

Mikronizacja materiałów kruchych metodą hydrostrumieniową

Micronization of brittle materials with hydro-jetting method

PRZEMYSŁAW BORKOWSKI
JÓZEF BORKOWSKI
MICHAŁ BIELECKI*

Potrzeba przetwarzania różnych kopalin narzuca konieczność ich głębokiego rozdrabniania, zwanego mikronizacją. Do takiego rozdrabniania surowców mineralnych, mających zwykle cechy materiałów kruchych, zastosowano wysokociśnieniową strugę wodną. Skonstruowano prototyp pionowego młyna hydrostrumieniowego, w którym rozdrabniano zróżnicowane rodzaje materiałów kruchych. Uzyskano korzystną wydajność mikronizacji materiałów z energochłonnością od kilku do dwudziestu kilku razy mniejszą niż podczas rozdrabniania mechanicznego, np. w młynie planetarno-kulowym.

SŁOWA KLUCZOWE: mikronizacja, materiały kruche, wysokociśnieniowa struga wodna, metoda hydrostrumieniowa, młyn hydrostrumieniowy.

The need of different minerals processing forces the necessity of their deep comminution which is called micronization. A high-pressure water jet have been used for such materials comminution which are usually of brittle characteristic. A special hydro-jetting mill prototype of vertical construction have been developed in order to comminute different types of brittle materials. As a consequence one can achieve favorable efficiency of micronization with the energy intensity range from a few up to over twenty times lower then for mechanical processing, e.g. in planetary-ball mill.

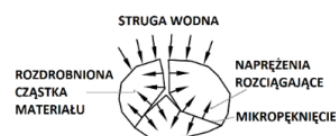
KEYWORDS: micronization, brittle materials, high-pressure water jet, hydro-jetting method, hydro-jetting mill

Istota hydrostrumieniowej metody rozdrabniania materiałów

Procesy rozdrabniania znajdują szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach przetwórstwa rozmaitych surowców i materiałów, z których coraz częściej wytwarzane są proszki

i mikroproszki. Niekiedy w trakcie przetwarzania różnych kopalin występuje także potrzeba ich głębokiego rozdrobnienia, zwanego mikronizacją. Mikronizację materiałów wykorzystuje się w celu uszlachetniania proszków mineralnych podlegających uregulowanemu rozdrabnianiu, w trakcie którego zostają rozdrobnione ziarna posiadające defekty naturalne lub powstałe w momencie urabiania [7, 10]. Zabiegi takie przeprowadza się również w celu zwiększania powierzchni właściwej materiału i są one jednymi z najbardziej energochłonnych procesów technologicznych [6].

W procesach rozdrabniania znajdujących zastosowanie w różnych dziedzinach przetwórstwa surowców mineralnych i energetycznych, szczególnego znaczenia nabierają technologie mikronizacji przy użyciu metody hydrostrumieniowej. Mechanizmy dezintegracji cząstek materiałów kruchych występujące podczas ich hydrostrumieniowego rozdrabniania są bardzo złożone. Występuje tu w zasadzie kilka mechanizmów, które działają ze sobą w sposób powiązany tworząc jeden skomplikowany system efektywnego rozdrabniania materiałów [11]. Stopień rozkruszenia cząstki podczas kontaktu z twardą powierzchnią zależy od jej wielkości, orientacji krystalicznej i wytrzymałości materiału a zwłaszcza jej prędkości decydującej o energii kinetycznej. Im większa jest energia kinetyczna cząstki podczas jej kolizji z twardym materiałem, tym wyższy wywołuje wzrost naprężeń wewnętrznych intensyfikujących jej kruche pękanie [12].



