
Przedmiot:	PRZERÓBKA KOPALIN II
Ćwiczenie:	TECHNOLOGIA ROZDRABNIANIA. FUNKCJA WYDAJNOŚCI ROZDRABNIANIA

Opracowanie: Alicja Bakalarz

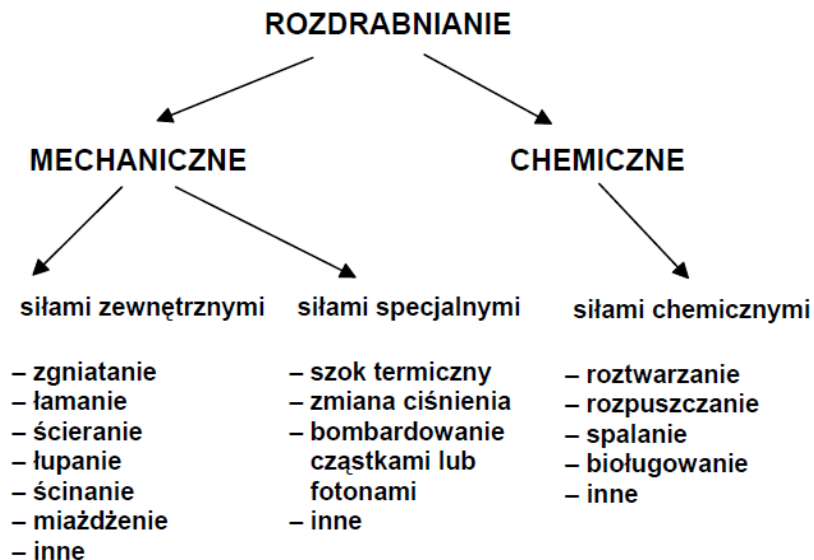
WPROWADZENIE

Rozdrabnianie to jeden z najbardziej energochłonnych procesów technologicznych, którego celem jest doprowadzenie danego materiału do odpowiedniego uziarnienia (Blaschke, 1982; Drzymała 2009; Gawenda, 2010). Analiza procesu rozdrabniania polega na ustaleniu zależności pomiędzy składem ziarnowym produktów rozdrabniania, fizycznymi właściwościami materiału, energią rozdrabniania i parametrami maszyn rozdrabniających (Malewski, 1981). Proces rozdrabniania surowca mineralnego przeprowadza się w dwóch celach (Blaschke, 1982; Gawenda, 2010; Łuszczkiewicz, 2015):

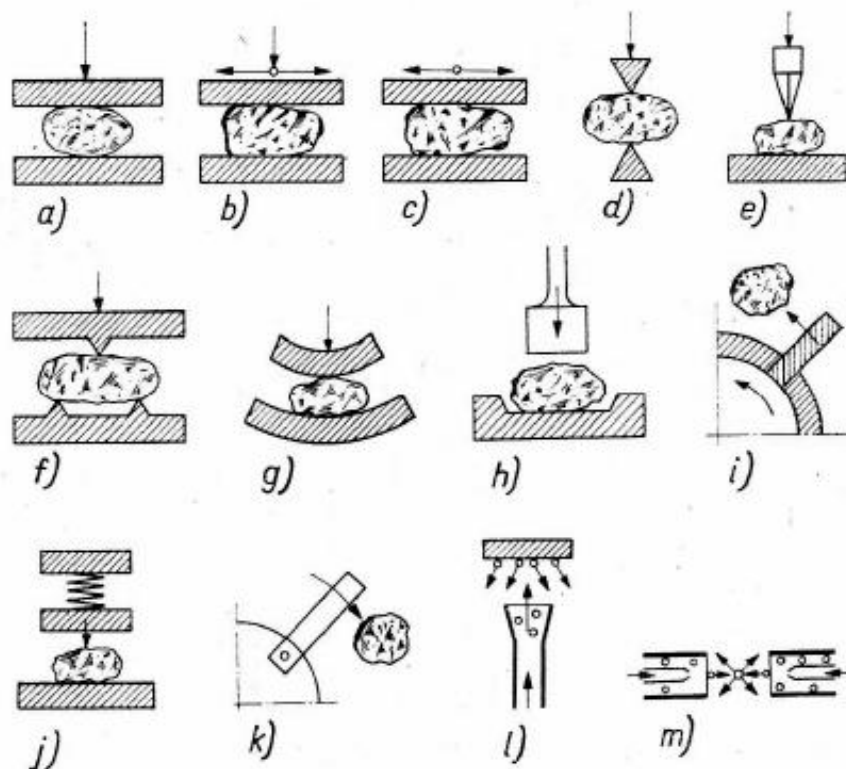
- uzyskania gotowego produktu, zgodnie z wymaganiami odbiorcy (operacja główna np. w przypadku kruszyw)
- uwolnienia ziarn danego minerału czyli doprowadzenia materiału do takiego stanu, aby uwolnić wprysnięcia składnika użytecznego od skały płonnej (operacja przygotowawcza do procesu wzbogacania).

