

WPLYW WYBRANYCH PARAMETRÓW KRUSZARKI WIBRACYJNEJ NA PROCES KRUSZENIA KWARCYTU I DIABAZU

EFFECT OF THE VIBRATORY CRUSHER PARAMETERS ON QUARTZITE AND DIABASE CRUSHING PROCESS

Jan Sidor, Marcin Mazur – Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH - Akademia Górniczo Hutnicza, Kraków

Badania procesu kruszenia wibracyjnego przeprowadzono w doświadczalnej kruszarce wibracyjnej KW40/1. W pracy podano schemat, opis techniczny i podstawowe parametry kruszarki. Nadawą były próbki pierwotne kwarcytu i diabazu o maksymalnym uziarnieniu do 40 mm. Celem badań było określenie wpływu częstotliwości pracy szczęk, oraz wielkości szczeliny wylotowej na przebieg procesu kruszenia przy dwóch rozdrabnianych materiałach. Proces kruszenia wibracyjnego przebiegał bardzo intensywnie zarówno podczas rozdrabniania diabazu jak i kwarcytu. Z analizy krzywych składu ziarnowego produktu kruszenia wynika, że materiałem bardziej podatnym na kruszenie wibracyjne jest kwarcyt dla którego zawartość klas ziarnowych 0÷1 mm wynosiła 67,4 % (przy $e=0,5$ mm). Wyniki badań wskazują na niewielki wpływ zmian częstotliwości drgań szczęk na zawartość poszczególnych klas ziarnowych w produkcie kruszenia. Główny wpływ na uziarnienie produktu kruszenia miała wielkość szczeliny wylotowej kruszarki.

Słowa kluczowe: surowce mineralne, rozdrabnianie, kruszarki wibracyjne, kruszenie wibracyjne

The examinations of the vibratory disintegration process were performed in the experimental vibratory crusher KW 40/1. The work contains a diagram, technical description and basic parameters of the crusher. The feed included primordial samples of quartzite and diabase of maximal graining up to 40 mm. The aim of the tests was to determine the influence of the crusher jaws operation frequency and the crusher gap size on the disintegration process with two materials being disintegrated. The vibratory disintegration process went very well both for diabase and quartzite disintegration. Analyses of size distribution curve show that quartzite is more prone to vibratory disintegration and its content of size grade 0÷1 mm amounted at 67.4 % (at gap size $e=0.5$ mm). The tests results indicate little influence of jaws vibration frequency changes and on the content of particular size grades during the disintegration process. The main effect of the product particle size grade was the size of the crusher's gap.

Key words: raw materials, comminution, vibratory crushers, vibratory crushing

Wprowadzenie

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, Przerobczych 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 posiadała górne zawieszenie szczęk, a druga dolne [1, 2].

Wyniki badań procesu kruszenia przeprowadzone w tych kruszarkach wykazały ich bardzo dobre możliwości technologiczne [3]. Uzyskano w nich: od 3 do 6 razy większy średni stopień rozdrobnienia oraz od 4 do 7 razy większą efektywność procesu kruszenia – w stosunku do klasycznych kruszarek szczękowych. Miarą efektywności był iloczyn stopnia rozdrobnienia i wydajności kruszarki. Niestety jednostkowy pobór energii był większy od 40% do 100% niż w typowych kruszarkach szczękowych.

O kontynuacji prac w tej kruszarce zdecydował korzystny rezultat technologiczny. W latach osiemdziesiątych w Instytucie

Introduction

One of the first tests of the vibratory disintegration process was performed in the Institute of Mining, Dressing and Transport Machines and the Institute of Automatics of the University of Science and Technology in Cracow in the 70's. The experiments were realized in two prototype vibratory crushers driven by two-mass mechanical vibrators which differed due to the location of jaws mounting. [1, 2] During the tests of the disintegration process there was obtained from 3 to 6 times higher average level of size reduction, from 40% to 100% higher unitary energy consumption and from 4 to 7 times higher efficiency of the disintegration process – in relation to classical jaw crushers. [3] In the 80's in the Institute of Metallurgy Machines and Automatics – currently the Department of Manufacturing Systems – there was elaborated a prototype of a vibratory jaw crusher [4] which was applied for very fine disintegration of enamel frits in the Institute of Glass and Ceramics in Cracow. In 1992 in the Department of Technological Devices and Environmental Protection (currently the Department of Manufacturing Systems) a new version of the crusher was worked out [5] and used for tests of disintegration processes of several materials

Maszyn Hutniczych i Automatyki AGH – obecnie Katedra Systemów Wytwarzania – opracowano prototyp nowej konstrukcji szczękowej kruszarki wibracyjnej [4] z dolnym zawieszeniem szczęk napędzanych wibratorami kinematycznymi. Kruszarkę tę 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 [5], wyposażoną w wibratory kinematyczne z mechanizmem regulacji mimośrodków, co zapewniło możliwość regulacji skoku szczęk. Ważną zaletą technologiczną tej kruszarki było uzyskiwanie tego samego granicznego stopnia rozdrobnienia niezależnie od zmiany uziarnienia nadawy, co w kruszarkach z bezwładnościowym wymuszeniem ruchu drgającego szczęk sprawiało poważne kłopoty.

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 badań wykazały jej wysoką przydatność technologiczną, zwłaszcza przy kruszeniu materiałów ceramicznych o znacznej wytrzymałości na ściskanie, takich jak: żelazokrzem, azotek glinu, węglík tytanowo-krzemowy [5]. W roku 1996 przeprowadzono modernizację kruszarki w celu zwiększenia jej możliwości technologicznych, głównie możliwości uzyskania drobniejszego uziarnienia produktu kruszenia. Wyniki badań procesu kruszenia typowych surowców mineralnych (dolomitu i kamienia wapiennego) [6, 7] oraz przemysłowych odpadów ceramicznych: korundu, krzemu polikrystalicznego [8] potwierdziły celowość modernizacji. Prace badawcze w zakresie kruszenia wibracyjnego różnego rodzaju przemysłowych odpadów ceramicznych kontynuowano w następnych latach [9, 10, 11]. Opracowano również prototyp przemysłowej kruszarki do kruszenia tego typu odpadów [12] o wydajności 0,5÷0,8 Mg/h.

Niniejszy artykuł jest kolejnym etapem tych prac i zawiera wyniki badań procesu kruszenia kwarcytu z kopalni „Bukowa Góra” (Łączna k. Kielc) i diabazu z kopalni „Niedźwiedzia Góra” (Tenczynek k. Krzeszowic). Głównym celem badań było eksperymentalne potwierdzenie możliwości zastosowania tej kruszarki do bardzo drobnego kruszenia tych materiałów (do uziarnienia o d_{90} poniżej 2,5 mm). Otrzymane wyniki wykazały pełną przydatność technologiczną kruszarki do uzyskania dużych stopni rozdrobnienia (i_{90} oraz i_{50}) przy kruszeniu badanych materiałów w jednym stadium rozdrabniania, oraz umożliwiły dobór najkorzystniejszych parametrów procesu rozdrabniania, a także dostarczyły pewnych informacji w zakresie możliwości wyznaczenia podatności danego materiału na kruszenie wibracyjne.

