



**304** DISSERTATIONS  
MONOGRAPHS

**TOMASZ GAWENDA**

Principles for selection of crushers  
and technological crushing circuits  
in crushed-stone aggregate production



ROZPRAWY  
MONOGRAFIE **304**

**TOMASZ GAWENDA**

Zasady doboru kruszarek  
oraz układów technologicznych  
w produkcji kruszyw łamanych



WYDAWNICTWA AGH

KRAKÓW 2015

Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej  
im. Stanisława Staszica w Krakowie

Redaktor Wydawnictw AGH: *Jan Sas*

Komitet Naukowy Wydawnictw AGH:  
*Zbigniew Kąkol* (przewodniczący)  
*Marek Cala*  
*Borys Mikułowski*  
*Tadeusz Sawik*  
*Mariusz Ziółko*

Recenzenci: *prof. dr hab. inż. Kazimierz Sztaba*  
*prof. dr hab. inż. Piotr Wodziński*

Afiliacja autora:  
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Górnictwa i Geoinżynierii  
Katedra Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców  
al. A. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków

Opieka redakcyjna: *Agnieszka Rusinek*

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2015  
ISSN 0867-6631  
ISBN 978-83-7464-788-5

Skład komputerowy: Wydawnictwo JAK, [www.wydawnictwojak.pl](http://www.wydawnictwojak.pl)

---

Wydawnictwa AGH  
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
tel. 12 617 32 28, tel./fax 12 636 40 38  
e-mail: [redakcja@wydawnictwoagh.pl](mailto:redakcja@wydawnictwoagh.pl)  
<http://www.wydawnictwo.agh.edu.pl>

---



# Spis treści

Streszczenie.....	9
Summary.....	11
<b>1. Wprowadzenie.....</b>	<b>13</b>
<b>2. Rola procesów przeróbczych w produkcji kruszyw mineralnych a wymagania jakościowe kruszyw.....</b>	<b>17</b>
2.1. Procesy rozdrabniania.....	18
2.2. Procesy klasyfikacji.....	19
2.2.1. Klasyfikacja mechaniczna (przesiewanie).....	20
2.2.2. Klasyfikacja hydrauliczna.....	22
2.2.3. Klasyfikacja powietrzna.....	22
2.3. Procesy płukania.....	23
2.4. Procesy odwadniania.....	23
2.5. Procesy uszlachetniania.....	24
2.6. Wymagania jakościowe stawiane kruszywom.....	24
<b>3. Wskaźniki oceny efektywności procesów rozdrabniania i przesiewania.....</b>	<b>34</b>
3.1. Wskaźniki technologiczno-eksploatacyjne procesu rozdrabniania.....	34
3.1.1. Uziarnienie produktu, wychód klasy, zawartość ziarn nieforemnych.....	34
3.1.2. Stopień rozdrobnienia.....	35
3.1.3. Wydajność, sprawność urządzenia, żywotność elementów roboczych....	37
3.2. Wskaźniki technologiczno-eksploatacyjne procesu przesiewania.....	39
3.2.1. Skuteczność procesu przesiewania.....	39
3.2.2. Wydajność, obciążenie przesiewacza.....	40
3.2.3. Ziarno podziałowe, wskaźniki dokładności rozdziału.....	40
3.3. Sposoby oceny pracy maszyn w układach technologicznych.....	42
<b>4. Ogólna charakterystyka maszyn rozdrabniających i przesiewających stosowanych w instalacjach produkcji kruszyw łamanych.....</b>	<b>45</b>
4.1. Systematyka kruszarek.....	45
4.1.1. Kruszarki szczękowe.....	49
4.1.2. Kruszarki stożkowe.....	51
4.1.3. Kruszarki wirnikowe udarowe młotkowe i listwowe.....	54
4.1.4. Kruszarki walcowe.....	58
4.1.5. Wysokociśnieniowe prasy walcowe HPGR.....	59
4.2. Innowacyjne rozwiązania konstrukcyjno-eksploatacyjne kruszarek.....	61
4.3. Przesiewacze i ruszty współpracujące z kruszarkami.....	64

<b>5. Rodzaje i modele układów technologicznych wykorzystywanych do produkcji kruszyw łamanych</b> .....	71
5.1. Podstawowe rodzaje układów rozdrabniania i klasyfikacji .....	71
5.1.1. Układy otwarte .....	72
5.1.2. Układy zamknięte .....	73
5.1.3. Układy hybrydowe .....	74
5.1.4. Układy jedno- i wielostadialne .....	75
5.1.5. Układy równoległe, szeregowe i mieszane .....	77
5.1.6. Układy selektywne i nieselektywne .....	78
5.1.7. Układy pracujące na mokro lub na sucho .....	79
5.2. Prezentacja modeli układów technologicznych przeróbki kruszyw w zależności od uwarunkowań złożowych, eksploatacyjnych i produkcyjnych .....	81
5.2.1. Model wielostadialnego układu rozdrabniania i klasyfikacji dla zwięzłych surowców skalnych .....	83
5.2.2. Modele układów rozdrabniania i klasyfikacji dla surowców zwirowych i piaskowych .....	86
5.2.3. Model układu produkcji kruszyw z zanieczyszczonych surowców skalnych lub zwirowych .....	90
5.2.4. Modele układów produkcji kruszyw o ziarnach foremnych i nieforemnych.....	92
<b>6. Analiza wpływu rodzaju kruszarek, układów technologicznych oraz właściwości nadawy na efektywność procesu rozdrabniania i jakość kruszyw</b> .....	97
6.1. Ogólne zasady doboru kruszarek .....	97
6.2. Ocena wpływu wybranych parametrów technologicznych kruszarek oraz właściwości nadawy na efektywność procesu rozdrabniania .....	103
6.2.1. Ogólne relacje pomiędzy właściwościami skał a efektami rozdrabniania .....	103
6.2.2. Analiza rozkładu wielkości i kształtu uziarnienia kruszyw w zależności od rodzajów maszyn .....	109
6.2.3. Analiza energochłonności i wydajności maszyn w zależności od rodzajów maszyn .....	125
6.3. Analiza energochłonności produkcji kruszyw łamanych w instalacjach mobilnych i stacjonarnych .....	133
6.3.1. Uwarunkowania stosowania instalacji mobilnych i stacjonarnych do produkcji kruszyw .....	133
6.3.2. Porównanie pracy wybranych instalacji mobilnych i stacjonarnych pod względem efektywności energetycznej .....	136
6.3.2.1. Charakterystyka wybranych układów instalacji stosowanych do produkcji kruszyw .....	136
6.3.2.2. Analiza pracy wybranych układów instalacji mobilnych i stacjonarnych.....	142

6.4. Analiza wpływu różnych rodzajów układów na jakość produkowanych kruszyw łamanych .....	145
6.4.1. Metody obliczania zawrotu materiału .....	145
6.4.2. Analiza efektów rozdrabniania kruszyw w układzie zamkniętym i otwartym.....	151
6.4.3. Analiza efektów rozdrabniania kruszyw w układzie selektywnym i nieselektywnym.....	154
6.4.4. Ocena możliwości wykorzystania układów selektywnej przeróbki odpadów do produkcji kruszyw o polepszonej jakości.....	158
6.4.5. Analiza produkcji kruszyw w układzie z zamkniętym obiegiem selektywnego i posobnego procesu przesiewania i rozdrabniania .....	163
6.5. Ocena wpływu doboru kruszarek w różnych stadiach rozdrabniania na jakość kruszyw łamanych.....	167
6.6. Błędy popełniane w doborze maszyn oraz ich eksploatacji.....	171
6.6.1. Niewłaściwa nadawa i parametry pracy urządzeń .....	171
6.6.2. Nieodpowiednie zasilanie nadawą i odbiór produktu .....	181
6.6.3. Zużycie elementów roboczych kruszarek .....	186
6.6.4. Nieodpowiednia współpraca kruszarek na różnych stadiach rozdrabniania .....	188
<b>7. Modele matematyczne procesów rozdrabniania .....</b>	<b>193</b>
7.1. Ogólny macierzowy model procesów rozdrabniania .....	194
7.2. Statystyczne (stochastyczne) modele składu ziarnowego .....	199
7.3. Koncepcja modeli ekonometrycznych pracy kruszarek i układów rozdrabniania .....	205
7.4. Modele układów technologicznych produkcji kruszyw mineralnych.....	206
<b>8. Podsumowanie .....</b>	<b>214</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>220</b>



TOMASZ GAWENDA

**Zasady doboru kruszarek  
oraz układów technologicznych  
w produkcji kruszyw łamanych**

## **Streszczenie**

W monografii określono zasady doboru maszyn oraz układów technologicznych rozdrabniania i przesiewania stosowanych do produkcji kruszyw łamanych. Poprawny dobór maszyn rozdrabniających i układów technologicznych jest bardzo istotny przy optymalizacji produkcji kruszyw zarówno w nowo projektowanych zakładach przeróbki, jak i tych funkcjonujących. W tym celu przedstawiono charakterystykę procesów rozdrabniania opisywaną w literaturze oraz wiedzę opartą na indywidualnych doświadczeniach praktycznych i badawczych dla różnych rozwiązań układów technologicznych i poszczególnych maszyn stosowanych do produkcji kruszyw łamanych.

W pracy zwrócono uwagę na rolę procesów przerobczych w odniesieniu do wymagań jakościowych kruszyw. Omówiono sposoby oceny pracy urządzeń w układach za pomocą wyznaczania określonych wskaźników technologicznych umożliwiających ich poprawną weryfikację pod kątem uzyskiwanej jakości produktów, efektywności oddziaływania urządzeń na zmianę najważniejszych właściwości surowca, wydajności, zużycia energii lub elementów roboczych maszyn. Posłużono się dotychczas niestosowanym wskaźnikiem zużycia energii na tonę rozdrobnionego surowca przy jednokrotnym pomniejszeniu rozdrabnianej nadawy. Wskaźnik ten może być wykorzystany do porównywania i weryfikacji pracy układów technologicznych i maszyn produkujących nie tylko kruszywa mineralne, ale również układów rozdrabniania i klasyfikacji innych surowców mineralnych.

Scharakteryzowano także maszyny rozdrabniające i przesiewające, omówiono innowacyjne rozwiązania kruszarek oraz ich parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne wpływające na proces technologiczny i jakość kruszyw. Na przykładzie zaprezentowanych jedenastu rodzajów układów technologicznych pokazano możliwości konfiguracji różnych urządzeń zapewniających określony sposób prowadzenia procesu technologicznego (cykle technologiczne, odsiewanie, sterowanie strumieniami przepływu materiału), wpływających na uzyskiwanie produktów o pożądanym parametrach.

W dalszej części pracy scharakteryzowano modele układów technologicznych w zależności od uwarunkowań złożowych, eksploatacyjnych i produkcyjnych dla związanych surowców skalnych, surowców żwirowo-piaskowych, a także surowców zanieczyszczonych. Opracowano, niestosowany dotychczas, a zasługujący w opinii autora na szczególną uwagę, model uwarunkowany produkcją kruszyw o wysokiej zawartości ziarn foremnych, który może mieć istotne znaczenie zarówno w produkcji kruszyw naturalnych łamanych, jak i kruszyw pochodzących z recyklingu odpadów przemysłowych.

Omówiono modele matematyczne układów technologicznych produkcji kruszyw mineralnych. Pokazano podejście stochastyczne do opisu rezultatów procesów rozdrabniania w kruszarkach w zależności od zadanych parametrów pracy, bazując na cenzurowanym rozkładzie Weibulla. Stosowana aproksymacja wzorów do opisu pracy urządzeń (składów ziarnowych) okazuje się istotnym parametrem zaprezentowanego modelu ekonometrycznego pracy kruszarek i układów rozdrabniania. Wykorzystując charakterystykę parku maszynowego kruszarek oraz przesiewaczy producenta PSP Engineering, przedstawiono koncepcje czterech układów w postaci schematów ilościowo-jakościowych produkujących kruszywa łamane o uziarnieniu 0–16 mm i wydajności 230 Mg/h. Pierwszy to konwencjonalny układ trójstadialny, natomiast pozostałe trzy układy zostały opracowane na założeniach podobnych jak w pierwszym układzie, ale z zamkniętym obiegiem selektywnego i posobnego procesu przesiewania i rozdrabniania (według projektów wynalazczych autora). W zakończeniu pracy przedstawiono ogólne zasady i wskazania stosowania układów technologicznych w zależności od uwarunkowań złożowych i maszynowych.

TOMASZ GAWENDA

**Principles for selection of crushers  
and technological crushing circuits  
in crushed-stone aggregate production**

## **Summary**

The monograph discusses principles of selection of crushers and crushing and screening circuits applied in crushed-stone aggregate production. The proper selection of both the crushing devices and technological circuits is very important in terms of optimization of aggregate production in both newly designed processing plants and in already operating ones. Therefore, the characteristics of comminution processes described in the literature and knowledge, based on individual practical and research experience for various options of technological circuits and individual devices applied in production of crushed-stone aggregate, were presented in the monograph.

The monograph also highlights the role of processing procedures in relation to the aggregate quality requirements. The methods of assessment the devices work, operating in technological circuit, through determination of technological indicators enabling: the proper verification of technology in terms of the quality of products obtained; the efficiency of interaction of devices on change the most important properties of the material; the productivity; the wear of working parts of machines, were characterized.

A new, not applied up to date, index of the unit energy consumption at a single-stage reduction of the feed size, was used in calculations. This index can be used to compare and verify the operation of technological circuits and machines, producing not only mineral aggregates, but for circuits of crushing and classifying other mineral resources.

There were also characterized crushing and screening devices and innovative solutions for crushers and their construction and operating parameters influencing the process of production and the quality of aggregates. On the example of presented eleven types of technological circuits there were shown configurable functions, which guarantee a certain manner of technological process course (technological cycles, screening, control of material flow streams) and influence on obtaining products with the expected characteristics.

The further part of monograph characterizes models of technological circuits, depending on conditions of the deposit, conditions of exploitation and production of raw materials for concise raw materials, gravel and sand materials, as well as contaminated materials. It was also worked out a new model determined by the production of aggregates with high content of symmetrical particles, which can show a significant impact on the production of crushed-stone natural aggregates or aggregates from recycled industrial waste.

Mathematical models of technological circuits of mineral aggregate production were also analyzed in the monograph. An approach to stochastic description of crushing processes

depending on given values of parameters, by means on censored Weibul's distribution, was described. Suitable approximation formulas used in description of devices operation (in terms of particle size) turned out to be an important parameter of the presented econometric model of crushing and screening circuits operation.

Utilizing the machinery park of PSP Engineering manufacturer, ideas for the four circuits were shown in the form of quantitative and qualitative diagrams of stone-crushed aggregate production for particle size 0–16 mm and a capacity of 230 Mg/h. The first circuit is a conventional triple-stage one, while the other three circuits have been developed on similar assumptions as the first one, but with closed circuit of material and selective screening and crushing operations (according to the inventions of the author), showing the benefits of using of this concept. The summary presents general principles and instructions for applications of technological circuits, depending on the conditions of deposit and device characteristics.



# 1. Wprowadzenie

Obserwowany od 2004 roku intensywny rozwój przemysłu budowlanego i budownictwa drogowego spowodował duży popyt na kruszywa łamane produkowane z surowców skalnych o wysokiej jakości, m.in. do wytwarzania nawierzchni drogowych i produkcji betonów. Kruszywo w betonie stanowi prawie 80% udziału masowego, dlatego jego parametry decydują również o wytrzymałości konstrukcji betonu i trwałości, a nawet o ilości użytego cementu. Wymagania konstrukcyjne budynków, budownictwa technicznego i drogowego oraz wysokie koszty konstrukcji stalowych w porównaniu z żelbetowymi spowodowały wzrost zapotrzebowania na betony wysokiej jakości charakteryzujące się dobrą wytrzymałością i trwałością.

Struktura rodzajowa wydobycia kamieni budowlanych i drogowych wskazuje na wyraźną dominację skał magmowych. W asortymencie produkcji kruszyw naturalnych łamanych nastąpiło w ostatnich latach zwiększenie udziału kruszyw naturalnych łamanych granulowanych (grysów) do 50%. Resztę stanowią kruszywa naturalne łamane zwykłe (tłuczeń, kliniec). Ogółem ocenia się, że obecnie około 55% zużycia kruszyw naturalnych łamanych przypada na budownictwo drogowe, około 25% na budownictwo kolejowe, a niespełna 20% na budownictwo mieszkaniowe i przemysłowe. Wytwarzane w Polsce kruszywa żwirowo-piaskowe zużywane są niemal w całości w budownictwie do produkcji różnego rodzaju betonów i wyrobów betonowych, głównie w betoniarniach do produkcji betonu towarowego, w zakładach prefabrykatów i wyrobów betonowych, do produkcji suchych mieszanek i tzw. chemii budowlanej, a w coraz mniejszym stopniu przez odbiorców indywidualnych na placu budowy. Wyjątkiem w tej grupie kruszyw są piaski. W ich przypadku udział w produkcji betonów w łącznym zużyciu prawdopodobnie nie przekraczał 25%, a w roku 2011 wynosił tylko około 15% (Kozioł, Galos red. 2013; Kozioł, Machniak red. 2014a, b).

Produkcją kruszyw naturalnych łamanych ze złóż kamieni budowlanych i drogowych zajmuje się ponad 120 firm, z których ponad 20 to małe przedsiębiorstwa o produkcji do 100 tys. ton rocznie. Obecnie czynnych jest około 120 kopalń eksploatujących złoża kamieni budowlanych i drogowych na poziomie przekraczającym 100 tys. ton rocznie i ukierunkowanych na produkcję kruszyw naturalnych łamanych. Liczba żwirowni w kraju przekracza 1700, w czym około 15 zakładów osobno produkuje piaski i żwiru powyżej 1 mln ton na rok.

Według opracowanego przez Państwowy Instytut Geologiczny oraz Państwowy Instytut Badawczy *Bilansu zasobów złóż kopalin w Polsce* w 2013 roku wydobyto 58,36 mln ton kamieni łamanych i blocznych oraz 173,3 mln ton naturalnych piasków i żwirów (Szufficki i in. red. 2014).

W 2012 roku nastąpiło wyhamowanie silnego trendu spadkowego, a obecna wielkość wydobycia zbliżyła się do poziomu z lat 2009–2010.

W ramach realizacji projektu pt. *Strategie i scenariusze technologiczne zagospodarowania i wykorzystania złóż surowców skalnych* prowadzonego przez W. Kozioła i K. Galosa (2013) opracowano m.in. różne scenariusze zapotrzebowania na kruszywo naturalne w Polsce i w poszczególnych jej regionach. W scenariuszu umiarkowanego rozwoju gospodarczego kraju prognozuje się, że zużycie kruszyw w latach 2015–2020 utrzyma się mniej więcej na podobnym poziomie i w 2020 roku zużycie kruszyw żwirowo-piaskowych (bez piasków na podbudowy) wyniesie 65,4 mln ton, kruszyw łamanych 50,2 mln ton, a więc łącznie kruszyw naturalnych 115,6 mln ton. W scenariuszu dynamicznego rozwoju gospodarczego kraju prognozuje się, że w 2020 roku zużycie kruszyw żwirowo-piaskowych wyniesie 70,3 mln ton, kruszyw łamanych 77,1 mln ton, łącznie kruszyw naturalnych 147,4 mln ton. Prognozy popytu na kruszywa naturalne (bez piasków na podbudowy) odniesiono do prognoz zapotrzebowania na nie ze strony przemysłu betonów oraz w nawiązaniu do planowanych prac w zakresie budownictwa drogowego i kolejowego (kruszywa łamane). Ilość piasków niezbędnych do podbudowy dróg oraz innych prac inżynierskich szacuje się na poziomie przekraczającym 60 mln ton rocznie.

W 2011 roku odnotowano największe zapotrzebowanie na kruszywa łamane na poziomie około 93 mln ton oraz na żwirowo-piaskowe około 237 mln ton. Przy założeniu, że część kruszyw żwirowych również uległa rozdrobnieniu, można przyjąć, że w 2011 roku tylko sam proces rozdrabniania około 140 mln ton surowca w kruszarkach pochłonął energię w ilości około 350 mln kWh, co daje koszt około 126 mln zł. Patrząc globalnie, można obliczyć, że przy takim przerobie obniżenie zużycia energii w kruszarkach o jedną kilowatogodzinę na tonę przerobionego kruszywa obniżyłoby koszty o ok. 50 mln zł w skali kraju, dlatego tak ważne są doskonalenie rozwiązań konstrukcyjnych kruszarek oraz kontrola i modernizacja układów technologicznych, które w efekcie przyczynią się także do obniżenia emisji dwutlenku węgla i zużycia elementów roboczych maszyn.

Poprawny dobór maszyn rozdrabniających i układów technologicznych jest bardzo istotny przy optymalizacji produkcji kruszyw zarówno w nowo projektowanych zakładach przeróbki, jak i tych funkcjonujących. Kruszarki oraz układy technologiczne powinny być dobierane według podstawowych zasad opisywanych w literaturze oraz uwzględniać wiedzę opartą na doświadczeniach praktycznych i badawczych dla indywidualnych rozwiązań. Przykładowo, bardzo przydatna jest znajomość relacji pomiędzy kruszarkami pracującymi na wstępnych, wtórnych i końcowych stadiach rozdrabniania przy uwzględnieniu uwarunkowań nadawy i efektów końcowych procesu. Znajomość takich zasad pozwala na uzyskiwanie kruszyw o wysokiej jakości (np. wysokim wskaźniku kubiczności, pożądanym rozkładzie uziarnienia, niskiej zawartości pyłów, wysokiej odporności na rozdrabnianie LA) oraz obniżyć zużycie elementów roboczych maszyn i energii.

Celem niniejszej monografii jest określenie zasad doboru układów technologicznych rozdrabniania i przesiewania oraz maszyn produkujących kruszywa łamane. Praca składa się z wprowadzenia, sześciu rozdziałów głównych i podsumowania.

W rozdziale drugim omówiono rolę procesów przerobczych w produkcji kruszyw mineralnych oraz wymagania jakościowe kruszyw. Do analizy i oceny efektywności procesów

rozdrabniania i przesiewania użyto wskaźników technologicznych, które zostały omówione w rozdziale trzecim. Dzięki wyznaczeniu wskaźników pracy układów technologicznych istnieje możliwość oceny poprawności i zasadności działania maszyn w węzłach technologicznych przeróbki kruszyw mineralnych. Takie informacje wykorzystywane są także przy projektowaniu instalacji lub eksploatacji maszyn. W pracy posłużono się dotychczas niestosowanym wskaźnikiem ( $W_j$  [MJ/Mg] lub [kWh/Mg]) zużycia energii na tonę rozdrobnionego surowca przy jednokrotnym pomniejszeniu uziarnienia rozdrabnianej nadawy. Wskaźnik ten może być wykorzystany do porównywania i oceny poprawności pracy układów technologicznych i maszyn produkujących nie tylko kruszywa mineralne, ale również układów rozdrabniania i klasyfikacji innych surowców mineralnych.

Wybór urządzeń do odpowiednich układów technologicznych dyktowany jest wiedzą i rozwojem technologii maszyn oraz procesów przerobczych kruszyw (rozdrabniania, klasyfikacji czy uszlachetnienia), chociaż jest ograniczony właściwościami fizyczno-mechanicznymi nadawy oraz wymaganiami jakościowymi produkowanych kruszyw. W rozdziale czwartym scharakteryzowano maszyny rozdrabniające i przesiewające, omówiono innowacyjne rozwiązania kruszarek oraz ich parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne wpływające na proces technologiczny i jakość kruszyw.

Procesy przeróbki surowców zachodzą w maszynach i urządzeniach zainstalowanych w różnych układach technologicznych tworzących instalację zakładu przeróbki mechanicznej kruszyw. Sposób prowadzenia procesu technologicznego, a więc liczba stadiów rozdrabniania, cykle technologiczne, odsiewanie i sterowanie strumieniami przepływu materiału do wybranych maszyn, wpływają na uzyskiwanie produktów o pożądanych parametrach. Budowa układów technologicznych przeróbki mechanicznej, podobnie jak budowa maszyn, jest uzależniona nie tylko od uwarunkowań produkcyjnych kruszyw, ale także od uwarunkowań geologicznych złóż surowców skalnych.

Forma występowania złóż surowców determinuje zróżnicowanie rodzajów układów technologicznych przeróbki kruszyw dla kopalń odkrywkowych (kamieniołomów) oraz żwirowo-piaskowych. Również stopień zaawansowania technologii uwzględnia rodzaj litologiczny surowca i jego właściwości fizyczno-mechaniczne, które są w szczególności charakterystyczne wielkością uziarnienia urobku (ziarno charakterystyczne maksymalne lub średnie, punkt piaskowy itp.), zwięzłością, urabialnością i twardością, stopniem zanieczyszczenia surowca i rodzajem zanieczyszczeń. Tym zagadnieniom poświęcono uwagę w rozdziale piątym, w którym omówiono podstawowe rodzaje układów rozdrabniania i klasyfikacji oraz dokonano prezentacji modeli układów technologicznych w zależności od uwarunkowań złożowych, eksploatacyjnych i produkcyjnych dla zwięzłych surowców skalnych, surowców żwirowo-piaskowych, a także surowców zanieczyszczonych. Na szczególną uwagę zasługuje model uwarunkowany produkcją kruszyw o wysokiej zawartości ziarn foremnych, który może mieć duże znaczenie zarówno w produkcji kruszyw naturalnych łamanych, jak i kruszyw pochodzących z recyklingu odpadów przemysłowych. Dzięki nowemu rozwiązaniu modelowego układu istnieje możliwość produkcji kruszyw łamanych o wysokich parametrach jakościowych przy minimalizacji kosztów eksploatacyjnych i maszynowych, a więc przy mniejszej liczbie stadiów rozdrabniania. Wstępne badania omówione w rozdziale szóstym wykazały zdecydowane zalety modelu – efektywniejszą produkcję kruszyw w układzie z zamkniętym

obiegami selektywnego procesu posobnego przesiewania i rozdrabniania bez konieczności zwiększania liczby stadiów rozdrabniania, w wyniku których możliwe jest uzyskanie co najmniej 98% ziarn foremnych w produktach końcowych oraz zminimalizowanie ilości ziarn nadmiernie przekruszonych i powstających pyłów.

Omówione w rozdziale trzecim sposoby i wskaźniki oceny pracy maszyn w układach technologicznych, w rozdziale szóstym posłużyły do analiz wpływu rodzajów kruszarek i ich parametrów technologicznych, układów technologicznych oraz właściwości nadawy na efektywność procesu rozdrabniania, mierzoną m.in. zużyciem energetycznym oraz parametrami jakościowymi produktów (np. kubeczność ziarn, odporność na rozdrabnianie LA, podatność na rozdrabnianie w młynku kulowym Bonda, zawartość pyłów <1 mm). Zwrócono także uwagę na błędy popełniane w doborze maszyn, jakie występowały w zakładach przeróbki kruszyw łamanych oraz na konsekwencje ponoszone w wyniku niewłaściwej eksploatacji maszyn.

W rozdziale siódmym omówiono modele matematyczne procesów rozdrabniania oraz przedstawiono układy technologiczne produkcji kruszyw łamanych. Bazując na cenzurowanym rozkładzie Weibulla, przedstawiono podejście stochastyczne do opisywania efektów procesów rozdrabniania w kruszarkach w zależności od zadanych parametrów pracy (szczelina wylotowa, liczba obrotów wirnika). Metoda opisu pracy urządzeń oparta na aproksymacji wzorów, umożliwiającą przewidywanie składów ziarnowych produktów rozdrabniania, stała się istotnym elementem przedstawionego modelu ekonometrycznego pracy kruszarek i układów rozdrabniania.

Przedstawiono także w postaci schematów jakościowo-ilościowych koncepcje czterech układów produkujących kruszywa łamane o uziarnieniu 0–16 mm i wydajności 230 Mg/h. Do tego celu wykorzystano charakterystykę parku maszynowego kruszarek oraz przesiewaczy producenta PSP Engineering. Pierwszym (bazowym) z opisanych układów jest konwencjonalny układ trójstadiowy, na podstawie którego opracowano kolejne trzy niekonwencjonalne układy z zamkniętym obiegiem selektywnego i posobnego procesu przesiewania i rozdrabniania (według projektów wynalazczych opartych na koncepcji autora). Porównanie ze sobą czterech układów wykazało korzyści z układów niekonwencjonalnych wynikające z oszczędności zużycia energii i elementów roboczych maszyn.

## **2. Rola procesów przeróbczych w produkcji kruszyw mineralnych a wymagania jakościowe kruszyw**

Urobek otrzymany w procesach wydobycia górniczego stanowi mieszaninę ziarn od najdrobniejszych do bloków skalnych o średnicy nawet powyżej 1 m. Wydobyte kruszywo naturalne żwirowo-piaskowe zazwyczaj zanieczyszczone jest gliną i iłem. Zawiera spore ilości frakcji drobnej (piaskowej), frakcję powyżej 63 mm oraz nadmierną ilość ziarn o nieodpowiedniej wytrzymałości i kształcie. Surowiec skalny pozyskiwany z wyrobiska metodami górnicznymi i przeznaczony do produkcji kruszyw naturalnych łamanych nie zawiera frakcji drobnych, a udział frakcji do 63 mm jest znikomy. Urobek ziarnowy stanowią grube odłamy skalne, a jeżeli występuje w nim frakcja drobna, to na ogół jest to materiał zwietrzały, zanieczyszczony gliną, nadkładem itp. Aby wydobyty lub urobiony materiał spełniał warunki stawiane kruszywom budowlanym, tj. piaskom, żwirom i kruszywom łamanym, musi być odpowiednio przerobiony. Przeróbka kruszyw polega przede wszystkim na:

- rozdrabnianiu jedno- lub wielostadialnym w celu otrzymania ziarn o wymiarach spełniających warunki odbiorców,
- przesiewaniu na różnego rodzaju przesiewaczach, co ma doprowadzić do podzielenia rozdrobnionego materiału na poszczególne frakcje (klasy ziarnowe) oraz jednocześnie przynajmniej do częściowego uszlachetnienia kruszywa przez wydzielenie zanieczyszczeń gliniastych, ilastych itp.,
- płukaniu w różnego rodzaju płuczkach, co ma na celu rozmycie i odprowadzenie z kruszywa pozostałej części gliny, pyłów itp.

Poza tymi trzema podstawowymi procesami technologicznymi, występującymi w przeróbce kruszyw, są też inne, których celem jest podwyższenie jakości produkowanego kruszywa. Procesy te obejmują:

- hydroklasyfikację kruszyw drobnych,
- odwadnianie,
- uszlachetnianie kruszyw grubych różnymi metodami i w różnego rodzaju urządzeniach.

Hydroklasyfikacja kruszyw drobnych ma na celu rozdzielanie ich na żądane frakcje oraz usunięcie frakcji pyłowych i gliny. Odwadnia się przede wszystkim kruszywa drobne, m.in.

w celu ich łatwiejszego transportowania. Uszlachetnianie stosuje się najczęściej dla kruszyw grubych (żwirów, kruszyw łamanych). Polega ono na usuwaniu grudek gliny oraz ziarn o nieodpowiedniej wytrzymałości (ziarn słabych i zwietrzałych), a także na poprawianiu kształtu poszczególnych ziarn (eliminacja ziarn nieforemnych – płaskich, wydłużonych).

## 2.1. Procesy rozdrabniania

Rozdrabnianie obejmuje grupę procesów, w wyniku których następuje rozpad ziarn rozdrabnianego materiału pod wpływem działań mechanicznych. W zdecydowanej większości przypadków rozdrabnianie ziarn uzyskuje się w wyniku wywołania odkształceń, którym towarzyszą naprężenia przekraczające naprężenia krytyczne dla danego ciała (Zawada 1988). Obok zmniejszenia wymiarów ziarn proces rozdrabniania powoduje zwiększenie powierzchni właściwej rozdrabnianego materiału, zmianę kształtu ziarn, wzrost liczby ziarn, pewne zmiany strukturalne, a niekiedy zmianę właściwości mechanicznych, w tym podatności na rozdrabnianie.

Rozdrabnianie dzieli się na kruszenie i mielenie, których celem jest doprowadzenie surowców mineralnych do odpowiedniego uziarnienia. Proces ten jest złożony i zależy od wielu czynników, m.in. od rozmiaru i formy rozdrabnianych ziarn, trajektorii i prędkości przemieszczania się ziarn oraz ich wzajemnego ułożenia w komorze roboczej maszyny, parametrów technologicznych urządzeń, fizyczno-mechanicznych i chemicznych właściwości materiału itp.

Procesy rozdrabniania mechanicznego odznaczają się olbrzymią energochłonnością, dlatego w tym kierunku są prowadzone intensywne badania nad nowoczesnymi rozwiązaniami konstrukcyjnych maszyn oraz układami technologicznymi rozdrabniania i klasyfikacji.

Procesy rozdrabniania znajdują szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przetwórstwa rozmaitych surowców, nastawionych na uzyskanie gotowego produktu, np. kruszyw mineralnych o odpowiednim uziarnieniu (operacja główna), bądź doprowadzenie materiału do stanu pozwalającego na uwolnienie wpryśnięcia składnika użytecznego od skały płonnej (operacja przygotowawcza do procesu wzbogacania) (Blaschke i in. 1983; Drzymała, Kurek 1985; Drzymała 2001). Procesy rozdrabniania wykorzystuje się również w celu uszlachetniania kruszyw mineralnych. Takie postępowanie polega na poddawaniu określonych klas ziarnowych kruszyw odpowiednio przygotowanemu i uregulowanemu rozdrabnianiu, w czasie którego zostają rozdrobnione ziarna mające defekty naturalne lub powstałe w momencie urabiania. Rozdrabnianie uszlachetniające kruszyw prowadzone jest także w celu zwiększenia udziału ziarn przekruszonych z owalnych ziarn żwiru i zwiększenia ich powierzchni właściwej lub w celu uszlachetniania związanego z usunięciem zanieczyszczeń ilastych pod wpływem udaru (Mazela 1988; Gawenda 2010a, b, c). Interesujące zjawisko oczyszczania surowców zaobserwowano na przykładzie rozdrabniania węgla kamiennych różnymi kruszarkami w badaniach dotyczących przygotowania węgla kamiennego do procesu zgazowania na drodze przeróbki mechanicznej (Dzik i in. 2014; Gawenda i in. 2014). Okazało się, że spośród wybranych kruszarek walcowych, szczękowych, wirnikowych nożowych oraz udarowych listwowych i młotkowych tylko kruszarki udarowe spełniały funkcję wzbogacania węgla podczas kruszenia. Analizy rozkładu zawartości popiołu wykazały, że najwięcej zanieczyszczeń gromadziło się w najdrobniejszych klasach produktów rozdrabniania, natomiast produkty uzyskane w pozostałych kruszarkach, charakteryzowały się równomiernym rozkładem popiołu w poszczególnych klasach ziarnowych.

Procesy mielenia mają na celu przeprowadzenie materiału drobnoziarnistego lub średnioziarnistego w produkt miałki (potocznie nazywany mączką, pyłem, pudrem) (Pahl 1993). Znacznie różnią się one od procesów kruszenia pod względem maszyn wykorzystywanych do produkcji kruszyw łamanych.

Do najważniejszych cech charakterystycznych procesu mielenia zalicza się:

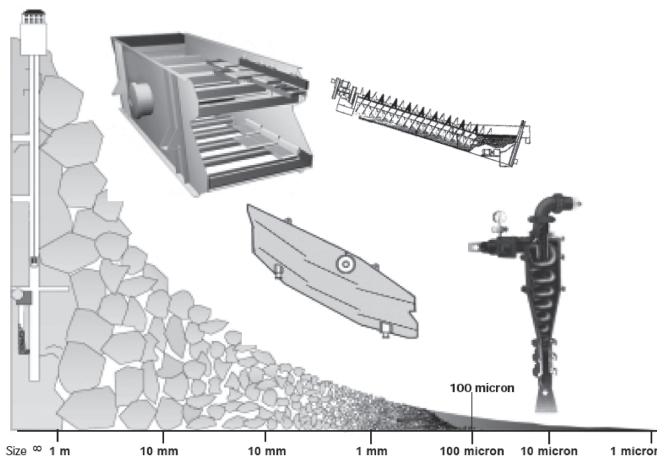
- produkowanie znacznie większej ilości najdrobniejszych klas ziarnowych,
- znacznie większe zużycie energii na jednostkę masową przerabianego surowca (niższa niż w innych procesach rozdrabniania sprawność technologiczna),
- wyższy stopień rozdrabniania niż procesach kruszenia,
- duży udział w większości tych procesów działania ścierającego,
- duże zużycie elementów roboczych na jednostkę przerobu,
- większe niż w innych procesach prawdopodobieństwo wytworzenia pewnej ilości podziarna (klasy ziarnowej drobniejszej od przyjętej dolnej granicy uziarnienia).

## 2.2. Procesy klasyfikacji

Celem procesu klasyfikacji ziarnowej jest wyodrębnienie z danego materiału klasy ziarnowej o założonych granicach wielkości ich rozmiarów lub gęstości. W przeróbce kruszyw mineralnych tego rodzaju procesy są realizowane przez klasyfikację:

- mechaniczną, czyli przesiewanie (ruszty, przesiewacze),
- hydrauliczną (klasyfikatory spiralne, hydrocyklony, wirówki, także osadzarki),
- powietrzną, nazywaną również pneumatyczną (cyklony powietrzne).

Rysunek 2.1 przedstawia zakres stosowania wybranych klasyfikatorów mechanicznych oraz hydraulicznych zależnie od wielkości klasyfikowanych ziarn.



**Rys. 2.1.** Zakres stosowania wybranych klasyfikatorów mechanicznych oraz hydraulicznych (Metso Minerals)



### 2.2.1. Klasyfikacja mechaniczna (przesiewanie)

Podstawą realizacji przesiewania jest doprowadzenie wszystkich ziarn przesiewanego kruszywa do kontaktu z powierzchnią stałą z otworami o określonym kształcie i wielkościach zależnych od obranej wartości granicy klasy, jaką zamierza się wydzielić z materiału.

Powierzchnię taką nazywa się powierzchnią sitową, a technicznie określa się jako sito lub ruszt. Ziarna o wielkościach mniejszych od wielkości otworów sita przechodzą przez nie, a ziarna większe pozostają na sicie.

