

Technologie w produkcji kruszyw foremnych



tekst: **dr hab. inż. TOMASZ GAWENDA**, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

Celem artykułu jest omówienie możliwości produkcji kruszyw o zwiększonej zawartości ziaren foremnych na przykładach powszechnie znanych, a także przedstawienie nowych metod produkcji kruszyw. Tradycyjne układy produkcji kruszyw wymagają zastosowania trzech lub czterech stadiów rozdrabniania (w zależności od uziarnienia nadawy), ale w drobnych frakcjach kruszyw występują ziarna nieforemne w ilości średnio ok. 10%. W proponowanych innowacyjnych rozwiązaniach technologicznych można uzyskać kruszywa z zawartością ziaren nieforemnych poniżej 3% nawet w układzie jedno- lub dwustadialnym rozdrabniania.

Wstęp

Przeróbka surowców skalnych coraz częściej stawia bardzo wysokie wymagania odnośnie do końcowej jakości produktów. Specyficzny rynek zbytu wymaga dużych ilości produktów o wąskim zakresie uziarnienia i określonych kształtach ziaren (kubicznych) przy możliwie niewielkim dopuszczalnym udziale ziaren podłużnych lub płaskich. Właściwości fizykochemiczne surowca zależą od miejsca eksploatacji, z tego też względu są niezmiennie, natomiast żądana wielkość i kształt ziaren czy tekstura powierzchni są możliwe do uzyskania w zależności od zastosowanych maszyn i metod przerobczych podczas ich produkcji (głównie rozdrabniania) i mogą bezpośrednio lub pośrednio wpływać na inne cechy.

Najważniejszymi surowcami skalnymi dla budownictwa inżynierskiego są kruszywa łamane produkowane przede wszystkim 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 [1]. Ponadto kruszywa te powinny charakteryzować się prawidłowym – zbliżonym do kuli lub sześciangu – kształtem ziaren, 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 (sześciangu), ponieważ ziarna znacznie odbiegające od tego kształtu mają większą powierzchnię, wskutek czego wymagają zwiększonej ilości cementu i wody. Ponadto ziarna płaskie i wydłużone mają tendencję do ukierunkowanej orientacji w jednej płaszczyźnie, co łączy się z możliwością powstawania pustek powietrznych [2]. Zwiększenie zawartości ziaren płaskich wpływa na wzrost wolnych przestrzeni, powodując konieczność zwiększenia ilości zaprawy w betonie, a przez to wpływa na zwiększenie zużycia cementu. Ich znaczący udział w kruszywie oddziałuje szkodliwie na trwałość betonu.

Stosunek szerokości ziaren do ich grubości ma również zasadniczy wpływ na wytrzymałość ziaren. Ziarna nieforemne, zwłaszcza płaskie, wykazują największą ścieralność. Stwierdzono, że szczególnie duży wpływ ziaren nieforemnych na wytrzymałość kruszywa występuje przy ich zawartości na poziomie 25–50%. Na przykład, przy 50-procentowym udziale ziaren nieprawidłowych wytrzymałość kruszywa bazaltowego zmniejsza się o 55% [1]. O jakości kruszywa decyduje więc zarówno jego skład granulometryczny, jak i kształt ziaren, a także właściwości fizykomechaniczne (np. odporność na rozdrabnianie, LA). Ziarna foremne mają mniejszą podatność na rozdrabnianie (mniejszy wskaźnik LA), mniejszą nasiąkliwość, ścieralność, co związane jest z wytrzymałością betonu lub nawierzchni drogowej [3, 4, 5].

Dla uniknięcia rozbieżności w ocenie kształtu ziaren i interpretacji wyników wykorzystano w prowadzonych badaniach stosowane w branży kruszywowej dwie normy: PN-EN 933-4:2008 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Cz. 4. Oznaczanie kształtu ziaren – wskaźnik kształtu* [6] oraz PN-EN 933-3:2012 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Cz. 3. Oznaczanie kształtu ziaren za pomocą wskaźnika płaskości* [7].

Sposoby zwiększania udziału ziaren foremnych w kruszwach mineralnych

Niewątpliwie na możliwości zwiększania udziału ziaren foremnych w kruszwach mineralnych mają wpływ właściwie dobrane kruszarki wraz z parametrami eksploatacyjnymi, liczba stadiów rozdrabniania oraz rodzaj układów technologicznych.

W zakładach przeróbki kruszyw łamanych najczęściej używane są kruszarki szczękowe, stożkowe i udarowe listwowe z wałem poziomym lub pionowym. We wstępnych stadiach kruszenia pracują najczęściej kruszarki szczękowe lub stożkowe (żyratory). Zaletą kruszarek szczękowych jest mała wrażliwość na zmiany wielkości uziarnienia nadawy, czyli urobku z robót strażawych, oraz niskie koszty eksploatacyjne i prosta w obsługa w porównaniu z innymi kruszarkami. Wadą – uzyskiwanie zbyt wysokich zawartości ziaren nieforemnych, nawet >30%.