Badania procesu kruszenia wibracyjnego

Cel i metoda badań

Celem badań było określenie wpływu wielkości szczeliny wylotowej oraz częstotliwości pracy szczęk kruszarki na przebieg procesu kruszenia przy dwóch rozdrabnianych materiałach. Zbadano zawartość dolnych zewnętrznych klas ziarnowych: 0÷2,5 mm i 0÷1,5 mm, oraz wyznaczono wydajności (całkowitą i badanych klas ziarnowych) oraz efektywności technologiczne

of very differentiated strength properties. In 1996 the crusher was modernised in order to increase its technological capabilities. A number of studies of the vibratory crushing process was performed – mainly of a technological nature in the very fine crushing of materials with very different strength properties. The results showed the technological usefulness of the crusher, especially during crushing ceramic materials significant compressive strength, such as ferrosilicon, aluminum nitride, titanium carbide and silicon. [5] In 1996, the crusher was modernized to improve its technological capabilities, primarily to obtain finer grain size distribution of the crushing product. The better results of the crushing process of typical minerals (dolomite and limestone) [6, 7] and industrial waste ceramics: alumina, silicon, polycrystalline [8] confirmed the desirability of modernization. Research works of vibratory crushing different types of the industrial ceramic waste were continued in the following years [9, 10, 11]. Developed a prototype of an industrial crusher for crushing this type of waste [12] with a capacity of 0.5 ÷ 0.8 Mg/h. The present work comprises tests results of disintegration processes of quartzite from the mine of ‘Bukowa Góra’ (Łączna by Kielce) and diabase from the mine of ‘Niedźwiedzia Góra’ (Tenczynek by Krzeszowice). The obtained results, presented in the form of size distribution curves of the disintegration output, enable determination of susceptibility of a certain material to vibratory disintegration and selection of the most favourable parameters of the disintegration process.

Examinations of vibratory disintegration process

The tests objectives and method

The aim of the tests was to determine the influence of the crusher jaws operation frequency and the size of the outlet gap on the disintegration process with two materials being disintegrated. The content of lower external size grades was tested: 0 ÷ 2.5 mm and 0 ÷ 1.5 mm and efficiencies were determined (total and the one of examined size grades) as well as crusher technological efficiencies (ET_{50} and ET_{90}) in the function of jaws vibration frequency and the size of the outlet gap.

Technological efficiencies of the disintegration process ET_{50} and ET_{90} were calculated using the formulas:

$$ET_{50} = Q_C \times i_{50}, \quad ET_{90} = Q_C \times i_{90}, \quad [\text{Mg/h}]$$

where: ET_{50} , ET_{90} – technological efficiency for size reduction levels i_{50} and i_{90} , [Mg/h]
 Q_C – total efficiency, [Mg/h]
 i_{50} , i_{90} – size reduction levels, respectively 50% and 90%

The tests included primordial samples of the two materials being disintegrated of 1 kg mass of the same graining (0 ÷ 40 mm) (Tab.1). The range of jaws vibration frequency changes amounted at 14 ÷ 22 Hz (2 Hz step) and the size of the outlet gap at: 0.5 mm, 1.5 mm and 2.5 mm. The crusher was fed manually trying to keep the crushing area filled up in about 50% of its height to obtain the highest efficiency. Each test was repeated twice and the final results are the arithmetic mean of two tests. The screen analysis of the feed and disintegration product was performed dry according to PN C 04501:1971. The crusher efficiency was assessed by measuring the disintegration time from the process beginning to its end. Technological efficiency - ET_{50}

kruszarce (ET_{50} i ET_{90}) zarówno w funkcji częstotliwości drgań szczęk jak i wielkości szczeliny wylotowej.

Efektywności technologiczne procesu kruszenia ET_{50} , oraz ET_{90} obliczano z następujących wyrażen:

$$ET_{50} = Q_c \times i_{50}, \quad ET_{90} = Q_c \times i_{90}, \quad [\text{Mg/h}]$$

gdzie: ET_{50} , ET_{90} – efektywność technologiczna dla stopni rozdrobnienia i_{50} , oraz i_{90} , [Mg/h]

Q_c – wydajność całkowita, [Mg/h]

i_{50} , i_{90} – stopnie rozdrobnienia - odpowiednio 50% i 90%

Badania przeprowadzono w wibracyjnej kruszarce szczękowej typu KW 40/1 w Katedrze Systemów Wytwarzania AGH. Do badań pobierano próbki pierwotne obu rozdrabnianych materiałów o masie 1 kg, rozdrobnione wstępnie w kruszarce szczękowej. Wszystkie próbki miały takie same uziarnienie (0÷40 mm) - tab. 1, rys. 5, 6, 7 i 8. Próby kruszenia wykonywano dla trzech wartości szczeliny wylotowej, oznaczonej symbolem e , to jest: 0,6 mm, 1,5 mm i 2,5 mm. Zakres zmian częstotliwości drgań szczęk wynosił 14 ÷ 22 Hz co 2 Hz. Zasilanie kruszarce wykonywano ręcznie, starając się, aby strefa kruszenia była wypełniona w około 50 % wysokości – przy takim wypełnieniu kruszarka uzyskiwała największą wydajność. Każdą próbę powtarzano dwukrotnie, a końcowe wyniki stanowią średnią

Tab. 1. Skład ziarnowy nadawy – kwarcytu i diabazu
Tab. 1. Feed grain composition – quartzite and diabase

Klasa ziarnowa, mm Material	40÷30 mm grade %	30÷20 mm grade %	20÷10 mm grade %	10÷5 mm grade %	< 5 mm grade %
Udział klasy, % Quartzite/Diabase	45,5	31,4	12,0	5,1	6,0

arytmetyczną z dwóch prób. Analizę sitową nadawy i produktu kruszenia wykonywano na sucho zgodnie z PN-C-04501:1971. Wydajność kruszarce wyznaczono przez pomiar czasu kruszenia od rozpoczęcia procesu do jego zakończenia.

Diabaz jest to magmowa skała żyłowa o składzie mineralnym bazaltu ale o grubszym ziarnie. Diabaz pochodzący z kopalni „Niedźwiedzia Góra” ze względu na dużą twardość jest stosowany do produkcji wysokiej jakości kruszyw na podbudowy dróg oraz ze względu na bardzo dobrą przyczepność do bituminów – do mieszanek bitumiczno asfaltowych. Wytrzymałość na ściskanie diabazu $R_c = 180 \div 260$ MPa.

