

Alicja Nowak, Tomasz Gawenda**

ANALIZA PORÓWNAWCZA KRUSZAREK W WIELOSTADIALNYCH UKŁADACH ROZDRABNIANIA SKAŁ BAZALTOWYCH**

1. Wprowadzenie

Najważniejszymi surowcami skalnymi dla drogownictwa i budownictwa są kruszywa łamane produkowane ze skał magmowych. Kruszywa bazaltowe i melafirowe znajdują szerokie zastosowanie przy wykonywaniu górnych warstw nawierzchni drogowych. Warstwy te, przenoszące duże obciążenia dynamiczne, poddawane bezpośredniemu ścieraniu oraz narażone na działanie niesprzyjających warunków atmosferycznych powinny być wykonywane z kruszyw o małej ścieralności, dużej wytrzymałości, odpornych na działanie wody i mrozu (Zieliński, 1983). Ponadto, kruszywa te powinny charakteryzować się prawidłowym — zbliżonym do kuli lub sześcianu — kształtem ziarn, posiadać ostre krawędzie oraz szorstkie płaszczyzny przełamania.

W budownictwie większość kruszyw ze skał magmowych jest wykorzystywana do produkcji betonów wysokich marek i betonów specjalnych. Tu również najbardziej pożądane są ziarna foremne o kształcie zbliżonym do kuli (sześcianu), ponieważ ziarna znacznie odbiegające od tego kształtu mają większą powierzchnię wymagającą zwiększonej ilości cementu i wody oraz układają się w betonie w sposób anizotropowy. Szczególnie niekorzystne są ziarna wydłużone i płaskie. Ich znaczący udział w kruszywie wpływa szkodliwie na trwałość betonu. Ziarna nieforemne mają tendencję do ukierunkowanej orientacji w jednej płaszczyźnie, co łączy się z możliwością powstawania pustek powietrznych [1–5].

Stosunek szerokości ziarn do ich grubości ma również zasadniczy wpływ na wytrzymałość ziarn. Ziarna nieforemne, zwłaszcza płaskie wykazują największą ścieralność. Stwierdzono, że szczególnie duży wpływ ziarn nieforemnych na wytrzymałość kruszywa występuje przy ich zawartości 25÷50%. Na przykład przy 50-procentowym udziale ziarn nieprawidłowych wytrzymałość kruszywa bazaltowego zmniejsza się o 55% [6].

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Artykuł jest wynikiem projektu badawczego KBN nr 4 T12A 030 26

O jakości kruszywa decyduje więc zarówno jego skład granulometryczny, jak i kształt ziarn, a także właściwości fizyko-mechaniczne (np. odporność na rozdrabnianie określona ścieralnością w bębnie kulowym Los Angeles).

Wymienione właściwości kruszywa uzależnione są od sposobu rozdrabniania surowca mineralnego, między innymi, od właściwego doboru kruszarek oraz parametrów ich pracy, zwłaszcza wielkości szczeliny wylotowej, kształtu i stopnia wypełnienia komory rozdrabniania, a także wielokrotności kruszenia.

Ocena wpływu podanych czynników na technologiczne efekty (stopień rozdrobnienia, skład ziarnowy i kształt ziarn produktów rozdrabniania) uzyskiwane w wielostadialnych układach rozdrabniania są przedmiotem niniejszego opracowania.

2. Charakterystyka kruszarek stosowanych w produkcji kruszyw bazaltowych

Bazaltowe surowce skalne przeznaczone są w całości do produkcji kruszyw łamanych najwyższej w Polsce jakości. Głównymi asortymentami są grysy w klasach ziarnowych 2÷4(5); 4(5)÷8; 8÷11; 8÷16; 16÷22; 16÷31,5 mm; a także kłińce 4÷31,5 mm i tłucznie 31,5÷63 mm.

Zakłady produkują zbliżony asortyment, w większości przeważają grysy. Do rozdrabniania surowca skalnego wykorzystuje się coraz częściej nowoczesne kruszarki renomowanych firm np. Svedala, Krupp, Metso, PSP.

