

energochłonność, rozdrabnianie, kruszywa mineralne

Zdzisław NAZIEMIEC*

Daniel SARAMAK**

ANALIZA ENERGOCHŁONNOŚCI PROCESÓW ROZDRABNIANIA KRUSZYW MINERALNYCH

Rozdrabnianie należy do najbardziej energochłonnych operacji przeróbczych stosowanych w procesach produkcji kruszyw łamanych. Na zużycie energii podczas procesu rozdrabniania wpływa szereg czynników związanych z charakterystyką nadawy i produktu, rodzajem zastosowanego urządzenia rozdrabniającego i sposobem prowadzenia procesu. Przedstawiono zależności pomiędzy parametrami nadawy i produktu końcowego a zużyciem energii przez różnego typu urządzenia kruszące. Przeanalizowano wpływ różnych parametrów procesu na zużycie energii w świetle najbardziej znanych teorii rozdrabniania oraz podano wyniki pomiarów energochłonności przeprowadzonych w skali przemysłowej.

1. WSTĘP

Wśród operacji przeróbczych stosowanych w procesach produkcji kruszyw łamanych rozdrabnianie należy do najważniejszych i najbardziej energochłonnych. Redukcja uziarnienia następuje w różnego typu kruszarkach, gdzie w wyniku wywołania odkształceń, którym towarzyszą naprężenia krytyczne dla danego ciała, powodujące rozpad skały, uzyskuje się zwiększenie powierzchni właściwej rozdrabnianego materiału, zmianę kształtu ziaren, a w pewnych przypadkach także zmianę podatności na dalsze rozdrabnianie. Rozdrabnianie jest operacją kosztowną ze względu na duże zużycie energii i szybkie zużywanie się części roboczych urządzeń kruszących. Z powyższych względów powinno się przestrzegać zasady sformułowanej przez Czeczotta: „Nie rozdrabiać niczego niepotrzebnie”, gdyż zbyt daleko posunięte rozdrabnianie prowadzi do zużycia maszyny kruszącej, zmniejszenia wydajności zakładu przeróbczego, a także niepotrzebnej straty surowca, którego bardzo drobne frakcje często stanowią materiał odpadowy. Jest to powodem poszukiwań nowych rozwiązań kon-

* Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział SiMB w Krakowie,
znaziemiec@immb.com.pl

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców,
30-059 Kraków, al. A. Mickiewicza 30, dsaramak@agh.edu.pl

strukcyjnych kruszarek [6, 7], odznaczających się łatwą obsługą, dużą trwałością, znaczną siłą kruszenia, niskim zużyciem energii i pozwalających uzyskać korzystną granulację produktu.

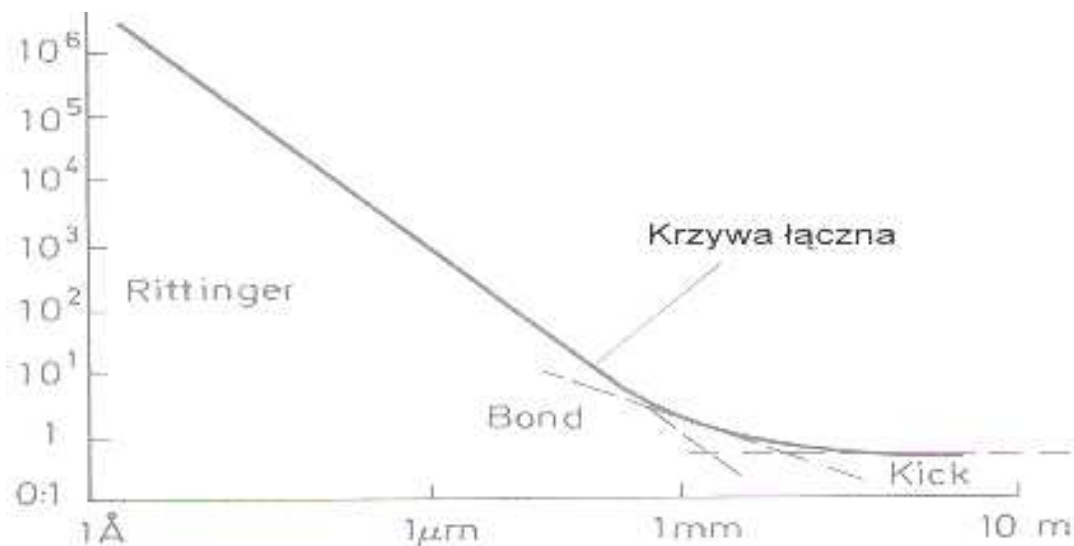
Znane teorie rozdrabniania różnią się między sobą w niektórych punktach i nie dają zadowalającej odpowiedzi na problemy dotyczące energochłonności procesów kruszenia. Teoria Rittingera odnosi się do mielenia drobnego, teoria Bonda do mielenia grubego (ok. 1–10 mm), a teoria Kicka, z różnymi ograniczeniami, do kruszenia grubego. Z wymienionych – jedynie teoria Bonda znalazła szersze zastosowanie w skali przemysłowej.

