

Wydatek energetyczny procesu rozdrabniania różnych skał za pomocą autorskiego młynka udarowego

MATEUSZ KUDASIK, NORBERT SKOCZYŁAS

Instytut Mechaniki Górniczej PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

Ocena wydatku energetycznego procesu rozdrobnienia danego materiału jest niezwykle istotna przy projektowaniu, budowie, czy też doborze urządzeń rozdrabniających. W Pracowni Mikromerytyki IMG PAN powstał prototyp urządzenia do rozdrabniania skał w kontekście oceny gazu zawartego w ich porach. W ramach przeprowadzonych prac zbadano moc i energię niezbędną do rozdrabniania różnych skał za pomocą zbudowanego urządzenia. Do badań użyto próbki dolomitu, anhydrytu, piaskowca, wapienia, węgla i granitu, pochodzące z różnych polskich kopalń. W pracy podjęto doświadczalną próbę odpowiedzi na pytanie: od jakich parametrów skały zależy wydatek energetyczny procesu jej rozdrabniania? Przeprowadzone badania nie wykazały korelacji pomiędzy wybranymi właściwościami mechanicznymi skał (twardością i wytrzymałością) i fizycznymi (gęstością), a mocą i energią niezbędną do ich rozdrobnienia. Eksperymenty potwierdziły teorię twierdzącą, że energia rozdrabniania materiałów jest zależna od objętości rozdrabnianego materiału, a także od nowoutworzonej powierzchni.

Słowa kluczowe: rozdrabnianie skał; mielenie udarowe; energia rozdrabniania

1. Wstęp

Rozdrabnianie to proces w wyniku którego następuje rozpad ziarn materiału pod wpływem działań mechanicznych [Zawada, 1998]. Oprócz zmniejszania rozmiarów ziarn, rozdrabnianie wywołuje również zmianę ich kształtów, zwiększenie powierzchni właściwej, wzrost ich liczby, a także zmianę ich właściwości strukturalnych i mechanicznych. Celem rozdrobnienia jest najczęściej zwiększenie powierzchni właściwej rozdrabnianego materiału lub też uzyskanie produktu o określonym rozmiarze cząstek.

Procesy rozdrabniania znajdują swoje główne zastosowanie w przetwórstwie surowców i minerałów prowadzącym do produkcji kruszyw naturalnych o określonych właściwościach. Surowce skalne pozyskiwane metodami górniczymi i przeznaczone do produkcji kruszyw, stanowią zwykle urobek ziarnowy o frakcji powyżej kilkudziesięciu milimetrów. Urobek w takiej formie nie nadaje się do bezpośredniej produkcji kruszyw budowlanych. Konieczne jest jego rozdrobnienie, a następnie wyselekcjonowanie odpowiednich frakcji ziarnowych, które mogą zostać przeznaczone do dalszej produkcji.

W przemyśle górniczym proces rozdrabniania odbywa się wyłącznie na drodze działania mechanicznych sił zewnętrznych. Stąd też proces ten jest niezwykle energochłonny, a energia ta zależna jest od wielu czynników, do których należą między innymi:

- rodzaj i forma rozdrabnianego materiału,
- właściwości mechaniczne, fizyczne i chemiczne rozdrabnianego materiału,
- wielkość i kształt ziarn,
- trajektoria i prędkość przemieszczania się ziarn w urządzeniu rozdrabniającym,
- parametry technologiczne urządzeń rozdrabniających.

Szacuje się, że przemysł górniczy, na procesy związane z rozdrabnianiem, pochłania około 5% wytworzonej na świecie energii [Foszcz i in., 2006]. W australijskich kopalniach miedzi i złota, energia zużywana na procesy związane z rozdrabnianiem stanowi 36% całkowitej energii pochłanianej przez te kopalnie [Ballantyne i Powell, 2014]. Ocena ilości energii koniecznej do rozdrobnienia danego materiału jest niezwykle istotna