Współcześnie budowane kruszarki szczękowe charakteryzują się głęboką komorą kruszenia i krzywoliniowym profilem wykładzin szczęk. Takie rozwiązanie przeciwdziała zapychaniu

się kruszarki, podwyższa jednorodność uziarnienia materiału i zwiększa stopień rozdrobnienia. Przyjmuje się, że kruszarki o złożonym ruchu szczęki mają korzystniejszy wpływ na kształt ziaren niż kruszarki o prostym ruchu szczęki, ale większą rolę odgrywa tutaj rodzaj okładziny szczęki. Szczęki rowkowane (zwłaszcza trapez wysoki) wpływają korzystniej na kształt kruszyw niż szczęki gładkie. Jednakże zawartości ziaren nieforemnych w najdrobniejszych klasach ziarnowych poniżej 8 mm przekraczają udział 50% [8, 9], co nie zadowala odbiorców kruszyw.

Do produkcji kruszyw we wtórnych stadiach kruszenia w celu uzyskania ziaren o korzystnym kształcie stosuje się granulatory stożkowe i kruszarki udarowe (kubizery). Granulatory stożkowe charakteryzują się specjalnym ukształtowaniem komory kruszenia, zapewniającym wielokrotne rozdrabnianie poszczególnych ziaren, oraz na ogół nieco mniejszym skokiem i większymi obrotami (większa liczba skoków), zapewniającymi ziarnom dłuższą drogę przejścia w komorze roboczej. Produkując grysy w granulatorach stożkowych, należy wyposażyć instalację w zbiorniki buforowe, które powinny dostarczać nadawę do tych kruszarek, zasypując ich całkowitą komorę roboczą. W ten sposób uzyskuje się optymalne rozdrobnienie oraz chroni stożek wewnętrzny przed ścieraniem na skutek spadku materiału z wysokości.

Szczególnie interesujące są kruszarki udarowe z wałem pionowym. Postęp w dziedzinie materiałowej umożliwia stosowanie ich także do kruszenia surowców bardzo zwiększonych. Również sposób podawania w nich materiału (system kamień – kamień) ogranicza zużycie elementów roboczych kruszarki. Kubizery są coraz częściej wykorzystywane w procesach produkcji kruszyw, szczególnie z wapieni i dolomitów. Jednak z kruszarek udarowych uzyskuje się produkty, w których zawartość najdrobniejszych klas ziarnowych (np. < 2 mm lub pyłów < 0,063 mm) jest zdecydowanie wyższa niż w przypadku kruszarek szczękowych i stożkowych.

Należy pamiętać, że nieodpowiednio dobrane parametry urządzenia mają wpływ na jego eksploatację, np. zużycie energii albo elementów roboczych, które w efekcie rzutują na jakość produktów (kształt i wielkość ziaren).

Układy technologiczne mają swoje zastosowanie w procesach rozdrabniania oraz klasyfikacji w zakładach przerobczych różnych kopalini użytecznych. Jakość otrzymywanych produktów z procesów przerobczych zależy nie tylko od prawidłowego doboru maszyn rozdrabniających, ale również od urządzeń współpracujących (klasyfikatorów), zależnie od rodzaju przerabianego surowca. Zakładając konkretny proces technologiczny, zwykle bierzemy pod uwagę charakterystyki pracy poszczególnych maszyn, które zależne są m.in. od właściwości fizykochemicznych nadawy oraz wielkości parametrów konstrukcyjnych i sterowalnych maszyn. Na uzyskiwanie dobrych produktów wpływ ma także sposób prowadzenia procesu technologicznego (liczba stadiów rozdrabniania, cykle technologiczne, sterowanie strumieniami przepływu materiału do wybranych maszyn itp.).

Okazuje się, że korzystniejsze jest rozdrabnianie materiału w kruszarkach z zamkniętym obiegiem, ponieważ przy zawrocie wypełnienie komory kruszenia jest większe, ziarna płaskie, słabsze fizycznie, ulegają łatwiejszemu rozkruszeniu, co z kolei wpływa na poprawę ich kształtu. Prawidłowo za-

projektowane układy rozdrabniania z obiegiem zamkniętym pozwalają kontrolować przepływ materiału, a także podnosić jakość produktu. Według przeprowadzonych badań [10], zawartość ziaren płaskich w produkcie po ustabilizowaniu się przepływu materiału w układzie zamkniętym była – w zależności od klasy ziarnowej – niższa o 4–15% niż dla produktu kruszonego w układzie otwartym (bez zawrotu).

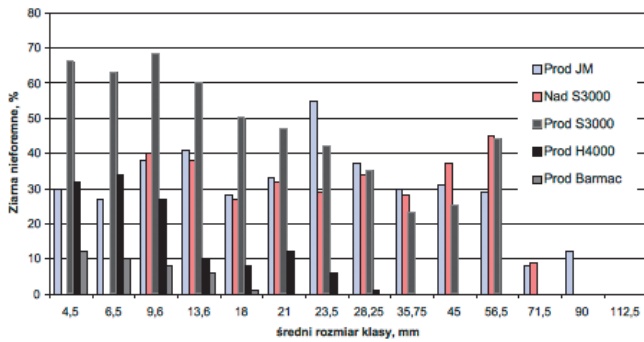
W pracy [11] przedstawiono warunki i wyniki układów czterostadialnych procesów rozdrabniania w dwóch wybranych zakładach produkcji kruszyw bazaltowych znajdujących się na Dolnym Śląsku. W tabeli 1 zamieszczono rodzaje kruszarek zainstalowanych w poszczególnych stadiach rozdrabniania w zakładach A i B oraz ich stopnie rozdrobnienia i współczynniki kształtu ziaren produktów.