Powyższe teorie nie wyczerpują wszystkich prób opisu procesów rozdrabniania i znalazły swoje rozwinięcia w pracach Rebintera, Schönerta, Rumpfa, Charlesa, Bracha i in. [1]. Wszystkie te teorie z pewnym uproszczeniem opisać można wzorem

$$L = Cx^{-m} \quad (1)$$

gdzie:

- L – praca potrzebna na rozdrobnienie,
- C – stała materiałowa,
- x – średnica ziarna nadawy,
- m – wykładnik potęgi przyjmujący wartość równą 1 dla teorii Rittingera; $m = 0,5$ dla teorii Bonda; $m = 0$ dla teorii Kicka*



Rys 1. Wpływ wielkości ziaren na ilość energii potrzebnej do ich rozdrabniania w kWh/Mg [5]
Fig.1. Particle size influence on the demanded comminution energy [5]

* Jest to tzw. wzór Charlesa, z którego dla teorii Kicka uzyskuje się wątpliwy wynik. Kick jednak nie mówi o rozdrabnianiu od jednej wielkości ziarna do drugiej, lecz o jednorazowym skruszeniu, przy czym praca takiego jednorazowego skruszenia jest stała dla masy 1 kg danego materiału, niezależnie od wielkości ziaren x .

W procesach kruszenia niszczenie ziaren skały następuje w wyniku ściskania, łamania, udaru lub ścierania. Dominacja jednego z tych oddziaływań decyduje o energochłonności i efektach rozdrabniania. W ostatnich latach do opisu procesów kruszenia coraz częściej stosuje się teorię plastyczności i teorię stanów granicznych.

Wyniki uzyskiwane przy ściskaniu próbek skalnych stemplami o różnych kształtach wskazują na bardzo duże zróżnicowanie zapotrzebowania energii na zniszczenie próbki. Wyniki badań wytrzymałości skał na ściskanie, rozciąganie, czy zginanie, również cechują się bardzo dużym zróżnicowaniem. Wynika stąd, że rodzaj oddziaływania niszczącego, a tym samym rodzaj zastosowanego urządzenia rozdrabniającego ma decydujący wpływ na energochłonność i efektywność rozdrabniania. Badania w skali laboratoryjnej i ich przemysłowa weryfikacja umożliwiają poznanie wzajemnych zależności i ułatwiają projektowanie urządzeń rozdrabniających i dokonanie optymalnych wyborów urządzeń kruszących do realizacji określonych zadań w procesach przeróbki. Na rys. 1 przedstawiono wpływ wielkości ziaren na ilość energii potrzebnej do ich rozdrabniania, w świetle różnych teorii rozdrabniania.

2. UWARUNKOWANIA PROCESÓW KRUSZENIA

W Polsce w ostatnich latach nastąpił duży rozwój w dziedzinie wyposażenia zakładów w różnego rodzaju kruszarki i młyny. Wiąże się to z dużym wzrostem zapotrzebowania na kruszywa naturalne drobne i grube. Łączna wielkość produkcji kruszyw naturalnych (piaskowo-żwirowych i łamanych, uzyskiwanych ze skał litych) w ostatnich latach kształtuje się w Polsce na poziomie większym od 200 mln Mg/rok. Jest to obecnie największa gałąź przetwórstwa surowców mineralnych, stanowiących podstawę rozwoju gospodarczego (budownictwo mieszkaniowe, budownictwo przemysłowe, drogownictwo). Efektywność procesu kruszenia generalnie zależy od następujących czynników:

- a) charakterystyk rozdrabnianego materiału,
- b) rodzaju zastosowanych urządzeń rozdrabniających,
- c) technologii rozdrabniania (obieg otwarty, obieg zamknięty, zastosowanie odsiewu wstępnego, liczba stopni rozdrabniania)

Ad a) Energochłonność procesów rozdrabniania zależy od rodzaju rozdrabnianego surowca oraz składu ziarnowego nadawy i produktów. Stosunek reprezentatywnych wielkości ziaren nadawy D do wielkości ziaren produktu d , jest podstawowym wskaźnikiem opisującym proces rozdrabniania, nazywanym *stopniem rozdrobnienia* i :

$$i = D / d \quad (2)$$

W zależności od sposobu ustalenia wielkości ziaren nadawy i produktu określa się stopień rozdrobnienia pozorny, graniczny, 80-procentowy, średni. Rodzaj rozdrabnianego surowca można z kolei scharakteryzować przy pomocy takich właściwości jak

