

Jan Zawada, Konstanty Chochoł**

DOŚWIADCZALNE BADANIA ENERGII KRUSZENIA (NA PRZYKŁADZIE MODELOWEJ KRUSZARKI DŹWIGNIOWEJ BLAKE'A)

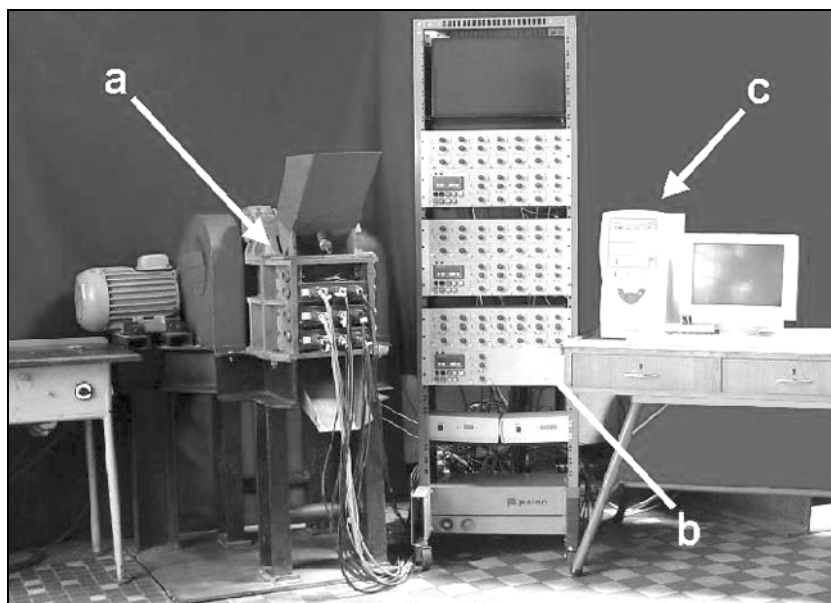
1. Wstęp

Choć nad problemem określenia energii rozdrabniania (tj. kruszenia i mielenia) trwają prace teoretyczne i doświadczalne od drugiej połowy XIX wieku, problem ten pozostaje nadal nie rozwiązany. Wynika to z wielkiej złożoności procesów rozdrabniania, jak również złożonych właściwości ośrodków kruchych [1, 2]. Z tego względu ściśle wyznaczanie energii efektywnej, tzn. energii nieodwracalnej wydatkowanej na proces, uwzględniające wiele różnych czynników (losowość procesu, wielokrotne obciążanie, ukształtowanie przestrzeni roboczej i organów obciążających, efektów skali wymiarów itd.) nie jest obecnie możliwe [2, 3]. W praktyce przemysłowej wykorzystuje się tzw. hipotezy energetyczne, które w przybliżony sposób, pomijając analizę formalną, wyznaczają zależności między wydatkowaną pracą sił zewnętrznych, a rozmiarami obciążanych elementów, nowo utworzoną powierzchnią po rozpadzie ciała i innymi wielkościami [4].

Przedmiotem niniejszej pracy jest określanie energii efektywnej (tzw. „energii czystej”) i innych składowych wydatkowanej energii oraz wzajemnych relacji między wymienionymi energiami. Obiektem badań była modelowa kruszarka dźwigniowa Blake’a. Kruszarka ta razem z zespołem pomiarowym i sterująco-rejestrującym stanowią nowoczesne stanowisko, umożliwiające badania mechaniki procesów kruszenia, jak również technologii procesów (rys. 1) [3]. Wyznaczanie energii efektywnej w kruszarkach dźwigniowych tradycyjnymi metodami, np. na podstawie wykresów watografu, czy pomiarów momentu obrotowego wału napędowego i liczby jego obrotów, jest mało dokładne. Należałoby bowiem wtedy sporządzić bilans energetyczny maszyny uwzględniający udział nie tylko dwóch głównych źródeł energii: silnika napędowego i kół zamachowych (źródło wtórne), ale również udział innych członów mechanizmu będących w ruchu złożonym. Należałoby także pamiętać o stratach

* Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich, Politechnika Warszawska, Warszawa

tarcia w przegubach mechanizmu i o energii zwracanej w ruchu jałowym (odciążania) przez odkształcony ośrodek kruchy. Sporządzenie takiego bilansu energetycznego byłoby zadaniem niezwykle trudnym.