przy projektowaniu układu technologicznego, a w szczególności doboru urządzeń zarówno pod względem typu, jak i wielkości. W skali przemysłowej obliczenie energii potrzebnej do rozdrobnienia jest zagadnieniem niezwykle złożonym. Istniejące teorie wydatku energetycznego procesu rozdrabniania opierają się głównie na powiązaniu stopnia rozdrabniania z zużytą energią. Teoria Rittinger'a zakłada, że energia rozdrabniania, zużywana na pokonanie sił spójności międzycząsteczkowej materiałów stałych, jest wprost proporcjonalna do nowoutworzonej powierzchni [Rittinger, 1867]. Z kolei teoria Kick'a mówi, że energia rozdrabniania zużywana jest na wytworzenie odkształcenia, przy którym nastąpi przekroczenie naprężenia krytycznego, a praca rozdrabniania jest proporcjonalna do objętości rozdrabnianego materiału [Kick, 1885]. Połączeniem obu teorii jest teoria Bond'a, która proces rozdrabniania dzieli na dwie fazy: w pierwszej powstaje odkształcenie doprowadzające do wystąpienia naprężenia krytycznego, a w drugiej odpowiedni dodatek energii powoduje zniszczenie sił spójności międzycząsteczkowej [Bond, 1952]. Wymienione teorie rozdrabniania nie dają zadowalającej odpowiedzi na problemy dotyczące energochłonności procesów rozdrabniania i jedynie teoria Bond'a znalazła szersze zastosowanie w skali przemysłowej [Naziemiec i Saramak, 2012].

W skali laboratoryjnej możliwe jest doświadczalne oszacowanie wydatku energetycznego niezbędnego do rozdrabniania skał poprzez pomiar mocy pobieranej przez silnik napędzający element rozdrabniający materiał skalny [Kudasik i in., 2016b]. Celem prezentowanej pracy było oszacowanie wydatku energetycznego rozdrabniania różnych skał za pomocą autorskiego urządzenia pracującego w oparciu o mielenie udarowe. Prototyp urządzenia rozdrabniającego był już wielokrotnie opisywany w pracach [Kudasik i in., 2014, 2016a; Kudasik i Skoczylas, 2016]. Jednym z najistotniejszych elementów jego budowy jest silnik napędzający noże tnące. W zbudowanym urządzeniu zastosowano wysokoobrotowy silnik bezszczotkowy, model Toro X8 KV2650 o mocy 2.2 kW. Silnik ten pozwala na nadanie prędkości obrotowej noża na poziomie 21 000 obr/min. Ocena wydatku energetycznego rozdrabniania skał opierała się na pomiarze mocy pobieranej przez ten silnik w trakcie jego pracy.

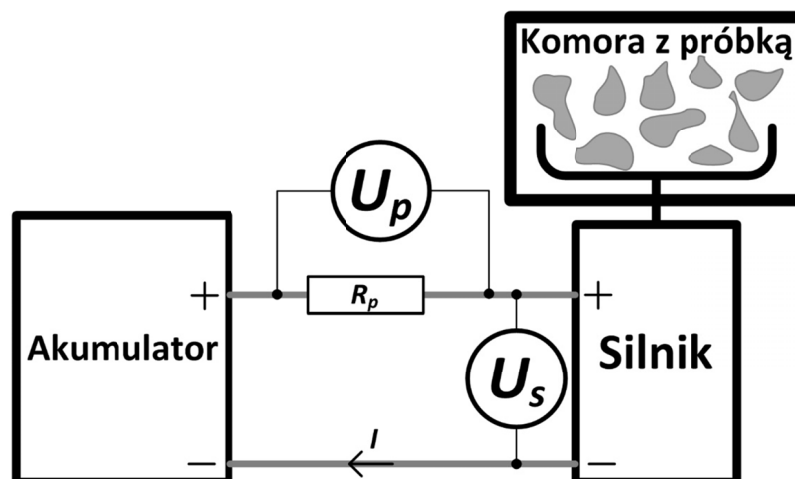
Istniejące badania i teorie procesu rozdrabniania materiałów uzależniają energię mielenia od:

- jego właściwości mechanicznych (twardość, wytrzymałość, plastyczność i inne),
- jego właściwości fizycznych (gęstość, porowatość i inne),
- nowoutworzonej powierzchni rozdrobnionego materiału,
- objętości rozdrabnianego materiału
- innych parametrów.