Zadania szczegółowe procesu przesiewania w konkretnych układach technologicznych przeróbki mogą być bardzo różnorodne. Według autorów różnych prac (Blaschke 1981; Banaszewski 1990; Sztaba 1993; Wodziński 1997) proces ten może występować jako:

- operacja przygotowawcza, w wyniku której nie otrzymuje się jeszcze efektu końcowego założonego dla całego układu procesów, jakim poddaje się dany materiał, ale która warunkuje bądź ułatwia przeprowadzenie kolejnych operacji technologicznych (wydzielenie klas ziarnowych do dokruszania w kubizerach lub do wzbogacania grawitacyjnego, oddzielenie na mokro ziarn najdrobniejszych na sitach w procesie odmulania materiału),
- operacja główna, której wynik decyduje bezpośrednio o osiągnięciu końcowego celu realizacji procesów przeróbczych,
- operacja uzupełniająca, której celem jest nadanie ostatecznej postaci lub dodatkowych dogodnych właściwości produktom operacji głównej przed przekazaniem ich odbiorcom (odsiewanie mialu i ziarn nieforemnych, zwietrzałych w przemyśle kruszyw).

Przesiewanie materiałów ziarnistych stwarza w warunkach przemysłowych dużo problemów. Kluczowe pozycje literatury poświęcone branży przeróbki surowców mineralnych (Banaszewski 1990; Sztaba 1993; Wodziński 1997) ukazują problematykę przesiewania surowców mineralnych.

Proces technologiczny klasyfikacji mechanicznej w przesiewaczach uzależniony jest od trzech podstawowych charakterystycznych czynników:

- 1) parametrów technicznych przesiewacza,
- 2) właściwości fizyczno-mechanicznych przesiewanych surowców,
- 3) sposobu prowadzenia procesu przesiewania.

Wymienione czynniki wpływają na siebie, decydując o jakości oraz wydajności procesu przesiewania, dlatego istotne jest, aby przy projektowaniu lub modernizacji układu przesiewania, a także właściwym sterowaniu procesem przesiewania, poznać i uwzględnić wszystkie czynniki mające związek z przesiewaniem (tab. 2.1).

W procesach przesiewania mających charakter operacji głównej, której celem jest rozdział materiału na różne klasy ziarnowe, w górnictwie skalnym najczęściej stosowane są przesiewacze wibracyjne nadrezonansowe o trajektoriach drgań: prostoliniowej, kołowej i eliptycznej. Te ostatnie charakteryzują się stosunkowo niską zabudową.



**Tabela 2.1**

Charakterystyka wielkości determinujących proces przesiewania

Wielkości wejściowe regulujące	Wielkości zakłócające	Wielkości wyjściowe
<ul style="list-style-type: none"> <li>– grubość warstwy materiału na sicie (obciążenie przesiewacza),</li> <li>– rozmiar i kształt oczek sita,</li> <li>– natężenie przepływu wody natryskowej,</li> <li>– kąt nachylenia sita,</li> <li>– amplituda i częstość drgań,</li> <li>– wskaźnik podrzutu sita</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– skład ziarnowy nadawy,</li> <li>– zawartość domieszek ilastych,</li> <li>– wilgotność nadawy,</li> <li>– kształt ziarn,</li> <li>– twardość surowca,</li> <li>– stan techniczny przesiewacza i sita,</li> <li>– współczynnik prześwitu sita,</li> <li>– rodzaj powierzchni sitowej</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zawartość nadziarna i podziarna,</li> <li>– wydajność przesiewania,</li> <li>– wychód produktu górnego i dolnego,</li> <li>– skuteczność przesiewania,</li> <li>– sprawność przesiewacza</li> </ul>

Przesiewacze wykorzystywane w procesach produkcji kruszyw płukanych, jako finalnych sortymentów handlowych, zaopatrzone są w specjalne dysze natryskowe, które odpowiednio kształtują strumień wypływającej wody. Ciśnienie wody wynosi zwykle 0,2–0,3 Pa. Utrzymywanie odpowiedniego stałego ciśnienia w natryskiwach oraz ich prawidłowe rozmieszczenie nad pokładem sitowym decyduje o stopniu oczyszczenia kruszyw z zanieczyszczeń (Naziemiec, Gawenda 2007b). Do procesów płukania najczęściej stosowane są sita poliuretanowe, charakteryzujące się dużą trwałością, a do odwadniania – sita szczelinowe poliuretanowe bądź metalowe.

Do przesiewania materiałów drobno uziarnionych stosuje się przesiewacze o odmiennej konstrukcji. Najczęściej są to przesiewacze z oddzielnym wzbudzeniem sit, a także przesiewacze swobodnie drgające i zataczające. Duże znaczenie ma zagadnienie czyszczenia pokładu sitowego, które może być realizowane przez przepływ powietrza, stosowanie elementów sprężystych uderzających w powierzchnię sita czy stosowanie okresowych impulsów czyszczących wytwarzanych przez wibratory.

Ostatnio zespół pod kierownictwem P. Wodzińskiego w Politechnice Łódzkiej oraz w Uniwersytecie Technologiczno-Przyrodniczym w Bydgoszczy zajmował się procesem przesiewania materiałów drobno uziarnionych w przesiewaczu o ruchu zataczającym napędzanym dwoma motowibratorami rotacyjnymi. Liczne badania potwierdzają wysoką sprawność takich przesiewaczy dla klasyfikacji produktów rozdrabniania poniżej 1 mm (Wodziński 1988; Poćwiardowski, Wodziński 2011; Poćwiardowski i in. 2012, Gawenda, Saramak 2014).

Na uwagę zasługują mobilne i semimobilne zestawy przesiewające stosowane w recyklingu odpadów. Przeważnie stosowane są tam przesiewacze o dużym kącie nachylenia pokładu sitowego, z sitami szczelinowymi (strunowymi) lub sitami harfowymi.

Do przesiewania wstępnego stosuje się ruszty stałe, przesiewacze z rusztami obrotowymi, przesiewacze wibracyjne z pokładami rusztowymi kaskadowymi (Wodziński 2008). W procesie wstępnego przesiewania mamy zwykle do czynienia z trudnymi warunkami przesiewu z uwagi na duże bryły nadawy i zanieczyszczenia występujące w urobku. Zadaniem operacji

wstępnego przesiewania jest oddzielenie zanieczyszczeń gliniasto-ilastych od kamienia. Często stosowany jest tutaj podział strugi urobku na nitkę „czystą” i „brudną”, które następnie przerabiane są w oddzielnych liniach technologicznych.

### **2.2.2. Klasyfikacja hydrauliczna**

Klasyfikacja hydrauliczna jest procesem rozdziału ziarn mineralnych według wartości ich rozmiaru i gęstości wykorzystującym różnice w prędkościach opadania tych ziarn w ośrodku płynnym.

Klasyfikacja hydrauliczna w procesach technologicznych może stanowić operację przygotowawczą, główną lub uzupełniającą:

- operacja przygotowawcza polega na wydzieleniu z produktu miałkiego (drobnego) ziarn grubych i ponownym skierowaniu go do mielenia,
- operacja główna polega na otrzymywaniu konkretnych klas ziarnowych lub gotowych produktów, np. przy produkcji rozmaitych piasków dla konkretnych zastosowań; także na uszlachetnianiu kruszyw przez wydzielenie zanieczyszczeń gliniastych i ilastych,
- operacja uzupełniająca jest stosowana wówczas, jeśli istnieje konieczność stopniowego wydzielania ziarn odpowiednio rozdrobnionych (Blaschke i in. 1983).

Klasyfikacja bardzo drobnego kruszywa według wielkości rozmiaru ziarn nie może się odbywać za pomocą przesiewaczy, ponieważ następuje szybkie zapychanie się otworów sit i spada skuteczność oraz wydajność procesu. Wówczas stosuje się klasyfikatory hydrauliczne, które najczęściej pracują przy ziarnie podziałowym 50–100  $\mu\text{m}$ , przy czym w najnowszych rozwiązaniach hydrocyklonów wielkości ziarna podziałowego sięgają do 7 mm, a w klasyfikatorach hydraulicznych mechanicznych do 30 mm. Maksymalna wielkość ziarn nadawy w klasyfikatorach hydraulicznych nie może przekraczać 10 mm, a w klasyfikatorach mechanicznych około kilkudziesięciu milimetrów. W przypadku ziarn bardzo drobnych (o niewielkich masach) rozdział staje się bardzo trudny, gdyż prędkość przemieszczania się ich względem ośrodka jest bardzo mała. Rozdział taki można łatwiej zrealizować w polu działania siły odśrodkowej (rys. 2.1).

Do klasyfikacji piasków stosuje się wodę, w której ziarna sedymentują z różnymi prędkościami. Prędkość sedymentacji fazy stałej jest najważniejszym składnikiem wzorów stosowanych przy obliczaniu klasyfikatorów. Prawidłowe określenie prędkości sedymentacji zawiesin ma duże znaczenie dla wyników procesu rozdziału (Gawenda 2009a).

### **2.2.3. Klasyfikacja powietrzna**

Klasyfikacja powietrzna jest procesem rozdziału ziarn, który przebiega w ośrodku gazowym (najczęściej powietrzu). Klasyfikatory powietrzne mają w przeróbce kruszyw mineralnych znaczne zastosowanie w produkcji na sucho materiałów drobnodziarnistych. Wadą tych urządzeń jest mała skuteczność wynosząca około 40–70%, dlatego w celu poprawy jakości produktów stosuje się metody wielostopniowej klasyfikacji, gdzie sprawność sięga 99%. Klasyfikatory najczęściej stosuje się do oddzielania gotowych produktów (pyłu) od materiału grubo uziarnionego w zawrocie technologicznym układu rozdrabniania i klasyfikacji lub do

uzyskiwania gotowych produktów o określonych klasach ziarnowych. Klasyfikacja pneumatyczna najczęściej stosowana jest w produkcji materiałów wysokiej jakości, np. drobnych i ultradrobnych sorbentów lub wypełniaczy dla materiałów budowlanych.

### 2.3. Procesy płukania

Kruszywa naturalne zwirowe oraz skały zwięzłe, przerabiane na kruszywa naturalne łamane, bardzo często zawierają znaczne ilości zanieczyszczeń gliniasto-ilastych. Zanieczyszczenia te muszą być usunięte w procesie produkcji, gdyż mają niekorzystny wpływ na jakość kruszyw, a ponadto utrudniają procesy kruszenia i przesiewania. Problemem są również zanieczyszczenia występujące w kruszywach z recyklingu, które czasami mogą wymagać – poza płukaniem – stosowania innych metod wzbogacania.

Kruszywa zwirowe, zwykle eksploatowane spod wody, poddawane są procesowi przesiewania na przesiewaczach zaopatrzonych w instalacje natryskowe. Zanieczyszczenia występujące w postaci grudek gliny są trudne do usunięcia w procesie płukania na przesiewaczach. W tym celu stosuje się różne urządzenia płuczące, umożliwiające skuteczne usunięcie niepożądanych grudek gliny i zanieczyszczeń występujących w formie oblepień na ziarnach kruszywa.

W praktyce najszersze zastosowanie znalazły płuczki, w których oddzielanie zanieczyszczeń oparte jest na intensywnym mieszaniu surowca w środowisku wodnym. Efektywność procesu płukania zależy m.in. od takich czynników, jak (Kobiałka, Naziemiec 2006; Naziemiec, Gawenda 2007b; Naziemiec 2009b; Naziemiec i in. 2010a, b):

- właściwości fizyczno-chemiczne zanieczyszczeń gliniasto-ilastych (podatność na rozmywanie, zawartość frakcji ilowej itp.),
- ilość wody doprowadzonej do płukania, jej ciśnienie i temperatura,
- przygotowanie materiału przed płukaniem (czas rozmakania),
- kształt i uziarnienie płukanego materiału.

### 2.4. Procesy odwadniania

Płukanie kruszyw mineralnych, które musi być prowadzone w obiegu wodno-mułowym zamkniętym, wykorzystuje procesy odwadniania w różnego rodzaju urządzeniach odwadniających, dzięki którym woda może być zwracana do obiegu.

Owadnianie jest to proces rozdziału fazy stałej od ciekłej i może przebiegać w następujących warunkach (Dietrych i in. 1976; Naziemiec, Gawenda 2007b; Naziemiec 2009b):

- w polu sił grawitacyjnych (przenośniki kubełkowe, sita stałe, zbiorniki obciekowe, klasyfikatory zwojowe, stawy osadowe, osadniki cykliczne i odstojniki),
- w ośrodku drgającym (przesiewacze wibracyjne),
- w polu sił odśrodkowych (sita łukowe, OSO, przesiewacze krzywoliniowe, wirówki sitowe i bezsitowe, hydrocyklony),
- pod działaniem różnicy ciśnień (filtry próżniowe, ciśnieniowe i prasy filtracyjne).

Wybór określonych urządzeń podyktowany jest wielkością uziarnienia produktów odwadnianych. Przyjmuje się, że dla ziarn grubszych (umownie  $>0,5$  mm) stosuje się odwadnianie w polu sił grawitacyjnych i w ośrodku drgającym, natomiast dla ziarn bardzo drobnych ( $<0,5$  mm) odwadnianie w polu sił odśrodkowych i pod działaniem różnicy ciśnień.

## 2.5. Procesy uszlachetniania

Celem uszlachetniania kruszyw mineralnych jest podniesienie ich cech jakościowych do wymaganych przez określone normy. Proces ten ma szczególne znaczenie zwłaszcza dla kruszyw żwirowych i łamanych ze skał węglanowych, które mogą być nieodpowiedniej jakości z uwagi na dużą niejednorodność pod względem wytrzymałości, zawartości zanieczyszczeń i kształtu ziarn. Do osiągnięcia tego celu stosuje się różne metody uszlachetniania, które dzielą się na następujące grupy (Grzelak 1973, 1975):

- uszlachetnianie na podstawie wykorzystania różnic w gęstościach pozornych ziarn wadliwych (zwietrzałych) i prawidłowych;
- uszlachetnianie na podstawie wykorzystania różnic właściwości wytrzymałościowych poszczególnych ziarn;
- uszlachetnianie na podstawie wykorzystania różnic we współczynnikach sprężystości i tarcia poszczególnych ziarn;
- uszlachetnianie na podstawie wykorzystania różnic w kształcie ziarn, według innowacyjnej metody polegającej na selektywnym odsiewaniu i ponownym rozdrabnianiu ziarn płaskich wydzielonych w wąskich klasach ziarnowych w przesiewaczach ustawionych ze sobą posobnie w układzie zamkniętym z kruszarką (Gawenda 2014a, b).

Najbardziej rozpowszechnione w przeróbce kruszyw są dwie pierwsze metody, które są zazwyczaj powiązane z procesami rozdrabniania, klasyfikacji i płukania. Dlatego często mówi się, że procesy uszlachetniania występują jednocześnie, np. w kruszarkach udarowych (oczyszczanie z surowców ilastych i organicznych) (Mazela 1988), klasyfikatorach hydraulicznych i osadarkach (usuwanie ziarn zwietrzałych o mniejszych gęstościach czy różnych prędkościach opadania) (Osoba 2007). Dotyczy to zwłaszcza kruszyw żwirowych, szczególnie pochodzenia polodowcowego, mających w ziarnach otoczkę ilastą, która w procesie płukania i dokruszania zostaje usunięta.

## 2.6. Wymagania jakościowe stawiane kruszywom

W budownictwie komunalnym i technicznym wszelkiego rodzaju kruszywa wykorzystuje się do produkcji betonów, zapraw murarskich, tynkarskich itp. Budownictwo drogowe natomiast zużywa kruszywa na podbudowy dróg oraz do wykonywania warstw nośnych i ściernych w konstrukcji nawierzchni drogowej. Najważniejszymi surowcami kamiennymi w drogownictwie i kolejnictwie są kruszywa łamane (tłuczeń, kliniec, grysy), produkowane z bazaltów, melafirów, diabazów, porfirów, granitów, gabra, amfibolitów,

gnejsów, serpentynitów, dolomitów, piaskowców, szarogłazów i wapieni. Kruszywa bazaltowe i melafirowe znajdują także zastosowanie do wykonywania warstw ściernych nawierzchni drogowych. W budownictwie większość kruszyw ze skał magmowych jest wykorzystywana do produkcji betonów wysokiej jakości marek i betonów specjalnych. Niższej klasy betony wytwarzane są z surowców pochodzących ze skał osadowych. Specjalnym kierunkiem zastosowań kruszyw łamanych jest produkcja sztucznych kamieni typu konglomeratu, tzw. lastrico i terazzo, gdzie użytkowane są przede wszystkim grysy marmurowe i wapienie dekoracyjne (Kozioł, Galos red. 2013; Kozioł, Machniak red. 2014a, b). W tabeli 2.2 przedstawiono ogólną klasyfikację petrograficzną surowców skalnych, z których produkowane są kruszywa łamane.

**Tabela 2.2**

Ogólna klasyfikacja petrograficzna oraz charakterystyka wytrzymałościowa skał

Rodzaj skały (pochodzenie skały, powstawanie)		Rodzaj skały (przykłady)	Orientacyjna wytrzymałość na ściskanie [MPa]
Skały magmowe	skały głębinowe	granity granodioryty sjenty, gabra	100–200 120–130 130–150
	skały wylewne	bazalty porfiry diabazy melafiry	120–320 200–210 210–230 100–190
Skały osadowe	skały węglanowe	wapienie dolomity	40–140 70–200
	skały krzemionkowe	chalcedonity	120
	skały okruczowe	żwiry piaskowce	60–190 60–120
Skały przeobrażone	skały metamorficzne	gnejsy kwarcyty marmury	100–110 150–250 60–150
	skały metasomatyczne	magnezyty	60–110

Baza zasobowa skał przydatnych do produkcji kruszyw naturalnych łamanych (dokumentowanych w grupie złóż kamieni łamanych i blocznych) wykazuje silne zróżnicowanie regionalne warunkowane budową geologiczną poszczególnych regionów kraju. Występują one przede wszystkim na Dolnym Śląsku i Śląsku Opolskim (55% krajowych zasobów bilansowych), w Górach Świętokrzyskich (21%), w Karpatach (17%) i w regionie śląsko-krakowskim (6%) oraz w pozostałych rejonach (1%).

Ogółem według stanu na koniec roku 2013 w Polsce było udokumentowanych 747 złóż kamieni łamanych i blocznych. Ich łączne zasoby bilansowe wynosiły około 10,66 mld ton. Według typów skał mających znaczenie w budownictwie, największe zasoby udokumentowano dla wapieni (1,80 mld ton), granitów (1,70 mld ton), piaskowców (1,49 mld ton), dolomitów (1,11 mld ton), porfirów (775 mln ton), bazaltów (587 mln ton), gabra i diabazu (534 mln ton), melafirów (482 mln ton) oraz gnejsów (465 mln ton). Wydobycie kamieni łamanych i blocznych w 2013 roku osiągnęło wielkość 58,36 mln ton i było niższe o 5,64 mln ton niż w roku poprzednim (spadek na poziomie około 8,8%). Nastąpiło wyhamowanie silnego trendu spadkowego, który pojawił się w roku 2012, a obecna wielkość wydobycia zbliżyła się do poziomu z lat 2009–2010 (Szufflicki i in. red. 2014).

Kruszywa naturalne żwirowo-piaskowe są kopalinami powszechnie występującymi w Polsce i tworzą złoża o znacznych zasobach. Geologiczne zasoby bilansowe kruszyw naturalnych według stanu na 31 grudnia 2013 roku wynosiły 17,9 mld ton, a udokumentowanych złóż było 9316. Przyrost zasobów wyniósł 237,36 mln ton, tj. 1,34% zasobów dotychczas udokumentowanych. W stosunku do poprzedniego roku dynamika wzrostu zmniejszyła się ponad dwukrotnie i osiągnęła wartość najniższą od sześciu lat, czyli od 2007 roku. Najwięcej złóż znajduje się obecnie w województwach: mazowieckim (1222), wielkopolskim (1061), lubelskim (862), łódzkim (833) i podkarpackim (774). Największe zasoby rozpoznano natomiast w województwach: dolnośląskim (2,26 mld ton), małopolskim (1,85 mld ton), opolskim (1,41 mld ton), podlaskim (1,29 mld ton) i podkarpackim (1,28 mld ton).

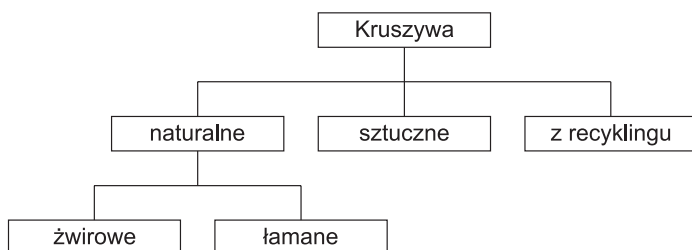
Wydobycie naturalnych piasków i żwirów ze złóż wyniosło w 2013 roku 173,3 mln ton.

W stosunku do roku poprzedniego eksploatacja zmalała o 11,5 mln ton, czyli o 6,2%. Rok 2013 był kolejnym, w którym ograniczano eksploatację, co związane było ze zmniejszeniem inwestycji drogowych, pochłaniających ogromną część kruszyw (Szufflicki i in. red. 2014).

Podział kruszyw jako materiału ziarnistego stosowanego w budownictwie określony jest w normach zawierających wymagania techniczne, a mianowicie:

- PN-EN 12620 *Kruszywa do betonu*,
- PN-EN 13043 *Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu*,
- PN-EN 13139 *Kruszywa do zapraw*,
- PN-EN 13242 *Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym*,
- PN-EN 13383-1 *Kamień do robót hydrotechnicznych*,
- PN-EN 13055-1 *Kruszywa lekkie. Część 1. Kruszywa lekkie do betonu, zaprawy i rzadkiej zaprawy*,
- PN-EN 13450 *Kruszywa na podsypkę kolejową*.

Według wymienionych norm przez kruszywo naturalne rozumieć należy pochodzący ze złóż naturalnych materiał uziarniony znajdujący zastosowanie w budownictwie, poddany co najwyżej przeróbce mechanicznej. Kruszywa dzielą się na naturalne, sztuczne i pochodzące z recyklingu. Ogólny podział kruszyw przedstawia schemat na rysunku 2.2.



**Rys. 2.2.** Podział kruszyw według PN-EN 12620

Do kruszyw sztucznych zalicza się kruszywa z żużla hutniczego, kruszywa lekkie (keramzyt, glinoporyt, łupkoporyt, popiołoporyt), żużel granulowany, żużel paleniskowy, pumeks hutniczy. Kruszywa z recyklingu to kruszywa z betonu lekkiego, cegły, betonu, asfaltu i in. Kruszywa sztuczne i z recyklingu nabierają coraz większego znaczenia i w ostatnich latach wzrasta ich udział w ogólnej ilości produkowanych kruszyw.

Od roku 2004, czyli od daty przystąpienia Polski do Unii Europejskiej, w Polsce wprowadzono nowe normy dotyczące kruszyw. W tabeli 2.3 zestawiono najważniejsze wycofane i odpowiadające im nowe normy dotyczące kruszyw. W tabeli 2.4 podano natomiast nowe normy dotyczące badań właściwości kruszyw.

**Tabela 2.3**

Najważniejsze wycofane i nowe normy dotyczące kruszyw

<b>Normy wycofane</b>	<b>Normy obowiązujące</b>
PN-86/B-06712 <i>Kruszywa mineralne do betonu</i>	PN-EN 12620 <i>Kruszywa do betonu</i>
PN-BN 11112:1996 <i>Kruszywa mineralne. Kruszywa łamane do nawierzchni drogowych</i>	PN-EN 13043:2004 <i>Kruszywa do mieszanek bitumicznych i powierzchniowych utrwaleń stosowanych na drogach, lotniskach i innych powierzchniach przeznaczonych do ruchu</i>
PN-BN 11111:1996 <i>Kruszywa mineralne. Kruszywa naturalne do nawierzchni drogowych; żwir i mieszanka</i>	PN-EN 13242:2004 <i>Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym</i>
PN-BN 11113:1996 <i>Kruszywa mineralne. Kruszywa naturalne do nawierzchni; piasek</i>	PN-EN 13139:2003 <i>Kruszywa do zapraw</i>
	PN-EN 13450 <i>Kruszywa na podsypkę kolejową</i>
	PN-EN 13055 cz. 1 i 2 <i>Kruszywa lekkie do betonu, zaprawy i zaczynu</i>
	PN-EN 13383-1:2003 <i>Kamień do robót hydrotechnicznych</i>



**Tabela 2.4**

Normy badawcze dotyczące kruszyw

Rodzaj badań	Wyszczególnienie badań	Grupa norm
Badania podstawowych właściwości kruszyw	uproszczony opis petrograficzny	PN-EN 932
Badania geometrycznych właściwości kruszyw	skład ziarnowy, kształt ziarn, zawartość pyłów	PN-EN 933
Badania mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw	gęstość, nasiąkliwość, odporność na rozdrabnianie	PN-EN 1097
Badanie właściwości cieplnych i odporności kruszyw na działanie czynników atmosferycznych	mrozoodporność, skurcz przy wysychaniu, odporność na szok termiczny	PN-EN 1367
Badania chemicznych właściwości kruszyw	zawartość siarki, chlorków, siarczanów	PN-EN 1744

Początkowo kruszywo w budownictwie uważane było za materiał niewpływający na jakość produktu, dodawany do zaczynu cementowego głównie ze względów ekonomicznych, ponieważ jest ono tańsze niż cement. W rzeczywistości udział kruszywa – z uwagi na jego właściwości fizyczne, chemiczne i cieplne – ma duży wpływ na cechy i zachowanie betonu w konstrukcji (Rolla 1983; Wolska-Kotańska 2001).

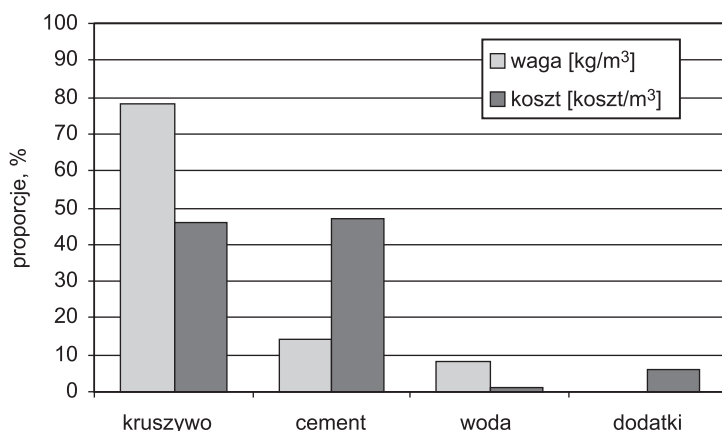
Wszystkie ziarna kruszywa pierwotnie wchodziły w skład skał macierzystych, które mogły zostać rozdrobnione wskutek naturalnych procesów wietrzenia i ścierania lub też przez rozdrabnianie mechaniczne. Wiele cech kruszywa zależy całkowicie od cech macierzystej skały, takich jak np.: skład chemiczny i mineralogiczny, charakterystyka petrograficzna, gęstość, twardość, trwałość fizyczna i chemiczna, zabarwienie itp. Jednak z drugiej strony kruszywo wykazuje cechy, które nie występują w skale macierzystej, takie jak kształt i wymiar ziarn, tekstura powierzchni i nasiąkliwość, mrozoodporność, odporność na rozdrabnianie. Niektóre z tych cech jak np. kształt, uziarnienie, tekstura powierzchni są uzależnione od metod przerobczych stosowanych podczas ich produkcji (głównie rozdrabniania) i mogą wpływać pośrednio lub bezpośrednio na inne cechy. Przykładowo kształt ziarn kruszywa wpływa na jego podatność na rozdrabnianie, a w konstrukcji betonowej na jego wytrzymałość oraz zużycie cementu (Tumidajski, Naziemiec 2004; Naziemiec i in. 2006; Naziemiec, Gawenda 2006).

Najważniejszymi surowcami skalnymi w drogownictwie i budownictwie 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, mieć ostre krawędzie oraz szorstkie płaszczyzny przełamu.

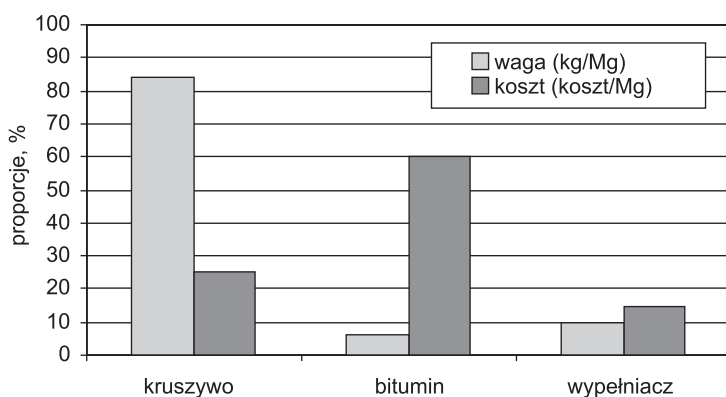
W budownictwie większość kruszyw ze skał magmowych jest wykorzystywana do produkcji betonów wysokiej jakości i betonów specjalnych. Tu również najbardziej pożądane są



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 wiąże się z możliwością powstawania pustek powietrznych (Neville 2000). Zwiększenie zawartości ziarn 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. Na rysunku 2.3 pokazano proporcje składników „przeciętnej” mieszanki betonowej według udziału wagowego i kosztów, z którego można wywnioskować, że niewielki wzrost udziału cementu może spowodować wzrost kosztów mieszanki betonowej o 50%. Jeszcze większe koszty w stosunku do udziału objętościowego obserwuje się dla bituminu w mieszance asfaltowej (rys. 2.4).



**Rys. 2.3.** Udział składników „przeciętnej” mieszanki betonowej według udziału wagowego i kosztów (Eloranta 2006)



**Rys. 2.4.** Udział składników mieszanki asfaltowej według udziału wagowego i kosztów (Eloranta 2006)

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% w stosunku do kruszywa z ziarnami foremnymi (Zieliński 1983).

O jakości kruszywa decyduje więc zarówno jego skład granulometryczny, jak i kształt ziarn, a także właściwości fizyczno-mechaniczne (np. odporność na rozdrabnianie określona ścieralnością w bębnie kulowym Los Angeles). Ziarna foremne mają mniejszą podatność na rozdrabnianie (mniejszy wskaźnik LA), mniejszą nasiąkliwość, ścieralność, co związane jest z wytrzymałością betonu lub nawierzchni drogowej. Przykładowe badania odporności na rozdrabnianie kruszyw o różnej zawartości ziarn nieforemnych były przeprowadzone w Instytucie Szkła, Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie dla produktów z procesu dwustadialnego kruszenia w kruszarkach stożkowych. Jak wynika z tabeli 2.5, kruszywa o mniejszej zawartości ziarn nieforemnych charakteryzują się wyższą odpornością na rozdrabnianie (mniejszy wskaźnik LA). Podobna zależność występuje w badaniu odporności kruszyw na miażdżenie.

**Tabela 2.5**

Wyniki badania odporności na rozdrabnianie kruszyw z wapienia dewońskiego o różnej zawartości ziarn nieforemnych (Tumidajski, Naziemiec 2004)

<b>Badane kruszywo</b>	<b>Odporność na rozdrabnianie (wskaźnik LA [%])</b>
Kruszywo 6,3–12 mm z zawartością ziarn nieforemnych < 25%	30,5
Kruszywo 6,3–12 mm z zawartością ziarn nieforemnych > 30%	33,6
Kruszywo 10–20 mm z zawartością ziarn nieforemnych < 25%	26,9
Kruszywo 10–20 mm z zawartością ziarn nieforemnych > 30%	31,0

Kruszywo budowlane musi mieć także odpowiednio dobrany skład ziarnowy, ponieważ wpływa on na wytrzymałość, mrozoodporność i urabialność mieszanki betonowej i zaprawy. Kruszywo powinno składać się z ziarn różnych frakcji dobranych w odpowiedniej proporcji. Ziarna muszą mieć szorstką powierzchnię, aby mogły się łączyć ze spoiwami. Kruszywo naturalne do produkcji betonu musi mieć gęstość ponad 2 g/cm<sup>3</sup> i spełniać wymagania dotyczące zakresów uziarnienia (określone w tabeli 2.5).

W starych normach podane były dokładnie zakresy uziarnienia dla piasku, miąłu, gryśów, kłinców, tłuczni itp. Ogólne zakresy uziarnienia są podawane w normach. Uziarnienie kruszywa opisywane jest za pomocą dwóch wielkości wymiarów ziarn – *d* (dolna granica

uziarnienia) i  $D$  (górną granicą uziarnienia). Kruszywa pod względem uziarnienia zależnie od wartości  $d$  i  $D$  możemy podzielić na:

- kruszywa drobne,
- kruszywa naturalne,
- kruszywa o ciągłym uziarnieniu,
- kruszywa grube.

Powyższa klasyfikacja nie jest jednak jednoznaczna, co obrazuje tabela 2.6.

**Tabela 2.6**

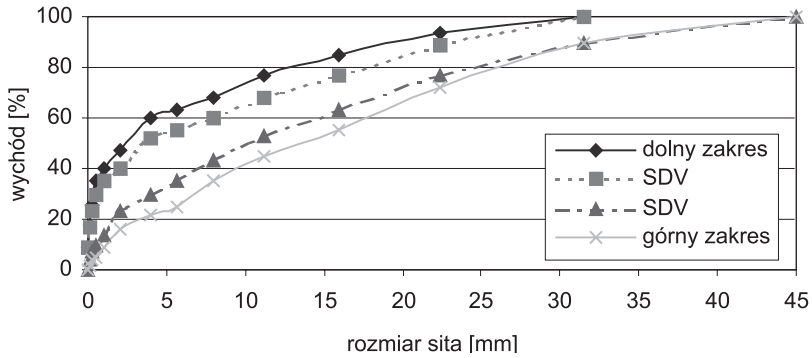
Podział uziarnienia kruszyw według wybranych norm

Kruszywo	Wielkość uziarnienia [mm]		
	PN-EN 12620	PN-EN 13043	PN-EN 13242
Drobne	$d = 0$ $D \leq 4$	$d = 0$ $D \leq 2$	$d = 0$ $D \leq 6,3$
Naturalne	$d = 0$ $D = 4$	–	–
O ciągłym uziarnieniu	$d = 0$ $D \leq 45$	$d = 0$ $D \leq 45$	$d = 0$ $D > 6$
Grube	$d \geq 2$ $D \geq 4$	$d \geq 2$ $D \leq 45$	$d \geq 1$ $D > 2$

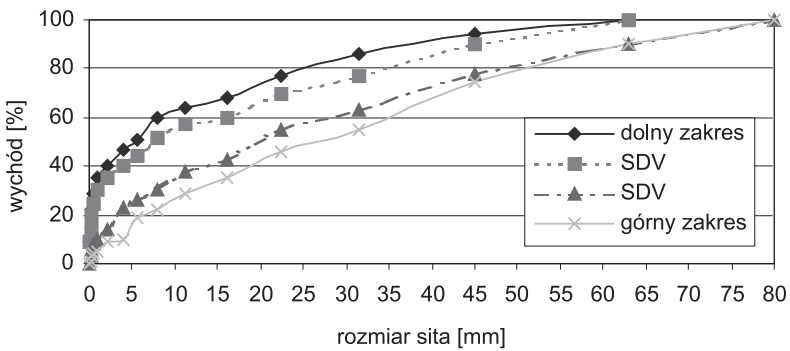
Do produkcji betonu i w budownictwie drogowym oprócz piasków (kruszyw drobnych) najczęściej stosuje się kruszywa łamane o uziarnieniu: 2–4; 2–5,6; 2–8; 4–8; 5,6–8; 8–11,2; 8–16; 11,2–16; 16–22,4; 16–31,5; 22,4–31,5 mm. W budownictwie drogowym znajdują zastosowanie mieszanki kruszyw o uziarnieniu: 0–8; 0–11,2; 0–16; 0–22,4; 0–31,5; 0–45; 0–63 mm i kruszywo grube 31,5–63 mm. Nazwy kruszyw typu grys, kliniec, tłuczeń są starą nomenklaturą, ale są rozpowszechnione w handlu kruszywami.

Wymagania dotyczące składu ziarnowego kruszyw drobnych i kruszyw grubych o ciągłym uziarnieniu podają normy wyszczególnione w tabeli 2.6. Zależnie od kategorii uziarnienia zawartość nadziarna waha się w granicach 10–15%. Zawartość podziarna dla kruszyw grubych mieści się w przedziale 10–20% (niekiedy więcej).

Wymagania dotyczące składu ziarnowego mieszanek stosowanych w budownictwie drogowym podane są w dokumentach aplikacyjnych w załącznikach do *Zarządzenia nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 listopada 2010 r. w sprawie stosowania wymagań technicznych na drogach krajowych* (Wilczek i in. 2009; WT-1 2010; WT-4 2010). Przykładowy obszar uziarnienia (SDV – przerywane linie na rysunkach 2.5 i 2.6) dla mieszanek 0–31,5 i 0–63 mm, w którym powinna się zmieścić krzywa składu ziarnowego mieszanki deklarowana przez dostawcę (producenta), przedstawiono na rysunkach 2.5 i 2.6. SDV jest to obszar uziarnienia, w którym powinna się mieścić krzywa składu ziarnowego mieszanki deklarowana przez dostawcę (producenta). Również mieszanki deklarowane powinny spełniać wymagania ciągłości uziarnienia zgodnie z określonymi wymogami (WT-4 2010).



Rys. 2.5. Mieszanka niezwiązana 0–31,5 mm do warstw podbudowy zasadniczej konstrukcji nawierzchni drogowej (według WT-4 2010)



Rys. 2.6. Mieszanka niezwiązana 0–63 mm do warstw podbudowy zasadniczej konstrukcji nawierzchni drogowej (według WT-4 2010)

Wymagania dotyczące kształtu ziarn kruszyw według norm PN-EN 13043:2004, PN-EN 12620:2004 i PN-EN 13242:2004 wprowadzają dla kruszyw różne kategorie wskaźnika płaskości  $FI$  (PN-EN 933-3) i wskaźnika kształtu  $SI$  (PN-EN 933-4). Dla najwyższych kategorii wskaźnika płaskości ( $FI_{10}$ ,  $FI_{15}$ ,  $FI_{20}$ ) zawartość ziarn nieforemnych wynosi odpowiednio poniżej 10%, poniżej 15% i poniżej 20%. Dla najniższych kategorii zawartości ziarn nieforemnych wynoszą 50% lub więcej. Podobnie jest w przypadku wskaźnika kształtu  $SI$ . Kruszywa uzyskiwane z kruszarek udarowych osiągają najwyższe kategorie wskaźnika płaskości  $FI_{10}$ – $FI_{20}$ , co oznacza, że zawartość ziarn nieforemnych wynosi poniżej 10–20%. Dla kruszyw stosowanych w budownictwie drogowym, zależnie od kategorii ruchu (KR1–KR6) i rodzaju warstwy konstrukcji drogowej, najczęściej stosuje się wymagania na poziomie  $FI_{20}$ – $FI_{30}$  ( $SI_{20}$ – $SI_{30}$ ).

