

Dariusz Foszcz, Tomasz Gawenda*, Damian Krawczykowski**

PORÓWNANIE RZECZYWISTEGO I WYZNACZONEGO TEORETYCZNIE ZUŻYCIA ENERGII DLA MŁYNA KULOWEGO**

1. Wstęp

Zagadnienie wydatkowania energii na proces rozdrabniania jest ściśle związane z właściwościami rozdrabnianego materiału. Problem ten jest jednym z najistotniejszych zagadnień związanych z procesami rozdrabniania, ponieważ przy wzbogacaniu surowców mineralnych rozdrabnianie jest najbardziej energochłonną operacją. Procesy rozdrabniania wymagają użycia dużych nakładów energii, szacuje się że zużywa się na ten cel ok. 5% wytworzonej na świecie energii. Dla zakładów przerobczych rud metali nieżelaznych koszt energii związanej z procesami rozdrabniania stanowią ok. 50÷60% kosztów. Możliwość określenia ilości koniecznej energii do rozdrobnienia danego materiału ma istotne znaczenie przy projektowaniu układu technologicznego a w szczególności doboru urządzeń zarówno pod względem typu jak i wielkości. Określony teoretycznie poziom zapotrzebowania na energię dla przerabianego materiału może ułatwić kontrolę kosztu przerobu z punktu widzenia zużytej energii, przy określeniu odpowiednich wskaźników [6]. Obliczenie energii potrzebnej do rozdrobnienia jest zagadnieniem bardzo złożonym. Złożoność ta wynika z braku prostoliniowej zależności pomiędzy obciążeniem i odkształceniem w całym obszarze aż do zniszczenia struktury danego materiału [4]. Dodatkowym utrudnieniem jest brak regularności kształtów rozdrabnianego materiału oraz spójności wewnętrznej wynikającej np. ze sposobów pozyskania surowca ze złoża lub wcześniejszych operacji rozdrabniania. Względy te spowodowały że problem obliczenia pracy rozdrabniania poszukiwano innymi drogami niż klasyczne teorie wytrzymałości materiałów. Energetyczne teorie rozdrabniania polegają na powiązaniu stopnia rozdrabniania materiału uziarnionego z zużyta energią. Wszystkie istnie-

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Artykuł został opracowany w ramach projektu badawczego nr 4 T12A 006 29

jące energetyczne teorie rozdrabniania są hipotezami, które posiadają bardzo ogólne uzasadnienia a ich zgodność z rzeczywistością potwierdza się wyłącznie doświadczalnie. Zasadniczymi teoriami są teorie: Rittingera, Kicka oraz Bonda (a także teorie Bracha i Papadakis).

2. Energetyczne teorie rozdrabniania

Rittinger (1867) przyjął, że energia zużywana przy rozdrabnianiu materiałów stałych jest proporcjonalna do nowoutworzonej powierzchni. Algebraicznie jest to wyrażone następująco

$$\begin{aligned} \text{energia} &= K (\text{nowa powierzchnia}) = \\ &= K (\text{finalna powierzchnia} - \text{pole powierzchni wyjściowej}) = \\ &= K (\text{końcowa liczba ziaren} * \text{pole powierzchni ziarna reprezentatywnego} - \\ &\text{początkowa liczba ziaren} * \text{pole powierzchni ziarna reprezentatywnego}) = \end{aligned}$$

$$K \left(\frac{1}{D_2^3} \cdot D_2^2 - \frac{1}{D_1^3} \cdot D_1^2 \right) = K \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right) \quad (1)$$

gdzie: D_1 i D_2 — wybrane wielkości ziaren nadawy (D_1) i produktu (D_2).

Wielu eksperymentatorów wykazało, że w pewnych szczególnie kontrolowanych warunkach zaprezentowane powyżej prawo ma potwierdzenie w praktyce. Dopasowanie obliczeń teoretycznych z wynikami doświadczeń było silnie zależne od przyjętej metody określenia nowopowstałej powierzchni (zastosowanie metody B.E.T. do pomiaru pola powierzchni zamiast metod przepuszczalności) oraz od sposobu rozdrobnienia materiału [1]. Nacisk potrzebny do złamania struktury materiału poprzez napięcie lub kompresję nie zależy od odległości, z której te siły działają, tzn. długość ziarna jest nieistotna dla wartości granicznego nacisku, ale energia absorbowana w procesie zależy od zmian długości, które z kolei zależą od długości wyjściowej. Tak więc ziarna, które są dłuższe w proporcji do ich pola przekroju poprzecznego będą wymagały zużycia większej ilości energii na rozdrobnienie.

