

Jan SIDOR, Marcin MAZUR

e-mail: jsidor@agh.edu.pl

Katedra Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

## Badania eksperymentalne procesu rozdrabniania kamienia wapiennego w kruszarkach szczękowych

### Wstęp

Prace dotyczące nowej technologii rozdrabniania, a właściwie kruszenia wibracyjnego zapoczątkowano w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w latach siedemdziesiątych. Rozpoczęto je w Instytucie Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Automatyki AGH, w którym opracowano dwa prototypy kruszarki wibracyjnej wyposażone w dwie ruchome szczęki, napędzane dwumasowymi wibratorami bezwładnościowymi. Kruszarki te różniły się miejscem zawieszenia szczęk. Jedna miała górne zawieszenie szczęk, a druga dolne [Banaszewski, 1971; 1974].

Wyniki badań procesu kruszenia przeprowadzone w tych kruszarkach wykazały ich bardzo dobre możliwości technologiczne [Drzymala i in., 1986]. Uzyskano w nich: od 3 do 6 razy większy stopień rozdrobnienia oraz od 4 do 7 razy większą efektywność procesu kruszenia – w stosunku do klasycznych kruszarek szczękowych [Kobialka i in., 2000].

W latach osiemdziesiątych w Instytucie Maszyn Hutniczych i Automatyki AGH – obecnie Katedra Systemów Wytwarzania – opracowano prototyp nowej konstrukcji szczękowej kruszarki wibracyjnej z dolnym zawieszeniem szczęk napędzanych wibratorami kinematycznymi [Drzymala i in., 1986]. Kruszarkę tą zastosowano do bardzo drobnego kruszenia fryt emalierskich w Instytucie Szkła i Ceramiki Filia w Krakowie.

W 1992 roku w Katedrze Urządzeń Technologicznych i Ochrony Środowiska AGH (obecnie Katedra Systemów Wytwarzania) opracowano nową kruszarkę wibracyjną KW 40/1, wyposażoną w wibratory kinematyczne z mechanizmem regulacji mimośrodów, co zapewniło możliwość regulacji skoku szczęk. Ważną zaletą technologiczną tej kruszarki była eliminacja wpływu uziarnienia nadawy na stopnie rozdrobnienia produktu kruszenia, co sprawiało kłopoty w kruszarkach z bezwładnościowym wymuszeniem ruchu drgającego szczęk. Przeprowadzono szereg badań procesu kruszenia wibracyjnego w tej kruszarce głównie o charakterze technologicznym w zakresie bardzo drobnego kruszenia materiałów o bardzo zróżnicowanych właściwościach wytrzymałościowych. Wyniki te wykazały jej pełną przydatność technologiczną, zwłaszcza przy kruszeniu materiałów ceramicznych o dużej wytrzymałości na ściskanie, takich jak: żelazokrzem, azotek glinu, węgiel tytanowo-krzemowy [Sidor, 1996], odpadów ceramicznych [Sidor, 1996; 2007] i surowców mineralnych [Sidor i Mazur, 2011; 2012].

W badaniach uzyskiwano duże stopnie rozdrobnienia ( $d_{80}$  i  $d_{40}$ ), w jednym stadium rozdrabniania materiałów o zróżnicowanych własnościach fizycznych. Umożliwiły także dobór najkorzystniejszych parametrów kruszarki i procesu rozdrabniania oraz dostarczyły zbiór informacji w zakresie możliwości wyznaczania podatności materiałów na kruszenie wibracyjne, która jest niezbędna do poprawnego doboru parametrów procesu kruszenia wibracyjnego oraz projektowania przemysłowych kruszarek wibracyjnych.

W niniejszej pracy podano wyniki badań porównawczych procesu kruszenia, możliwości technologicznych wibracyjnych kruszarek szczękowych (o kinematycznym i bezwładnościowym wymuszeniu ruchu drgającego) oraz klasycznej kruszarki szczękowej dwurozporowej.

