

DANIEL ZBRONSKI*, ALEKSANDRA GÓRECKA-ZBRONSKA*

Analiza oddziaływania wybranych parametrów procesu na osiągi młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego. Część II: Skład ziarnowy produktu mielenia

Słowa kluczowe

Mielenie, fluidyzacja, młyn strumieniowo-fluidyzacyjny, skład ziarnowy, kamień wapienny

Streszczenie

W artykule przedstawiono dalsze wyniki z badań rozdrabniania wybranych klas ziarnowych kamienia wapiennego w warunkach burzliwej warstwy fluidalnej młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego. Celem badań zawartych w części II artykułu było ustalenie wpływu istotnych parametrów procesu, takich jak: początkowa masa zasypowa i uziarnienie nadawy dostarczonej do komory mielenia młyna oraz wartości nadciśnienia powietrza roboczego, prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora przepływowego i czasu trwania mielenia na uzyskany skład ziarnowy produktu. Otrzymane wyniki umożliwiły ocenę jakości i skuteczności przeprowadzonych prób mielenia.

Wprowadzenie

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. Perspektywnym rozwiązaniem wydają się technologie

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

realizujące przeróbkę materiałów ziarnistych w warunkach wysokoenergetycznej warstwy fluidalnej (Vogel 1991; Korzeń i Rink 1999). 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, a w górnej – stan fluidyzacji fontannowej. Taki rozkład stref fluidyzacji umożliwia efektywne rozdrabnianie materiału ziarnistego (Korzeń i in. 1997; Zbroński 2005). Choć młyny strumieniowo-fluidyzacyjne stosowane są w różnych gałęziach przemysłu od wielu lat, to jednak projektowanie i optymalizacja tego typu urządzeń w dużej mierze oparta jest ciągle na złożonych badaniach eksperymentalnych (Benz i in. 1996; Rink i Konieczny 1997; Korzeń i in. 1997–1999; Berthiaux i Dodds 1999; Hogg 1999; Tasirin i Geldart 1999; Wang i in. 1999; Godet-Morand i in. 2002; Zhang i in. 2003; Zbroński i in. 2005–2006). Głównym celem prowadzonych prac jest optymalizacja procesu rozdrabniania i klasyfikacji oraz ustalenie wpływu istotnych parametrów na uzyskany produkt mielenia. W porównaniu do innych typów urządzeń rozdrabniających młyny te wykazują następujące korzyści: wysoki stopień rozdrobnienia, małe zużycie energii, niski poziom hałasu, znikome zużycie materiałów i niewielkie gabaryty urządzenia (Vogel 1991).

1. Cel, zakres i metodyka badań

Celem badań było ustalenie wpływu istotnych parametrów procesu na uzyskany skład ziarnowy produktu mielenia strumieniowo-fluidalnego. W szczególności dotyczyło to określenia oddziaływania na produkt końcowy takich parametrów, jak: początkowe uziarnienie nadawy, początkowa masa zasypowa nadawy, nadciśnienie powietrza roboczego, prędkość obrotowa wirnika klasyfikatora przepływowego i czas trwania mielenia.

Stanowisko badawcze i metodykę badań omówiono szczegółowo w części I artykułu dotyczącej badania wydajności młyna.