Rys. 1. Schemat mechanizmu rozpadu cząstki materiału kruchego pod naporem klina hydraulicznego

Jeden z głównych mechanizmów dezintegracji cząstki podczas mikronizacji hydrostrumieniowej materiału występuje wówczas, kiedy w obszarze jej kolizji ze strugą wody jest dostatecznie wysokie ciśnienie, by rozwinąć w nim

prof. dr hab. inż. Przemysław Borkowski (pborkowski@cuprum.wroc.pl)
prof. dr hab. inż. Józef Borkowski (jozef.borkowski@tu.koszalin.pl),
dr inż. Michał Bielecki (michal.bielecki@tu.koszalin.pl)

siatkę pęknięć [3], jak to schematycznie przedstawiono na rys. 1. Pod naporem nieściśliwego klina wodnego pęknięcia te rozprzestrzeniają się w materiale kruchym stosunkowo łatwo. Proces dezintegracji takiego materiału postępuje wzdłuż szczelin i mikroszczelin, które najczęściej rozwijają się na granicy ziaren. Zjawiska te przebiegają stosunkowo intensywnie ze względu na to, że są one generowane przez naprężenia rozciągające, na które materiały kruche są znacznie mniej odporne [1].

Urządzenia technologiczne i metodyka badań

Po przeanalizowaniu kilku amerykańskich [8, 9] i chińskich [4, 5] rozwiązań konstrukcyjnych młynów hydrostrumieniowych przeprowadzono wielokryterialne badania rozpoznawcze młyna amerykańskiego. Wynika z nich, że wydajność dezintegracji różnych materiałów w takim młynie wynosi $8 \div 30$ g/s [1]. W takim młynie dezintegracja materiału następuje wskutek gwałtownego udaru, wywołanego dużą prędkością liniową cząstek oraz pod wpływem intensywnej penetracji strugą wody powstających szczelin każdej rozkruszającej się cząstki. Korzystając ze zdobytego doświadczenia przeprowadzono modelowe symulacje funkcjonowania zasadniczych zespołów takiego młyna, w których wyniku wybrano konstrukcję o układzie pionowym ze względu na najbardziej korzystną charakterystykę pracy. Dzięki temu opracowano i zbudowano własny prototyp analogicznego młyna pionowego. Prototyp takiego młyna wraz z wysokociśnieniowym hydromonitorem, zbudowanym na bazie pompy typu Hammelmann HDP 164, wchodzi w skład stanowiska badawczego przedstawionego na rys. 2.



Rys. 2. Widok ogólny stanowiska badawczego do rozdrabniania materiałów

Taki zestaw urządzeń technologicznych zapewnia możliwość rozdrabniania materiałów w zakresie ciśnień $50 \div 300$ MPa przy zmiennym wydatku wody w zakresie $0,2 \div 0,5$ dm³/s. W urządzeniu tym można rozdrabniać kruszywo badanego materiału o ziarnistości do 2 mm z wydajnością, wynoszącą dla różnych materiałów od 8 do 53 g/s [2].

Obecne badania rozdrabniania materiałów przeprowadzono przy następujących stałych parametrach procesu:

- średnica dyszy wodnej $d_w = 0,7$ mm,
- rodzaj i średnica dyszy rozdrabniająco-homogenizującej typu RI2-1: $d_h = 2,4$ mm,
- odległość wylotu dyszy homogenizacyjnej od tarczy rozdrabniającej: $s = 10$ mm,
- opcjonalnie stosowano także przedłużenie dyszy rozdrabniająco-homogenizującej $l = 200$ mm.

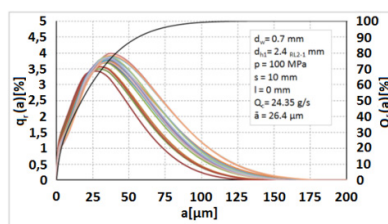
Badania nad efektywnością hydrostrumieniowego rozdrabniania nadawy o ziarnistości do 2 mm, przeprowadzono dla następujących materiałów:

- węgiel kamienny, zawiera głównie: 75-95% czystego węgla, 2,5-5,5% wodoru, 2,5-18% tlenu,
- magnezyt: skład chemiczny $MgCO_3$, gęstość $2,9-3,1$ Mg/m³, twardość 4-4,5 wg skali Mohsa,
- baryt: skład chemiczny $BaSO_4$, gęstość $4,3-4,6$ Mg/m³, twardość 3-3,5 wg skali Mohsa,
- mikro kulki szklane: gęstość $2,5$ Mg/m³, twardość 5-7 wg skali Mohsa,
- piasek kwarcowy: skład chemiczny SiO_2 , gęstość $2,6$ Mg/m³, twardość 7 wg skali Mohsa.