Tab. 1. Stopnie rozdrobnienia S_{80} i S_{50} oraz współczynniki kształtu K uzyskane w kolejnych stadiach rozdrabniania [11]

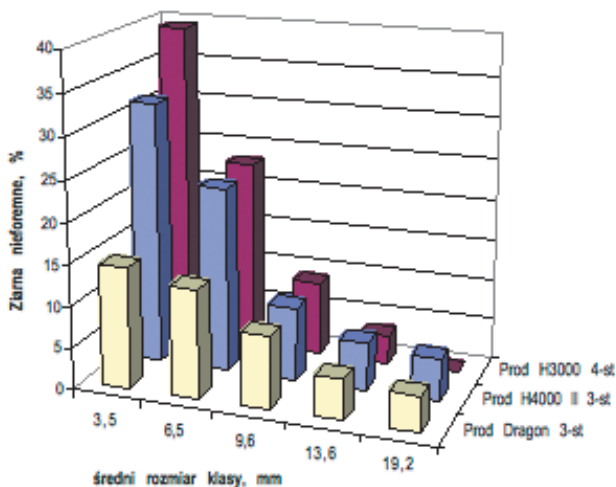
	Rodzaj kruszarki	S_{80}	S_{50}	K , %
zakład A	szczękowa JM st-1			
	stożkowa Svedala	4,6	4,2	21,0
	Superior S3000 st-2	2,5	3,6	38,0
	stożkowa Svedala	2,3	2,1	14,3
	Hydrocon H4000 st-3	1,5	1,8	6,0
	udarowa Barmac MK st-4			
zakład B	stożkowa Krupp st-2			
	stożkowa Svedala			
	Hydrocon H4000 I st-3			
	stożkowa Svedala Hydrocon H4000 II L1 st-3	4,2	3,6	–
	stożkowa Svedala Hydrocon H4000 II L1 st-3	2,3	2,8	–
	stożkowa Svedala Hydrocon H4000 II L2 st-3	1,2	1,6	13,3
	stożkowa Svedala H3000	1,2	1,4	10,0
	L1 st-4	2,2	2,9	16,3
	stożkowa Svedala H3000	2,3	2,5	16,4
	L2 st-4	1,1	1,3	7,2
	udarowa PSP Dragon st-3 L1			

Udziały ziaren nieforemnych w poszczególnych frakcjach ziarnowych produktów rozdrabniania pokazano na rycinach 1 (zakład A) i 2 (zakład B). Na rycinie 1 zwraca uwagę bardzo wysoka (> 60% dla klas ziarnowych < 16 mm) zawartość ziaren nieforemnych po kruszeniu w kruszarce stożkowej S3000 (drugie stadium). Zawartość ta wyraźnie maleje w następnych stadiach rozdrabniania, zwłaszcza po zastosowaniu kubizera Barmac. Z analizy danych przedstawionych na rycinie 2 wynika, że najniższą zawartością ziaren nieforemnych charakteryzuje się produkt rozdrabniania w kruszarce udarowej Dragon (trzecie stadium), a udział takich ziaren we frakcji >16 mm jest najniższy po kruszeniu w kruszarce H3000 (czwarte stadium).

Zamieszczone w tabeli 1 dane umożliwiają określenie zależności wskaźnika kształtu od stopnia rozdrobnienia. Zależność tę przedstawiono na rycinie 3. 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



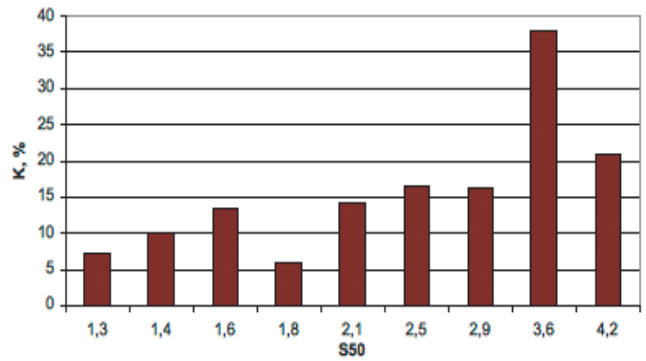
Ryc. 1. Udział ziarna nieforemnych (współczynnik kształtu) w poszczególnych frakcjach ziarnowych produktów rozdrabniania – zakład A [11]



Ryc. 2. Udział ziarna nieforemnych (współczynnik kształtu) w poszczególnych frakcjach ziarnowych wybranych produktów rozdrabniania – zakład B, okres letni [11]

$S_{50} = 3.6$ wynika z opisanej wcześniej szczególnie dużej zawartości ziarna nieforemnych we frakcji <16 mm po rozdrobnieniu kruszarki stożkowej S3000.

