

Received January 30, 2015; reviewed; accepted March 26, 2015

*układy technologiczne, rozdrabnianie,  
kruszywa mineralne, ziarna foremne*

Tomasz GAWENDA <sup>1</sup>

## **INNOWACYJNE TECHNOLOGIE PRODUKCJI KRUSZYW O ZIARNACH FOREMNYCH**

Celem artykułu jest opisanie możliwości produkcji kruszyw o zwiększonej zawartości ziaren foremnych na przykładach powszechnie znanych, a także przedstawienie dotąd niestosowanej w przemyśle metody 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 innowacyjnym układzie technologicznym można uzyskać kruszywa z zawartością ziaren nieforemnych poniżej 3%, nawet w jedno- lub dwustadialnym układzie rozdrabniania.

### **1. WSTĘP**

Przeróbka surowców skalnych stawia coraz częściej wysokie wymagania odnośnie końcowej jakości produktów. Specyficzny rynek zbytu wymaga dużej liczby i dużych ilości produktów o wąskim zakresie uziarnienia i określonych kształtach ziaren (kubicznych) przy możliwie niewielkim dopuszczalnym udziale ziaren podłużnych lub płaskich. Właściwości fizykochemiczne kopaliny 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 metod przerobczych podczas ich produkcji (głównie rozdrabniania) i mogą wpływać pośrednio lub bezpośrednio na inne cechy.

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, gawenda@agh.edu.pl

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 bezpośrednio 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 ziaren, posiadać ostre krawędzie oraz szorstkie płaszczyzny przelamu.

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. Ponadto ziarna płaskie i wydłużone mają tendencję do ukierunkowanej orientacji w jednej płaszczyźnie, co łączy się z możliwością powstawania pustek powietrznych (Neville, 2000). Zwiększenie zawartości ziaren płaskich wpływa na wzrost wolnych przestrzeni, co powoduje konieczność zwiększenia ilości zaprawy w betonie, a przez to wpływa na zwiększenie zużycia cementu. Ich znaczący udział w kruszywie wpływa szkodliwie na trwałość betonu.

Stosunek szerokości ziaren do ich grubości ma również zasadniczy wpływ na ich wytrzymałość. Ziarna nieforemne, zwłaszcza płaskie wykazują największą ścieralność. Stwierdzono, że szczególnie duży wpływ ziaren nieforemnych na wytrzymałość kruszywa występuje przy ich zawartości 25–50%. Na przykład przy 50% udziale ziaren nieprawidłowych wytrzymałość kruszywa bazaltowego zmniejsza się o 55% (Zieliński, 1983). O jakości kruszywa decyduje więc zarówno jego skład granulometryczny, jak i kształt ziaren, a także właściwości fizykomechaniczne (np. odporność na rozdrabnianie określona ścieralnością w bębnie kulowym Los Angeles). Ziarna foremne posiadają mniejszą podatność na rozdrabnianie (mniejszy wskaźnik  $LA$ ), mniejszą nasiąkliwość, ścieralność, co związane jest z wytrzymałością betonu lub nawierzchni drogowej (Tumidajski & Naziemiec, 2004, Naziemiec i in., 2006). Na problematykę trudności zdefiniowania miary kształtu i interpretacji wskaźników kształtu ziaren zwrócił uwagę J. Malewski (Malewski, 2014) przytaczając szereg definicji opisu kształtu ziaren, np. jako kulisty, kubiczny, podłużny, płaski, wydłużony itp. 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 oraz PN-EN 933-3:2012.

## 2. MOŻLIWOŚCI ZWIĘKSZANIA UDZIAŁU ZIAREN FOREMNYCH

Na możliwości zwiększania udziału ziaren foremnych w kruszywach 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. Na wstępnych stopniach kruszenia pracują najczęściej kruszarki szczękowe lub stożkowe (żyratory). Zaletą kruszarek szczękowych jest mała wrażliwość na zmiany wielkości uziarnienia nadawy, czyli urobku z robót strzałowymi oraz niskie koszty eksploatacyjne i prosta ich obsługa w porównaniu z innymi kruszarkami.

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 ruchu prostym, ale większą rolę odgrywa rodzaj okładziny szczęki. Szczęki rowkowane, (zwłaszcza trapez wysoki) wpływają korzystniej na kształt produktów niż szczęki gładkie. Jednakże zawartości ziaren nieforemnych w najdrobniejszych klasach ziarnowych poniżej 8 mm przekraczają udział 50% (Gawenda, Naziemiec 2003), co nie zadowala odbiorców kruszyw.

