

DANIEL ZBRÓŃSKI*

**Analiza oddziaływania wybranych parametrów procesu na osiągi
młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego.
Część III. Mechanizm rozdrabniania ziaren**

Wprowadzenie

Pomimo wzrostu przemysłowego zastosowania technologii mielenia materiałów ziarnistych w warstwie fluidalnej (Vogel 1991; Korzeń 1997; Korzeń i Rink 1999) podstawy mechanizmu rozdrabniania w tego typu młynach nie są nadal dostatecznie wyjaśnione. Wynika to głównie z trudności związanych z ustaleniem wpływu wszystkich zjawisk na realizowany proces rozdrabniania. Chaotyczny ruch ziaren i przypadkowy charakter ich zderzeń w warstwie fluidalnej powoduje nieustanną zmianę układu sił i naprężeń w ziarnach – w praktyce trudną do wyznaczenia dla prawidłowego opisu mechanizmu rozdrabniania. Ten złożony mechanizm stał się przedmiotem wielu analiz teoretycznych i badań doświadczalnych (Korzeń i in. 1997; Berthiaux i Dodds 1999; Hogg 1999; Tasirin i Geldart 1999; Zbroński 2007). Korzeń, Rink i Konieczny (1997) na podstawie wyników badań młynów powietrzno-fluidalnych uznali, że część ziaren ulega rozbiciu w wyniku wzajemnych zderzeń, a część – w wyniku uderzeń o powierzchnię ścian bocznych komory mielenia. W zależności od przyjętych parametrów procesu ziarna nadawy mogą też być w młynie ścierane. Berthiaux i Dodds (1999) stwierdzili, że struktura ziaren nadawy decyduje o mechanizmie rozdrabniania. Ich zdaniem dla typowego ziarna hydrargilitu proces rozdrabniania odbywa się w wyniku rozdzielenia ziarna nadawy na kilka dużych fragmentów, które ulegają dalszemu rozbiciu na drobne ziarna produktu. Hogg (1999) stwierdził, że na sposób rozdrabniania ziaren wpływa, oprócz rodzaju nadawy, także przyjęty

* Dr inż., Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Katedra Kotłów i Termodynamiki, Politechnika Częstochowska, Częstochowa; e-mail: zbroński@kkt.pcz.czyst.pl

poziomu obciążenia. Jego zdaniem ziarna ulegają w młynie najczęściej pękaniu lub ścieraniu. Pęknięcie ziarna następuje wtedy, gdy siła działająca na ziarno przewyższa wartość krytyczną, powodując jego rozkruszenie na mniejsze fragmenty. Ścieranie ziarna występuje zaś przy mniejszej sile, dla której wartość krytyczna osiągnięta jest lokalnie na krawędziach ziarna. Dzięki temu ziarno nadawcy, zachowując nadal swój wejściowy kształt, podlega powolnej utracie masy, przy równoczesnym wzroście liczby ziaren o rozmiarach zdecydowanie mniejszych od niego. Tasirin i Geldart (1999) na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzili, że duże ziarna nadawcy rozpadają się głównie w wyniku pęknięcia w początkowych etapach przeróbki, drobne natomiast w wyniku ścierania.

1. Badania eksperymentalne

Celem badań było wyjaśnienie mechanizmu rozdrabniania ziaren kamienia wapiennego w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym. Przeprowadzone badania eksperymentalne (Zbroński 2005) pozwoliły ustalić wpływ wybranych parametrów procesu na wydajność młyna – część I artykułu (Zbroński i Górecka-Zbrońska 2007a) i skład ziarnowy produktu mielenia – część II artykułu (Zbroński i Górecka-Zbrońska 2007b), dzięki czemu możliwe stało się określenie mechanizmu rozdrabniania ziaren dla optymalnych parametrów procesu. Stanowisko badawcze, metodykę, zakres i wyniki badań omówiono szczegółowo w części I i II artykułu.