Kick (1985) założył, że wymagana energia dla uzyskania „analogicznych zmian w konfiguracji w geometrycznie podobnych strukturach ziarn z technologicznego punktu widzenia zmienia się w zależności od objętości lub wagi tych struktur”. Energia deformacji ziarna jest proporcjonalna do jego objętości i do tak zwanej energii napięcia poprzedzającego zniszczenie kruszące, i w dalszym ciągu zależy od objętości.

Tak więc objętość jednostkowa ziaren, które są w stanie bliskim pęknięcia zawiera taką energię deformacji niezależnie od wielkości ziarn. Energia deformacji przy maksymalnym nacisku jest taka sama dla objętości jednostkowej na każdym stadium rozdrabniania lub

$$\text{Ogólna energia deformacji} = K_f * \text{liczba stadiów rozdrabniania}$$

i gdy wyjściowa średnia wielkość ziarna wynosi D_1 a końcowa D_n w jednostce objętości materiału, liczba stadiów wynosi n , stopień rozdrabniania r , to:

$$\left(\frac{D_1}{D_n}\right)^3 = r^n$$

$$n = \frac{3(\lg D_1 - \lg D_n)}{\lg r} = K_2 \lg\left(\frac{D_1}{D_n}\right)$$

lub całkowita energia deformacji =

$$= K_1 \cdot K_2 \lg\left(\frac{D_1}{D_n}\right) = K \cdot \lg\left(\frac{D_1}{D_n}\right) \quad (2)$$

Energia naprężenia jest tylko energia deformacji (do etapu pęknięcia) i nie uwzględnia ona energii rzeczywistej potrzebnej do pęknięcia ziarna. Taplin zasugerował, że prawo Kicka określa energię wymaganą do momentu pęknięcia ziarna a prawo Rittingera — energię rzeczywistą potrzebną do złamania po tym jak ziarno znalazło się w stanie deformacji po którym pękło i że stosunek tych dwóch ilości energii jest związany z rozmiarami rozpatrywanych ziaren. Tak więc jeżeli stany energii na dwóch poziomach reprezentują parametry α (przygotowanie do łamania — Kick) i β — energia łamania (Rittinger) $\alpha/\beta = x$, gdzie x jest wymiarem ziaren. Jeżeli wartość x jest duża prawo Kicka dominuje, gdy x małe — dominuje prawo Rittingera.

Bond określił równanie ilości energii wymaganej dla materiału opartego na funkcji odwrotnej do funkcji kwadratowej wymiaru sit przez które przechodzi 80% ziaren, reprezentowaną przez $Z^{-0,5}$. Stąd dla ziarna o nieskończonej wielkości funkcja ta wynosić będzie zero. Bond zakłada, że dowolny proces rozdrabniania może być rozważany jako pośrednie stadium pomniejszania ziarna o nieskończonym wymiarze do nieskończonej liczby ziaren o wielkości zero, tak więc energia grupy ziaren jest proporcjonalna do $Z^{-0,5}$ i energia potrzebna na rozdrobnienie grupy ziaren scharakteryzowanych przez wielkość Z_1 do grupy scharakteryzowanej przez Z_2 jest proporcjonalna do różnicy $Z_1^{-0,5} - Z_2^{-0,5}$. Jest ona także proporcjonalna do energii (W) potrzebnej do rozdrobnienia ziaren z wielkości Z_1 do wielkości Z_2 . Tak więc

$$W = K(Z_2^{-0,5} - Z_1^{-0,5})$$

gdzie K jest stałą dla danego materiału. W niektórych równaniach K zastępuje się przez $10 \cdot W_i$, gdzie W_i jest tzw. indeksem Bonda i otrzymujemy

$$W = 10 \cdot W_i \cdot (Z_2^{-0,5} - Z_1^{-0,5}) \quad (3)$$

Warto podkreślić, że nie istnieją argumenty przemawiające za tym, że energia związana jest ze stopniem podziału między nieskończenie duże a nieskończenie małe, co jest specyficzne do zastosowania we wzorze Bonda pierwiastka kwadratowego.