W pracy podjęto doświadczalną próbę odpowiedzi na pytanie: od jakich parametrów skały zależny jest wydatek energetyczny procesów rozdrabniania?

2. Metodyka pomiarowa

Wydatek energetyczny rozdrabniania różnych skał za pomocą autorskiego urządzenia wyznaczany był analogicznie jak w pracy [Kudasik i in., 2016b]. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego do oceny bilansu energetycznego rozdrabniania skał

Silnik urządzenia rozdrabniającego zasilany jest z akumulatora o pojemności 10 Ah i napięciu 14.8 V. Badania mocy niezbędnej do rozdrabniania skał dolomitów polegały na pomiarze spadku napięcia (U_p) na jednym z przewodów zasilających silnik oraz na pomiarze napięcia na silniku (U_s), w trakcie pracy urządzenia. Moc niezbędna do rozdrobnienia próbek wyznaczana była ze wzoru:

$$P(t) = I \cdot U_s - I_0 \cdot U_{s0}$$

$$P(t) = \frac{U_p}{R_p} \cdot U_s - \frac{U_{p0}}{R_p} \cdot U_{s0} \quad (1)$$

gdzie:

- $P(t)$ – moc pobierana przez silnik z akumulatora, [W],
- t – czas, [s],
- U_p, U_{p0} – spadek napięcia na przewodzie zasilającym silnik przy rozdrabnianiu skał i przy pracy jałowej, [V],
- U_s, U_{s0} – napięcie zasilające na silniku przy rozdrabnianiu skał i przy pracy jałowej, [V],
- R_p – rezystancja przewodu zasilającego silnik, [Ω],
- I, I_0 – prąd w obwodzie przy rozdrabnianiu skał i przy pracy jałowej silnika, [A].

Energia niezbędna do rozdrobnienia próbek wyznaczana była ze wzoru:

$$E(t) = \int_0^t P(t) dt \quad (2)$$

gdzie: $E(t)$ – energia pobierana przez silnik z akumulatora, [J].

3. Materiał badawczy

Do badań użyto kawałkowe próbki anhydrytu, dolomitu, piaskowca, wapienia, węgla kamiennego i granitu. Początkowa wielkość próbek skał przeznaczonych do rozdrabniania była podobna i stanowiły ją sześciiany o krawędzi około 1.5-2.0 cm. Pochodzenie oraz niektóre właściwości próbek skał użytych do badań przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Pochodzenie i niektóre parametry próbek skał użytych do badań