wytrzymałość na ściskanie, odporność na rozdrabnianie, ścieralność, mielność itp. Znanych jest bardzo wiele metod oznaczania tych właściwości, przykładowo, samych metod oznaczania mielności (podatności na rozdrabnianie) jest ponad 20. W literaturze często spotkać się można np. z informacją, że indeks pracy Bonda dla wapieni wynosi $W_i = 13\text{--}14$ kWh/Mg. W badaniach prowadzonych w ICiMB dla krajowych wapieni uzyskiwano wyniki w przedziale 6–15 kWh/Mg. Widać stąd, że parametr ten będzie miał bardzo duży wpływ na wielkość zużycia energii w procesie rozdrabniania różnych wapieni. W opisie procesów kruszenia podaje się wpływ różnych parametrów (rodzaj skały, wilgotność, parametry wytrzymałościowe, wielkość ziaren nadawy) na efekty rozdrabniania (wydajność, stopień rozdrobnienia, skład ziarnowy, kształt ziaren itp.). Zależności te są jednak zmienne dla różnych surowców i różnych maszyn. Najbardziej widoczny jest brak kompleksowego porównania efektywności rozdrabniania różnych surowców skalnych w różnych rodzajach urządzeń kruszących. Prezentowany artykuł przybliży zagadnienia związane z energochłonnością i efektywnością procesu rozdrabniania, mierzoną za pomocą takich parametrów jak: wydajność, stopień rozdrobnienia skład ziarnowy produktu, kształt ziaren produktu.

Tabela 1

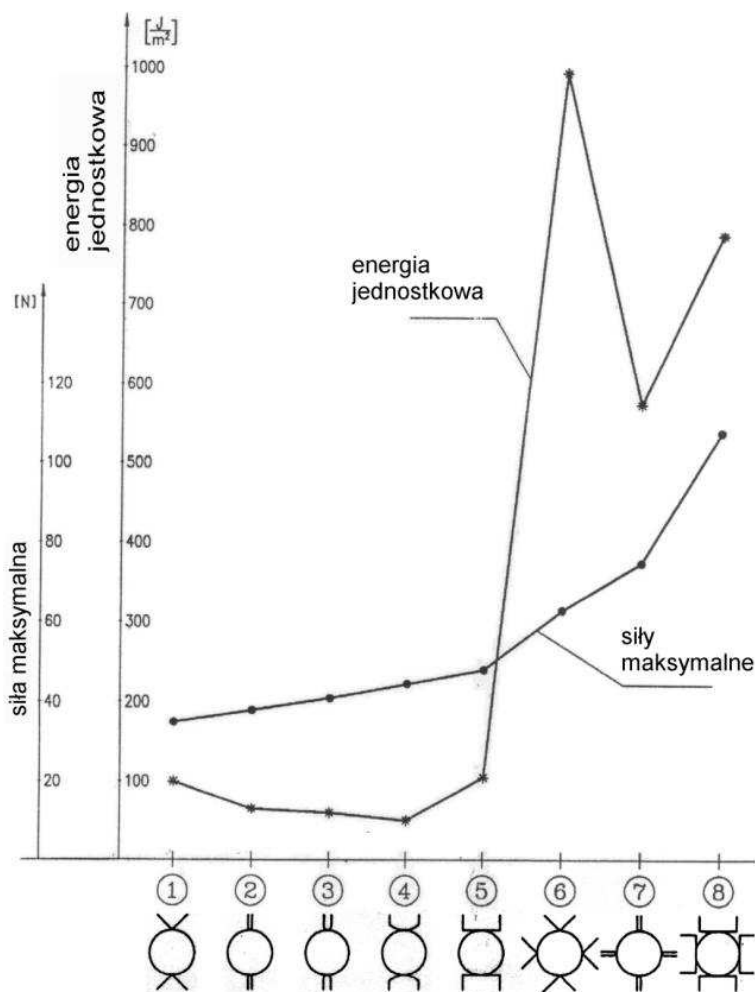
Charakterystyka wytrzymałościowa wybranych skał

Badany surowiec skalny	Wytrzymałość na ściskanie (stan suchy) R_c [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie (stan nasycenia wodą) R_c [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R_r [MPa]	Indeks pracy Bonda W_i [kWh/Mg]
bazalt	210–300		10–80	19
granit	164		3–25	11
piaskowiec	60–150 (170)	50–85	8–12	11
chalcedonit	60–120	42–85		19
dolomit	80–150	52–98	15–25	13
wapień zwięzły	80–140	56–100	9–15	9,5–12

W tabeli 1 podano orientacyjne parametry wytrzymałościowe dla różnych surowców skalnych. Wytrzymałość na rozciąganie określona może być różnymi metodami: rozciąganie bezpośrednie, metoda brazylijska, rozłupywanie rdzeni, metoda współśrodkowych stempli, zginanie belek, zginanie płyt kołowych. Wyniki otrzymane w poszczególnych metodach różnią się pomiędzy sobą nawet trzykrotnie. Warto zwrócić uwagę na duże różnice pomiędzy wytrzymałością na ściskanie i rozciąganie, a także na różnice wytrzymałości na ściskanie skał suchych i skał nasyconych wodą. Czynniki te posiadają wpływ na energochłonność procesów rozdrabniania [2, 3].