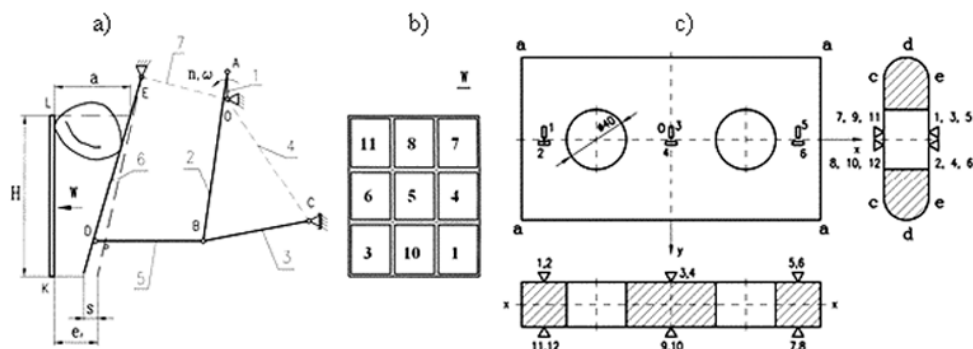
Rys. 1. Stanowisko badawcze „kruszarka modelowa” i jego zespoły:
a) kruszarka dźwigniowa dwurozporowa, b) zespół pomiarowy, c) zespół sterująco-rejestrujący

Z tego względu w pracy wykorzystano inną metodę, która nie jest obciążona znaczącymi błędami. Idea tej metody jest prosta. Energię efektywną kruszenia w poszczególnych cyklach roboczych znajdujemy w pośredni sposób, wyznaczając zależność funkcyjną: siła w przedniej płycie rozporowej kruszarki modelowej — przemieszczenie „*s*” (skok) tej płyty punkcie „*D*” (rys. 2). Otrzymujemy tzw. „pętlę pola pracy” dostarczającą ważnych informacji na temat składowych energii wydatkowanych w poszczególnych cyklach i na temat przebiegu procesu. Znajomość pętli pola pracy umożliwia ponadto weryfikację znanych hipotez energetycznych mechaniki kruszenia.

2. Stanowisko badawcze: laboratoryjna kruszarka szczękowa Blake’a — opis i szkic metody pomiarów sił i energii kruszenia

Schemat kinematyczny kruszarki pokazuje rysunek 2a Stanowi ona typowy przykład wieloboku przegubowego. Człon *OA* oznacza korbę napędową (w rzeczywistej maszynie jest to wał mimośrodowy), człon *AB* — pociągacz, członki *BC* i *BD* — płyty rozporowe,

człon DE — szczękę ruchomą. Płyta nieruchoma — szczęką nieruchomą — została oznaczona literami KL .



Rys. 2. Laboratoryjna kruszarka szczękowa Blake'a:

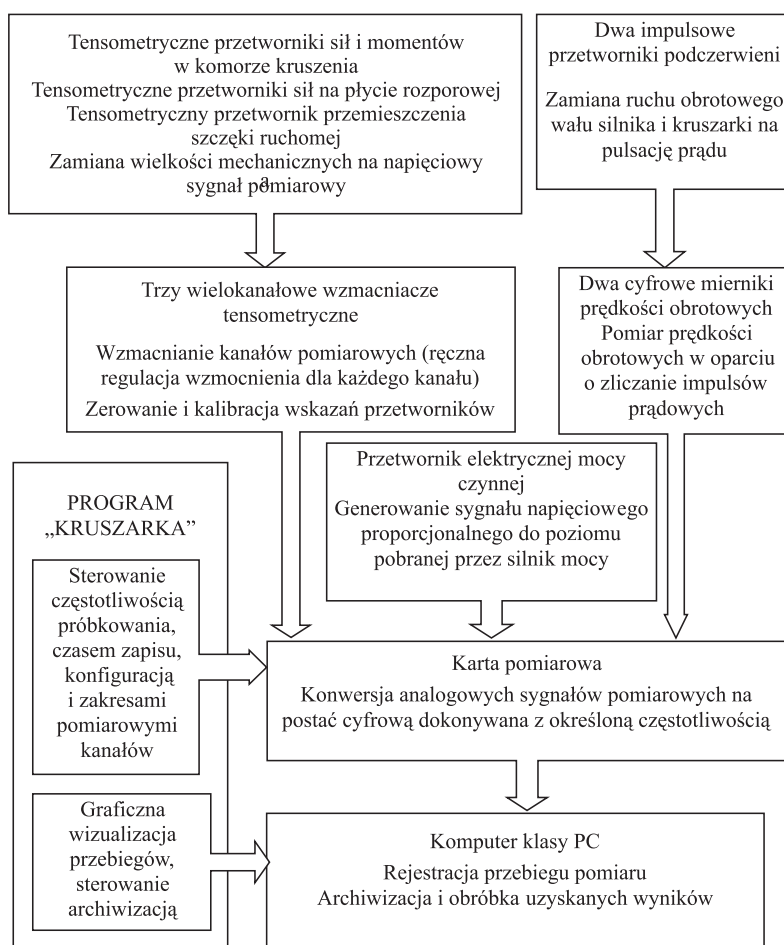
- a) schemat kinematyczny, b) widok na segmenty drobiące szczęki stałej, c) przednia płyta rozporowa jako przetwornik sił-rozmieszczenie tensometrów

Człon nieruchomy OC wraz z członami OA , AB , BC tworzą czworobok przegubowy, człony zaś OA , AB , BD , DE , EO , tworzą pięciobok przegubowy. Ruch obrotowy korby przenosi się przez pociągacz AB i płytę rozporową BD na szczękę DE . Wykonuje ona proste ruchy wahadłowe cyklicznego zbliżania się i oddalania w stosunku do szczęki nieruchomej KL . Bryły materiału znajdującego się w przestrzeni komory roboczej o przekroju $DELK$ są głównie ściskane i zginane, co powoduje ich pękanie, redukcję wymiarów i przesuwanie się do dolnej części komory, w kierunku otworu wylotowego. Powierzchnie robocze płyt DE i KL (są to powierzchnie tzw. płyt drobiących stanowiących oddzielne części) są gładkie lub odpowiednio profilowane, co zmniejsza siły kruszenia.

Prędkości i przyspieszenia punktów leżących na szczęce ruchomej nie są duże. Jeżeli liczba obrotów wału napędowego wynosi $n = 390$ obr./min, to np. maksymalna prędkość punktu D (rys. 1) osiąga wartość $v = 0,1$ m/s, zaś maksymalne przyspieszenie $p = 5,5$ m/s². Obciążanie ośrodka kruchej w przestrzeni roboczej jest to zatem tzw. obciążanie pośrednie, nie zaś, jak zwykle się sądzi, obciążanie dynamiczne, gdy prędkość odkształcania $\dot{\epsilon}$ jest większa niż 102 1/s [2].