Odnośnie do zawartości pyłów różne normy ustanawiają różne kategorie (dla poszczególnych rodzajów kruszyw drobnych, grubych itp.). Najwyższa kategoria to zawartość pyłów

poniżej 0,5%. Najczęściej spotyka się zawartości pyłów poniżej 1%; 1,5%; 2% i 3%. Są też stosowane kruszywa o zawartości pyłów kilka, a nawet kilkunastu procent.

Odnosnie do zawartości części organicznych wymaga się, aby one nie występowały. Określa się w tym celu zawartość humusu, oznaczając kolor wyciągu wodnego. Barwa jaśniejsza od wzorcowej świadczy o braku humusu.

Niektóre właściwości kruszyw w istotny sposób wpływają na właściwości wyrobu, w którym je zastosowano. Przykładem może być, poza wspomnianą odpornością na rozdrabniania LA, mrozoodporność kruszywa, jeden z elementów wpływający na trwałość betonu. Zgodnie z wymaganiami norm europejskich, jako wskaźnik mrozoodporności można przyjąć nasiąkliwość kruszywa (PN-EN 1097-6). Uznaje się, że nasiąkliwość nieprzekraczająca 1% gwarantuje mrozoodporność kruszywa. W przypadku niektórych wapieni i piaskowców wartość nasiąkliwości jest większa, a kruszywa te są wystarczająco mrozoodporne.

Z kolei na jakość mieszanek bitumicznych wpływa odporność kruszywa na ogrzewanie i suszenie, występujące przy produkcji gorących mieszanek. Właściwość tę określa się w badaniu odporności na szok termiczny (PN-EN 1367-5). Parametry takie jak odporność na ścieranie (PN-EN 1097-1), odporność na polerowanie i ścieranie powierzchniowe (PN-EN 1097-8) decydują o możliwości zastosowania kruszywa do nawierzchni. Należy podkreślić, że postanowienia norm europejskich mogą umożliwić wybór właściwości kruszyw odpowiadającej odbiorcy dla konkretnego zastosowania (Góralczyk, Kukielska 2010; WT-1 2010; WT-2 2010).

### **3. Wskaźniki oceny efektywności procesów rozdrabniania i przesiewania**

Ze względu na to, że w pracy będą omawiane i porównywane urządzenia oraz układy technologiczne, do analizy niezbędne jest użycie różnych wskaźników technologicznych oceny efektywności procesów rozdrabniania i przesiewania, które zostały przedstawione w tym rozdziale.

#### **3.1. Wskaźniki technologiczno-eksploatacyjne procesu rozdrabniania**

Wskaźniki technologiczne i eksploatacyjne oceny efektów rozdrabniania można podzielić na trzy grupy:

- 1) wskaźniki oceny jakości produktu rozdrabniania,
- 2) wskaźniki określające efektywność oddziaływania urządzeń na zmianę najważniejszych właściwości surowca,
- 3) wskaźniki charakteryzujące procesy pod względem wydajności, zużycia energii lub elementów roboczych maszyn.

##### **3.1.1. Uziarnienie produktu, wychód klasy, zawartość ziarn nieforemnych**

Analizy produktów rozdrabniania są podstawą wyznaczania wielu wskaźników pracy układów technologicznych, dzięki którym istnieje możliwość weryfikacji poprawności i zasadności działania maszyn w węzłach technologicznych przeróbki surowców mineralnych. W praktyce bardzo często wykorzystuje się takie możliwości opisu i charakterystyki także przy projektowaniu instalacji lub eksploatacji maszyn.

Charakterystyki granulometryczne są bardzo pożytecznym elementem wykorzystywanym i przydatnym w przypadku:

- obliczania stopni rozdrobnienia,
- obliczania wielkości zawrotów technologicznych,

- określania maksymalnej wielkości ziarna produktów rozdrabniania,
- ilościowo-jakościowego planowania, prognozowania uziarnienia produktów (obliczania wychodów poszczególnych klas ziarnowych),
- wyznaczania niektórych wskaźników zużycia energii w odniesieniu do stopnia rozdrobnienia,
- weryfikacji lub prawidłowego doboru kruszarki do właściwości materiału (wielkości uziarnienia i parametrów wytrzymałościowych),
- projektowania instalacji przeróbczej (doboru pozostałych urządzeń) i określenia liczby stadiów rozdrabniania.

Do oceny jakości produktu rozdrabniania często stosowany jest w praktyce wychód granulometryczny, który określa zawartość procentową danej klasy w produkcie rozdrabniania.

Zawartość ziarn nieforemnych oznaczana jest metodą, którą charakteryzuje norma PN-EN 933-4:2008 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 4: Oznaczanie kształtu ziarn – wskaźnik kształtu*.

Metoda stosowana jest do kruszywa naturalnego i sztucznego, dla ziarn o wielkości 4–63 mm. Pojedyncze ziarna w próbce są klasyfikowane na podstawie stosunku długości  $l$  do grubości  $c$  przy użyciu suwmiarki Schultza. Wskaźnik kształtu ( $SI$ ) ziarn jest obliczany w procentach, jako masa ziarn o stosunku wymiarów  $l/c$  większym od 3 w porównaniu do całkowitej masy badanych ziarn.

Do oceny kształtu ziarn można również zastosować metodę przesiewania przez sito szczelinowe o rozstawie szczelin  $d_{\max}/2$ , gdzie  $d_{\max}$  oznacza górną granicę badanej klasy ziarnowej. Ze stosunku masy ziarn przechodzących przez sito o szerokości szczeliny  $d_{\max}/2$  do całkowitej masy ziarn o wymiarach od  $d_{\min}$  do  $d_{\max}$  oblicza się tzw. wskaźnik płaskości ( $FI$ ). Metoda opisana jest w PN-EN 933-3:2012 *Badania geometrycznych właściwości kruszyw. Część 3: Oznaczanie kształtu ziarn za pomocą wskaźnika płaskości*.

Do obliczenia całkowitej zawartości ziarn nieforemnych w produkcie uzyskanym w kruszarce stosuje się wskaźniki  $K$ , który oblicza się, korzystając ze wzoru (3.1):

$$K = a_{iN} \cdot \gamma_i + a_{i+1N} \cdot \gamma_{i+1} + \dots + a_{nN} \cdot \gamma_n, \quad i = 1 \dots n \quad (3.1)$$

gdzie:

- $K$  – masowa, procentowa zawartość ziarn nieforemnych w produkcie rozdrabniania,
- $a_{iN}$  – procentowa zawartość ziarn nieforemnych w  $i$ -tej frakcji ziarnowej,
- $\gamma_i$  – procentowy udział  $i$ -tej frakcji w składzie ziarnowym produktu.

### 3.1.2. Stopień rozdrobnienia

Stopień rozdrobnienia  $S$  jest bezwymiarowym wskaźnikiem określającym krotność pomniejszania wielkości ziarn rozdrabnianego materiału w danym procesie rozdrabniania. Stopień rozdrobnienia jest definiowany jako stosunek wielkości reprezentatywnych (rozmiarów) ziarn nadawy i otrzymanego produktu:

$$S = \frac{D}{d} \quad (3.2)$$

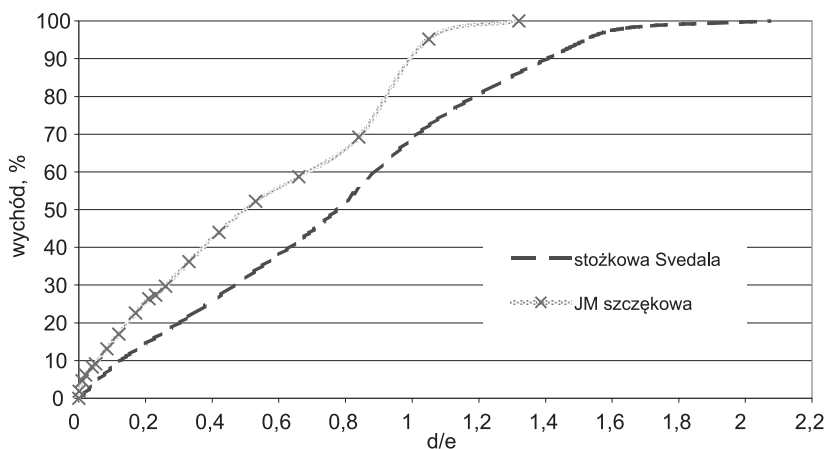
We wzorze (3.2)  $D$  opisuje rozmiar ziarn reprezentatywnych w nadawie,  $d$  jest rozmiarem ziarn reprezentatywnych w produkcie, przy czym wartości te mogą przyjmować wielkości maksymalne (graniczne) ziarn ( $D_{\max}$  i  $d_{\max}$ ), średnie (geometryczne lub arytmetyczne) ( $D_{\text{sr.}}$  i  $d_{\text{sr.}}$ ), 50-procentowe ( $D_{50}$  i  $d_{50}$ ) i 80-procentowe. W celu wyznaczenia stopni rozdrobnienia korzysta się z krzywych składu ziarnowego (rozkładu wielkości uziarnienia nadawy i produktu).

Stopień rozdrobnienia bywa często używany w badaniach nad wpływem różnych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych maszyny oraz właściwości fizyczno-mechanicznych rozdrabnianych surowców na przebieg tego procesu. Jego wielkość charakteryzuje również urządzenia do rozdrabniania i z tego powodu bywa wykorzystywany przy projektowaniu rozdrabniania w zakładach przerobczych.

Stopień rozdrobnienia może być określany dla jednej kruszarki, poszczególnych kruszarek występujących w jakimś układzie maszyn lub dla całego układu technologicznego. W ten sposób możliwe jest określenie wielkości ziarna charakterystycznego dla nadawy i produktu końcowego. Stopień rozdrobnienia  $n$ -stadijalnego procesu rozdrabniania równa się iloczynowi stopni rozdrabniania procesów składowych.

W praktyce najczęściej określa się kwalifikowany stopień rozdrobnienia, np. 90-procentowy  $S_{90}$  lub 80-procentowy  $S_{80}$ , rzadziej natomiast maksymalny  $S_{\max}$  stopień rozdrobnienia. Ponieważ maksymalne ziarna z reguły najmniej odzwierciedlają właściwości ziarn rozpatrywanego zbioru, a ponadto wielkości ich wyznacza się na ogół przez ekstrapolację krzywych składu ziarnowego, dlatego stosuje się ziarna  $n$ -procentowe (zastępcze).

Kolejną formą opisu zmiany właściwości materiału jest wyznaczenie charakterystyki porównawczej produktu rozdrabniania jednej lub kilku kruszarek. W ten sposób wyznacza się zależność wychodów frakcji ziarnowych (sortymentów) w produktach rozdrabniania od stosunku wielkości ziarn  $d$  do wielkości szczeliny wylotowej  $e$  (rys. 3.1). Dzięki temu możemy określić ziarna większe od szczeliny wylotowej, które przedostają się do produktów kruszenia.



**Rys. 3.1.** Przykładowy skład ziarnowy produktów rozdrabniania w odniesieniu do wielkości szczeliny wylotowej  $e$  (Nowak i Gawenda, 2006)



### 3.1.3. Wydajność, sprawność urządzenia, żywołność elementów roboczych

Wydajność urządzenia rozdrabniającego jest to ilość materiału, jaką może rozdrobnić dane urządzenie w pewnych ustalonych warunkach pracy. Wydajność wyrażana jest zwykle w tonach (megagramach) na godzinę i zależy przede wszystkim od wielkości komory roboczej urządzenia rozdrabniającego, parametrów technologicznych urządzenia, właściwości fizyczno-mechanicznych surowców rozdrabnianych (w tym również uziarnienia nadawy i rodzaju surowca), sposobu podawania materiału do maszyny i jego upakowania w komorze rozdrabniającej.

Podstawowym wzorem do obliczania wydajności urządzenia przy ruchu cyklicznym jest model (3.3) (Brach 1963):

$$W = \frac{3600 \cdot V \cdot \rho \cdot \varphi}{t} \quad [\text{Mg/h}] \quad (3.3)$$

a przy ruchu ciągłym:

$$W = 3600 \cdot F \cdot v \cdot \rho \cdot \varphi \quad [\text{Mg/h}] \quad (3.4)$$

gdzie:

$V$  – objętość produktu wypadającego z maszyny w ciągu jednego cyklu [ $\text{m}^3$ ],

$\rho$  – gęstość materiału [ $\text{Mg/m}^3$ ],

$\varphi$  – współczynnik rozluźnienia materiału [-],

$t$  – czas jednego cyklu [s],

$F$  – przekrój poprzeczny płynącej strugi materiału [ $\text{m}^2$ ],

$v$  – prędkość strugi materiału [m/s].

W literaturze spotyka się kilka określeń wydajności, do których zalicza się wydajność teoretyczną, techniczną, znamionową (gwarancyjną), praktyczną i względną (porównawczą) (Pudło 1976).

Wydajność teoretyczna  $W_o$  obliczana jest ze wzorów wyprowadzonych na podstawie danego modelu przepływu materiału przez urządzenie rozdrabniające. Wskutek przyjętych założeń odbiega ona na ogół znacznie od wydajności rzeczywistych.

Wydajność techniczna  $W_t$  jest to wydajność określana na podstawie krótkotrwałych pomiarów przy ciągłej pracy urządzenia i równomiernym doprowadzaniu nadawy i odprowadzaniu produktu (bez jakichkolwiek przeszkód zakłócających pomiar). Jest to więc maksymalna wydajność, jaką dane urządzenie może osiągnąć.

Wydajność znamionowa (gwarancyjna)  $W_g$  jest to wydajność podawana przez wytwórcę (zwykle z podaniem warunków pracy urządzenia), jest ona zazwyczaj niższa od wydajności technicznej.

Wydajność praktyczna  $W_p$  jest określana jako średnia wydajność dobową (przy jednej, dwóch lub trzech zmianach), uwzględniająca całokształt warunków pracy na danym stanowisku, jest ona znacznie mniejsza od wydajności technicznej. Uwzględnia ona nieuniknione

przerwy w dostawie materiału i przerwy na przeglądy międzymianowe oraz konserwację. Jest to więc wydajność rzeczywista osiągnięta w danym miejscu pracy w ciągu doby. Jeżeli maszyna podlega sezonowym zmianom obciążenia, to w celu ustalenia wydajności praktycznej należy przyjmować okres największego obciążenia.

Wydajność średnia roczna  $W_{sr}$  jest to wydajność określana na podstawie rocznej pracy urządzenia na danym stanowisku, uwzględniająca przerwy na remonty bieżące, średnie i kapitalne, z tego też powodu największa jest dla urządzeń pracy jednozmianowej, a najmniejsza dla urządzeń pracy trójzmianowej.

Wydajność względna (porównawcza) jest to wydajność z jednego metra sześciennego komory roboczej urządzenia, stosowana jest ona przeważnie dla młynów.

Efektywność urządzenia rozdrabniającego (inaczej sprawność rozdrobnienia) jest to wydajność przypadająca na jednostkę zużytej energii. Czasami używa się odwrotności tego wskaźnika, którym jest jednostkowe zużycie energii, określające ilość energii przypadającej na jednostkę masy skruszonego materiału (kWh/Mg).

Sprawność maszyny jest to stosunek mocy teoretycznie obliczonej  $N_0$  do mocy rzeczywistej  $N$  potrzebnej do wykonania danej pracy przez maszynę:

$$\eta = \frac{N_0}{N} \quad (3.5)$$

Sprawność maszyny jest nazywana sprawnością całkowitą, na którą składa się sprawność mechaniczna i energetyczna według wzoru (3.6):

$$\eta = \eta_m \cdot \eta_e \quad (3.6)$$

Żywotność elementów roboczych maszyny jest bezpośrednio związana ze ścieralnością elementów roboczych maszyny i ilością przerobionego materiału. Na żywotność elementów mają wpływ rodzaj tworzywa i komponentów, z jakiego zostały one wykonane, właściwości fizyczno-mechaniczne surowca i sposób prowadzenia procesu technologicznego rozdrabniania. Abrazywność i kruszalność są jednymi z najważniejszych właściwości fizyczno-mechanicznych surowca, które są uzależnione od zawartości kwarcu, twardości, wytrzymałości na ściskanie, gęstości, wilgotności itp.

Zużycie elementów roboczych maszyny można w warunkach przemysłowych przewidywać, wykorzystując w badaniach laboratoryjnych testy na abrazywność i kruszalność. Badania wykonuje się zgodnie z normą w młynku Abroy. Do analizy przygotowuje się trzy reprezentatywne próbki o masie 500 g i uziarnieniu 4–6,3 mm, które umieszcza się kolejno w cylindrze wyposażonym w wirnik z nieużywaną płytką metalową o znanej masie. Czas rozdrabniania wynosi 5 min przy prędkości obrotowej wirnika 4500 1/min. Abrazywność jest miarą ubytku masy płytki metalowej w stosunku do masy próbki, wyrażoną w gramach na tonę. Natomiast kruszalność jest stosunkiem masy surowca przechodzącego przez sito 1,6 mm i masy całej próbki wyrażoną w procentach. O ile abrazywność jest odnoszona do trwałości elementów roboczych urządzenia, o tyle kruszalność dotyczy właściwości surowca, a więc podatności na rozdrabnianie.

## 3.2. Wskaźniki technologiczno-eksploatacyjne procesu przesiewania

Proces technologiczny klasyfikacji mechanicznej w przesiewaczach uzależniony jest od trzech podstawowych charakterystycznych czynników:

- 1) parametrów technicznych przesiewacza,
- 2) właściwości fizyczno-mechanicznych przesiewanych surowców,
- 3) sposobu prowadzenia procesu przesiewania.

Wymienione czynniki wpływają na siebie, decydując o wskaźnikach jakościowo-ilościowych procesu przesiewania, dlatego istotne jest, aby przy projektowaniu lub modernizacji układu przesiewania poznać i rozważyć wszystkie czynniki mające związek z przesiewaniem.

### 3.2.1. Skuteczność procesu przesiewania

Oceną skuteczności technologicznej procesu przesiewania jest obliczenie i ocena wskaźników technologicznych wyników procesu takich jak jakość i wychody produktów. Wskaźnikami jakości produktów są zawartości w nich określonych klas ziarnowych, a więc w szczególności klasy drobnej ( $d < d_T$ ) w produkcie dolnym  $a_{dd}$  i klasy grubej ( $d > d_T$ ) w produkcie górnym  $a_{gd}$ , oraz – jako ich dopełnienia – zawartości podziarna w produkcie górnym  $a_{gd}$  i nadziarna w produkcie dolnym  $a_{dg}$ .

W ocenie technologicznych kryteriów skuteczności procesu przesiewania bierze się pod uwagę skuteczności: jakościową, ilościową, ogólną i chociaż liczba wzorów określających skuteczność według K. Sztaby (1993) może być olbrzymia, w praktyce przyjęto używać kilka podstawowych wzorów.

Skuteczność technologiczna jakościowa  $S_j$  oparta jest bezpośrednio na ocenie jakości produktów procesu, na przykład najprostszą ocenę jakościową produktu dolnego daje zawartość w nim klasy drobnej:

$$S_{j1} = a_{dd} \text{ [%]} \quad (3.7)$$

a dla produktu górnego zawartość klasy grubej:

$$S_{j2} = 100 - a_{gd} \text{ [%]} \quad (3.8)$$

gdzie:

$a_{dd}$  – procentowa zawartość klasy drobnej w produkcie dolnym,

$a_{gd}$  – procentowa zawartość klasy drobnej w produkcie górnym.

Skuteczność technologiczną ilościową  $S_i$  szacuje się na podstawie ilości materiału poszczególnych klas ziarnowych przechodzących do produktów procesu, zwykle w odniesieniu do sytuacji teoretycznej (optymalnej), np. uzysku  $\epsilon$ , czyli stosunku ilości pewnego składnika (klasy ziarnowej) zawartego w produkcie właściwym dla tego składnika do całkowitej ilości tego składnika w nadawie procesu.

$$S_i = \gamma_d \frac{a_{dd}}{a_{nd}} = \varepsilon \quad [\%] \quad (3.9)$$

gdzie  $a_{nd}$  jest zawartością klasy drobnej w nadawie.

Uzysk składnika w produkcji niewłaściwym to straty oznaczane symbolem  $\varepsilon'$ , przy czym  $\varepsilon + \varepsilon' = 100\%$ .

Skuteczność technologiczna ogólna  $S_H$  uwzględnia zarówno jakość produktów, jak i efekty rozdziału ilościowego składników nadawy pomiędzy te produkty. Jej określenie sprowadza się do wzoru Hancocka, który również definiuje sprawność przesiewacza według wzoru:

$$S_H = 10000 \frac{(a_{nd} - a_{gd})(a_{dd} - a_{nd})}{a_{nd}(a_{dd} - a_{gd})(100 - a_{nd})} \quad [\%] \quad (3.10)$$

oznaczenia jak wcześniej.

### 3.2.2. Wydajność, obciążenie przesiewacza

Kolejnymi wskaźnikami charakteryzującymi pracę przesiewacza poza sprawnością są wydajność transportowa i technologiczna oraz obciążenie przesiewacza. Obciążenie przesiewacza jest to masa materiału przesiewanego znajdującego się w czasie przesiewania na powierzchni sita. Wydajność technologiczna przesiewacza jest to ilość materiału, jaka w jednostce czasu może zostać przesiana na danym przesiewaczu. Wydajność transportowa  $W_t$  przesiewacza określa ilość materiału, która może przejść po powierzchni przesiewacza w jednostce czasu:

$$W_t = 3,6 \cdot v \cdot B \cdot H_p \cdot \rho_n \quad [\text{Mg/h}], \quad (3.11)$$

gdzie:

- $v$  – średnia prędkość materiału na sicie [m/s],
- $B$  – szerokość użyteczna sita [m],
- $H_p$  – grubość średnia warstwy materiału na sicie w miejscu doprowadzenia nadawy [m],
- $\rho_n$  – gęstość nasypana materiału [kg/m<sup>3</sup>].

### 3.2.3. Ziarno podziałowe, dokładność rozdziału

Przy idealnym rozdziale materiału na sitach ziarna charakteryzujące się wielkością, czyli wartością parametru rozdziału mniejszą od zadanej, znajdują się w jednym produkcie, a pozostałe w drugim. W warunkach rzeczywistych rozdział nigdy nie jest idealny i część ziarn trafia do produktu dla siebie niewłaściwego (Drzymała 2001).

W analizie wyników procesu klasyfikacji na podstawie przeprowadzonego opróbowania stosuje się krzywe rozdziału, które służą określeniu ziarna podziałowego  $d_{50}$  oraz wskaźników imperfekcji  $I$  i ostrości rozdziału  $E_p$  lub współczynnika dokładności rozdziału  $k_r$  ( $k_r = d_{25}/d_{75}$ ).

Ziarno podziałowe  $d_{50}$  jest to wielkość tych ziarn, które rozdzielają się do produktów rozdziału w równych ilościach, a więc ich prawdopodobieństwa przechodzenia do obu

produktów są równe i wynoszą 0,5. Mimo że w przypadku przesiewania wielkość otworu sita  $d_T$  wyznacza granicę między uziarnieniem obu produktów, ograniczone prawdopodobieństwa odsiania (zwłaszcza ziarn o wielkościach zbliżonych do  $d_T$ ) powodują, że granica ta w rzeczywistych procesach prowadzonych na sitach nie bywa nigdy osiągnięta. Rzeczywistą wartość granicy rozdziału  $d_{50}$  wyznacza się z krzywej rozdziału jako odciętą punktu krzywej o rzędnej 0,5 (rys. 3.2).

Drugim ważnym wskaźnikiem otrzymywanym z krzywej rozdziału jest charakterystyka rozproszenia, określająca dokładność rozdziału. Umownie można ją interpretować jako miarę rozproszenia pewnej klasy ziarnowej (np. wąskiej klasy, w której zawiera się wartość  $d_{50}$ ) wśród sąsiednich klas ziarnowych, z czego można wnioskować, że ziarna rozpatrywanej klasy zachowują się w procesie przesiewania tak, jakby należały do tych innych, sąsiednich klas. Spośród znanych w statystyce miar rozproszenia najczęściej stosuje się w omawianym przypadku rozproszenie ćwiartkowe (prawdopodobne)  $E_p$ :

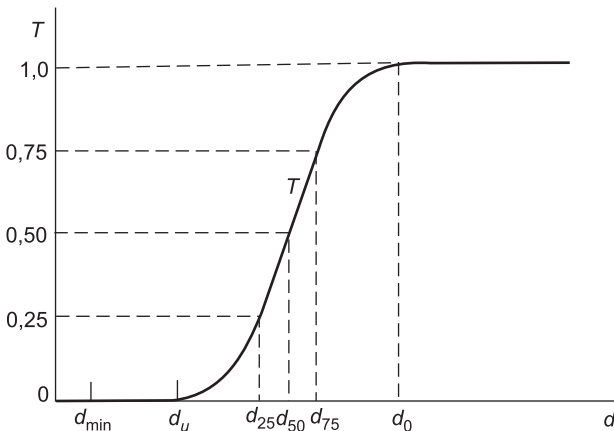
$$E_p = \frac{d_{75} - d_{25}}{2} \quad [\text{mm}] \quad (3.12)$$

Rozproszenie prawdopodobne określa szerokość takiego przedziału, zawierającego wartość przeciętną rozkładu  $d_{50}$ , w którym znajduje się połowa wszystkich elementów danego zbioru (w tym przypadku ziarn o określonym zachowaniu podczas procesu).

Również do oceny pracy urządzenia stosuje się wskaźnik imperfekcji wyrażony wzorem:

$$I = \frac{E_p}{d_{50}} \quad (3.13)$$

Im mniejsze są wartości tych wskaźników (bliższe zeru), tym rozdział jest dokładniejszy. Kształt krzywej rozdziału ( $T$ ) w przypadku przesiewania może być funkcją rodzaju otworów sita, wielkości powierzchni użytecznej sita, wskaźnika prześwietu, częstości drgań, amplitudy drgań rzeszota oraz składu ziarnowego. Krzywe rozdziału wykorzystuje się także do oceny procesu klasyfikacji hydraulicznej oraz wzbogacania.



Rys. 3.2. Krzywa rozdziału  $T$  (Grzelak 1973)

Na rysunku 3.2 przedstawiono krzywą rozdziału, z której można odczytać wielkość ziarna podziałowego  $d_{50}$  oraz  $d_{25}$  i  $d_{75}$  służące do wyznaczenia współczynnika dokładności rozdziału  $k_r$ , rozproszenia prawdopodobnego  $E_p$  i imperfekcji  $I$ . W warunkach technicznych współczynnik  $k_r$  nie przekracza 0,72.

### 3.3. Sposoby oceny pracy maszyn w układach technologicznych

W celu scharakteryzowania pracujących urządzeń stosowanych do produkcji kruszyw mineralnych, a przede wszystkim do oceny ich poprawności i zasadności funkcjonowania w danym układzie technologicznym kruszarka – przesiewacz, wykorzystuje się wskaźniki oceny pracy urządzeń. Ponieważ sam układ rozdrabniający praktycznie nie występuje oddzielnie, lecz współpracuje z przesiewaczem, co zapewnia jego prawidłowe funkcjonowanie i produkcję kruszyw o dobrej jakości, dlatego dokonując opróbowania i oceny, nie powinno się rozpatrywać tylko pojedynczego urządzenia. Oczywiście także w produkcji kruszyw dokonuje się oceny procesu uszlachetniania, płukania czy odwadniania, ale tę część tematyki pominięto w rozważaniach i została omówiona w pracy (Gawenda 2011b).

Omówione w niniejszym rozdziale wskaźniki i zasady ich obliczeń są istotne w proponowanej metodyce oceny pracy układów zbudowanych z kruszarek i przesiewaczy, które przedstawiono w tabeli 3.1. W celach porównawczych powinno się również odnotować parametry techniczno-konstrukcyjne maszyn, takie jak: wielkość komory roboczej i szczeliny wylotowej, prędkość wirujących elementów roboczych, moc silnika, powierzchnia sita, wielkość i kształt oczka sita, prześwit, amplituda i częstość drgań itp. Wskaźniki mogą być wykorzystywane do modelowania, sterowania i kontroli procesów rozdrabniania.

**Tabela 3.1**

Możliwości wyznaczania podstawowych wskaźników pracy układów technologicznych rozdrabniania i przesiewania

Wskaźniki	Zakres czynności do wyznaczenia wskaźników
<b>Proces rozdrabniania</b>	
Stopień rozdrobnienia $S$ [-]	analizy sitowe nadawy i produktów, odczyt z krzywych składu ziarnowego
Wychód klasy $\gamma$ [%]	analizy sitowe nadawy i produktów, odczyt z krzywych składu ziarnowego
Zawartość ziarn nieforemnych $K$ [%]	analizy sitowe nadawy i produktów, analizy zawartości ziarn w produktach za pomocą sit szczelinowych lub suwmiarki Schultza
Stosunek wielkości ziarna do szczeliny wylotowej $d/e$ [-]	analizy sitowe produktów, pomiar szczeliny wylotowej
Zużycie energii $E$ [kWh/Mg] lub oleju napędowego ON [l/100 Mg]	odczyt z liczników rejestrujących pomiary
Wskaźnik jednostkowego zużycia energii [MJ] potrzebnej na rozdrobnienie jednej tony surowca przy jednokrotnym pomniejszeniu uziarnienia nadawy $W_j$ [MJ/Mg]	odczyt z liczników rejestrujących pomiary, analizy sitowe nadawy i produktów, odczyt z krzywych składu ziarnowego i wyznaczenie stopnia rozdrobnienia

**Tabela 3.1** cd.

Ścieralność (zużycie) elementów roboczych $Z$ [g/Mg]	odnotowanie masy ubytku elementów roboczych przy określonym przerobie
Koszt zużycia elementów roboczych $K_z$ [zł/Mg]	odnotowanie kosztów zużycia elementów roboczych przy określonym przerobie
Wydajność (praktyczna) $W_p$ [Mg/h]	odczyt z liczników rejestrujących pomiary
Wskaźnik ciężaru (masy) urządzeń przypadający na jednostkę wydajności $M$	odczyt z DTR urządzenia i odczyt wydajności
<b>Proces przesiewania</b>	
Skuteczność $S$ i sprawność przesiewacza $S_H$ [%]	analizy sitowe produktów, odczyt z krzywych składu ziarnowego
Zawartość nadziarna $a_{dg}$ i podziarna $a_{dg}$ w produktach [%]	analizy sitowe produktów, odczyt z krzywych składu ziarnowego
Ziarno podziałowe $d_{50}$ [mm]	analizy sitowe produktów, odczyt z krzywych składu ziarnowego
Wskaźnik imperfekcji $I$ [-]	analizy sitowe produktów, odczyt z krzywych składu ziarnowego
Ostrość rozdziału $E_p$ [mm]	analizy sitowe produktów, odczyt z krzywych składu ziarnowego
Wydajność (transportowa) $W_t$ [Mg/h]	obliczenie średniej prędkości materiału na sicie oraz grubości jego warstwy na sicie w miejscu doprowadzenia nadawy, odnotowanie szerokości użytecznej sita, wyznaczenie gęstości nasypowej materiału
Wydajność (praktyczna) $W_p$ [Mg/h]	odczyt z liczników rejestrujących pomiary
Koszt zużycia pokładów sitowych $K_z$ [zł/Mg]	odnotowanie zużycia pokładów sitowych przy określonym przerobie w odniesieniu do ceny zakupu

Porównywanie układów technologicznych produkujących kruszywa mineralne może odbywać się za pomocą oceny efektów końcowych produktów, jak wielkość i kształt uziarnienia, a także wskaźników (technologicznych, energetycznych, ekonomicznych) charakteryzujących pracę urządzeń w danym układzie, które mogą być również zależne od siebie. Energochłonność procesu rozdrabniania warunkowane jest wydajnością maszyn, która zależy od parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych urządzeń oraz właściwości fizyczno-mechanicznych surowca. Przy określaniu wydajności maszyny należy brać pod uwagę stopień rozdrobnienia uzyskany przy danym przerobie, a przy energochłonności – ilość zużytej energii pozwalającą doprowadzić określoną jednostkę masy materiału do pożądanego uziarnienia w określonym czasie. Za pomocą takich wskaźników można już porównywać ze sobą układy technologiczne rozdrabniania, ale przy wyborze właściwych urządzeń należy kierować się jeszcze jednym bardzo ważnym wskaźnikiem, jakim jest żywotność elementów roboczych, czyli ogólnie rzecz biorąc, kosztami eksploatacyjnymi.

Dokonywanie dokładnego porównania układów w praktyce jest bardzo trudne, gdyż wymaga rzetelnego zbierania przez odpowiedni czas szczegółowych informacji na temat pracy układu

technologicznego w danym zakładzie, dotyczących przerobu, zużycia energii elektrycznej czy oleju napędowego oraz innych czynników związanych z kosztami. Kolejnym ważnym wymogiem jest porównywanie układów przerabiających te same surowce mineralne o znanych składach granulometrycznych nadawy i produktów, tak aby można było określić podstawowe wskaźniki procesów technologicznych.

W celu porównania różnych maszyn (kruszarki i przesiewacze) pracujących w układach mobilnych i stacjonarnych, z zawrotem lub bez zawrotu, produkujących różnego rodzaju kruszywa mineralne, do oceny można wziąć pod uwagę wskaźniki takie jak koszty zużycia paliwa dla układów mobilnych lub energii elektrycznej dla układów stacjonarnych, jednostkowe zużycie energii, maksymalne stopnie rozdrobnienia oraz proponowany przez autora pracy wskaźnik  $W_j$  [MJ/Mg], będący ilorazem zużycia energii i maksymalnego stopnia rozdrobnienia przy jednokrotnym pomniejszeniu uziarnienia nadawy o masie jednej tony surowca (Gawenda 2013a).

Wskaźnik  $W_j$  jest wskaźnikiem miarodajnie określającym stosunek zużycia energii przez kruszarkę do jej efektywnej pracy związanej z wielkością rozdrobnionego produktu przy uwzględnieniu nadawy. Na przykład samo zużycie energii przez dwie różne kruszarki może być bardzo podobne, ale odniesienie ich wyników zużycia energii do stopnia rozdrobnienia może wykazać, że któraś kruszarka pracuje mniej efektywnie lub nieefektywnie w stosunku do swoich możliwości. Takie przykładowe analizy zostały omówione w rozdziale 6 dla wybranych instalacji przemysłowych. Wskaźnik  $W_j$  można stosować dla pojedynczej kruszarki lub kruszarki współpracującej z przesiewaczem, zwłaszcza w układzie z zawrotem materiału, a także do całego wielostadialnego układu technologicznego składającego się z kilku kruszarek i przesiewaczy.

Najwłaściwszą formą porównania energochłonności różnie zasilanych mediami instalacji przerobczych jest przedstawienie wyników zużycia energii w dżulach, przy uwzględnieniu znanych zależności, że 1 kWh energii elektrycznej to 3,6 MJ, a kaloryczność 1 l oleju napędowego wynosi około 38 MJ.



## **4. Ogólna charakterystyka maszyn rozdrabniających i przesiewających stosowanych w instalacjach produkcji kruszyw łamanych**

### **4.1. Systematyka kruszarek**

W produkcji kruszyw łamanych w szerokim zakresie stosuje się rozdrabnianie jako podstawową operację technologiczną. Także w przemyśle kruszyw żwirowych i piaskowych, w którym ważne jest pełne wykorzystanie złoża zawierającego otoczaki, głązy i głaziki oraz produkcję frakcji żwirów i żwiro-tłuczni do 20 mm, stosuje się operację rozdrabniania.

Zależnie od wielkości brył nadawy rozdrabnianie w przemyśle kruszyw dzieli się na kruszenie wstępne (grube), średnie oraz drobne.

Z kruszenia wstępnego otrzymuje się produkt o górnej wielkości ziarna w granicach 100–300 mm, a czasami powyżej 300 mm. Kruszenie średnie obejmuje rozdrabnianie materiału po kruszarkach wstępnych lub nadawy o uziarnieniu nieprzekraczającym 300–400 mm. Maksymalne uziarnienie produktu kruszenia zawiera się w granicach od kilkudziesięciu do stu kilkudziesięciu milimetrów. Z kruszenia drobnego otrzymuje się produkt o maksymalnym uziarnieniu od kilku do kilkudziesięciu milimetrów.

Obecnie oferowane na rynku maszyny kruszące odznaczają się dużym zróżnicowaniem pod względem zastosowania, przeznaczenia, budowy oraz obsługi. Pojawiły się nowej generacji lub udoskonalone rozwiązania maszyn, np. kruszarki wertykalne potocznie nazywane kubizerami, kruszarki rewersyjne udarowe, kruszarki młotkowe dwuwimikowe, prasy walcowe wysokociśnieniowe (HPGR). Zastosowanie nowoczesnych rozwiązań w kruszarkach pozwoliło uzyskać produkty o określonych wymogach stawianych drobnoziarnistym produktom stosowanym do produkcji wyrobów budowlanych (kleje, zaprawy tynkarskie, gładzie szpachlowe), sorbentów lub nawozów, a tym samym spowodowało zastąpienie energochłonnych młynów (Gawenda 2010c).

Modną stała się także produkcja kruszarek mobilnych oferowanych w podobnym asortymencie jak kruszarki stacjonarne, cieszących się znakomitą opinią ze względu na praktyczność i uniwersalność ich zastosowania. Warto też zauważyć, że kruszarki stacjonarne i mobilne mogą być napędzane silnikiem elektrycznym, hydraulicznym, spalinowym lub w kombinacji silników spalinowego i elektrycznego oraz spalinowego i hydraulicznego (Marktfocus Brecher 2013).

Kruszarki mają zastosowanie najczęściej w przemyśle górniczym (przeróbka surowców skalnych, rud i węgla), hutniczym, cementowym, ceramicznym oraz w przeróbce odpadów stałych.

W tabeli 4.1 przedstawiono podział maszyn kruszących oraz podano ich praktyczne zastosowania. Dane pozyskano z kilkudziesięciu firm produkujących takie maszyny.