Taki argument może również znaleźć zastosowanie dla wzorów Kicka i Rittingera. Unikalnym dla wzoru Bonda jest fakt, że szeroka ilość wskaźników pracy dla materiałów w praktyce może być określana przy względnie stałych wartościach dla całego zakresu wymiarów.

Bond traktuje czynnik $Z^{0.5}$ jako miarę długości szczelin do pęknięcia ziarna o rozmiarze Z , stąd pole powierzchni jednostki objętości materiału jest proporcjonalne do Z^{-1} , długość spękań w jednostkowej objętości jest traktowana jako proporcjonalna do jednej strony tego pola i dlatego jest proporcjonalna do $Z^{0.5}$.

Holmes zasugerował modyfikację równania energii Bonda podstawiając wykładnik r zamiast bondowskiego 0,5 i równanie to otrzymuje postać

$$W = 10 \cdot W_i (Z_2^{-r} - Z_1^{-r})$$

Wykonano wiele badań w celu wykazania, że zależności Rittingera, Kicka oraz Bonda są odmianami poniższego ogólnego równania:

$$\frac{dW}{dd} = -Cd^n \quad (\text{Walker})$$

$$W_R = a + \frac{b}{d_0^m} \quad (\text{Dobie}) \quad (4)$$

$$W = \frac{Kd_0^{3-r} (R^r - 1)}{2^R - 1} \quad (\text{Holmes})$$

gdzie:

W — zużywana energia (lub wykonywana praca),

d — wielkość ziarna,

d_D — wielkość początkowa ziarna,

W_R — energia potrzebna dla stopnia rozdrobnienia,

R, r i m — wykładniki.

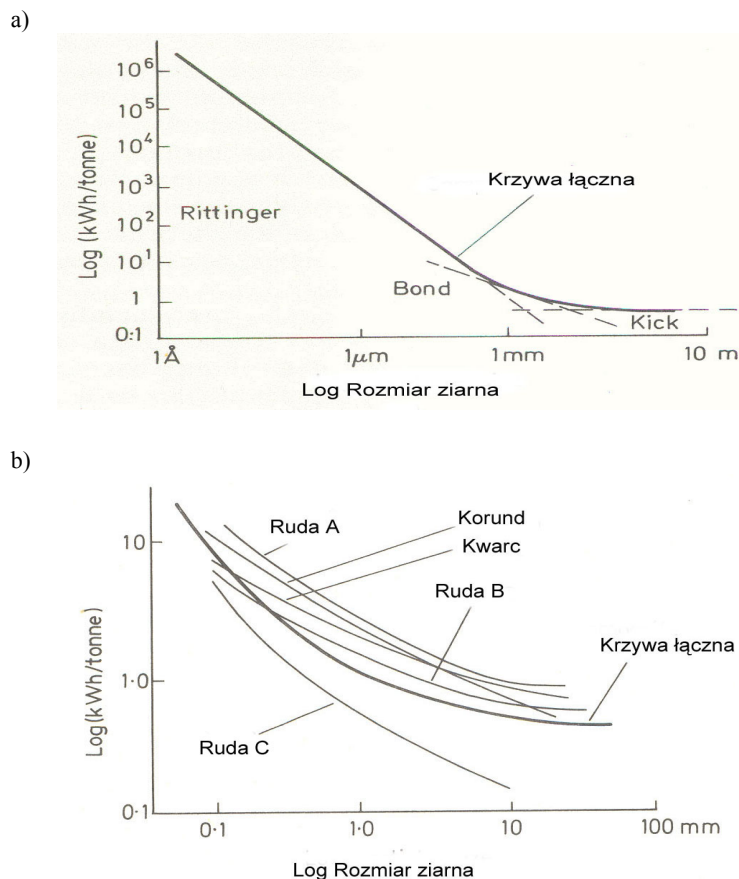
Wartości n, a, b, m, r przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Wartości wskaźników dla zależności Rittingera, Kicka i Bonda [1]