Kwarcyt pochodził z Gór Świętokrzyskich i należy do skał osadowych. Jest bardzo odporny na obróbkę mechaniczną, nawet bardziej od granitu. Stosowany jest do produkcji wysokich jakości kruszyw na podbudowy dróg i w kolejnictwie. Wytrzymałość na ściskanie kwarcytu $R_c = 200 \div 300$ MPa.

Stanowisko badawcze laboratoryjnej, wibracyjnej kruszarce szczękowej

Stanowisko badawcze wibracyjnej kruszarce szczękowej typu KW 40/1 przedstawiono na rysunku 1. W skład stanowiska wchodzi: laboratoryjna kruszarka KW 40/1, zespół zasilania i regulacji prędkości obrotowej silnika kruszarce - przetwornik częstotliwości, układ pomiaru poboru mocy, układ pomiaru częstotliwości drgań, układ odpylania i oczyszczania powietrza oraz przesiewacz wibracyjny z kompletem sit, waga laboratoryjna, stoper i komplet szczelinomierzy.

and ET_{90} was determined as the product of total efficiency and the level of size reduction respectively i_{50} , and i_{90} .

Diabase is an igneous intrusive rock equivalent to basalt but of thicker grain. Diabase from the mine of ‘Niedźwiedzia Góra’ due to its hardness is commonly used for manufacturing high quality aggregates for road foundations, and because of its good adherence to bitumen – for bitumen and asphalt blacktops. Diabase compression strength $R_c = 180 \div 260$ MPa.

Quartzites from the Świętokrzyskie Mountains belong to sedimentary quartzites. They are very resistant to mechanical working. In this field they have an advantage over such a hard rock like e.g. granite. They are used for manufacturing high quality aggregates for road foundations and in railway engineering. Quartzite compression strength $R_c = 200 \div 300$ MPa. Additionally, quartzites are characterised by high resistance to mechanical processing.

Research station of the vibratory jaw crusher

The research station (Fig. 1) comprised the experimental vibratory jaw crusher KW 40/1, unit of feeding and rotational speed control of the crusher engine (frequency inverter), system of power consumption measurement, system of vibrations frequency measurement, vibrating screen with a set of sieves, laboratory scales, timer and a set of feeler gauges.



Rys. 1. Stanowisko badawcze wibracyjnej kruszarce szczękowej KW 40/1 [7]
Fig. 1. Research station of the vibratory jaw crusher [7]

The diagram of the KW 40/1 crusher construction was presented in fig. 2.

The working unit of the crusher consists of two live jaws 1 mounted self-aligningly at the bottom. Elastic systems 2 press both jaws to inverse cams of mechanical kinematic vibrators 3. One of the jaws is equipped with a mechanism controlling the outlet gap 4. Both vibrator shafts are coupled by a chain

Schemat budowy i działania kruszarki typu KW 40/1 przedstawiono na rysunku 2.

Zespół roboczy kruszarki stanowią dwie ruchome szczęki 1 zamocowane wahliwie u dołu. Układy sprężyste 2 dociskają obie szczęki do rolek napędowych wibratorów kinematycznych 3. Jedna ze szczęk ma mechanizm regulacji szczeliny wylotowej 4. Oba wały wibratora sprzężone są przekładnią łańcuchową 5, przenoszącą moment napędowy z silnika elektrycznego 6. Ruch obu szczęk zachodzi w sposób przeciwsobny, to znaczy jednocześnie szczęki zbliżają się do siebie lub od siebie oddalają. Szczęki kruszarki posiadają wymienną gładką wykładzinę stalową, jednakże istnieje możliwość zamocowania wykładzin ceramicznych. Kruszarka ma możliwość regulacji skoku obu szczęk. Układ zasilania silnika elektrycznego 6 zapewnia bezstopniową regulację prędkości obrotowej wałów wibratora, a tym samym częstotliwości drgań szczęk. Rozwiązanie techniczne kruszarki chronione jest patentem [2].

Podstawowe parametry szczękowej kruszarki wibracyjnej typu KW 40/1:

- Wymiary wlotu:	100 x 160 mm
- Zakres regulacji szczeliny:	0,5÷10 mm
- Częstotliwość drgań szczęk:	14÷25 Hz
- Maksymalne uziarnienie nadawy:	50 mm
- Moc silnika:	2,2 kW

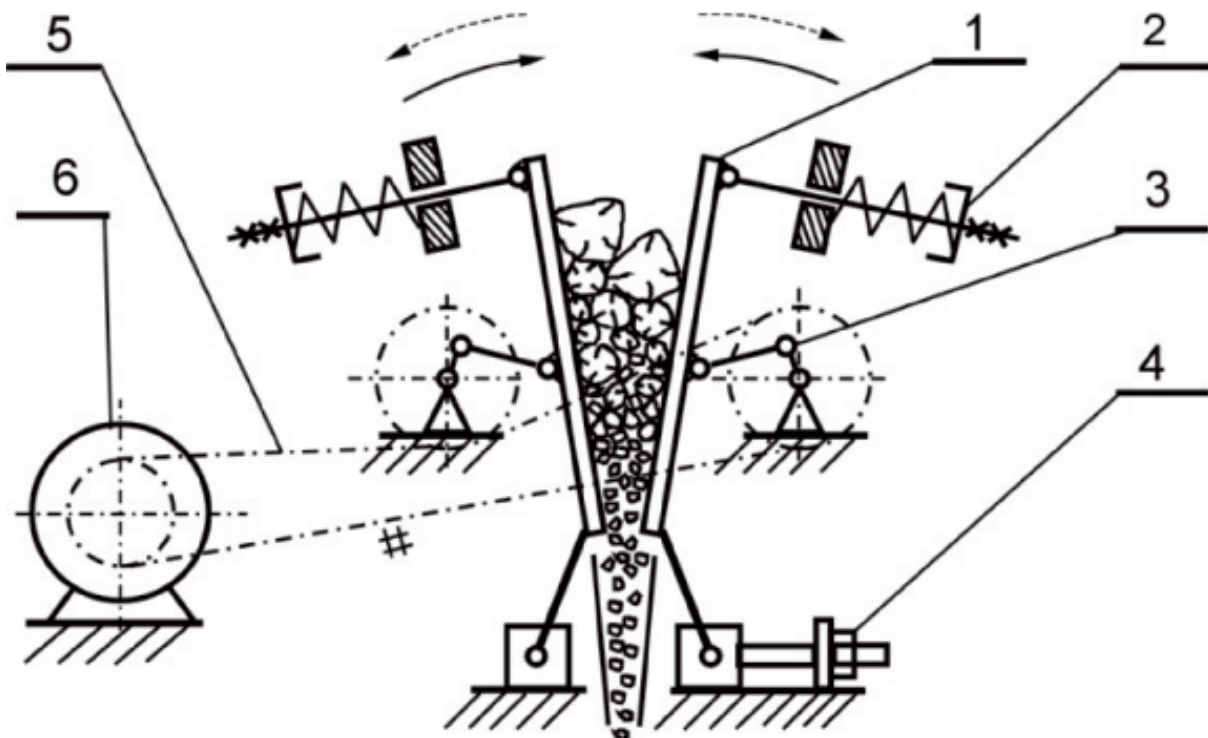
transmission 5, driven by an electric engine 6. The jaws work contrariwise which means they move closer or away at the same time. The crusher jaws have replaceable smooth steel lining although it is possible to mount ceramic linings. The crusher can control the travel of both jaws. The electric engine feed system 6 ensures smooth control of vibrator shafts rotational speed and thus the frequency of jaws vibration. The technical solution of the crusher is protected by a patent [2].