### Cel i metodyka badań

Celem badań było określenie wpływu wielkości szczeliny wylotowej  $e$ , na uziarnienie produktu kruszenia podczas rozdrabniania kamienia wapiennego z Kopalni Czatkowice w Krzeszowicach. Zbadano zawartość dolnych zewnętrznych klas ziarnowych:  $0 \div 2$  mm,  $0 \div 1$  mm, wyznaczono wydajności (całkowitą i badanych klas ziarnowych) oraz efektywności technologiczne kruszarki w funkcji wielkości szczeliny wylotowej kruszarki.

Efektywności technologiczne procesu kruszenia obliczano z następujących wyrażen:

$$ET_{40} = Q_C i_{40} \quad \text{oraz} \quad ET_{80} = Q_C i_{80} \quad [\text{Mg/h}] \quad (1)$$

gdzie:

$ET_{40}$ ,  $ET_{80}$  – efektywność technologiczna dla stopni rozdrobnienia

$i_{40}$ , oraz  $i_{80}$ , [Mg/h],

$Q_C$  – wydajność całkowita, [Mg/h],

$i_{40}$ ,  $i_{80}$  – stopnie rozdrobnienia – odpowiednio 40% i 80%.

Badania przeprowadzono w wibracyjnych kruszarkach szczękowych o kinematycznym KW 40/1 i bezwładnościowym wymuszeniu ruchu drgającego KWB-d oraz w klasycznej kruszarce szczękowej o prostym ruchu szczęki KS. Do badań pobierano próbki kamienia wapiennego o masie 1 kg oraz takim samym uziarnieniu ( $0 \div 40$  mm). Próby kruszenia wykonywano dla dwóch wartości szczeliny wylotowej: dla kruszarki wibracyjnej KW 40/1: 1,5 mm i 2,5 mm, natomiast dla kruszarki wibracyjnej KWB-d: 1,75 mm i 2,25 mm. Kruszarka szczękowa KS posiadała szczelinę wylotową  $e$  równą 5 mm.

Nadawę do kruszarek wibracyjnych podawano ręcznie, starając się, aby strefa kruszenia była wypełniona w około 50% wysokości – przy takim wypełnieniu kruszarki uzyskiwały największe wydajności. Podczas zasilania kruszarki KS komora kruszenia była zasypana prawie w całej wysokości.

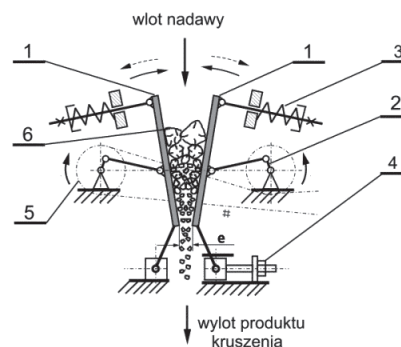
Każdą próbę powtarzano dwukrotnie, a końcowe wyniki stanowią średnią arytmetyczną z tych prób. Analizę sitową nadawy i produktu kruszenia wykonywano na sucho, zgodnie z PN-C-04501:1971. Wydajność kruszarek wyznaczono przez pomiar czasu kruszenia od rozpoczęcia procesu do jego zakończenia.

### Stanowiska badawcze

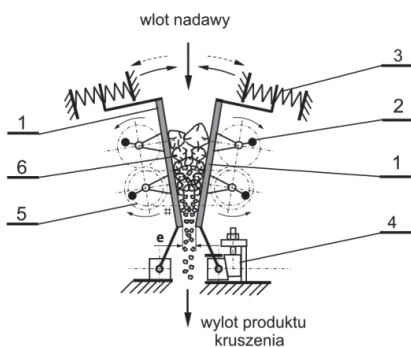
Schemat wibracyjnej kruszarki szczękowej KW 40/1 przedstawiono na rys. 1, kruszarki KWB-d na rys. 2, a na rys. 3 – schemat klasycznej kruszarki szczękowej KS. Podstawowe parametry kruszarek podano w tab. 1–3.