Konstrukcja kruszarki modelowej umożliwia dość dokładne określanie rozkładu i wartości sił kruszenia w przestrzeni roboczej. Nieruchoma płyta rozdrabniająca KL — rysunek 2a, jest bowiem podzielona na dziewięć niezależnych segmentów (gładkich bądź profilowanych), jak objaśnia to rysunek 2b, każdy zaś z tych segmentów jest odpowiednio podparty na przetwornikach tensometrycznych specjalnej konstrukcji [3]. Zgodnie z informacją w punkcie 1, siła R przenoszona przez mechanizm kruszarki mierzona jest na płycie rozporowej DB , a przemieszczenie „ s ” mierzony jest w punkcie D , w którym płyta ta tworzy obrotową parę kinematyczną V klasy ze szczęką ruchomą. Płytę DB , przystosowaną do pełnienia funk-

cji pomiaru siły wzdłużnej R , przedstawiono na rysunku 2c. Przemieszczenie „s” rejestrowano za pomocą specjalnego przetwornika tensometrycznego. Układy pomiarowy i rejestrujący kruszarki modelowej zawierają wiele innych elementów, których opisy tutaj pomijamy, ponieważ nie dotyczą omawianego tematu. Schemat blokowy układu zamieszcza rysunek 3.



Rys. 3. Schemat blokowy układów pomiarowego i rejestrującego kruszarki modelowej

3. Badania doświadczalne

Surowcem (nadawą) w doświadczeniach na kruszarce modelowej były dwie skały krajowe: marmur średniokrystaliczny, „Biała Marianna” (BM) z okolic Stronia Śląskiego o pa-

rametrach — wytrzymałość na jednokierunkowe ściskanie $S_c = 55$ MPa, wytrzymałość na jednokierunkowe rozrywanie $S_r = -4,9$ MPa, kąt tarcia wewnętrznego $\rho = 300$, oraz wapień zwarty (M) z okolic Morawicy, w kieleckiem, o parametrach $S_c = 85$ MPa, $S_r = -12,2$ MPa, i kącie tarcia wewnętrznego $\rho = 550$. Szczegółowe dane o przeprowadzonych badaniach zawiera tabela 1.

TABELA 1
Informacje o badaniach doświadczalnych

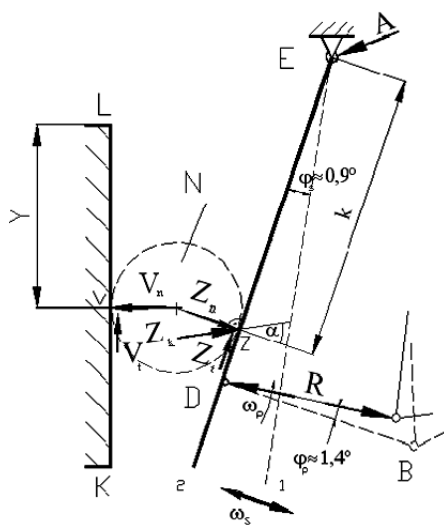
Numer serii	Nadawa	Masa nadawy, kg	Wielkość średnia ziarna D_{sr} , mm	Szczelina wylotowa e_r , mm	Płyty rozdrabniające	Liczba prób
I	marmur średniokrystaliczny „BM”	6,32÷6,6 6	~80	16	gładkie	9
II	marmur średniokrystaliczny „BM”	6,32÷6,6 8	~80	21	gładkie	9
III	wapień zwarty „M”	6,08÷6,4 5	~80	16	gładkie	6
IV	wapień zwarty „M”	6,22÷6,8 6	~80	21	gładkie	6
V	marmur średniokrystaliczny „BM”	3,19÷3,3 8	~70	24	profilowane	6
VI	marmur średniokrystaliczny „BM”	3,42÷3,5 2	~70	30	profilowane	6
VII	wapień zwarty „M”	3,08÷3,3 6	~70	24	profilowane	6
VIII	wapień zwarty „M”	3,02÷3,2 8	~70	30	profilowane	6

4. Pętla pola pracy jako podstawa analizy energetycznej procesu kruszenia

Jak podano poprzednio, w badaniach energii na modelowej kruszarce dźwigniowej Blake’a zastosowano metodę pośrednią opartą na pomiarze siły R w przedniej płycie rozporowej i przemieszczenia przegubu D (pary kinematycznej).