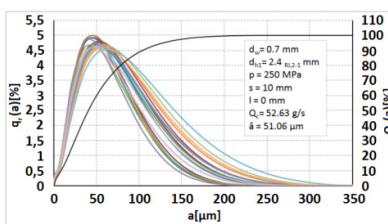
Do pomiaru efektów rozdrobnienia badanych materiałów używano laserowego miernika wielkości cząstek Analysette 22 MicroTec Plus, wyposażonego w dwa półprzewodnikowe lasery, które umożliwiają analizę i sporządzanie rozkładów wielkości cząstek w zakresie od $0,08 \div 2000$ μ m.

Mikronizacja materiałów kruchych metodą hydrostrumieniową

Zaprezentowane przykładowe wyniki badań mikronizacji hydrostrumieniowej dotyczą: barytu i piasku kwarcowego. Stosunkowo miękkie (3-3,5 Mohsa) baryt charakteryzuje się dobrą tłużliwością w dwóch kierunkach. Jest on podatny na rozdrabnianie w hydrostrumieniowym młynie, szczególnie bez wkładki przedłużającej dyszę rozdrabniająco-homogenizującą już przy ciśnieniu strugi wodnej wynoszącym 100 MPa. Wymiar tak rozdrobnionych cząstek wynosi $\bar{a} = 26,4$ μ m (rys. 3). Odpowiednio dla ciśnienia $p = 150$ MPa, średni wymiar rozdrobnionych cząstek wynosi $\bar{a} = 26,0$ μ m, podczas gdy dla ciśnienia strugi 200 MPa, jest on równy $\bar{a} = 22,9$ μ m natomiast dla maksymalnego ciśnienia strugi 250 MPa wymiar tych cząstek wynosi $\bar{a} = 21,55$ μ m.



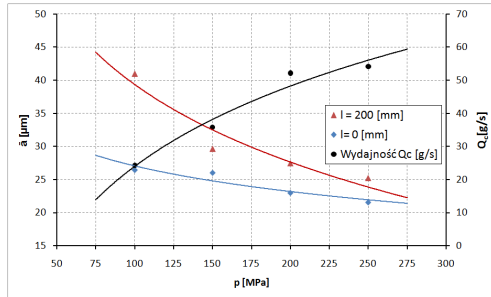
Rys. 3. Rozkład rozdrobnionych cząstek barytu uzyskiwany przy ciśnieniu wody $p = 100$ MPa



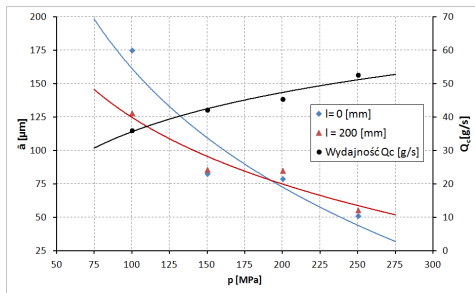
Rys. 4. Rozkład rozdrobnionych cząstek piasku kwarcowego przy ciśnieniu wody $p = 250$ MPa

Dla kontrastu, rozdrabnianie stosunkowo twardego piasku kwarcowego w młynie, bez wkładki przedłużającej dyszę rozdrabniająco-homogenizującą, zapewnia następujące efekty: dla minimalnego ciśnienia strugi wodnej użytego w badaniach (100 MPa), uzyskuje się średni wymiar cząstek równy $\bar{a} = 174,4$ μ m; dla ciśnienia 150 MPa, średni wymiar wynosi $\bar{a} = 82,76$ μ m, zaś dla ciśnienia 200 MPa jest on równy $\bar{a} = 78,9$ μ m, natomiast przy ciśnieniu 250 MPa (rys. 4), wymiar cząstek wynosi $\bar{a} = 51,06$ μ m. Natomiast nieco lepsze, choć raczej mieszane wyniki rozdrabniania tego piasku uzyskuje się przy wykorzystaniu młyna z wkładką przedłużającą dyszę rozdrabniająco-homogenizującą.