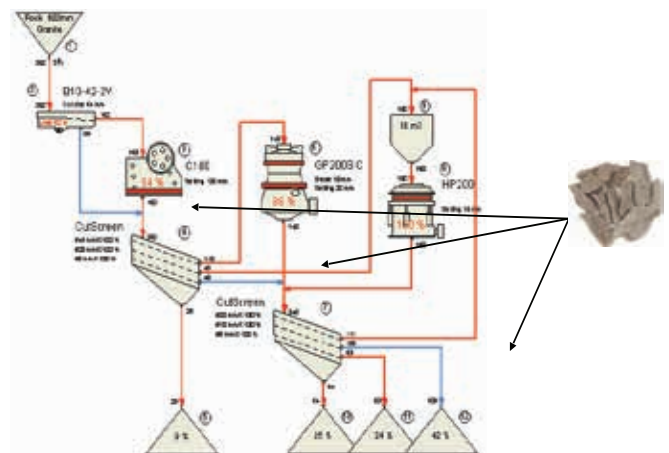
Analiza efektywności wielostadialnego rozdrabniania na przykładzie skał bazaltowych pozwala na sformułowanie ważnych wniosków. Wskaźnik kształtu ziaren w produktach kruszarek udarowych jest niższy od wskaźnika kształtu ziaren produktów kruszarek stożkowych. W granulatorach stożkowych można jednak otrzymać frakcje ziarnowe o niskiej (niższej nawet od uzyskiwanej w kruszarkach udarowych) zawartości ziarna nieforemnych pod warunkiem odpowiedniego doboru szczeliny wylotowej, której wielkość ma decydujący wpływ nie tylko na uziarnienie, ale także na kształt ziaren produktów rozdrabniania. Dla każdej frakcji kruszywa istnieje optymalna wielkość szczeliny wylotowej, przy której uzyskuje się najbardziej prawidłowy kształt ziaren. Wielkość ta jest zbliżona do wielkości ziaren żądanej frakcji. Wskaźnik kształtu ziaren w produktach rozdrabniania maleje wraz ze zmniejszeniem się stopnia rozdrobnienia. Możliwe jest więc zapewnienie prawidłowego kształtu ziaren produktów rozdrabniania przez stosowanie w technologii produkcji kruszyw większej liczby stadiów kruszenia, w szczególności do rozdrabniania końcowego. Niestety wiąże się to ze zwiększonym zakupem maszyn oraz droższą eksploatacją.



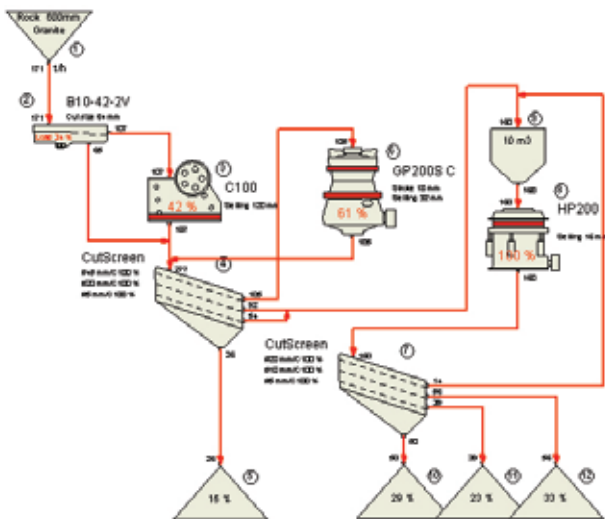
Ryc. 3. Zależność wskaźnika kształtu K od stopnia rozdrobnienia S_{50} [11]

Okazuje się, że procesy rozdrabniania z zawrotem materiału nie tylko większego od ziarna podziałowego, ale nawet drobnego (nazywanego również łozem) są stosowane w produkcji kruszyw mineralnych w celu zmniejszenia zawartości ziarna nieforemnych. Takie badania prowadziła firma Metso Minerals w granulatorach stożkowych produkujących grysy [12]. Do tego celu wykorzystano dwa układy trójstadialne. W pierwszym układzie (ryc. 4) dwa pierwsze stadia kruszarek pracują w układach otwartych. Granulator stożkowy w trzecim stadium pracuje w obiegu zamkniętym z pełnym obciążeniem. Wszystkie maszyny są połączone tak, aby maksymalizować wydajność, która wynosiła 262 Mg/h. Jak widać na rycinie 4, drobne płaskie cząstki obecne w nadawie nie będą kruszone w żadnej kruszarce i otrzymamy produkt końcowy słabej jakości. Porównanie zawartości ziarna nieforemnych dla obu układów przedstawia tabela 2.

W drugim układzie (ryc. 5) kruszarka szczękowa w pierwszym stadium pracuje w układzie otwartym. Pozostałe kruszarki – w obiegu zamkniętym, przy czym granulator stożkowy w trzecim stadium pracuje również z pełnym obciążeniem jak na rycinie 4. Taki układ odznacza się jednak mniejszą wydajnością, która wynosiła 171 Mg/h, ale uzyskuje się maksymalne zawartości ziaren foremnych. Warto zwrócić uwagę, że na tym schemacie produkt dolny z drugiego pokładu sitowego pierwszego przesiewacza jest łączony z produktem dolnym pierwszego pokładu i kierowany do granulatora stożkowego.