2. Wyniki badań

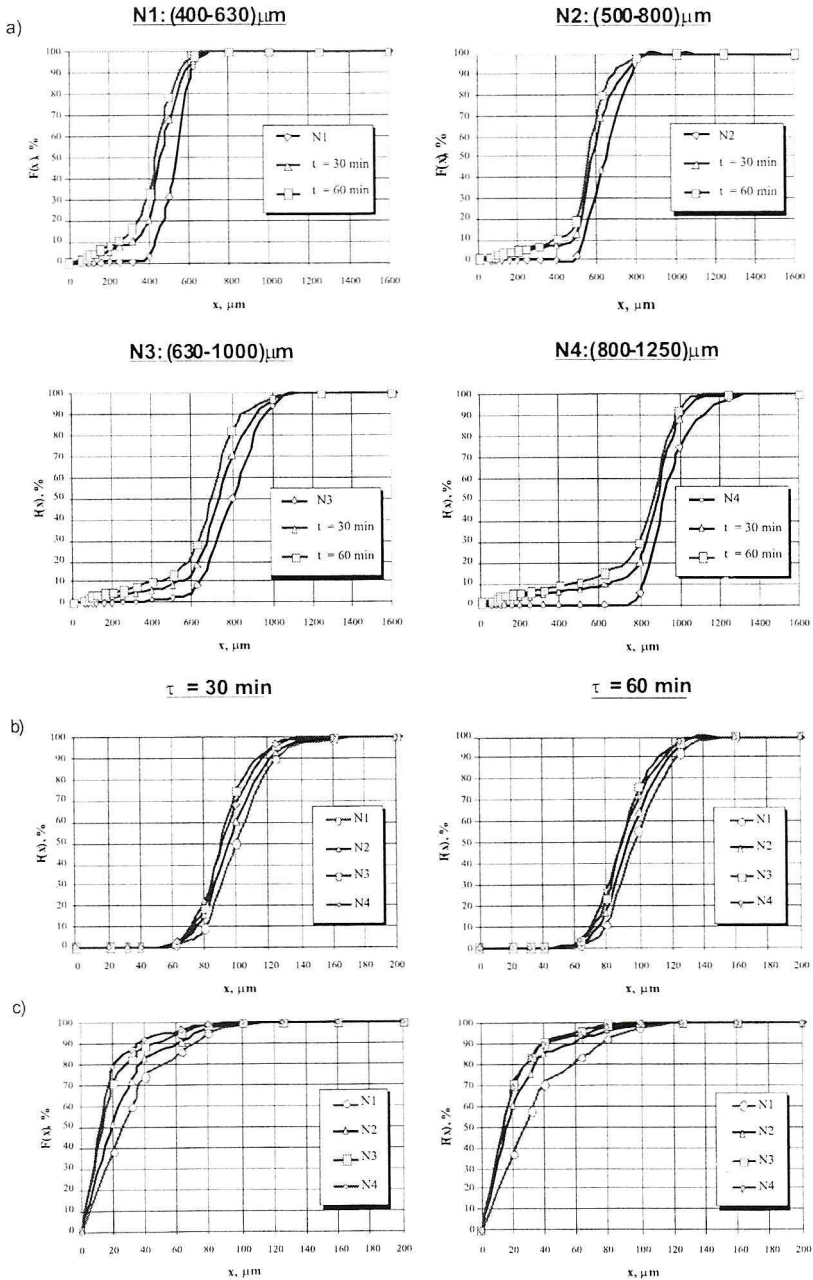
Dla wszystkich badanych próbek nadawy przeprowadzono po dwie próby mielenia, określając za każdym razem uziarnienie pozostałości w komorze mielenia oraz produktu z cyklonu i z filtra. Na rysunkach 1–4 przedstawiono wykresy dotyczące dystrybuanty składu ziarnowego $F(x)$, której prawdopodobieństwo ustalono na zasadzie pomiaru mas badanych klas ziarnowych kamienia wapiennego, uzyskane po czasie mielenia $\tau = 30$ min i 60 min. Na ich podstawie stwierdzono, że czas trwania próby mielenia kamienia wapiennego wpływa głównie na uziarnienie pozostałości w komorze młyna. Badane klasy ziarnowe nadawy podlegały skutecznej przeróbce w młynie, przy czym proces rozdrabniania intensywniej przebiegał w pierwszym okresie mielenia ($\tau = 0$ –30 min) niż w drugim ($\tau = 30$ –60 min).