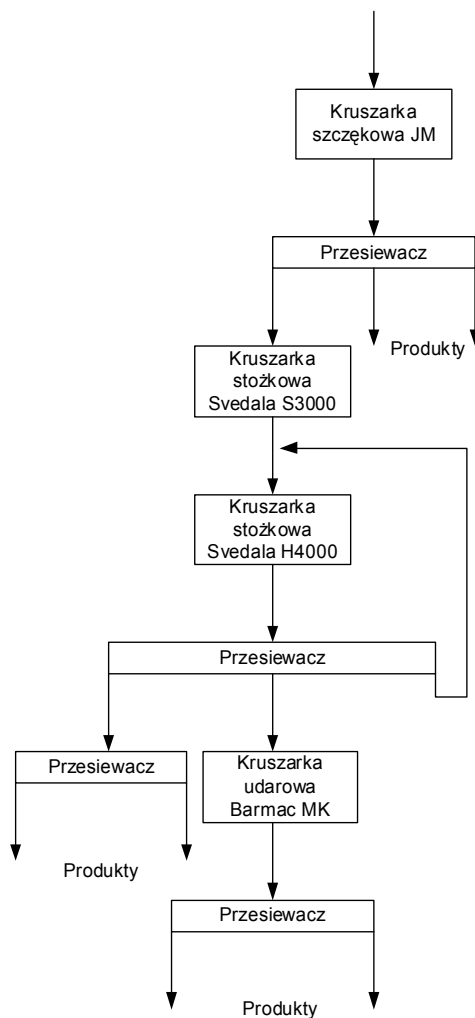
W celu określenia wpływu parametrów pracy tych kruszarek na rezultaty uzyskiwane w poszczególnych stadiach rozdrabniania, a w szczególności na uziarnienie produktów i udział w nich ziarn nieforemnych, przeanalizowano warunki i wyniki procesów kruszenia w dwóch wybranych zakładach przeróbki bazaltu. Uproszczone schematy technologiczne przebiegu produkcji w tych zakładach pokazano na rysunkach 1 i 2.

We wstępnym stadium rozdrabniania w zakładzie A zastosowano kruszarkę szczękową jednorozporową typu JM 1108HD, a w zakładzie B — kruszarkę stożkową firmy Krupp. Urządzenia te charakteryzują się dużą komorą wlotową, a stopień rozdrobnienia wynosi ok. 4.

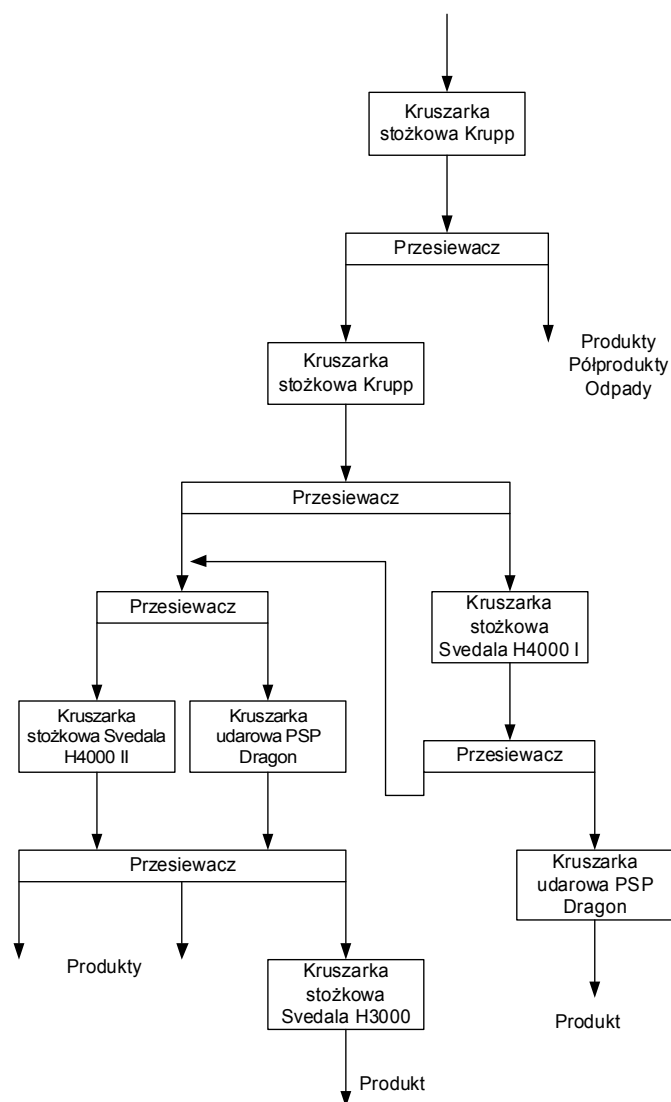
W drugim stadium kruszenia zamontowano stożkową kruszarkę szwedzkiej firmy Svedala typu Superior 3000 (w zakładzie A) oraz stożkową Krupp (zakład B). Kuszarki Superior zostały zaprojektowane tak by zapewnić maksymalną wytrzymałość na ciągłe siły udarowe i związane z nimi naprężenia, stąd też w zakładach przeróbczych stosowane są również na wstępnych etapach rozdrabniania jako kruszarki żyratorowe z ułożyskowanym od góry wałem głównym z wymienną gwintowaną tuleją ze stali stopowej.