Basic parameters of the vibratory jaw crusher of KW 40/1 type:

- Inlet dimensions :	100 x 160 mm
- Range of gap control :	0,5÷10 mm
- Jaws vibration frequency :	8÷25 Hz
- Engine power :	2.2 kW
- Maximal feed grain:	40 mm
- Dimensions:	840 x 420 x 980 mm
- Mass:	145 kg
- Efficiency:	50÷500 kg/h

Program, implementation and tests results

The tests program included determining the influence of crusher jaws vibration frequency and the crusher outlet gap on



Rys. 2. Schemat mechaniczny wibracyjnej kruszarki szczękowej typu KW 40/1: 1 – szczęki, 2 – układ sprężysty, 3 – wibrator kinematyczny, 4 – mechanizm regulacji szczeliny, 5 –przekładnia napędu szczęk, 6 – silnik [5,6,7]

Fig. 2. Mechanical diagram of the KW 40/1 vibratory jaw crusher: 1 – jaws, 2 – elastic system, 3 – kinematic vibrator, 4 – gap control mechanism, 5 –jaws drive transmission, 6 – engine [5, 6, 7]

- Wydajność:	50÷500 kg/h
- Wymiary:	840x420x980mm
- Masa:	145 kg

Program, realizacja i wyniki badań

Program badań obejmował określenie wpływu wielkości szczeliny wylotowej oraz częstotliwości drgań szczęk kruszarki na następujące parametry procesu kruszenia:

- uziarnienie produktów kruszenia,

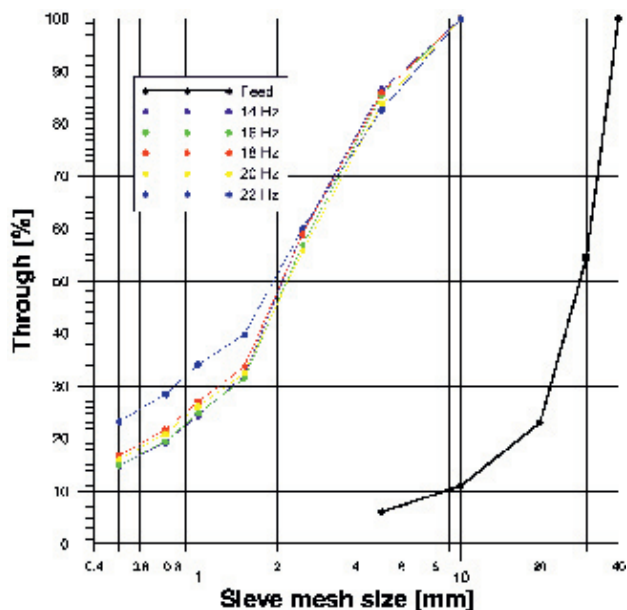
the following parameters of the disintegration process:

- graining of the disintegration products,
- total efficiency of the crusher,
- size reductions levels i_{90} and i_{50}
- efficiency of external size grades: 0 ÷ 1.5 mm and 0 ÷ 2.5 mm
- technological efficiency of the disintegration process for two levels of size reduction i_{90} and i_{50} .

The first series of tests concerned determining errors of the disintegration process. For each of the materials there were four disintegration tests performed at jaws vibration frequency

- wydajność całkowitą kruszarki,
- stopnie rozdrobnienia i_{90} oraz i_{50}
- wydajność zewnętrznych klas ziarnowych: $0 \div 1,5$ mm i $0 \div 2,5$ mm,
- efektywność technologiczną procesu kruszenia dla dwóch stopni rozdrobnienia i_{90} oraz i_{50} .

Pierwsza seria badań dotyczyła wyznaczenia błędów procesu kruszenia. Stąd dla każdego materiału wykonano po cztery próby kruszenia przy częstotliwości drgania szczęk $f = 18$ Hz, oraz szczelinie $e = 1,5$ mm. Badania te miały na celu obniżenie pracochłonności całego eksperymentu, w przypadku jeśli błędy kruszenia będą poniżej 3÷4%. Podczas wyznaczania błęd używano rozkładu t Studenta, zakładając poziom ufności $\alpha = 0,05$. Błąd analizy dla próbek kwarcytu nie przekroczył 3%, natomiast dla diabazu był mniejszy od 1,5%. Maksymalny błąd dla dwóch prób kruszenia wynosi odpowiednio 2,5% dla diabazu i 4% dla kwarcytu. Z powyższych względów wszystkie pozostałe wyniki badań stanowią średnią arytmetyczną z dwóch prób kruszenia.

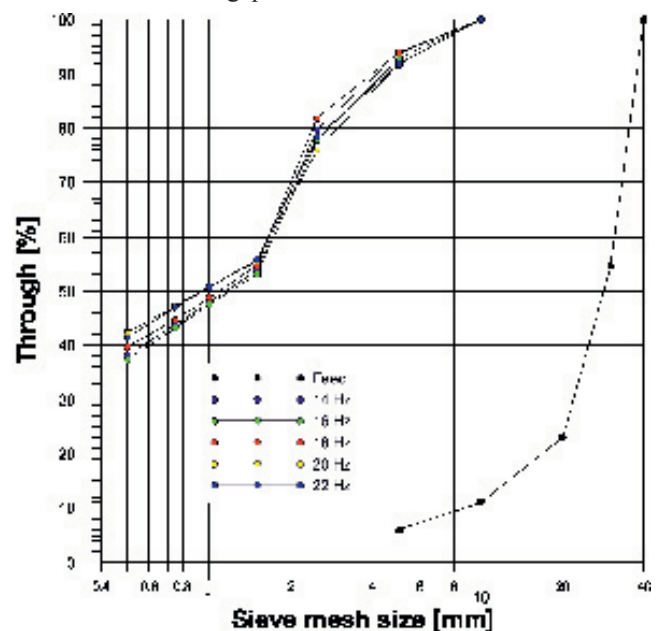


Rys. 3. Wyniki analizy sitowej diabazu
Fig. 3. Results of diabase screen analysis