Ad b) Rodzaj zastosowanej kruszarki ma bardzo duży wpływ na energochłonność procesu, a dobór urządzenia powinien być poprzedzony analizą charakterystyki surowca przeznaczonego do rozdrabniania. Często jednak wybór urządzeń rozdrabniających dokonywany jest jedynie w oparciu o dane dotyczące wydajności i kosztów

danego urządzenia. Brak jest dokładnego rozeznania w dziedzinie efektywności rozdrabniania w różnych urządzeniach. Skutkiem niewłaściwie dobranych urządzeń rozdrabniających jest nie tylko duże zużycie energii, ale również gorsza jakość produktu, zwiększona liczba frakcji niepożądanych oraz szybsze zużywanie się elementów roboczych urządzenia rozdrabniającego (wykładzin szczęk, stożków, płyt odbojowych, walców, elementów udarowych).

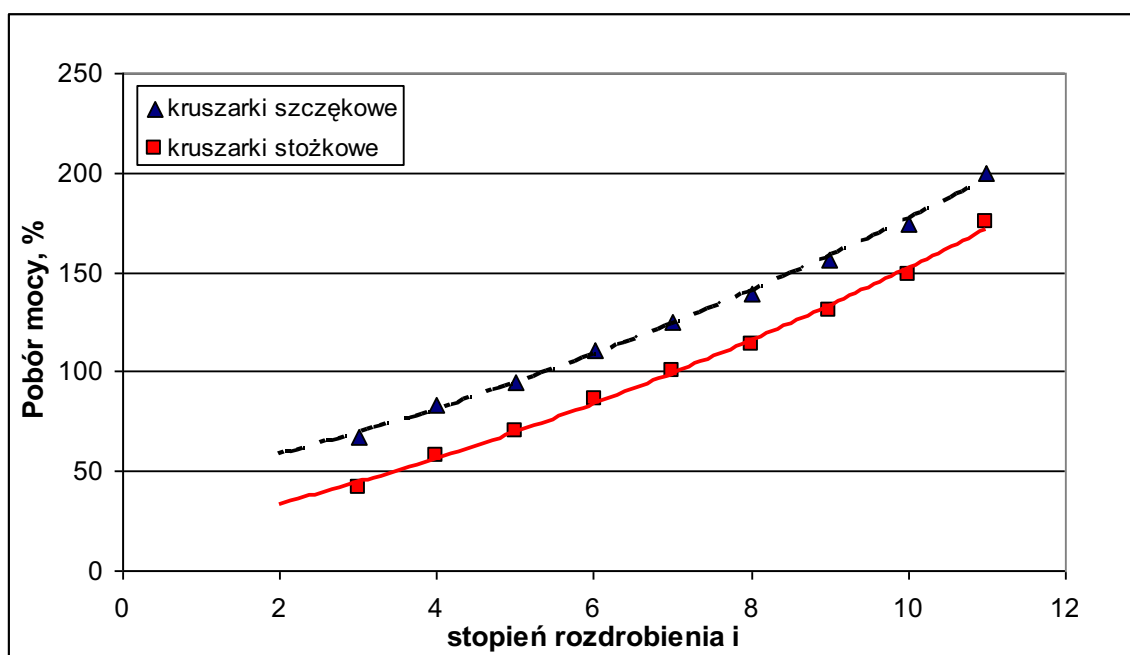


Rys. 2. Siły maksymalne i energia jednostkowa dla różnych sposobów obciążania materiału [9]
 Fig. 2. Maximum forces and the unit energy for various manners of the material load [9]

Wpływ różnego ukształtowania elementów roboczych powodujących zniszczenie badanych próbek surowców skalnych pokazano na rys. 2. Dzięki odpowiedniemu ukształtowaniu stempli można osiągnąć znaczne obniżenie zarówno sił niszczących jak i zużycia energii. W budowie kruszarek fakt ten jest uwzględniany, np. poprzez zastosowanie w kruszarkach szczękowych wykładzin szczęk o różnym profilu rowkowania jak i zastosowanie różnego ukształtowania kowadeł i elementów udarowych w kruszarkach udarowych.

3. CZYNNIKI DETERMINUJĄCE ENERGOCHŁONNOŚĆ PROCESU KRUSZENIA

Zużycie energii w procesach kruszenia zależy od bardzo wielu czynników. Stopień rozdrobnienia ma wpływ przede wszystkim na pobór mocy przez kruszarki. Na rysunku 3 przedstawiono wpływ stopnia rozdrobnienia na pobór mocy przez kruszarki stożkowe i szczękowe. Wraz ze zwiększeniem stopnia rozdrobnienia materiału następuje wzrost zużycia energii. Pobór mocy przez kruszarki szczękowe w analizowanym przypadku był wyższy o około 25%, niż przez kruszarki stożkowe.