W trzecim i czwartym stadium rozdrabniania w obu zakładach zastosowano kruszarki stożkowe firmy Svedala oraz wirnikowe udarowe typu Barmac MK firmy Metso (Svedala) i Dragon firmy PSP, czyli tzw. kubizery. Kuszarki stożkowe typu Hydrocon to granulatory charakteryzujące się wydłużoną komorą roboczą, dającą w efekcie zwiększone udziały ziarn foremnych, i niewielkim stopniem rozdrobnienia. Kuszarki te posiadają również wysoką wydajność oraz łączą w sobie nowoczesne cechy dynamiki pracy poprzez hydrauliczną zmianę wielkości szczeliny wylotowej w sposób stały i okresowy, uwalnianie komory od obiektów niekruszących się i czyszczenie komory oraz okresową zmianę prędkości obrotowej

stożka. Zastosowane kruszarki udarowe posiadają wirnik na wale pionowym, który odrzuca materiał na boczne ściany lub kowadła rozmieszczone na obwodzie ścian. W kruszarkach Barmac i Dragon zastosowano technologię kamień–kamień (tzn., że część materiału jest kierowana na wirnik a pozostała rozprowadzana po obwodzie bocznych ścian, przez co zmniejsza się zużycie okładzin) lub kamień–metal. Stopień rozdrobnienia w tych urządzeniach jest niewielki, a największą ich zaletą jest bardzo wysoki uzysk ziarn kubicznych zwłaszcza w drobnych frakcjach, np. dla klasy 0÷4 mm posiadającej 45% ziarn nieforemnych zawartość ta może się obniżyć do ok. 15%. Ogólny udział ziarn nieforemnych w produktach tych kruszarek nie przekracza 5%.



Rys. 1. Uproszczony schemat technologiczny produkcji kruszyw bazaltowych — zakład A



Rys. 2. Uproszczony schemat technologiczny produkcji kruszyw bazaltowych — zakład B

W tabeli 1 zestawiono rodzaje kruszarek rozdrabniających skałę bazaltową w poszczególnych stadiach produkcji kruszyw. Przedstawiono tu również uziarnienie kierowanej do kruszarek nadawy i produktów rozdrabniania. Podane w tabeli wartości granic klas ziarnowych — określone z krzywych składu ziarnowego — odzwierciedlają rzeczywisty stan przebiegu procesów rozdrabniania oraz przesiewania i w większości przypadków obiegają od założeń technologicznych.

TABELA 1

Rodzaje kruszarek zainstalowanych w wybranych zakładach produkcji kruszyw bazaltowych

Stadium rozdrabniania	Zakład	Rodzaj kruszarki	Szczelina wylotowa e , mm	Uziarnienie nadawy D , mm	Uziarnienie produktu d , mm
I	A	Szczękowa JM	95	0÷500	0÷125
	B	Stożkowa Krupp	>100	0÷1000	0÷250
II	A	Stożkowa Svedala Superior 3000	38	8÷125	0÷63
	B	Stożkowa Krupp	90	28÷250	0÷100
III	A	Stożkowa Svedala Hydrocon 4000	16	2÷63	0÷31,5
	B	Stożkowa Svedala Hydrocon 4000 I	22,1÷26,6	8÷63	0÷45
		Stożkowa Svedala Hydrocon 4000 II	11,1÷15,2	0÷31,5	0÷31,5
		Udarowa PSP Dragon	–	0÷45	0÷31,5
IV	A	Udarowa Barmac MK	–	0÷31,5	0÷20
	B	Stożkowa Svedala H-3000	9÷10,9	2÷31,5	0÷22
		Udarowa PSP Dragon	–	0÷11	0÷8

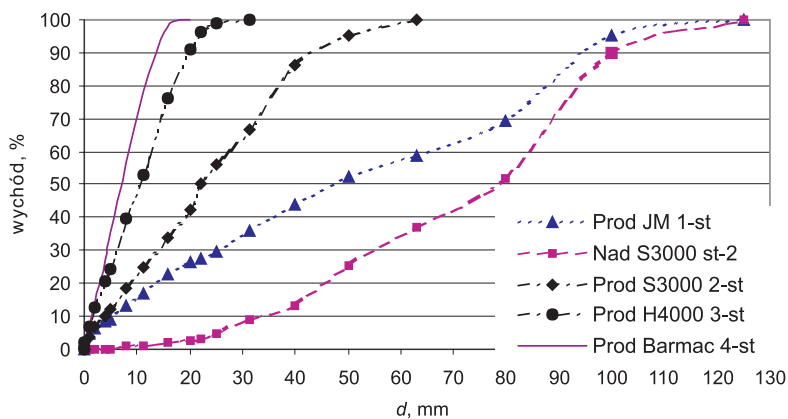
3. Ocena wpływu parametrów pracy kruszarek na efekty rozdrabniania

W celu określenia wpływu parametrów pracy kruszarek na uzyskiwane wyniki rozdrabniania wykorzystano dane pochodzące z opróbowania ciągów technologicznych w czasie 5 miesięcy produkcji kruszyw (zakład A) oraz w okresie letnim i zimowym (zakład B).