Wyposażenie stanowisk badawczych obejmowało: zespół zasilania i regulacji prędkości obrotowej silników kruszarek – przetwornik częstotliwości, układ pomiaru poboru mocy – watomierz rejestrujący, układ pomiaru częstotliwości drgań, układ odpylania i oczyszczania powietrza, przesiewacz wibracyjny z kompletem sit, wagę laboratoryjną, stoper i komplet szczelinomierzy.

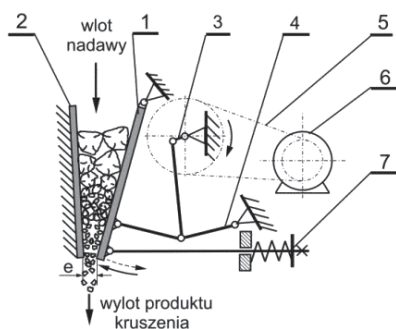
Zespół roboczy kruszarki przedstawionej na rys. 1 stanowią dwie ruchome szczęki – 1 zamocowane wahlawie u dołu. Układy sprężyste – 3 dociskają obie szczęki do rolek napędowych wibratorów kinematycznych – 2. Jedna ze szczęk ma mechanizm regulacji szczeliny wylotowej – 4. Oba wały wibratora sprzężone są przekładnią łańcuchową – 5, napędzaną przez silnik elektryczny. Ruch obu szczęk zachodzi w sposób przeciwny, to znaczy jednocześnie szczęki zbliżają się do siebie lub



Rys. 1. Schemat wibracyjnej kruszarki szczękowej KW 40/1 o kinematycznym wymuszeniu ruchu drgającego szczęk



Rys. 2. Schemat wibracyjnej kruszarki szczękowej KWB-d o bezwładnościowym wymuszeniu ruchu drgającego



Rys. 3. Schemat kruszarki szczękowej KS o prostym ruchu szczęki

się od siebie oddalają. Szczęki kruszarki mają wymienną, gładką wykładzinę stalową, jednakże istnieje możliwość zamocowania wykładzin ceramicznych. Kruszarka ma możliwość regulacji skoku obu szczęk.

Tab. 1. Podstawowe parametry wibracyjnej kruszarki szczękowej KW 40/1 o wymuszeniu kinematycznym ruchu drgającego

Wymiary wlotu: 100 × 160 mm	Moc silnika: 2,2 kW
Zakres regulacji szczeliny: 0,5÷10 mm	Wydajność: 50÷500 kg/h
Częstotliwość drgań szczęk: 14÷25 Hz	Wymiary: 840 × 420 × 980 mm
Maksymalne uziarnienie nadawy: 50 mm	Masa: 145 kg

Tab. 2. Podstawowe parametry wibracyjnej kruszarki szczękowej KWB-d o wymuszeniu bezwładnościowym ruchu drgającego

Wymiary wlotu: 120 × 150 mm	Moc silnika: 2,9 kW
Zakres regulacji szczeliny: 1,0÷20 mm	Wydajność: 50÷800 kg/h
Częstotliwość drgań szczęk: 22÷32 Hz	Wymiary: 825 × 480 × 770 mm
Maksymalne uziarnienie nadawy: 50 mm	Masa: ok. 200 kg

Tab. 3. Podstawowe parametry kruszarki szczękowej KS dwurozporowej o prostym ruchu szczęki

Wymiary wlotu: 100 × 50 mm	Moc silnika: 1,7 kW
Zakres regulacji szczeliny: 5÷20 mm	Wydajność: 50÷400 kg/h
Częstotliwość drgań szczęki: 2 Hz	Wymiary: 1050 × 470 × 1500 mm
Maksymalne uziarnienie nadawy: 40 mm	Masa: ok. 200 kg