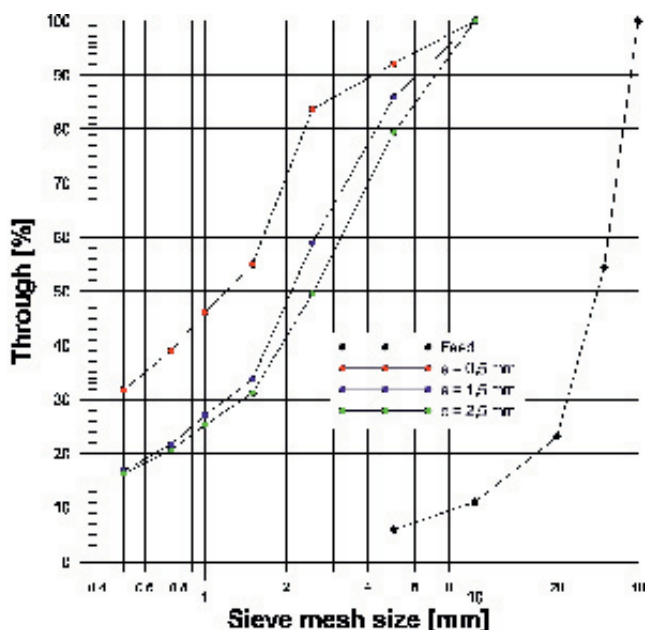
$f = 18$ Hz. The tests were to lower labour demand of the whole experiment in case the disintegration errors were below 3-4%. T-Student test was applied to determine errors assuming confidence level $\alpha = 0.05$. Disintegration error for quartzite did not exceed 3%, whereas for diabase it was lower than 1.5%. Maximal error for two disintegration tests was 2.5% for diabase and 4% for quartzite. For these reasons, all the other results are the arithmetic mean of the two crushing samples.

The second series of tests was to determine the influence of frequency of jaw vibration on the crushing process parameters. The results of the screen analysis and basic parameters of the disintegration process with the crusher outlet gap $e = 1.5$ mm were presented in tables 2 and 3 for diabase and quartzite respectively.

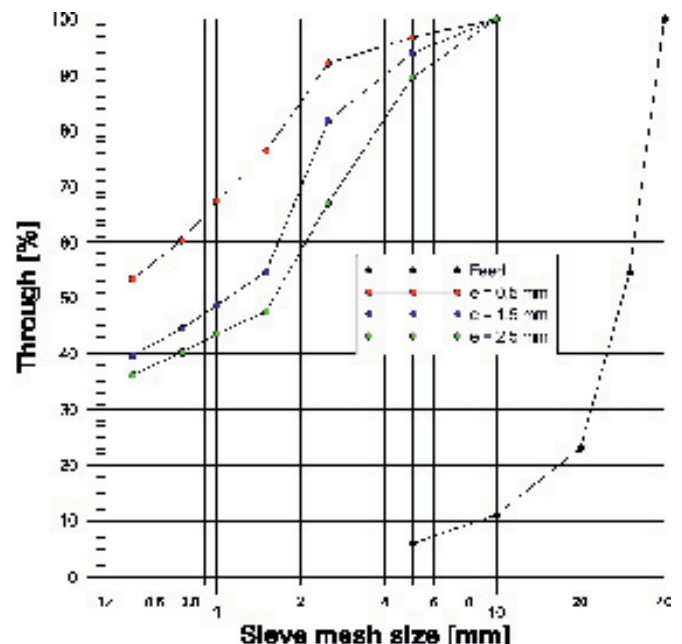
Figs. 3 and 4 present size distribution curves of the disintegration product and the feed for diabase and quartzite respectively, obtained with outlet gap size $e = 1.5$ mm.



Rys. 4. Wyniki analizy sitowej kwarcytu
Fig. 4. Results of quartzite screen analysis



Rys. 5. Wyniki analizy sitowej diabazu ($f = 18$ Hz)
Rys. 5. Results of diabase screen analysis



Rys. 6. Wyniki analizy sitowej kwarcytu ($f = 18$ Hz)
Rys. 6. Results of quartzite screen analysis

Tab. 2. Wyniki analizy sitowej oraz podstawowe parametry procesu kruszenia diabazu uzyskane przy $e = 1,5$ mm
 Tab. 2. The results of the screen analysis and basic parameters of the disintegration process for diabase

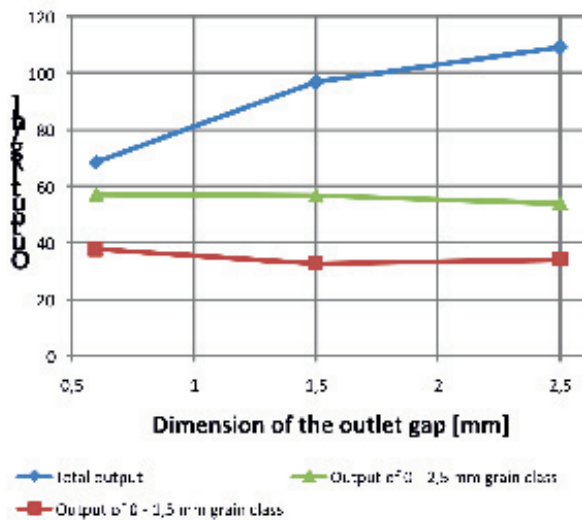
Częstotliwość drgań f , Hz Vibration frequency f , Hz	14	16	18	20	22
Wymiar oczek sita, mm Sieve mesh size, mm	Suma frakcji, % Sum of fractions, %				
10.0	100	100	100	100	100
5.0	86,5	85,5	85,9	83,8	82,6
2.5	59,3	56,9	58,9	55,8	60,1
1.5	32,0	31,5	33,8	32,5	39,9
1.0	24,5	24,8	27,1	26,2	34,2
0.75	19,3	19,5	21,7	20,9	28,5
< 0.5	14,8	14,9	16,8	16,1	23,2
Wydajność całkowita, kg/h Total efficiency, kg/h	99,5	102,0	96,8	84,0	67,5
Wydajność klasy $0 \div 1,5$ mm, kg/h Efficiency of grade $0 \div 1.5$ mm, kg/h	31,8	32,2	32,7	27,3	27
Wydajność klasy $0 \div 2,5$ mm, kg/h Efficiency of grade $0 \div 2.5$ mm, kg/h	59,1	58,0	57,0	46,9	40,5
Stopień rozdrobnienia i_{50} Size reduction level i_{50}	13,6	13,0	13,6	12,9	14,6
Stopień rozdrobnienia i_{90} Size reduction level i_{90}	6,2	6,1	6,3	5,8	5,6
Efektywność technologiczna ET_{50} , Mg/h Technological efficiency ET_{50} , Mg/h	1,35	1,33	1,32	1,09	0,99
Efektywność technologiczna ET_{90} , Mg/h Technological efficiency ET_{90} , Mg/h	0,63	0,62	0,61	0,49	0,38

Tab. 3. Wyniki analizy sitowej oraz podstawowe parametry procesu kruszenia kwarcytu uzyskane przy $e = 1,5$ mm
 Tab. 3. The results of the screen analysis and basic parameters of the disintegration process for quartzite