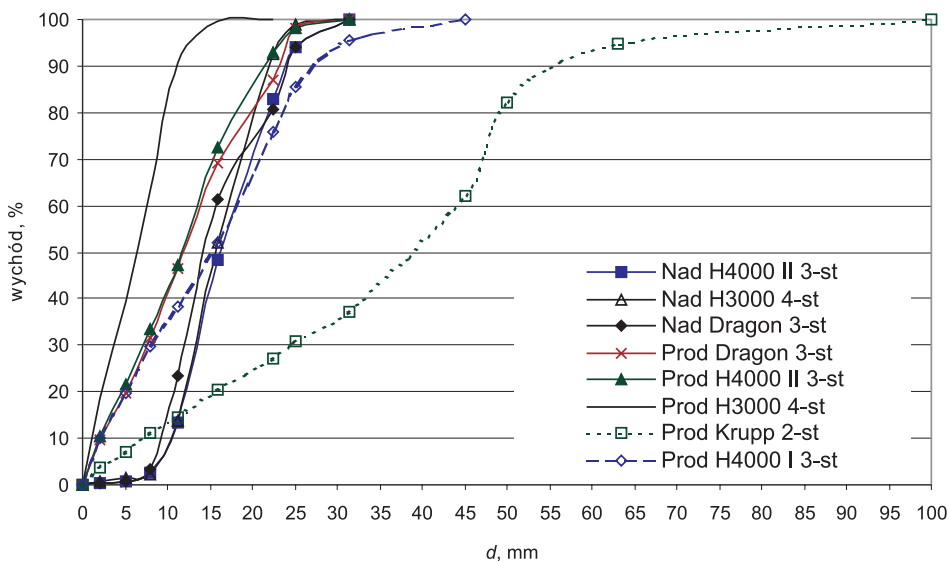
Wstępna analiza wyników opróbowania pozwoliła stwierdzić, że składy ziarnowe produktów rozdrabniania otrzymywanych w zakładzie A w poszczególnych miesiącach wykazują tylko niewielkie różnice (w granicach błędów analiz), stąd też do dalszych rozważań przyjęto uśrednione składy granulometryczne. Zaobserwowano natomiast znaczące rozbieżności w uziarnieniu produktów rozdrabniania związane z prowadzeniem procesu w miesiącach letnich i zimowych w zakładzie B. W tym przypadku uśredniono więc wyniki dla każdego okresu oddzielnie.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono otrzymane w poszczególnych stadiach rozdrabniania w zakładach A i B składy granulometryczne produktów kruszenia. Analiza zamieszczonych na rysunkach wykresów krzywych składu ziarnowego pozwala zauważyć zdecydowaną różnicę w uziarnieniu produktów uzyskiwanych w drugim stadium prowadzenia procesu w za-

kładzie A i zakładzie B. Zróznicowanie to wynika oczywiście z faktu wykorzystania na tym etapie rozdrabniania, urządzeń o wyraźnie różniących się szczelinach wylotowych (zakład A — kruszarka stożkowa S3000, szczelina $e = 38$ mm; zakład B — kruszarka stożkowa firmy Krupp, szczelina $e = 90$ mm). Pomimo dużych różnic w składzie granulometrycznym produktów drugiego stadium rozdrabniania, uziarnienie uzyskiwane w trzecim i czwartym stadium kruszenia w obu zakładach jest podobne, co z kolei jest wynikiem stosowania na tym etapie produkcji kruszyw innego układu technologicznego i wykorzystania dodatkowego urządzenia kruszącego w zakładzie B (kruszarka H4000 I).