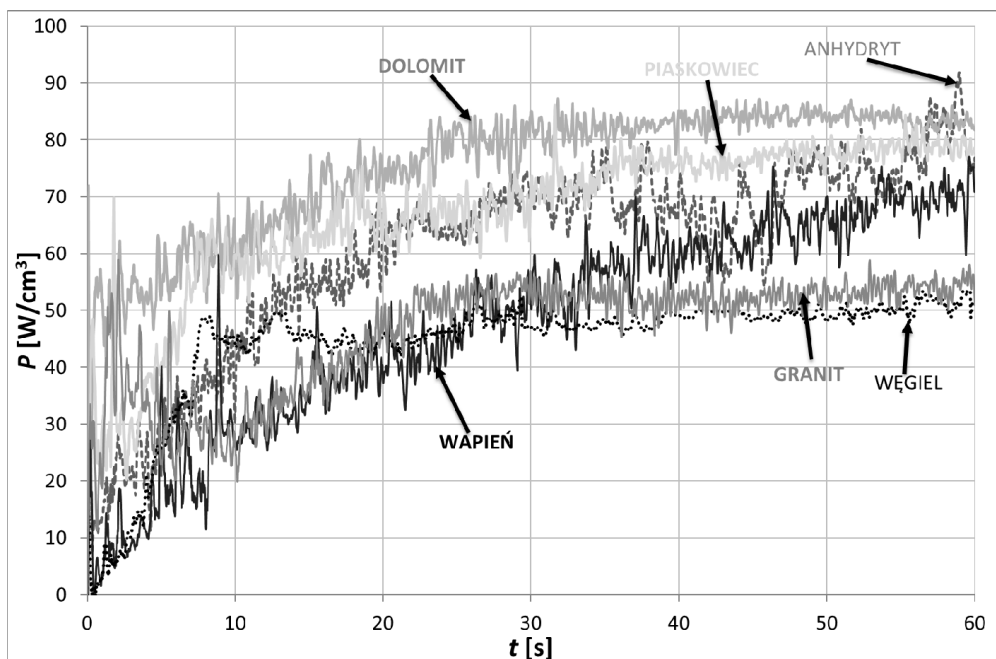
Skała	Kopalnia	Masa próbki, [g]	Gęstość helowa próbki, [g/cm ³]	Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, [MPa]	Twardość w skali Mohsa
Anhydryt	„Lubin”	42.3	2.955	19.47	3.0-3.5
Dolomit	„Lubin”	41.7	2.873	73.68	3.5-4.0
Piaskowiec	„Tumlin-Gród”	39.8	2.674	42.97	6.5-7.0
Wapień	„Czatkowice”	41.6	2.704	29.77	3.0-4.0
Węgiel kamienny	„Brzeszcze”	39.0	1.335	14.59	1.0-1.5
Granit	„Strzelin”	37.7	2.631	81.02	6.0-7.0

Do określenia gęstości helowej (szkieletowej) próbek wykorzystano analizator AccuPyc II 1340 (firmy Micromeritics). Gęstość helową próbek określono na podstawie objętości szkieletowej próbki, poprzez pomiar ilości helu wnিকniętego do porów w próbce kawałkowej. Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie wyznaczono w testach wykonanych na prasie hydraulicznej. Twardość w skali Mohsa określana jest zwykle dla czystych minerałów, jednak dostępne są również w literaturze i tabelach szacunkowe wartości twardości Mohs'a dla skał, które to wartości zostały przedstawione w tabeli 1 [World Mineral Exchange, 2016].

4. Wyniki

Wyniki pomiarów mocy (wyznaczonej ze wzoru (1)), jaką pobrał silnik podczas rozdrabniania skał, w przeliczeniu na jednostkową ich objętość, znajdują się na rysunku 2. Zmienność rejestrowanej mocy występuje do około 30 sekundy – jest to okres, w którym dokonuje się zasadnicze rozdrobnienie skał. W dalszej

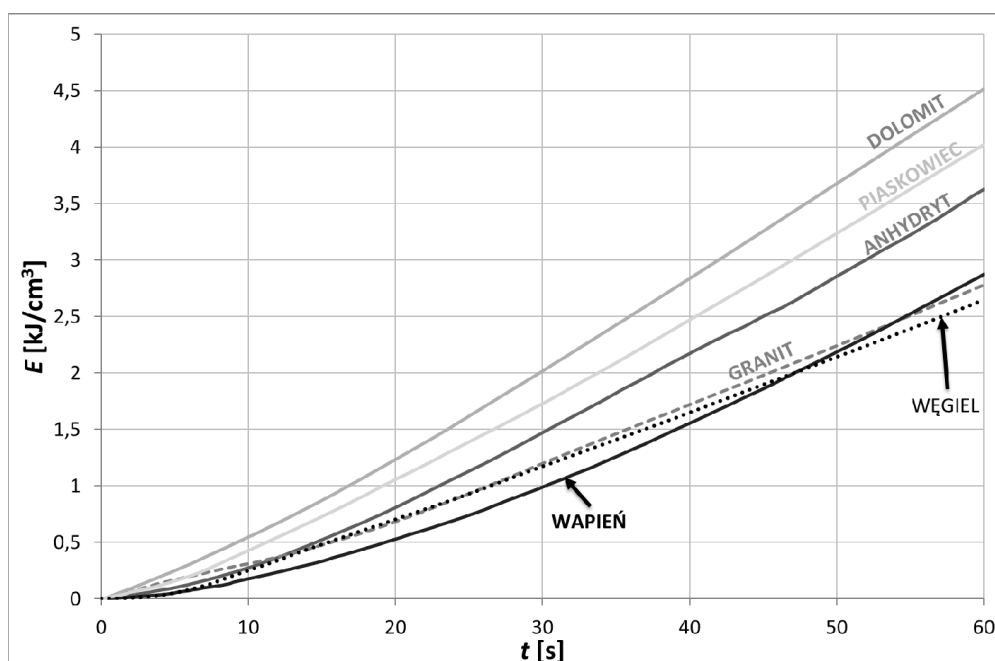
części, praktycznie cała pobierana przez silnik moc wykorzystywana jest do utrzymania energii kinetycznej złoża fluidalnego, czemu towarzyszy znaczna emisja ciepła na skutek wzajemnego tarcia rozdrobnionych ziarn skały oraz ziarn względem obudowy i noży.