2.1. Wpływ początkowego uziarnienia nadawy na skład ziarnowy produktu

Podczas próby mielenia zachowano stałą wartość następujących parametrów procesu: początkowa masa nadawy $m_n = 3000$ g, nadciśnienie powietrza roboczego $p_n = 350$ kPa i prędkość obrotowa wirnika klasyfikatora $n = 6000$ 1/min. Wzrost początkowego uziarnienia nadawy doprowadzonej do młyna wpłynął na uziarnienie pozostałości w komorze mielenia. Stwierdzono blisko 10 % udział ziaren o rozmiarach poniżej $200 \mu\text{m}$ i wyraźne zwiększenie udziału masowego ziaren o rozmiarach w zakresie: dla nadawy N1 – $(200\text{--}500) \mu\text{m}$, dla nadawy N2 – $(200\text{--}630) \mu\text{m}$, dla nadawy N3 – $(200\text{--}800) \mu\text{m}$ i dla nadawy N4 – $(200\text{--}1000) \mu\text{m}$ (rys. 1a). Wzrost początkowego uziarnienia nadawy wpłynął także na zmianę udziału masowego ziaren poniżej $100 \mu\text{m}$ w produkcie wytrąconym w cyklonie. W przypadku nadawy N1 produkt I zawierał około 50 % ziaren o rozmiarze większym od $100 \mu\text{m}$. Produkt taki nie spełnił wymagań dotyczących żądanego uziarnienia ($d < 100 \mu\text{m}$), dlatego też ziarna te powinny zostać skierowane powtórnie do komory mielenia w celu dalszego rozdrabniania (rys. 1b). Wzrost początkowego uziarnienia nadawy wpłynął natomiast wyraźnie na zmianę udziału masowego szczególnie ziaren poniżej $40 \mu\text{m}$ zatrzymanych w filtrze. Dla nadawy N1 stanowił on $(70\text{--}72)\%$ całego produktu II, dla nadawy N2 – $(81\text{--}85)\%$, dla nadawy N3 – $(89\text{--}90)\%$, zaś dla nadawy N4 – $(90\text{--}92)\%$ (rys. 1c). Dążenie do uzyskania drobniejszego produktu mielenia wiąże się tylko pośrednio z początkowym uziarnieniem nadawy dostarczonej do młyna, bardziej bowiem zależy od takich parametrów procesu, jak nadciśnienie powietrza roboczego i prędkość obrotowa wirnika klasyfikatora. Niemniej, stosowanie materiałów o uziarnieniu mniejszym od $400 \mu\text{m}$ wydaje się być nieuzasadnione przemysłowo, ponieważ uzyskanie oczekiwanego produktu końcowego wymagać będzie dużych nakładów energii koniecznej do efektywnego przemiału oraz dużych wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora.

2.2. Wpływ początkowej masy zasypowej nadawy na skład ziarnowy produktu

Podczas próby mielenia zachowano stałą wartość następujących parametrów procesu: początkowe uziarnienie nadawy N3: $(630\text{--}1000) \mu\text{m}$, nadciśnienie powietrza roboczego $p_n = 350$ kPa i prędkość obrotowa wirnika klasyfikatora $n = 6000$ 1/min. Wzrost początkowej masy zasypowej nadawy doprowadzonej do komory mielenia spowodował spadek intensywności rozdrabniania kamienia wapiennego w młynie. Dowodzi tego uzyskanie w komorze mielenia produktu zawierającego więcej ziaren grubych. Szczególnie widoczne to jest w przypadku przejścia z początkowej masy nadawy $m_n = 3000$ g do masy $m_n = 4500$ g (rys. 2a). Wynika to ze zmniejszenia burzliwości warstwy fluidalnej, podyktowanej wzrostem masy nadawy w tej samej objętości komory mielenia oraz spadkiem liczby wzajemnych oddziaływań ziaren w warstwie. Wzrost początkowej masy nadawy spowodował nieznaczne zmiany w uziarnieniu produktu mielenia I – wytrąconego w cyklonie oraz