Proces rozdrabniania jest jednym z elementarnych procesów przeróbczych we wszystkich tych przypadkach, gdy charakterystyka technologiczna materiału surowego nie pozwala na skierowanie go do procesów wzbogacania, w postaci w której został on wydobyty. W każdym przypadku przygotowania materiału do dalszych operacji przeróbczych, istnieje konieczność przeprowadzenia badań technologicznych, mających na celu określenie wymiarów ziarn zrośniętych ze sobą lub wymiarów ziarn wprysniętych. Na tej podstawie dobiera się następnie najkorzystniejszy stopień rozdrabniania lub stosuje się rozdrabnianie przygotowawcze wielokrotne (Blaschke, 1982).

Proces rozdrabniania może się odbywać na drodze mechanicznej oraz chemicznej (rys. 1.). Rozdrabnianie mechaniczne jest wynikiem działania sił zewnętrznych lub sił specjalnych, podczas gdy rozdrabnianie chemiczne prowadzi do usuwania części ziarn przez rozpuszczanie, roztwarzanie lub utworzenie z nich innej substancji. Mechaniczne rozdrabnianie polega na dzieleniu poszczególnych ziarn materiału na mniejsze części przez między innymi ich: zgniatanie, nacisk, ścieranie, ścinanie, rozłupywanie, łamanie czy uderzanie (rys. 2.).



Rys. 1. Systematyka metod rozdrabniania ziarn (Drzymała, 2009)



Rys. 2. Sposoby rozdrabniania: a) zgniatanie, b) nacisk, ścieranie, c) ścieranie, d) ścinanie, e) rozłupywanie, f, g) łamanie, h, i) uderzanie, j, k) uder sprężysty, l) kruszenie strumieniowe o płytę kruszącą, m) kruszenie strumieniowe bez mechanicznych elementów roboczych, wzajemne zderzenie się ziaren (Blaschke, 1982)