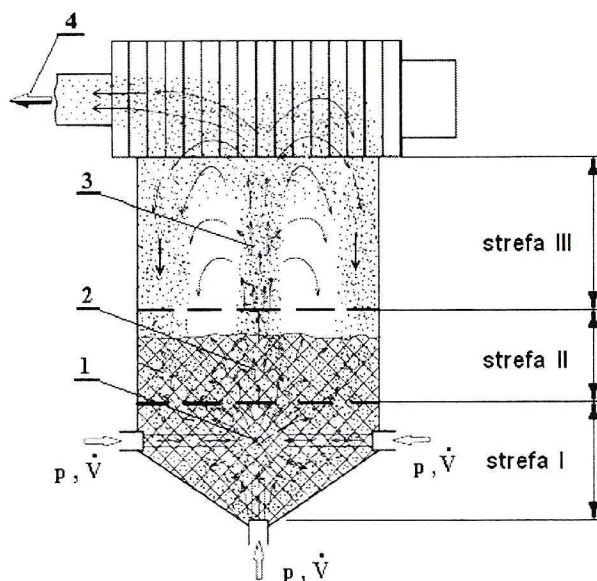
2. Analiza mechanizmu rozdrabniania ziaren w młynie

W pracy doktorskiej (Zbroński 2005) podjęto próbę wyjaśnienia mechanizmu rozdrabniania ziaren w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym. Zadanie to nie należało jednak do prostych, ponieważ związane było z pokonaniem różnych trudności, nie zawsze możliwych do rozwiązania, między innymi (Zbroński 2007):

- określeniem ruchu ziaren, charakteru i skali wzajemnych zderzeń, uderzeń ziaren o ścianki komory mielenia, układy separacji wewnętrznej i zewnętrznej oraz przewody transportujące produkty mielenia,
- określeniem sił i naprężeń w ziarnach w trakcie rozdrabniania, klasyfikacji i transportu,
- wykonaniem wizualizacji procesu rozdrabniania i klasyfikacji w komorze mielenia.

W związku z powyższym przyjęto założenie, że ziarna ulegają rozdrobnieniu tylko w objętości komory mielenia młyna, natomiast podczas transportu pneumatycznego do układów separacji (klasyfikator, cyklon i filtr) nie zmieniają rozmiaru. Na podstawie poczynionych obserwacji (Zbroński 2005), ustalono w komorze mielenia młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego występowanie trzech charakterystycznych stref rozdrabniania (rys. 1).

Strefa I – obejmuje dolną część burzliwej warstwy fluidalnej wraz z obszarem powstałego ogniska zderzeń przeciwstrumieni powietrznych. W strefie tej dynamiczne oddziaływanie strumieni powietrza prowadzi do powstania naprężeń w poszczególnych ziarnach,



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

Fig. 1. The zones of comminution in the grinding chamber of fluidized bed opposed jet mill:
 I – zone of percussive breakage of grains, II – zone of dynamic cleavage of grain agglomerates,
 III – zone of fluidized surface attrition of grains, 1 – collision source of air counter-fluxes,
 2 – zone of pulsatory fluidization, 3 – zone of fountain fluidization, 4 – outlet of milling product

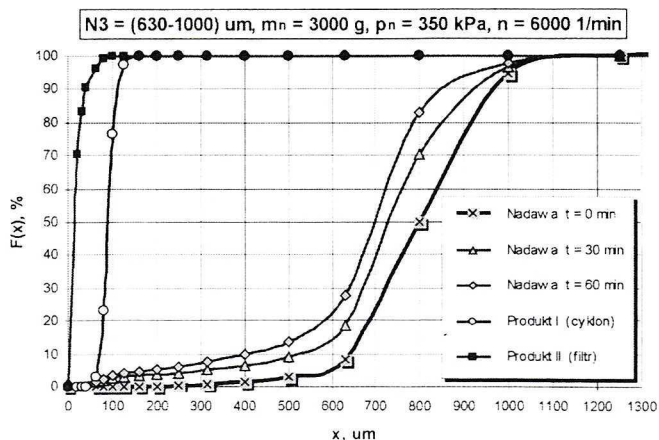
które przyczyniają się do wzrostu powierzchniowych pęknięć ziaren. W momencie, w którym powstałe naprężenia przekroczą wartość wytrzymałości materiału ziarnistego, następuje skuteczne rozbijanie ziaren w wyniku uderowych zderzeń.

Strefa II – obejmuje pozostałą część burzliwej warstwy fluidalnej (obszar fluidyzacji pulsacyjnej), zajmującą fragmenty dolnej i środkowej części komory młwienia. W strefie tej obserwuje się dynamiczne rozdzielanie fragmentów ziaren nadawy i utworzonych wcześniej aglomeratów ziarnowych. Dzięki intensywnemu mieszaniu materiału w warstwie następuje rozdrabnianie ziaren w wyniku pęknięcia, rozłupywania i ścierania.