Ryc. 4. Układ trójstadialny z nieselektywnym obiegiem materiału [12]



Ryc. 5. Układ trójstadiowy z selektywnym obiegiem materiału [12]

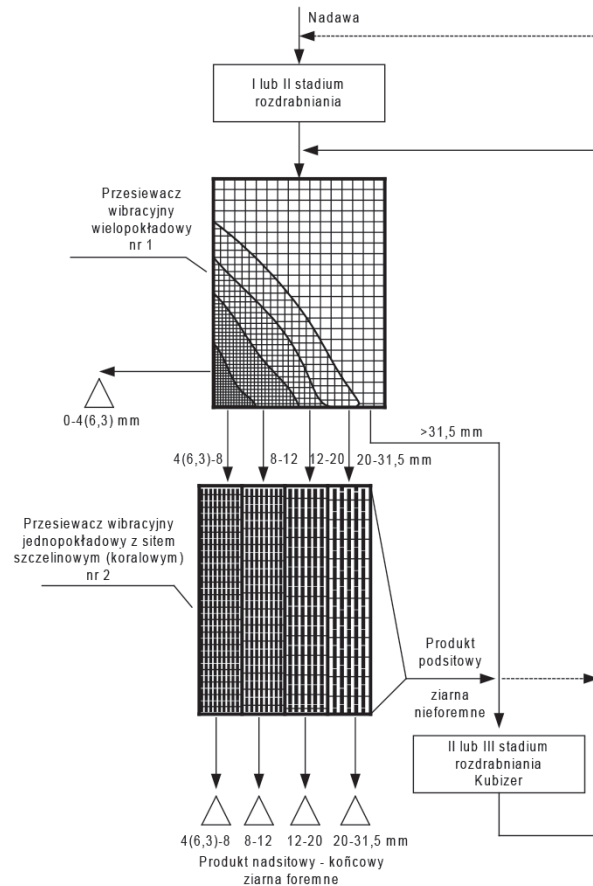
Tab. 2. Zawartość ziaren nieforemnych produktów po różnych stadiach rozdrabniania dla różnych układów technologicznych [12]

Stadium kruszenia	Procentowa zawartość ziaren nieforemnych we frakcjach			
	układ nieselektywny		układ selektywny	
	5/10	10/20	5/10	10/20
II	50	30	nie dotyczy	nie dotyczy
III	20	15	15	10
końcowy produkt	34	22	15	10

Proces selektywnego rozdrabniania z zawrotem drobnego materiału (z udziałem łoża) jest korzystny w produkcji kruszyw mineralnych w granulatorach stożkowych, ale trzeba pamiętać, że w takim przypadku należy unikać nadmiernego rozdrabniania (zbyt wysokich wartości stopni rozdrabniania), ponieważ mogą powstawać drobne pyły w produktach. Należy też przestrzegać zasad doboru składu ziarnowego nadawy do takich kruszarek, tak aby nie przekraczać zbyt dużych udziałów ziaren drobnych, mniejszych od nastawy szczeliny wylotowej kruszarki. Źle dobrane parametry przesiewacza pracującego przed kruszarką mogą wpływać na niewłaściwy skład ziarnowy nadawy do granulatora. Zagadnienie to zostało omówione w pracy [13].

Innowacje technologiczne służące do produkcji kruszyw foremnych

Aby usprawnić proces technologiczny produkcji kruszyw łamanych w typowych instalacjach, można wyposażyć układ w dodatkowy przesiewacz wieloproduktowy z sitem szczelinowym i zwracać produkt podsitowy do ponownego rozdrabniania. Na rycinie 6 przedstawiono schemat takiego innowacyjnego układu zaprojektowanego przez autora artykułu do produkcji kruszyw o zwiększonej zawartości ziaren foremnych, którego idea wynalazku została zgłoszona w Urzędzie Patentowym [14].

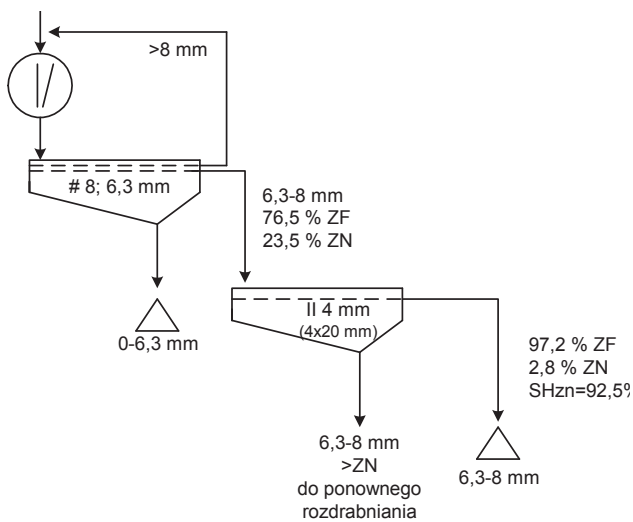


Ryc. 6. Koncepcja układu produkcji kruszyw z zamkniętym obiegiem selektywnego procesu posobnego przesiewania i rozdrabniania [14]