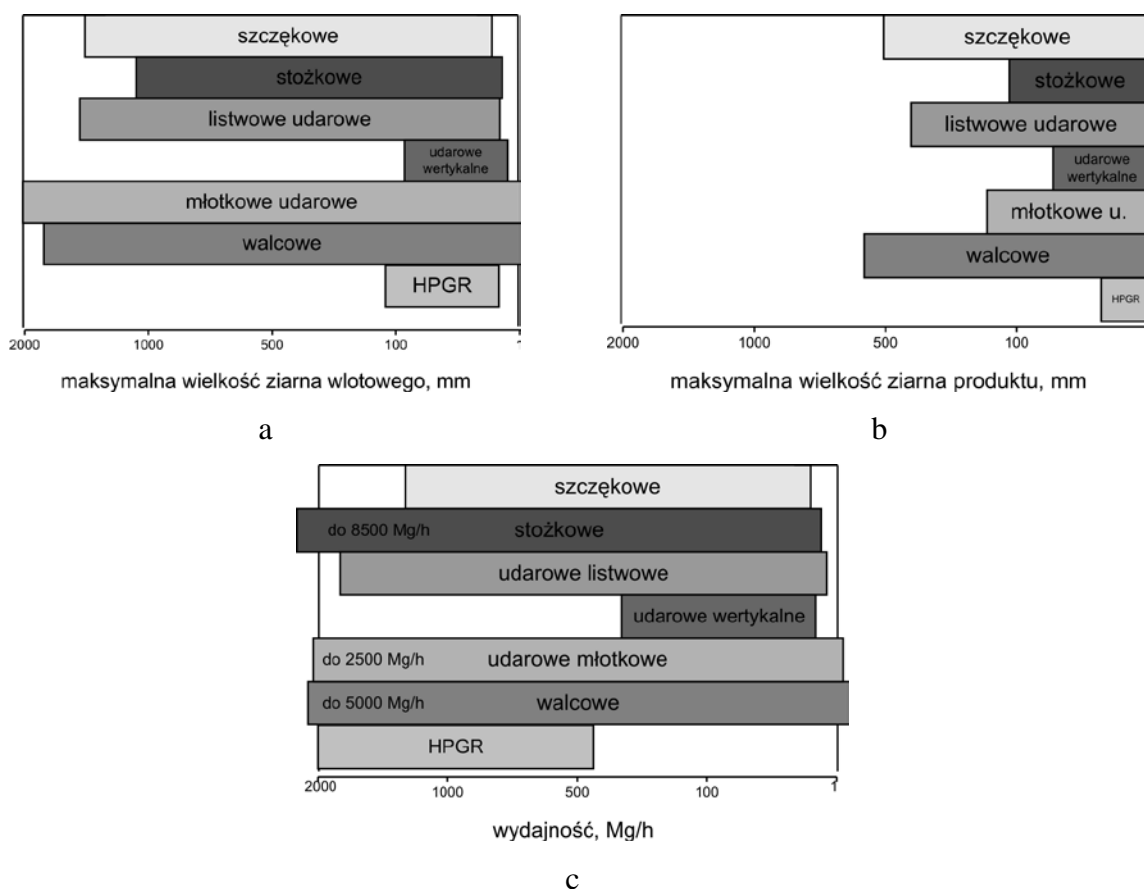
Rozdrabniania można dokonać poprzez kruszenie lub mielenie.

Kruszeniem nazywamy proces rozdrabniania materiału, którego ziarna są większe niż około 50 mm. Ze względu na wielkość nadawy oraz produktu, kruszenie dzieli się na: grube, średnie i drobne, a przeprowadza się je w maszynach nazywanych kruszarkami. Ze

względu na sposób rozdrabniania i budowę kruszarki dzieli się na:

- szczękowe (zgniatanie, łamanie i ścieranie)
- stożkowe (zgniatanie, łamanie i ścieranie)
- walcowe (zgniatanie i ścieranie)
- udarowe (uderzanie).

Na rysunku 3. przedstawiono możliwość zastosowania poszczególnych rodzajów kruszarek w zależności od maksymalnego wielkości ziarna wlotowego (rys. 3a) i produktu (rys. 3b) oraz ich wydajności (rys. 3c).



Rys. 3. Podział kruszarek według maksymalnej wielkości ziarna wlotowego (a) i produktu (b) oraz wydajności (c) (Gawenda, 2010)

Maszyny służące do rozdrabniania dobiera się odpowiednio do danego materiału, uwzględniając przede wszystkim jego właściwości decydujące o podatności na różne rodzaje działań kruszących (Nawrocki i in., 1989, za Gawendą (2010)). Materiały twarde rozdrabnia się przez udar, mniej twarde przez zgniatanie, miękkie przez zgniatanie, łamanie lub ścieranie, ilaste i lepkie przez ścieranie. Do rozdrabniania ziaren grubych stosuje się zgniatanie, do średnich – zgniatanie lub udar, do drobnych – ścieranie lub udar (Gawenda, 2010).