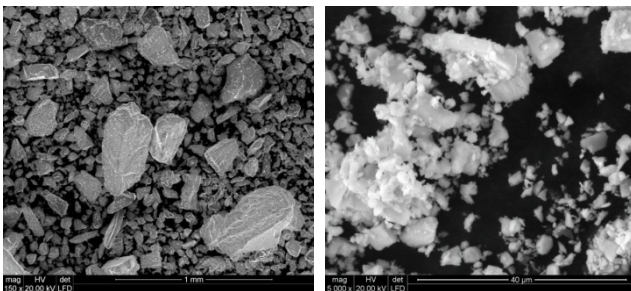
Przyczyny zróżnicowania efektów rozdrabniania tych materiałów o wyraźnie różniących się właściwościach, dają się zauważyć z porównania wykresów ilustrujących wpływ ciśnienia strugi wodnej na końcowe rozdrobnienie i wydajność tego procesu. Tego rodzaju zależności dotyczące barytu ilustrują wykresy zamieszczone na przykładowym rys. 5, natomiast analogiczne wykresy dla piasku kwarcowego przedstawiono na przykładowym rys. 6.



Rys. 5. Wpływ ciśnienia strugi wodnej na skuteczność rozdrabniania barytu i wydajność tego procesu, dla młyna hydrostrumieniowego bez wkładki i z wkładką przedłużającą dyszę rozdrabniająco-homogenizującą

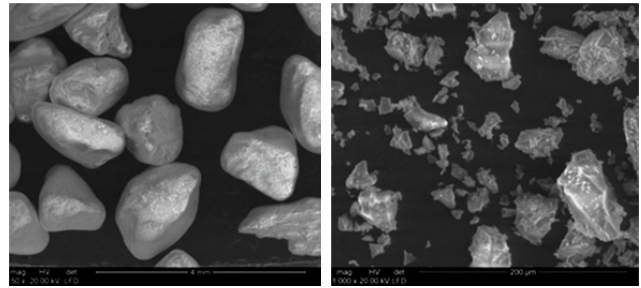


Rys. 6. Wpływ ciśnienia strugi wodnej na skuteczność rozdrabniania piasku kwarcowego i wydajność tego procesu, dla młyna hydrostrumieniowego bez wkładki i z przedłużką dyszy rozdrabniająco-homogenizującej



Rys. 7. Obrazy SEM cząstek barytu przed i po rozdrabnianiu hydrostrumieniowym odznaczające się zupełnie różnym stopniem rozwinięcia ich powierzchni właściwej

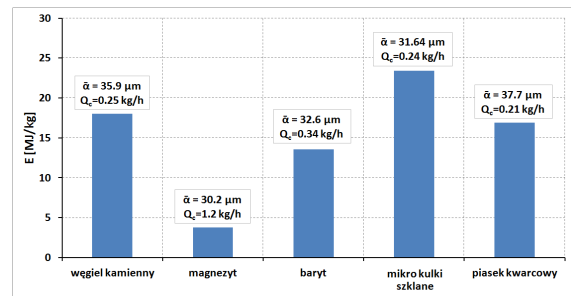
Zróżnicowana jest także morfologia nadawy badanych cząstek, gdyż cząstki barytu, użytego do rozdrabniania hydrostrumieniowego za pomocą wysokociśnieniowej strugi wodnej, mają przeważnie kształt izometryczny o zdecydowanie ostrych krawędziach (rys. 7), natomiast izometryczne ziarna piasku kwarcowego w przeważającej większości to obłe ziarna i pozbawione ostrych krawędzi (rys. 8). Należy przy tym odnotować, że po zabiegu mikronizacji kształty cząstek obydwu, tych zdecydowanie różniących się materiałów są izometryczne i stosunkowo do siebie zbliżone.



Rys. 8. Obrazy SEM ziaren piasku kwarcowego przed i po rozdrabnianiu hydrostrumieniowym, które odznaczają się od siebie zupełnie różną postacią kształtu i stopniem rozwinięcia ich powierzchni właściwej

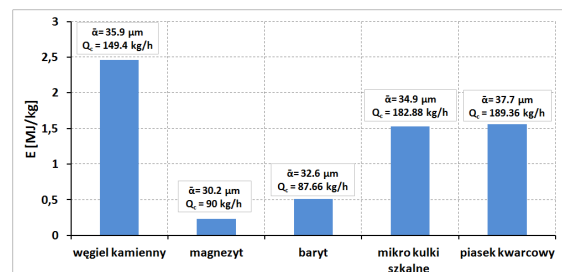
Porównanie energochłonności mikronizacji materiałów różnymi metodami

Za pomocą młyna planetarno-kulowego PM 100, przeprowadzono weryfikacyjne badania mielenia na grupie materiałów: węgiel kamienny, magnezyt, baryt, mikro kulki szklane i piasek kwarcowy. Badania te przeprowadzono w celu określenia energochłonności operacji rozdrabniania w takim urządzeniu oraz jej porównania z energochłonnością rozdrabniania hydrostrumieniowego.