Wyznaczona energia globalna $E_g^{1)}$ (jest to w istocie praca siły R) jest sumą energii cząstkowych. Są to:

- energia efektywna kruszenia E_{ek} („praca czysta” kruszenia),
- energia odkształceń sprężystych E_s płyty rozporowej BD , szczęki ruchomej i nieruchomej KL oraz obciążanego surowca N (nadawy) zalegającego w przestrzeni roboczej — rysunek 4,
- energia tarcia w przegubach E, D, B .



Rys. 4. Dwa zwrotne położenia szczęki ruchomej, przesunięcie z położenia E_1 do położenia E_2 wymaga nakładu energii E_g (energii globalnej)

Jeśli oznaczymy $E_{ek} + E_s = E_c$, wówczas energia globalna

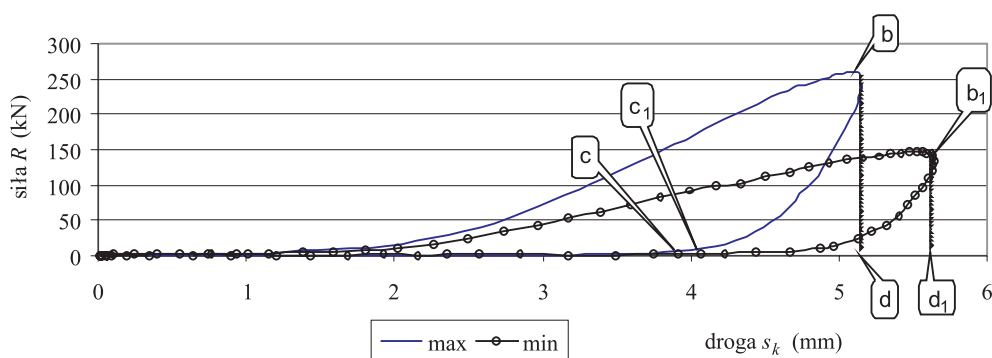
$$E_g = E_c + E_t \quad (1)$$

Energia efektywna kruszenia E_{ek} jest sumą energii dyssypacji plastycznej, energii powierzchniowej powstających rozprzestrzeniających się szczelin, energii kinetycznej tych szczelin oraz innych rodzajów energii (np. energii termicznej) [2]. Wyznaczanie tych składowych stanowi odrębny problem — nie będziemy go obecnie rozpatrywać, ponieważ interesuje nas obecnie wartość energii efektywnej E_{ek} . We wzorze (1) na energię globalną występuje energia tarcia E_t to jest energia tracona w łożysku zawieszenia szczęki ruchomej

1) Praca sił obciążających prowadzi do zmagazynowania w ośrodku określonej energii. Wykonana praca — praca kruszenia — jest równa tej energii — energii kruszenia. Jeżeli nie interesują nas stany pokrywcze, możemy utożsamić te dwa pojęcia.

oraz w gniazdach przedniej płyty rozporowej. Jak wykazano w pracy (dysertacji) [5], jest to jednak energia pomijalnie mała, rzędu ułamka procenta w stosunku do energii E_c , co oznacza, iż głównymi składowymi energii E_g są człony E_{ek} i E_s , czyli energia efektywna kruszenia i energia odkształceń sprężystych.