Przebadano także kombinację zestawów szczęk w kruszarce typu L44.41 o różnych profilach poprzecznych (Naziemiec i in., 2008). Z badań kruszenia wynika, że dla szczęk kombinowanych (gładka + rowkowana trapezowa) uzyskano korzystniejsze efekty rozdrabniania. Zawartość ziaren nieforemnych przy płytach kombinowanych była niższa niż dla obu płyt rowkowanych. Zauważono także, że ten sam układ płyt niesymetrycznych (gładka + rowkowana) wpływał na zwiększenie wydajności procesu rozdrabniania, bo grawitacyjny przepływ materiału przez komorę kruszenia jest łatwiejszy (mniejsze opory tarcia o powierzchnie płyt) niż w przypadku zestawu płyt rowkowanych.

Do produkcji kruszyw na 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 ziaren oraz na ogół nieco mniejszym skokiem i większymi obrotami (większa liczba skoków) zapewniającym ziarnom dłuższą drogę przejścia w komorze roboczej. Produkcując 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 zwięzłych. Również sposób podawania w nich materiału (system kamień–kamień) ogranicza zużycie elementów roboczych kruszarki. Kubizery są coraz częściej stosowane 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) 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 wpływają na jakość produktów (kształt i wielkość ziaren).

W tabeli 1 zestawiono dane dotyczące zawartości ziaren nieforemnych dla rozpastrywanych kruszarek; najwięcej foremnych ziaren uzyskuje się w kruszarkach udarowych, następnie stożkowych, a najmniej w szczękowych.

Tab. 1. Zawartość ziaren nieforemnych (wskaźnik płaskości) w produktach uzyskanych w różnych kruszarkach (Naziemiec & Gawenda, 2006)

Tab. 1. Irregular particles content (flatness index) in products obtained in various crushers (Naziemiec & Gawenda, 2006)

Frakcja kruszywa [mm]	Średnia zawartość ziaren nieforemnych [%] z kruszarek						
	udarowe	stożkowe		szczękowe			
	40,77 40,76	44,51 granulator	Nordberg granulator	LJ – prosty ruch szczęki		L 44.41 – złożony ruch szczęki	
				rowki trój- kątnie	rowki trape- zowe	rowki trój- kątnie	rowki trape- zowe
6,3-12,5	5,9	8,7	15,2	33,0	26,2	27,5	27,9
12,5-16	4,5	8,1	9,0	20,8	15,5	31,4	24,7
średnio 6,3-16	5,2	8,4	12,1	26,9	20,9	29,5	26,5

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 brane są pod uwagę charakterystyki pracy poszczególnych maszyn, które zależne są między innymi od właściwości fizykomechanicznych 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 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. Prawdłowo zaprojektowane układy rozdrabniania z obiegiem zamkniętym pozwalają kontrolować przepływ materiału, a także podnosić jakość produktu. Według przeprowadzonych badań (Naziemiec & Gawenda, 2007) 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 (Nowak & Gawenda, 2006) przedstawiono warunki i wyniki układów czterostadialnych procesów rozdrabniania w dwóch wybranych zakładach produkcji kruszyw bazaltowych. W tabeli 2 pokazano rodzaje kruszarek zainstalowanych na poszczególnych stadiach rozdrabniania w zakładach A i B oraz ich stopnie rozdrobnienia i współczynniki kształtu ziaren produktów.

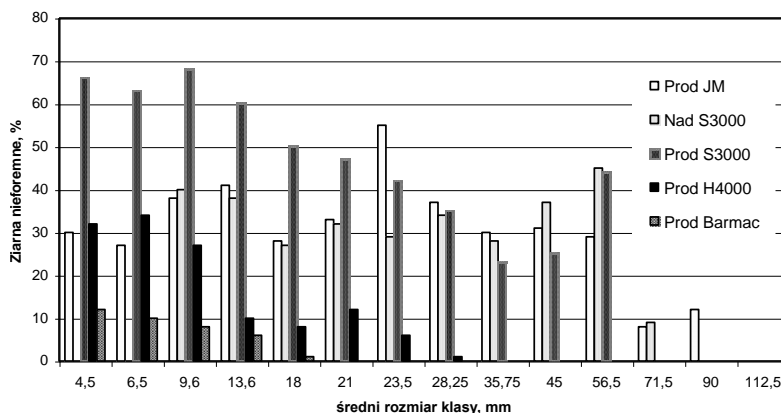
Tab. 2. Stopnie rozdrobnienia  $S_{80}$  i  $S_{50}$  oraz współczynniki kształtu  $K$  uzyskane w kolejnych stadiach rozdrabniania (Nowak & Gawenda, 2006)  
Tab. 2.  $S_{80}$  and  $S_{50}$  comminution degrees and shape coefficients  $K$ , obtained on consecutive crushing stages (Nowak & Gawenda, 2006)