Rys. 9. Kształtowanie się jednostkowej energochłonności rozdrabniania wybranych materiałów przy użyciu młyna planetarno-kulowego PM 100 ($n = 300$ obr./min, kulki $\varnothing 5$ mm -100 sztuk) ze wskazaniem skuteczności ich rozdrabniania oraz wydajności procesu ich mielenia

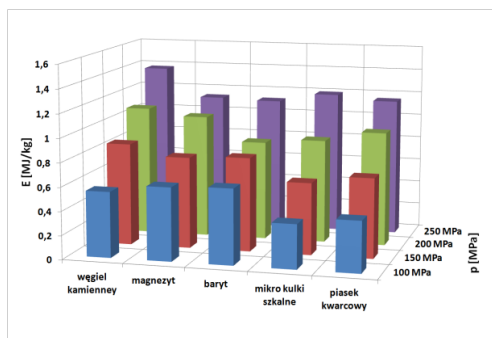
Nawiązując do wyników jednostkowej energochłonności rozdrabniania wybranych materiałów przy użyciu młyna planetarno-kulowego PM 100 (rys. 9), odszukano przykłady analogicznych efektów uzyskanych podczas mielenia takich właśnie materiałów w młynie hydrostrumieniowym. Wyniki takiego rozdrabniania przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Kształtowanie się jednostkowej energochłonności hydrostrumieniowego rozdrabniania wybranych materiałów, ze wskazaniem warunków i skuteczności ich rozdrabniania oraz wydajności procesu ich mielenia

Przeprowadzone analizy umożliwiły również wykonanie analogicznego zestawienia energochłonności rozdrabniania materiałów przebadanych dla wszystkich ciśnień wody (rys. 11). Z danych tych wynika, że dla wszystkich rozdrab-

nianych materiałów, pomiędzy jednostkową energochłonnością procesu ich mikronizacji a ciśnieniem strugi wodnej występują praktycznie proporcjonalne zależności.



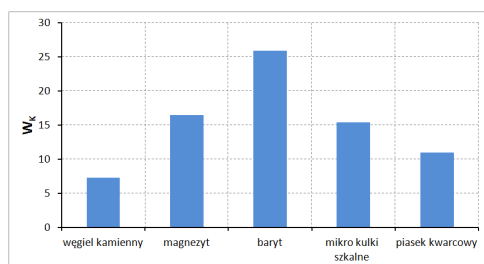
Rys. 11. Zestawienie energochłonności hydrostrumieniowego rozdrabniania nadawy materiałów dla ciśnień strugi wodnej 100-250 MPa

Konfrontując odpowiednio ze sobą wyniki rozdrabniania, przedstawione na wcześniejszych rys. 9 i rys. 10, stwierdzono, że energochłonność hydrostrumieniowego mielenia materiałów kruchych jest na ogół wielokrotnie mniejsza, niż podczas ich mechanicznego rozdrabniania w młynie planetarno-kulowym. Wynikające stąd korzyści określa następujący wskaźnik:

$$W_K = \frac{E_M}{E_H} \quad (1)$$

w którym: E_M - energochłonność rozdrabniania materiału w młynie planetarno-kulowym, E_H - energochłonność rozdrabniania materiału w młynie hydrostrumieniowym.

Określony w ten sposób wskaźnik korzyści występujących w odniesieniu do poszczególnych rodzajów badanych materiałów, zmielonych w takim stopniu by średni wymiar rozdrobnionych cząstek mieścił się w przedziale $\bar{a} = 30,2-37,7 \mu\text{m}$, najlepiej ilustruje wykres zamieszczony na rys. 12.