Budowa wibracyjnej kruszarki szczękowej KWB-d (Rys. 2) jest bardzo podobna do kruszarki KW 40/1 (Rys. 1). Podstawową różnicą jest sposób wymuszania ruchu drgającego szczęk. W kruszarce KWB-d ruch szczęk – 1 powodują bezwładnościowe wibratory dwumasowe – 2, połączone są ze sobą za pomocą przekładni – 3. Kruszarka ta posiada mechanizm regulacji szczeliny wylotowej – 4. Układ zasilania silnika elektrycznego zapewnia bezstopniową regulację prędkości obrotowej wałów wibratorów, a tym samym częstotliwości drgań szczęk obydwu kruszarek.

Kruszarka szczękowa KS zbudowana ze szczęki ruchomej – 1, szczęki nieruchomej – 2. Szczęka ruchoma wprawiana jest w ruch jest wałem mimośrodowym – 3, napędzanym przekładnią – 4 przez silnik – 5. Ruch wahliwy szczęki – 1 oraz jej zabezpieczenie zapewnia mechanizm – 7, który tworzą dwie płyty rozporowe oraz cięgło, którego jeden koniec połączony jest ze szczęką, a drugi koniec posiada sprężynę zapewniającą stały kontakt szczęki – 1 z płytami rozporowymi.

## Program badań

Program badań obejmował określenie wpływu wielkości szczeliny wylotowej na następujące parametry procesu kruszenia:

- uziarnienie produktów kruszenia,
- wydajność całkowitą kruszarki,
- wydajność zewnętrznych klas ziarnowych: 0÷2 mm i 0÷1 mm,
- efektywność technologiczną procesu kruszenia dla dwóch stopni rozdrobnienia  $i_{80}$  oraz  $i_{40}$ .

W badaniach kruszarki wibracyjnej KW 40/1 przyjęto dwie wartości szczeliny wylotowej:  $e = 1,50$  mm, oraz  $e = 2,50$  mm oraz jedną częstotliwość drgań szczęk kruszarki 18 Hz.

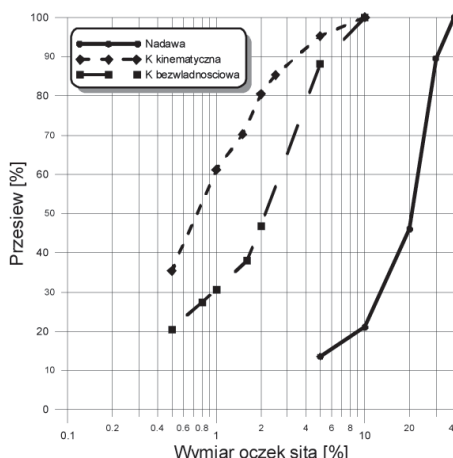
W badaniach kruszarki wibracyjnej KWB-d przyjęto również dwie wartości szczeliny wylotowej:  $e = 1,75$  mm, oraz  $e = 2,25$  mm. Wartości te uzyskano dla częstotliwości drgań szczęk odpowiednio: 32 i 30 Hz.

Wydajności klas ziarnowych 0÷2 mm, 0÷1 mm obliczono z iloczynu wydajności całkowitej i procentowej zawartości odpowiednich klas ziarnowych w produkcie kruszenia (od rozpoczęcia do zaniku procesu kruszenia).

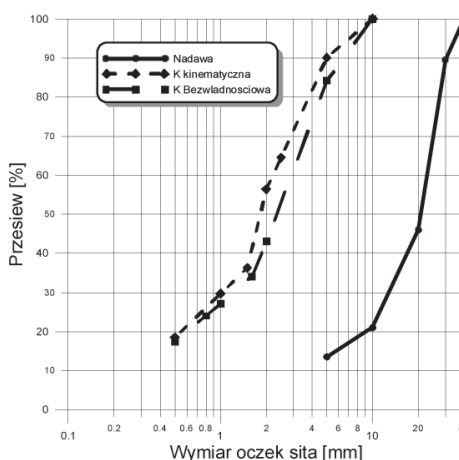
Stopnie rozdrobnienia  $i_{40}$ , oraz  $i_{80}$  wyznaczono jako ilorazy odpowiednich wymiarów ziaren z krzywych uziarnienia nadawy i produktu kruszenia. Graniczny stopień rozdrobnienia dla wszystkich prób kruszenia był jednakowy i wynosił 4 dla obydwu kruszarek wibracyjnych i 2 dla kruszarki szczękowej.