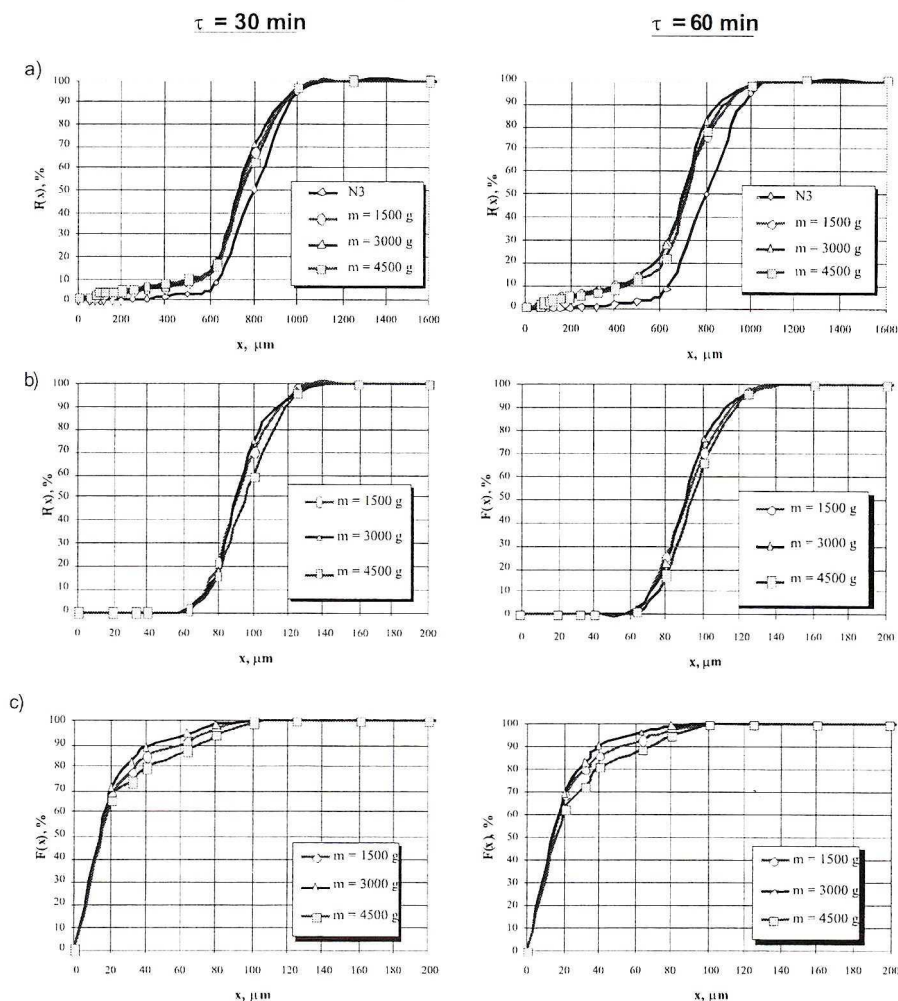
Rys. 1. Skład ziarnowy produktu otrzymany przy zmianie początkowego uziarnienia nadawy kamienia wapiennego po czasie mielenia $\tau = 30 \text{ min}$ i $\tau = 60 \text{ min}$:

a) pozostałość w komorze mielenia, b) produkt I (cyklon), c) produkt II (filtr)

Fig. 1. The particle size distribution of product obtained during changes the initial fed grinding of limestone after duration of milling $\tau = 30 \text{ min}$ and $\tau = 60 \text{ min}$:

a) remnant in grinding chamber, b) product I (cyclone), c) product II (filter)

produktu mielenia II – zatrzymanego w filtrze. Wytrącone w cyklonie ziarna o rozmiarach poniżej $100\ \mu\text{m}$ stanowiły: dla masy nadawy $m_n = 1500\ \text{g}$ – (45–50)% całego produktu I, dla masy nadawy $m_n = 3000\ \text{g}$ – (52–56)%, zaś dla masy nadawy $m_n = 4500\ \text{g}$ – (42–48)% (rys. 2b). Zatrzymane w filtrze ziarna o rozmiarach poniżej $40\ \mu\text{m}$ stanowiły: dla masy nadawy $m_n = 1500\ \text{g}$ – (85–87)% całego produktu II, dla masy nadawy $m_n = 3000\ \text{g}$ – (89–91)%, zaś dla masy nadawy $m_n = 4500\ \text{g}$ – (80–81)% (rys. 2c). Produkt zatrzymany w filtrze mieścił się w zakresie żądanego uziarnienia.



Rys. 2. Skład ziarnowy produktu otrzymany przy zmianie początkowej masy nadawy kamienia wapiennego po czasie mielenia $\tau = 30\ \text{min}$ i $\tau = 60\ \text{min}$:

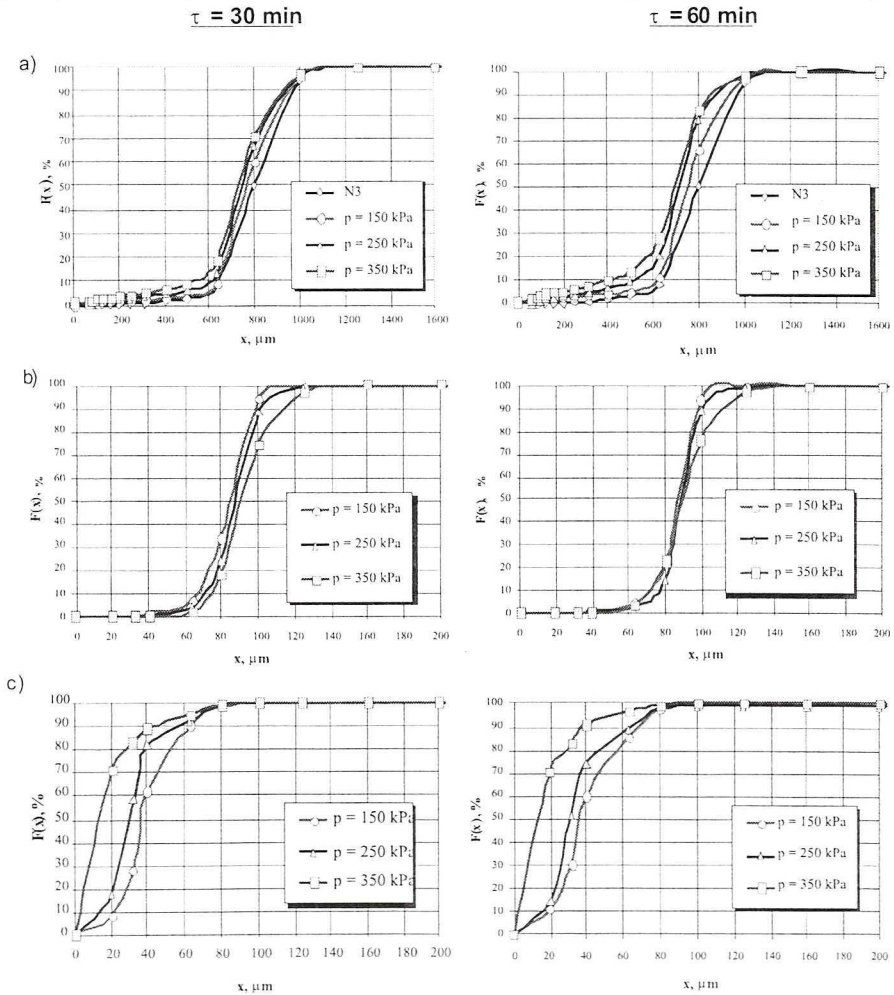
a) pozostałość w komorze mielenia, b) produkt I (cyklon), c) produkt II (filtr)

Fig. 2. The particle size distribution of product obtained during changes the initial fed mass of limestone after duration of milling $\tau = 30\ \text{min}$ and $\tau = 60\ \text{min}$:

a) remnant in grinding chamber, b) product I (cyclone), c) product II (filter)

2.3. Wpływ nadciśnienia powietrza roboczego na skład ziarnowy produktu

Podczas próby mielenia zachowano stałą wartość następujących parametrów procesu: początkowe uziarnienie nadawy N3 – (630–1000) μm , początkowa masa nadawy $m_n = 3000$ g i prędkość obrotowa wirnika klasyfikatora $n = 6000$ 1/min. Wzrost nadciśnienia powietrza roboczego doprowadzonego do komory mielenia spowodował zwiększenie intensywności wzajemnych oddziaływań ziaren w warstwie. Świadczy o tym uzyskanie w kolejnych



Rys. 3. Skład ziarnowy produktu otrzymany przy zmianie nadciśnienia powietrza roboczego po czasie mielenia $\tau = 30$ min i $\tau = 60$ min:

a) pozostałość w komorze mielenia, b) produkt I (cyklon), c) produkt II (filtr)