Rys. 12. Kształtowanie się wskaźnika korzyści wynikających z mikronizacji materiałów metodą hydrostrumieniową

Z analizy danych zamieszczonych na tym wykresie wynika, że w porównaniu z warunkami mechanicznego rozkruszania materiałów w młynie planetarno-kulowym, energochłonność rozdrabniania hydrostrumieniowego jest wielokrotnie mniejsza. Przykładowo, dla węgla kamiennego jest ona ponad 7-krotnie mniejsza, dla magnezytu ponad 16-krotnie, a dla barytu najbardziej, gdyż blisko 26-krotnie mniejsza, z kolei dla mikro kulek szklanych około 15-krotnie, natomiast energochłonność hydrostrumieniowego rozdrabniania piasku kwarcowego jest niemal 11-krotnie mniejsza niż przy użyciu młyna planetarno-kulowego.

Podsumowanie

Przeprowadzenie szczegółowych analiz wyników badań umożliwiło sformułowanie następujących wniosków:

- Zwiększenie ciśnienia strugi wodnej wpływa w korzystny sposób na proces hydrostrumieniowego rozdrabniania materiałów, a zwłaszcza na wydajność mielenia. Zwiększenie ciśnienia wpływa za to niekorzystnie na energochłonność procesu mielenia. Obserwuje się niemal proporcjonalną zależność energochłonności od nominalnego ciśnienia strugi wodnej.
- Analiza porównawcza efektywności rozdrabniania materiałów różnymi metodami, uwzględniająca przede wszystkim jednostkową energochłonność, a także wydajność procesu mielenia, wskazuje jednoznacznie, że energochłonność hydrostrumieniowego rozdrabniania materiałów jest od kilku do dwudziestu kilku razy mniejsza niż podczas rozdrabniania mechanicznego, np. w młynie planetarno-kulowym.
- Funkcjonowanie wysokociśnieniowego młyna hydrostrumieniowego własnej konstrukcji stwarza bardzo wyraźną konkurencję dla standardowych sposobów rozdrabniania materiałów kruchych.

LITERATURA

1. Borkowski P., Borkowski J.: Comminuting of different materials with high-pressure water jet. Unconventional and HydroJetting Technologies. Monograph of UHJT Institute, Koszalin, 493-500, 2009.
2. Borkowski P., Borkowski J., Bielecki M.: Coal disintegration using high pressure water jet. Technical Gazette, 19 (2), 367-372, 2012.
3. Borkowski P., Borkowski J., Mazurkiewicz M., Lasko S.: Coal micronization utilizing with high-pressure water jet. Unconventional and HydroJetting Technologies. Monograph of UHJT Institute, Koszalin, 511-518, 2009.
4. Cui L., An L., Gong W.: Optimizing process parameters of high pressure water jet mill. The 8th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology. Qingdao, China, 138-145, 2006.
5. Cui L., An L., Gong W.: Effects of process parameters on the comminution capability of high pressure water jet Mill. International Journal of Mineral Processing. 81 (2), 113-121, 2006.
6. Gawenda T.: Produkcja surowców mineralnych o wąskim zakresie uziarnienia w dwustadialnym zamkniętym układzie rozdrabniania i klasyfikacji. Górnictwo i Geologia. 6 (2), 39-48, 2011.
7. Mateuszuk, S.: Wybrane zagadnienia mielenia materiałów w pionowych młynach rolkowo-misowych, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, nr 9, Warszawa Opole, 113-124, 2012.
8. Mazurkiewicz M.: Method of creating ultra-fine particles of materials using high pressure mill. US Patent No. 63,8649, 2001.
9. Mazurkiewicz M.: Apparatus for comminution of solid materials using a processor-controlled fluid jet. US Patent No. 643,5435, 2002.
10. Nakach M., Authelin J.R., Chamayou A., Dodds J.: Comparison of various milling technologies for grinding pharmaceutical powders. Original Research Article International Journal of Mineral Processing 74, Supplement, 173-181, 2004.
11. Sitek L., J. Foldyna, P. Martinec, J. Klich, Maślář M.: On the preparation of precursors and carriers of nanoparticles by water jet technology. International Conference Water Jet 2011 - Research, Development, Applications. Ostravice, 255-271, 2011.
12. Yashima S., Kanda Y., San S.: Relationship between particle size and fracture as estimated from single particle crushing. Powder Technology. 51 (3), 277-282, 1987.