Istota układu została tak przemyślana, że nawet przy zastosowaniu tylko jednej kruszarki, np. szczękowej, mimo iż nie jest korzystna pod względem jakości produktów (tab. 2), można uzyskać finalne kruszywa z zawartością nie więcej niż 2–3% ziaren nieforemnych. Układ wymaga jedynie zastosowania przesiewaczy wibracyjnych z sitami o oczkach kwadratowych nr 1 i szczelinowych nr 2 (ryc. 6), współpracujących ze sobą posobnie w zawrocie z kruszarką znajdującą się w pierwszym lub drugim stadium. Zadaniem przesiewacza wielopokładowego jest klasyfikacja kruszyw w wąskie frakcje ziarnowe, które trafiają na przesiewacz jednopokładowy wieloproduktowy z sitem szczelinowym, a następnie są z nich odsiewane ziarna nieforemne (produkt podsitowy) i zwracane ponownie do rozdrabniania. Ziarna nieforemne mogą być rozdrabnianie w tej samej kruszarce lub na wtórnym stadium kruszenia udarem, np. w kubizerze, co wpłynęłoby jeszcze korzystniej na jakość produktu. Zawartość ziaren nieforemnych w produktach finalnych będzie zależać od sprawności przesiewacza z sitem szczelinowym, a zwłaszcza od relacji zakresu wąskiej frakcji ziarnowej i wielkości szczeliny w sicie. Sito szczelinowe powinno być dobierane na zasadzie $d_{max}/2$, czyli połowy ziarna maksymalnego danej klasy poddawanej przesiewaniu. Ponieważ udział ziaren nieforemnych maleje wraz ze wzrostem wielkości klasy ziarnowej oraz skuteczność procesu przesiewania wzrasta dla grubszych ziaren, to odsiewanie ziaren nieforemnych w grubszych klasach będzie łatwiejsze i skuteczniejsze. Dlatego w badaniach laboratoryjnych prowadzonych w Katedrze Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców AGH zgodnie ze

schematem (ryc. 7) przebadano najdrobniejszą klasę ziarnową (6,3–8 mm), aby zweryfikować słuszność koncepcji (ryc. 6) i ustalić maksymalną zawartość ziaren nieforemnych, jakie mogłyby się pojawiać w produktach końcowych.

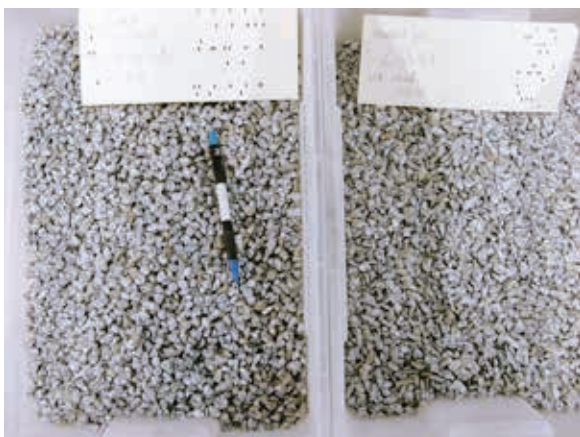
Materiał rozdrobniony w kruszarce szczękowej typu L44.41 został rozklasyfikowany na przesiewaczu wibracyjnym dwupokładowym, tak aby wydzielić wąską klasę ziarnową 6,3–8 mm. Klasa ta zawierała ok. 76% ziaren foremnych i 24% ziaren nieforemnych. W kombinacji układu posobnego przesiewaczy z sitami o oczkach kwadratowych i szczelinowych zastosowano cztery rodzaje sit szczelinowych w celu określenia na nich efektywności odsiewania ziaren nieforemnych. Wszystkie wyniki zaprezentowano w pracy [15], natomiast na rycinie 7 pokazano układ technologiczny, w którym zastosowano najkorzystniejsze sito metalowe druciane z oczkami 4 x 20 mm ukształtowanymi wzdłużnie do kierunku przepływu nadawy.



Ryc. 7. Schemat przeprowadzonych badań według koncepcji P.408045 [14]

Analizując wyniki przesiewania klasy 6,3–8 mm, udział ziaren foremnych (tzw. czystość odsiewu korzystnych ziaren) wzrósł z 76,1% do 97,2%, co oznacza, że w produkcie końcowym klasa zawierała zamiast ok. 24% tylko 2,8% ziaren nieforemnych, przy skuteczności przesiewania według Hancocka (SH_{ZN}) wynoszącej 92,5%.

Rycina 8 obrazuje produkty finalne w klasie 6,3–8 mm o ziarnach foremnych i nieforemnych.

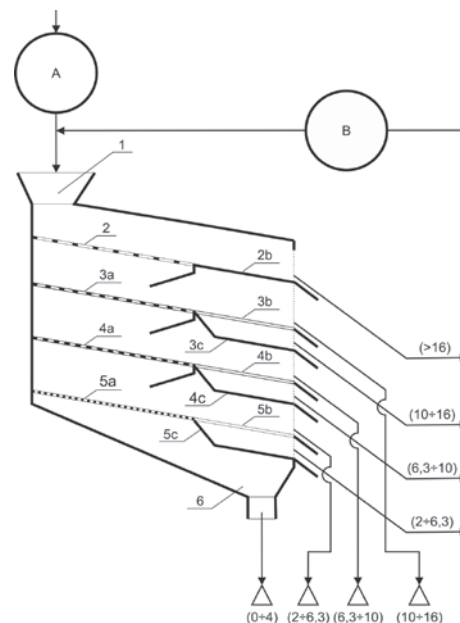


Ryc. 8. Kruszywo z ziarnami foremnymi (z lewej) i nieforemnymi (z prawej) w klasie 6,3–8 mm