Częstotliwość drgań f , Hz Vibration frequency f , Hz	14	16	18	20	22
Wymiar oczek sita, mm Sieve mesh size, mm	Suma frakcji, % Sum of fractions, %				
10.0	100	100	100	100	100
5.0	93,8	92,7	93,9	91,9	91,8
2.5	79,7	77,8	81,8	75,9	78,5
1.5	53,8	53,1	54,7	55,5	55,8
1.0	47,8	47,5	48,7	50,7	50,7
0.75	43,6	43,2	44,5	47,0	47,0
< 0.5	38,1	37,4	39,8	42,3	41,5
Wydajność całkowita, kg/h Total efficiency, kg/h	134,7	137,4	131,2	130,8	122
Wydajność klasy $0 \div 1,5$ mm, kg/h Efficiency of grade $0 \div 1.5$ mm, kg/h	72,4	72,9	71,7	72,6	68,1
Wydajność klasy $0 \div 2,5$ mm, kg/h Efficiency of grade $0 \div 2.5$ mm, kg/h	107,4	106,9	107,3	99,3	95,7
Stopień rozdrobnienia i_{50} Size reduction level i_{50}	24,4	23,2	25,9	30,1	29,8
Stopień rozdrobnienia i_{90} Size reduction level i_{90}	9,1	8,5	9,4	8,2	8,3
Efektywność technologiczna ET_{50} , Mg/h Technological efficiency ET_{50} , Mg/h	3,29	3,19	3,4	3,94	3,64
Efektywność technologiczna ET_{90} , Mg/h Technological efficiency ET_{90} , Mg/h	1,22	1,17	1,23	1,07	1,01

Tab. 4. Wyniki analizy sitowej oraz podstawowe parametry procesu kruszenia diabazu
 Tab. 4. The results of the screen analysis and basic parameters of the disintegration process for diabase

Wymiar szczeliny wylotowej e, mm The dimension of the outlet gap e, mm	0,5	1,5	2,5
Wymiar oczek sita, mm Sieve mesh size, mm	Suma frakcji, % Sum of fractions, %		
10,0	100	100	100
5,0	92,1	85,9	79,3
2,5	83,6	58,9	49,6
1,5	55,1	33,7	31,2
1,0	46,1	27,1	25,3
0,75	39,0	21,7	20,6
< 0,5	31,7	16,8	16,4
Wydajność całkowita, kg/h Total efficiency, kg/h	68,6	96,8	109,1
Wydajność klasy 0 ÷ 1,5 mm, kg/h Efficiency of grade 0 ÷ 1.5 mm, kg/h	37,8	32,7	34,1
Wydajność klasy 0 ÷ 2,5 mm, kg/h Efficiency of grade 0 ÷ 2.5 mm, kg/h	57,4	57,0	54,1
Stopień rozdrobnienia i_{50} Size reduction level i_{50}	23,7	13,6	11,2
Stopień rozdrobnienia i_{90} Size reduction level i_{90}	8,9	6,3	5,3
Efektywność technologiczna ET_{50} , Mg/h Technological efficiency ET_{50} , Mg/h	1,63	1,32	1,22
Efektywność technologiczna ET_{90} , Mg/h Technological efficiency ET_{90} , Mg/h	0,61	0,61	0,58



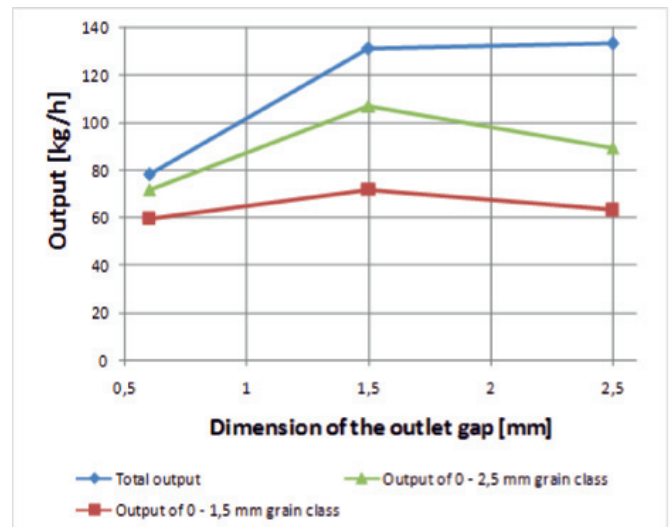
Rys. 7. Wpływ wymiaru szczeliny wylotowej na wydajność kruszarki przy rozdrabnianiu diabazu ($f = 18$ Hz) Fig.

Fig. 7. Effect of the gap dimension on the performance of the crusher for diabase

Druga seria badań miała na celu wyznaczenie wpływu częstotliwości drgań szczęk kruszarki na parametry procesu rozdrabniania. Wyniki analizy sitowej oraz podstawowe parametry procesu kruszenia przy szczeliny wylotowej kruszarki $e = 1,5$ mm zostały przedstawione w tabelach 2 i 3, odpowiednio dla diabazu i kwarcytu.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono krzywe składu ziarnowego produktu kruszenia oraz nadawy odpowiednio dla diabazu i kwarcytu uzyskane przy $e = 1,5$ mm.

Po analizie wyników badań drugiej serii przyjęto częstotli-



Rys. 8. Wpływ wymiaru szczeliny wylotowej na wydajność kruszarki przy rozdrabnianiu kwarcytu ($f = 18$ Hz)

Fig. 8. Effect of the gap dimension on the performance of the crusher for quartzite

After analyzing the results of the second series, accepted the jaws frequency $f = 18$ Hz as the most favorable during grinding quartzite and diabase. Then performed a study to determine the effect of the size of the outlet gap at crushing process parameters with fixed oscillation frequency $f = 18$ Hz. The results of the sieve analysis and the basic parameters of the crushing process with adopted frequency are presented in tables 4 and 5, respectively, for diabase and quartzite.

Figs. 5 and 6 present size distribution curves of the disintegration product and the feed for diabase and quartzite

Tab. 5. Wyniki analizy sitowej oraz podstawowe parametry procesu kruszenia kwarcytu

Tab. 5. The results of the screen analysis and basic parameters of the disintegration process for quartzite

Wymiar szczeliny wylotowej e, mm The dimension of the outlet gap e, mm	0,5	1,5	2,5
Wymiar oczek sita, mm Sieve mesh size, mm	Suma frakcji, % Sum of fractions, %		
10,0	100	100	100
5,0	96,7	93,9	89,5
2,5	92,2	81,8	67,1
1,5	76,4	54,7	47,5
1,0	67,4	48,7	43,5
0,75	60,3	44,5	40,3
< 0,5	53,4	39,8	36,2
Wydajność całkowita, kg/h Total efficiency, kg/h	78,2	131,2	133,3
Wydajność klasy 0 ÷ 1,5 mm, kg/h Efficiency of grade 0 ÷ 1.5 mm, kg/h	59,7	71,7	63,4
Wydajność klasy 0 ÷ 2,5 mm, kg/h Efficiency of grade 0 ÷ 2.5 mm, kg/h	72,0	107,3	89,4
Stopień rozdrobnienia i_{50} Size reduction level i_{50}	69,4*	25,9	17,7
Stopień rozdrobnienia i_{90} Size reduction level i_{90}	16,1	9,40	7,3
Efektywność technologiczna ET_{50} , Mg/h Technological efficiency ET_{50} , Mg/h	8,82	3,40	2,36
Efektywność technologiczna ET_{90} , Mg/h Technological efficiency ET_{90} , Mg/h	1,26	1,23	0,97