Rys. 2. Moc rozdrabniania różnych skał w przeliczeniu na 1 cm³ próbki

Analizując wykres mocy pobranej przez silnik (Rys. 2), przypadającej na jednostkę objętości mielonej skały, można zauważyć, że z upływem czasu mielenia, któremu odpowiada stopień rozdrobnienia skał, moc rośnie asymptotycznie. Wzrost mocy towarzyszący stopniowi rozdrobnienia może potwierdzać teorię Rittinger'a [Rittinger, 1867], która mówi, że wydatek energetyczny procesu rozdrabniania materiału jest zależny od objętości nowoutworzonej powierzchni.

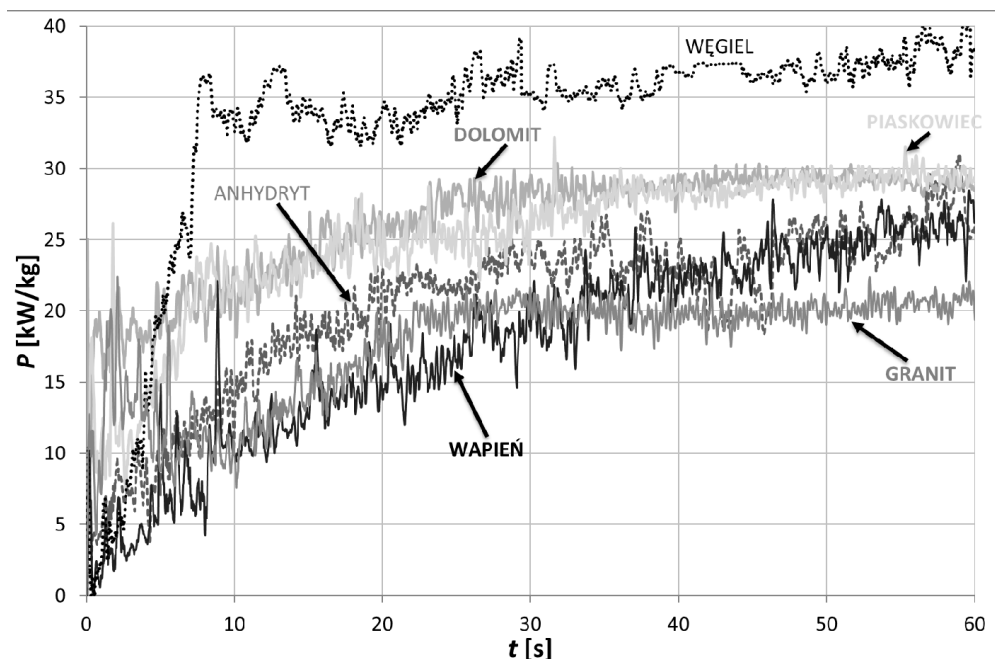
Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów energii (wyznaczonej ze wzoru (2)), jaką pobrał silnik podczas rozdrabniania skał, w przeliczeniu na jednostkową ich objętość.