Przejdźmy do omówienia pętli pola pracy. Przykładowe wykresy i zmiany siły R w płycie rozporowej w funkcji przemieszczenia „ s ” pokazano na rysunku 5. pole Obd i Ob_1d_1 oznaczają energie globalne E_g w dwóch różnych cyklach roboczych w jednej z prób serii I (obciążanie — odciążanie), gdy siła R w płycie rozporowej osiąga największą i najmniejszą wartość. Pola Obc i Ob_1c_1 oznaczają energie efektywne E_{ek} a więc zdefiniowane wcześniej pętle pola pracy, zaś pola bdc i $b_1d_1c_1$ oznaczają energie sprężyste E_s zwracane do układu dźwigniowego kruszarki. Kształt pętli pracy jest różny, co świadczy o złożoności i losowości procesu kruszenia, ale ogólna tendencje ich powstawania są podobne. Początkowo, w czasie zbliżania się szczęki ruchomej do szczęki stałej, siła R rośnie stosunkowo wolno, gdyż w tym czasie następuje likwidowanie luzów w mechanizmie, później następuje wyraźny wzrost. W punktach b , b_1 siła R osiąga maksimum, ale skok „ s_k ”, który zapewnia konstrukcja maszyny, nie zostaje wykorzystany. Zjawisko to omawiają prace [6, 7]. W czasie powrotnego ruchu szczęki siła nie spada najczęściej gwałtownie do zera, lecz następuje to po pewnym czasie, co jest związane ze zwrotem energii sprężystej do układu kruszarki.



Rys. 5. Wykresy siła R w płycie rozporowej — przemieszczenie punktu D szczęki ruchomej — pętle pola pracy dla dwóch cykli roboczych (seria I, płyty gładkie, marmur BM)

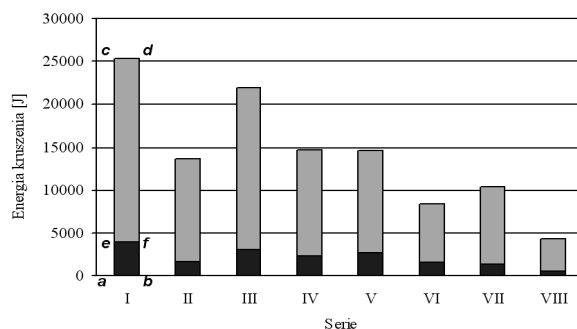
5. Badanie związków między składowymi energiami kruszenia

W tabeli 2 zestawiono, razem z odchyleniami standardowymi, wartości energii globalnej E_g , efektywnej energii kruszenia E_{ek} i oddawanej do układu energii sprężystej E_s . Wyniki dotyczące każdej serii są wartościami średnimi z poszczególnych prób. Ilustrację graficzną uzyskanych wyników przedstawia rysunek 6.

TABELA 2
Energia globalna, efektywna energia kruszenia i energia sprężysta w seriach pomiarowych

Seria pomiarowa	Energia globalna E_g , J	Odchylenie standardowe S_g , J	Energia efektywna E_{ek} , J	Odchylenie standardowe S_{ek} , J	Energia sprężysta E_{s} , J	Odchylenie standardowe S_s , J
I	25 303	2 444	21 371	1 943	3 932	551
II	13 631	2 015	11 920	1 736	1 710	303
III	21 873	787	18 718	852	3 154	73
IV	14 746	1 314	12 446	1 009	2 300	306
V	14 613	5 515	11 926	4 433	2 688	1 323
VI	8 377	1 998	6 832	1 334	1 545	665
VII	10 361	1 707	9 034	1 292	1 326	414
VIII	4 315	216	3 732	114	583	127

Ważną kwestią, nie poruszaną w literaturze, jest ilościowy udział energii efektywnej i energii sprężystej w energii globalnej oraz wpływ na niego warunków, w których przebiega proces.



Rys. 6. Energia globalna E_g (pole $abcd$), energia efektywna E_{ek} (pole $efcd$), energia sprężysta E_s (pole $abef$) w seriach badań

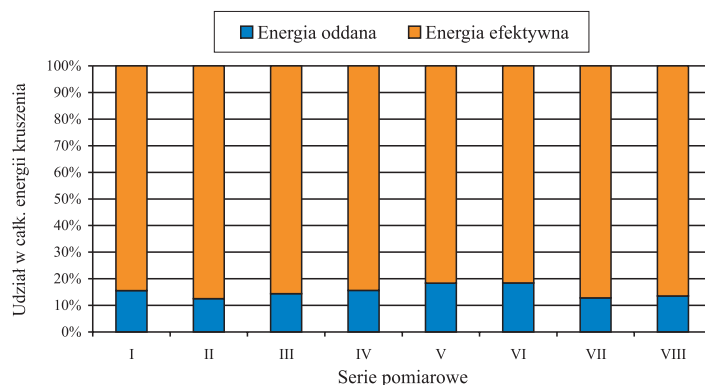
Wyniki są wyszczególnione w tabeli 3 i pokazane poglądowo na rysunku 7.