Mielenie to proces rozdrabniania ziarn nadawy mniejszych od 50 mm i może się ono odbywać na sucho i na mokro (z dodatkiem wody). Sposób mielenia na mokro jest bardziej efektywny i stosuje się go wszędzie tam, gdzie nie ma przeciwwskazań technologicznych. Procesy mielenia przeprowadza się w młynach. Do najczęściej stosowanych młynów zalicza się młyny bębnowe. Jako media mielące w młynach bębnowych stosuje się przede wszystkim kule (np. stalowe, chromo-niklowe, ceramiczne), cylpepsy stalowe, pręty, otoczaki czy też bryły tego samego materiału (Malewski, 1981; Drzymała, 2009; Łuszczkiewicz, 2015). Odpowiedni sposób pracy młyna zależy od ilości i wielkości mielników oraz częstotliwości obrotów młyna. Kształt mielników wpływa z kolei na skład ziarnowy produktów mielenia (Malewski, 1981).

Wybór maszyny do określonej operacji rozdrabniania jest uwarunkowany zwykle wielkością ziarn nadawy oraz wymaganiami dotyczącymi otrzymanego w wyniku rozdrabniania produktu. Zagadnienie to jest ściśle związane z wydajnością maszyn rozdrabniających. *Wydajność maszyny rozdrabniającej* jest to ilość przepływającej przez maszynę masy nadawy w jednostce czasu. Istnieje szereg równań pozwalających obliczyć wydajność stosowanych maszyn rozdrabniających. Wydajność kruszarek zależy przede wszystkim od składu ziarnowego nadawy oraz szerokości szczeliny wypustowej i wyraża się ona ogólnym wzorem (Malewski, 2015):

$$Q(p, F(d)) = \int_0^{D_{\max}} q(d, p) dF(d) , \quad (1)$$

gdzie:

$q(d, p)$ – wydajność wąskiej klasy ziarn nadawy o średnicy d ,

$p = \{e, s, B.. \}$ – parametry maszyny

$F(d)$ – krzywa składu ziarnowego nadawy.

Praktycznie wydajność maszyny rozdrabniającej określa zależność:

$$Q(p, F(d)) = \frac{\gamma}{t} , \quad (2)$$

gdzie γ oznacza wychód czyli masę rozdrobnionego materiału w danym okresie czasu t . Jednostką wydajności rozdrabniania jest zwykle megagram na dobę czyli Mg/dobę, ale może także być wyrażone w kg/s, kg/h czy Mg/h.

Procesy kruszenia oraz mielenia umownie dzieli się według wielkości ziarn (tabela 1.). Inny podział procesów rozdrabniania, pod względem największego ziarna otrzymanego po rozdrabnianiu, zaproponował Blaschke (1982): grube (do 100 mm), średnie (do 10 mm), drobne (do 2 mm) oraz miałkie (do 0,25 mm).

Tabela 1. Umowny podział kruszenia i mielenia według wielkości ziarn (na podstawie Drzymały (2009))

Rodzaj rozdrabniania	Maksymalne ziarno, mm		
	nadawa	produkt	
kruszenie	grube	1 500	500
	średnie	500	150
	drobne	150	50
mielenie	grube	50	5
	średnie	5	0,5
	drobne	0,5	0,05
	koloidalne	0,05	< 0,005

Podatność ziarn surowca mineralnego zależy od ich właściwości fizycznych takich jak (Blaschke, 1982):

- twardość, którą określa się skalą twardości Rossivala lub Mohsa
- wytrzymałość na uderzenie
- wytrzymałość na zgniatanie
- struktura ziarn (ziarnistość, włóknistość, naturalna łupliwość, porowatość itd.)
- wilgotność i związana z tym lepkość (ilastość).

Do porównania stopnia twardości ziarn minerałów w tabeli 2. zestawiono przyjęty zestaw minerałów wzorcowych oparty na skali Mohsa (na podstawie Blaschke, 1982).