Strefa III – obejmuje obszar fluidyzacji fontannowej, zajmujący fragmenty środkowej i górnej części komory młwienia. W strefie tej obserwuje się ciągłe unoszenie ziaren z burzliwej warstwy fluidalnej do obszaru oddziaływania łopatek wirnika klasyfikatora przepływowego. Porywanie ziaren z warstwy odbywa się w wyniku unoszenia bardzo drobnych ziaren oraz transportu większych ziaren w śladzie pęcherzy gazowych. Rozdrabnianie ziaren następuje w wyniku wzajemnego ścierania oraz zderzeń ziaren unoszonych i zwracanych z powrotem do warstwy. Ścieranie jest w tych warunkach identyfikowane jako główny mechanizm rozdrabniania.

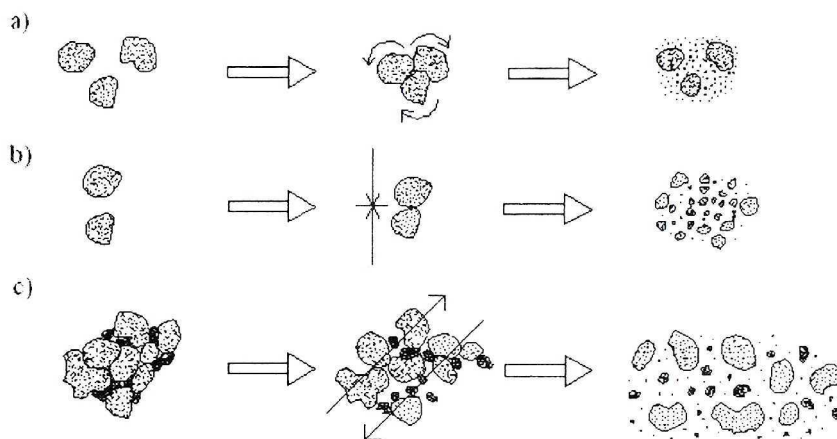
Należy podkreślić, że pewna część ziaren zmniejsza swój rozmiar także podczas kontaktu ze ściankami komory mielenia i łopatkami wirnika klasyfikatora przepływowego, głównie w wyniku ścierania i rozbijania (Korzeń i in. 1997). W miarę zmniejszania się rozmiarów ziaren maleje liczba miejsc, w których mogą 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. Jednakże wyznaczenie tego parametru nie jest zadaniem prostym (Hogg 1999), a podstawowa trudność tkwi między innymi w reprezentatywnym i bardzo dokładnym wykonaniu analiz składu ziarnowego produktu superdrobnego przemiału 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 nadawy, w strefie II – dynamiczne rozdzielanie ziaren i aglomeratów ziarnowych, zaś w strefie III – fluidalne ścieranie powierzchni ziaren. 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 2 wykresy krzywych składu ziarnowego nadawy i produktu mielenia kamienia wapiennego można stwierdzić, że rozdrabnianie ziaren zachodziło głównie w wyniku powierzchniowego ścierania, mniej zaś – gwałtownego rozbijania i dynamicznego rozdzielania aglomeratów ziarnowych. Dowodem tego jest stosunkowo nieduża redukcja największych rozmiarów ziaren nadawy i wyraźny przyrost udziału masowego najdrobniejszych ziaren w produkcie końcowym. Na rysunku 3 przedstawiono formy mechanicznego rozdrabniania materiału ziarnistego w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym (Zbroński i in. 2005).



Rys. 2. Skład ziarnowy nadawy i produktu mielenia kamienia wapiennego otrzymany dla optymalnych warunków pracy młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego

Fig. 2. The particle size distribution of fed material and milling product of limestone obtained for optimum operating conditions of the fluidized bed opposed jet mill



Rys. 3. Formy mechanicznego rozdrabniania materiału ziarnistego w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym:
 a – fluidalne ścieranie powierzchni ziaren; b – udarowe rozbijanie ziaren;
 c – dynamiczne rozdzielanie aglomeratów ziarnowych

Fig. 3. The forms of mechanical comminution of the granular material in the fluidized bed opposed jet mill:
 a – fluidized surface attrition of grains; b – percussive breakage of grains;
 c – dynamic cleavage of grain agglomerates