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

Udziały ziaren nieforemnych w poszczególnych frakcjach ziarnowych produktów rozdrabniania przedstawiają rysunki 1, 2. Na rysunku 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 rysunku 2 wynika, że najniższą zawartością ziaren nieforemnych charakteryzuje się produkt rozdrabniania w kruszarce udarowej Dragon (3 stadium), a udział takich ziaren we frakcji > 16 mm jest najniższy po kruszeniu w kruszarce H3000 (czwarte stadium).

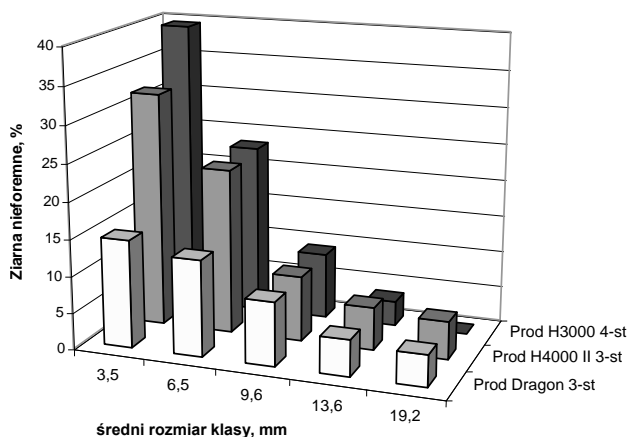
Zamieszczone w tabeli 3 dane umożliwiają określenie zależności wskaźnika kształtu od stopnia rozdrobnienia (rys. 3). Najwyższe stopnie rozdrobnienia charakteryzują

kruszarzki pracujące we wstępnych stadiach procesu, lecz korzystniejsze 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 szczególnie dużej zawartości ziaren nieforemnych we frakcji  $< 16$  mm po rozdrobnieniu w kruszarce stożkowej S3000.



Rys. 1. Udział ziaren nieforemnych (współczynnik kształtu) w poszczególnych frakcjach ziarnowych produktów rozdrabniania – zakład A (Nowak & Gawenda, 2006)

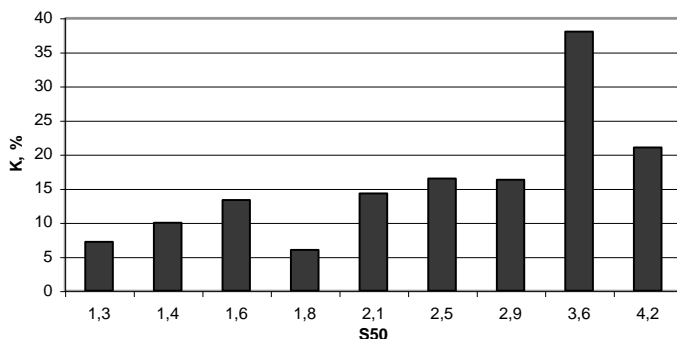
Fig. 1. Irregular particles share (shape coefficients) in individual particle size fractions of comminution products – plant A (Nowak & Gawenda, 2006)



Rys. 2. Udział ziaren nieforemnych (współczynnik kształtu) w poszczególnych frakcjach ziarnowych wybranych produktów rozdrabniania – zakład B, okres letni (Nowak & Gawenda, 2006)

Fig. 2. Share of irregular particles (shape coefficients) in individual particle size fractions of chosen comminution products – plant B, summer period (Nowak & Gawenda, 2006)

