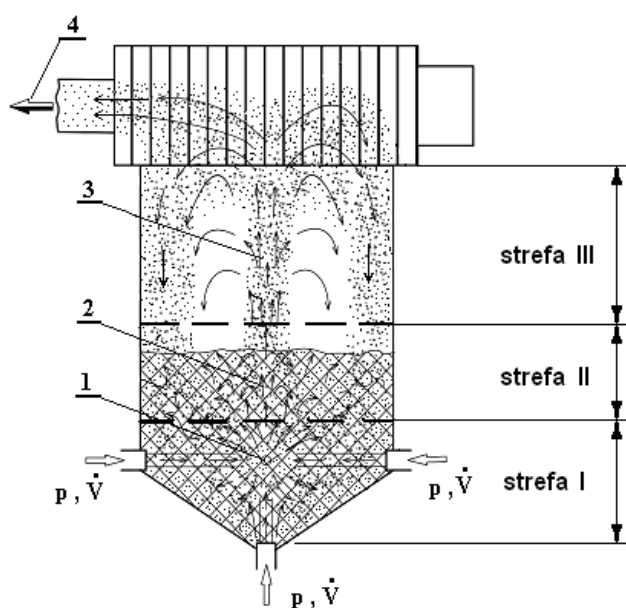
3. Analiza mechanizmu rozdrabniania ziaren w komorze mielenia młyna

W pracy [9] podjęto próbę wyjaśnienia mechanizmu rozdrabniania ziaren w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym.

Zadanie to nie należy jednak do łatwych, gdyż związane jest z przewyciężeniem różnego rodzaju trudności, nie zawsze możliwych do rozwiązania, między innymi takimi jak:

- określenie ruchu ziaren, charakteru i skali wzajemnych zderzeń, uderzeń ziaren o ścianki komory mielenia, układów separacji wewnętrznej i zewnętrznej oraz przewodów transportujące produkty mielenia,
- określenie sił i naprężeń w ziarnach w trakcie rozdrabniania, klasyfikacji i transportu,
- wykonanie pełnej wizualizacji procesu rozdrabniania i klasyfikacji w komorze mielenia.

Przyjęto założenie, że ziarna materiału stałego ulegają rozdrobnieniu tylko w objętości komory mielenia młyna, natomiast podczas transportu pneumatycznego przez przewody i układy separacji (klasyfikator, cyklon i filtr), nie zmieniają rozmiaru. Na podstawie poczynionych obserwacji [9], stwierdzono występowanie w komorze mielenia młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego trzech charakterystycznych stref rozdrabniania (rys. 4).



Rys. 4. Strefy rozdrabniania w komorze mielenia młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego:
 I — strefa udarowego rozbijania ziaren, II — strefa dynamicznego rozdzielania ziaren i aglomeratów ziarnowych, III — strefa fluidalnego ścierania powierzchni ziaren,
 1 — ognisko zderzeń przeciwstrumieni powietrznych, 2 — obszar fluidyzacji pulsacyjnej,
 3 — obszar fluidyzacji fontannowej, 4 — wylot produktu mielenia

Strefa I obejmuje dolną część burzliwej warstwy fluidalnej wraz z obszarem powstałego ogniska zderzeń przeciwstrumieni powietrznych. W strefie tej dynamiczne oddziaływa-

nie strumieni powietrza prowadzi do powstania naprężeń w poszczególnych ziarnach, które przyczyniają się do wzrostu powierzchniowych pęknięć ziaren. W momencie, w którym powstałe naprężenia przekroczą wartość wytrzymałości materiału ziarnistego, następuje skuteczne rozbijanie ziaren w wyniku udarowych zderzeń.

Strefa II obejmuje pozostałą część burzliwej warstwy fluidalnej (obszar fluidyzacji pulsacyjnej), zajmującej fragmenty dolnej i środkowej części komory mielenia. W strefie tej obserwuje się dynamiczne i ciągle rozdzielanie fragmentów macierzystych ziaren i aglomeratów ziarnowych. Dzięki intensywnemu mieszaniu materiału z powietrzem następuje rozdrabnianie ziaren w wyniku pęknięcia, rozłupywania i ścierania.