Tabela 2. Zestaw minerałów wzorcowych i ich stopnie twardości (na podstawie Blaschke, 1982)

Twardość minerału	Minerał wzorcowy
bardzo miękki	talk
miękki	gips kalcyt fluoryt
twardy	apatyt ortoklaz kwarc
bardzo twardy	topaz korund diament

W tabeli 3. podano zasady doboru urządzeń rozdrabniających w zależności od twardości nadawy i uziarnienia produktu (Grotowski i Sztaba, 1996).

Tabela 3. Zasada doboru urządzeń rozdrabniających w zależności od twardości nadawy i uziarnienia produktu (Grotowski i Sztaba, 1996)

Grupa twardości	Typ materiału	Urządzenie rozdrabniające		
		> 10 mm	10–1 mm	< 1 mm
twarde 10–4 wg skali Mohsa	rudy, skały twarde, piasek, materiały ściernie, metale, stopy	kruszarki: szczękowe, walcowe, stożkowe	kruszarki walcowe	młyny kulowe i wahadłowe
średnio twarde 4–3 wg skali Mohsa	węgiel miękki, łupek, margle	kruszarki: szczękowe, walcowe, odrzutowe	kruszarki odrzutowe i młotkowe	młyny kulowe
miękkie 3–1 wg skali Mohsa	węgiel brunatny, miękkie wapienie, miękkie piaskowce, talle, tworzywa sztuczne, produkty organiczne, naturalne chemikalia	kruszarki: szczękowo-igłowe, walcowo-igłowe, młotkowe, odrzutowe	kruszarki odrzutowe i młotkowe	strumieniowe młyny wialne, młynki udarowe - precyzyjne

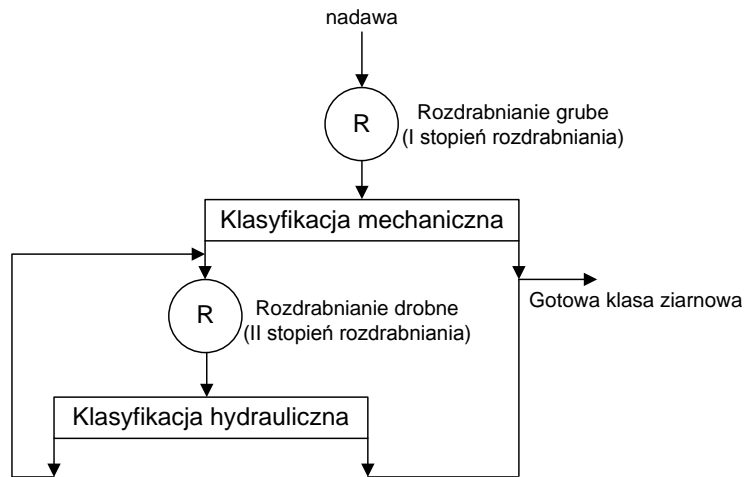
Dobrą miarą służącą do porównania i oceny podatności danego materiału na rozdrabnianie oraz efektywności operacji rozdrabniania jest energia rozdrabniania, którą wyraża się jako ilość energii potrzebną do wytworzenia jednostki nowej powierzchni (J/m^2) lub objętości (masy) ziarn określonych wymiarów (J/kg). Istnieje kilka modeli energochłonności rozdrabniania (Malewski, 1981). Największe znaczenie dla celów praktycznych ma model Bonda (1952), zaproponowany w oparciu o wyniki badań energochłonności rozdrabniania wielu skał przy zastosowaniu oryginalnej metodyki i techniki eksperymentalnej i ma ona postać (Malewski, 1981; Drzymała, 2009; Łuszczkiewicz, 2015):

$$E_D = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}^p}} - \frac{1}{\sqrt{d_{80}^n}} \right) \quad (3)$$