## Wyniki badań

Wyniki analizy sitowej oraz podstawowe parametry procesu kruszenia kamienia wapiennego podano w tab. 4, a na rys. 4–6 część wyników dotyczących uziarnienia rozdrabnianego kamienia wapiennego.



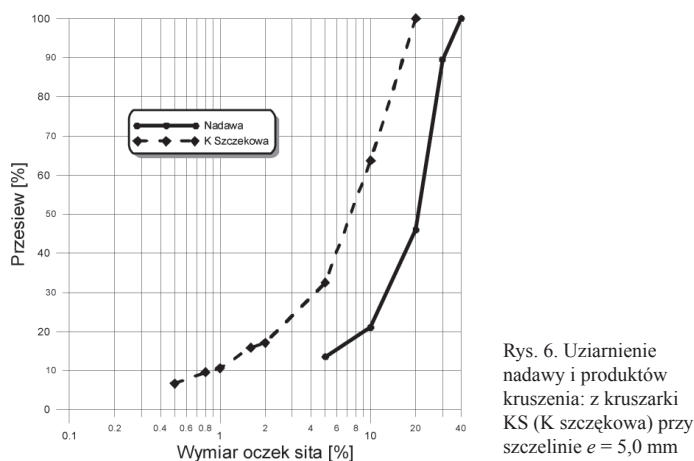
Rys. 4. Uziarnienie nadawy i produktów kruszenia: z kruszarki KW 40/1 (K kinematyczna) przy szczelinie  $e = 1,50$  mm i kruszarki KWB-d (K bezwładnościowa) przy szczelinie  $e = 1,75$  mm



Rys. 5. Uziarnienie nadawy i produktów kruszenia: z kruszarki KW 40/1 (K kinematyczna) przy szczelinie  $e = 2,50$  mm i kruszarki KWB-d (K bezwładnościowa) przy szczelinie  $e = 2,25$  mm

## Analiza wyników badań

Wyniki badań wskazują, że w szczękowych kruszarkach wibracyjnych proces kruszenia zachodzi bardzo intensywnie. Analizy uziarnie-



Rys. 6. Uziarnienie nadawy i produktów kruszenia: z kruszarki KS (K szczękowa) przy szczelinie  $e = 5,0$  mm

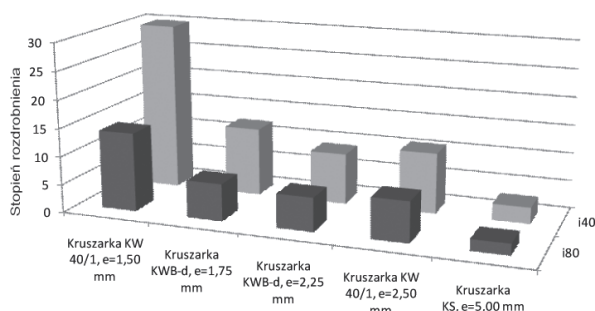
Tab. 4. Wyniki analizy sitowej oraz podstawowe parametry procesu kruszenia kamienia wapiennego