* do określenia wymiaru ziarna d_{50} przy szczelinie 0.5 mm aproksymowano krzywą uziarnienia do wartości przesiewu 50%.* to determine the grain size d_{50} for the gap size of 0.5 mm the grain size distribution curve was approximated to a screening value of 50%.

wość drgań szczęk $f = 18$ Hz jako najbardziej korzystną podczas rozdrabniania kwarcytu i diabazu. Następnie przeprowadzono badania mające na celu określenie wpływu wielkości szczeliny wylotowej na parametry procesu rozdrabniania przy ustalonej częstotliwości drgań $f = 18$ Hz. Wyniki analizy sitowej oraz podstawowe parametry procesu kruszenia przy założonej częstotliwości zostały przedstawione w tabelach 4 i 5, odpowiednio dla diabazu i kwarcytu.

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono krzywe składu ziarnowego produktu kruszenia oraz nadawy odpowiednio dla diabazu i kwarcytu uzyskane przy $f = 18$ Hz.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono zależność wydajności całkowitej oraz badanych klas w funkcji wielkości szczeliny wylotowej, przy założonej częstotliwości pracy szczęk $f = 18$ Hz, odpowiednio dla diabazu i kwarcytu.

Ocena i podsumowanie wyników badań

Na podstawie otrzymanych wyników badań można stwierdzić, że w szczękowej kruszarce wibracyjnej proces kruszenia zachodzi bardzo intensywnie. Stwierdzono niewielki wpływ częstotliwości pracy szczęk na parametry procesu kruszenia. Wraz ze wzrostem częstotliwości zaobserwowano nieznaczny wzrost stopnia rozdrobnienia i_{50} zarówno dla diabazu, jak i kwarcytu, jednakże po przekroczeniu $f = 18$ Hz dość wyraźnie spada wydajność kruszenia, wzrasta zauważalnie poziom drgań kruszarki oraz poziom ciśnienia akustycznego. Wobec powyższych przyjęto częstotliwość

respective, obtained with jaws frequency $f = 18$ Hz.

Figures 7 and 8 show the dependence of the total output, and tested grain classes as a function of the outlet gap at the fixed frequency jaws $f = 18$ Hz, respectively, for diabase and quartzite.

Assessment and summary of the results

On the bases of the obtained results it can be stated that the disintegration process in a vibratory jaws crusher takes place very intensively. During disintegration process a slight effect of the jaw frequency on crushing process parameters was observed. However, it should be emphasized that after exceeding frequency $f = 18$ Hz, the disintegration efficiency decreases significantly, and there is an increase of crusher vibrations level and acoustic pressure level. The examinations showed that during disintegration processes of both materials, the most favourable frequency of crusher operation i.e. the one causing the highest efficiencies of ET_{50} and ET_{90} is $f = 18$ Hz. Examination of the influence of the outlet gap on the selected parameters of crushing process was performed for the above frequency. It should be noted that during the crushing of quartzite with an outlet gap $e = 0.5$ mm more than 50% by weight of the product has passed through a sieve of 0.5 mm and up to 67% through a sieve of 1 mm. This results in a very high degree of fragmentation of almost 70 (the need to approximate the grain size curve to determine the grain size d_{50}). With the increase of the value of the outlet gap observed the expected increase in the overall output of the crusher. The calculated values of output

pracy szczęk kruszarki $f = 18$ Hz jako najkorzystniejszą podczas rozdrabniania kwarcytu i diabazu. Badanie wpływu wielkości szczeliny wylotowej na wybrane parametry procesu kruszenia wykonano dla powyższej częstotliwości. Należy zauważyć, że podczas rozdrabniania kwarcytu przy szczelinie wylotowej $e = 0,5$ mm ponad 50% masy produktu przeszło przez sito 0,5 mm, a aż 67% przez sito 1 mm. Skutkuje to bardzo wysokim stopniem rozdrobnienia wynoszącym prawie 70 (konieczność dokonania aproksymacji krzywej uziarnienia w celu określenia d_{50}). Wraz ze wzrostem wartości wielkości szczeliny wylotowej zaobserwowano spodziewany wzrost wydajności całkowitej kruszarki. Obliczone wartości wydajności należy traktować jako orientacyjne, gdyż zależą od sposobu zasilania kruszarki nadawą. Zwykle podczas pracy ciągłej wydajność jest o ok. 50 % wyższa.

Wnioski. Kierunki dalszych badań

Na podstawie analizy wyników badań procesu kruszenia diabazu i kwarcytu można sformułować następujące wnioski:

1. Proces kruszenia wibracyjnego przebiegał bardzo dobrze zarówno podczas rozdrabniania diabazu jak i kwarcytu. Z analizy krzywych składu ziarnowego produktu kruszenia wynika, że materiałem bardziej podatnym na kruszenie wibracyjne jest kwarcyt, dla którego zawartość klas ziarnowych $0 \div 1$ mm wynosiła od 67,4 % do 43,5% wobec zawartości od 46,1% do 25,3% dla diabazu w zależności od wymiaru szczeliny wylotowej.
2. Największy wpływ na uziarnienie produktu kruszenia oraz wydajność kruszarki przy kruszeniu obu materiałów ma wymiar szczeliny wylotowej.
3. Wpływ częstotliwości pracy szczęk na zawartość poszczególnych klas ziarnowych, zarówno w przypadku kwarcytu, jak i diabazu jest niewielki. Dlatego w badaniach przyjęto częstotliwość pracy szczęk kruszarki $f = 18$ Hz jako najkorzystniejszą w procesie rozdrabniania obu materiałów.
4. Zawartość klas ziarnowych $5 \div 10$ mm zależała również głównie od wielkości szczeliny wylotowej i utrzymywała się na poziomie od 3,3% przy $e = 0,5$ mm do 10,5 % przy $e = 2,5$ mm dla kwarcytu, oraz odpowiednio od 8% do 20,6% dla diabazu.
5. Wyraźnie większe stopnie rozdrobnienia (zarówno i_{50} jak również i_{90}) uzyskano podczas kruszenia kwarcytu. Wartości te zależały głównie od wielkości szczeliny wylotowej e . Największy stopień rozdrobnienia i_{50} dla kwarcytu wyniósł prawie 70 (wyznaczony przez aproksymację) a najmniejszy 17,7. Odpowiednio dla diabazu było to 23,7 i 5,3. Graniczny stopień rozdrobnienia podczas wszystkich prób był jednakowy i wyniósł 4.
6. Wydajność całkowita kruszarki wzrastała wraz ze wzrostem wymiaru szczeliny wylotowej. Wydajności zewnętrznych klas ziarnowych $0 \div 2,5$ mm i $0 \div 1,5$ mm dla diabazu utrzymywały się na stałym poziomie – odpowiednio około 55 i 45 kg/h. Natomiast dla kwarcytu zaobserwowano spadek tych wydajności dla szczeliny $e = 2,5$ mm. Jest to spowodowane wyraźnym spadkiem wartości obu stopni rozdrobnienia, przy niewielkim wzroście wydajności całkowitej dla tego samego wymiaru szczeliny wylotowej kruszarki.
7. Analizując efektywności technologiczne ET_{50} i ET_{90} zauważono zdecydowanie wyższe ich wartości podczas rozdrabniania kwarcytu. Oznacza to, że kwarcyt pomimo