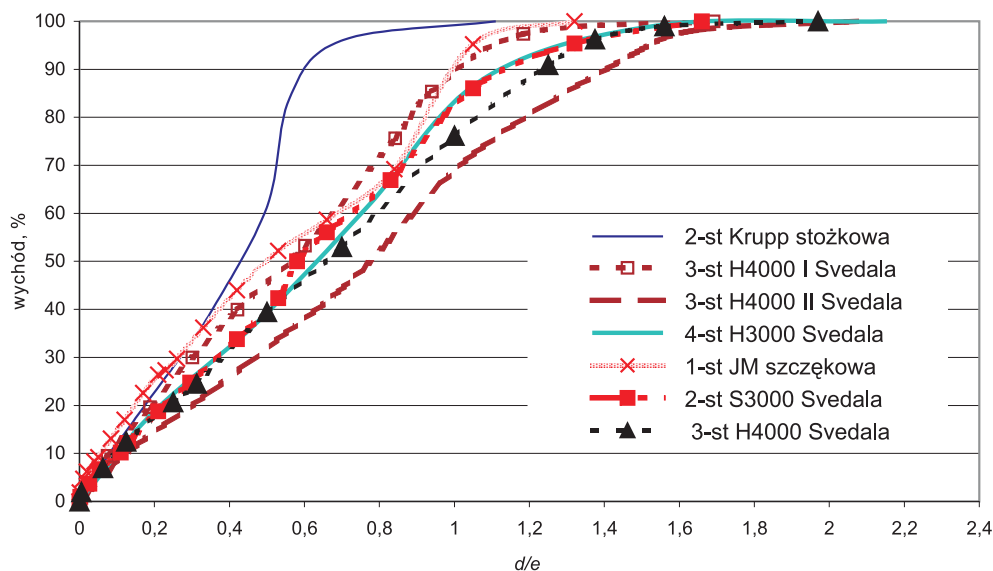


Rys. 3. Skład ziarnowy nadawy i produktów rozdrabniania — zakład A



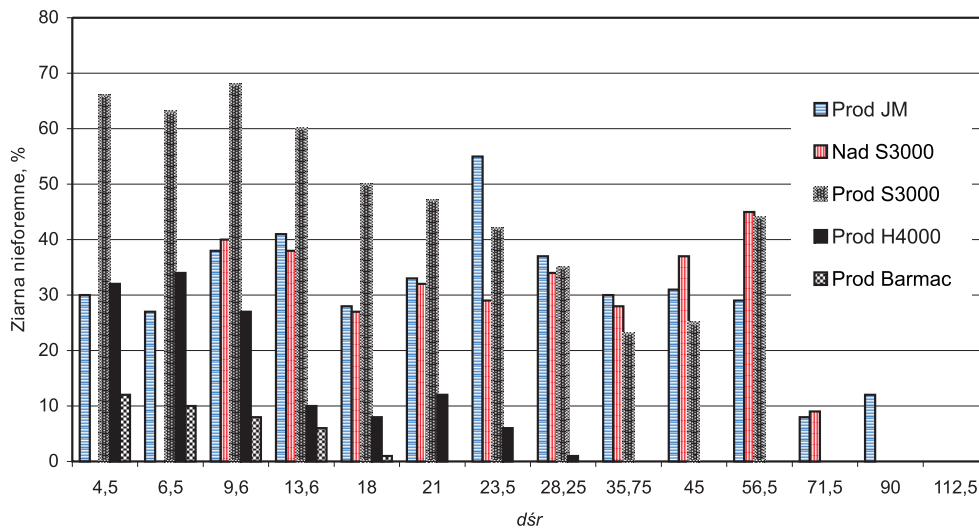
Rys. 4. Skład ziarnowy nadawy i produktów rozdrabniania — zakład B, okres letni

Rysunek 5 obrazuje zależność wychodów frakcji ziarnowych w produktach rozdrabniania od stosunku wielkości ziarn d do wielkości szczeliny wylotowej e kruszarek stosowanych w obu zakładach. Można tu zaobserwować, że im dalsze stadium rozdrabniania (mniejsze e), tym więcej ziarn większych od szczeliny wylotowej przedostaje się do produktów kruszenia. Porównując natomiast efekty rozdrabniania w trzecim stadium zauważa się, że najmniejsza liczba ziarn o wielkości $d > e$ przechodzi do produktu kruszarki H4000 I w zakładzie B.

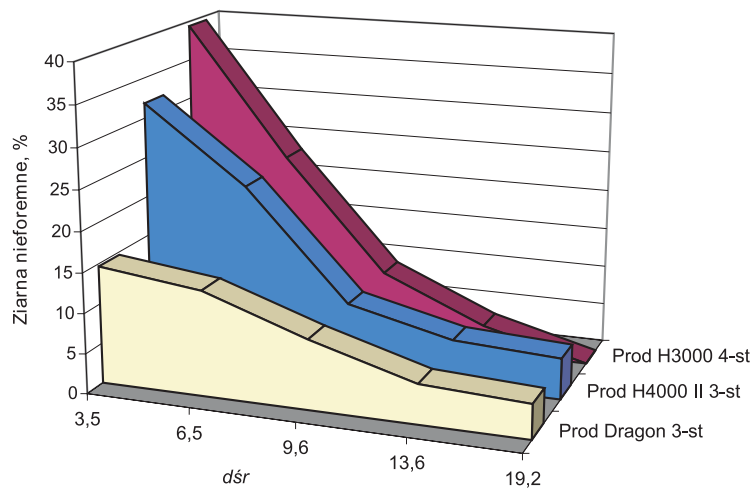


Rys. 5. Skład ziarnowy produktów rozdrabniania w odniesieniu do wielkości szczeliny wylotowej e — zakłady A i B