**Tabela 4.1**

Podział maszyn do kruszenia oraz przykłady ich zastosowania (Gawenda 2010c)

Rodzaj kruszarki	Typ i budowa	Zastosowanie
Szczękowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>– jednorozporowe (ruch prosty lub złożony) lub dwurozporowe (ruch prosty),</li> <li>– granulatory szczękowe (ruch złożony),</li> <li>– kombinowane (np. szczękowo-walcowe),</li> <li>– wibracyjne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– najczęściej: surowce skalne średniotwarde, twarde, rudy, żużel hutniczy, gruz budowlany,</li> <li>– rzadko: węgiel (mobilne) odpady komunalne i klinkier cementowy,</li> <li>– surowce suche lub niezbyt wilgotne</li> </ul>
Stożkowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>– z wałem podwieszanym lub wspartym,</li> <li>– żyrator, granulator stożkowy,</li> <li>– wibracyjne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– najczęściej: surowce skalne miękkie, średniotwarde, twarde, klinkier cementowy, rudy, żużel hutniczy, odpady komunalne,</li> <li>– rzadko: gruz budowlany,</li> <li>– surowce suche lub niezbyt wilgotne</li> </ul>
Wirnikowe udarowe młotkowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>– młotkowe jedno- i dwuwirnikowe,</li> <li>– młyny młotkowe, kombinowane (młotkowo-udarowe, młotkowe z walcami)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– najczęściej: surowce skalne miękkie, średniotwarde, twarde i zanieczyszczone materiałami ilastymi, węgiel, rudy, żużel hutniczy, asfalt, odpady komunalne,</li> <li>– rzadko: gruz budowlany, żwir,</li> <li>– surowce suche lub wilgotne</li> </ul>
Wirnikowe udarowe listwowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>– z wałem poziomym (horyzontalne), dezintegratory, młyny udarowe,</li> <li>– z wałem pionowym (wertykalne), kubizery</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– najczęściej: surowce skalne twarde, gruz budowlany, żwir, kamień średniotwardy, rudy, żużel hutniczy i klinkier cementowy,</li> <li>– rzadko: odpady komunalne,</li> <li>– surowce suche lub niezbyt wilgotne</li> </ul>
Walcowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>– jednowalcowe, dwuwalcowe, wielowalcowe, kombinowane (walcowo-udarowe, walcowo-młotkowe),</li> <li>– z walcami gładkimi lub uzębionymi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– najczęściej: suche i wilgotne surowce skalne miękkie, średniotwarde, rudy miękkie, popioły elektrociepłownicze, żużel hutniczy, gruz budowlany (cegła), surowce ilaste,</li> <li>– rzadko: węgiel (mobilne) odpady komunalne,</li> <li>– surowce suche lub wilgotne</li> </ul>
Prasy walcowe wysokociśnieniowe HPGR i HRC	<ul style="list-style-type: none"> <li>– z okładzinami walców typu hexadur, jodełka i korek (stad)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– najczęściej: twarde rudy, klinkier cementowy, twarde surowce węglanowe</li> <li>– surowce suche lub niezbyt wilgotne</li> </ul>

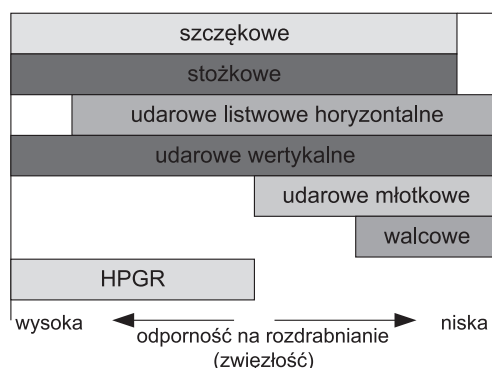
Wiodącymi producentami europejskimi są: Metso Minerals (Svedala, Nordberg), Magotteaux, Sandvik Mining + Construction Central Europe GMBH, Weil Brechertechnik GMBH, Hazemag & Epr GMBG, KHD Humboldt Wedag AG, Retsch GMBH, PSP Engineering A.S., MFL Grupa (Maschinenfabrik Liezen GMBH & SBM Mineral Processing GMBH), Thyssenkrupp Foerdertechnik GMBH, Koeppern, a także pozostałe firmy: Aube-ma Crushing Technology GMBG, PSP Vertriebs GMBH, Brauer Aufbereitungsmaschinen GMBH & CO, FAM, GIPO AG, KDS Maschinenbau GMBH, Liedlbauer Aufbereitungstechnik, Reiter & Crippa S.R.L., Vortex Zerkleinerungstechnik GMBH, DBT Mineral Processing GMBH, Merz Aufbereitungstechnik GMBH, Thomaco Baumaschinen GMBH, Ammann Aufbereitung AG, BHS-Sonthofen, Lut Metalltechnik GMBH, Martin Steckert, Giegold Maschinenbau GMBH.

Wśród firm produkujących mobilne zestawy kruszarek (poza wiodącymi producentami) wyróżnić należy: Mobilne Fintec (NI) LTD, Kleemann GMBH, Posch Mobile GMBH, Terex Pegson LTD, Beyer GMBH, Extec Screens + Crushers LTD, DBT Mineral Processing GMBH, Giegold Maschinenbau GMBH, Hartl Anlagenbau GMBH, KDS Maschinenbau GMBH, Komatsu Deutschland GMBH, Kormann Rockster Recycler GMBH, Officine Meccaniche Di Pozzano Veneto SPA, SBM Wageneder GMBG, Rubble Master HMH, Engineering, Trima Triebeser Maschinenbau GMBH.

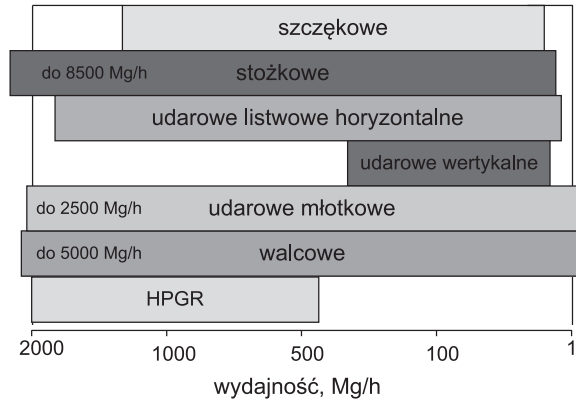
W Polsce kruszarki produkują m.in.:

- Makrum Project Management sp. z o.o.,
- KGHM Zanam S.A.,
- Kopex Machinery S.A.,
- Ofama sp. z o.o.

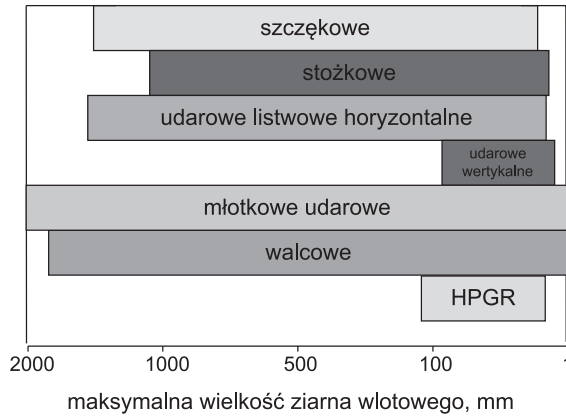
Na rysunkach 4.1–4.4 przedstawiono możliwości zastosowania poszczególnych kruszarek w zależności od ich przeznaczenia dla surowców o różnych właściwościach fizyczno-mechanicznych, wydajności, maksymalnego uziarnienia nadawy i produktów.



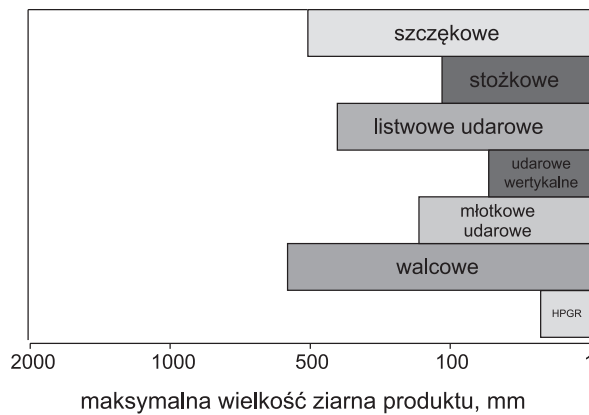
**Rys. 4.1.** Podział kruszarek według ich przeznaczenia dla materiałów o różnych właściwościach fizyczno-mechanicznych



Rys. 4.2. Podział kruszarek według wydajności



Rys. 4.3. Podział kruszarek według maksymalnej wielkości ziarn nadawy

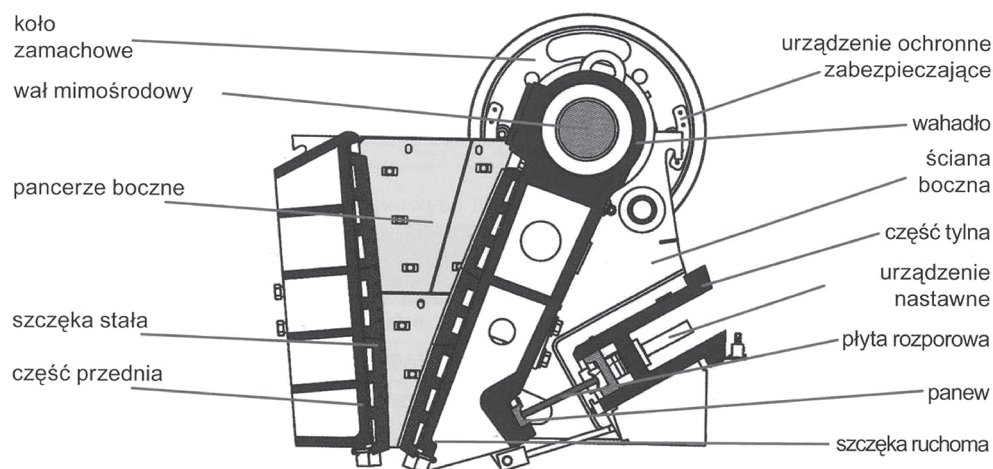


Rys. 4.4. Podział kruszarek według maksymalnej wielkości ziarn produktu

W przeróbce mechanicznej produkcji kruszyw drobnoziarnistych dla przemysłu budowlanego i cementowo-wapienniczego stosuje się także mielenie. Jest to operacja główna występująca po kruszeniu i przesiewaniu, mająca na celu doprowadzenie materiału mielonego do odpowiedniego uziarnienia. Do mielenia surowców służą urządzenia zwane młynami. Ponieważ urządzenia te zaliczane są do najmniej sprawnych (np. sprawność młynów kulowych nie przekracza 10%) i bardziej energochłonnych, ważne jest, aby przy projektowaniu układów rozdrabniania przyjąć możliwie największy całkowity stopień rozdrobnienia w kruszarkach pracujących na wcześniejszych stadiach rozdrabniania. Procesy mielenia oparte na różnego rodzaju młynach stosowanych do produkcji kruszyw wypełniających czy wypełniaczy drobnoziarnistych w tej pracy nie będą omawiane. Zagadnienia procesów mielenia zostały szerzej omówione w literaturze m.in. w publikacjach K. Trybalskiego (2013), W. Kurdowskiego (1981), W. Dudy (1975), E. Nowaka (red.) (1999 i 2000).

#### 4.1.1. Kruszarki szczękowe

Kruszarki szczękowe ze względu na prostą konstrukcję, łatwą obsługę i znaczną siłę kruszenia są najbardziej rozpowszechnione w przemyśle górniczym, budowlanym i drogownictwie. Stosuje się je do rozdrabniania materiałów twardych i średniotwardych, do rozdrabniania grubego (wstępnego) i średniego surowców pochodzenia mineralnego, organicznego oraz odpadów o bardzo wysokiej wytrzymałości na zgniatanie (do 300 MPa) (Blaschke 1981). Kruszarki szczękowe, tzw. granulatory szczękowe, z płytami roboczymi o wypukłej i uzębionej powierzchni, są również stosowane na ostatnich stadiach kruszenia, zwłaszcza w przypadku przełamywania owalnych ziarn żwiru czy produkcji grysów z twardych skał zwięzłych (Naziemiec 2006; Gawenda 2010a, b). Typowy przykład budowy kruszarki szczękowej przedstawiono na rysunku 4.5.

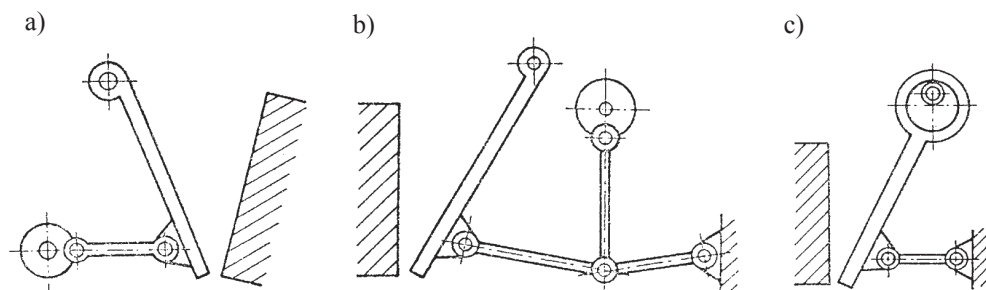


Rys. 4.5. Budowa kruszarki szczękowej jednozporowej o ruchu złożonym (PSP Engineering)

Kruszarka tego typu zbudowana jest z kadłuba, na którym zamontowany jest wał mimośrodowy służący do przenoszenia ruchu (skoku) wahacza, czyli drgań (wahnięć szczęki ruchomej). Ruch obrotowy wału wywołany jest ruchem obrotowym kół zamachowych zamontowanych na wale. Koła są napędzane silnikiem za pomocą przekładni pasowej. Wahacz w dolnej części kadłuba podparty jest na płycie rozporowej pełniącej funkcję bezpiecznika przeciążeniowego przed zniszczeniem płyty kruszącej oraz jest dociskany za pomocą sprężynowego napinacza. Płyta rozporowa pełni również funkcję przenoszenia miejsca położenia szczęki ruchomej względem nieruchomej za pomocą urządzenia nastawnego służącego do zmiany wielkości szczeliny wylotowej. Szczeka nieruchoma zamocowana jest w kadłubie po przeciwnej stronie szczęki ruchomej i wraz z płytami bocznymi tworzy komorę roboczą (tzw. gardziel kruszarki). Kadłub kruszarki wraz z silnikiem może być zamocowany na stałe do fundamentów lub do konstrukcji przenośnych (ramię stalowe lub nadwozie jezdne), tworząc wtedy jednostki kruszące semimobilne lub mobilne.

Działanie kruszarki odbywa się na zasadzie zgniatania brył nadawy pozostających pomiędzy nachylonymi względem siebie pod kątem około  $22^\circ$  dwoma szczękami, z których szczeka ruchoma wykonuje ruch wahadłowy względem nieruchomej. Obie szczęki wyposażone są w wymienne płyty wykładzinowe, które mogą być gładkie lub karbowane i odpowiednio wyprofilowane.

Najbardziej charakterystyczną cechą kruszarek szczękowych, z uwagi na proces rozdrabniania, jest charakter ruchu szczęki ruchomej. Pod tym względem kruszarki szczękowe dzieli się na dwie zasadnicze grupy: o prostym ruchu szczęki i złożonym ruchu szczęki (rys. 4.6) (Grzelak 1975; Nawrocki i in. 1989).



**Rys. 4.6.** Schematy kruszarek szczękowych: a) jednorozporowej o prostym ruchu szczęki; b) dwurozporowej o prostym ruchu szczęki; c) jednorozporowej o ruchu złożonym szczęki (Grzelak 1975; Nawrocki i in. 1989)

Zgodnie z literaturą (Nawrocki 1974; Blaschke 1981; Nawrocki i in. 1989) kruszarki szczękowe można podzielić na:

- górnosiowe, o wale umieszczonym w górnej części ruchomej,
- dolnosiowe, o wale umieszczonym w dolnej części ruchomej.

Porównanie właściwości cech obu typów kruszarek daje pierwszeństwo kruszarkom górnoosiowym, które w praktyce znalazły znacznie szersze zastosowanie. Przypisać to należy przede wszystkim lepszemu przystosowaniu do rozdrabniania grubych brył oraz wyższej wydajności, co w praktyce ma dominujące znaczenie.

Obecnie największe produkowane kruszarki szczękowe mają paszce wlotowe o wymiarach  $2100 \times 3000$  mm, a wydajność ich dochodzi do 1500 Mg/h. Współcześnie budowane kruszarki charakteryzują się głęboką komorą kruszenia, krzywoliniowym profilem wykładzin szczęk i sztywnym masywnym korpusem. Krzywoliniowy profil mają wykładziny obu szczęk lub tylko szczęka ruchoma. Przeciwdziała on zapychaniu się kruszarki, podwyższa jednorodność uziarnienia materiału, zwiększa stopień rozdrobnienia oraz zapewnia mniejsze zużycie szczęk. Stopień rozdrobnienia w kruszarkach na ogół wynosi od 4 do 6, ale w skrajnych przypadkach może wynosić od około 2 (w granulacjach) do około 10.

Najważniejszymi parametrami konstrukcyjno-eksploatacyjnymi kruszarki szczękowej są: szczelina wylotowa, profil poprzeczny i podłużny płyt, kąt nachylenia płyty rozporowej, skok szczęki, prędkość obrotowa wału mimośrodowego. Parametry te wpływają na wydajność i skład ziarnowy produktów. W warunkach przemysłowych regulowane są tylko pierwsze dwa parametry, pozostałe są ustalane projektowo dla danego typoszeregu kruszarki i przeznaczenia (Gawenda 2004).

Warto w tym miejscu wspomnieć o kruszarkach szczękowych wibracyjnych opatentowanych w latach 70. ubiegłego stulecia i opracowanych w Instytucie Maszyn Górniczych, Przerobczych i Automatyki AGH (Banaszewski 1971). Zbudowano wówczas dwa prototypy kruszarki wibracyjnej wyposażone w dwie ruchome szczęki, napędzane dwumasowymi wibratorami bezwładnościowymi. Kruszarki te różniły się miejscem górnego i dolnego zawieszenia szczęk. Efektywność kruszenia była od 4 do 7 razy większa od efektywności procesu kruszenia w klasycznych kruszarkach szczękowych, przy jednostkowym poborze energii większym od 40% do 100% (Sidor, Mazur 2011).

W latach 80. w AGH opracowano prototyp nowej konstrukcji szczękowej kruszarki wibracyjnej (Drzymała i in. 1986) z dolnym zawieszeniem szczęk napędzanych wibratorami kinematycznymi. Kruszarkę tę zastosowano do bardzo drobnego kruszenia fryt emalierskich. W 1992 roku w Katedrze Systemów Wytwarzania AGH opracowano nową kruszarkę wibracyjną KW 40/1 (Sidor 1996), wyposażoną w wibratory kinematyczne z mechanizmem regulacji mimośrodków, umożliwiającymi regulację skoku szczęk.

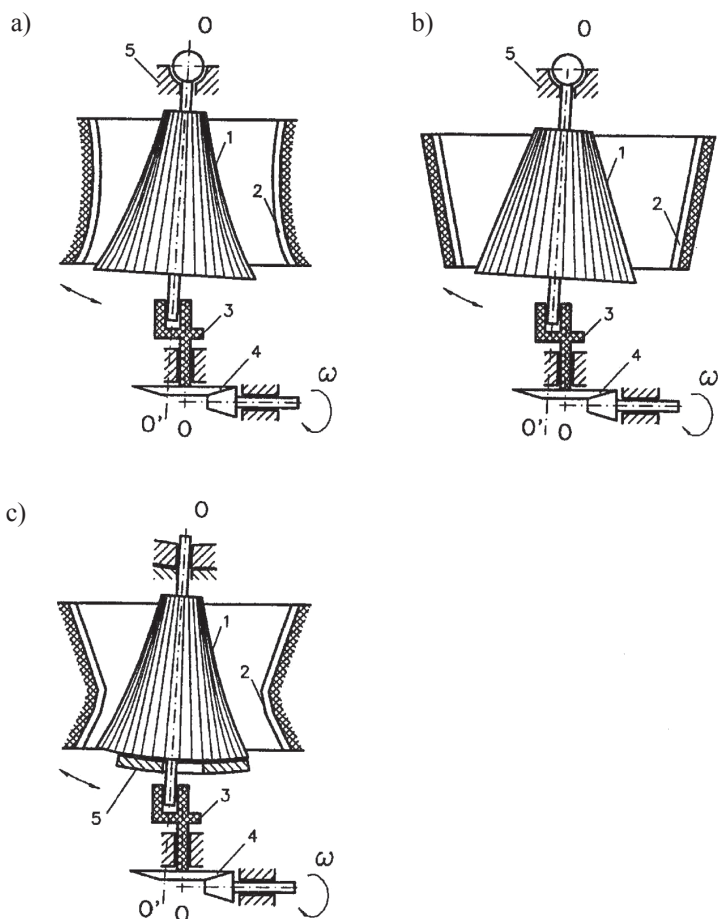
Przeprowadzono szereg badań procesu kruszenia wibracyjnego w tej kruszarce (podobnie w wibracyjnej stożkowej), głównie o charakterze technologicznym w zakresie bardzo drobnego kruszenia materiałów o bardzo zróżnicowanych właściwościach wytrzymałościowych. Wyniki badań wykazały wysoką przydatność technologiczną urządzeń, zwłaszcza przy kruszeniu materiałów ceramicznych o znacznej wytrzymałości na ściskanie, takich jak: żelazokrzem, azotek glinu, węgiel tytanowo-krzemowy, korund, a także surowców mineralnych (dolomit, kwarcyt, diabaz) (Sidor 2007; Sidor, Mazur 2011, 2012, 2014).

#### **4.1.2. Kruszarki stożkowe**

Budowa kruszarek stożkowych (rys. 4.7 i 4.8) maszyn o pracy ciągłej jest bardziej złożona niż kruszarek szczękowych. Elementami roboczymi są dwa stożki mające w praktyce różne kształty: stożek wewnętrzny 1 i zewnętrzny 2.

W kruszarkach typu „Gates” (rys. 4.7a, b) stożek jest zawieszony na łożysku kulistym 5. Oś tego stożka  $OO'$  jest odchylona o kilka stopni od osi geometrycznej maszyny  $OO$ . Przez przekładnię stożkową 4 napęd przenosi się na tuleję mimośrodkową 3, w której osadzona jest oś  $OO'$ . Zatacza ona powierzchnię stożkową w stosunku do osi  $OO$ . Stożek 1 może również obracać się wokół własnej osi ( $OO'$ ), co powoduje, że występuje tu ruch precesyjny. Kruszenie materiału zachodzi na skutek zbliżania się stożka ruchomego 1 do kolejnych części stożka nieruchomego 2. Powierzchnie robocze stożków są gładkie lub odpowiednio karbowane.

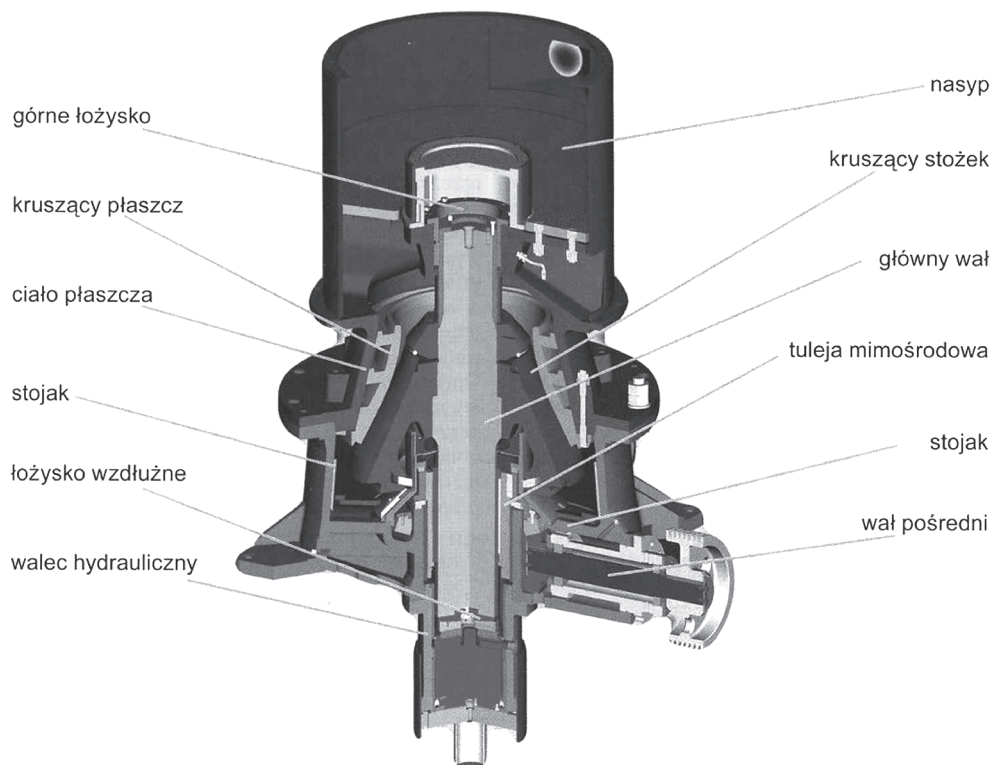
W kruszarkach „Symons” (rys. 4.7c) stożek 1 jest podparty na łożysku 5. Różne kształty komór kruszenia tych maszyn są dostosowane do różnych warunków kruszenia (kruszenie grube, drobne i średnie). Optymalizacja kształtu komór kruszenia kruszarek „Symons” jest przedmiotem obszernych badań doświadczalnych i teoretycznych (Zawada 1998).



**Rys. 4.7.** Schematy kruszarek stożkowych (Zawada 1998):  
 a, b) z wałem podwieszanym „Gates”; c) z wałem wspartym „Symons”

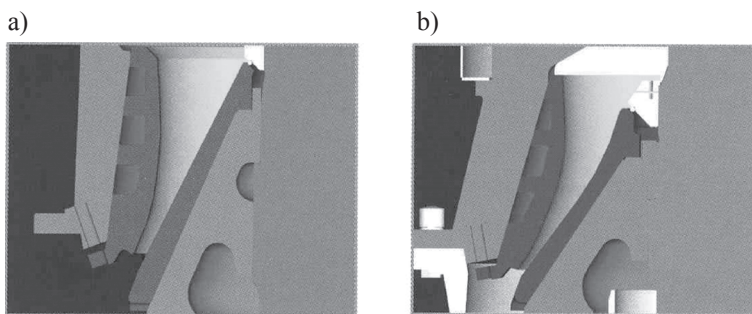


Główne działanie kruszące w tego typu maszynach polega na zgniataniu oraz dodatkowo na łamaniu i udarze przy szybkoobrotowych kruszarkach wyposażonych w karbowany płaszcz kruszący.



**Rys. 4.8.** Budowa kruszarki stożkowej (PSP Engineering)

Obecnie produkowane kruszarki stożkowe (tzw. żyratory) odznaczają się największą wydajnością spośród wszystkich kruszarek do 8500 Mg/h, przyjmując przy tym maksymalną wielkość brył nadawy przekraczającą 1000 mm, a więc kruszarki te mogą pracować na wstępnych stadiach rozdrabniania (rys. 4.3, tab. 4.1). Ich komora robocza jest zbudowana ze stożków przeciwbieżnych (rys. 4.7b). Kruszarki przeznaczone są również do drugiego (rys. 4.9a) i trzeciego stopnia kruszenia, przy czym na etapie końcowym rozdrabniania są stosowane tzw. granulatory stożkowe (rys. 4.9b), które mają krótszą komorę roboczą z prawie równoległymi płaszczyznami stożków w obrębie szczeliny wylotowej. Przestrzenie kruszenia mają zakrzywiony kształt z pionowym obszarem otworu wlotowego, gdzie przez prawie cały okres żywotności elementów kruszenia nie dochodzi do zmniejszania otworu wlotowego i kształtu przestrzeni roboczej. Optymalizacja kształtu przestrzeni kruszenia kruszarek drugiego i trzeciego stopnia kruszenia podnosi jakość końcowego produktu (zawartość ziarn nieforemnych poniżej 20%) oraz obniża koszty eksploatacji.



**Rys. 4.9.** Komora robocza kruszarki stożkowej KDC firmy PSP Engineering a.s. do kruszenia:  
a) na drugim stadium; b) na trzecim stadium (granulator) (PSP Engineering)

Obecnie budowane maszyny standardowo są wyposażone w urządzenie hydrauliczne umożliwiające prostą regulację szczeliny wylotowej, łatwe opróżnienie przestrzeni kruszenia po zasypaniu i chroniące przed uszkodzeniem wewnętrznej części kruszarki w wypadku nadmiernego przeciążenia lub przedostania się zbyt twardych materiałów.

Kruszarki stożkowe są przeznaczone do kruszenia twardych, ścieralnych, nieklejących się surowców (np. kwarc, granit, bazalt) o wytrzymałości na ściskanie do 400 MPa. Stopień rozdrobnienia w kruszarkach stożkowych do wstępnego rozdrabniania dochodzi do 8 (przeciętnie wynosi 4), natomiast do rozdrabniania średniego najczęściej 4–7, ale może dochodzić do 15.

Najważniejszymi parametrami kruszarki stożkowej są kąt uchwytu, prędkość obrotowa głowicy oraz szczeliny wylotowa i wlotowa, które wpływają na wydajność maszyny.

#### 4.1.3. Kruszarki wirnikowe udarowe młotkowe i listwowe

Wspólną cechą procesów rozdrabniania w kruszarkach wirnikowych jest wyraźna przewaga działania rozdrabniającego – udaru, które pociąga za sobą dużą selektywność rozdrabniania. Następuje zatem destrukcja materiałów jednorodnych petrograficznie wzdłuż łupliwych powierzchni naturalnych lub osłabień spójności nabytych we wcześniejszych stadiach rozdrabniania, a także rozdrabnianie w pierwszej kolejności ziarn spękanych, zwietrzałych itp. Dzięki zaletom kruszarek maszyny te mogą być wykorzystane w wielu procesach, takich jak np. (Gawenda 2010c, d):

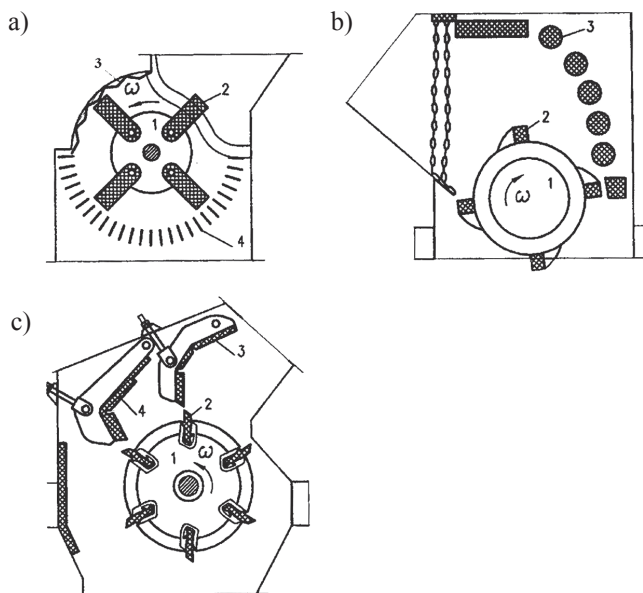
- wzbogacanie kruszyw mineralnych w wyniku pracy przesiewaczy oczyszczających ziarna z oblepionych zanieczyszczeń ilastych podczas udaru (rozpylenie iłu, gliny),
- homogenizacja materiałów ziarnistych, polegająca na przeprowadzeniu do klas drobniejszych wyłącznie ziarn zwietrzałych, spękanych o nieregularnych kształtach; zjawisko to wykorzystuje się w przypadku produkcji kruszyw budowlanych (proces uszlachetniania),
- wstępne wzbogacanie surowców, polegające na odseparowaniu bezpośrednio po procesie rozdrabniania klas ziarnowych dostatecznie wzbogaconych lub zubożonych w składniki użyteczne w przypadku kruszyw lub węgla albo skierowaniu rudy do wstępnego procesu wzbogacania,
- suszenie surowca podczas rozdrabniania wraz z klasyfikacją w obiegu zamkniętym.

Podział technologiczny procesów rozdrabniania w kruszarkach wirnikowych odzwierciedla podział konstrukcyjny kruszarek wirnikowych udarowych, wśród których wyróżnia się młotkowe i listwowe. W kruszarkach młotkowych rozdrabnianie odbywa się głównie przez uderzenie ziarn nadawy młotkami wahliwymi zamocowanymi na obracającym się wirniku, a następnie uderzenie ziarn o płyty odbojowe i ruszty. W kruszarkach listwowych rozdrabnianie następuje przez uderzenie ziarn sztywnymi listwami zamocowanymi również na obracającym się wirniku, a następnie o płyty odbojowe.

W kruszarkach udarowych (rys. 4.10) proces kruszenia ma charakter dynamiczny, ponieważ prędkość obwodowa elementów roboczych, tzn. młotków i bijaków, osiąga wartości w zakresie 50–60 m/s. W kruszarkach młotkowych (rys. 4.10a) młotki 2 osadzone są wahliwie na tarczy 1 zaklinowanej na wale napędowym. Części ścian korpusu wyłożone są segmentami płyt pancernych 3 odpornych na ścieranie. Proces kruszenia jest wyjątkowo złożony. Ziarna materiału uderzane są przez szybko wirujące młotki, odrzucone na płyty pancerne i ponownie rozbijane przez młotki. Cząstki dostatecznie pokruszone przedostają się na zewnątrz przez ruszt 4, inne o większych wymiarach znów są zawracane.

W kruszarkach bijakowych (listwowych) (rys. 4.10b) elementy robocze – bijaki 2, będące odpowiednio ukształtowanymi listwami, są przymocowane sztywno do wałów lub tarcz 1. Na schemacie kruszarki „Humboldt” (rys. 4.10b) elementami pancernymi jest układ prętów 3 odgrywających rolę rusztu.

Rysunek 4.10c przedstawia kruszarkę „Andreas-Hazemag”, w której położenie układu płyt odbojowych 3 i 4 można regulować. Położenie powinno być takie, aby odrzucone ziarna trafiały na powierzchnię tych płyt pod kątem zbliżonym do prostego.



**Rys. 4.10.** Schematy kruszarek udarowych (Zawada 1998): a) kruszarka młotkowa; b) kruszarka bijakowa „Humboldt”; c) kruszarka bijakowa „Andreas-Hazemag”

Prezentowane urządzenia kruszące są typowymi przedstawicielami wielu kruszarek i mimo iż na rynku coraz częściej pojawiają się nowe, to z reguły charakteryzują się podobnymi zasadami działania i rozwiązaniami konstrukcyjnymi.

Wydajność kruszarek młotkowych zależy od właściwości rozdrabnianego materiału, liczby obrotów wirnika, jego wymiarów, kształtu i masy młotków oraz stopnia rozdrobnienia.

Stopień rozdrobnienia kruszarek młotkowych dochodzi do 40, jednak najlepiej pracują one przy stopniu rozdrobnienia około 10.

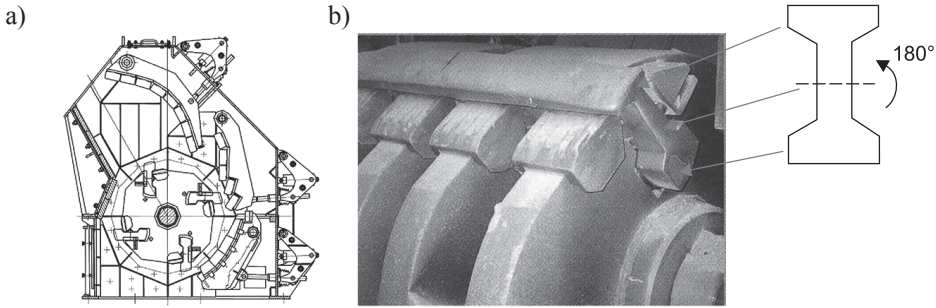
W nowoczesnych kruszarkach młotkowych wydajność dochodzi do 2500 Mg/h. Takie kruszarki mogą być przeznaczone do jednostadialnego kruszenia miękkich i średniotwardych surowców, np. wapienia, gipsu oraz różnych surowców z zawartością kleistych glin i ilów. Często są jedynymi kruszarkami w linii technologicznej w przemyśle cementowym, gdzie zwykle pracują przed młynami kulowymi. Istnieją różne rozwiązania konstrukcyjne kruszarek. Często dla materiałów o wysokiej wilgotności dochodzącej do 50% i zawartości składników ilastych do 25% lub surowego kaolinu do 25% są stosowane kruszarki młotkowe z wałcami. Dobrym rozwiązaniem konstrukcyjnym charakteryzują się również kruszarki młotkowe rewersyjne, w których wirnik może się obracać w obu kierunkach, co daje możliwość obustronnego, równomiernego ścierania się młotków bez konieczności ich odwracania. Układ obudowy nowoczesnych kruszarek umożliwia prosty i szybki dostęp do elementów roboczych kruszarki, zaletą jest także duża zmienność układu przestrzeni wewnętrznej kruszarki, łatwo jest również zmieniać trajektorię lotu ziarna od młotka do płyt odbojowych, zmieniając kąt nachylenia płyt odbojowych.

Wydajność kruszarek udarowych listwowych dochodzi do 1800 Mg/h i uzależniona jest od prędkości obwodowej listew, liczby listew, długości wirnika, szerokości szczeliny pomiędzy płytami odbojowymi a listwami, kształtu i kąta nachylenia okładzin, właściwości fizyczno-mechanicznych rozdrabnianej nadawy.

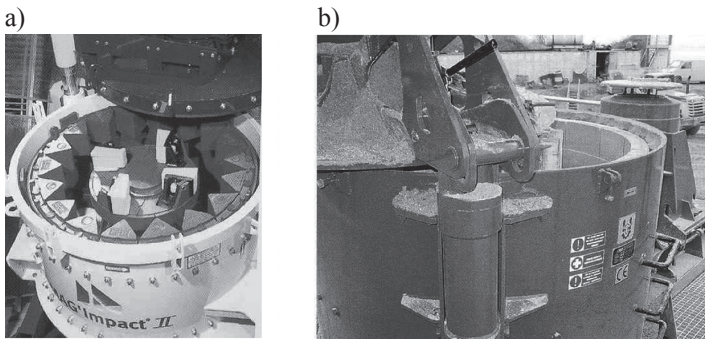
Kruszarki udarowe listwowe są stosowane do materiałów twardych i średniotwardych (przede wszystkim surowce skalne i odpady budowlane), tam gdzie jest wymagana większa miałkość oraz dobra jakość produktu. Materiał jest rozdrabniany w wyniku uderzenia płyt wirujących listew i odbicia od płyt odbojowych i ewentualnie od płyty dolnej – mielącej, umieszczonej pod wirnikiem, regulującej wielkość szczeliny wylotowej (rys. 4.11a). Listwy montowane na wirniku są symetryczne, co daje możliwość ich odwrócenia o 180° w celu przedłużenia żywotności. Zaletą tych maszyn jest produkcja kruszywy o niskiej zawartości ziarn nieforemnych (poniżej 20%) oraz wysoki stopień rozdrobnienia, który może być większy niż w kruszarkach młotkowych i dochodzić do 60.