Kruszarka	KW 40/1		KWB-d		KS
Wymiar szczeliny wylotowej $e$ , mm	1,5	2,5	1,75	2,25	5
Wydajność całkowita, kg/h	71,7	97,3	104,6	131,1	208,0
Wydajność klasy $0 \div 2,0$ mm, kg/h	57,7	54,9	49,0	56,3	35,6
Wydajność klasy $0 \div 1,0$ mm, kg/h	43,9	28,9	31,9	35,5	22,0
Stopień rozdrobnienia $i_{40}$	30,0	10,8	12,2	9,1	2,9
Stopień rozdrobnienia $i_{80}$	14,0	7,2	6,6	6,0	2,0
Efektywność technologiczna $ET_{40}$ , Mg/h	2,2	1,1	1,3	1,2	0,6
Efektywność technologiczna $ET_{80}$ , Mg/h	1,0	0,7	0,7	0,8	0,4

nia produktów kruszenia z nich są bardzo stabilne, a zmiany udziałów poszczególnych klas ziarnowych są poniżej 2,5%.

Ziarna produktów kruszenia w kruszarkach wibracyjnych w przeważającej ilości cechowały się kształtem regularnym (kubicznym), przy czym w nadawie dominowały ziarna słupkowe i płytkowe. Jest to bardzo pożądana zaleta technologiczna, zwłaszcza w kruszywach.

Największe stopnie rozdrobnienia, zarówno  $i_{40}$  (30) oraz  $i_{80}$  (14), otrzymano w wibracyjnej kruszarce szczękowej o kinematycznym wymuszeniu ruchu drgającego (KW 40/1), przy szczelinie wylotowej  $e = 1,50$  mm. Przy szczelinie wylotowej  $e = 2,50$  mm otrzymano wyższe stopnie rozdrobnienia niż przy mniejszych szczelinach dla kruszarki wibracyjnej o bezwładnościowym wymuszeniu drgań (KWB-d). Można to wytłumaczyć faktem, że w kruszarce wibracyjnej kinematycznej szczelina wylotowa jest stała w czasie procesu rozdrabniania, natomiast w kruszarce KWB-d może się ona zmieniać (zwiększać) tylko w pewnym zakresie. Z tego powodu w tej kruszarce jest dużo większy wpływ uziarnienia nadawy na uziarnienie produktu kruszenia, co skutkuje pogarszaniem się wszystkich stopni rozdrobnienia produktu kruszenia, co stanowi pewną wadę tych kruszarek. Natomiast niewątpliwą zaletą bezwładnościowego sposobu wymuszenia ruchu drgającego szczęk jest całkowite zabezpieczenie kruszarki przed uszkodzeniem z powodu dostania się do przestrzeni roboczej materiału nie ulegającego kruszeniu (np. kawałka metalu). W takim przypadku następuje niemal całkowity zanik amplitudy drgań szczęk oraz niestety wstrzymanie procesu roz-



Rys. 7. Wpływ szczeliny wylotowej i wymiaru szczeliny kruszarek na stopnie rozdrobnienia:  $i_{40}$  oraz  $i_{80}$

drabniania, ale bez żadnego negatywnego wpływu na konstrukcję maszyny.

Kruszarki wibracyjne o wymuszeniu kinematycznym ruchu drgającego zabezpieczane są przed taką ewentualnością w inny sposób. Kruszarki laboratoryjne zabezpieczane są przez podlegający zniszczeniu kołek łączący bierne koło pasowe z piastą [Sidor i Krawczyk, 2010], a kruszarki przemysłowe na drodze elektrycznej [Sidor, 2008].

Graniczny stopień rozdrobnienia dla obu kruszarek wibracyjnych wyniósł 4 natomiast dla klasycznej kruszarki szczękowej 2.

Wydajność całkowita kruszarek zwiększała się wraz ze wzrostem wielkości szczeliny wylotowej. Wyższe wartości wydajności uzyskano dla kruszarki wibracyjnej KWB-d – nawet przy mniejszych wielkościach szczeliny wylotowej. Uzyskane wydajności kruszarek wibracyjnych należy traktować jako orientacyjne, ze względu na przyjętą metodę wyznaczania wydajności. W kilku próbach przy pracy ciągłej kruszarki uzyskano wydajność większą o około 50%.