gdzie W_i to wskaźnik (indeks) rozdrabniania (indeks Bonda), a d_{80}^p i d_{80}^n to wielkości ziarn stanowiące 80% odpowiednio produktu i nadawy. Wskaźnik rozdrabniania (nazywany także indeksem Bonda) jest to praca, wyrażona w kWh/Mg, rozdrabniania jednostki masy danego ciała od wymiaru nieskończenie dużego do rozmiaru 100 μm . W dostępnej literaturze można odnaleźć wartości indeksów Bonda dla większości materiałów, np. dla węgla kamiennego o gęstości 1400 kg/m^3 wynosi on 14,33 kWh/Mg, a dla rudy miedzi o gęstości 3020 kg/m^3 – 14,05 kWh/Mg (Malewski, 1981). Sama procedura Bonda jest skomplikowana i czasochłonna, dlatego w literaturze opisano wiele jej modyfikacji (Drzymała, 2009).

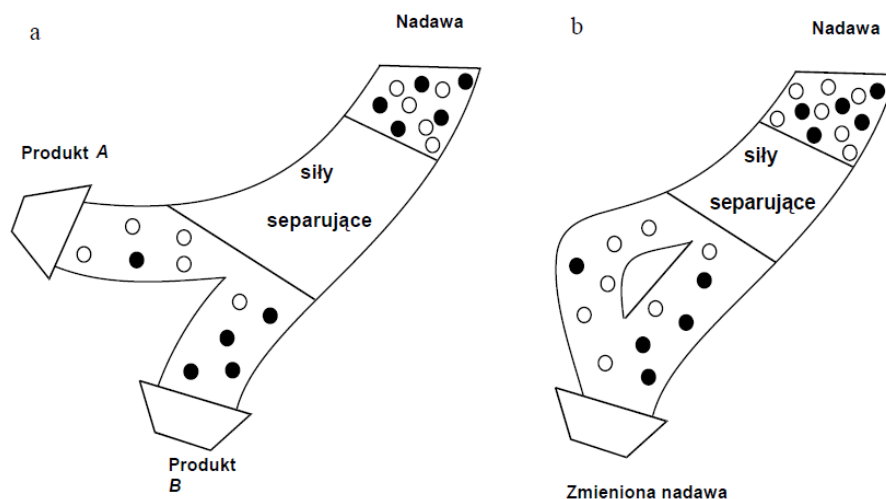
Ze względu na wysoką energochłonność, a tym samym kosztowność rozdrabniania,

proces ten powinno prowadzić się w sposób jak najbardziej efektywny. W tym celu procesy kruszenia czy mielenia sprzęga się z procesami klasyfikacji mechanicznej lub hydraulicznej. Na rys. 4. przedstawiono przykładowy układ rozdrabniania sprzężony z procesami klasyfikacji.



Rys. 4. Przykład układu rozdrabniania sprzężonego z procesami klasyfikacji (na podstawie Łuszczkiewicza, 2015)

Proces rozdrabniania jest procesem separacji i dlatego można go opisywać jako wzbogacanie lub klasyfikację. Posiada on swoją cechę, czyli parametr główny, którą jest ogólnie pojęta podatność na rozdrabnianie. Cecha ta, jako pojedynczy parametr, jak dotychczas, nie ma swojej precyzyjnej formuły, ale wiadomo, że jest ona kombinacją modułu Younga (lub jego odpowiedników) oraz energii powierzchniowej. Wykorzystując różnice w podatności na rozdrabnianie, można, w jakimś stopniu, doprowadzić do rozdzielenia się składników, czyli na ziarna o różnej wielkości lub o różnym składzie. Jednak, rozdrabniania nie prowadzi się w pełni jako proces separacji, gdyż – mimo że zachodzi zarówno uwalnianie, jak i przemieszczanie się ziarn w różne miejsca urządzenia rozdrabniającego – nie odbiera się produktów separacji, lecz produkuje się tylko zmienioną nadawę. Różnice pomiędzy prowadzeniem procesu rozdrabniania jako procesu separacji oraz jako procesu bez separacji a prowadzącym do wytworzenia zmienionej nadawy przedstawiono na rys. 5. (Drzymała, 2009).