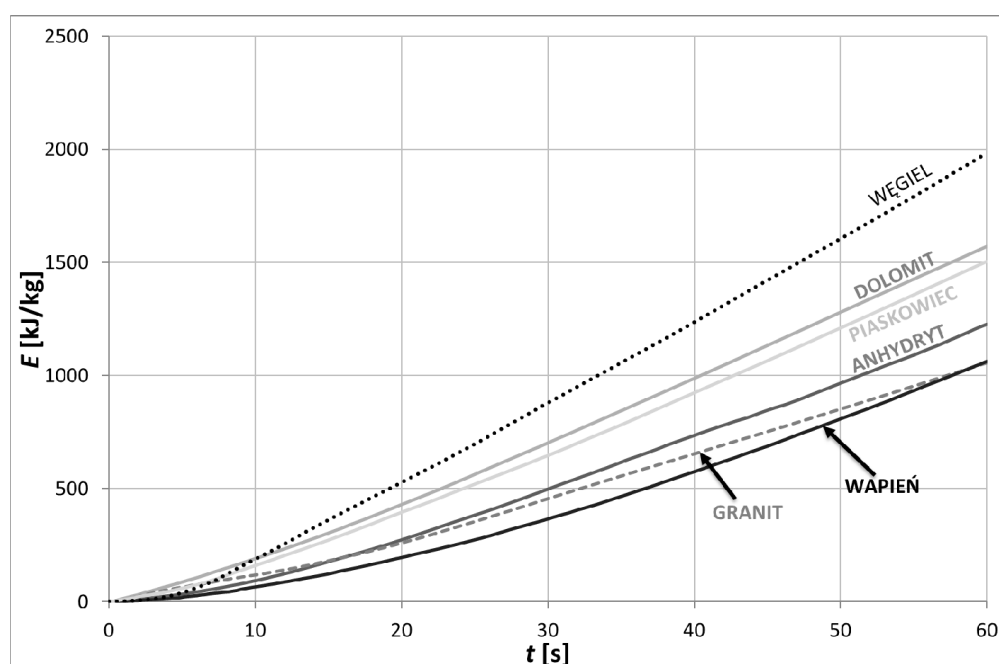
Rys. 3. Energia rozdrabniania różnych skał w przeliczeniu na 1 cm³ próbki

Jak widać na rysunku 3, najwięcej energii pochłonęło rozdrobnienie skał dolomitu, piaskowca i anhydrytu, w przeliczeniu na jednostkową ich objętość. Energia niezbędna do rozdrobnienia skał wapienia, granitu i węgla była najmniejsza. Próbuąc zestawić uzyskane wyniki wydatku energetycznego rozdrabniania poszczególnych skał, trudno zauważyć korelację uzyskanych wyników z wybranymi właściwościami fizycznymi i mechanicznymi, zestawionymi w tabeli 1. Przykładowo, rozdrabnianie granitu, wykazującego największą wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie i jedną z największych twardości w skali Mohsa, pochłonęło około dwa razy mniej energii od dolomitu, posiadającego niższą wytrzymałość i twardość. Jedynie rozdrabnianie węgla kamiennego, o najniższej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie i twardości, pochłonęło najmniej energii w przeliczeniu na 1 cm³ próbki.

Na rysunku 4 i 5 przedstawiono podobne wykresy mocy i energii rozdrabniania skał, jednak w tych przypadkach wyniki przeliczono na jednostkę ich masy.