Dla mniejszych wartości szczeliny wylotowej wyższe efektywności technologiczne posiada kruszarka wibracyjna o wymuszeniu kinematycznym. Dla szczelin większych efektywności technologiczne obu kruszarek były zbliżone.

Wyniki badań przeprowadzonych w klasycznej (handlowej) kruszarce szczękowej KS przy najmniejszej (konstrukcyjnie) szczelinie wylotowej  $e = 5,0$  mm zamieszczono w celu porównania jej możliwości technologicznych z kruszarkami wibracyjnymi. Jak należało oczekiwać uzyskano w niej największą wydajność całkowitą przy najmniejszych wydajnościach klas  $0 \div 2,0$  mm oraz  $0 \div 1,0$  mm. Konsekwencją tego były najmniejsze stopnie rozdrobnienia i efektywności technologiczne. Ponadto produkt kruszenia z tej kruszarki zawierał znaczną ilość ziaren płaskich.

### Kierunki dalszych badań

- Kierunki dalszych badań kruszarek wibracyjnych obejmują:
  - wyznaczenie jednostkowego zapotrzebowania energii na proces rozdrabniania,
  - badania procesu kruszenia innych materiałów pochodzenia mineralnego (surowców mineralnych, kruszyw, rud, węgla) oraz wytworzonych sztucznie (szkieł, tworzyw ceramicznych o wysokiej wytrzymałości mechanicznej i twardości),
  - opracowanie modelu matematycznego procesu kruszenia wibracyjnego,
  - opracowanie metody projektowania kruszarek wibracyjnych,
  - opracowanie typoszeregu kruszarek wibracyjnych o wydajności  $0,5 \div 10$  Mg/h.

### LITERATURA

Banaszewski T., 1971. *Wibracyjna kruszarka szczękowa*, Patent PRL nr 62930. Uprawniony z patentu: AGH, Kraków

Banaszewski T., 1974. *Wibracyjna kruszarka szczękowa*, Patent PRL nr 69 785. Patent dodatkowy do patentu Pl 62930. Uprawniony z patentu: AGH, Kraków

Drzymała Z., Sidor J., Kaczmarczyk S., Maćków E., Dzik T., Michalik W., Kurek B., Łagan A., 1986. *Kruszarka wibracyjna*, Patent PRL nr 133 128. Uprawniony z patentu: AGH, Kraków

Kobiałka R., Filipowicz A., Feliks J., 2000. Analiza kinematyki ruchu szczeki kruszarki jednorozporowej. *Pr. Nauk. Inst. Gór. Pol. Wroc.*, **91**, nr 28, 193-200

Sidor J., 1996. *Niektóre wyniki badań procesu bardzo drobnego kruszenia w kruszarce wibracyjnej*. Mat. IX Konf. Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Zakopane. z. 3, 169-176

Sidor J., 2007. Possible use of the vibration jaw crusher for process of preparing the recycling & utilization of ceramic waste products. *Polish Journal of Environmental Studies*, **16**, nr 3B, 451-454 (Supplement)

Sidor J., 2008. Preliminary investigations of industrial line of mechanical processing of ceramic wastes for recycling. *Polish Journal of Environmental Studies*, **17**, nr 3A, 507-510 (Supplement)

Sidor J., Krawczyk K., 2010. Instrukcja eksploatacyjna laboratoryjnej wibracyjnej kruszarki szczękowej KWj-4. ZSP, Kraków (niepubl.)

Sidor J., Mazur M., 2011. Niektóre wyniki badań procesu kruszenia wibracyjnego surowców mineralnych. *Przeł. Gór.*, **66**, nr 11, 106-111

Sidor J., Mazur M., 2012. Wpływ wybranych parametrów kruszarki wibracyjnej na proces kruszenia kwarcytu i diabazu. *Górnictwo Odkrywkowe*, **53**, nr 6, 5-6