W celu uzyskania lepszych parametrów kształtu grysów (o wysokiej zawartości ziarn kubicznych) wśród kruszarek udarowych horyzontalnych nastąpił rozwój tzw. kubizerów z pionowym wałem. Z reguły stosuje się je na ostatnich stadiach kruszenia, gdzie ponownie kruszą już przygotowane frakcje. Maszyny te podnoszą zawartość ziarn foremnych w produktach wąskich klas ziarnowych (nawet 0–4 mm) i zaniżają udział wadliwych ziarn z 45% do 15% lub z 70% do 20%.

W zasadzie można wyróżnić dwa rodzaje tego typu kruszarek wertykalnych. Jednym z przedstawicieli, spośród kilku firm produkujących takie maszyny, jest belgijska firma Magotteaux, której produktem jest kruszarka MAG<sup>3</sup>Impact (rys. 4.12a).



**Rys. 4.11.** Kruszarka udarowa ODX firmy PSP Engineering a.s.: a) przekrój kruszarki; b) wirnik kruszarki



**Rys. 4.12.** Kubizer: a) MAG'Impact firmy Magotteaux; b) ODV firmy PSP Engineering a.s. (Magotteaux, PSP Engineering a.s.)

Surowiec w kubizerze kierowany jest do wnętrza za pośrednictwem rękawa podającego i trafia do dystrybutora znajdującego się na środku stołu obrotowego. Wyrzutniki powodują gwałtowne przyspieszenie przemieszczania się ziarn, które trafiają na kowadła rozmieszczone na obwodzie komory kruszenia z odpowiednią energią kinetyczną. Elementy robocze charakteryzują się wysoką odpornością na ścieranie. Kształt kowadła decyduje o kącie kruszenia obrabianego surowca i może być dobrany w zależności od rodzaju kruszonego materiału oraz jego zastosowania. Kowadło Xwin<sup>R</sup> charakteryzuje się wytrzymałością zarówno na ścieranie, jak i na gwałtowne uderzenia. Prędkość stołu obrotowego może wynosić do 75 m/s (tj. około 1400 obr/min). Dobór tej prędkości wpływa bezpośrednio na stopień rozdrobnienia materiału w kruszarce. Geometria kowadeł została tak opracowana, aby udar następował w optymalnych warunkach. Kruszarka tego typu gwarantuje najwyższy stopień sześciennego ukształtowania ziarn oraz stałą granulometrię produktu końcowego, niezależną od stopnia zużycia współpracujących elementów. Wydajność takiego urządzenia dochodzi do 500 Mg/h.

Drugim typem kubizerów jest kruszarka ODV czeskiej firmy PSP Engineering a.s. (rys. 4.12a), która w odróżnieniu od MAG'Impact nie ma na obwodzie kowadeł, lecz gładkie okładziny. Tutaj materiał jest wprowadzany do wirnika, który pod wpływem siły odśrodkowej odrzuca go na kamienną ścianę utworzoną z kruszonego materiału (ODV-S – system kamień-kamień), lub na pancerz (ODV-M – system kamień-metal).

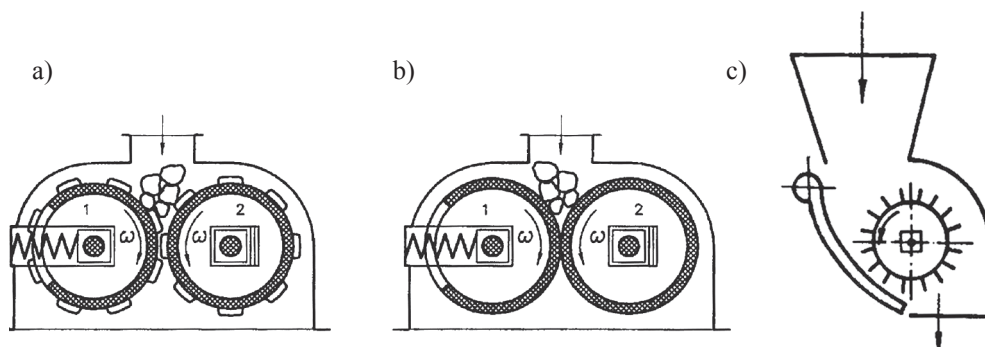


Kruszarki w systemie kamień-kamień używane są w końcowych stadiach technologicznych linii rozdrabniania, gdzie jest wymagana bardzo wysoka kubiczność ziarn produktu. Stopień rozdrobnienia nie przekracza 2. Kruszarki w systemie kamień-metal używane są tam, gdzie również jest wymagana bardzo dobra kubiczność ziarn produktu, z możliwością wyższego stopnia rozdrobnienia (do 5).

#### 4.1.4. Kruszarki walcowe

Kruszarki walcowe przeznaczone są do rozdrabniania materiałów miękkich i średnio-twardych. Najczęściej są stosowane do rozdrabniania odpadów oraz materiałów plastycznych i ilastych. Zaletą takich kruszarek jest stosunkowo duża jednorodność uziarnienia produktu. Niektóre kruszarki mogą pracować w środowisku wilgotnym i zapylnym.

Zasada pracy kruszarek walcowych (rys. 4.13) jest prosta. Walce (gładkie, rowkowane bądź uzębione) 1 i 2 obracają się z prędkościami w kierunku przeciwnym (ku sobie), tak że ziarna wciągane są w przestrzeń roboczą utworzoną między powierzchniami obu walców. Istnieją także kruszarki wyposażone w jeden walec i wklęsłą płaszczyznę roboczą (rys. 4.13c) (Blaschke i in. 1983; Nawrocki i in. 1989; Zawada 1998).



Rys. 4.13. Schematy kruszarek walcowych (Nawrocki i in. 1989; Zawada 1998):  
a) walcowe uzębione; b) walcowe gładkie; c) jednowalcowa

W kruszarkach o walcach gładkich rozdrabnianie ziarn następuje przez ich zgniatanie. Żeby ziarna twardych surowców skalnych mogły być wciągane do przestrzeni roboczej kruszarki, średnica walców gładkich musi być około 20 razy większa od średnicy największych ziarn rozdrabnianych. Kruszarki o walcach rowkowanych i zębatych rozdrabniają ziarna przez łupanie i łamanie połączone z nieznacznym zgniatanie. Można w nich rozdrabniać ziarna większe od jednej dwudziestej średnicy walców, gdyż ziarna są łatwiej wciągane pomiędzy walce z powierzchniami rowkowanymi lub zębatymi. W przypadku kruszarek wyposażonych w walce pracujące z różnymi prędkościami rozdrabnianie następuje dodatkowo przez ścieranie.

Ze względu na prędkość obwodową walców, kruszarki dzielimy na wolnoobrotowe ( $v = 0,5$  m/s), normalnoobrotowe ( $v = 2$  do  $3$  m/s) i szybkoobrotowe ( $v = 4$  do  $6$  m/s). Stopień rozdrobnienia dla kruszarek o gładkich walcach wynosi 3 do 4, natomiast dla kruszarek

o uzębionych walcach dochodzi do 6. W celu podwyższenia wartości stopnia rozdrobnienia oraz zwiększenia wydajności konstruuje się kruszarki wielowalcowe. Wówczas pierwsza para walców służy do rozdrabniania średniego, pozostałe walce do rozdrabniania drobnego.

#### 4.1.5. Wysokociśnieniowe prasy walcowe HPGR

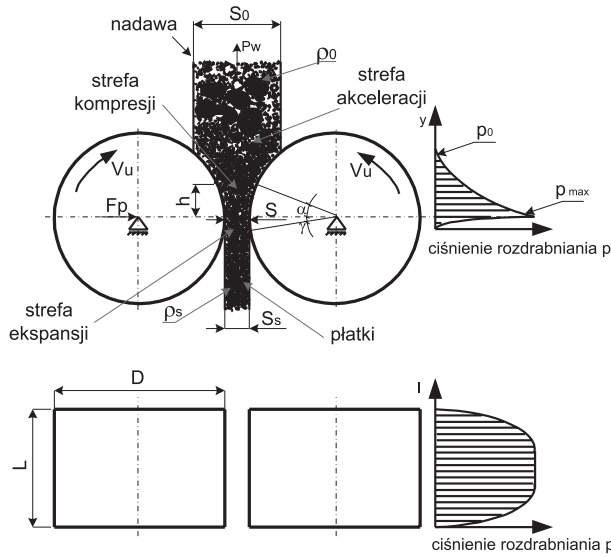
Wysokociśnieniowe prasy walcowe są stosowane do rozdrabniania twardych surowców mineralnych w układach przed domieleniem surowców w młynach, zastępując przy tym inne kruszarki z ostatniego stadium kruszenia lub młyny bębnowe z pierwszego stadium mielenia lub całkowicie eliminując młyny z instalacji (np. przy przemiele wapienia, dolomitu) (Gawenda 2009b; Gawenda, Saramak 2010; Naziemiec i in. 2010c). Nie są natomiast wykorzystywane do produkcji kruszyw gruboziarnistych.

Prasy walcowe oparte są na rozdrabnianiu kompresyjnym w łożu pod wysokim ciśnieniem dochodzącym do 250 MPa, zachodzącym pomiędzy dwoma przeciwnie obracającymi się walcami o jednakowej średnicy  $D$  i prędkości obrotowej  $V$ . Każdy z walców ma własny napęd, a silniki obu walców są ściśle zsynchronizowane co do liczby obrotów. W regulowaną szczelinę pomiędzy walcami, od góry i równomiernie na całej długości (szerokości walców), podawany jest materiał do skruszenia przez sprasowanie. Ciśnienie prasowania ma wytworzyć w warstwie i tworzących ją pojedynczych ziarnach w warunkach skrópowanych naprężenia przekraczające strukturalną wielkość ich oporu na rozdrobnienie (ściskanie, zgniatanie). Zagęszczane ziarna w łożu między walcami przekazują sąsiednim ziarnom energię kruszenia, powodując coraz większe upakowanie materiału w jednostce objętości i zmianę z początkowej gęstości nasypowej łoża (np. 1,65 g/cm<sup>3</sup>) znajdującego się w gardzieli kruszarki do nowej gęstości rzeczywistej (objętościowej) (np. 2,45 g/cm<sup>3</sup>) nowo powstałych brył. Takie płatki mają gęstość rzeczywistą o 10–20% mniejszą od gęstości rozdrabnianego materiału (Schönert 1985; Daniel, Morell 2004; Unland, Kleeberg 2006).

Formowana przez podajnik warstwa materiału o grubości  $S_0$  i gęstości początkowej  $\rho_0$  po grawitacyjnym wejściu w obszar oddziaływania walców podlega najpierw zagęszczeniu (rys. 4.14). Stopień zagęszczenia charakteryzuje rosnąca wartość stosunku grubości  $S_0$  materiału przed wejściem w szczelinę wylotową do grubości  $S_s$ , czyli materiału po wyjściu ze szczeliny wylotowej, a także stosunek osiągniętej w tym miejscu przez materiał gęstości  $\rho_s$  do gęstości  $\rho_0$ . Sumaryczną wielkość stopnia zagęszczenia materiału w prasie określa równanie:

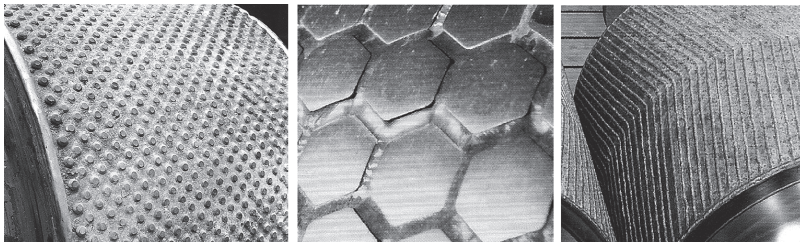
$$S_z = \frac{S_0}{S_s} = \frac{\rho_s}{\rho_0} \quad (4.1)$$

Z chwilą osiągnięcia przez materiał gęstości ograniczającej możliwość dalszego zagęszczenia się na skutek zmiany wzajemnego położenia ziarn wobec siebie w warstwie pojawia się ciśnienie zwrotne  $P_w$  wypychania ziarn z przestrzeni między walcami. Negatywny wpływ tego ciśnienia równoważony jest odpowiednim rozproszeniem i ukierunkowaniem przenoszenia sił nacisku z powierzchni walców do warstwy materiału. Rozproszenie i ukierunkowanie tych sił osiąga się przez odpowiednie ukształtowanie powierzchni walców (rys. 4.15). Dobrane odpowiednio powierzchnie również eliminują poślizg, dzięki czemu zmniejsza się straty energii (zamiany na ciepło), a zwłaszcza ogranicza zużycie okładzin walców.



Rys. 4.14. Schemat zasady działania prasy walcowej (Gawenda 2009b)

Autorzy prac (Unland, Kleeberg 2006; Naziemiec i in. 2010c) wyróżniają trzy etapy w procesie zgniatania materiału w prasach walcowych (rys. 4.14). Na początku występuje etap akceleracji, czyli wstępnego zagęszczania się warstwy materiału przy bardzo niskim zużyciu energii. Później zanik możliwości wzajemnego przemieszczania się ziarn wywołuje pojawienie się i stopniowy wzrost oporów ścinania. Warstwa ta staje się coraz bardziej stabilna i podatna na przenoszenie sił zgniatania w kierunku powierzchni walców. Opór ścinania przewyższa wielkość ciśnienia wypychania i w efekcie ziarno zgniata ziarno – jest to tzw. etap deformacji, w wyniku którego kształtuje się nowy, umiarkowanie luźny skład ziarnowy zgniatanego materiału. Kolejny etap prasowania warstwy (kompresji), przebiegający w obszarze w kierunku narastającego zbliżenia walców, zasadniczo nie tworzy już ziarn nowych, ale wskutek wysokiego ciśnienia prasy, w ziarnach wcześniej utworzonych wywołuje defekty tekstury (mikrorysy, pęknięcia), które w obszarze ekspansji (narastające oddalanie się powierzchni walców) może się objawić powstawaniem nowych ziarn. Jeżeli to nie nastąpi, defekty te ujawnią się w młynie domielającym w wyniku poprawy mielności zgniecionego materiału.



Rys. 4.15. Widok różnych okładzin walca (Koeppern i Humboldt Wedag)



Produkt wychodzący z pras walcowych nie jest sypki, co jest charakterystyczne dla tego procesu, lecz tworzy zwarte sprasowane agregaty ziarn w postaci płatków (rys. 4.16). Jeżeli prasa współpracuje z młynem domielającym, to zjawiska agregatywacji nie mają praktycznego znaczenia. Jeżeli prasa walcowa jest urządzeniem dającym produkt przydatny do wyseparowania produktu finalnego, wówczas opuszczając ją materiał należy poddać dezagregatywacji, np. na przesiewaczu, i skierować do separatora z zawrotem.



**Rys. 4.16.** Chińska ruda złota przed rozdrobnieniem (z lewej), po rozdrobnieniu w HPGR (w środku), po ściśnięciu płatków w dłoni (z prawej) (fot. T. Gawenda)

Wysokociśnieniowe prasy walcowe HPGR (oraz ich pochodne konstrukcje typu HRC produkowane przez Metso Minerals) w Polsce obecnie cieszą się dużym zainteresowaniem, mimo iż są wykorzystywane tylko w przemyśle cementowo-wapienniczym. W ostatnim czasie powstało wiele publikacji i zrealizowano prace badawcze pod kierownictwem D. Saramaka i T. Gawendy, dotyczące możliwości zastosowania takich urządzeń w przygotowaniu rud do procesu wzbogacania m.in. w O/ZWR KGHM Polska Miedź S.A. (Gawenda i in. 2009; Saramak 2011a, b; Saramak i in. 2013; Saramak i in. 2014). Badania na polskich rudach miedzi wykazały wiele korzyści wynikających z zastosowania takich urządzeń na ostatnich stadiach kruszenia i jednocześnie z eliminacji młynów prętowych, co może usprawnić proces technologiczny pod względem zmniejszenia zużycia energii nawet o 10–20%, zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych o ok. 10% czy potencjalnego zwiększenia uzysku miedzi w procesie flotacji o ok. 1% ze względu na selektywne uwalnianie składników użytecznych rud miedzi.

## **4.2. Innowacyjne rozwiązania konstrukcyjno-eksploatacyjne kruszarek**

Obecnie przy budowie nowych kruszarek zwraca się uwagę na ich innowacyjność. Najczęstszym uzasadnieniem technicznej i technologicznej innowacyjności wynikającej z budowy konstrukcyjnej oraz możliwości eksploatacyjnej urządzenia są odpowiednie parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne kruszarki wpływające na wysoką jakość produktów, stan otoczenia podczas eksploatacji czy żywotność maszyny.

Niewątpliwie najbardziej uciążliwymi czynnikami podczas eksploatacji każdej maszyny są zapylenie, hałas i drgania. Czynniki te uznawane są za szkodliwe dla operatora maszyny, osób znajdujących się w pobliżu i środowiska naturalnego. Zatem konstrukcje maszyn zostały starannie przemyślane, aby zmniejszyć wszelkie niekorzystne oddziaływania na otoczenie. Na przykład kruszarki wyposażone są w układ usuwania pyłu wraz z hydraulicznie napędzaną pompą wodną i przenośnik taśmowy z czujnikami dla produktów rozdrobnionych. Takie rzadko dotychczas stosowane rozwiązanie pozwala do kilkudziesięciu procent zmniejszyć zapylenie powstające u źródła przez zraszanie pyłów wodą oraz dostosowanie wysokości spadku materiału z wysięgnika taśmociągu na samochód lub zwałowisko. Ma to szczególne znaczenie dla okolicznych mieszkańców, gdy mobilne urządzenie będzie przerabiać np. odpady budowlane w miejscu ich powstania (Gawenda 2009c).

Znakomitym rozwiązaniem i udogodnieniem dla obsługi jest wyposażanie maszyn kruszących i przesiewających w wagi taśmowe montowane na wysięgniku głównym, ponieważ eliminuje to niepotrzebne przejazdy samochodów ciężarowych do stanowiska wagi lub załadunek kruszywa za pomocą łyżki ważącej przez ładowarkę. Rozwiązanie to skraca czas realizacji pracy, zmniejsza liczbę zaangażowanych maszyn (a tym samym ogranicza hałas i zanieczyszczenia gazowe), zmniejsza emisję pyłów do powietrza w wyniku przeładunku.

Niewątpliwie innowacyjnym rozwiązaniem maszyn mobilnych jest wyposażenie ich w pilota obsługującego maszynę z odległości kilkunastu metrów, dzięki czemu operator nie jest narażony bezpośrednio na hałas i wibracje powstające podczas eksploatacji.

Również hydrauliczny (młot) łamacz kamienia umożliwia sprawniejszą obsługę maszyny w przypadku przytykania się gardzieli nadmiernymi gabarytami nadawy. Wysięgnik ten obsługiwany jest przez urządzenie zdalnie sterujące, co pozwala operatorowi na zachowanie bezpiecznej odległości. Jeszcze ciekawszym rozwiązaniem jest zastąpienie młota hydraulicznego wałem mimośrodowym z rewersyjnymi obrotami, jak ma to miejsce w mobilnych kruszarkach szczękowych. Dawniej nad kruszarką stacjonarną znajdowała się kula na wysięgniku (dźwigu), która była spuszczana na zakleszczony urobek. Coraz częściej w kruszarkach mobilnych wraca się do zasilania wału mimośrodowego wraz z kołem zamachowym bezpośrednio z silnika za pomocą przekładni prasowej, rezygnując z silnika hydraulicznego, co tłumaczy się niezawodnością i prostotą rozwiązania.

Ciekawostką w nowoczesnych urządzeniach jest również możliwość montażu pompy paliwowej ułatwiającej czerpanie prosto do zbiornika paliwa maszyny paliwa ze źródła znajdującego się w większej odległości. Jest to rozwiązanie bardzo przydatne w przypadku eksploatacji urządzenia na trudnym i niebezpiecznym terenie.

Na przedłużenie żywotności maszyny bardzo duży wpływ ma hydrauliczny system ostrzegania przed przeciążeniem kruszarki w przypadku przedostania się do niej materiałów twardszych niż surowce skalne. W kruszarkach szczękowych takie rozwiązanie powoduje cofnięcie się wahacza na siłownikach i uchronienie okładzin szczęki przed zniszczeniem. Dotychczas podobne rozwiązania były stosowane tylko w bardziej zaawansowanych technologicznie i drogich kruszarkach stożkowych czy udarowych.

Innowacyjnych rozwiązań w budowie kruszarek wirnikowych z wałem poziomym można się doszukać m.in. w kruszarkach z serii H-CI (Hard Impact Crusher), któ-

re mają odpowiednie ukształtowanie komory roboczej, gwarantujące wielokrotne rozdrabnianie, wraz ze specjalnym profilem listew udarowych zapewniającym efekt samoostrzenia ich krawędzi (MRC Doltech 2007). Ważnym atutem kruszarek mobilnych jest możliwość tworzenia bezpośredniego zawrotu materiału do kruszarki, co korzystnie wpływa na jakość kruszyw.

Nowoczesny park maszynowy kruszarek wzbogacony został również w system zwiększający bezpieczeństwo, czego przykładem mogą być kruszarki udarowe Nordberg serii NP (Metso Minerals 2009). Firma Metso, mająca ponad ćwierć wieku doświadczeń w rozwoju kruszarek udarowych, opracowała serię NP o wyjątkowym połączeniu wytrzymałej konstrukcji wirnika, materiałów eksploatacyjnych i konstrukcji komory kruszenia. Metso wprowadziło nowy sposób unieruchamiania wirnika (system bezpiecznej rotacji wirnika). Jest on stosowany w odniesieniu do wszystkich kruszarek, co stanowi wyraz pewnej polityki firmy mającej na celu rozwijanie nowych, bezpieczniejszych rozwiązań w odpowiedzi na zapotrzebowanie rynku. Nowy system służy do pozycjonowania wirnika podczas prac konserwacyjnych takich jak wymiana listew udarowych czy regulacja płyt łamacza. Niewątpliwą zaletą jest możliwość pozycjonowania wirnika wewnątrz kruszarki bez udziału człowieka.

Po raz pierwszy zaprezentowana prawie dekadę temu przez firmę Hazemag kruszarka rewersyjna udarowa listwowa typu AP-VM wykazała się w wielu praktycznych i najprzeróżniejszych zastosowaniach swoją elastycznością i efektywnością. Kruszarka udarowa posiada pionowy wlot, a symetryczna budowa kruszarki umożliwia prawo- i lewoobrotową pracę wirnika. W wyniku procesu zużywania się krawędzie kruszące listew udarowych ulegają zaokrągleniu, co powoduje także zmiany w produkcie finalnym. Gdy promień będzie większy lub równy połowie szerokości listwy udarowej, nastąpi wówczas zmiana kierunku obrotów wirnika. W takim wypadku listwy udarowe znów będą mieć ostre krawędzie. Tym samym pięć łatwo regulowanych automatycznym układem sterowania HAZtronic parametrów, a mianowicie: prędkość, kierunek obrotów oraz trzy regulowane szerokości szczelin gwarantują jakość produktu na stałym poziomie (Koch 2007). Również ruch rewersyjny wirnika został wykorzystany w kruszarkach młotkowych.

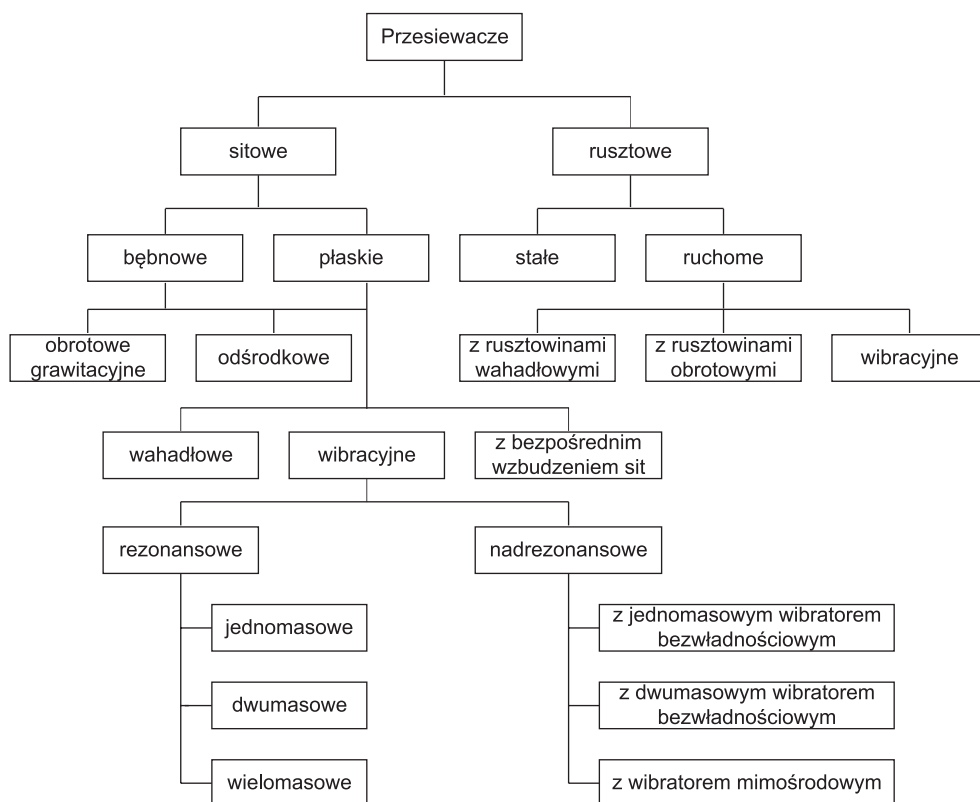
W ostatnich latach z uwagi na postęp w technologii wytwarzania materiałów odpornych na udar i ścieranie, prędkości obracających się wałów uległy podwyższeniu od 10 do 15 m/s. Pamiętać jednak należy, że zwiększenie prędkości liniowej elementów udarowych powoduje szybki wzrost ich zużycia. Z tych powodów bardzo cenna jest możliwość regulacji prędkości obrotowej wirnika kruszarki. Regulacja kąta nachylenia płyt odbojowych umożliwia nie tylko odpowiednie ustawienie szczeliny wylotowej, ale pozwala również znaleźć optymalny kąt uderzenia ziarn nadawy o ściany odbojowe.

Wśród kruszarek udarowych nastąpił także rozwój kruszarek z pionowym wałem, na którym osadzony jest wirnik z odrzutnikami, a na obwodzie ścian zainstalowane są kowadła typu Xwin<sup>R</sup> charakteryzujące się wytrzymałością zarówno na ścieranie, jak i na gwałtowne uderzenia. Kubizery z reguły stosuje się na ostatnich stadiach kruszenia, gdzie ich zadaniem jest ponowne kruszenie odsianych drobnych frakcji. Maszyny te podnoszą zawartość ziarn foremnych w produktach wąskich klas ziarnowych (nawet 0–4 mm), o czym wspomniano w podrozdziale 4.1.3.

### 4.3. Przesiewacze i ruszty współpracujące z kruszarkami

Omawiając urządzenia do rozdrabniania, nie można pominąć przesiewaczy, gdyż urządzenia te stanowią zwarty układ technologiczny kruszarka-przesiewacz lub przesiewacz-kruszarka, którego elementy oddziałują bezpośrednio na siebie i wpływają na efektywność całego procesu produkcji kruszyw (nawet mimo niewielkiego zużycia energii przez przesiewacz).

Przesiewacze i ruszty należą do podstawowych maszyn przerobczych stosowanych w przeróbce surowców skalnych. Na rysunku 4.17 dokonano podziału przesiewaczy, uwzględniając takie kryteria, jak: cechy konstrukcyjne, dynamika układu, ruch materiału, ruch rzeszota, rodzaj napędu itp. Należy pamiętać, że stały postęp techniczny, dążenie do najskuteczniejszego działania zarówno przez zapewnienie najlepszych warunków przebiegu samego procesu, jak i zwiększenie jego wydajności, redukcja zużycia energii i inne czynniki ekonomizacji procesu – doprowadziły do powstania licznych rozwiązań konstrukcyjnych, w dalszym ciągu udoskonalanych (Sztaba 1993; Wodziński 1997). Wprowadzenie coraz nowszych maszyn, wydajniejszych, o doskonalszych konstrukcjach sprawia, że szczegółowa klasyfikacja szybko się zmienia.

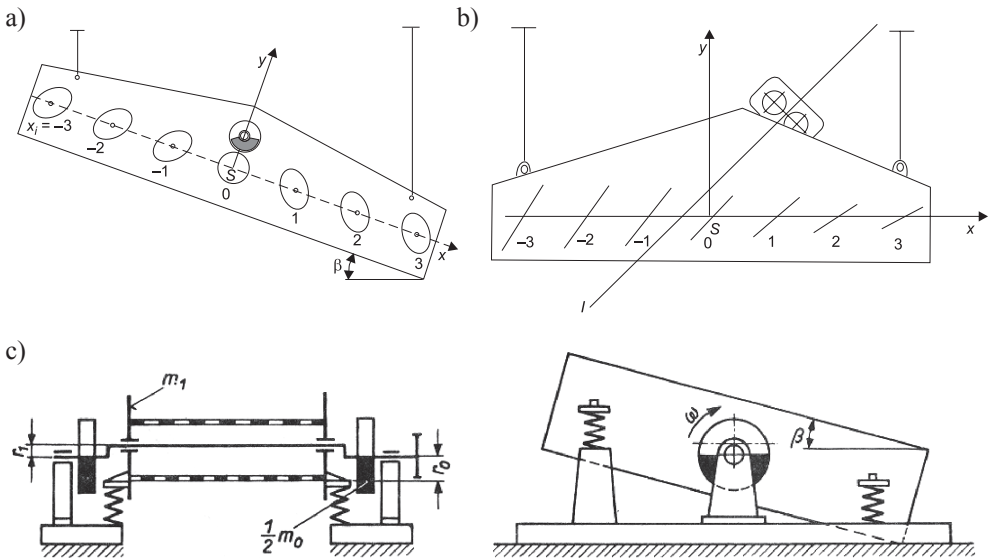


Rys. 4.17. Podział przesiewaczy według Banaszewskiego (1990)

Obecnie najbardziej rozpowszechnione są przesiewacze wibracyjne nadrezonansowe, o drganiach z częstotliwością  $n > 10$  Hz i amplitudach  $A = 2-12$  mm, zapewniające ruch materiału z podrzutem po powierzchni sita.

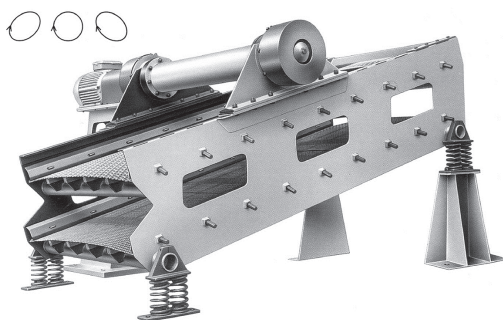
Wśród przesiewaczy wibracyjnych wyróżniamy przesiewacze o drganiach prostoliniowych i drganiach po krzywej zamkniętej. Najbardziej rozpowszechnioną grupą wśród tych drugich są konstrukcje, w których rzeszota wykonują drgania kołowe. W górnictwie skalnym spotyka się wiele przesiewaczy z rzeszotami o drganiach eliptycznych. Kształt trajektorii zataczanych przez punkty leżące wzdłuż sita przesiewacza można kształtować dzięki odpowiedniemu usytuowaniu wibratorów. Przykładowe rozwiązania napędów przesiewaczy wibracyjnych z zaznaczeniem trajektorii ruchu rzeszota przedstawiono na rysunkach 4.18 i 4.19. Typowy przesiewacz składa się z ramy, obudowy, napędu, zawieszenia, rzeszota i sita.

Sito jest głównym elementem przesiewacza, gdyż na nim odbywa się rozdział ziarn. Sito ma otwory, których wielkość, kształt i rozmieszczenie decyduje o składzie ziarnowym produktu, skuteczności procesu i jego wydajności. Jednym z podstawowych parametrów sita jest jego współczynnik prześwitu, czyli stosunek powierzchni czynnej do całkowitej powierzchni sita wyrażony w procentach. Im większy współczynnik prześwitu, tym korzystniej dla procesu. Sita mogą być kratowe (np. tkane, harfowe), wykonane z drutów lub prętów, a współczynnik prześwitu dla tego rodzaju sit dochodzi do 80%. Natomiast sита lite wykonane z blachy lub odlewane cechują się mniejszym współczynnikiem prześwitu i dla otworów mniejszych bądź średnich nie przekracza on z reguły 50%, dla większych otworów kwadratowych prześwit może dochodzić do 70%.



Rys. 4.18. Przesiewacze wibracyjne nadrezonansowe (Banaszewski 1990):

- a) przesiewacz z jednomasowym wibratorem bezwładnościowym; b) przesiewacz z dwumasowym wibratorem bezwładnościowym; c) przesiewacz z wibratorem mimośrodowym



Rys. 4.19. Widok przesiewacza wibracyjnego nadrezonansowego (Banaszewski 1990)

Rozpowszechnione są także sita gumowe z uwagi na odporność na ścieranie i zdolność tłumienia hałasu. Wyróżniamy sita stalowo-gumowe wykonane z blachy lub prętów, na które nawulkanizowuje się gumę, oraz sita gumowe dwuwarstwowe wykonane z dwóch rodzajów gum różniących się właściwościami. Wadą sit gumowych jest niewielki prześwit, około 50%.

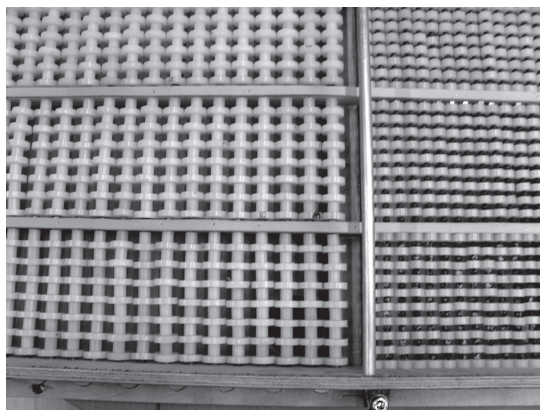
Obecnie szerokie zastosowanie mają sita wykonane z tworzyw sztucznych, z poliuretanu lub gumy (rys. 4.20). Zaletą tego rozwiązania jest bardzo duża wytrzymałość na ścieranie, gładka powierzchnia, długa żywotność, tłumienie hałasu, wydajność, widoczna zwłaszcza w procesie przesiewania na mokro. Sita takie mają budowę modułową, dzięki czemu można wymienić tylko uszkodzoną lub zużytą część powierzchni sitowej. Do wad zalicza się wysoką cenę w porównaniu z sitami gumowymi i mniejszy prześwit w stosunku do sit stalowych i gumowych.



Rys. 4.20. Sita wykonane z tworzyw sztucznych (Metso Minerals)

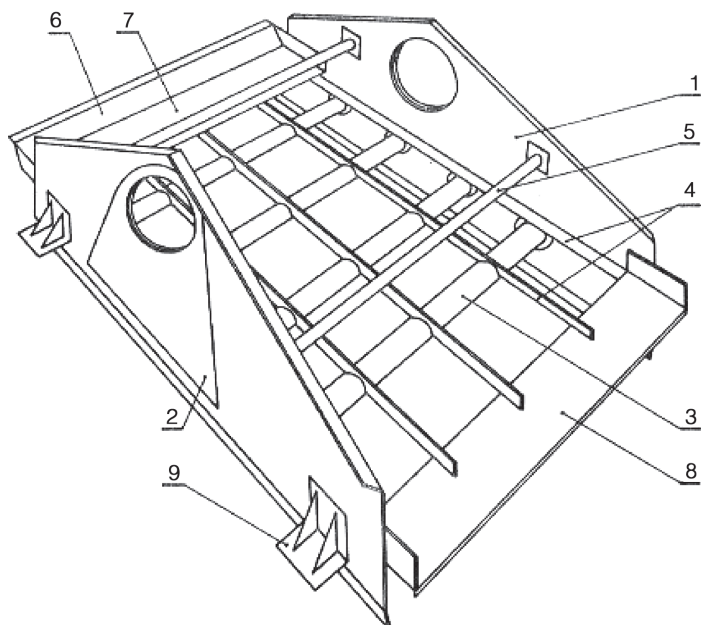
Konkurencją dla obecnie stosowanych sit płaskich blaszanych perforowanych lub poliuretanowych w trudnych warunkach procesu przesiewania może być sito koralowe opracowane w Katedrze Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców AGH oraz zgłoszone do Urzędu Patentowego pod nazwą *Sito do materiałów trudno przesiewalnych* (Gawenda 2013b). Prototyp takiego sita przedstawiono na rysunku 4.21. Charakterystykę tego sita oraz wykorzystanie omówiono w podrozdziale 5.2.4.





**Rys. 4.21.** Fragment sita koralowego (fot. T. Gawenda)

Rzeszoto jest to konstrukcja przestrzenna służąca do zamocowania sita, prowadzenia materiału i przenoszenia drgań na pokład sitowy. W licznych przypadkach zamocowuje się w nim również wibrator. Rzeszoto powinno mieć sztywną konstrukcję i być lekkie. Na rysunku 4.22 przedstawiono przykładową budowę rzeszota przesiewacza nadrezonansowego.