TABELA 3

Procentowe udziały efektywnej energii kruszenia i energii kruszenia w globalnej energii kruszenia

Seria pomiarowa	Udział energii efektywnej w energii globalnej $\frac{E_{ek}}{E_g}$, %	Udział energii sprężystej w energii globalnej $\frac{E_s}{E_g}$, %
1	2	3
I	84,0	16,0
II	87,0	13,0
III	86,0	14,0
IV	84,0	16,0
V	82,0	18,0
VI	82,0	18,0
VII	87,0	13,0
VIII	86,0	14,0

Okazuje się, że zmiana warunków procesu: rodzaj nadawy, rodzaje płyt rozdrabniających, rozmiar szczeliny wylotowej nie odgrywają większej roli we wzajemnych relacjach pomiędzy E_g , E_{ek} , E_s . Efektywna energia kruszenia E_{ek} stanowi średnio 85% energii globalnej, a oddawana do układu energia sprężysta E_s średnio 15% energii globalnej.



Rys. 7. Procentowe udziały efektywnej energii kruszenia (pole $efcd$) i energii sprężystej (pole $abef$) w globalnej energii kruszenia (pole $abcd$)

6. Zakończenie

Niniejsze rozważania nad energią kruszenia w kruszarkach dźwigniowych mogą stanowić wstęp do obszerniejszych studiów poświęconych temu ważnemu problemowi. Do dalszych rozważań pozostaje wiele kwestii, jak np. weryfikacja znanych hipotez energetycznych, oszacowania energii traconej na opory tarcia w całym mechanizmie (obecnie przyjmuje się, że opory te są równe około 35% mocy kruszenia). Istotne jest wyznaczenie zależności między liczbą obrotów wału napędowego a wydatkowaną energią, gdyż liczba obrotów ustalona wg zależności L. Lewensona [8], nie odpowiada energii najmniejszej. Konieczne jest rozwijanie badań na temat modelowania procesu i opracowania modelu umożliwiającego realne określanie zapotrzebowanej energii. Można wymienić jeszcze inne zagadnienia, które oczekują na rozwiązania.

LITERATURA

- [1] Zawada J.: Obciążenia graniczne i pękanie skał. PWN, Warszawa, 1995
- [2] Zawada J.: Wstęp do mechaniki procesów kruszenia. Wydawnictwo Technologii Eksploatacji, Radom, 1998
- [3] Zawada J. (red), Buczyński A., Chochół K., Rzeszot J.: Wprowadzenie do mechaniki maszynowych procesów kruszenia. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji (w Radomiu), Warszawa, 2005
- [4] Lowrison G.Ch.: Crushing and Grinding. Butterworths, London, 1974
- [5] Chochół K.: Doświadczalne studium mechaniki procesów kruszenia (na przykładzie kruszarki szczękowej). Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2005
- [6] Supel J., Rumel J.: Wpływ podatności elementów kruszarek szczękowych na wielkość sił kruszenia i wydajność. Seminarium Naukowe. Problemy Konstrukcji Maszyn i Urządzeń kruszących, Politechnika Warszawska, 1974
- [7] Zawada J.: O problemie określania sił kruszenia. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Mechanika, z. 96, 37–72, 1986
- [8] Sobolewski S.: Przeróbka mechaniczna skał i surowców mineralnych. T. XV Rozdrabnianie, Politechnika Wroclawska, Wroclaw, 1974