Zgodnie z ideą produkcji kruszyw o podwyższonej zawartości ziaren foremnych w układzie z zamkniętym obiegiem selektywnego procesu posobnego przesiewania i rozdrabniania, możliwe jest obniżenie zawartości ziaren nieforemnych z kilkudziesięciu procent do co najmniej 2–3% w każdej klasie ziarnowej. A nawet przy zwiększeniu szczelin oczek sita z 50% na 60–70% wielkości ziarna maksymalnego danej klasy można będzie wyeliminować prawie wszystkie ziarna nieforemne z produktów kosztem zwiększonego zawrotu w układzie. Po złączeniu wąskich klas ziarnowych możliwe jest również uzyskiwanie kruszyw o ciągłym zakresie uziarnienia.

Porównując efekty rozdrabniania, jakie uzyskano w warunkach przemysłowych w układzie selektywnym Mesto Minerals z granulatorami stożkowymi, gdzie zgodnie z tabelą 2 dla zbliżonej klasy ziarnowej 5–10 mm zawartość ziaren nieforemnych wyniosła 15%, warto zauważyć, że uzyskane wyniki są ponad pięciokrotnie wyższe. Również w układzie do produkcji kruszyw bazaltowych w kubizerze Dragon w trzecim stadium rozdrabniania w klasie 5–8 mm uzyskano 13% ZN, a w granulatorach stożkowych typu H3000 i H4000 Svedala w stadiach trzecim i czwartym aż 23% ZN (ryc. 2), a więc wartości te są ponad ośmiokrotnie wyższe od porównywanych rezultatów.

Skuteczność odsiewu zależy będzie od rodzaju sit szczelinowych i wielkości szczelin w stosunku do zakresu uziarnienia przesiewanej frakcji, parametrów dynamicznych przesiewacza wibracyjnego, a także od rodzaju zastosowanej kruszarki. Przy wykorzystaniu kruszarek udarowych z wałem pionowym oraz ograniczeniu liczby stadiów rozdrabniania w obiegu zamkniętym, np. z czterech do trzech, na pewno krążyć będzie mniej ziaren nieforemnych, co wpłynie korzystnie na skuteczność procesu przesiewania oraz na ilość powstającej najdrobniejszej klasy < 4 mm i pyłów. Zrezygnowanie z jednego stadium rozdrabniania pozwoli zaoszczędzić nawet do ok. 1 kWh energii na Mg rozdrabnianego kruszywa oraz zmniejszyć koszty zużycia elementów roboczych kruszarek, wynoszące od ok. 0,2–0,5 zł/Mg.



Ryc. 9. Układ do separacji ziaren foremnych i nieforemnych według patentu nr 513057 [16]: A, B – kruszarki; 1 – lej zasypany; 2, 3a, 4a, 5a – pokłady sit frakcyjnych; 2b, 3b, 4b, 5b – pokłady sit szczelinowych; 3c, 4c, 5c – zsypy ziaren nieforemnych, 6 – zsyp ziaren drobnych

Warto podkreślić, że w Polsce pierwsza taka instalacja przeróbki kruszyw łamanych powstała w żwirowni Kaniów IV w spółce Budtor Bestwina według licencji AGH *Układ urządzeń do produkcji kruszyw foremnych* (nr patentu 408045).

Alternatywnym rozwiązaniem przedstawionego rozwiązania technologicznego jest opatentowany przez AGH układ do produkcji kruszyw z dwoma kruszarkami i przesiewaczem wielopokładowym do klasyfikacji ziarnowej i selektywnej separacji ziaren nieforemnych z kruszyw (nr patentu 413057) [16]. Idea została pokazana na rycinie 9. Układ składający się z kruszarek zawiera jeden przesiewacz wielopokładowy, w którym następuje rozdział nadawy na wąskie klasy ziarnowe podlegające rozseparowaniu na ziarna foremne i nieforemne na sitach szczelinowych kończących pokłady sitowe.

Zaletą omawianych układów poza oszczędnościami energetycznymi i mimo nakładów poniesionych na większą liczbę kruszarek jest możliwość selektywnego wydzielenia dowolnych klas ziarnowych oraz ziaren foremnych i nieforemnych w tych klasach bez zbytecznego ich przekruszania, co niestety ma miejsce w tradycyjnych wielostadialnych układach. Również frakcje składające się z ziaren nieforemnych mogą mieć zastosowanie w inżynierii wodnej czy architekturze budowlanej.