**Rys. 4.22.** Budowa rzeszota przesiewacza nadrezonansowego (Banaszewski 1990): 1 – ściana boczna, 2 – blacha wzmacniająca, 3 – belki pokładowe, 4 – elementy podpierające sito, 5 – belki dystansowe, 6 – ściana tylna, 7 – zsuwnia nadawy, 8 – zsuwnia produktu górnego, 9 – wsporniki

Napęd służy do wywołania drgań przesiewacza. W skład napędu wchodzi: silnik, przekładnia oraz urządzenie do wywołania drgań – wibrator. W przesiewaczach stosuje się powszechnie dwa rodzaje wibratorów: mimośrodowe i bezwładnościowe. Wibratory mimośrodowe znajdują zastosowanie w przesiewaczach rezonansowych oraz nadrezonansowych. Wibratory tego typu wymuszają drgania o amplitudzie zależnej od wymiaru mimośrodów wału napędowego. Wibratory bezwładnościowe stosuje się głównie w przesiewaczach nadrezonansowych. Drgania wymuszone są siłą pochodzącą od wibratora, w przybliżeniu równą sile odśrodkowej pochodzącej od wszystkich mas niewyważonych wibratora (Banaszewski 1990). Wibrator bezwładnościowy może być jednomasowy, składający się z jednego wału, na którym osadzona jest jedna lub kilka mas niewyważonych. Natomiast wibrator dwumasowy składa się z dwóch wałów, na których zamocowane są masy niewyważone. Przesiewacze wibracyjne umożliwiają drgania po krzywej zamkniętej. Najczęściej są to konstrukcje przesiewaczy, w których rzeszota wykonują drgania kołowe i eliptyczne, a trajektorie zataczane przez punkty leżące wzdłuż sita przesiewacza można kształtować dzięki odpowiedniemu usytuowaniu mas niewyważonych wibratora.

Element sprężysty (zawieszenie) służy do podwieszenia lub podparcia rzeszota. Najczęściej są to sprężyny stalowe śrubowe lub sprężyny gumowe. Rzeszota zawieszona jest w ramie, a całość przesiewacza może być zabudowana, zwłaszcza przy drobnym przesiewaniu, aby zapobiec pyleniu.

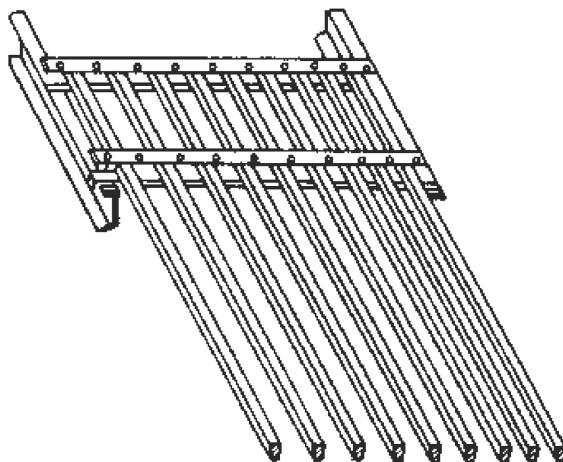
W ostatnim czasie do przesiewania nadawy zawierającej zanieczyszczenia coraz częściej stosowane są przesiewacze obrotowe bębnowe. Stanowią one osobną grupę przesiewaczy ruchomych, mających postać bębnowych walcowych lub stożkowych bądź ostrosłupów wielościennych obracających się wokół własnej osi. Bęben przesiewacza może być podparty na rolkach lub ułożyskowany na wale. Zasadniczą zaletą przesiewaczy bębnowych jest możliwość utrzymania kilku frakcji materiału (przez zastosowanie odpowiedniej liczby sekcji sit) i spokojny ruch, co umożliwia ich zabudowę bezpośrednio nad zbiornikami. Charakteryzują się one także odpornością na zatykanie sit dzięki temu, że materiał uderzający w sitową pobocznicę bębna ułatwia przesiew materiału. W minionych latach ubiegłego wieku ograniczono ich stosowanie z uwagi na małą wydajność spowodowaną pracą tylko niewielkiej części sita ( $1/6$ – $1/8$  jego powierzchni). Obecnie często są wykorzystywane w jednostkach mobilnych mających zastosowanie zwłaszcza w recyklingu odpadów (Kobiałka, Naziemiec 2004; Wodziński 2008).

Przesiewacze rusztowe stosowane są do klasyfikacji przedwstępnej urobku skalnego, do wydzielenia ziarn o największych wymiarach. W związku z tym mają mocną konstrukcję, która umożliwia przyjęcie znacznego obciążenia materiałem. Stosowane są do przesiewania ziarn materiałów  $>80$  mm.

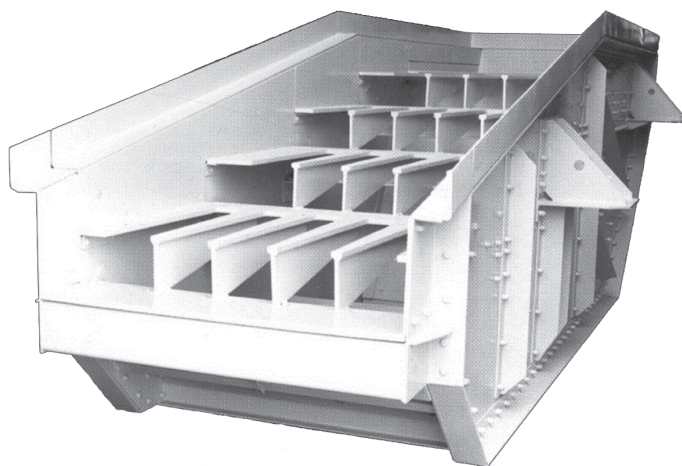
Ruszty dzieli się na podłużne i poprzeczne, zależnie od usytuowania rusztowin w stosunku do kierunku ruchu materiału. Ruszty podłużne mogą być nieruchome lub ruchome, poprzeczne – tylko ruchome (Sztaba 1993).

Ruszty podłużne nieruchome są najprostszymi urządzeniami do przesiewania. Budowane są z umocowanych równolegle rusztowin o rozmaitych przekrojach, tworzących otwory szczelinowe (rys. 4.23). Ruszty te mają nachylenie podłużne pod kątem umożliwiającym ruch nadawy pod wpływem własnego ciężaru. Z pokładami rusztowymi kaskadowymi budowane są również przesiewacze wibracyjne (rys. 4.24).





Rys. 4.23. Ruszt podłużny nieruchomy (Sztaba 1993)



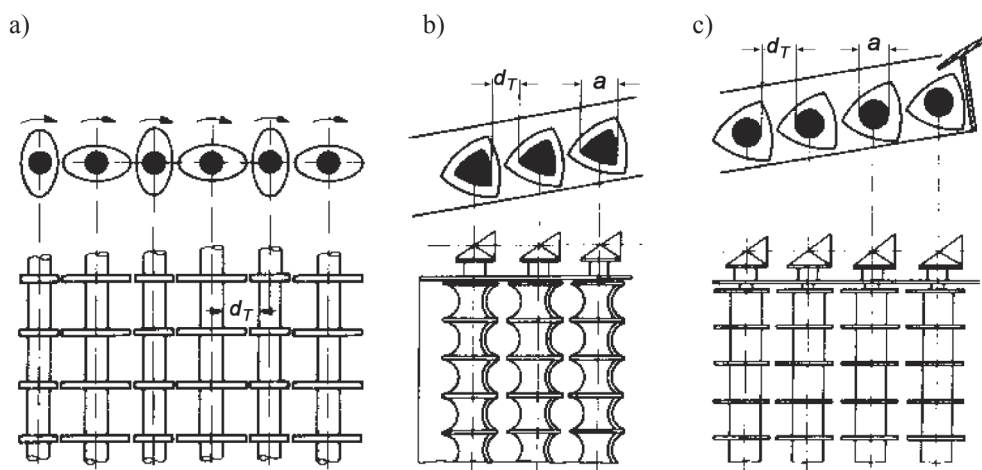
Rys. 4.24. Rzeszoto przesiewacza wibracyjnego z pokładem rusztowym kaskadowym (Kobiałka, Naziemiec 2004)

Rusztzy podłużne ruchome składają się przeważnie z dwóch systemów rusztowin. Co druga rusztowina należy do tego samego systemu. Systemy te poruszają się w ten sam sposób, z reguły mimośrodowo, ale z przesunięciem faz ruchu o kąt  $180^\circ$ . Ziarna podawane na powierzchnie rusztu są dzięki temu przekazywane z rusztowin należących do jednego systemu na rusztowiny należące do systemu drugiego i ulegają odsiewaniu i jednocześnie przesuwaniu wzdłuż rusztu.

Ruszty poprzeczne składają się z rusztowin ułożonych prostopadłe do kierunku ruchu materiału. Są one zaopatrzone w rozmaite występy, tworzące wraz z sąsiednimi rusztowinami otwory o kształcie prostokąta, kwadratu lub rzadziej koła. Rusztowiny wykonują ruchy wahadłowe lub obrotowe.

Ruszty poprzeczne z rusztowinami obrotowymi noszą najczęściej nazwę rusztów wałkowych. Wałki są zaopatrzone w osadzone na nich w równych odstępach kołnierze, które tworzą otwory sitowe. W czasie obrotu rusztowin wokół osi podłużnych ziarna są przenoszone po powierzchni rusztu, przy czym kołnierze spełniają zadanie wałków przenośnika wałkowego. Zanieczyszczenia, które skoncentrowane są w drobnych frakcjach, przedostają się przez szczeliny pomiędzy krążkami i odprowadzane są np. jako nitka brudna.

Aby zwiększyć efekt przenoszenia materiału, kołnierze wykonuje się w postaci tarcz kołowych, w postaci wielokątów, elips lub trójkątów z wypukłymi bokami (rys. 4.25) (Sztaba 1993).



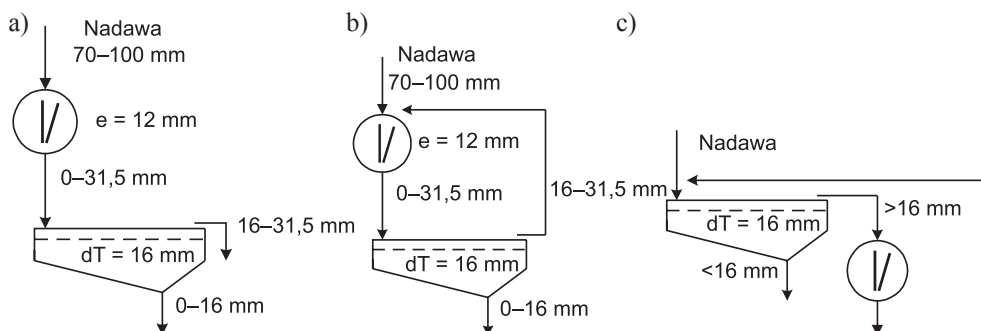
**Rys. 4.25.** Schemat rusztu poprzecznego o kołnierzach: a) eliptycznych; b) trójkątnych z otworami kolistymi; c) trójkątnych z otworami prostokątnymi (Sztaba 1993)

## 5. Rodzaje i modele układów technologicznych wykorzystywanych do produkcji kruszyw łamanych

### 5.1. Podstawowe rodzaje układów rozdrabniania i klasyfikacji

Do podstawowych układów technologicznych rozdrabniania i klasyfikacji zalicza się układy (cykle) otwarte i zamknięte (rys. 5.1), które w zakładach produkujących kruszywa mineralne odgrywają kluczową rolę. Oczywiście jest, że uzyskiwanie kruszyw o wysokiej jakości (np. wysokim wskaźniku kubiczności, niskiej zawartości pyłów, wysokiej odporności na rozdrabnianie LA) związane jest z prawidłowym doбором maszyn rozdrabniających oraz urządzeń współpracujących z nimi (przesiewaczy, klasyfikatorów, płuczek) do właściwości fizyczno-mechanicznych surowców. Ponadto na uzyskiwanie produktów o pożądanych właściwościach wpływają liczba stadiów rozdrabniania, cykle technologiczne, odsiewanie i sterowanie strumieniami przepływu materiału do wybranych maszyn, a więc sposób prowadzenia procesu technologicznego (Gawenda 2010c).

Układy jednostadialne w cyklach otwartych i zamkniętych rozdrabniania i klasyfikacji, które przedstawiono na rysunku 5.1, są najprostszymi układami technologicznymi. Na ich podstawie buduje się bardziej lub mniej skomplikowane układy, takie jak: hybrydowe, wielostadialne, szeregowo, równoległe i mieszane, a także układy selektywne i nieselektywne.



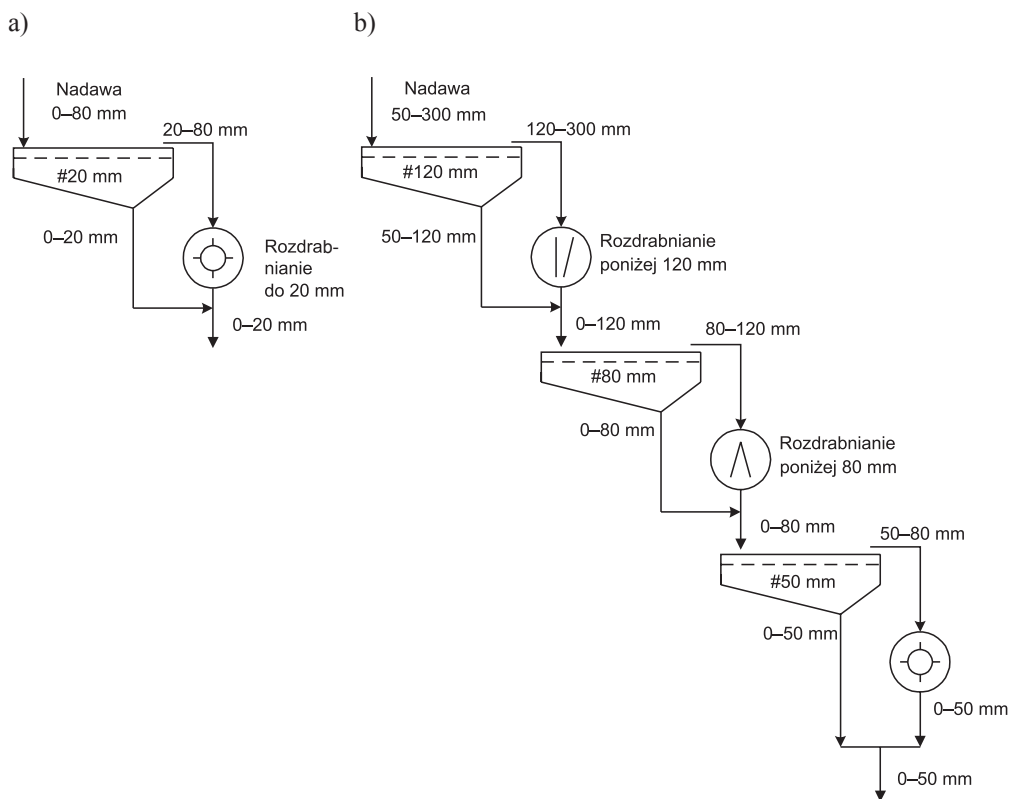
Rys. 5.1. Układy technologiczne: a) układ otwarty; b, c) układy zamknięte

### 5.1.1. Układy otwarte

Układy technologiczne z otwartym obiegiem materiału charakteryzują się tym, że przerabiany surowiec przepływa jednorazowo przez urządzenia i nie ma możliwości jego zawrócenia (rys. 5.1a). Takie układy mają przewagę nad zamkniętymi cyklami pod względem wydajności, ale często produkty charakteryzują się niższą jakością.

Według literatury (Blaschke 1981; Naziemiec, Gawenda 2007a) układy otwarte są przedstawiane jako takie, które mają za zadanie zapobiegać powstawaniu nadmiernej ilości drobnych ziarn i pyłu oraz zminimalizować zużycie energii, zwłaszcza przy dużych stopniach rozdrabniania stosowanych w jednej kruszarce w myśl przeróbczej zasady „nie rozdrabniać nic zbytecznie”.

Schemat przedstawiony na rysunku 5.2a zawiera w układzie jednostadialnym przesiewacz odsiewający drobnoziarnisty materiał z nadawy oraz kruszarkę udarową wirnikową rozdrabniającą grubszą nadawę. Uzyskuje się kruszywo o uziarnieniu ciągłym 0–20 mm, ale układ jest pozbawiony możliwości eliminacji grubszych ziarn pojawiających się w produktach.



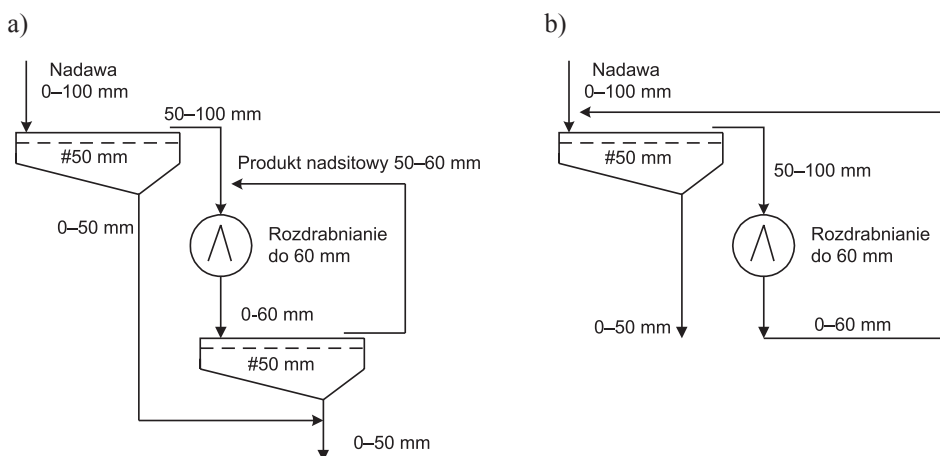
Rys. 5.2. Schemat rozdrabniania według Blaschkego (1981): a) z uprzednim odsiewaniem; b) wielokrotnego

Na rysunku 5.2b przedstawiono schemat wielostadialnego rozdrabniania w układach otwartych. Rozwiązanie stosuje się dla gruboziarnistej nadawy w celu uzyskania dużego stopnia rozdrobnienia przy dużej wydajności produkcji kruszyw. W układzie tym znajduje się na pierwszym stadium kruszarka szczękowa, która rozdrabnia tylko produkt górny przesiewacza, przy czym szczelina wylotowa tej kruszarki jest tak dobrana, że maksymalne ziarno po rozdrobnieniu w tej kruszarce jest równe wielkości maksymalnego ziarna (120 mm) produktu dolnego uzyskanego z przesiewacza wstępnego. Następnie produkty z przesiewacza i kruszarki łączy się ze sobą i ziarna drobne (< 80 mm) odsiewa w kolejnym przesiewaczu. Produkt nadsitowy kieruje się do kruszarki stożkowej na drugim stadium ze szczeliną wylotową ustawioną na wymiar maksymalnych ziarn produktu, równy wymiarowi otworów sita drugiego przesiewacza. Analogicznie kolejne odsiewanie i kruszenie w trzecim stadium przeprowadza się aż do uzyskania produktu dostatecznie drobnego.

### 5.1.2. Układy zamknięte

W procesie produkcji kruszyw grubo- lub drobnoziarnistych o lepszych właściwościach wytrzymałościowych oraz kontrolowanej wielkości uziarnienia stosuje się często układy z zamkniętym cyklem technologicznym. Takie układy również mogą ograniczać powstawanie nadmiernej ilości materiału drobnego (pyłu) oraz zmniejszać zużycie energii.

Na rysunku 5.3a przedstawiono schemat rozdrabniania z produktem nadsitowym, gdzie szczelinę wylotową kruszarki stożkowej ustawia się na wymiar kruszenia większy o kilkanaście lub kilkadziesiąt procent niż żądany wymiar największych ziarn produktu kruszenia. Następnie rozdrobnione kruszywo przesiewa się na sicie o wymiarze otworów równym żądanemu wymiarowi rozdrabnianych ziarn, przy czym produkt nadsitowy zawraca się do kruszarki. Przykładowy układ poza ograniczeniem powstawania pyłów pozwala uzyskiwać kruszywa o równomiernym rozkładzie uziarnienia, np. w przedziale 0–50 mm.



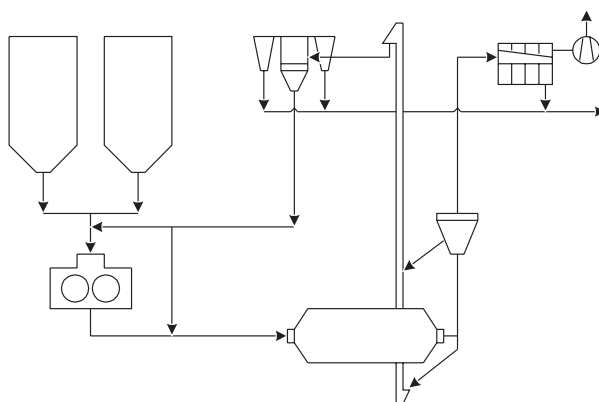
**Rys. 5.3.** Schemat rozdrabniania w cyklu zamkniętym z produktem nadsitowym: a) w układzie kruszarka-przesiewacz; b) w układzie przesiewacz-kruszarka

Wykorzystując przesiewacz o większej wydajności, który odsiewa materiał drobny z nadawy, można zmodyfikować proces technologiczny do układu zamkniętego przesiewacz-krusząrka, kierując produkt skruszony w całości na ten sam przesiewacz (rys. 5.3b).

Wielkość zawrotu materiału może być określana krotnością obiegu, definiowaną jako iloraz ilości materiału zawracanego do ilości świeżej nadawy. Metodyka określania krotności obiegu materiału została omówiona w rozdziale 6 na przykładzie układu i badań zrealizowanych w warunkach laboratoryjnych. Krotność obiegu dla kruszenia materiałów gruboziarnistych w krusząrkach jest niska w porównaniu z mieleniem materiałów drobnoziarnistych i wynosi kilkadziesiąt procent. Przykładowo dla mielenia w młynach na sucho surowców węglanowych krotność obiegu wynosi 200–260%, dla mielenia na mokro rud krotność obiegu przekracza nawet 300%. Wielkość zawrotu jest determinowana rozkładem uziarnienia uzyskiwanych produktów rozdrabniania i wielkością ziarna podziałowego klasyfikatora (Naziemiec, Gawenda 2007a).

### 5.1.3. Układy hybrydowe

Wysoką skuteczność procesu przemiału (efektywniejsze rozdrabnianie materiału) można uzyskać, zmieniając proces z układu otwartego na zamknięty – hybrydowy (Pahl 1993), tak jak w przypadku mielenia twardych surowców mineralnych (rys. 5.4). Przedstawiony układ mieszany składa się z wysokociśnieniowej prasy walcowej (HPGR), która współpracuje z domielającym młynem kulowym. Produkt z młyna jest klasyfikowany w klasyfikatorze powietrznym, skąd produkt niedomielony może być zawracany albo do młyna kulowego, albo do wysokociśnieniowej prasy walcowej, albo jednocześnie rozdzielany na dwa strumienie do obu maszyn. Idea takiego układu hybrydowego jest zaletą, ponieważ zawrót materiału stabilizuje udział procentowy nadawy do prasy i umożliwia łatwiejsze uzyskanie ciśnienia międzyziarnowego w komorze roboczej prasy. Także w przypadku rozdrabniania surowców wilgotnych taka instalacja może być korzystna, gdyż wilgotność materiału (np. z zawrotu po klasyfikacji hydraulicznej lub mechanicznej na mokro) może pozwolić na zwiększenie prędkości obrotowej walców, a zatem wydajności całego procesu, ale niestety często kosztem nadmiernego zużycia okładzin walców.

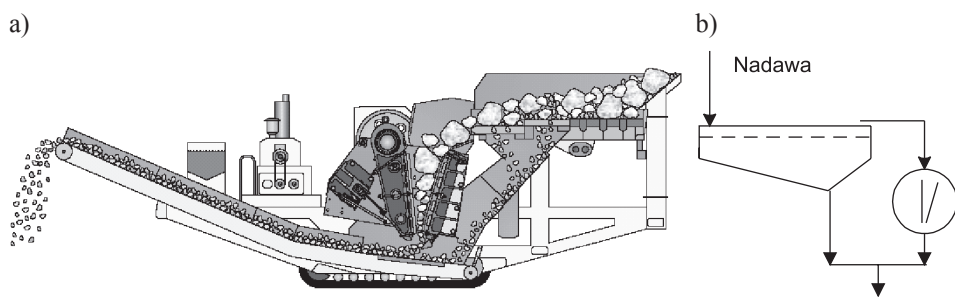


Rys. 5.4. Układy przemielania twardych surowców mineralnych według instalacji z układem hybrydowym typu Polycom firmy Krupp Polysius

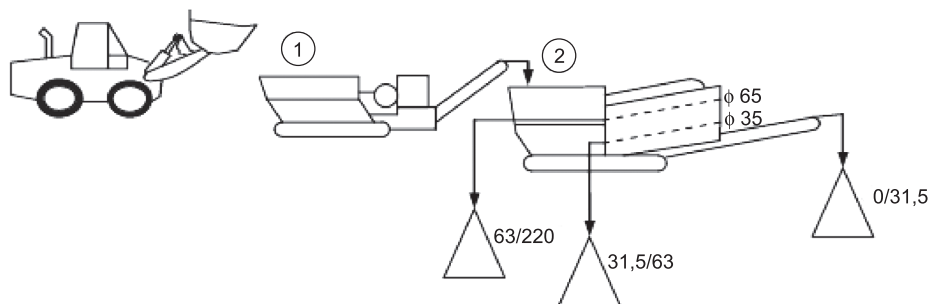
### 5.1.4. Układy jedno- i wielostadialne

Podstawowym efektem procesu rozdrabniania i klasyfikacji jest zmniejszenie wymiaru ziarn nadawy i produktów pośrednich oraz uzyskanie właściwego kształtu i klasy ziarnowej gotowego kruszywa. Do tego celu stosuje się urządzenia rozdrabniające i klasyfikujące, pracujące ze sobą w układzie jedno- lub wielostadialnym (również nazywane układami jedno- i wielostopniowymi).

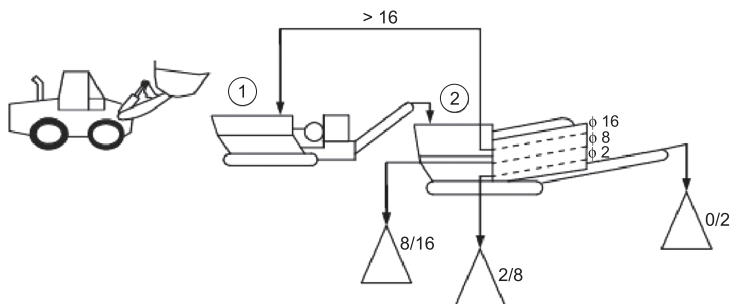
W przypadku produkcji kruszyw naturalnych żwirowych, gdzie nie ma potrzeby rozdrabniania całego wydobytego urobku, ale w wyniku klasyfikacji wstępnej uzyskuje się nadgabarytowe ziarna (otoczaki), stosuje się układy jednostadialne rozdrabniania i klasyfikacji z zawrotem lub bez zawrotu materiału. Również w celu zwiększenia udziału ziarn przekuszonych dla kruszyw żwirowych wystarczy zastosować układ jednostadialny. Układy jednostadialne buduje się nie tylko jako jednostki stacjonarne, ale w obecnych czasach coraz częściej instaluje się jednostki mobilne wyposażone właśnie w jedną tylko kruszarkę i przesiewacz wielopokładowy. Na rysunkach 5.5 i 5.6 przedstawiono kruszarkę pracującą w otwartym układzie rozdrabniania, a na rysunku 5.7 w układzie zamkniętym.



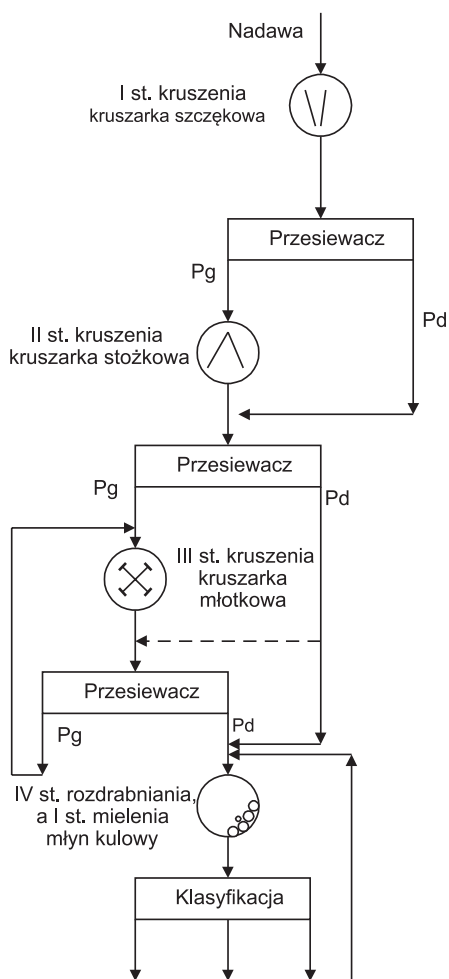
Rys. 5.5. Kruszarka szczękowa mobilna firmy Metso Minerals (a), schemat układu otwartego (b) (DTR Kleemann)



Rys. 5.6. Schemat instalacji mobilnej w kopalni Jazwica IV: 1 – mobilna kruszarka szczękowa w układzie otwartym, 2 – przesiewacz dwupokładowy (Gawenda i in. 2013a)



Rys. 5.7. Schemat instalacji mobilnej w kopalni Jaźwica III: 1 – mobilna kruszarka udarowa w układzie zamkniętym, 2 – przesiewacz trójpokładowy (Gawenda i in. 2013a)



Rys. 5.8. Czterostadialny układ rozdrabniania i klasyfikacji produkcji kruszyw drobno uziarnionych



W przypadku produkcji kruszyw naturalnych łamanych stosuje się przeważnie układy wielostadialne, które składają się ze wstępnego i wtórnego stadium rozdrabniania i klasyfikacji. Liczba stadiów jest uzależniona od wielkości uziarnienia nadawy i wymaganych wielkości produktów kruszyw. Przykładowo, jeżeli nadawa ma wielkość uziarnienia ponad 1000 mm, a celem jest uzyskanie drobno uziarnionych kruszyw (mączek) poniżej 0,1 mm, to układ może być czterostadialny i wtedy składać się będzie z trzech stadiów kruszenia i jednego stadium mielenia (rys. 5.8).

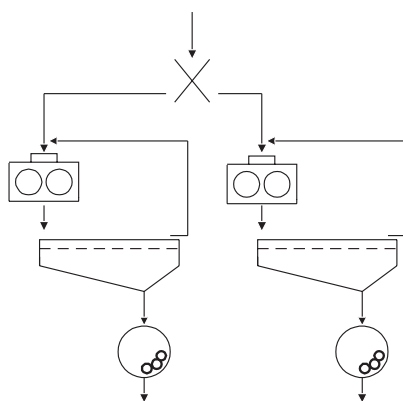
Warto podkreślić, że układy wielostadialne nie muszą być stosowane tylko i wyłącznie do rozdrabniania, ale również samej klasyfikacji np. piasków. Takie instalacje produkcji piasków są oparte na wielostadialnych układach klasyfikacji od przesiewacza do klasyfikatorów hydraulicznych przepływowych lub hydrocyklonach.

### 5.1.5. Układy równoległe, szeregowe i mieszane

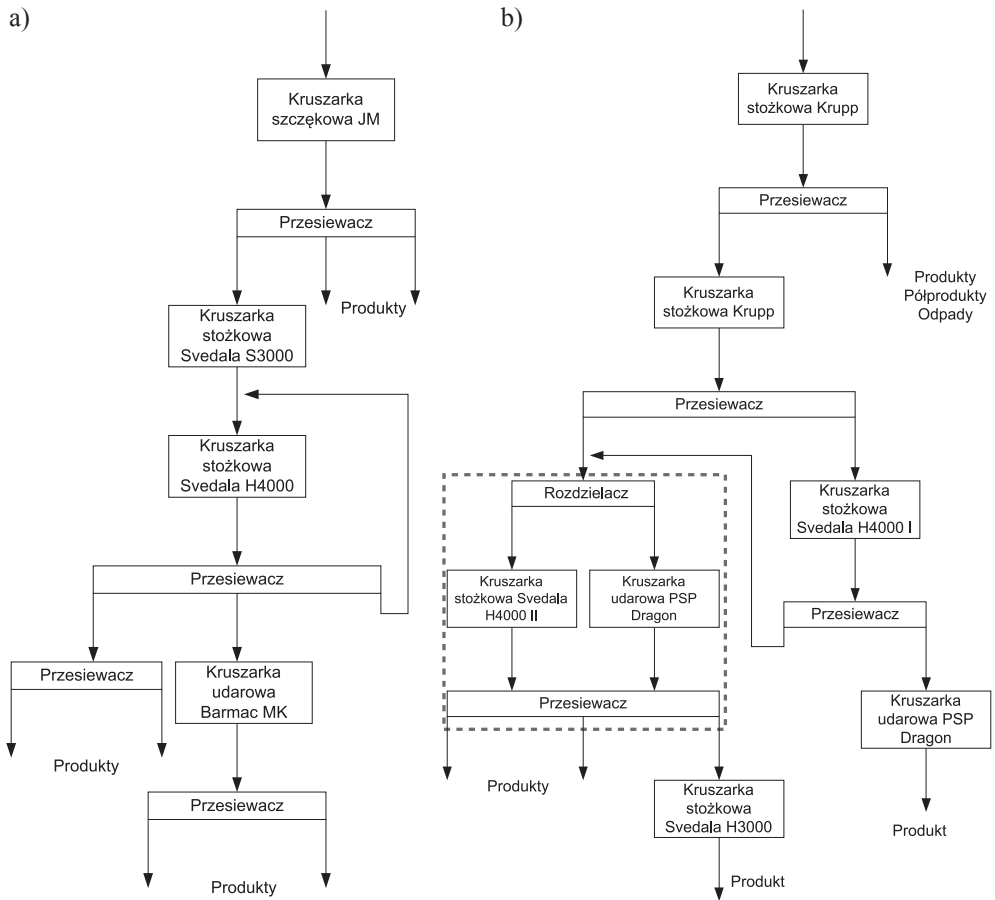
W układach równoległych te same urządzenia pracują z reguły na dwóch lub wielu strumieniach uzyskanych wcześniej na rozdzielaczu (rys. 5.9), natomiast za układy szeregowe uważa się takie, w których urządzenia pełniące te same funkcje, np. rozdrabniające, występują kolejno po sobie (rys. 5.10).

Instalacje układów równoległych stosuje się, gdy zakład realizuje znacznie większe przeroby surowca. Zaletą tych układów jest możliwość prowadzenia ciągłej i stabilnej przeróbki zależnie od sezonowości i potrzeb odbiorców. Również przestoje jednej nitki, związane z obsługą i remontem maszyn, umożliwiają ciągłość pracy na drugiej nitce technologicznej.

Układ równoległy ma również sens, gdy stosuje się rozdział materiału na dwa strumienie i kieruje do dwóch różnych kruszarek w celu uzyskania większej różnorodności parametrów, a następnie oba strumienie łączy się podczas klasyfikacji. Częściowo taki układ pokazano na rysunku 5.10b (oznaczony linią przerywaną) na przykładzie rozdzielania kruszywa bazaltowego do kruszarki stożkowej H400 i udarowej z wałem pionowym Dragon. Cały układ jest przykładem układu mieszane.



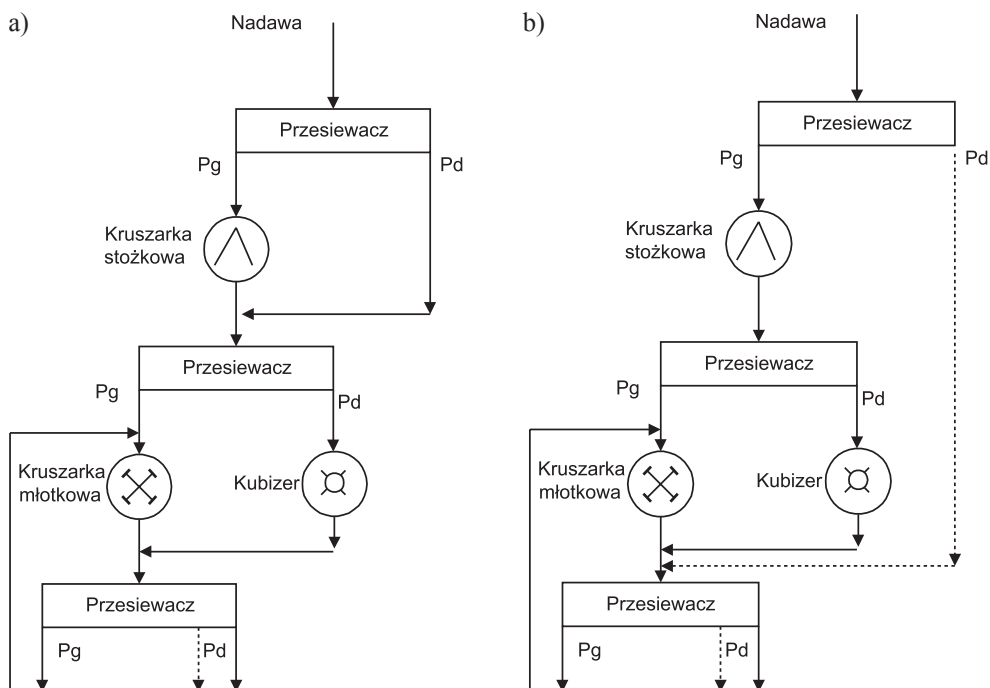
Rys. 5.9. Równoległy układ technologiczny rozdrabniania wapienia w HPGR i młynach



**Rys. 5.10.** Uproszczone schematy technologiczne produkcji kruszyw bazaltowych:  
a) szeregowy (zakład A); b) mieszany (zakład B) (Nowak, Gawenda 2006)

### 5.1.6. Układy selektywne i nieselektywne

Układy selektywne (rys. 5.11a) w przeróbce kruszyw mineralnych polegają na prowadzeniu strumienia materiału w ten sposób, że zawsze produkt dolny czy górny z przesiewania jest kierowany do przynajmniej jednego stadium rozdrabniania z zawrotem. W ten sposób uzyskuje się kruszywo o lepszych parametrach (wyższa zawartość ziarn foremnych), natomiast układ będzie mniej wydajny w stosunku do układu nieselektywnego (rys. 5.11b). Układ nieselektywny polega na odsiewaniu pewnej klasy ziarnowej i kierowaniu jej do klasyfikacji bez ingerowania w jej dokruszanie. Na rysunku 5.11b przepływ strumienia nierozdrabnianego został pokazany liniami przerywanymi. Poza zwiększoną wydajnością procesu uzyskuje się kruszywo końcowe o gorszych parametrach (zwiększona zawartość ziarn nieforemnych). Układ taki może być korzystny w przypadku odsiewania zwietrzałego surowca i całkowitego jego odseparowania od kruszywa łamanego.