Wnioski

Przeprowadzona analiza pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. W komorze mielenia młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego można wyróżnić trzy strefy rozdrabniania:
 - strefę udarowego rozbijania ziaren – znajdującą się w dolnej części komory mielenia w obszarze fluidyzacji burzliwej,
 - strefę dynamicznego rozdzielania ziaren i aglomeratów ziarnowych – znajdującą się w środkowej części komory mielenia w obszarze fluidyzacji pulsacyjnej,
 - strefę fluidalnego ścierania ziaren – znajdującą się w górnej części komory mielenia w obszarze fluidyzacji fontannowej.
2. Rozdrabnianie ziaren kamienia wapiennego w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym zachodzi 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 redukcja rozmiarów największych ziaren nadawy w komorze mielenia i przyrost udziału masowego drobnych ziaren wytrąconych w cyklonie (produkt I).
3. Mechanizm rozdrabniania ziaren w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym zależy od wielu czynników, między innymi: rodzaju, struktury, wytrzymałości i sposobu zderzeń

ziaren oraz parametrów procesu (masa i uziarnienie nadawy, ciśnienie i wydatek powietrza, prędkość obrotowa wirnika klasyfikatora, czas trwania mielenia itp.).

LITERATURA

- Berthiaux H., Dodds J.A., 1999 – Modeling fine grinding in a fluidized bed opposed jet mill: Part I. Batch grinding kinetics. Part II. Continuous grinding. *Powder Technol.* 106, 78–97.
- Hogg R., 1999 – Breakage mechanisms and mill performance in ultrafine grinding. *Powder Technol.* 105, 135–140.
- Korzeń Z., 1997 – Problemy rozwoju nowych powietrzno-fluidalnych technologii w inżynierii materiałów ziarnistych. *Górnictwo Odkrywkowe* 4–5, 119–128.
- Korzeń Z., Rink R., 1999 – Powietrzno-strumieniowe technologie mikronizacji ciał twardych – tendencje rozwojowe i propozycje nowych wdrożeń. *Mechanika* 18/11, 49–65.
- Korzeń Z., Rink R., Konieczny A., 1997 – Problemy syntezy konstrukcyjnej i badań młynów powietrzno-fluidalnych. *ZN Politechniki Łódzkiej, Inż. Chem.* 780/22, 141–150.
- Tasirin S.M., Geldart D., 1999 – Experimental investigation on fluidized bed jet grinding. *Powder Technol.* 105, 337–341.
- Vogel A., 1991 – The Alpine fluidized bed opposed jet mill – a case history. *Powder Hand. Process.* 3/2, 129–134.
- Zbroński D., 2005 – Badanie i modelowanie procesu strumieniowo-fluidalnego rozdrabniania materiałów ziarnistych. Praca doktorska, Politechnika Częstochowska.
- Zbroński D., 2007 – Analiza mechanizmu rozdrabniania ziaren w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym. *Uczelniane Wyd. Nauk.–Dyd. AGH, Górn. i Geoinż.* 31/4, 117–125.
- Zbroński D., Górecka-Zbrońska A., 2007a – Analiza oddziaływania wybranych parametrów procesu na osiągi młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego. Część I. Wydajność młyna. *Gosp. Sur. Miner.* 23/1, 152–163.
- Zbroński D., Górecka-Zbrońska A., 2007b – Analiza oddziaływania wybranych parametrów procesu na osiągi młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego. Część II. Skład ziarnowy produktu mielenia. *Gosp. Sur. Miner.* 23/2, 65–74.
- Zbroński D., Górecka-Zbrońska A., Otwinowski H., Urbaniak D., 2005 – Research of limestone particles comminution in the fluidized bed opposed jet mill. *Powder Hand. Process.* 17/1, 32–39.

ANALIZA ODDZIAŁYWANIA WYBRANYCH PARAMETRÓW PROCESU NA OSIĄGI MŁYNA STRUMIENIOWO-FLUIDYZACYJNEGO. CZĘŚĆ III. MECHANIZM ROZDRABNIANIA ZIAREN

Słowa kluczowe

Mielenie, fluidyzacja, mechanizm rozdrabniania, młyn strumieniowo-fluidyzacyjny, kamień wapienny