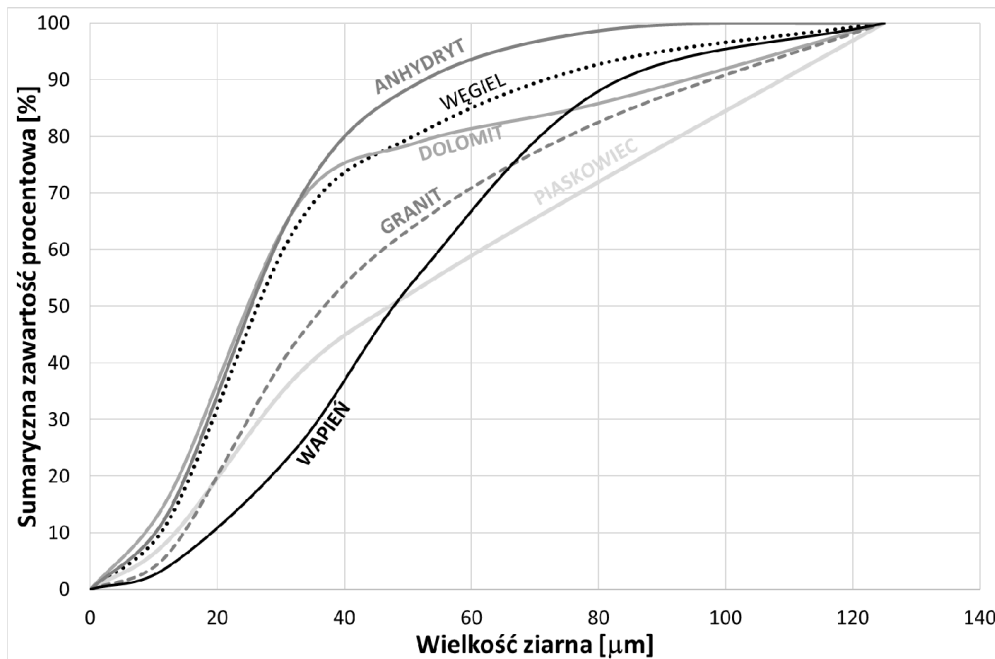
Rys. 4. Moc rozdrabniania różnych skał w przeliczeniu na 1 kg próbki



Rys. 5. Energia rozdrabniania różnych skał w przeliczeniu na 1 kg próbki

Prezentując wyniki mocy i energii procesu rozdrabniania skał, w przeliczeniu na jednostkową ich masę (Rys. 4 i 5), można zauważyć, iż węgiel kamienny, posiadający najniższe wartości twardości i wytrzymałości na ściskanie oraz najniższą gęstość, wymagał dostarczenia zdecydowanie najwięcej mocy podczas jego rozdrabniania. Wyniki kalkulacji wydatku energetycznego rozdrabniania pozostałych skał, w przeliczeniu na jednostkę ich masy, wykazały podobną tendencję, jak w przypadku prezentacji ich w przeliczeniu na jednostkową objętość. W tym przypadku również ciężko wskazać jakąkolwiek korelację pomiędzy mocą i energią rozdrabniania skał, a ich właściwościami fizycznymi i mechanicznymi.

Rozdrobiony materiał poddano analizie sitowej w celu określenia składu granulometrycznego. Sumaryczny rozkład granulometryczny rozdrobionych próbek różnych skał przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Sumaryczny rozkład granulometryczny rozdrobionych próbek różnych skał

Analiza granulometryczna rozdrobionych skał wykazała, że dla wszystkich próbek, po 60 sekundach mielenia sumaryczna zawartość 90% udziału masowego stanowiły ziarna o wielkości nie większej niż 120 µm. Ponadto efektywność rozdrabniania anhydrytu była największa, a wapienia i piaskowca najniższa.

5. Wnioski

Wykonane zostały badania mające na celu określenie parametrów opisujących energetykę procesu rozdrabniania różnych skał. Zmienność rejestrowanej mocy pobieranej przez silnik urządzenia występuje do około 30 sekundy – jest to okres, w którym dokonuje się zasadnicze rozdrobienie skał. W dalszej części, praktycznie cała moc wykorzystywana jest do utrzymania energii kinetycznej złoża fluidalnego.

Badania granulometryczne wykonane po jednonminutowym procesie rozdrabniania wskazują, iż anhydryt, węgiel oraz dolomit osiągnęły podobny stopień rozdrobienia (50% ziarn < 25 µm). Nieznacznie niższy stopień rozdrobienia uzyskał granit, piaskowiec i wapień.