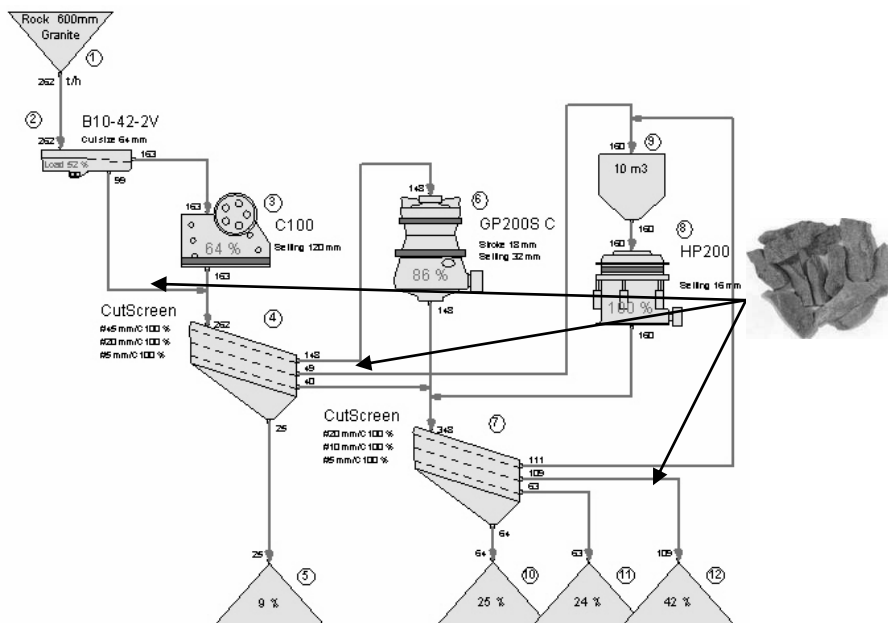
Analiza efektywności wielostadialnego rozdrabniania na przykładzie skał bazaltowych pozwala na sformułowanie ważnych wniosków. Wskaźnik kształtu ziaren w produktach kruszarek udarowych jest niższy od wskaźnika kształtu ziaren produktów kruszarek stożkowych. W granulatorach stożkowych można jednak otrzymać frakcje ziarnowe o niskiej (niższej nawet od uzyskiwanej w kruszarkach udarowych) zawartości ziaren 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 poprzez stosowanie w produkcji kruszyw większej liczby stadiów kruszenia w szczególności do rozdrabniania końcowego. Niestety wiąże się to z zakupem większej liczby maszyn oraz droższą eksploatacją.



Rys. 3. Zależność wskaźnika kształtu  $K$  od stopnia rozdrobnienia  $S_{50}$  (Nowak & Gawenda, 2006)

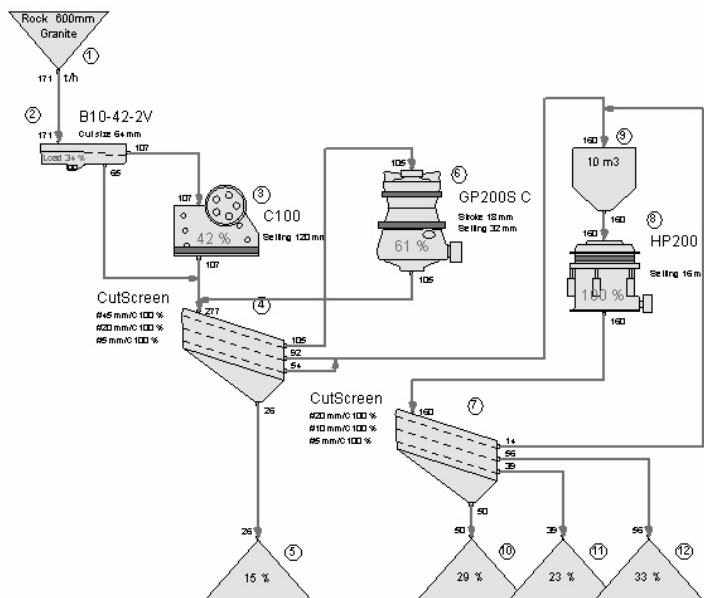
Fig. 3. Influence of the shape coefficient on comminution level (Nowak & Gawenda, 2006)

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 w celu zmniejszenia zawartości ziaren nieforemnych. Badania takie prowadziła firma Metso Minerals w granulatorach stożkowych produkujących grysy (Eloranta, 2006). Do tego celu wykorzystano dwa układy trójstadialne. W pierwszym układzie (rys. 4) dwa pierwsze stadia kruszarek pracują w układach otwartych. Granulator stożkowy na trzecim stadium pracuje w obiegu zamkniętym z pełnym obciążeniem. Maszyny są połączone tak, aby maksymalizować wydajność, wynoszącą 262 Mg/h. Jak widać na rysunku 4, drobne płaskie cząstki obecne w nadawie nie będą kruszone w żadnej kruszarce i otrzymamy produkt końcowy słabej jakości. Porównanie zawartości ziaren nieforemnych dla obu układów przedstawia tabela 3.