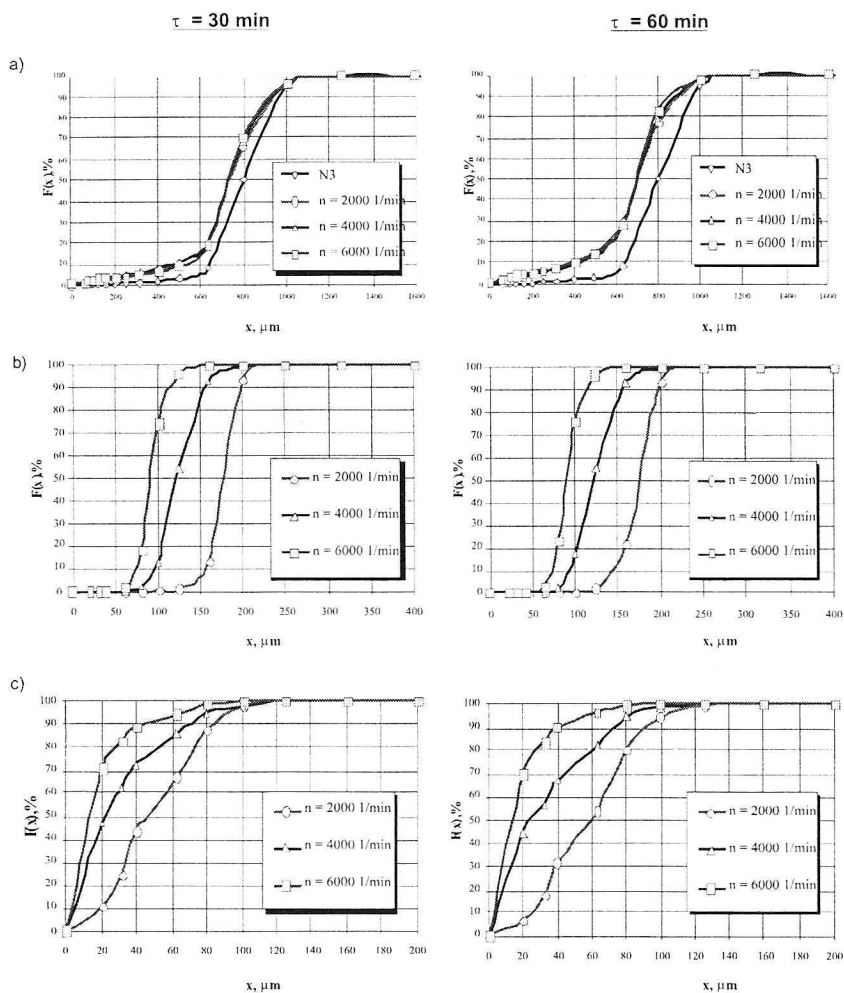
Fig. 3. The particle size distribution of product obtained during changes the overpressure of working air after duration of milling $\tau = 30$ min and $\tau = 60$ min:

a) remnant in grinding chamber, b) product I (cyclone), c) product II (filter)

próbach produktu bardziej rozdrobnionego oraz wzrost udziału masowego ziaren o rozmiarach z zakresu 200–800 μm w produkcie pozostałym w komorze mielenia (rys. 3a). Wzrost nadciśnienia powietrza roboczego spowodował jednak wzrost udziału masowego ziaren o rozmiarach powyżej 100 μm w produkcie I – wytraconym w cyklonie. Zatrzymane ziarna poniżej 100 μm stanowiły: dla nadciśnienia $p_n = 150 \text{ kPa}$ – (94–96)% całego produktu I, dla nadciśnienia $p_n = 250 \text{ kPa}$ – (89–90)%, zaś dla nadciśnienia $p_n = 350 \text{ kPa}$ tylko (74–78)% (rys. 3b). Wzrost nadciśnienia powietrza roboczego spowodował wzrost udziału masowego ziaren o rozmiarach poniżej 40 μm w produkcie II – wychwyconym w filtrze. Zatrzymane ziarna poniżej 40 μm stanowiły: dla nadciśnienia $p_n = 150 \text{ kPa}$ – (60–62)% całego produktu II, dla nadciśnienia $p_n = 250 \text{ kPa}$ – (73–81)%, zaś dla nadciśnienia $p_n = 350 \text{ kPa}$ – (89–91)% (rys. 3c). Produkt zatrzymany w filtrze mieścił się w zakresie żądanego uziarnienia.