Rys. 5. Możliwe sposoby prowadzenia procesu rozdrabniania: a – jako proces separacji, b – jako proces bez separacji, prowadzący do wytworzenia zmienionej nadawy (Drzymała, 2006)

Gdy proces rozdrabniania nie jest selektywny i polega jedynie na pomniejszeniu wielkości ziaren nadawy, wówczas jest on charakteryzowany przez stopień rozdrobnienia, natomiast w przypadku prowadzenia procesu selektywnego rozdrabniania (np. w przypadku przeróbki rud), charakteryzowany jest przez stopień uwolnienia.

Stopień rozdrabniania wyraża się wzorem (Blaschke, 1982; Drzymała, 2009; Łuszczkiewicz, 2015):

$$r = \frac{d_n}{d_p} \quad (4)$$

gdzie d_n i d_p to pewne wielkości charakteryzujące ziarna odpowiednio nadawy i produktu rozdrabniania, którymi mogą być:

- wartości średnie średnic ziarn
- wartości modalne
- wartości maksymalne ziarn (wtedy stopień rozdrabniania nazywa się *granicznym stopniem rozdrobnienia*)
- wartości minimalne ziarn
- d_{50} lub d_{80} – wielkość ziarn materialu stanowiących odpowiednio 50 lub 80% wszystkich ziarn.

Wartość stopnia rozdrabniania zależy zatem od procedury zastosowanej do wyznaczenia charakterystycznej wartości wielkości ziarn d_n i d_p , a sam proces najlepiej określają krzywe składu ziarnowego (Drzymała, 2009).

W przypadku przeróbki rud, gdzie głównym celem rozdrabniania jest uwolnienie ziarn

minerału, proces rozdrabniania takich materiałów powinien być prowadzony w taki sposób, aby doprowadził on do wydzielenia ziarn o rozmiarach zbliżonych do rozmiarów naturalnych tych ziarn w skale (Malewski, 1981; Łuszczkiewicz, 2015). Wtedy miarą uwolnienia ziarn minerału w produkcji rozdrabniania jest *stopień uwolnienia* wyrażany wzorem (Drzymała, 2009; Łuszczkiewicz, 2015):

$$S_{uw} = \varepsilon_L = \frac{\text{masa wolnych ziarn minerału w produkcji}}{\text{masa ziarn tego minerału w nadawie przed rozdrobieniem}} \quad (5)$$

Stopień uwolnienia ziarn można określić jako uzysk wolnych ziarn danego składnika nadawy w produkcji wolnych ziarn, a tym samym sam proces rozdrabniania można opisać podstawowymi wskaźnikami wzbogacania (zawartość, wychód czy uzysk) (Drzymała, 2009).

Literatura cytowana

- Blaschke S., 1982. *Przeróbka mechaniczna kopalni*, część I. Wydawnictwo Śląsk.
- Drzymała J., 2009. *Podstawy mineralurgii*. Wyd. II, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Gawenda T., 2010. *Problematyka doboru maszyn kruszących w instalacjach produkcji kruszyw mineralnych*, *Górnictwo i Geoinżynieria*, 34/4, 195–209.
- Łuszczkiewicz A., 2015. *Wykłady do przedmiotu Przeróbka kopalni II*. Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wroclawska, strona internetowa: www.minproc.pwr.edu.pl.
- Malewski J., 1981. *Przeróbka kopalni. Zasady rozdrabniania i klasyfikacji*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej.
- Malewski J., 2015. *Instrukcja do ćwiczenia Funkcja wydajności rozdrabniania do ćwiczeń z przedmiotu Przeróbka Kopalni II*. Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wroclawska, strona internetowa: www.minproc.pwr.edu.pl.
- Nawrocki J., Ryncarz A., Węglarczyk J., 1989. *Teoria i praktyka rozdrabniania*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Skrypt uczelniany nr 1500, Gliwice.
- Grotowski A., Sztaba K., 1996. *Przeróbka*, W: Monografia KGHM Polska Miedź S.A., Lubin, Wydawnictwo PROFIL.