Udziały ziarn nieforemnych w poszczególnych frakcjach ziarnowych produktów rozdrabniania pokazano na rysunkach 6 (zakład A) i 7 (zakład B). Na rysunku 6 zwraca uwagę bardzo wysoka (> 60% dla klas ziarnowych < 16 mm) zawartość ziarn nieforemnych po kruszeniu w kruszarce S3000 (drugie stadium). Zawartość ta wyraźnie maleje w następnych stadiach rozdrabniania, zwłaszcza po zastosowaniu kubizera Barmac. Z analizy danych przedstawionych na rysunku 7 (przykładowo dla okresu letniego) wynika, że najniższą zawartością ziarn nieforemnych charakteryzuje się produkt rozdrabniania w kruszarce udarowej Dragon (3 stadium), a udział takich ziarn we frakcji > 16 mm jest najniższy po kruszeniu w kruszarce H3000 (czwarte stadium). Można w tym miejscu zaznaczyć, że wyniki rozdrabniania z okresu zimowego wykazują większy udział ziarn nieforemnych w produkcie kubizera (Dragon — trzecie stadium) w porównaniu z produktem kruszarki H3000 (za wyjątkiem frakcji < 8 mm), co można ewentualnie powiązać ze zmniejszeniem szczeliny wylotowej kruszarki H3000 w tym okresie.



Rys. 6. Udział ziarn nieforemnych w poszczególnych frakcjach ziarnowych produktów rozdrabniania — zakład A



Rys. 7. Udział ziarn nieforemnych w poszczególnych frakcjach ziarnowych wybranych produktów rozdrabniania — zakład B, okres letni

W tabeli 2 podano — uzyskane w kolejnych stadiach kruszenia na różnych liniach technologicznych — stopnie rozdrobnienia S_{80} i S_{50} oraz wskaźniki kształtu ziarn w produktach kruszarek. Wskaźniki kształtu K obliczono, korzystając ze wzoru

$$K = a_{iN} \cdot \gamma_i + a_{i+1N} \cdot \gamma_{i+1} + \dots + a_{nN} \cdot \gamma_n, \quad i = 1 \dots n,$$

gdzie:

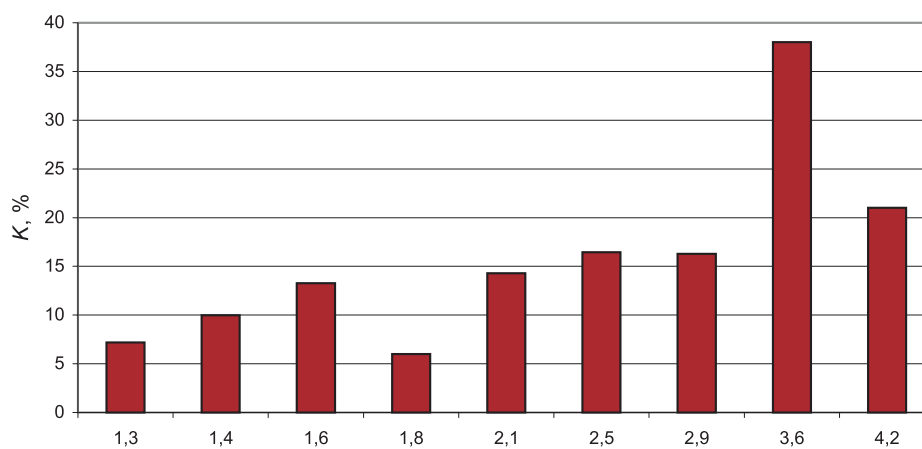
- K — masowa, procentowa zawartość ziarn nieforemnych w produkcji rozdrabniania,
- a_{iN} — procentowa zawartość ziarn nieforemnych w i -tej frakcji ziarnowej,
- γ_i — procentowy udział i -tej frakcji w składzie ziarnowym produktu.