Rys. 4. Układ trójstadiowy z nieselektywnym obiegiem materiału (Eloranta, 2006)

Fig. 4. Triple-stage circuit with non-selective material flow (Eloranta, 2006)



Rys. 5. Układ trójstadiowy z selektywnym obiegiem materiału (Eloranta, 2006)

Fig. 5. Triple-stage circuit with selective material flow (Eloranta, 2006)



W drugim układzie (rys. 5) kruszarka szczękowa na pierwszym stadium pracuje w układzie otwartym. Pozostałe kruszarki pracują w obiegu zamkniętym, przy czym granulator stożkowy na trzecim stadium pracuje również z pełnym obciążeniem jak na rysunku 4. Taki układ odznacza się jednak mniejszą wydajnością, która wynosiła 171 Mg/godz, 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.

Tab. 3. Zawartość ziaren nieforemnych produktów po różnych stadiach rozdrabniania dla różnych układów technologicznych (Eloranta, 2006)

Tab. 3. Irregular particles content for products after different crushing stages for different technological circuits (Eloranta, 2006)

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

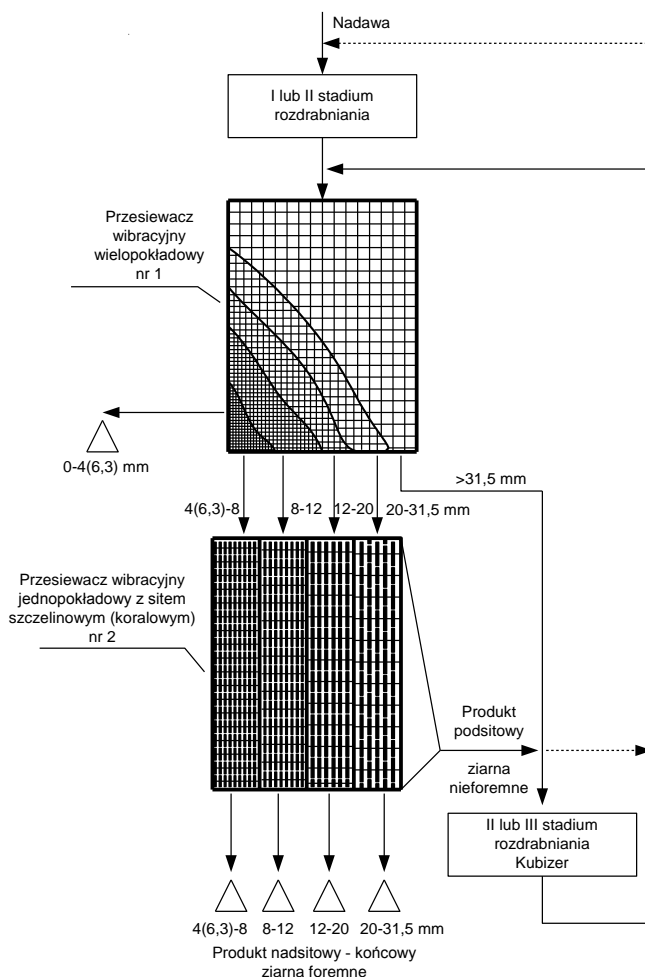
Proces selektywnego rozdrabniania z zawrotem drobnego materiału (z udziałem łoża) jest korzystny w produkcji kruszyw granulatorami stożkowymi, ale trzeba pamiętać, że w takim przypadku należy unikać nadmiernego rozdrabniania (zbyt dużych stopni rozdrobnienia), ponieważ mogą powstawać drobne pyły w produktach. Należy też przestrzegać zasad doboru składu ziarnowego nadawy do takich kruszarek, 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 (Gawenda, 2012).