Rys. 5.11. Schemat układu: a) selektywnego; b) nieselektywnego

### 5.1.7. Układy pracujące na mokro lub na sucho

Omawiając układy technologiczne produkcji kruszyw budowlanych, należy również zwrócić uwagę na podział takich instalacji, które mogą pracować bez udziału wody (na sucho) oraz z udziałem wody (na mokro). Wybór rodzaju instalacji podyktowany jest właściwościami przerabianego surowca, oczekiwanymi pomiarami produktów końcowych i ich przeznaczeniem.

Instalacje pracujące na mokro są stosowane najczęściej wtedy, gdy:

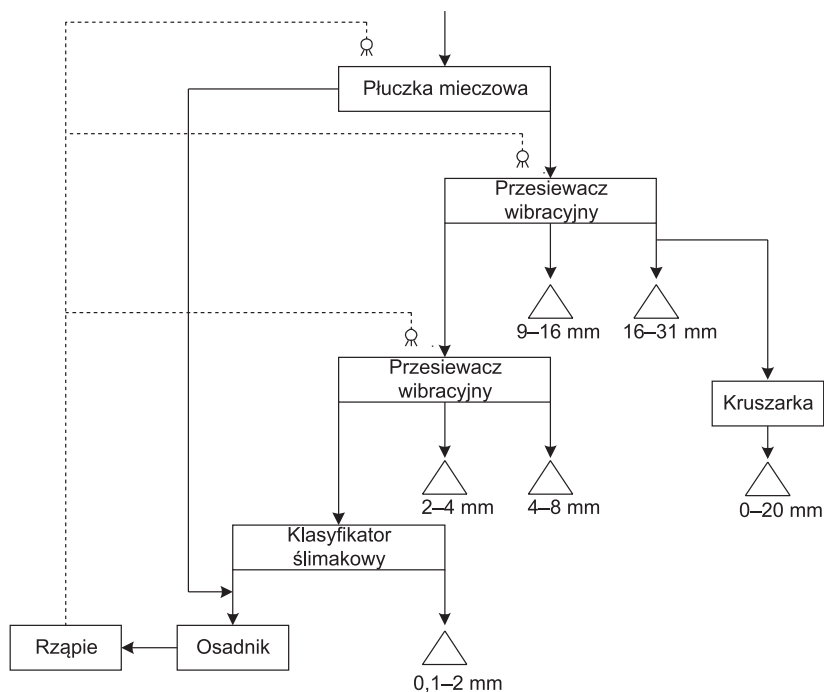
- wydobyć złoża następuje spod wody,
- w nadawie znajdują się zanieczyszczenia ilaste lub pyły, a proces wymaga oczyszczania produktów,
- proces technologiczny wymaga klasyfikacji hydraulicznej drobnoziarnistych piasków,
- proces wymaga przemiału materiału na mokro.

Należy podkreślić, że oszczędności energetyczne w procesach przemiału na mokro w porównaniu z mieleniem na sucho mogą dochodzić nawet do 10%, ponieważ surowiec mokry ma większą podatność na rozdrabnianie (Lowrinson 1974; Pahl 1993). Wzrasta również ostrość rozdziału materiału podczas klasyfikacji na mokro (kruszywa są pozbawione zanieczyszczeń).

Niestety nie zawsze można prowadzić procesy produkcji kruszyw na mokro, co może wynikać z rodzaju i właściwości surowca oraz jego przeznaczenia. Również brak dostępu

do wody czy produkcja kruszyw w okresie zimowym może ograniczać wybór takich układów. Instalacje pracujące na mokro wyposażone dodatkowo w urządzenia odwadniające, osuszające wymagają także realizowania gospodarki wodno-mułowej, która podnosi koszty inwestycji.

Zależnie od rodzaju płukanego surowca i występujących w nim zanieczyszczeń oraz od wymagań stawianych gotowym produktom, rozwiązania technologiczne procesów rozdrabniania, klasyfikacji czy płukania surowców skalnych mogą być bardzo zróżnicowane. Przykładem może być instalacja technologiczna płukania węglanowych kruszyw łamanych (rys. 5.12). Niekiedy w celu uzyskania wypłukanego kruszywa wystarczy zastosować przesiewacz wibracyjny z natryskiem wody, częściej jednak istnieje potrzeba zastosowania urządzenia płuczącego, np. w postaci płuczki mieczowej.



Rys. 5.12. Schemat technologiczny płukania kruszyw łamanych

W zakładach eksploatujących kruszywa żwirowe spod lustra wody spotyka się rozwiązania, w których do płuczki mieczowej kierowana jest określona frakcja kruszywa wydzielona wcześniej na przesiewaczu wibracyjnym. Możliwe jest wówczas zastosowanie kilku płuczek o mniejszej wydajności.

W zakładach produkujących kruszywa łamane ze skał zanieczyszczonych płuczka zwykle jest zainstalowana przed przesiewaczem, w którym wydzielane są poszczególne frakcje kruszyw (Naziemiec, Gawenda 2005). Przykłady takich rozwiązań przedstawiono na rysunku 5.12.

## **5.2. Prezentacja modeli układów technologicznych przeróbki kruszyw w zależności od uwarunkowań złożowych, eksploatacyjnych i produkcyjnych**

Dobór układów technologicznych przeróbki mechanicznej kruszyw mineralnych zależy nie tylko od uwarunkowań produkcyjnych, ale także od uwarunkowań geologicznych złóż surowców skalnych (Nieć 2007a, b).

Surowce skalne, które są przerabiane na kruszywa mineralne i stosowane w budownictwie, występują w przyrodzie w postaci zespołów jednakowych lub różnych minerałów tworzących silnie związane masy skalne lub luźne skupiska. Skąły zwarte stanowią złoża materiałów kamiennych wydobywanych i przerabianych na łamane kruszywa mineralne, natomiast luźne skupiska są produktem naturalnego rozdrobnienia skał zwięzłych. Są to glązy narzutowe, żwiry i piaski pochodzenia polodowcowego, zanieczyszczone łem i gliną lub stanowiące produkty erozji (otoczaki rzeczne, żwiry, piaski). W przeróbce kruszyw stosuje się wtedy produkcję kruszyw łamanych ze żwirów oraz otoczków.

Eksploatacja złóż surowców skał zwięzłych występujących zwykle na powierzchni lub pod cienkim nadkładem na ogół czwartorzędowym, jest stosunkowo prosta. Niekiedy procesy wietrzeniowe skał powodują, że do nadkładu zaliczane są złoża z silniejszymi spękaniami skał o obniżonych właściwościach mechanicznych. Wtedy nadkład o grubszej miąższości bywa zróżnicowany litologicznie i może powodować utrudnienia w jego urabianiu i utrzymaniu stateczności skarp. Nadkład taki może być także przerabiany na kruszywa o gorszych parametrach jakościowych (pospółka) i o niewielkim, tylko lokalnym znaczeniu.

W kamieniołomach stokowych lub stokowo-wgłębnych złoża są eksploatowane sposobem odkrywkowym, z reguły powyżej zwierciadła wód podziemnych. Złoża wyróżniające się dobrą jakością (np. granity, dolomity) wydobywane są też w kamieniołomach wgłębnych. W złożach wydobywanych poniżej poziomu lustra wody dochodzi do przedostawania się wody do wyrobiska, co utrudnia eksploatację.

Także zmienność litologiczna kopaliny i związane z nią zróżnicowanie właściwości fizyczno-mechanicznych zmuszają niekiedy do eksploatacji selektywnej, zapewniającej parametry jakościowe produkowanych kruszyw. Podstawowym utrudnieniem w eksploatacji jest występowanie w obrębie złoża skał słabo zwięzłych. W złożach skał magmowych i metamorficznych są to utwory zwietrzałe lub przeobrażone w wyniku procesów pomagmowych o zmienionych właściwościach fizycznych, często w strefach spękań. W złożach piaskowców stanowią je przerosty łupkowe, a w złożach skał węglanowych – skały objęte procesami wietrzeniowymi krasowymi lub rzadziej (np. w złożach dolomitów) przeobrażeniami hydrotermalnymi. Zmiany właściwości fizycznych, aż do utraty cech surowcowych, występują też w sąsiedztwie stref uskokowych i w strefie przypowierzchniowej, objętej wietrzeniem. Utwory takie często muszą być zaliczone do strat. Utrudniają one też utrzymanie stateczności skarp odkrywki (Nieć 2007a).

W złożach wapieni i dolomitów eksploatację poważnie komplikują zjawiska krasowe, które mogą być trudne do wcześniejszego wykrycia. Są to zwykle kotły krasowe o zróżnicowanych wymiarach i kształtach wypełnione materiałem ilasto-piaszczystym i rumoszem

gliniasto-wapiennym, rzadziej – nieregularne kanały krasowe wypełnione materiałem obcym. Takie zanieczyszczenia muszą zostać usunięte z kruszyw różnymi metodami przeróbki mechanicznej.

Warunki geologiczne złóż żwirowo-piaskowych nie są na ogół przeszkodą, ponieważ złoża występują blisko powierzchni i są łatwo urabialne. Wiele złóż jest częściowo lub całkowicie zawodnionych. Wydobywanie prowadzone jest tylko w warstwie suchej (do zwierciadła wód gruntowych) bądź całego złoża, również w części zawodnionej, spod wody. W przypadku złóż dużych zawodnionych z reguły prowadzona jest eksploatacja spod wody. Zasadniczym jej utrudnieniem są przerosty ilaste i często spotykane w złożach wodno-lodowcowych głązy narzutowe. W dużych złożach piasków podsadzkowych eksploatowanych poniżej zwierciadła wód podziemnych, prowadzone jest odwadnianie złoża. Zwierciadło wody bywa obniżone nieraz nawet do 25 m (Nieć 2007b).

Zasadnicze problemy sprawia eksploatacja kruszywa naturalnego w dolinach rzecznych, z powodu ograniczeń wynikających z konieczności ochrony warunków hydrodynamicznych rzeki oraz ochrony przeciwpowodziowej. Niektóre złoża, zwłaszcza wodno-lodowcowe, odznaczają się dużą zmiennością miąższości, co utrudnia ich pełne wybranie. W przypadku eksploatacji spod wody występować mogą znaczne straty zasobów w spągu złoża. Zwykle wynoszą one od kilku do nawet 20% zasobów przemysłowych, w zależności od rodzaju urządzeń urabiających oraz organizacji wydobywania i jego kontroli. Utrudnieniem w eksploatacji złóż żwirowo-piaskowych jest niekiedy duży udział frakcji piaskowej nieznajdującej zastosowania. Stanowi ona odpad gromadzony w zwalach lub wykorzystywany do wypełniania wyrobiska poeksploatacyjnego (Nieć 2007b).

Forma występowania złóż surowców determinuje zróżnicowanie instalacji układów technologicznych przeróbki kruszyw dla kopalń odkrywkowych (kamieniołomów) oraz żwirowo-piaskowych. Również stopień skomplikowania technologii uwzględnia rodzaj litologiczny surowca i jego właściwości fizyczno-mechaniczne, które są w szczególności charakteryzowane wielkością uziarnienia urobku (ziarno maksymalne lub średnie, punkt piaskowy itp.), zwięzłością, urabialnością i twardością, stopniem zanieczyszczenia surowca i rodzajem zanieczyszczeń oraz przede wszystkim wymaganą jakością produktów pod względem charakterystyki granulometrycznej, kształtu ziarn i czystości gotowych kruszyw (zawartość pyłów i zanieczyszczeń obcych).

Tak więc biorąc pod uwagę uwarunkowania geologiczne złóż przy doborze układów technologicznych, rozróżnić należy trzy podstawowe modele instalacji do produkcji kruszyw (Gawenda 2011a, b):

- 1) ze zwięzłych surowców skalnych o podstawowym uziarnieniu produktów 0–63 (120) mm, w typowych sortymentach handlowych,
- 2) z surowców żwirowo-piaskowych 0–31,5 (63) mm, rozklasyfikowanych na różne frakcje, które również mogą być przekruszone (łamane), ewentualnie z surowców piaskowych 0–1 (2) mm, rozklasyfikowanych na drobne frakcje ziarnowe,
- 3) z surowców silnie zanieczyszczonych, pochodzących ze zwięzłych surowców skalnych lub żwirowo-piaskowych, jako model do produkcji kruszyw uszlachetnionych uwarunkowany jakością produktów.

Rozważania dotyczące doboru układów technologicznych do produkcji kruszyw ze złóż antropogenicznych lub utylizacji odpadów nie będą szerzej przedstawiane, ponieważ układy takie w zależności od uziarnienia nadawy oraz stopnia zanieczyszczeń będą bazować na wyżej wymienionych trzech podstawowych modelach. Natomiast w rozważaniach zwrócono szczególną uwagę na możliwość uzyskiwania kruszyw w zależności od uwarunkowań produkcyjnych, zwłaszcza kruszyw łamanych o szczególnych parametrach jakościowych związanych z kształtem ziarn. Dlatego w rozdziale tym przedstawiono także autorskie rozwiązania modeli układów produkcji kruszyw o ziarnach foremnych i nieforemnych, które mogą być stosowane zarówno w produkcji kruszyw pochodzących z surowców naturalnych, jak i odpadów.

### **5.2.1. Model wielostadialnego układu rozdrabniania i klasyfikacji dla związłych surowców skalnych**

Do urabiania skał celem uzyskania kamienia łamanego wykorzystuje się w górnictwie kruszyw łamanych materiały wybuchowe i metodę strzelania długich otworów (pionowych lub odchylonych od pionu). Otwory strzałowe wykonywane są ze stropu eksploatowanego piętra najczęściej hydraulicznymi wiertnicami udarowo-obrotowymi (Frankiewicz, Głapa 2007a).

Podstawowym sposobem urabiania jest technika strzelania jedno- lub wieloszeregowego z milisekundowym odpalaniem ładunków. Powszechnie stosuje się mechaniczny ładunek materiałów wybuchowych emulsyjnych i granulowanych (np. saletrole) oraz nieelektryczne systemy inicjacji.

Kryterium efektywnego wykonywania robót strzałowych jest uzyskanie odpowiedniego rozdrobnienia oraz prawidłowego kształtu usypu urobku po odstrzale, kształtu spągu i ociosu (Grześkowiak 2007). Ma to szczególne znaczenie dla kształtowania rzędnej poziomu eksploatacyjnego, racjonalnej pracy maszyn ładujących urobek w wyrobisku na środki transportu oraz optymalnego dostosowania nadawy do maszyn przerobczych pracujących na wstępnych stadiach.

W ostatnim czasie prowadzone badania (Rajczakowski, Żołądek 2011) nad zastosowaniem elektronicznego systemu inicjacji typu i-kon wykazały korzyści wynikające ze zmniejszenia emisji drgań sejsmicznych, mniejszego zużycia paliwa lub energii elektrycznej w fazie wstępnego kruszenia, skrócenia czasu pracy kruszarki wynikającego ze wzrostu wydajności wstępnego kruszenia i z większego rozdrobnienia odstrzelonego urobku. Rozdrobnienie to ma także wpływ na obniżenie kosztów remontów maszyn i wydłużenie ich żywotności, co jest istotne w ogólnym koszcie przeróbki surowców. Metoda ta również umożliwia zagospodarowanie tych części złóż, które ze względu na oddziaływanie drgań sejsmicznych nie mogły być eksploatowane.

W krajowych zakładach górnictwa skalnego stosowane są metody urabiania mechanicznego przy użyciu koparek łyżkowych i młotów hydraulicznych, jeśli istnieją duże ograniczenia robót strzałowych. Ograniczeniem w stosowaniu mechanicznego urabiania jest wyższy koszt tych robót w stosunku do kosztu eksploatacji przy użyciu materiałów wybuchowych. Dotyczy to szczególnie urabiania skał o dużej wytrzymałości mechanicznej. Koparki łyżkowe znajdują zastosowanie w eksploatacji kruszyw żwirowych. Wydobyte związłych surowców skalnych metodą urabiania mechanicznego jest stosunkowo niewielkie i dotyczy urabiania miękkich wapieni i chalcedonitu. Prowadzone były też próby mechanicznego urabiania kombajnami frezującymi.

Urabianie mechaniczne wpływa na rozwiązania technologiczne zakładu przeróbczego. W porównaniu z tradycyjną techniką strzałową po urabianiu mechanicznym urobek skalny ma na ogół drobniejsze uziarnienie, a głównie mniejszą ilość brył nadwymiarowych. Sprawia to, że we wstępnych stadiach kruszenia mogą być stosowane mniejsze kruszarki (o mniejszym wymiarze uziarnienia nadawy). Roboty strzałowe mogą być tak prowadzone, aby uzyskiwać urobek o określonym rozdrobnieniu, jednak warunki zalegania złoża sprawiają niekiedy, że nie da się uniknąć brył nadwymiarowych. Ilość i wielkość maksymalnych brył urobku skalnego wpływają na wielkość urządzeń rozdrabniających stosowanych we wstępnym lub pierwszym stadium kruszenia (Bęben i in. 1997).

Załadunek odspojonego od calizny złożowej urobku wykonywany jest za pomocą koparek jednonaczyniowych lub ładowarek na podwoziu oponowym o pojemnościach łyżek na ogół do 5 m<sup>3</sup>. Do rozbijania brył nadwymiarowych najczęściej stosuje się koparki wyposażone w kulę lub w młot hydrauliczny. Jest to jedno z rozwiązań skutecznie ograniczających niekorzystny wpływ na środowisko, spowodowany stosowanym tradycyjnie strzelaniem rozszczepkowym.

Do transportu urobku z wyrobisk do zakładów przeróbczych powszechnie wykorzystuje się samochody samowładowcze o ładowności do około 28 t i przegubowe wozidła o ładowności do około 70 t. W krajowym górnictwie kamienia łamanego urobek transportowany jest na odległość od kilkuset metrów do kilku kilometrów (Frankiewicz, Glapa 2007a).

Przy wyborze układu technologicznego produkcji kruszyw ze zwięzłych surowców skalnych należy kierować się wymogami norm w zakresie kryteriów dotyczących właściwości fizyczno-mechanicznych kruszyw takich jak skład ziarnowy, kształt ziarn, zawartość pyłów i zanieczyszczeń, o których była mowa w rozdziale 2.

Produkcja kruszyw w takim układzie składa się z procesów rozdrabniania, klasyfikacji i ewentualnie płukania i odwadniania w przypadku surowca silnie zanieczyszczanego. Proces rozdrabniania i klasyfikacji w zależności od wielkości uziarnienia nadawy może składać się z kilku etapów (stadiów), tj. wstępnego, kilku wtórnych i końcowego. W wypadku kruszyw zanieczyszczonych w niewielkim stopniu wystarczy zastosować proces klasyfikacji na mokro, który usunie pyły oraz poprawi ostrość rozdziału frakcji ziarnowych.

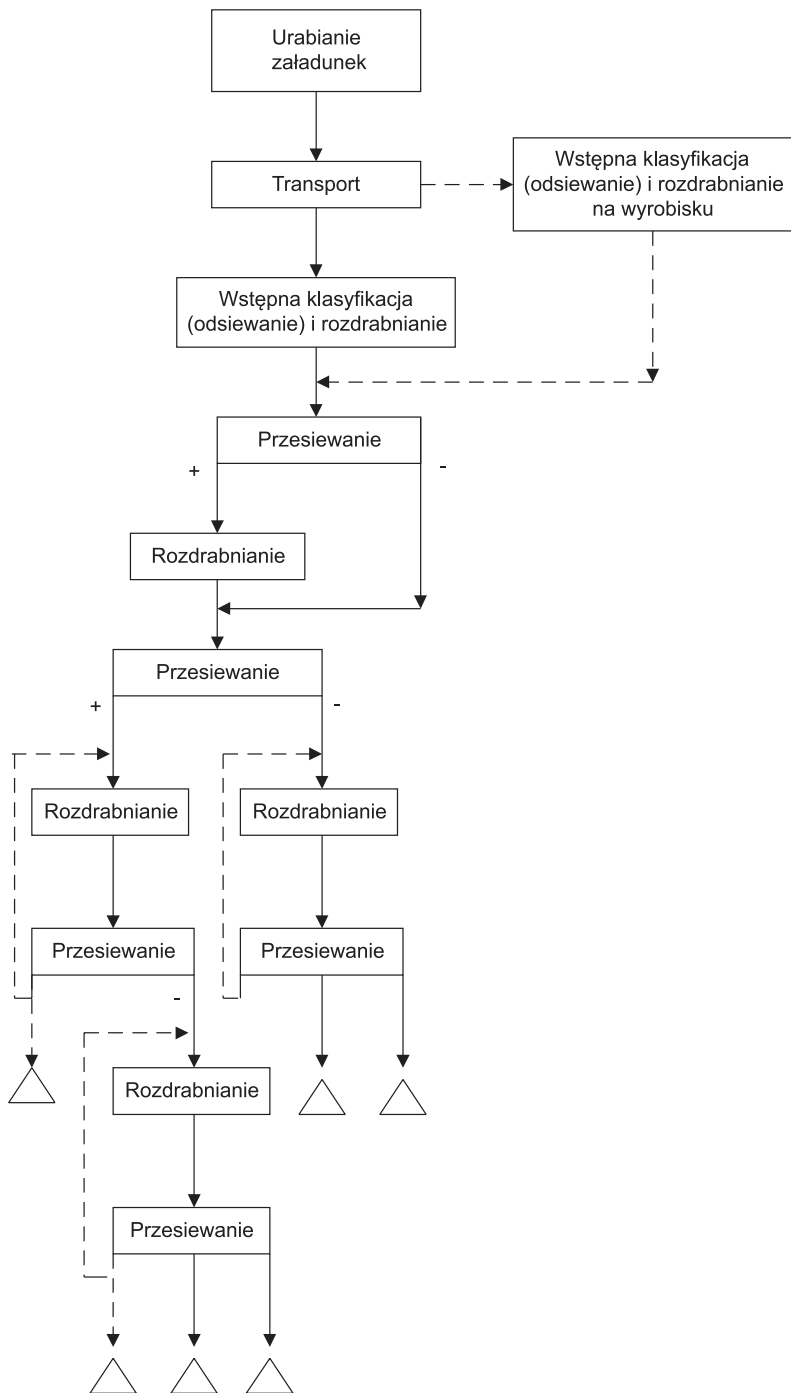
Układy przeróbcze produkcji kruszyw ze zwięzłych surowców skalnych można podzielić na trzy modele determinowane wielkością uziarnienia urobku, tj. układy produkcji kruszyw dla nadawy:

- 1) powyżej 500 mm (I układ) (rys. 5.13),
- 2) do 500 mm (II układ),
- 3) do 200 mm (III układ).

Specjalnym rozwiązaniem w niniejszych rozważaniach są układy produkujące kruszywa o ciągłym uziarnieniu 0–31,5 (63) mm w różnych frakcjach w zależności od zapotrzebowań odbiorców.

Na rysunku 5.13 zaprezentowano schemat typowego modelowego wielostadialnego układu produkcji kruszyw z nadawy o grubym uziarnieniu powyżej 500 mm. Układy dla nadawy o mniejszym uziarnieniu będą się różnić jedynie mniejszą liczbą stadiów rozdrabniania i przesiewania.





Rys. 5.13. Model wielostadialnego układu rozdrabniania i klasyfikacji (Gawenda 2011b)

Układy I i II są najbardziej rozpowszechnione w przeróbce surowców skalnych. Wynika to z uwarunkowań geologicznych złoża i metody urabiania. W zależności od występowania nadkładu o silnie zróżnicowanych właściwościach zwietrzałych skał i stopnia zanieczyszczeń stosuje się odsiewanie wstępne na wyrobisku bądź w zakładzie przeróbczym. Proces produkcji kruszywo oparty jest na wielostadialnym rozdrabnianiu w kruszarkach oraz na wielostadialnym przesiewaniu materiału z zawrotem do kruszarki lub skierowaniem surowca do następnej kruszarki w kolejnym stadium. W zależności od wielkości uziarnienia nadawy stosuje się taką liczbę stadiów rozdrabniania i przesiewania, aby cały materiał rozdrobnić do wymaganego uziarnienia końcowego produktów takich jak tłuczeń, kliniec czy kruszywa łamane granulowane. Zatem dla nadawy 500–1200 mm mogą to być układy cztero- lub nawet pięciostadialne, a dla nadawy do 500 mm układy trójstadialne. Dla nadawy o drobniejszym uziarnieniu, np. do 200 mm, mogą to być zarówno układy jedno-, jak i dwustadialne. Jeżeli w instalacji stosuje się klasyfikację na mokro czy płukanie, wówczas stosuje się proces oparty na gospodarce wodno-mułowej w obiegu zamkniętym. W tym celu stosuje się płuczki oraz urządzenia odwadniające.

### **5.2.2. Modele układów rozdrabniania i klasyfikacji dla surowców żwirowych i piaskowych**

Wykorzystywane gospodarczo żwiry i piaski pochodzą ze złóż kruszyw naturalnych lub różnych grup piasków przemysłowych (szklarskich, formierskich, podszadzkowych, do betonu komórkowego lub wyrobów wapienno-piaskowych). Głównym przeznaczeniem kruszyw naturalnych żwirowych i piaskowych różnych frakcji jest produkcja betonów oraz budownictwo drogowe.

Występujące w złożu kruszywo naturalne jako kopalina w postaci mieszaniny piasku i żwiru, w zależności od punktu piaskowego (procentowej zawartości frakcji piaskowej 0,05–2 mm), dzieli się na:

- żwirowe (do 30% piasku),
- żwirowo-piaszczyste (30–50% piasku),
- piaszczysto-żwirowe (50–75% piasku),
- piaskowe (ponad 75% piasku).

Eksploatacja złóż żwirowo-piaskowych i sposób ich przeróbki zależą przede wszystkim od warunków geologiczno-złożowych i hydrogeologicznych. W zależności od usytuowania poziomu wody gruntowej w stosunku do stropu złoża wyróżnia się złoża niezawodnione, częściowo zawodnione i zawodnione.

Najwięcej złóż niezawodnionych (ok. 40% wszystkich udokumentowanych złóż) występuje w obszarze zlodowacenia północnej części kraju. Ich zagospodarowanie przy zastosowaniu nowoczesnych rozwiązań przeróbczych wymaga dostarczenia wody przemysłowej. Ze względów środowiskowych i ekonomicznych nie zawsze jest to możliwe (Frankiewicz, Głapa 2007b).

W złożach zawodnionych (podwodnych) zwierciadło wody utrzymuje się stale co najmniej 1,5 m powyżej stropu złoża. Tego typu złoża występują w południowej części kraju, gdyż związane są z obszarami akumulacji rzecznej, wodnolodowcowej. W części środkowej i północnej kraju są one nieliczne.

Uwzględniając wymienione warunki geologiczno-złożowe, hydrogeologiczne i środowiskowe, układy wydobywcze stosowane w eksploatacji żwirów i piasków przedstawiono w tabeli 5.1.

**Tabela 5.1**

Układy wydobywcze do eksploatacji żwirów i piasków (Bęben i in. 1988; Glapa, Korzeniowski 2005)

Eksploatacja	Rodzaj wyrobiska	Układy wydobywcze	
Lądowa	stokowe, wglębne, stokowo-wglębne	koparki wielonaczyniowe: kołowe i łańcuchowe	przenośnikowy, samochodowy, szynowy
		koparki jednonaczyniowe: zgarniakowe, chwytakowe, łyżkowe	przenośnikowy, samochodowy
		ładowarki łyżkowe	przenośnikowy, samochodowy
		spycharki (załadunek ładowarką lub koparką)	samochodowy
Spod wody	wglębne	koparki urabiające z poziomu lądowego: wieloczerpakowe i jednonaczyniowe (zgarniakowe, łyżkowe, chwytakowe, zgarniaki linowe)	przenośnikowy, samochodowy
		koparki pływające: wieloczerpakowe, chwytakowe	przenośnikami pływającymi, barkami
		ssące	rurociągami tłoczącymi
		hydropneumatyczne	przenośnikami pływającymi
Lądowa i spod wody	stokowo-wglębne	koparki urabiające z ładu lub jednocześnie z ładu i pływające	przenośnikowy, samochodowy, przenośnikami pływającymi, rurociągami tłoczonymi, barkami, szalandami

Eksploatacja lądowa kruszyw naturalnych żwirowo-piaskowych nie jest poprzedzana procesem odwadniania złóż i polega na mechanicznych metodach urabiania – zarówno zdejmowania nadkładu, jak i wydobywania kopaliny. W lądowej eksploatacji żwirów i piasków stosuje się koparki wielonaczyniowe (kołowe, łańcuchowe), koparki jednonaczyniowe (chwytakowe, zgarniakowe, łyżkowe), ładowarki łyżkowe na podwoziu oponowym oraz spycharki (tab. 5.1). Maszyny te współpracują z przenośnikami taśmowymi lub samochodami transportującymi urobek do zakładu przerobczego lub ze środkami transportu samochodowego (rzadziej szynowego), dostarczającymi bezpośrednio produkty handlowe do odbiorców.

Wyróżnia się wyrobiska stokowe, stokowo-wglębne i wglębne, jedno- i wielopiętrowe. Przy większej miąższości złoża eksploatacja prowadzona jest z kilku poziomów, niekiedy ze wstępną przeróbką kopaliny bezpośrednio w wyrobisku. Przeróbka ta polega najczęściej na oddzieleniu frakcji piaskowej 0–2 mm, której pewne niezbywalne odbiorcom ilości

składowane są na zwałach wewnętrznych lub wykorzystywane do rekultywacji technicznej terenów poeksploatacyjnych (Frankiewicz, Głapa 2007b).

Eksploatacja spod wody polega na procesie odspajania i spulchniania calizny, a następnie transporcie urobku do zakładu przerobczego. Zniszczenie struktury calizny pod wodą może nastąpić w wyniku mechanicznego urabiania (działanie klina, udaru lub wibracji), urabiania hydraulicznego lub pneumatycznego (przez siły erozji) oraz w następstwie sił grawitacji. Eksploatacja spod wody realizowana może być z wykorzystaniem układów z koparkami wieloczepakowymi, z pływającymi koparkami chwytakowymi, ze zgarniakami linowymi, z koparkami ssącymi i hydropneumatycznymi.

W zależności od parametrów jakościowych kopaliny oraz zastosowanych procesów przeróbki możliwe jest otrzymanie odpowiedniej jakości kruszyw:

- okruchowych – łamanych lub częściowo przekruszonych o ciągłym uziarnieniu w zakresie 0–31,5 (63) mm,
- piasków 0–2 mm.

Modelowe układy przerobcze produkcji kruszyw z surowców żwirowych i piaskowych zanieczyszczonych w niewielkim stopniu można podzielić na trzy schematy blokowe w zależności od wielkości uziarnienia urobku, tj. układy produkcji kruszyw dla nadawy:

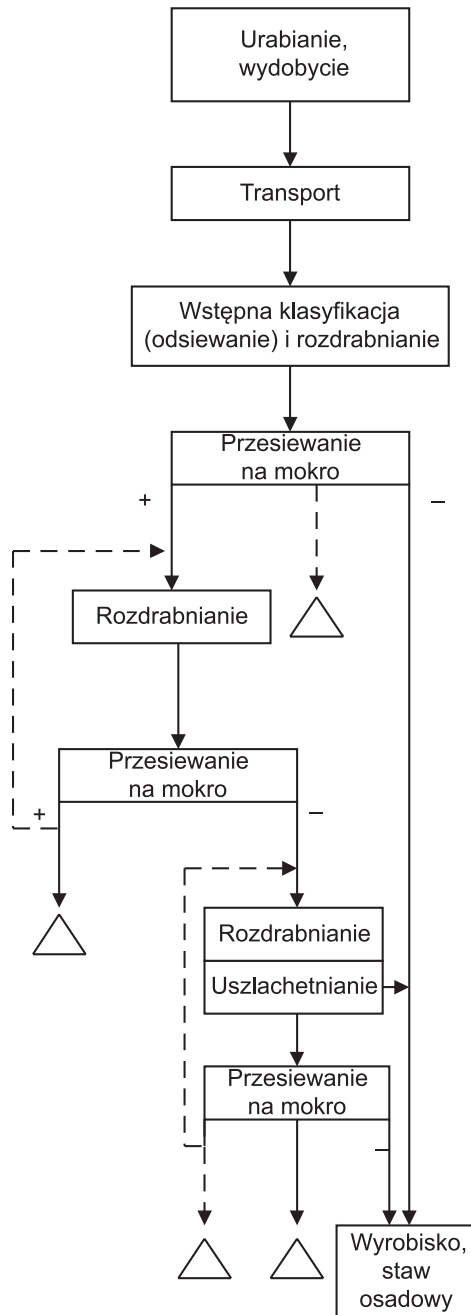
- 1) powyżej 50 (80) mm (I układ) (rys. 5.14),
- 2) do 50 (80) mm (II układ),
- 3) do 2 mm (III układ) (rys. 5.15).

Na rysunku 5.14 przedstawiono model wielostadialnego układu produkcji kruszyw z nadawy o grubym uziarnieniu powyżej 50 (80) mm, przy czym maksymalne ziarno nadawy może mieć wielkość przekraczającą 300 mm. Układ dla nadawy o mniejszym uziarnieniu, np. do 80 mm, będzie się różnił jedynie mniejszą liczbą stadiów rozdrabniania i przesiewania (układ II). W instalacji surowiec podlega klasyfikacji na mokro na przesiewaczach wibracyjnych, w wyniku której uzyskuje się większą ostrość rozdziału produktów, skuteczność przesiewania i wysoką czystość kruszyw. Przesącz kierowany jest do wyrobiska lub stawu osadowego, woda oczyszczona zwracana do obiegu. Procesy kruszenia prowadzone są wielostadialnie w kruszarkach:

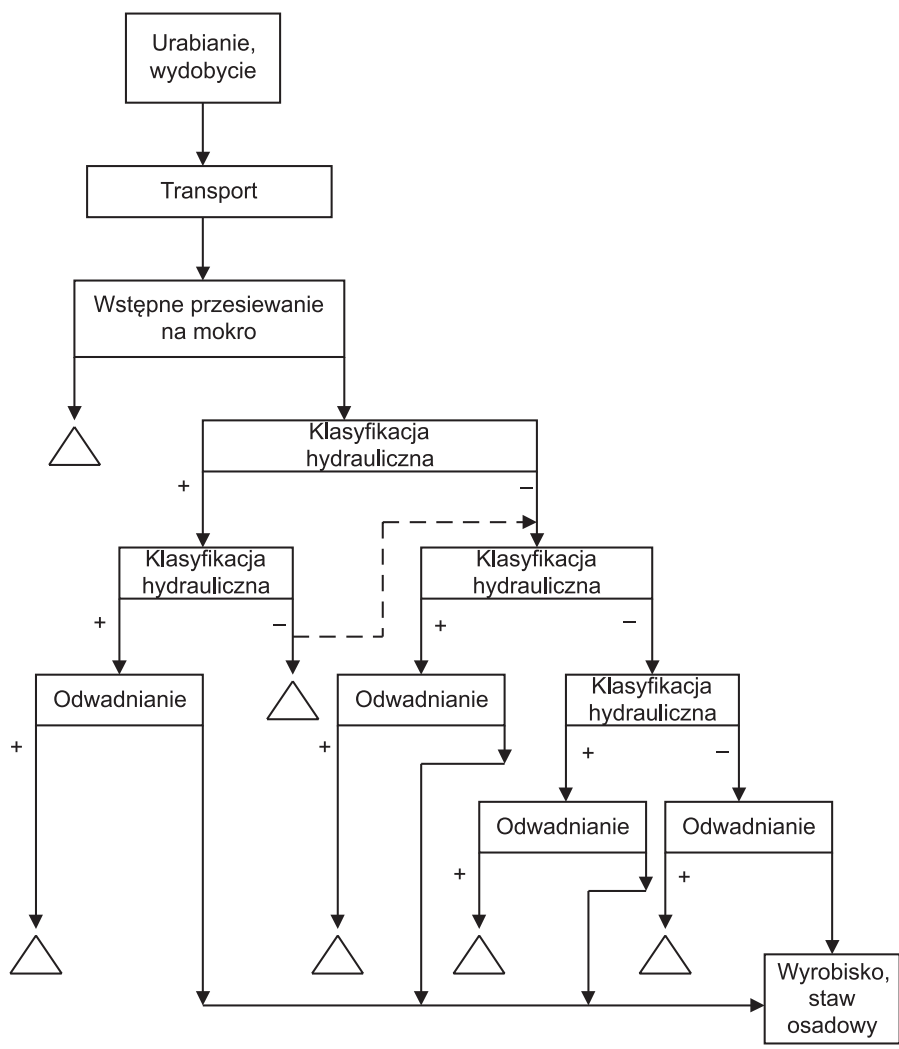
- wstępnych szczękowych, stożkowych lub udarowych listwowych, w wyniku czego uzyskuje się produkty kruszenia nieprzekraczające 80–100 mm;
- wtórnych granulatorów stożkowych i udarowych (kubizerach) dających produkt o wielkości ziarn do około 31,5 mm i właściwym kształcie.

Stosowanie kruszarek: granulatorów i kubizerów oraz osadzarek zapewnia dodatkowy proces uszlachetniania kruszyw.

Rysunek 5.15 przedstawia model układu produkcji kruszyw piaskowych składający się ze wstępnego przesiewania materiału na przesiewaczu wibracyjnym (odsiewanie zanieczyszczeń oraz kamieni), klasyfikacji hydraulicznej w klasyfikatorach pionowo-, poziomoprądowych lub hydrocyklonach oraz odwadniania w przesiewaczach, hydrocyklonach lub wirówkach. Klasyfikacja hydrauliczna pełni również rolę uszlachetniania piasków. Szlamy kierowane są do wyrobiska lub stawu osadowego. W literaturze (Gawenda 2009a) omówiono schemat technologiczny klasyfikacji drobnych piasków w klasyfikatorach przepływowych hydraulicznych poziomo- i pionowoprądowych.