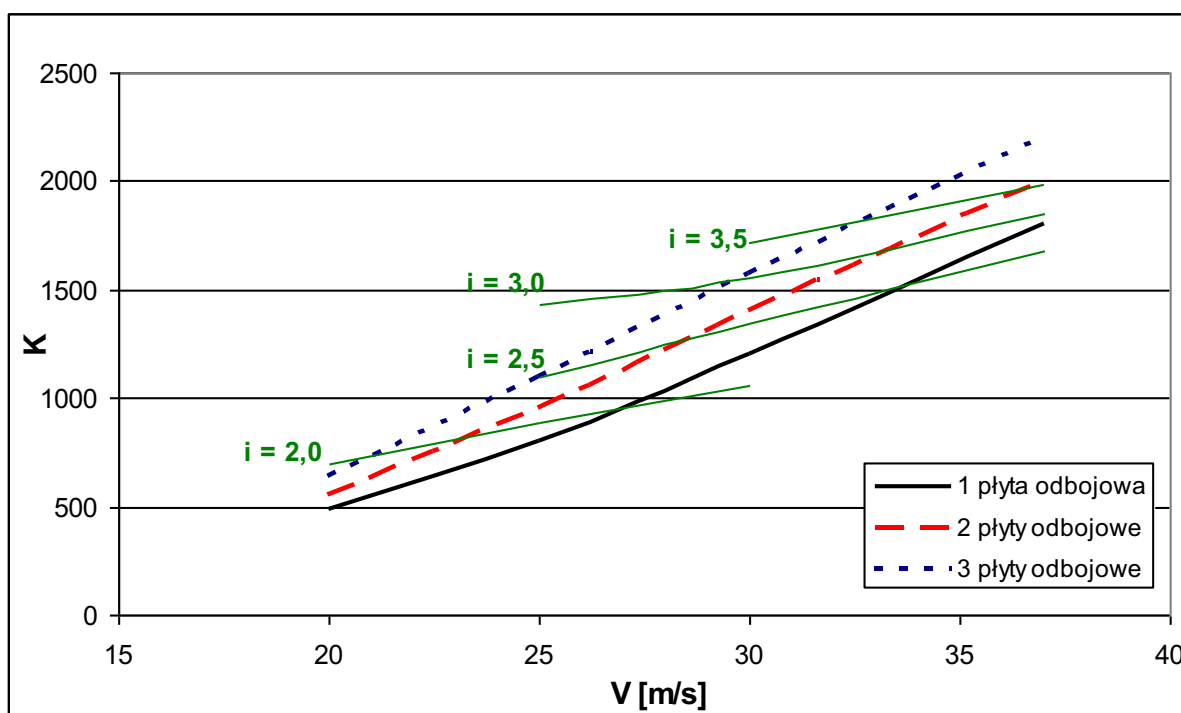


Rys. 3. Zależność względnej mocy kruszenia od stopnia rozdrobnienia i [8]

Fig. 3. Relationship between relative power of i comminution degree [8]

Z rysunku 3 wynika, że na energochłonność procesu rozdrabniania wpływa nie tylko stopień rozdrobnienia, ale również rodzaj zastosowanego urządzenia kruszącego. Wpływ na energochłonność procesu rozdrabniania mają także parametry konstrukcyjne danego urządzenia. Na rysunku 4 przedstawiono, w jaki sposób na energochłonność kruszenia wpływa prędkość liniowa elementów uderowych i liczba płyt odbojowych w kruszarkach uderowych.

Z analizy przedstawionych zależności wynika, że z energetycznego punktu widzenia dany stopień rozdrobnienia korzystniej jest uzyskać stosując większą liczbę płyt odbojowych i niższą prędkość liniową listew udarowych. Warto jednak pamiętać, że wzrost liczby płyt odbojowych zwiększa również liczbę najdrobniejszych frakcji, które mogą być niepożądane w danym procesie przeróbki. Najwyższe przyrosty stopnia rozdrobnienia uzyskuje się zwiększając prędkości listew udarowych. Jest to jednak rozwiązanie bardziej kosztowne z uwagi na zwiększone zużycie energii jak i zwiększenie szybkości zużycia listew, która wzrasta proporcjonalnie do kwadratu ich prędkości liniowej.