Przeprowadzone badania wskazują, iż korelacja pomiędzy energetyką procesu mielenia skał, a podstawowymi ich parametrami jest niewielka. Wytrzymałość w konwencjonalnym teście jednoosiowego ściskania nie odzwierciedla aspektów dynamiki procesu kruszenia – prawdopodobnie lepiej skorelowane wyniki dałby test dynamiczny, ze stałym i szybkim posuwem tłoka. Gęstość helowa oraz twardość w skali Mohsa także nie pozycjonują skał w aspekcie wymaganej energii kruszenia. Można przypuszczać, iż badania dylatacji (niesprężystego wzrostu objętości skały w warunkach działania przyłożonych naprężeń różnicowych), która jest zjawiskiem poprzedzającym kruche zniszczenie ośrodka skalnego, bądź poszukiwanie granicy liniowości odkształceń poprzecznych skał, mogłyby dostarczyć parametrów skorelowanych z energetyką ich kruszenia.

Niniejsza praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu pt.: „Nowatorski system wspomaganie oceny zagrożeń gazowych w kopalniach rud miedzi” (numer projektu: LIDER/003/408/L-4/12/NCBR/2013).

Literatura

- Ballantyne G.R., Powell M.S., 2014: *Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores*. Minerals Engineering, Vol. 65, p. 109-114.
- Bond F.C., 1952: *The third theory of comminution*. Trans. AIME 193, p. 484-494.
- Foszcz D., Gawenda T., Krawczykowski D., 2006: *Comparison of real and theoretically estimated energy consumption for ball grinder*. AGH Journal of Mining and Geoenvironment, Vol. 30, Issue 3/1, p. 79-90.
- Kick F., 1885: *Das Gesetz der Proportionalen Widerstande und Seine Anwendung*. Arthur Felix, Leipzig.
- Kudasik M., Skoczylas N., Murzyn T., Wierzbicki M., 2014: *Efektywność rozdrabniania skal w kontekście oceny zawartości w nich gazu*. Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, Tom 16, nr 3-4, s. 81-84.
- Kudasik M., Skoczylas N., Murzyn T., Wierzbicki M., 2016a: *Ocena zawartości gazu w rozdrabnianych skalach*. Wiadomości Górnicze, nr 7-8, s. 450-457.
- Kudasik M., Skoczylas N., Nurkowski J., 2016b: *Oszacowanie wydatku energetycznego rozdrabniania skal metodą mielenia udarowego*. Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, Tom 18, nr 3, s. 75-82.
- Kudasik M., Skoczylas N., 2016: *Stopień rozdrabniania skal w zależności od czasu mielenia udarowego*. Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, Tom 18, nr 3, s. 11-18.
- Naziemiec Z., Saramak D., 2012: *The energy-consumption analysis in mineral aggregates crushing processes*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Vol. 134, No. 41, p. 209-220.
- Rittinger P.R., 1867: *Lehrbuch der Aufbereitungskunde*. Ernst and Korn, Berlin.
- World Mineral Exchange, <http://www.mineralszone.com/>, 28.09.2016.
- Zawada J., 1998: *Wstęp do mechaniki procesów kruszenia*. Wydawnictwo Technologii Eksploatacji, Radom.

Energy consumption of comminution process of various rocks by an original impact mill

Abstract

Estimating the energy of comminution process of various materials is very important in the design, construction, or the choice of grinding equipment. In the Laboratory of Micrometrics of the Strata Mechanics Research Institute of the Polish Academy of Sciences a device for rock comminution by impact milling was constructed. The purpose of the device is to assess the gas content in rocks. The power and energy required for grinding various rock samples using the developed device was examined. For the research dolomite, anhydrite, sandstone, limestone, hard coal and granite samples, which were obtained from different Polish mines, were used. The authors of this paper attempted to answer the question: Which parameters does the energy consumption of rocks comminution process depend on? Based on the obtained results the authors did not find any dependency of the energy of rocks comminution process in relation to mechanical (hardness, strength) and physical (density) properties of rocks. The test confirmed the theory that the energy of rocks comminution depends on the input volume of the sample and the new surface area of crushed sample.

Keywords: rocks comminution; impact milling; energy of comminution process