TABELA 2

Stopnie rozdrobnienia S_{80} i S_{50} oraz współczynniki kształtu K uzyskane w kolejnych stadiach rozdrabniania

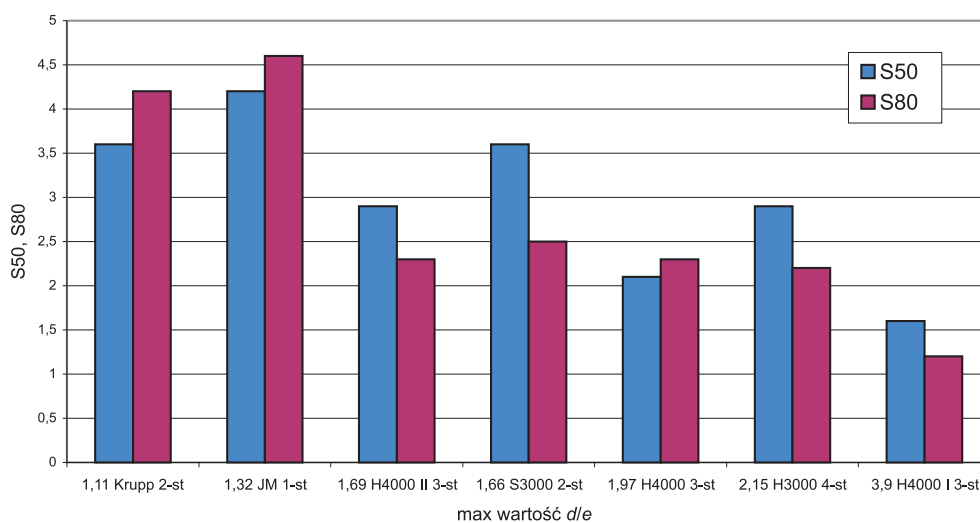
	Rodzaj kruszarki	S_{80}	S_{50}	$K, \%$
Zakład A	JM st-1	4,6	4,2	21
	S3000 st-2	2,5	3,6	38
	H4000 st-3	2,3	2,1	14,28
	Barmac st-4	1,5	1,8	6
Zakład B	Krupp st-2	4,2	3,6	–
	H4000 I st-3	2,3	2,8	–
	H4000 II L1 st-3	1,2	1,6	13,28
	H4000 II L2 st-3	1,2	1,4	9,97
	H3000 L1 st-4	2,2	2,9	16,28
	H3000 L2 st-4	2,3	2,5	16,44
	Dragon st-3 L1	1,1	1,3	7,18

Zamieszczone w tabeli dane umożliwiają określenie zależności wskaźnika kształtu od stopnia rozdrobnienia. Zależność tę przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Zależność wskaźnika kształtu S_{50} od stopnia rozdrobnienia

Jak widać najwyższe stopnie rozdrobnienia charakteryzują kruszarki pracujące we wstępnych stadiach procesu, ale lepsze wskaźniki kształtu mają ziarna produktów otrzymywanych w kolejnych etapach przy niższych stopniach rozdrobnienia. Bardzo wysoka wartość K dla $S_{50} = 3,6$ wynika z opisanej wcześniej szczególnie dużej zawartości ziarn nieforemnych we frakcji < 16 mm po rozdrobieniu kruszarce S3000.

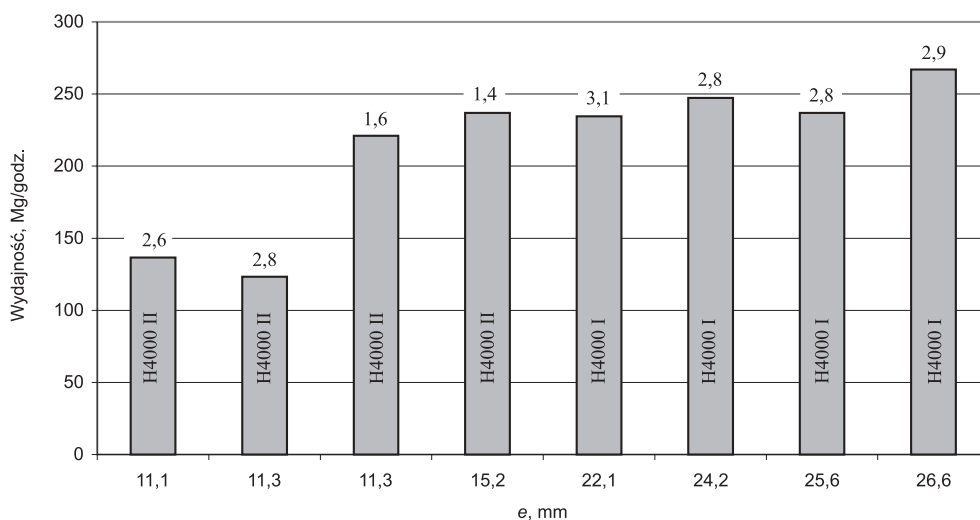


Rys. 9. Zależność stopnia rozdrobnienia od maksymalnej wartości d/e

Pokazana na rysunku 9 zależność stopnia rozdrobnienia od maksymalnej wartości d/e pozwala zauważyć, że odznaczające się najwyższym stopniem rozdrobnienia kruszarki: szcękowa JM i stożkowa firmy Krupp cechuje najniższa wartość stosunku maksymalnej wielkości ziarn produktu rozdrabniania do wielkości szczeliny wylotowej d_{\max}/e . Wraz ze wzrostem wartości d_{\max}/e maleje stopień rozdrobnienia, wzrasta zawartość ziarn większych od szczeliny kruszarki w produkcie rozdrabniania.