### 3. INNOWACYJNY UKŁAD TECHNOLOGICZNY DO PRODUKCJI KRUSZYW O ZWIĘKSZONEJ ZAWARTOŚCI ZIAREN FOREMNYCH

Najbardziej popularnymi rozwiązaniami technologicznymi w niewielkich zakładach przerobczych, a zwłaszcza przeróbki odpadów na kruszywo z recyklingu, cieszą się instalacje mobilne i stacjonarne wyposażone na ogół w jedno lub dwa stadia rozdrabniania. O ile instalacje stacjonarne pracują w układach zamkniętych, to instalacje mobilne najczęściej w układach otwartych przeważnie z jedną kruszarką, zazwyczaj szczękową, rzadziej stożkową lub udarową. Takie rozwiązanie jest podyktowane przede wszystkim względami ekonomicznymi, co odbija się negatywnie na jakości

produktu. Istnieją na rynku instalacje mobilne z zawrotem materiału, jak np. firmy SBM MP, oferującej maszynę typu Remax z kruszarką wirnikową udarową listwową, ale niewiele zakładów posiada tego typu instalacje.

Aby usprawnić proces produkcji kruszyw w prostych instalacjach, można wyposażyć układ w dodatkowy przesiewacz z sitem szczelinowym wieloproduktowy i zawracać produkt podsitowy do ponownego rozdrabniania. Schemat takiego innowacyjnego układu, zaprojektowanego przez autora do produkcji kruszyw o zwiększonej zawartości ziaren foremnych, przedstawiono na rysunku 6; idea wynalazku została zgłoszona w UP (Gawenda, 2014).



Rys. 6. Konceptcja układu produkcji kruszyw z zamkniętym obiegiem selektywnego procesu posobnego przesiewania i rozdrabniania (Gawenda, 2014)

Fig. 6. Idea of the aggregate production circuit with a closed recirculation for selective screening and crushing operations (Gawenda, 2014)

Struktura 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 tylko zastosowania przesiewaczy wibracyjnych z sitami o oczkach kwadratowych nr 1 i szczelinowych nr 2 (rys. 6), współpracującymi ze sobą posobnie w zawrocie z kruszarką znajdującą się na pierwszym lub drugim stadium. Zadaniem przesiewacza wielopokładowego jest klasyfikacja kruszyw na wąskie frakcje ziarnowe, które trafiają na przesiewacz jednopokładowy wieloproduktowy z sitem szczelinowym, a następnie są z nich odsiewane ziarna nieforemne (produkt podsitowy) i zawracane ponownie do rozdrabniania. Ziarna nieforemne mogą być rozdrabnianie w tej samej kruszarce lub na wtórnym stadium kruszenia udarem, np. w kubizerze, co wpłynie jeszcze korzystniej na jakość produktu. Zawartość ziaren nieforemnych w produktach finalnych będzie zależec od sprawności przesiewacza z sitem szczelinowym, a zwłaszcza od relacji zakresu wąskiej frakcji ziarnowej i wielkości szczeliny w sicie. Sito szczelinowe powinno być dobrane na zasadzie  $d_{\max}/2$ , czyli połowy ziarna maksymalnego danej klasy. 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 we wstępnych badaniach laboratoryjnych prowadzonych w KISiPS AGH, zgodnie ze schematem (rys. 6) przebadano najdrobniejszą klasę ziarnową (6,3–8 mm), aby zweryfikować słuszność idei 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, żeby 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 4 rodzaje następujących sit szczelinowych w celu określenia na nich efektywności odsiewania ziaren nieforemnych (tab. 4):

- metalowe druciane z oczkami 4×20 mm ukształtowanymi wzdłużnie (MD wzdł.),
- metalowe druciane z oczkami 20×4 mm ukształtowanymi poprzecznie (MD poprz.),
- poliuretanowe z oczkami 4×20 mm ukształtowanymi wzdłużnie (PU wzdł.),
- poliuretanowe z oczkami 20×4 mm ukształtowanymi poprzecznie (PU poprz.).

Tab. 4. Rozkład zawartości ziaren foremnych (ZF) i nieforemnych (ZN) w klasie ziarnowej 6,3–8 mm w zależności od rodzaju sita szczelinowego (Gawenda, 2015)

Tab. 4. Distribution of regular (ZF) and irregular (ZN) particles in 6.3–8 particle size fraction in relationship to the type of the sieve (Gawenda, 2015)