Podsumowanie

Zwięzłe surowce skalne, zwłaszcza pochodzenia wulkanicznego i metamorficznego, są cennym surowcem do produkcji kruszyw łamanych dla drogownictwa, kolejnictwa i budownictwa, z których produkuje się tłuczeń, kliniec, grysy (kruszywa granulowane). O jakości kruszywa decyduje m.in. skład ziarnowy i kształt ziaren, który istotnie wpływa na jego wytrzymałość. Zawartość ziaren nieforemnych w kruszawkach mineralnych zależy głównie od sposobu kruszenia surowca, tzn. od rodzaju stosowanych urządzeń rozdrabniających, ich parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych, stopnia rozdrobnienia i liczby stadiów kruszenia. W badaniach przemysłowych i laboratoryjnych zauważono, że im twardszy (bardziej zwięzły) surowiec, tym trudniej z niego jest uzyskać kruszywo o kształcie foremnym. Ponadto w drobniejszych klasach ziarnowych produktów rozdrabniania uzyskuje się najwięcej ziaren nieforemnych, dlatego w ostatnich stadiach rozdrabniania powinno się stosować kubizery. Wraz ze wzrostem stopnia rozdrobnienia wzrasta również zawartość ziaren nieforemnych, dlatego kruszarki powinny pracować przy niewielkich stopniach rozdrobnienia. Wszystkie te istotne czynniki wpływają na konieczność stosowania układów wielostadialnych, które podnoszą koszty zarówno inwestycyjne, jak i eksploatacyjne. Alternatywą w tym zakresie mogą być zastosowane wynalazki AGH w postaci instalacji do produkcji kruszyw łamanych w układzie z zamkniętym obiegiem selektywnego i posobnego procesu przesiewania i rozdrabniania lub instalacji z przesiewaczem wielopokładowym wielofrakcyjnym, które występują (w zależności od wielkości uziarnienia nadawy) w jedno- lub dwustadialnym układzie, eliminując jednocześnie jedno stadium rozdrabniania.

Artykuł jest wynikiem realizacji pracy statutowej.

Literatura

[1] Zieliński Z.: *Korelacja parametrów technologicznych mechanicznego kruszenia i przesiewania materiałów skalnych stosowanych w budownictwie drogowym*. „Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej. Instytut Inżynierii Lądowej” 1983, z. 18 (228).

- [2] Neville A.M.: *Właściwości betonu*. Polski Cement. Kraków 2000.
- [3] Tumidajski T., Naziemiec Z.: *Wpływ warunków procesu kruszenia na kształt ziaren kruszyw mineralnych*. IV Konferencja *Kruszywa mineralne: surowce, rynek, technologie*, Szklarska Poręba, 14–16 kwietnia 2004. „Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Konferencje” 2004, Vol. 108, nr 40, s. 163–175.
- [4] Naziemiec Z., Gawenda T.: *Ocena efektów rozdrabniania surowców mineralnych w różnych urządzeniach kruszących*. VI Konferencja *Kruszywa mineralne: surowce, rynek, technologie*, Szklarska Poręba, 26–28 kwietnia 2006. „Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Konferencje” 2006, Vol. 115, nr 46, s. 83–94.
- [5] Gawenda T.: *Innowacyjne technologie produkcji kruszyw o ziarnach foremnych*. „Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Górnictwo i Geologia” 2015, Vol. 22, spec. iss. 1, s. 45–59.
- [6] PN-EN 933-4:2008 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw*. Cz. 4. *Oznaczanie kształtu ziaren – wskaźnik kształtu*.
- [7] PN-EN 933-3:2012 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw*. Cz. 3. *Oznaczanie kształtu ziaren za pomocą wskaźnika płaskości*.
- [8] Gawenda T., Naziemiec Z.: *Sposoby poprawy kształtu ziaren kruszyw mineralnych w kruszarkach szczękowych*. „Inżynieria Mineralna” 2003, nr spec. 3, s. 115–124.
- [9] Naziemiec Z., Gawenda T., Saramak D., Tumidajski T.: *Investigations over the influence of technological parameters and operating conditions for jaw crushers on the optimization of geometrical properties of comminution products*. XXIV International Mineral Processing Congress. Beijing, 24–28 September 2008.
- [10] Naziemiec Z., Gawenda T.: *Badanie procesu kruszenia z zamkniętym obiegiem*. VII Konferencja *Kruszywa mineralne: surowce, rynek, technologie, jakość*, Szklarska Poręba, 18–20 kwietnia 2007. „Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Konferencje” 2007, Vol. 119, nr 48, s. 107–116.
- [11] Nowak A., Gawenda T.: *Analiza porównawcza kruszarek w wielostadialnych układach rozdrabniania skał bazaltowych*. „Górnictwo i Geoinżynieria” 2006, Vol. 30, z. 3/1, s. 267–278.
- [12] Eloranta J.: *Sposoby wpływania na jakość kruszyw*. Prezentacja badań firmy Metso Minerals na nośniku CD, VI Konferencja *Kruszywa mineralne: surowce, rynek, technologie, jakość*, Szklarska Poręba, 26–28 kwietnia 2006. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2006.
- [13] Gawenda T.: *Analiza efektów rozdrabniania w granulatorze stożkowym w zależności od wielkości uziarnienia nadawy i jego obciążenia*. „Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i materiały” 2012, Vol. 134, nr 41, s. 71–83.
- [14] Gawenda T.: *Projekt wynalazczy Układ urządzeń do produkcji kruszyw foremnych*. Pismo CTT-owi-1/333/2013/100 z 13 czerwca 2013 AGH w Krakowie, nr P408045 z 28 kwietnia 2014.
- [15] Gawenda T.: *Analiza i zasady doboru kruszarek oraz układów technologicznych w produkcji kruszyw łamanych*. Monografia nr 304. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH. Kraków 2015.
- [16] Gawenda T.: *Przesiewacz wibracyjny wielopokładowy*. AGH w Krakowie. Patent nr P413057, 7 lipca 2015.