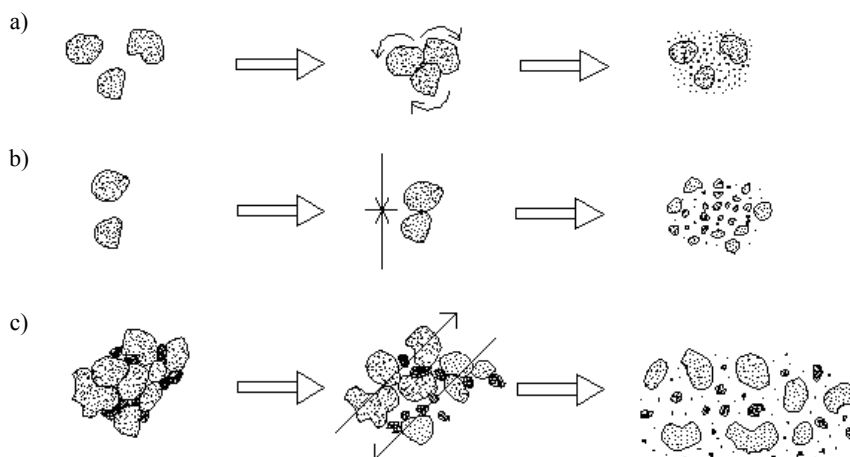
Strefa III obejmuje obszar fluidyzacji fontannowej, zajmujący fragmenty środkowej i górnej części komory mielenia. W strefie tej obserwuje się ciągle unoszenie ziaren z burzliwej warstwy fluidalnej do obszaru oddziaływania łopatek wirnika klasyfikatora przepływowego. Porywanie ziaren z warstwy przypuszczalnie odbywa się w wyniku dwóch równoległych przebiegających mechanizmów: natychmiastowego unoszenia bardzo drobnych ziaren i unoszenia większych ziaren w śladzie pęcherzy gazowych. Rozdrabnianie ziaren następuje w wyniku wzajemnego ścierania i zderzeń ziaren unoszonych i zawracanych z powrotem do warstwy. Ścieranie jest w tych warunkach identyfikowane jako główny mechanizm rozdrabniania ziaren.

Należy podkreślić, że pewna część ziaren zmniejsza swój rozmiar także podczas kontaktu ze ściankami komory mielenia i łopatkami wirnika klasyfikatora przepływowego, głównie w wyniku ścierania i rozbijania. Należy także pamiętać, że w miarę zmniejszania się rozmiarów ziaren maleje liczba miejsc, w których mogą pojawić się miejscowe pęknięcia powierzchniowe. Oznacza to wzrost wytrzymałości ziaren i jednostkowej energii niezbędnej do ich rozdrobnienia. Pęknięcia występują do momentu uzyskania granicznego rozmiaru ziarna, które nie ulega dalszemu zmniejszeniu. Jednak wyznaczenie tego parametru, opisującego podatność materiału na rozdrabnianie, nie jest zadaniem prostym. Podstawowa trudność tkwi między innymi w reprezentatywnym i bardzo dokładnym wykonaniu analiz składu ziarnowego produktów superdrobnoziarnistego strumieniowo-fluidalnego.

Jak wynika z przeprowadzonej analizy, rozdrabnianie materiałów ziarnistych w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym może odbywać się w wyniku trzech różnych mechanizmów. W strefie I dominuje udarowe rozbijanie ziaren macierzystych (*breakage process*), w strefie II — dynamiczne rozdzielanie ziaren i aglomeratów ziarnowych (*cleavage process*), zaś w strefie III — fluidalne ścieranie powierzchni ziaren (*attrition process*). Oczywiście mechanizmy te przeważają mniej lub bardziej w każdej z wymienionych stref, w zależności od rodzaju, struktury i uziarnienia materiału oraz przyjętych parametrów procesu.

Analizując przedstawione na rysunku 3 wykresy krzywych składu ziarnowego nadaw kamienia wapiennego, można stwierdzić, że rozdrabnianie ziaren zachodziło głównie w wyniku powierzchniowego ścierania oraz gwałtownego rozbijania i dynamicznego rozdzielania aglomeratów ziarnowych. Dowodem tego jest redukcja największych rozmiarów ziaren nadawy i przyrost udziału masowego najdrobniejszych ziaren w produkcie końcowym.

Na rysunku 5 przedstawiono formy mechanicznego rozdrabniania materiału ziarnistego w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym [13].