Rodzaj sita	Wychód		Wychód				Produkt końcowy	Uzysk	Skuteczność	
	[%]									
	$\gamma_g$	$\gamma_d$	$\gamma_g$ ZF	$\gamma_d$ ZF	$\gamma_g$ ZN	$\gamma_d$ ZN	ZF PK	ZN PK	$\varepsilon_{ZN}$	$SH_{ZN}$
MD wzdł. 4×20 mm	78,3	21,7	76,1	0,4	2,2	21,3	97,2	2,8	7,4	92,5
MD poprz. 20×4 mm	77,5	22,5	75,0	0,5	2,5	21,4	96,7	3,3	8,2	91,6
PU wzdł. 4×20 mm	91,2	8,8	75,7	0,5	15,4	8,3	83,1	16,9	59,3	41,6
PU poprz. 20×4 mm	91,7	8,3	75,3	0,9	16,4	7,4	82,1	17,9	63,2	37,2

W wyniku przesiewania klasy 6,3–8 mm (tab. 4) zawartość wychodu ziaren foremnych (tzw. czystość odsiewu korzystnych ziaren) podniesiono z 76,1% do 97,2%, co oznacza, że w produkcie końcowym klasa ta będzie zawierać zamiast ok. 24% tylko 2,8% ziaren nieforemnych, przy technologicznej skuteczności przesiewania wg Hancocka ( $SH_{ZN}$ ) wynoszącej 92,5%. Uzysk ( $\varepsilon_{ZN}$ ) ziaren nieforemnych odnotowany na poziomie 7,4% również jest najniższy (im bliższy zero, tym większa efektywność odsiewu w układzie posobnym sit). Najlepsze takie rezultaty uzyskano dla sita metalowego drucianego z oczkami ukształtowanymi wzdłużnie do kierunku przepływu kruszywa. Najgorsze efekty odsiewania ziaren nieforemnych uzyskano dla sita poliuretanowego z oczkami poprzecznie ukształtowanymi, gdyż w produkcie końcowym w klasie 6,3–8 mm pozostanie ok. 18% ziaren nieforemnych.

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 np. 0–31,5 mm.

Porównując efekty rozdrabniania, jakie uzyskano w warunkach przemysłowych w układzie selektywnym Mesto Minerals z granuladorami stożkowymi, gdzie zgodnie z tabelą 3 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 (rys. 2) w kubizerze Dragon

na 3 stadium rozdrabniania w klasie 5–8 mm uzyskano 13% ZN, a w granulatorach stożkowych typu H3000 i H4000 Svedała na 3 i 4 stadium aż 23% ZN, a więc wartości te są ponad ośmiokrotnie większe.

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 mniej będzie krążyć 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 zużycie energii nawet do ok. 1 kWh/Mg rozdrabnianego kruszywa oraz koszty zużycia elementów roboczych kruszarek wynoszących od ok. 0,2–0,5 zł/Mg, a koszty związane z eksploatacją dodatkowego przesiewacza są niewielkie; będą wynosić od 15–35 zł/1000 Mg przesiewanego kruszywa w zależności od rodzaju przesiewacza i użytych sit. Planuje się dalsze prowadzenie badań w tym zakresie, łącznie z wykorzystaniem sit szczelinowych koralowych w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych, które są istotą zgłoszonego w UP wynalazku (Gawenda, 2013).

Należy podkreślić, że zaletą omawianego układu poza oszczędnościami energetycznymi jest możliwość selektywnego wydzielania dowolnych klas ziarnowych oraz ziaren foremnych i nieforemnych w tych klasach, bez zbytecznego ich przekruszania, co niestety ma miejsce w tradycyjnych wielostadialnych układach. Dlatego bardziej zaawansowane technologicznie układy są wyposażone na ostatnich stadiach rozdrabniania w kubizery lub granulatory stożkowe, których zadaniem jest rozdrabnianie drobnych kruszyw finalnych przy niewielkich stopniach rozdrobnienia, by uniknąć ich nadmiernego rozdrobnienia.

#### 4. 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 skład ziarnowy i kształt ziaren, który istotnie wpływa na jego wytrzymałość. Zawartość ziaren nieforemnych w kruszywach 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 uzyskać kruszywo o kształcie foremnym. Ponadto w drobniejszych klasach ziarnowych produktów rozdrabniania uzyskuje się najwięcej ziaren nieforemnych,

dlatego powinno się stosować kubizery na ostatnich stadiach rozdrabniania. Wraz ze wzrostem stopnia rozdrobnienia również wzrasta zawartość ziaren nieforemnych, dlatego kruszarki powinny pracować przy niewielkich stopniach rozdrobnienia. Wszystkie te istotne czynniki wpływają jednak na konieczność stosowania układów wielostadialnych, które podnoszą koszty zarówno inwestycyjne jak i eksploatacyjne. Alternatywą w tym zakresie może być wykorzystanie instalacji produkcji kruszyw łamanych w układzie z zamkniętym obiegiem selektywnego i posobnego procesu przesiewania i rozdrabniania, opartym (w zależności od wielkości uziarnienia nadawy) na jedno- lub dwustadialnym układzie, eliminując jednocześnie jedno stadium rozdrabniania.