WYKONANIE ĆWICZENIA

I. Aparatura, urządzenia i materiały

- próbka rudy miedzi z ZWR Polkowice o masie około 2,5 kg i uziarnieniu 0–32 mm
- wstrząsarka wibracyjna do sit z zestawem sit
- laboratoryjna kruszarka szczękowa
- laboratoryjna waga o dokładności ważenia do 1 g
- pojemniki na produkty, łopatkę
- stoper

II. Przebieg ćwiczenia

Wykonanie analizy sitowej nadawy na wstrząsarce wibracyjnej

Po zapoznaniu się z instrukcją BHP obsługi wstrząsarki laboratoryjnej do sit oraz po sprawdzeniu poprawnego ułożenia sit, przeprowadź analizę sitową przygotowanej do procesu rozdrabniania nadawy (próbka rudy miedzi). Zważ oraz zapisz w arkuszu sprawozdawczym wychody wszystkich produktów przesiewania. Następnie otrzymane frakcje przesyp do jednego naczynia.

Przeprowadzenie procesu rozdrabniania

Po zapoznaniu się z instrukcją BHP obsługi laboratoryjnej kruszarki szczękowej, za pomocą dźwigni ustaw szerokość szczeliny wylotowej kruszarki w pozycji „5,5”. Pod kruszarkę podstaw metalowy pojemnik do którego będzie zbierany produkt rozdrabniania. Mając przygotowany materiał do rozdrabniania oraz łopatkę do dozowania nadawy do kruszarki, uruchom maszynę. W momencie podania do kruszarki pierwszej porcji materiału, włącz stoper. Materiał do rozdrabniania należy podawać w sposób ciągły, jednak nie w nie za dużych ilościach tak, aby nie dopuścić do zatrzymania się szczęk kruszarki. W przypadku zablokowania się szczęk maszyny, należy ją natychmiast wyłączyć a stoper zatrzymać. Po ponownym uruchomieniu maszyny oraz odblokowaniu się szczęk, włącz stoper i kontynuuj proces rozdrabniania. Zatrzymaj stoper w chwili rozdrobnienia ostatniej porcji nadawy. Zapisz czas rozdrabniania w arkuszu sprawozdawczym.

Wykonanie analizy sitowej produktu rozdrabniania

Przeprowadź analizę sitową produktów rozdrabniania. Zważ oraz zapisz w arkuszu

sprawozdawczym wychody wszystkich produktów przesiewania.

III. Wykonanie sprawozdania

1. Aby przeprowadzić analizę otrzymanych wyników procesu rozdrabniania, wypełnij tabelę 1. w arkuszu sprawozdawczym. Wyznacz i zapisz wartości maksymalnych wielkości ziarn w poszczególnych klasach ziarnowych. Oblicz wychody procentowe i kumulowane wychody procentowe poszczególnych klas ziarnowych nadawy oraz produktu rozdrabniania. Wyniki zapisz z dokładnością do 0,1 g lub 0,1%.
2. Na podstawie obliczonych wartości narysuj krzywe składu ziarnowego nadawy i produktu rozdrabniania w formie kumulowanej na przygotowanym w arkuszu układzie współrzędnym (rys. 1.). Do narysowania krzywych składu ziarnowego użyj ołówka a same krzywe narysuj cienką linią.
3. Wyznacz oraz zaznacz na wykresie na rys. 1. wartości d_{50} i d_{80} dla nadawy oraz produktu rozdrabniania. Odczytaj wartości z wykresu i zapisz je w tabeli 2., z dokładnością do liczby całkowitej.
4. Na podstawie wyznaczonych wartości d_{50} i d_{80} dla nadawy i produktu, oblicz ze wzoru (4) stopień rozdrobnienia dla wskazanych wielkości charakteryzujących i zapisz w tabeli 2. Wynik obliczeń podaj z dokładnością do 0,1.