Rys. 5. Formy mechanicznego rozdrabniania materiału ziarnistego w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym: a) fluidalne ścieranie powierzchni ziaren; b) udarowe rozbijanie ziaren; c) dynamiczne rozdzielanie aglomeratów ziarnowych

4. Wnioski

- 1) Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, iż rozdrabnianie ziaren kamienia wapiennego w młynie zachodzi głównie w wyniku:
 - powierzchniowego ścierania — o czym świadczy przyrost udziału masowego najdrobniejszych ziaren zatrzymanych w filtrze (produkt II);
 - gwałtownego rozbijania i rozdzielania aglomeratów ziarnowych — o czym świadczy znaczna redukcja rozmiarów największych ziaren nadawy w komorze mielenia i przyrost udziału masowego drobnych ziaren wytrąconych w cyklonie (produkt I).
- 2) Na podstawie przeprowadzonej analizy mechanizmu rozdrabniania ziaren wyodrębniono w komorze mielenia młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego trzy strefy rozdrabniania:
 - strefę udarowego rozbijania ziaren — występującą w dolnej części komory mielenia (obszar fluidyzacji burzliwej);
 - strefę dynamicznego rozdzielania ziaren i aglomeratów ziarnowych — występującą w środkowej części komory mielenia (obszar fluidyzacji pulsacyjnej);
 - strefę fluidalnego ścierania powierzchni ziaren — występującą w górnej części komory mielenia (obszar fluidyzacji fontannowej).

- 3) Mechanizm rozdrabniania ziaren w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym zależy od rodzaju, struktury, wytrzymałości i sposobu zderzeń ziaren oraz parametrów procesu przemiatu (masa i uziarnienie nadawy, ciśnienie i wydatek powietrza, prędkość obrotowa wirnika klasyfikatora, czas trwania mielenia itp.).

LITERATURA

- [1] *Berthiaux H., Dodds J.A.*: Modeling fine grinding in a fluidized bed opposed jet mill: Part I. Batch grinding kinetics. Part II. Continuous grinding. *Powder Technology*, 106, 1999, 78–97
- [2] *Hogg R.*: Breakage mechanisms and mill performance in ultrafine grinding. *Powder Technology*, 105, 1999, 135–140
- [3] *Korzeń Z.*: Problemy rozwoju nowych powietrzno-fluidalnych technologii w inżynierii materiałów ziarnistych. *Górnictwo Odkrywkowe*, 4–5, 1997, 119–128
- [4] *Korzeń Z., Rink R.*: Powietrzno-strumieniowe technologie mikronizacji ciał twardych — tendencje rozwoju i propozycje nowych wdrożeń. *Mechanika*, 18, 11, 1999, 49–65
- [5] *Korzeń Z., Rink R., Konieczny A.*: Problemy syntezy konstrukcyjnej i badań młynów powietrzno-fluidalnych. *ZN PŁ, Inżynieria Chemiczna*, 780, 22, 1997, 141–150
- [6] PN-71/C-04501 – Analiza sitowa. Wytyczne wykonywania
- [7] *Tasirin S.M., Geldart D.*: Experimental investigation on fluidized bed jet grinding. *Powder Technology*, 105, 1999, 337–341
- [8] *Vogel A.*: The Alpine fluidized bed opposed jet mill — a case history. *Powder Handling & Processing*, 3, 2, 1991, 129–134
- [9] *Zbroński D.*: Badanie i modelowanie procesu strumieniowo-fluidalnego rozdrabniania materiałów ziarnistych. Praca doktorska, Politechnika Częstochowska 2005
- [10] *Zbroński D., Górecka-Zbrońska A.*: Analiza oddziaływania wybranych parametrów procesu na osiągi młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego. Cz. I. Wydajność młyna. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 23, 1, 2007, 152–163
- [11] *Zbroński D., Górecka-Zbrońska A.*: Analiza oddziaływania wybranych parametrów procesu na osiągi młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego. Cz. II. Skład ziarnowy produktu mielenia. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 23, 2, 2007
- [12] *Zbroński D., Górecka-Zbrońska A.*: Wpływ prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora przepływowego na osiągi młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego. *Górnictwo i Geoinżynieria*, 30, 3/1, 2006, 365–373
- [13] *Zbroński D., Górecka-Zbrońska A., Otwinowski H., Urbaniak D.*: Research of limestone particles comminution in the fluidized bed opposed jet mill. *Powder Handling & Processing*, 17, 1, 2005, 32–39