Na rysunku 10 pokazano zmiany wydajności kruszarek stożkowych H4000 I i H4000 II w zależności od wielkości szczeliny wylotowej e i stopnia rozdrobnienia S_{50} (stopień rozdrobnienia podano nad słupkami). Uwzględniono w tym przypadku wyniki pracy tych urządzeń na dwóch liniach technologicznych w okresie letnim i zimowym. Zauważalna od razu istotna różnica w wydajności kruszarek z taką samą szczeliną wylotową wynika ze zmiany warunków pracy kruszarek H4000 II w okresie zimowym. Obniżenie wydajności kruszarek jest efektem kierowania do urządzenia nadawy o zwiększonej zawartości ziarn grubiej uziarnionych, co prowadzi również do zwiększenia stopnia rozdrobnienia. Im wyższy stopień rozdrobnienia tym niższa wydajność.

Można również przypuszczać, że w okresie zimowym częściej występują problemy z zasilaniem komór zasypowych kruszarek oraz przestoje urządzeń, co również rzutuje na ich wydajność.



Rys. 10. Wydajność kruszarek stożkowych H4000 w zależności od wielkości szczeliny wylotowej i stopnia rozdrobnienia — zakład B

4. Podsumowanie

Analiza efektywności kilkustadialnego rozdrabniania skał bazaltowych w wybranych zakładach produkcji kruszyw pozwala na sformułowanie następujących stwierdzeń:

- 1) Produkty otrzymywane w wyniku rozdrabniania w kruszarkach stożkowych i udarowych charakteryzują się zróżnicowaną zawartością ziarn nieforemnych. Wskaźnik kształtu ziarn w produktach kruszarek udarowych jest niższy od wskaźnika kształtu ziarn produktów kruszarek stożkowych. W granulatorach stożkowych można jednak otrzymać frakcje ziarnowe o niskiej (niższej nawet od uzyskiwanej w kruszarkach udarowych) zawartości ziarn nieforemnych pod warunkiem odpowiedniego doboru szczeliny wylotowej, której wielkość ma decydujący wpływ nie tylko na uziarnienie ale także na kształt ziarn produktów rozdrabniania.
- 2) Dla każdej frakcji kruszywa istnieje optymalna wielkość szczeliny wylotowej przy której uzyskuje się najbardziej prawidłowy kształt ziarn. Wielkość ta jest zbliżona do wielkości ziarn żądanej frakcji. Zależność tę można wyraźnie zaobserwować analizując np. wyniki pracy kruszarek H4000 (zakład A) i H4000 II (zakład B).
- 3) Wskaźnik kształtu ziarn określający zawartość ziarn nieforemnych w produktach rozdrabniania maleje wraz ze zmniejszeniem się stopnia rozdrobnienia. Możliwe jest więc zapewnienie prawidłowego kształtu ziarn produktów rozdrabniania poprzez stosowanie w technologii produkcji kruszyw większej ilości stadiów kruszenia w szczególności do rozdrabniania końcowego [3].

LITERATURA

- [1] *Gawenda T., Naziemiec Z.*: Sposoby poprawy kształtu ziaren kruszyw mineralnych w kruszarkach szczękowych. *Inżynieria Mineralna, Zeszyt specjalny Nr S.3 (10)*, 2003
- [2] *Naziemiec Z., Gawenda T., Tumidajski T., Saramak D.*: The influence of transverse profile of crusher jaws on comminution effects. *XXIII International Mineral Processing Congress, Stambuł, Turcja, 2006*
- [3] *Naziemiec Z.*: Wpływ kształtu powierzchni płyt roboczych w kruszarkach szczękowych na skład ziarnowy i kształt ziaren produktów. AGH, 2006 (praca doktorska)
- [4] *Naziemiec Z., Gawenda T.*: Ocena efektów rozdrabniania surowców mineralnych w różnych urządzeniach kruszących. *VI Konferencja „Kruszywa Mineralne – surowce – rynek – technologie – jakość”, Szklarska Poręba, 2006*
- [5] *Tumidajski T., Naziemiec Z.*: Wpływ warunków procesu kruszenia na kształt ziaren kruszyw mineralnych. *IV Konferencja „Kruszywa Mineralne – surowce – rynek – technologie – jakość”, Szklarska Poręba 2004, Wyd. Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2004*
- [6] *Zieliński Z.*: Korelacja parametrów technologicznych mechanicznego kruszenia i przesiewania materiałów skalnych stosowanych w budownictwie drogowym. *Wyd. Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, zeszyt 228. Szczecin, 1983*