Wskaźnik zużycia energii	n	a	b	m	r
Rittinger	-2	0	b	1	1
Kick	-1	a	0	—	0
Bond	-1,5	0	b	0,5	0,5

Hukki uważa, że zależność pomiędzy zużywaną energią a wymiarem ziarn jest złożeniem wzorów Rittingera, Bonda i Kicka. Jeżeli krzywe reprezentujące prawa tych autorów wykreśliśmy w skali logarymicznej w zakresach od 1 μm do 5000 μm (5 mm) a następnie do 10 cm, otrzymujemy uśrednioną krzywą zachowującą zależności otrzymane w praktyce (rys. 1). Prawo Rittingera można stosować z dostateczną dokładnością w zakresie 10÷1000 μm . Dla ziaren mniejszych niż 10 μm przedłużone mielenie nie wpływa na zmianę pola powierzchni.



Rys. 1. Krzywe: wielkość ziarn — zapotrzebowanie energetyczne w zakresach Rittingera, Bonda i Kicka (a), krzywe eksperymentalne dla wybranych materiałów (b) [1]

Drugim aspektem problemu energii potrzebnej na rozdrabnianie jest problem dyssypacji energii. Efektywność z jaką urządzenie rozdrabniające wydatkuje energię na rozdrobnienie materiału jest przypisana do urządzenia. W zależności od konstrukcji urządzenia spora ilość energii jest absorbowana przez jego akcesoria i części (towarzyszące) i nie bierze bezpośrednio udziału w procesie rozdrabniania materiału.

Nie bez znaczenia jest również wpływ wielkości ziarna rozdrabnianego na ilość energii potrzebną do jego rozdrobnienia im drobniejsze mielenie tym musimy się liczyć z większym zużyciem energii przykładowo [1]

		kWh/t
Grube kruszenieponiżej	10 cm	3÷4
Średnie kruszeniemiedzy	1÷10 cm	5÷6
Drobne mielenie	125 μm ÷ 1 cm	20÷30
Ultra drobneponiżej	125 μm	100÷1000

Jednym z podejść do problemu jest rozważenie energii zużywanej przez urządzenie jako stałej i przyjęcie jako zmiennej tylko energii konsumowanej przez materiał i traktowanie jej jako wprost proporcjonalnej do masy materiału rozdrabnianego tak, że prostoliniowa zależność istnieje pomiędzy ogólną konsumowaną energią a masą przerabianego materiału. Tak więc, jeżeli u jest ułamkiem energii wymaganym przez materiał przy przerobie optymalnym a i jest ułamkiem energii wymaganym dla pracy urządzenia nieobciążonego to mamy: $u + i = 1$, i jeżeli g jest ułamkiem określającym stosunek ilości optymalnej materiału do ilości przerabianego materiału to ilość ogólna wymaganej energii wynosi $g \cdot u + i$

energia względna = ogólna ilość potrzebnej energii/optymalna ilość energii =

$$= \frac{g \cdot u + i}{u + i} = g \cdot u + i$$

to

$$\text{względna ilość energii/tonę} = \frac{g \cdot u + i}{g} \quad (5)$$

Heywood wyznaczył u oraz i dla wybranych urządzeń — jest to bardzo przybliżone, a zwłaszcza i . Inni badacze określili propozycje zużywanej energii przy kruszeniu materiału w pewnych specyficznych warunkach (tab. 2).

TABELA 2

Zależność pomiędzy energią wymaganą do rozruchu pustego urządzenia (i) oraz energią zużywaną przy optymalnym wypełnieniu materiałem (u) [1]

	i	u
Młyn wypełniony kulami	0,9	0,1
Młyn pierścieniowy	0,4	0,6
Młyn udarowy	0,25	0,75

Zależność podana przez Bonda i Wanga zakłada, że

$$\text{liczba koni mechanicznych/tonę} = \left(\frac{n^{1/2}}{P} \right)^{1/2} \quad (6)$$

gdzie n jest ilorazem wymiaru sita w calach przez które przechodzi 80% nadawy oraz wymiar sita przez które przechodzi 80% produktu tzn. F/P .