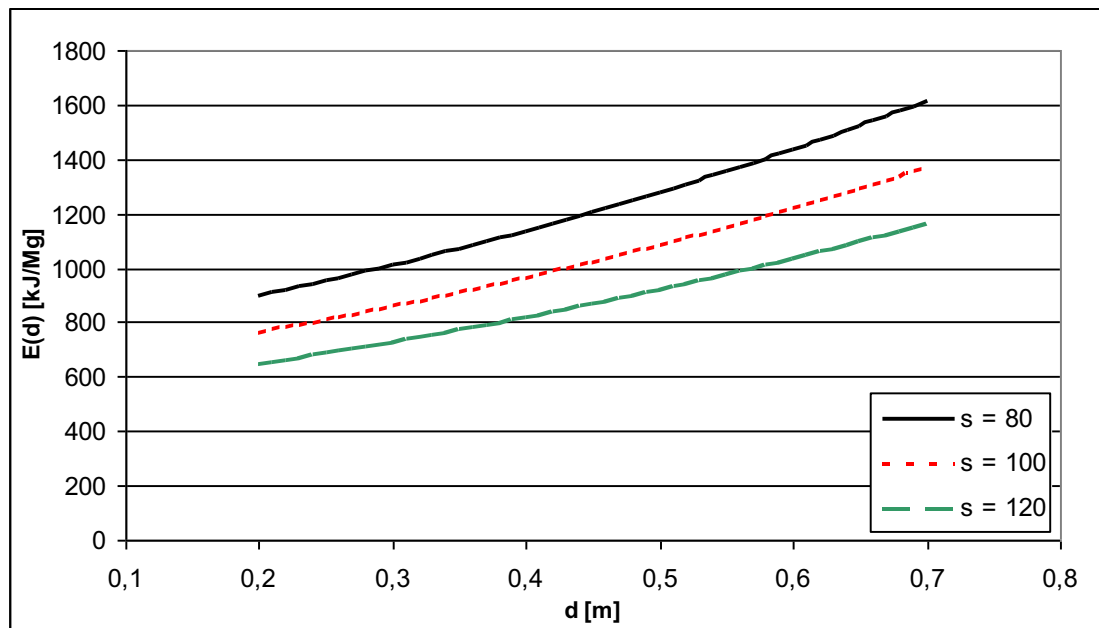


Rys. 4. Wpływ prędkości liniowej listew udarowych i liczby płyt odbojowych kruszarki udarowej na stopień rozdrobnienia i oraz energochłonność procesu kruszenia K [4]

Fig. 4. Influence of the linear speed of impact crusher impaction parts on the comminution degree i and the energy-consumption K [4]

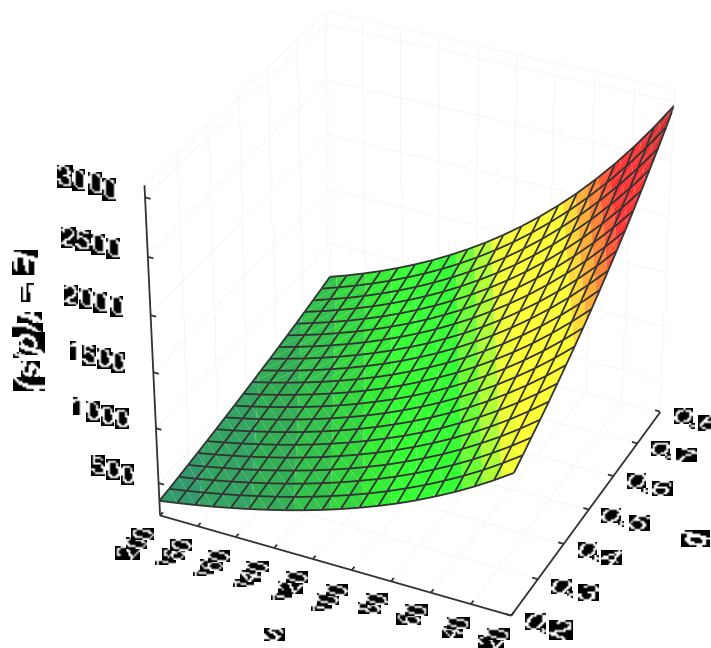
Na rysunku 5 przedstawiono przebieg zmian zużycia energii dla kruszarek szczękowych, w zależności od wielkości szczeliny wylotowej s i wielkości nadawy d , przy napełnieniu komory kruszenia $n = 0,7$.

Podobnie jak na rysunku 3, dla zmniejszającej się szczeliny wylotowej s , a więc dla wzrastającego stopnia rozdrobnienia następuje wzrost zużycia energii. Zależności funkcyjne z rysunku 5 przedstawiono w układzie przestrzennym na rysunku 6.



Rys. 5. Zależność zużycia energii od wielkości średniego ziarna nadawy d , dla różnych wartości szczeliny wylotowej s kruszarek szczękowych [10]

Fig. 5. Relationship between the energy-consumption and the maximum feed particle size d , for various values of gap in jaw crushers [10]



Rys. 6. Zużycie energii przez kruszarki szczękowe w funkcji wielkości szczeliny wylotowej s i wielkości ziarna nadawy d

Fig. 6. The energy consumption for jaw crushers as a two-variable function of gap s and feed particle size d

4. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH I PRZEMYSŁOWYCH

Aby obliczyć zużycie energii przy rozdrabnianiu danego surowca, należy znać jego podatność na rozdrabnianie. Najbardziej znaną metodą określania mielności różnych surowców jest metoda Bonda dla młynka kulowego. Wskaźnik pracy W_i oblicza się z uproszczonego wzoru:

$$W_i = \frac{16}{G^{0,82}} \sqrt{\frac{\gamma}{100}} \cdot 1,1 \quad [\text{kWh/Mg}] \quad (3)$$

gdzie:

γ – wielkość otworów sita kontrolnego w $[\mu\text{m}]$; w naszym przypadku $100 \mu\text{m}$

G – ilość drobnego materiału powstającego podczas jednego obrotu młynka

Zużycie energii rozdrabniania określa wzór:

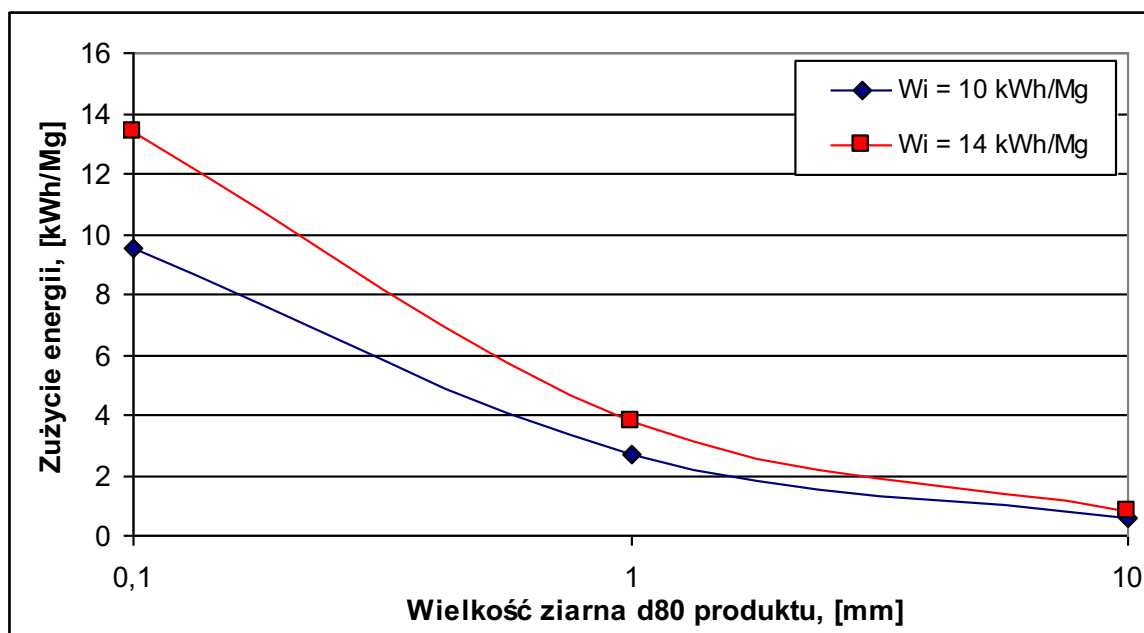
$$W = 10 \cdot W_i \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right) \quad [\text{kWh/Mg}] \quad (4)$$

gdzie:

W_i – indeks pracy Bonda

d_{80} – ziarno 80% produktu $[\mu\text{m}]$

D_{80} – ziarno 80% nadawy $[\mu\text{m}]$



Rys. 7. Zużycie energii na rozdrabnianie wg wzorów Bonda dla materiałów o różnej podatności na rozdrabnianie i różnych wielkości ziarna produktu końcowego d_{80}

Fig. 7. The crushing energy utilization according to the Bond formulas for the materials with different grind abilities and d_{80} product particle size

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki obliczeń zużycia energii, przy rozdrabnianiu różnych surowców, zależnie od wielkości ziarna produktu końcowego. Obliczenia wykonano dla wielkości ziarna wejściowego $D_{80} = 50$ mm.

Analizując wyniki z rysunku można zauważyć, że wraz ze zmniejszaniem się wymiaru ziarna produktu następuje coraz większy wzrost zużycia energii, co potwierdza też teoria Rittingera.

W przemysłowych układach krusząco-sortujących procentowy udział poszczególnych operacji przerobczych w zużyciu energii elektrycznej wynosi:

- kruszenie 70–85%,
- przesiewanie, dozowanie wibracyjne 8–15%,
- transport przenośnikami taśmowymi 7–15%.

W kilku zakładach kruszywowych i przeróbki rud dokonano pomiarów zużycia energii elektrycznej w procesie kruszenia. Wyniki przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Parametry techniczno-technologiczne procesu kruszenia skał w różnych kruszarkach

Typ kruszarki	Parametry techniczno-technologiczne					
	nadawa [mm]	produkt [mm]	stopień rozdr. S90	wydajność [Mg/h]	moc zainstal. [kW]	jednostkowe zużycie energii [kWh/Mg]
stożkowa układ zamknięty	dolomit 10–50	0–10	3,5	214	450	1,26
stożkowa układ otwarty	dolomit 15–50	0–30	1,8	307	450	0,88
udarowa Ø 1500 × 2000 układ zamknięty	dolomit 10–50	0–10	3,5	320	400	0,84
udarowa Ø 1540 × 2490 układ otwarty	wapień 30–100	0–30	2,3	450	2 × 370	0,62
szczękowa 1100 × 650 układ otwarty	chalcedonit 0–400	0–100	3,9	160	260	1,26

Duża zmienność uzyskanych wyników wskazuje na to, iż bez dokładnej znajomości wszystkich parametrów procesu kruszenia i charakterystyki rozdrabnianej skały, trudno jest dokonać porównania jednostkowego zużycia energii dla poszczególnych rodzajów kruszarek. Charakterystyczne jednak jest stosunkowo niskie zużycie energii w kruszarkach udarowych.