*Artykuł jest wynikiem realizacji projektu badawczego nr 17.17.100.87470*

#### LITERATURA

- ELORANTA J., 2006, *Sposoby wpływania na jakość kruszyw*, Prezentacja badań firmy Metso Minerals na nośniku CD, VI Konferencja *Kruszywa mineralne – surowce – rynek – technologie – jakość*, Szklarska Poręba.
- GAWENDA T., 2012, *Analiza efektów rozdrabniania w granulatorze stożkowym w zależności od wielkości uziarnienia nadawy i jego obciążenia*, *Górnictwo i geologia XVII*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr., nr 134, *Studia i Materiały*, nr 41, 71–83.
- GAWENDA T., 2013, Projekt wynalazczy pt. *Sito do materiałów trudno przesiewalnych*, Pismo CTT-owi-1/200/2013 AGH w Krakowie, Opis zgłoszeniowy wynalazku nr PL.402726 A1, zgłoszono 11.02.2013 r., opublikowano 12.11.2013 r. w *Biuletynie Urzędu Patentowego*, nr 23, s. 10.
- GAWENDA T., 2014, Projekt wynalazczy pt. *Układ urządzeń do produkcji kruszyw foremnych*, Pismo CTT-owi-1/333/2013/100 z dnia 13.06.2013 AGH w Krakowie, nr P.408045 z dnia 28.04.2014.
- GAWENDA T., 2015, *Analiza i zasady doboru kruszarek oraz układów technologicznych w produkcji kruszyw łamanych*, Monografia w przygotowaniu do publ. w Wyd. AGH, Kraków.
- MALEWSKI J., 2014, *Kształt ziaren w produktach kruszenia*, *Kruszywa* nr 3, 52–55.
- NAZIEMIEC Z., GAWENDA T., 2006, *Ocena efektów rozdrabniania surowców mineralnych w różnych urządzeniach kruszących*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr., nr 115, Konferencje, nr 46, 83–94.
- NAZIEMIEC Z., GAWENDA T., 2007, *Badanie procesu kruszenia z zamkniętym obiegiem*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr., nr 119, Konferencje, nr 41, 107–116.
- NAZIEMIEC Z., GAWENDA T., SARAMAK D., TUMIDAJSKI T., 2008, *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.
- NEVILLE A.M., 2000, *Właściwości betonu*, Polski Cement, Kraków.
- NOWAK A., GAWENDA T., 2006, *Analiza porównawcza kruszarek w wielostadialnych układach rozdrabniania skal bazaltowych*, Uczelniane Wyd. N.-Dyd. Górnictwo i Geoinżynieria, Zeszyt 3/1, Kraków–Zakopane, 267–278.
- PN-EN 933-4:2008 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw - Część 4: Oznaczanie kształtu ziaren – wskaźnik kształtu*.
- PN-EN 933-3:2012 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw - Część 3: Oznaczanie kształtu ziaren za pomocą wskaźnika płaskości*.

- TUMIDAJSKI T., NAZIEMIEC Z., 2004, *Wpływ warunków procesu kruszenia na kształt ziaren kruszyw mineralnych*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr., nr 108, Konferencje, nr 4, 163–175.
- ZIELIŃSKI Z., 1983, *Korelacja parametrów technologicznych mechanicznego kruszenia i przesiewania materiałów skalnych stosowanych w budownictwie drogowym*, Wyd. Ucz. PSz., zeszyt 228.

#### INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF THE REGULAR PARTICLE AGGREGATES PRODUCTION

The aim of the article is to discuss possibilities of production of aggregates with increased content of regular particles, on some well-known examples, as well as presentation the method of aggregate production, which was not previously present in the industry. Traditional aggregate production circuits require application of three or four grinding stages (depending on the particle size of the feed), but for fine particle fractions of aggregates irregular grains occur on average approximate content of 10%. The innovative technological circuit can produce the aggregates with the content of irregular grains below 3%, even in a single- or two-stage crushing circuit.