3. Metodyka określania energochłonności procesu mielenia — wyznaczenie indeksu pracy Bonda

Test Bonda dla młynka prętowego

Test ten jest realizowany w młynku prętowym o wymiarach: średnica wewnętrzna 12 cali (305 mm), długość wewnętrzna 24 cale (610 mm), który wypełniony jest sześcioma prętami o długości 21 cali i łącznej wadze 33 380 g, z których cztery mają średnicę 1,25 cala a dwa – 1,75 cala. Młyn wypełniony jest 1250 cm³ badanego materiału o uziarnieniu poniżej 0,5 cala i wprawiony w ruch przy 46 obrotach na minutę. Analogicznie jak w teście Bonda dla młyna kulowego ustala się wielkość zawrotu ale na poziomie 100%. Wielkość G określa się tak jak przy młynie kulowym i wtedy indeks pracy Bonda dla mielenia mokrego określa się wzorem [1, 5]

$$W_i = 1,1 \frac{62}{P^{0,23} G^{0,625} \left[\frac{10}{P^{0,5}} - \frac{10}{F^{0,5}} \right]} \quad [\text{kWh/t}] \quad (7)$$

Test Bonda dla młynka kulowego

Indeks pracy Bonda W_i wyznaczany jest w standardowym młynku kulowym. Młynek ten ma wymiary wewnętrzne: 12 cali \times 12 cali (długość i średnica) czyli 305 \times 305 mm. Wypełniony jest 285 kulami (mielnikami) o łącznej masie 20,125 kg. Kule mają średnice między 0,6 cala (15,2 mm) a 1,5 cala (38,1 mm), przy czym 120 z nich musi mieć wymiar powyżej 1 cala. Liczba obrotów młynka jest ustalona i wynosi 70 obrotów na minutę. Wyjściową próbkę materiału badanego stanowi 700 cm³ materiału o uziarnieniu poniżej 3,35 mm. Po załadowaniu materiału młynek wykonuje 100 obrotów a po zatrzymaniu materiał rozdrobniony jest przesiewany na sicie kontrolnym (wybrany sicie seryjnym). Do produktu nadsitowego dodaje się świeżą nadawę aby znów uzyskać 700 cm³.

Mieszanka ta jest kierowana do młynka, który wykonuje tyle obrotów aby uzyskać zawrót 250%, tzn. aby zawierał 28,6% klasy przechodzącej przez sito kontrolne. Powtarzanie prób jest kontynuowane aż do momentu, gdy masa netto produktu kontrolnego (podsi-towego) liczona na jeden obrót pozostaje stała; oznaczamy ją przez G .

Jeżeli F jest wielkością oczka sita przez które przechodzi 80% nadawy (wsadu do młynka) a P jest wielkością sita kontrolnego, to indeks pracy Bonda określa wzór [1, 5]

$$W_i = 1,1 \frac{44,5}{P^{0,23} G^{0,82} \left[\frac{10}{P^{0,5}} - \frac{10}{F^{0,5}} \right]} \quad [\text{kWh/t}] \quad (8)$$

Dla rozdrabniania (mielenia) suchego indeks pracy Bonda uzyskuje się mnożąc W_i przez 1,3.

4. Analiza energochłonności procesu mielenia rudy miedzi na podstawie wyznaczonego indeksu pracy Bonda — określenie jednostkowej energii na rozdrabnianie

Podstawowym materiałem do badań była ruda dolomitowa przerabiana w O/ZWR Rejon Polkowice. Każdy z rejonów O/ZWR tj. Rudna, Polkowice i Lubin przerabia z różnym udziałem procentowym trzy typy litologiczne rud. Zmienny skład litologiczny a co z tym związane i skład mineralogiczny doprowadził do różnic w schematach technologicznych dla tych trzech rejonów. Różnice te obejmują także stosowane układy przygotowania rudy do właściwego procesu wzbogacania jakim jest flotacja oraz urządzenia rozdrabniające. Dotychczas jedynie O/ZWR Rejon Polkowice przerabiał rudę, którą blisko w 90 procentach stanowiła ruda dolomitowa. Obecnie z uwagi na wzrost udziału w przerabianej w tym rejonie rudzie urobku z rejonu Sieroszowic ten udział zaczyna się zmniejszać na rzecz wzrostu rudy piaskowcowej. Badania podatności na rozdrabnianie rudy miedzi przeprowadzono na młynku Bonda w Zakładzie Przeróbki Kopaliny, Ochrony Środowiska i Utylizacji Odpadów w Akademii Górniczo-Hutniczej.