should be treated as approximate ones as they depend on the method of feeding the crusher. Generally, during continuous work the efficiency is higher by about 50%.

Conclusions. Directions of further research

Based on the results analysis of diabase and quartzite crushing process the following conclusions can be drawn:

1. The vibratory disintegration process proceeded very well both for diabase and quartzite. Analyses of size distribution curves of the disintegration output indicate that the material more susceptible to disintegration is quartzite with content of size grade $0 \div 1$ mm amounted at $43.5 \div 67.4$ % depending on the size of the outlet gap.
2. The biggest influence on the grain size and performance of the crusher at crushing the two materials is the dimension of the outlet gap.
3. Effect of the jaws frequency on the grain size of the product, both in the case of quartzite and diabase is small. The results analysis indicated that frequency $f = 18$ Hz can be accepted as the most favorable one during the process of diabase and quartzite disintegration.
4. Content of grain classes 5 to 10 mm also depend mainly on the size of the outlet gap, and remained at a level of from 3.3% at $e = 0.5$ mm to 10.5% at $e = 2.5$ mm, for quartzite, and between 8% and 20.6% for diabase.
5. Significantly higher levels of fragmentation (both i_{50} and i_{90}) obtained during crushing quartzite. These values depend mainly on the size of the outlet gap e . The highest degree of fragmentation of the i_{50} for the quartzite was almost 70 (determined by approximation) and the lowest 17.7. For diabase it were respectively 23.7 and 5.3. Border degree of fragmentation in all samples was the same and was 4.
6. Overall efficiency increased with the size of the outlet gap. Efficiency of the external grain classes 0 to 2.5 mm, and 0 to 1.5 mm for the diabase remained at a constant level - approximately 55 and 45 kg/h. However, observed a decrease in the quartzite output for the gap $e = 2.5$ mm. This is due to a significant decrease in the value of the both degrees of fragmentation, with a slight increase in the total output for the same dimension of the crusher outlet gap.
7. Analyzing the technological effectiveness ET_{50} and ET_{90} noted the much higher value at crushing quartzite. This means that although a larger quartzite compressive strength and hardness is more prone to vibratory crushing.

Directions of further tests of the vibratory crusher include:

1. Determination of energy-consumption of the disintegration process,
2. Examining disintegration processes of other materials,
3. Elaboration of a mathematical model of vibratory disintegration process,
4. Elaboration of series of vibratory crushers types with 0.5 – 10 Mg/h efficiency.

większej wytrzymałości na ściskanie oraz większej twardości jest materiałem bardziej podatnym na kruszenie wibracyjne.

Kierunki dalszych badań kruszarki wibracyjnej obejmują:

1. Wyznaczenie energochłonności procesu rozdrabniania.
2. Badania procesu kruszenia innych materiałów pochodzenia mineralnego (surowców mineralnych, kruszyw, rud, węgla) oraz wytworzonych sztucznie (szkieł, tworzyw ceramicznych o wysokiej wytrzymałości mechanicznej i twardości).
3. Opracowanie modelu matematycznego procesu kruszenia wibracyjnego.
4. Opracowanie typoszeregu kruszarek wibracyjnych o wydajności 0,5÷10 Mg/h.

Literatura/References

- [1] Banaszewski T., *Wibracyjna kruszarka szczękowa*, Patent PRL nr 62930, 1971
- [2] Banaszewski T., *Wibracyjna kruszarka szczękowa*, Patent PRL nr 69 785, 1974
- [3] Banaszewski T., Kobiałka R., Blaszkę J., *Badania nad możliwością wykorzystania wibracyjnej kruszarki szczękowej do celów przemysłowych*. Zeszyty Naukowe AGH Kraków 1974, „Górnictwo” nr 63, s. 77-86
- [4] Drzymała Z., Sidor J., Kaczmarczyk S., Maćków E. i inni, *Kruszarka wibracyjna*, Patent PRL nr 133 128, 1986
- [5] Sidor J., *Niektóre wyniki badań procesu bardzo drobnego kruszenia w kruszarce wibracyjnej*, IX Konferencja Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, z. 3, s. 169 – 176, Zakopane, 1996
- [6] Sidor J., *Badania procesu kruszenia wibracyjnego kamienia wapiennego i dolomitu*. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, nr 779, Inżynieria Chemiczna, z. 21, s. 197 – 204, Łódź, 1997
- [7] Sidor J., *Rozwój konstrukcji kruszarek wibracyjnych*, Maszyny Górnicze, nr 77 s. 30 – 37, Kraków, 1997
- [8] Sidor J., Wójcik M., Kordek J., *Fine grinding of hard ceramic waste in the rotary-vibration mill*, The International Conference for the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials, The Netherlands. Wascon'97, Elsevier Science, Amsterdam, Holland 1997, p. 591-598. (ang.), ISBN 0-44-82771-4.
- [9] Sidor J., *Badania procesu wibracyjnego kruszenia odpadów piecowych i suszarnianych czerwonej ceramiki budowlanej*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2004, nr 3s, s. 137-138, PL ISSN 0368-0827
- [10] Sidor J., *Badanie recyklingu rdzeni ferrytowych w młynach wibracyjnych*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2005, nr 3s, s. 72-73, PL ISSN 0368-0827
- [11] Sidor J., *Badania procesu bardzo drobnego kruszenia odpadów produkcyjnych ceramiki sanitarnej w kruszarce wibracyjnej*. Monografie Wyd. Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH Kraków 2006, vol. 32, s. 277-286, ISBN 83-89772-21-3
- [12] Sidor J., *Preliminary investigations of industrial line of mechanical processing of ceramic wastes for recycling* / J. Sidor // Polish Journal of Environmental Studies ; ISSN 1230-1485. — 2008 vol. 17 no. 3A s. 507–510



Z cyklu: kopalnie odkrywkowe

fot. Renata S-K