5. PODSUMOWANIE – KIERUNKI ROZWOJU W PROCESACH PRODUKCJI KRUSZYW

W literaturze spotkać można jedynie ogólne informacje na temat efektywności rozdrabniania w różnych kruszarkach i energochłonności procesów kruszenia. W praktyce przemysłowej na wstępnych stopniach kruszenia stosuje się kruszarki szczękowe i droższe, ale bardziej wydajne kruszarki stożkowe. Na wtórnych stopniach kruszenia stosowane są kruszarki stożkowe i kruszarki udarowe z wałem poziomym. Na końcowych stopniach kruszenia stosowane są tzw. granulatory–stożkowe lub coraz częściej udarowe z pionowym wałem. Najbardziej energochłonne są procesy przemiału w młynach kulowych (rurowych). W nowoczesnych instalacjach przemiałowych pracują energooszczędne pionowe młyny rolowo-misowe. Za bardziej energooszczędne uważane są wysokociśnieniowe prasy walcowe i mało jeszcze znane młyny typu vertimil i horomil. Brak jest porównań efektywności i energochłonności rozdrabniania dla różnych urządzeń pracujących w instalacjach o zbliżonym profilu produkcji. Niekiedy trudno jest przenieść pozytywne wyniki uzyskiwane w danych warunkach do rozdrabniania innego surowca i z innym przeznaczeniem. Typowym przykładem mogą tu być prasy walcowe wysokociśnieniowe. Pracują one z dobrymi wynikami w przemiałowniach mączek wapiennych gruboziarnistych. Nie nadają się jednak do produkcji kruszyw. Przyczyna tkwi w tym, że kruszywo otrzymane z prasy walcowej posiada naruszoną strukturę wewnętrzną i charakteryzuje się niższą odpornością na rozdrabnianie LA niż kruszywo otrzymane z kruszarek stożkowych czy udarowych. Prasy walcowe są jednak wskazane w przeróbce rud metali, gdyż rozdrobniony produkt z nich otrzymywany charakteryzuje się o około 30% większą podatnością na mielenie Wi w młynach kulowych.

Ustalenie zależności występujących pomiędzy różnymi parametrami procesu kruszenia i ich wpływu na efekty rozdrabniania pozwala na dokonywanie optymalnych wyborów rodzajów urządzeń kruszących, zależnie od jakości przerabianego surowca i oczekiwanych parametrów produktów końcowych (kruszyw grubych i drobnych). Wybór odpowiedniego urządzenia rozdrabniającego zapewnia uzyskanie produktu o oczekiwanej jakości, przy równoczesnym zminimalizowaniu zużycia energii i ograniczeniu ilości odpadów (np. frakcji pylastych powstających w procesie produkcji kruszyw). Ma to bardzo duże znaczenie z uwagi na fakt, że procesy rozdrabniania należą do najbardziej energochłonnych operacji przeróbczych. Na energochłonność procesów rozdrabniania wpływa ponadto wielkość średniego ziarna nadawy, ważne jest zatem zagadnienie optymalizacji uziarnienia urobku pochodzącego z robót strzałowych prowadzonych w kopalniach odkrywkowych.

Artykuł jest wynikiem projektu badawczego NN 524 466 139 MniSW ze środków finansowych na lata 2010–2013.

LITERATURA

- [1] BRACH I., *Teoretyczne podstawy rozdrabniania ciał kruchych*, Konf. Rozdrabnianie i sortowanie w przeróbce kopalni użytecznych, Częstochowa 1972.
- [2] MAJCHERCZYK T., *Badanie fizycznych własności skał*, Skrypt AGH, Kraków 1989.
- [3] MALEWSKI J., *Przeróbka kopalni. Zasady rozdrabniania i klasyfikacji*, Skrypt PWr., Wrocław 1981.
- [4] MAZELA A., *Procesy kruszenia w kruszarkach udarowych*, IMBiGS, Warszawa 1988.
- [5] NAWROCKI J. i in., *Teoria i praktyka rozdrabniania*, Gliwice 1989.
- [6] NAZIEMIEC Z., *Zasady optymalnego doboru parametrów technicznych kruszarek przy rozdrabnianiu materiału skalnego w procesie produkcji kruszywa łamanego*, Kopaliny Podstawowe i Pospolite Górnictwa Skalnego nr 6/2009–1/2010.
- [7] NAZIEMIEC Z., GAWENDA T., *Ocena efektów rozdrabniania surowców mineralnych w różnych urządzeniach kruszących*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr., nr 115, Wrocław 2006.
- [8] *Poradnik Górnika*, t. V, Katowice 1976.
- [9] ZAWADA J., *Wstęp do mechaniki procesów kruszenia*, Wyd. i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 1998.
- [10] ZYCH S., *Gabaryty urobku a energochłonność procesu wydobywczo-przetwórczego*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr., nr 91, Wrocław 2000.

THE ENERGY-CONSUMPTION ANALYSIS IN
MINERAL AGGREGATES CRUSHING PROCESSES

Industrial comminution is the most energy consuming operation in the aggregate production sector. Several factors, including the the feed and products properties, type of applied device, and the technological process run, have an effect on the level of the process energy-consumption. The relationships between the feed and final product characteristics and the energy consumption of various crushing devices were presented in the paper. An influence of selected process parameters on the level of energy consumption was analyzed in the light of the most common comminution theories, the results of pilot plant scale energy consumption results were also presented. Main directions of development of crushing devices, applied in the sector of fillers and coarse aggregate production, were indicated in the article.