Opracowana przez Bonda metoda oznaczania podatności na mielenie przewiduje, że nadawa do młynka musi mieć granulację poniżej 6 mesh, co odpowiada wymiarom oczka 3,35 mm. Praktycznie, przygotowując nadawę do badań w młynku Bonda, przesiano ją w całości przez sito 3,35 mm i do badań brano frakcje poniżej 3,35 mm.

Metoda Bonda zakłada przemiał w pozorowanym cyklu zamkniętym, przy czym rolę separatora spełnia sito kontrolne (100 μm). Krotność obiegu wynosi 250%. Oznacza to, że do młynka należy zawracać 2,5 g nadawy na 1 g produktu. Następnie oblicza się masę materiału w gramach dla frakcji poniżej 100 μm , którą należy uzyskać w wyniku próby: powinna ona wynosić 28,5% (waga 700 cm^3 wsadu do młynka dzielona przez 3,5 g tj. 1 g produktu plus 2,5 g nadziarna) w stosunku do masy nadawy do młynka. Tak obliczona ilość materiału (poniżej 100 μm) wyrażona w gramach, jest wielkością którą powinno się uzyskać; stanowi ona właśnie 28,5% masy nadawy.

Po każdym cyklu przemiału oznacza się współczynnik podatności na mielenie G ze wzoru [3]

$$G = \frac{A}{n_1} \quad (9)$$

gdzie:

- G — współczynnik podatności na mielenie, g/obr.;
- A — ilość frakcji poniżej 100 μm . uzyskana w pierwszym cyklu mielenia, g;
- n — liczba obrotów wykonanych przez młynek w pierwszym cyklu przemiału.

Następnie uzupełnia się wsad młynka pierwotną nadawą w ilości równej A . Kolejno oblicza się liczbę obrotów młynka dla następnego cyklu przemiału według wzoru [3]

$$n_2 = \frac{D - K}{G} \quad (10)$$

gdzie:

- n_2 — liczba obrotów młynka,
- D — ilość materiału, którą ma się uzyskać (28,5% nadawy), g;
- K — ilość frakcji poniżej 100 μm , która zostaje wprowadzona do młynka (w ilości A) z pierwotną nadawą, g.

Próbę mielności prowadzi się według wyżej podanego schematu, aż do momentu uzyskania zbliżonych wartości G . Ta końcowa wartość współczynnika mielności stanowi podstawę do obliczenia indeksu pracy W_i . Oblicza się go z empirycznego wzoru [3]

$$W_i = \left(\frac{16}{G^{0,82}} \right) \cdot \sqrt{\frac{P_0}{100}} \quad (11)$$

gdzie:

- W_i — indeks pracy Bonda, kWh/t;
- G — współczynnik mielności, g/obr.;
- P_0 — wielkość otworów sita kontrolnego, μm .

Wzór podaje zużycie energii na tak zwaną „krótką tonę” („krótka tona” = 907 kg); dla przeliczenia na tonę metryczną należy wartość W_i pomnożyć przez 1,1. Wskaźnik pracy W_i pozwala na proste obliczenie zapotrzebowania mocy dla młyna kulowego przy określonych wymiarach ziarn nadawy i produktu końcowego.

Dane literaturowe operują dość szerokimi zakresami zmienności wskaźników indeksów Bonda dla poszczególnych surowców. Związane jest to ze strukturą materiałów, ich kruchością czyli generalnie z podatnością na rozdrabnianie (Nawrocki 1989).

W tabeli 3 przedstawiono wyniki zmielenia rudy dolomitowej miedzi z O/ZWR Rejon Polkowice.