2.4. Wpływ prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora na skład ziarnowy produktu

Podczas próby mielenia zachowano stałą wartość następujących parametrów procesu: początkowe uziarnienie nadawy N3 – (630–1000) μm , początkowa masa nadawy $m_n = 3000 \text{ g}$ i nadciśnienie powietrza roboczego $p_n = 350 \text{ kPa}$. Wzrost wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora przepływowego spowodował wyraźne różnice w uziarnieniu produktu mielenia. Niezależnie od przyjętej wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora zaobserwowano zwiększenie udziału masowego ziaren o rozmiarach poniżej 1000 μm w produkcie pozostałym w komorze mielenia. Największemu rozdrobnieniu uległy ziarna nadawy o rozmiarach z zakresu 1000–1250 μm , które w trakcie trwania procesu przechodziły do sąsiednich klas ziarnowych, głównie zasilając klasę 500–800 μm (rys. 4a). Wzrost wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora spowodował, że komorę opuszczał coraz drobniejszy produkt mielenia. Zaobserwowano zdecydowany wzrost udziału masowego ziaren poniżej 100 μm w produkcie mielenia I – wytraconym w cyklonie, oraz wzrost udziału masowego ziaren poniżej 40 μm w produkcie mielenia II – zatrzymanym w filtrze. Jednakże otrzymane produkty I i II nie mieściły się w zakresie żądanego uziarnienia poniżej 100 μm . Wytracone w cyklonie ziarna poniżej 100 μm stanowiły: dla prędkości obrotowej $n = 6000 \text{ 1/min}$ – (74–78)% całego produktu I, dla prędkości obrotowej $n = 4000 \text{ 1/min}$ – (12–18)%, zaś dla prędkości obrotowej $n = 2000 \text{ 1/min}$ – nie występowały (rys. 4b). Obecność w produkcie I nadziarna o rozmiarze większym niż 100 μm dyskwalifikuje taki produkt z punktu widzenia zastosowanej technologii przerobczej, dlatego też konieczny jest zawrót tych ziaren z powrotem do komory mielenia, w celu ich dalszego rozdrobnienia. Uzyskanie ziaren poniżej 40 μm możliwe było już dla wartości prędkości obrotowej $n = 2000 \text{ 1/min}$ i stanowiło 32–44% całego produktu II, dla prędkości obrotowej $n = 4000 \text{ 1/min}$ – (68–72)%, zaś dla prędkości obrotowej $n = 6000 \text{ 1/min}$ aż (89–91)% (rys. 4c). Dalsze zwiększanie wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora przepływowego z pewnością spowoduje uzyskanie jeszcze drobniejszego produktu mielenia, jednakże obniży to wyraźnie wydajność młyna i zwiększy energochłonność procesu rozdrabniania strumieniowo-fluidalnego.



Rys. 4. Skład ziarnowy produktu otrzymany przy zmianie prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora po czasie mielenia $\tau = 30$ min i $\tau = 60$ min:

a) pozostałość w komorze mielenia, b) produkt I (cyklon), c) produkt II (filtr)

Fig. 4. The particle size distribution of product obtained during changes the rotational speed of classifier rotor after duration of milling $\tau = 30$ min and $\tau = 60$ min:

a) remnant in grinding chamber, b) product I (cyclone), c) product II (filter)

Wnioski

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- I. Możliwa jest skuteczna realizacja procesu rozdrabniania kamienia wapiennego w młynie strumieniowo-fluidyzacyjnym, w wyniku której otrzymuje się produkt o uziarnieniu gwarantującym obecność w filtrze ponad 90 % ziaren o rozmiarach poniżej 40 μm .

2. Zastosowany w badaniach kamień wapienny charakteryzuje się dużą podatnością na rozdrabnianie. Badane nadawy podlegały skutecznej przeróbce w młynie, przy czym proces rozdrabniania poszczególnych próbek przebiegał intensywniej w pierwszym okresie mielenia $\tau_1 = 0-30$ min, niż w drugim $\tau_2 = 30-60$ min.
3. Wzrost wartości początkowego uziarnienia nadawy kamienia wapiennego doprowadzonej do młyna dla przyjętych parametrów procesu wywołuje:
 - w komorze mielenia – uzyskiwanie produktu zawierającego więcej ziaren grubych,
 - w cyklonie – wzrost udziału masowego ziaren o rozmiarach poniżej 100 μm ,
 - w filtrze – wzrost udziału masowego ziaren o rozmiarach poniżej 40 μm .
4. Wzrost wartości początkowej masy nadawy kamienia wapiennego doprowadzonej do młyna dla przyjętych parametrów procesu wywołuje:
 - w komorze mielenia – uzyskiwanie produktu zawierającego więcej ziaren grubych,
 - w cyklonie – spadek udziału masowego ziaren o rozmiarach poniżej 100 μm ,
 - w filtrze – spadek udziału masowego ziaren o rozmiarach poniżej 40 μm .
5. Wzrost energii dostarczanej do nadawy, wynikający ze zwiększenia wartości nadciśnienia powietrza roboczego, powoduje dla przyjętych parametrów procesu intensyfikację procesu rozdrabniania wywołując:
 - w komorze mielenia – zwiększenie udziału masowego ziaren o rozmiarach w zakresie 200–800 μm ,
 - w cyklonie – spadek udziału masowego ziaren o rozmiarach poniżej 100 μm ,
 - w filtrze – wzrost udziału masowego ziaren o rozmiarach poniżej 40 μm .
6. Wzrost wartości prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora dla przyjętych parametrów procesu wywołuje:
 - w komorze mielenia – zwiększenie udziału masowego ziaren o rozmiarach w zakresie 500–800 μm oraz uzyskiwanie produktu drobniejszego,
 - w cyklonie – wyraźny wzrost udziału masowego ziaren o rozmiarach poniżej 100 μm ,
 - w filtrze – wyraźny wzrost udziału masowego ziaren o rozmiarach poniżej 40 μm .