Streszczenie

Stosowanie w wielu gałęziach przemysłu materiałów o wysokim stopniu rozdrobnienia wymaga użycia takich nowoczesnych technologii mechanicznej przeróbki substancji stałych, jakie zapewnią uzyskanieżądanego uziarnienia produktu, przy jednoczesnym zmniejszeniu energochłonności procesu. Perspektywicznym rozwiązaniem są technologie realizujące przeróbkę materiałów ziarnistych w warunkach wysokoenergetycznej warstwy fluidalnej. Istota rozdrabniania materiałów w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym polega na wytworzeniu ogniska zderzeń przeciwstrumieni powietrznych w nieruchomej warstwie, inicjującego powstanie i utrzymanie stanu fluidyzacji burzliwej w komorze mielenia młyna. W dolnej strefie warstwy wystąpi stan fluidyzacji pulsacyjnej, w górnej zaś –

stan fluidyzacji fontannowej. W strefie fluidyzacji pulsacyjnej powstają obszary pęcherzy gazowych i aglomeratów ziarnowych, które intensyfikują mieszanie i rozdrabnianie ziaren. Natomiast w strefie fluidyzacji fontannowej obserwuje się unoszenie ziaren w obszarze dużych prędkości w rdzeniu komory, a następnie grawitacyjne opadanie grubszych ziaren w strefie małych prędkości w pobliżu ścian bądź trwałe porywanie drobnych ziaren do układu separacji zewnętrznej przez strumień przepływającego powietrza. Taki rozkład stref fluidyzacji umożliwia efektywne rozdrabnianie materiału ziarnistego. Mimo to, podstawy mechanizmu rozdrabniania ziaren w młynach strumieniowo-fluidyzacyjnych są nadal niedostatecznie wyjaśnione. Wynika to głównie z trudności dotyczących określenia wpływu wszystkich parametrów procesu na charakter zmiany uziarnienia produktu. W punkcie 2 artykułu przedstawiono analizę mechanizmu rozdrabniania ziaren w komorze mielenia młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego. Badania przeprowadzono na laboratoryjnym stanowisku młyna służącym do drobnego mielenia materiałów ziarnistych. Eksperyment obejmował mielenie wybranej klasy ziarnowej kamienia wapiennego dla optymalnych warunków pracy młyna. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że rozdrabnianie ziaren zachodzi w trzech strefach w wyniku powierzchniowego ścierania, gwałtownego rozbijania oraz rozdzielania aglomeratów ziarnowych. Intensywność poszczególnych procesów zależy od wielu czynników, między innymi: energii powietrza fluidyzującego, masy substancji tworzącej warstwę, sposobu zderzeń ziaren, budowy i wytrzymałości pojedynczych ziaren (monokryształy, polikryształy, aglomeraty).

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SELECTED PARAMETERS PROCESS ON THE PERFORMANCE OF FLUIDIZED BED
OPPOSED JET MILL.
PART III. COMMINUTION MECHANISM OF GRAINS

Key words

Grinding, fluidization, mechanism of comminution, fluidized bed opposed jet mill, limestone

Abstract

The necessity of applying materials with high degree of fineness in many industrial branches requires using modern technology in mechanical processing, which will assure demanded particle size distribution of product and should decrease of consumption energy. The industrial grinding devices, which work in the high-energetic fluidized bed conditions are the perspective resolution. Comminution of granular material relies on keeping up a turbulent fluidization in the grinding chamber of the fluidized bed opposed jet mill, which is a result of collisions source of air counter-fluxes. The state of pulsatory fluidization is created in the lower zone of the fluidized bed, where take place intensive mixing and comminution of grains by gas bubbles and grain agglomerates. The state of fountain fluidization is created in the upper zone of the fluidized bed, which is characterized by carryover of grains in the zone of high velocities in the centre core of grinding chamber, then by gravitational falling of coarse grains near walls and by carrying away of the small grains by the flowing gas into the separation system. Occurrence of collision source of air counter-flux and turbulent fluidization state in the grinding chamber makes it possible to obtain high-energetic fluidization layer. This layer in turn ensures an effective comminution of tested granular material. However basis of the comminution mechanism of grains in the fluidized bed opposed jet mills aren't satisfactory explained. It results from the difficulties to determine the influence of all parameters process on the evolution of particle size distribution of milling product. The theoretical analysis of the comminution mechanism of grains in the grinding chamber of the fluidized bed opposed jet mill are presented in the part 2 of article. The researches were performed on a laboratory mill, which is designed for fine grinding of granular materials. The experiment contained grinding of selected narrow size fractions of limestone for optimum operating conditions of the fluidized bed opposed jet mill. The analysis showed that comminution in the mill takes place in three zones as a result of superficial attrition of grains, dynamic breakage of grains and cleavage of grain agglomerates. Intensification of individual processes depends on many parameters, e.g.: fluidized air energy, mass of materials creating the layer, the way of grain collisions, structure and resistance of grains (mono-crystals, poly-crystals, agglomerated).