TABELA 3

Wyniki zmielenia rudy dolomitowej miedzi z O/ZWR Rejon Polkowice

Typ litologiczny rudy	Obroty, <i>n</i>	Czas	Ilość frakcji 0÷0,1 mm			<i>G</i> , g/obr.
			w produkcji	w nadawie	uzyskana	
Dolomit O/ZWR Rejon Polkowice (masa nadawy 1276,2 g, zawartość klasy – 0,1 mm = 12,6%)	100	1' 27"	284	164	120	1,20
	273	3' 58"	442	36	406	1,48
	208	3' 01"	411	57	354	1,70
	183	2' 39"	383	53	330	1,80
	175	2' 33"	372	49	323	1,84
Przyjęty wskaźnik $G = 1,82$ g/obr. Indeks pracy $W_i = 10,8$ kWh/t						

5. Analiza energochłonności dla pomiarów przemysłowych

Innym podejściem jest wyznaczenie indeksu pracy Bonda na podstawie ilości energii zużywanej w rzeczywistości. Jeżeli W jest pobraną energią mierzoną w kWh/t, W_e — wyliczonym wskaźnikiem Bonda, F i P ziarnami 80% w nadawie i produkcji (mierzonymi w mikrometrach), to

$$W = 10 \cdot W_e (P^{-1/2} - F^{-1/2}) \quad [\text{kWh/t}] \quad (12)$$

Do wyznaczenia indeksu pracy Bonda dla warunków przemysłowych wykorzystano dane z eksperymentu w którym zmieniano przerób młyna A MK131 (młyn pierwszego zmielenia rudy pracujący na I ciągu technologicznym O/ZWR Rejon Polkowice produkcji Markrum typ 41.02). Eksperyment prowadzono dla trzech poziomów przerobu młyna: niskiego — ok. 85 Mg/h, normalnego — ok. 100 Mg/h i wysokiego — ok. 115 Mg/h. W trakcie eksperymentu pobierano próbki nadawy i wylewu młyna w celu oznaczenia składu ziarnowego (rys. 2) oraz rejestrowano pobór energii przez silnik napędowy młyna.

Zestawienie wyników obliczeń wskaźników zapotrzebowania na energię dla danego stopnia rozdrobnienia na podstawie wzoru 12 ($W_{teoretyczne}$) oraz uzyskanych w warunkach przemysłowych rzeczywistego zużycia energii i wielkości przerobu materiału ($W_{praktyczne}$) dla młyna kulowego:

Przerób niski:

$$W_{teoretyczne} = 4,04 \text{ kWh/t (dla danych: } P = 500 \text{ } \mu\text{m; } F = 19\,000 \text{ } \mu\text{m) (rys. 2)}$$

$$W_{praktyczne} = 5,40 \text{ kWh/t (dla danych: pobór mocy = 459 kW; wydajność 85 t/h)}$$

Przerób normalny:

$$W_{teoretyczne} = 2,37 \text{ kWh/t (dla danych: } P = 1\,190 \text{ } \mu\text{m; } F = 20\,200 \text{ } \mu\text{m) (rys. 2)}$$

$$W_{praktyczne} = 4,55 \text{ kWh/t (dla danych: pobór mocy = 455 kW; wydajność 100 t/h)}$$

Przerób wysoki:

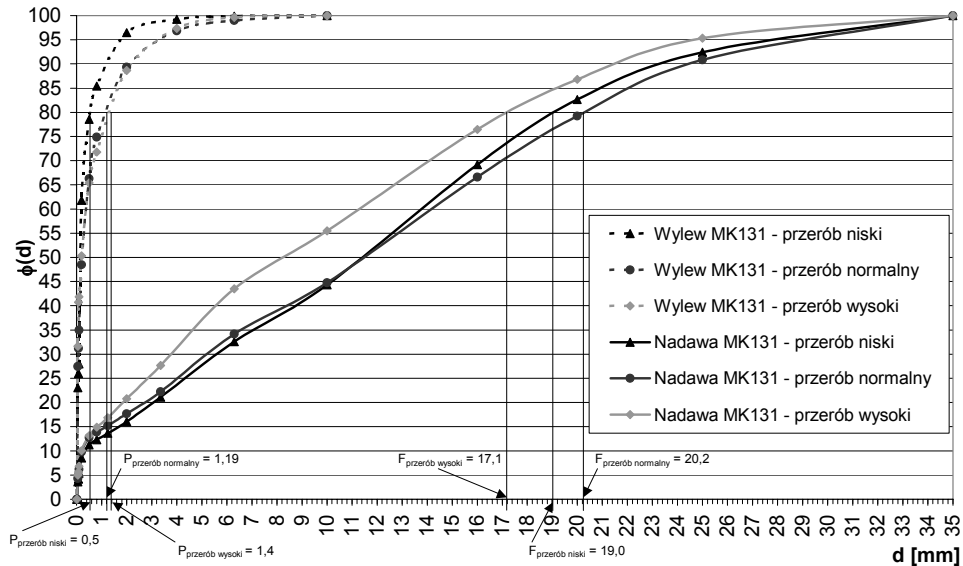
$W_{teoretyczne} = 2,06 \text{ kWh/t}$ (dla danych: $P = 1\,400 \mu\text{m}$; $F = 17\,100 \mu\text{m}$) (rys. 2)