LITERATURA

- Benz M., Herold H., Ulfik B., 1996 – Performance of a fluidized bed jet mill as a function of operating parameters. *International Journal of Mineral Processing* vol. 44–45, 507–519.
- 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 Technology* vol. 106, 78–97.
- Godet-Morand L., Chamayou A., Dodds J., 2002 – Talc grinding in an opposed air jet mill: tart-up, product quality and production rate optimization. *Powder Technology* vol. 128, 306–313.
- Hogg R., 1999 – Breakage mechanisms and mill performance in ultrafine grinding. *Powder Technology* vol. 105, 135–140.
- Korzeń Z., Rink R., 1999 – Powietrzno-strumieniowe technologie mikronizacji ciał twardych – tendencje rozwojowe i propozycje nowych wdrożeń. *Mechanika* t. 18, z. 11, 49–65.
- Korzeń Z., Rink R., Konieczny A., 1997 – Problemy syntezy konstrukcyjnej i badań młynów powietrzno-fluidalnych. *ZN Politechniki Łódzkiej, Seria: Inżynieria Chemiczna* nr 780, z. 22, 141–150.

- Rink R., Konieczny A., 1997 – Niektóre wyniki badań procesu mielenia w młynie powietrzno-fluidalnym. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 13, 369–378.
- Tasirin S.M., Geldart D., 1999 – Experimental investigation on fluidized bed jet grinding. *Powder Technology* vol. 105, 337–341.
- Vogel A., 1991 – The Alpine fluidized bed opposed jet mill – a case history. *Powder Handling & Processing* vol. 3, nr 2, 129–134.
- Wang H., Ikeda T., Fukuda K., Yoshio M., 1999 – Effect of milling on the electrochemical performance of natural graphite as an anode material of lithium-ion battery. *Journal of Power Sources* vol. 83, 141–147.
- Zbroński D., 2005 – Badanie i modelowanie procesu strumieniowo-fluidalnego rozdrabniania materiałów ziarnistych. Praca doktorska, Politechnika Częstochowska.
- Zbroński D., Górecka-Zbrońska A., 2006 – Wpływ prędkości obrotowej wirnika klasyfikatora przepływowego na osiągi młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego. *Uczelniane Wyd. Naukowo-Dydaktyczne AGH, Górnictwo i Geoinżynieria* rok 30, z. 3/1, 365–373.
- Zbroński D., Górecka-Zbrońska A., Otwinowski H., Urbaniak D., 2005 – Research of limestone particles comminution in the fluidized bed opposed jet mill. *Powder Handling & Processing* vol. 17, nr 1, 32–39.
- Zbroński D., Otwinowski H., 2006 – Badanie wydajności młyna strumieniowo-fluidyzacyjnego. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* vol. 45, no 4s, 158–160.
- Zhang K., Zhang J., Zhang B., 2003 – Experimental and numerical study of fluid dynamic parameters in a jetting fluidized bed of a binary mixture. *Powder Technology* vol. 132, 30–38.

DANIEL ZBRŃSKI, ALEKSANDRA GÓRCKA-ZBRŃSKA

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SELECTED PARAMETERS PROCESS ON THE PERFORMANCE
OF FLUIDIZED BED OPPOSED JET MILL.
PART II: PARTICLE SIZE DISTRIBUTION OF GRINDING PRODUCT**

Key words

Grinding, fluidization, fluidized bed opposed jet mill, particle size distribution, limestone

Abstract

The experimental results for the fluidized jet grinding of granular materials are presented in the paper. The researches were performed on a laboratory fluidized bed opposed jet mill. The experiment contained grinding tests of selected narrow size fractions of limestone in turbulent fluidized layer conditions. The aim of researches, content in part II article was to explain the influence of selected parameters process: the initial grinding and the fed mass in the mill, the values of working air overpressure, the rotational speed of flow classifier rotor and duration of grinding test on the particle size distribution of grinding product. The determined particle size distribution of grinding products make it possible to estimate the quality and the efficiency of the carried out fluidized jet grinding tests.