$W_{praktyczne} = 3,98 \text{ kWh/t}$ (dla danych: pobór mocy = 458 kW; wydajność 115 t/h)

gdzie:

P — d_{80} produktu,

F — d_{80} nadawy.



Rys. 2. Krzywe składu ziarnowego nadawy i wylewu młyna kulowego dla trzech poziomów przerobu

Powyższe zestawienie wykazuje zbieżność obliczeń teoretycznych z uzyskanymi wynikami praktycznymi. Pewne różnice pomiędzy wartościami teoretycznymi a rzeczywistymi wynikami wskaźników energetycznych mogą wynikać z omawianego już wcześniej faktu iż przerabiana ruda jest mieszanką trzech typów litologicznych z coraz większym udziałem rudy piaskowcowej. Najbardziej zbliżone do siebie są wartości wskaźnika teoretycznego dla niskiego poziomu z wskaźnikiem praktycznym uzyskanym w warunkach rzeczywistych przy wysokim przerobie młyna. Wyniki eksperymentu potwierdziły znany fakt iż przerób ma znikomy wpływ na pobór energii przez silnik napędowy młyna, co wynika z dużej masy własnej oraz stopnia wypełnienia go mielnikami. Może to oznaczać że są pewne możliwości w zakresie ustalenia optymalnego z punktu widzenia poboru energii przerobu na tym młynie tj. określenie wypełnienia młyna mielnikami zapewniające pożądany skład ziarnowy produktu w odniesieniu do składu ziarnowego nadawy i ustalenie maksymalnego przerobu zapewniającego właściwy wskaźnik energochłonności.

6. Wnioski

Energetyczne teorie rozdrabniania polegające na powiązaniu stopnia rozdrabniania materiału uziarnionego z zużytą energią znajdują praktyczne zastosowanie w określaniu zapotrzebowania na energię konieczną do rozdrobnienia danego materiału dożądanego poziomu i umożliwiają dobór właściwych urządzeń zarówno co do rodzaju jak i typu.

Wyniki badań potwierdziły dużą zbieżność obliczeń teoretycznych z uzyskanymi wynikami praktycznymi poboru energii koniecznej do rozdrobnienia rudy miedzi. Wykazano możliwość optymalizacji pracy młyna pod względem poboru energii dostosowując odpowiednio przerób w celu uzyskania zmniejszenia zużycia energii na jednostkę przerobionej rudy.

LITERATURA

- [1] *Lowrison G.C.*: Crushing and grinding, Butterworths, London 1974
- [2] *Nawrocki J.*: Teoria i praktyka rozdrabniania, Gliwice 1989
- [3] *Naziemiec Z.*: Określenie indeksu pracy Bonda dla kamienia wapiennego z Czatkowic. IMMB Kraków 1994 (praca niepublikowana)
- [4] *Sokolowski M.*: Energia rozdrabniania. Instytut Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego, Warszawa 1995
- [5] *Tora B.*: Wybrane metody badania podatności na mielenie. Inżynieria Mineralna Z.S., nr S.3(10), 2003
- [6] *Trybalski K., Krawczykowski D.*: Energetyczne wskaźniki oceny procesu mielenia rudy miedzi i ich modelowanie. UWN-D AGH Górnictwo i Geoinżynieria z. 4, 2005