**Rys. 5.14.** Model wielostadialnego układu produkcji kruszyw żwirowo-piaskowych (Gawenda 2011b)



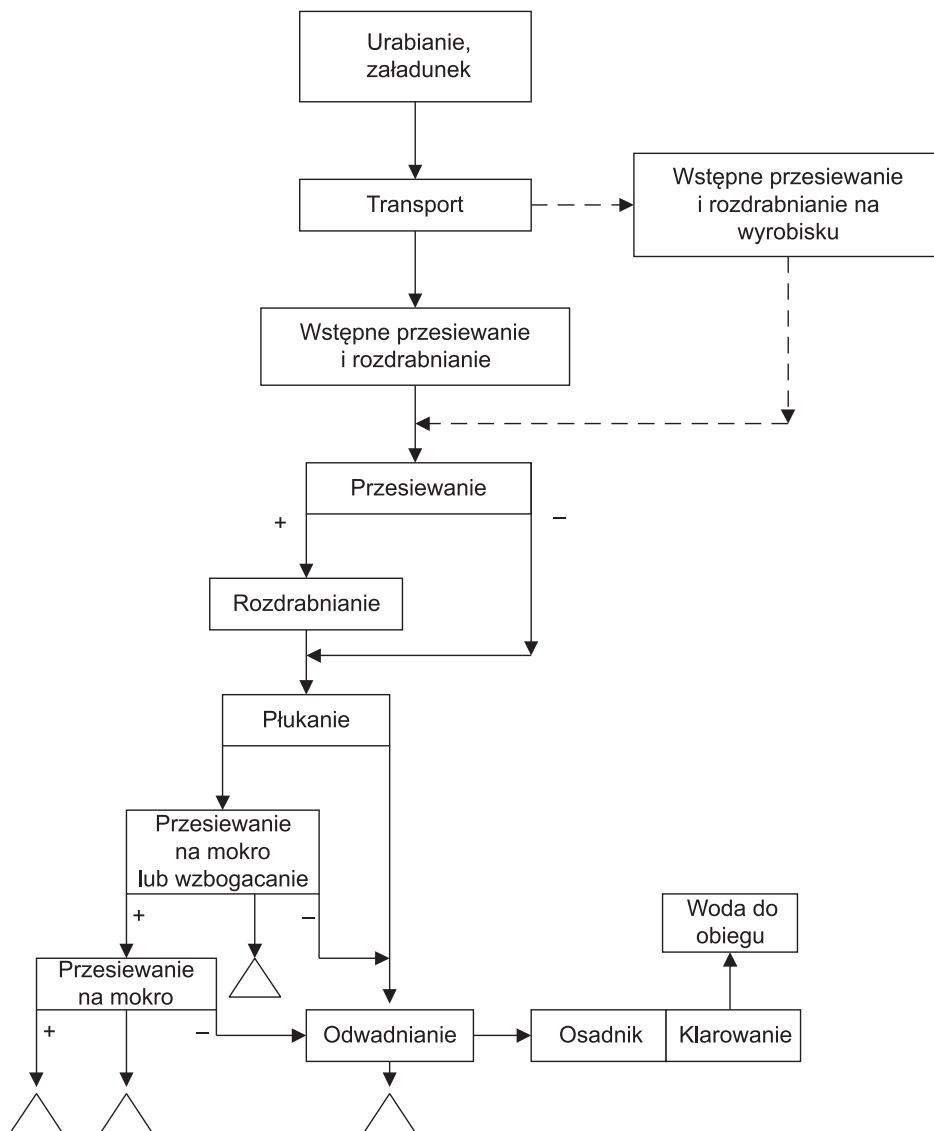
Rys. 5.15. Model wielostadialnego układu klasyfikacji piasków (Gawenda 2011b)

### 5.2.3. Model układu produkcji kruszyw z zanieczyszczonych surowców skalnych lub żwirowych

W przypadku eksploatacji skał zwięzłych lub luźnych żwirowych zanieczyszczonych surowcami ilastymi konieczne jest przeprowadzenie operacji uszlachetniania, czyli odsiewu wstępnego i wzbogacania, jak również procesów płukania i odwadniania. Z procesami płukania prowadzonymi w różnego rodzaju urządzeniach płuczących (płuczki mieczowe,

płuczki bębnowe, hydrauliczne, przesiewacze płuczące) związane są procesy odwadniania produktów i oczyszczania wody. Są to operacje technologiczne, które znacznie podnoszą koszty przeróbki i produkcji kruszyw.

Model układu uszlachetniania, płukania i odwadniania kruszyw dla surowców skalnych związłych czy luźnych silnie zanieczyszczonych przedstawiono na rysunku 5.16.



**Rys. 5.16.** Model układu produkcji kruszyw z zanieczyszczonych surowców skalnych lub zwirowych (Gawenda 2011b)

Rozwiązanie takiego układu w dużym stopniu zależy będzie od właściwości fizyczno-mechanicznych kopaliny w złożu. Układ oparty jest na następujących operacjach technologicznych:

- kruszenie, realizowane na etapie przeróbki wstępnej w przypadku występowania w nadawie dużych skał lub otoczków, a w etapach przeróbki pośredniej w celu uzyskania kruszywa o odpowiedniej granulacji i odpowiednim kształcie ziarn,
- przesiewanie (klasyfikacja sitowa) w trakcie przeróbki wstępnej w celu oddzielenia zanieczyszczeń, grubych frakcji kruszywa (otoczków), a w etapach pośrednich w celu wydzielenia gotowych produktów (klasyfikacja sitowa lub hydrauliczna),
- płukanie w celu usunięcia zanieczyszczeń ilasto-gliniastych,
- odwadnianie – na etapie przeróbki wstępnej i końcowej w celu usunięcia wody z frakcji piaskowej,
- uszlachetnianie w celu podwyższenia jakości produkowanego kruszywa, m.in. usunięcia zanieczyszczeń organicznych i innych za pomocą klasyfikacji, poprawy wskaźnika kształtu ziarn za pomocą dokruszania, usunięcia ziarn zwietrzałych w osadzarkach oraz zanieczyszczeń reagujących w środowisku alkalicznym – w etapach pośrednich i końcowym w wyniku wzbogacania.

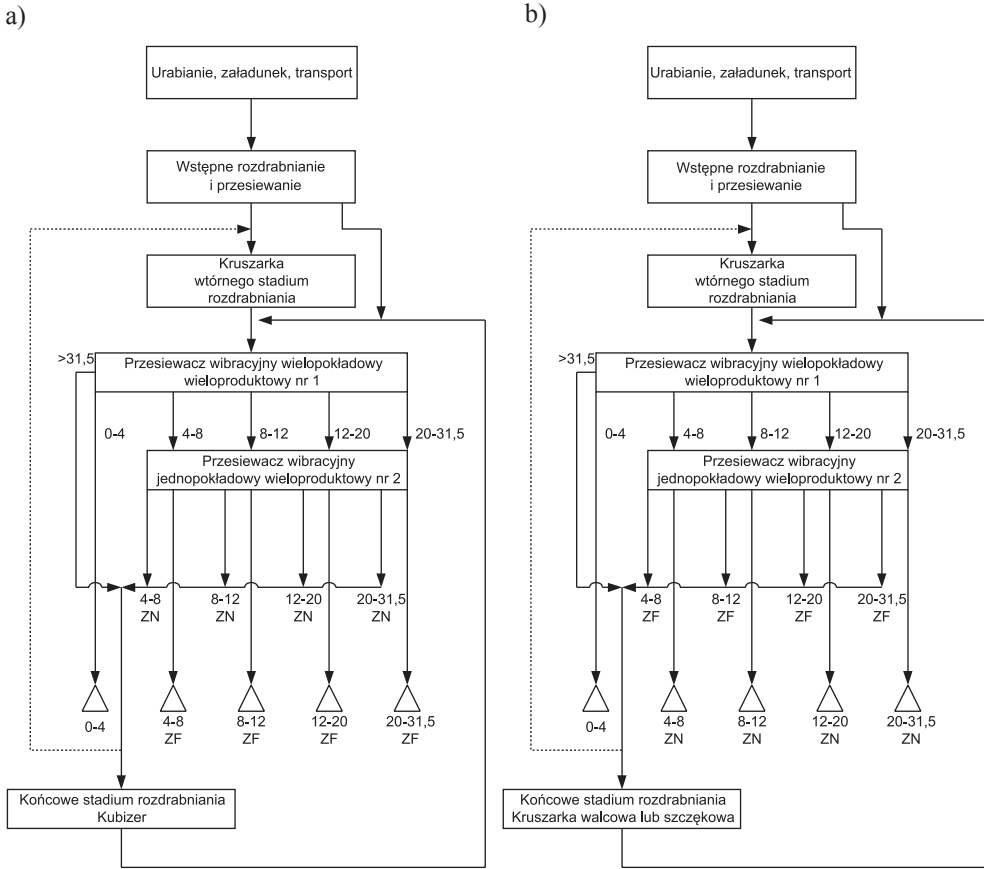
#### **5.2.4. Modele układów produkcji kruszywa o ziarnach foremnych i nieforemnych**

Rozdrabnianie surowców skalnych charakteryzuje się pewnymi regułami, np. wraz ze wzrostem wytrzymałości kruszyw (twardości, odporności na rozdrabnianie, wytrzymałości na ścislenie itp.) coraz trudniej jest nadać ziarnom w procesie rozdrabniania kształt foremny. Zjawisko to zaobserwowane w licznych badaniach określa kolejną regułę – największy udział ziarn nieforemnych pojawia się w najdrobniejszych klasach ziarnowych (Gawenda, Naziemiec 2003; Gawenda i in. 2006; Naziemiec, Gawenda 2006; Gawenda 2013c). Idea procesu produkcji kruszyw zarówno z surowców skalnych, jak i odpadów powstających w górnictwie, hutnictwie czy budownictwie jest podobna, ale wymaga doboru odpowiednich urządzeń i zapewnienia optymalnego układu technologicznego.

Dotychczasowe typowe układy produkcji kruszyw rozdrabniają surowce zarówno z ziarnami foremnymi, jak i nieforemnymi, narażając gotowe produkty czasami na zbyteczne przekruszanie ziarn, wzrost ilości odpadów w postaci pyłów oraz większe zużycie energii i elementów roboczych kruszarek.

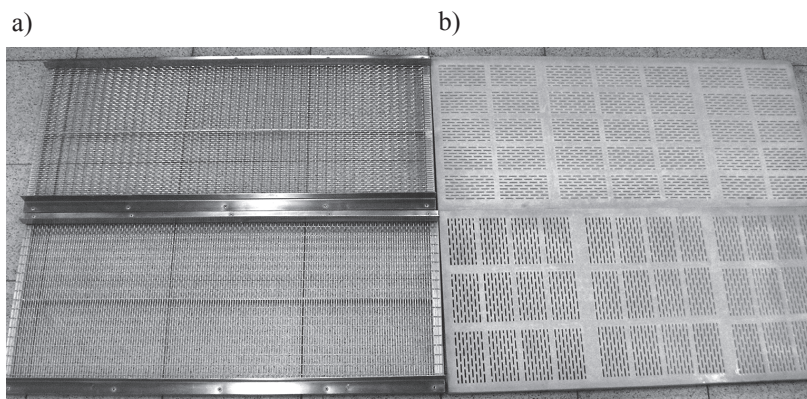
Omawiana procedura selektywnej produkcji kruszyw mineralnych dotyczy rozdrabniania i klasyfikacji zwięzłych i okruczowych surowców skalnych, a także odpadów mineralnych, w szczególności charakteryzujących się wysoce zmiennymi i gorszymi właściwościami fizyczno-mechanicznymi. Przykładem takich odpadów są np. skały przywęglowe. Na rysunku 5.17 przedstawiono schematy układów produkcji kruszyw o ziarnach foremnym (rys. 5.17a) i nieforemnym (rys. 5.17b) w układzie z zamkniętym obiegiem selektywnego procesu rozdrabniania i przesiewania, których idea (projekty wynalazcze) została zgłoszona przez autora w Urzędzie Patentowym jako „Układ urządzeń do produkcji kruszyw foremnych” nr P.408045 i „Układ urządzeń do produkcji kruszyw nieforemnych” nr P.408046 (Gawenda 2014a, b).





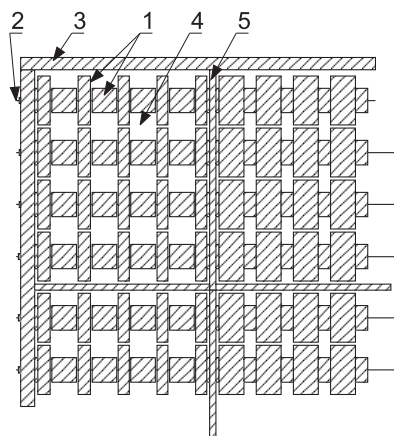
Rys. 5.17. Modele układów produkcji kruszyw o ziarnach: a) foremnych; b) nieforemnych

W przypadku produkcji kruszyw o ziarnach foremnych po wstępnym rozdrobieniu i przesiewaniu surowiec kierowany jest do wtórnego stadium rozdrabniania w kruszarce, a następnie przesiewany w przesiewaczu wibracyjnym wielopokładowym, gdzie tworzy produkty o wąskich klasach ziarnowych, np. 0–4, 4–8, 8–12, 12–20, 20–31,5 i >31,5 mm, zapewniając w ten sposób ciągłość uziarnienia mieszanki kruszyw. Następnie frakcje ziarnowe kierowane są do przesiewacza wibracyjnego jednopokładowego wielopokładowego z typowym sitem szczelinowym (rys. 5.18) lub sitem koralowym szczelinowym – zgłoszonym przez autora jako projekt wynalazczy pt.: „Sito do materiałów trudno przesiewalnych”, nr P.402726 (Gawenda 2013b), w taki sposób, że każdy strumień materiału z przesiewacza nr 1 z odpowiedniego pokładu sitowego podawany jest do przynależnej części sita koralowego o odpowiednio dopasowanych oczkach szczelin w przesiewaczu nr 2 (rys. 5.17a). W ten sposób przesiewacz umożliwia oddzielenie ziarn foremnych (produkt nadsitowy) od ziarn nieforemnych (produkt podsitowy) w dowolnej klasie ziarnowej.



**Rys. 5.18.** Sita szczelinowe wyprodukowane przez Progress Eco: a) metalowe druciane; b) poliuretanowe (fot. T. Gawenda)

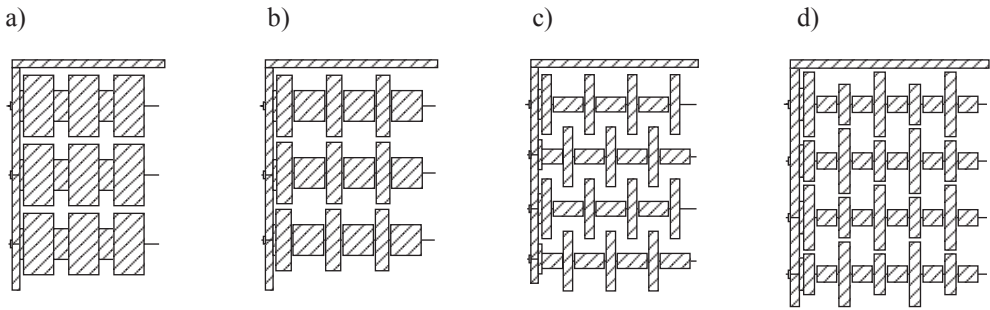
Sito koralowe składa się z elementów o kształcie dowolnych figur geometrycznych, tzw. koralu, np. o przekroju poprzecznym kołowym, mających w osi symetrii otwory i osadzonych na prętach metalowych lub cięgnach w sposób cykliczny, które zamocowane są do ramy w rzędach. Powstały zespół rzędów cięgien lub prętów wraz z koralami oraz otwory pomiędzy nimi tworzą pokład sitowy, jak pokazano na rysunku 5.19, o różnych rozmiarach, kształtach i konfiguracjach oczek, dopasowanych do przesiewanych materiałów ziarnistych, a także pozwala na dzielenie sita na poszczególne pola za pomocą sztywnych przegród w celu zwiększenia wytrzymałości i stabilności sita. Sztywne przegrody również w tym przypadku wyznaczają obszar pokładu sitowego, po którym przemieszcza się konkretna frakcja ziarnowa kierowana z przesiewacza nr 1 (rys. 5.17a).



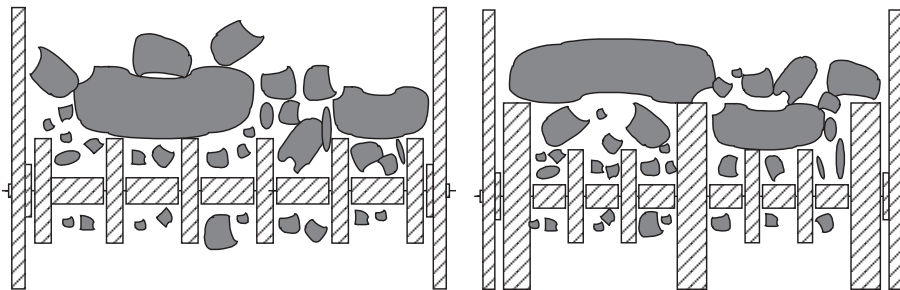
**Rys. 5.19.** Fragment sita z koralami o różnych kształtach z pojedynczych elementów (lewa część sita) i złożonych elementów (prawa część sita) (Gawenda 2013b). Objaśnienia: 1 – koral, 2 – ciągn, 3 – rama sita, 4 – otwór sita, 5 – mostek wzmacniający sito

Możliwość produkcji wielu kształtów geometrycznych koralików pozwala na budowanie sit o różnych kształtach przestrzennych i konfiguracjach poszczególnych elementów (rys. 5.20). Taka konstrukcja pozwala na wzrost wydajności oraz skuteczności procesu przesiewania przez:

- lepszy transport materiału (rys. 5.21); wskutek łatwiejszego kontaktu ziarn drobnych z powierzchnią sita oraz ze względu na przestrzenne rozmieszczenie koralików ziarna grube nie blokują transportu ziarnom drobnym (przesiewanie przestrzenne),
- korzystniejsze ułożenie się ziarn nieforemnych pomiędzy koralikami (mniejszą powierzchnią projekcyjną),
- samooczyszczanie się pokładu sitowego na skutek ruchu drgającego i obrotowego koralików,
- łatwiejsze mieszanie się strugi materiału, spowodowane ruchem falowym cięgien, na których osadzone są koraliki, oraz ruchem drgająco-obrotowym samych koralików,
- większą prędkość transportową materiału, będącą wynikiem mniejszego tarcia po powierzchni obracających się koralików,
- ochronę walorów użytkowych produktów dzięki elastycznym (gumowym) koralikom o określonej odbojności.



**Rys. 5.20.** Przykładowe wzory sit koralowych o różnych rozmiarach i kształtach oczek: a) szcelinowe; b) kwadratowe; c) szcelinowe poprzeczno-wzdłużne; d) prostokątne (Gawenda 2014c)



**Rys. 5.21.** Widok stykania się ziarn grubych z koralikami o większej średnicy oraz swobodnego przedostawania się drobnych ziarn przez otwory w przekroju poprzecznym sita (Gawenda 2014c)

Rozmiar szczeliny oczka w typowym sicie szczelinowym lub koralowym powinien być dobrany jako połowa maksymalnej wielkości klasy ziarnowej, przy czym ważne jest, aby klasy ziarnowe zawierały się w możliwie wąskim przedziale uziarnienia. Proces selektywnego wieloproduktowego przesiewania na sicie szczelinowym o jednym pokładzie pozwala uzyskać tyle samo frakcji nadsitowych zawierających ziarna foremne (ZF) oraz frakcji produktu podsitowego składających się z ziarn nieforemnych (ZN).

Produkt podsitowy (ZN) wraz z produktem nadsitowym  $>31,5$  mm z pierwszego przesiewacza kierowane są do końcowego stadium rozdrabniania w kubizerze w celu poprawy kształtu ziarn przy nieznacznym stopniu rozdrobnienia (bez przekruszenia). Po rozdrobnieniu produkty są zawracane do przesiewacza nr 1 (rys. 5.17a) i ustawionego posobnie przesiewacza nr 2 w celu ponownego rozdzielenia produktu na ziarna foremne i nieforemne. W przypadku produkcji kruszyw o zawartości ziarn foremnych korzystnie jest stosować kruszarki udarowe, które ułatwiają otrzymanie ziarn właśnie o takich kształtach, chociaż układ selektywny rozdziału ziarn może efektywnie współpracować z innymi kruszarkami (stożkowymi, szczękowymi). Wtedy w zawrocie może krążyć więcej produktu podsitowego (ziarn nieforemnych) do ponownego rozdrabniania i klasyfikacji.

Na rysunku 5.17a przedstawiono schemat układu produkcji kruszyw o ziarnach nieforemnych w układzie z zamkniętym obiegiem selektywnego procesu rozdrabniania i przesiewania. W tym przypadku na wtórnym i końcowym stadium rozdrabniania korzystnie jest stosować kruszarki szczękowe lub walcowe z okładzinami gładkimi, gdyż takie urządzenia produkują kruszywa o zawartości ziarn nieforemnych ponad 30%. W układzie tym produkty podsitowe przesiewacza z sitem szczelinowym są produktami finalnymi z ziarnami nieforemnymi, a nadsitowe z ziarnami foremnymi są kierowane do wtórnego rozdrabniania.

## 6. Analiza wpływu rodzaju kruszarek, układów technologicznych oraz właściwości nadawy na efektywność procesu rozdrabniania i jakość kruszyw

### 6.1. Ogólne zasady doboru kruszarek

W produkcji kruszyw łamanych bardzo ważnym elementem jest właściwy dobór rodzaju kruszarki z uwzględnieniem klasyfikatora, który pozwoli osiągnąć uziarnienie o odpowiednich wychodach poszczególnych klas ziarnowych i możliwie regularnych kształtach ziarn. Podstawową cechą materiałów uziarnionych jest ich losowy charakter polegający na tym, że składy ziarnowe, petrograficzne i mineralogiczne są w złożu (a także w nadawach do procesów rozdrabniania) zmienne w sposób nieprzewidywalny. Także przebieg procesu rozdrabniania ma charakter losowy, ale może być również determinowany parametrami urządzeń rozdrabniających. W badaniach wpływu rodzajów maszyn rozdrabniających na skład ziarnowy oraz kształt ziarn został ustalony ich bezpośredni związek pomiędzy parametrami maszyn, rodzajem maszyn i dzięki temu jest możliwe przewidywanie uzyskiwanych produktów o określonych parametrach (Beckmann 2003). Na procesy kruszenia wpływają wielkości wejściowe, zakłócające oraz wyjściowe (tab. 6.1).

**Tabela 6.1**

Charakterystyka wielkości determinujących proces kruszenia

Wielkości wejściowe regulujące	Wielkości zakłócające	Wielkości wyjściowe
<ul style="list-style-type: none"> <li>– natężenie przepływu surowca (nadawy),</li> <li>– wymiar szczeliny wylotowej lub rusztu kruszarki,</li> <li>– prędkość obrotowa elementów roboczych kruszarki,</li> <li>– liczba elementów roboczych kruszarki,</li> <li>– kształt elementów roboczych</li> <li>– siła nacisku elementów roboczych kruszarki</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– skład ziarnowy nadawy,</li> <li>– twardość surowca,</li> <li>– wilgotność surowca,</li> <li>– stan techniczny elementów roboczych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– skład ziarnowy produktu kruszenia,</li> <li>– wydajność kruszarki,</li> <li>– energia jednostkowa pobierana przez silnik kruszarki</li> </ul>

Przebieg procesu kruszenia, tzn. pękanie i przemieszczanie się materiału, zależy głównie (poza właściwościami surowca) od konstrukcji i sposobu działania maszyny, w której zachodzą skomplikowane zjawiska towarzyszące kruszeniu, a więc od ukształtowania przestrzeni roboczej i organów roboczych (np. powierzchni roboczych płyt kruszących, kształtu stożków, młotków, bijaków, położenia płyt odbojowych itd.), a następnie od cech kinematycznych maszyny.

Prawidłowo dobrane moc silnika oraz optymalny kształt elementów roboczych do rozdrabnianych surowców skalnych umożliwiają osiągnięcie wysokiej sprawności maszyny i uzyskanie najlepszego wskaźnika faktycznego zużycia energii w odniesieniu do mocy znamionowej.

Gabaryty kruszarek mają niewątpliwie duży wpływ na proces kruszenia. W dużych maszynach pękają bryły o znacznych rozmiarach, a oddziaływania między tymi bryłami nie mają tak wielkiego wpływu na siły i energię kruszenia jak w mniejszych kruszarkach. W kruszarkach średnich i małych oddziaływania między mniejszymi ziarnami kruszonymi mają znaczny wpływ na te wielkości, głównie w dolnych strefach przestrzeni roboczej, gdzie występuje zagęszczenie ośrodka (Zawada 1998).

Maszyny służące do rozdrabniania dobiera się odpowiednio do właściwości fizyczno-mechanicznych danego surowca (rys. 4.1), uwzględniając przede wszystkim jego cechy decydujące o podatności na różne rodzaje działań kruszących. Materiały twarde korzystnie jest rozdrabniać przez udar, mniej twarde – przez zgniatanie, miękkie – przez zgniatanie, łamanie lub ścieranie, a ilaste i lepkie – przez ścieranie. Do rozdrabniania ziarn grubych stosuje się zgniatanie, do średnich – zgniatanie lub udar, do drobnych – ścieranie lub udar.

H. Rumpf zalecał dobierać urządzenia kruszące w zależności od twardości rozdrabnianego materiału (Pudło 1976; Nawrocki i in. 1989). Niezależnie od zróżnicowanej twardości skał należy zwracać uwagę na optymalizację procesu rozdrabniania z uwzględnieniem dostosowania wielkości uziarnienia urobku do rodzaju maszyn rozdrabniających i przesiewających współpracujących ze sobą zarówno na wstępnych, jak i kolejnych stadiach układu technologicznego (Malewski, Rink 2012; Malewski, Baszczyńska 2013). Ważnym problemem optymalizacji układu jest występowanie w urobku nadawy maksymalnych ziarn, których ilość może być znaczna lub ograniczona, co ma istotne znaczenie dla doboru odpowiedniej kruszarki wstępnego kruszenia, charakteryzującej się określonym rozmiarem komory wlotowej. W przypadku niewielkiej ilości ziarn nadgabarytowych korzystnie jest dobrać kruszarkę dostosowaną do wielkości mniejszego rozmiaru maksymalnego ziarna w nadawie, np. do wielkości ziarna  $d_{95}$ . Występujące wtedy ryzyko zaklinowania się ziarn nadawy w mniejszej gardzieli kruszarki (celowo dobranej, ale za to tańszej i wydajniejszej) można zniwelować przez dokruszanie ziarn nadgabarytowych ( $d_{95}-d_{\max}$ ) młotem hydraulicznym.

W praktyce bardzo często wykorzystuje się informacje o kształcie i wielkości uziarnienia produktów przy projektowaniu instalacji lub eksploatacji maszyn. Z tego powodu niektóre firmy zajmujące się produkcją maszyn rozdrabniających prowadzą doświadczałne badania pozwalające ustalić granulację produktów rozdrabniania w zależności od wielkości szczeliny wylotowej.

Maksymalne ziarna produktów na ogół nie odpowiadają wielkości zadanej szczeliny wylotowej kruszarki. W kruszarkach szczękowych i stożkowych, gdzie oprócz wielkości szczeliny wylotowej występują jeszcze parametry, takie jak: skok elementu roboczego oraz

kształt powierzchni elementów roboczych, rozmiar największego ziarna może być nawet 1,5–3-krotnie większy od zadanej szczeliny wylotowej, przy czym im większa kruszarka i twardszy materiał, tym stosunek rozmiaru ziarna i szczeliny jest większy (Naziemiec, Gawenda 2006). Do analiz granulometrycznych kruszyw stosuje się sita o oczkach kwadratowych, w związku z czym aby ziarno mogło przedostać się przez dane oczko, musi mieć przynajmniej dwa rozmiary mniejsze od tego oczka, natomiast żeby wypadło z gardzieli kruszarki, musi mieć tylko jeden rozmiar mniejszy od szczeliny i skoku szczęki ( $e + s$ ). Dlatego też przedostanie się ziarn płaskich z komory kruszarki jest ułatwione. W kruszarkach, np. udarowych, poza szczeliną wylotową albo wielkością oczka rusztu występuje także zmienna prędkość obrotowa wirnika, która również wpływa na uziarnienie produktów. Niektóre miękkie surowce węglanowe po rozdrobnieniu przy dużych prędkościach obrotowych wirnika mogą mieć rozmiar ziarna  $d_{\max}$  równy lub nawet mniejszy od zadanej wielkości szczeliny kalibracyjnej płyt albo oczka rusztu.

W zakładach przeróbki surowców skalnych najczęściej używane są kruszarki szczękowe, stożkowe, młotkowe i udarowe (odrzutowe) z wałem poziomym lub pionowym. Na wstępnych stopniach kruszenia pracują najczęściej kruszarki szczękowe lub stożkowe – tzw. żyratory. W zakładach wapienniczych i cementowniach, ze względu na słabo związane surowce oraz konieczność przygotowania ich do przemiału, najczęściej stosowane są kruszarki młotkowe. Zaletą kruszarek szczękowych jest mała wrażliwość na zmiany rozkładu wielkości uziarnienia urobku, który w wyniku robót strzałowych może charakteryzować się dużą zmiennością. Na wtórnych stopniach kruszenia zwykle pracują kruszarki stożkowe (granulatory stożkowe) i kruszarki udarowe. Piotr Wodziński (2009) podkreśla, że w produkcji grysów w granulacjach stożkowych instalację należy wyposażyć w zbiorniki buforowe, które powinny dostarczać nadawę do kruszarek stożkowych i udarowych, zasypując całkowicie ich komorę roboczą. W ten sposób uzyskuje się optymalne rozdrobnienie oraz chroni stożek wewnętrzny przed uszkodzeniem na skutek spadku materiału z podajnika.

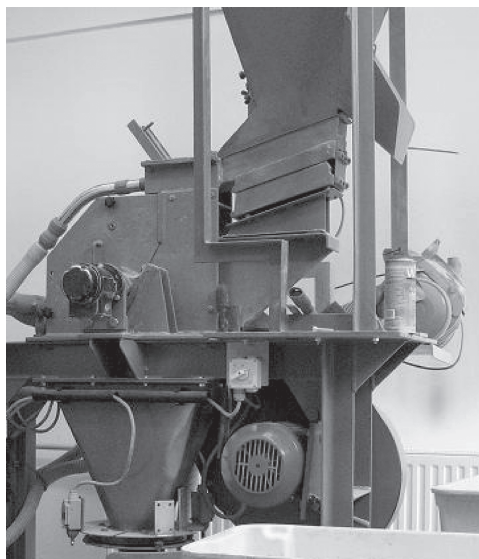
W ostatnich latach nastąpił duży rozwój technologiczny kruszarek udarowych odrzutowych. Szczególnie interesujące są kruszarki udarowe z wałem pionowym. Postęp w dziedzinie konstruowania elementów roboczych o wysokiej odporności na ścieranie i udar umożliwia stosowanie ich także do kruszenia surowców bardzo zwięzłych. Również sposób podawania w nich materiału oraz rozdrabniania (system kamień-kamień) ogranicza zużycie elementów roboczych kruszarki. Coraz częściej rozpowszechnione prasy walcowe wysokociśnieniowe również sprawdziły się w technologii produkcji kruszyw drobnoziarnistych (mączek wapiennych i dolomitowych).

Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjne podstawowych maszyn przerobczych (kruszarek, przesiewaczy) umożliwiły równocześnie rozwój mobilnych zestawów przerobczych. W mobilnych i semimobilnych instalacjach montowane są zazwyczaj kruszarki szczękowe, następnie stożkowe i udarowe. Od kruszarek i przesiewaczy montowanych w mobilnych zestawach wymaga się podobnych cech jak w urządzeniach stacjonarnych. W przypadku zestawów mobilnych zwraca się szczególną uwagę na wysokość urządzenia i jego masę. Obniżenie obu tych parametrów zwiększa możliwość zastosowania urządzenia przerobczego na zestawie przejezdnym czy przewoźnym. Urządzenia takie charakteryzuje wskaźnik ciężaru (masy) urządzeń przypadający na jednostkę wydajności.

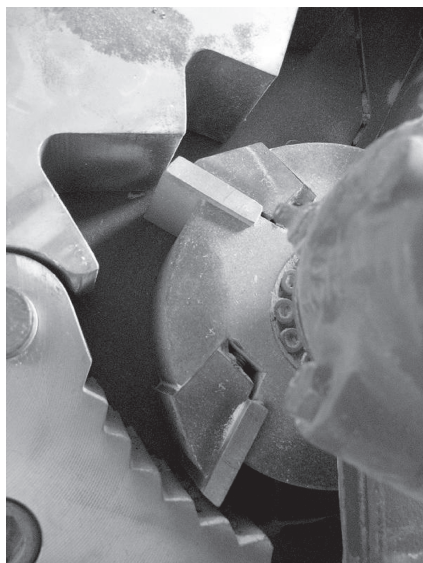


Istnieje duża różnorodność urządzeń rozdrabniających i wiele firm branży maszynowej ma je w swojej ofercie. Często jednak w konkretnym przypadku pojawia się pytanie, jakie urządzenie kruszące zastosować, aby uzyskać największy wychód pożądanego produktu. W takich przypadkach bardzo pomocnymi mogą się okazać próby kruszenia przeprowadzone w interesującym urządzeniu u producenta maszyn lub zakładzie przerobczym. Bardzo skuteczne jest rozdrabnianie surowca w doświadczalnej kruszarce, w wyniku którego właściwości fizyczno-mechaniczne surowca oraz ustalone parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne posłużą do zaprojektowania zamawianej kruszarki.

Przykładowo austriacka firma SBM Mineral Processing (MFL Group) produkująca maszyny i urządzenia przerobcze, m.in. kruszarki udarowe listwowe, w celu doboru komponentów i elementów roboczych korzysta ze swojego „banku danych” i „know-how”. Zbiór danych oparty jest na kilkudziesięcioletnim gromadzeniu informacji o właściwościach rozdrabnianych surowców z całego świata, także danych z procesu rozdrabniania w unikatowej laboratoryjnej kruszarce udarowej (rys. 6.1 i 6.2) własnej produkcji oraz podobnych danych uzyskanych dla tego samego surowca rozdrabnianego w warunkach przemysłowych. W ten sposób zasób wiedzy i doświadczenie firmy pozwala przy projektowaniu i budowie maszyn dobrać optymalne rozwiązania według opracowanych algorytmów i najlepszych sprawdzonych kombinacji istotnych parametrów, sprawdzonych konstrukcji, optymalnych jakościowo komponentów i tworzyw, z których mają powstać elementy robocze kruszarek. Kruszarki prawidłowo dobrane do właściwości fizyczno-mechanicznych rozdrabnianego surowca umożliwiają uzyskanie wysokiej wydajności, przewidywanej jakości produktów i długiej żywotności elementów roboczych.



**Rys. 6.1.** Laboratoryjna kruszarka udarowa do oznaczania ścieralności i energochłonności (fot. T. Gawenda)



**Rys. 6.2.** Komora robocza testującej kruszarki udarowej firmy SBM MP (fot. T. Gawenda)



Dobór maszyn przerobczych przy projektowaniu instalacji technologicznych jest związany z rozpoznaniem właściwości fizyczno-mechanicznych surowca, założeniem wielkości przerobu oraz jakości oczekiwanych produktów. Do określenia właściwości surowca SBM MP stosuje urządzenia, w których podczas prowadzonych prób testowych można określić energochłonność, ścieralność udarową, abrazywność, kruszalność, gęstość, wilgotność, skład ziarnowy oraz zawartość ziarn nieforemnych.

Badania abrazywności i kruszalności wykonuje się we francuskim młynku Abroy na trzech reprezentatywnych próbkach o masie 500 g i uziarnieniu 4–6,3 mm, które umieszcza się kolejno w cylindrze wyposażonym w wirnik z nieużywaną płytką metalową o znanej masie. Czas rozdrabniania wynosi 5 min przy prędkości obrotowej wirnika 4500 obr/min. Abrazywność jest miarą ubytku masy płytki metalowej w stosunku do masy próbki, wyrażonego w gramach na tonę. Natomiast kruszalność jest stosunkiem masy surowca przechodzącego przez sito 1,6 mm i masy całej próbki wyrażona w procentach. Na rysunku 6.3 przedstawiono protokół z testów przeprowadzonych dla wapienia. W dolnej części protokołu podane są dla różnych surowców skalnych charakterystyki takie jak zawartość krzemionki, gęstość, indeks pracy Bonda, kruszalność i abrazywność.

<b>LABOR - Bericht</b>		SBM-Mineral Processing Arbeiterheimstrasse 46 4663 - Laakirchen AUSTRIA Tel.Nr.: +43 7613 2771 0 Fax.Nr.: +43 7613 2771 649 email: office@sbm-mp.at		<b>SBM</b> MINERAL PROCESSING <b>ILUAS</b>	
<b>Crushability</b>					
<b>Allgemein</b>					
Crush. ID:	C 00210				
Auftraggeber:	Bmk Steinbruchbetriebe / Deutschland				
<b>Material</b>					
Proben.Nr.:	E 00358	Gesteinsart:	dichter Kalkstein		
Gestein:	Kalkstein				
<b>Abrasivness</b>					
	Messung 1	Messung 2	Messung 3		
	[s]	[s]	[s]		
Paddel vorher	47,2870	47,4140	47,1273		
Paddel nachher	47,2592	47,3895	47,1009		
Differenz	0,0278	0,0245	0,0264		
Abrasivness	56g/t	49g/t	53g/t		
<b>Abrasivness</b>	<b>52g/t</b>				
<b>Crushability</b>					
Gesamtgewicht	500	500	500		
1,6 / X	351	351	349		
0 / 1,6	149	149	151		
Crushability	29,8%	29,8%	30,2%		
<b>Crushability</b>	<b>29,9%</b>				
<b>Erfahrungswerte</b>					
<b>Gestein</b>	<b>SiO2</b>	<b>Rohdichte</b>	<b>Work Index</b>	<b>Crushability</b>	<b>Abrasivness</b>
	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[kWh/t]	[%]	[g/t]
Amphibolit	-	-	-	25-46	300-1600
Basalt	20-50	2,7-3,1	10-20	20-44	500-2300
Diabase	45-55	2,6-3,1	14-22	18-44	450-2300
Diorit	55-70	2,6-2,9	10-22	20-36	400-1700
Dolomit	0-10	2,6-3,0	6-12	30-56	20-450
Gabbro	40-55	2,6-2,8	8-22	27-34	800-1700
Granit	65-75	2,7-3,0	10-20	28-90	900-1900
Kies	-	ca. 2,7	12-18	30-55	300-2500
Kalkstein	0-30	2,4-2,8	6-15	30-62	0-500
Sandstein	40-80	2,5-2,7	8-16	32-60	300-2200

Rys. 6.3. Przykład protokołu z testów na abrazywność i kruszalność w młynku Abroy (Gawenda 2011d)

Energochłonność i ścieralność dla kruszarek udarowych produkowanych przez SBM MP określa się w laboratoryjnej kruszarce listwowej udarowej (rys. 6.1 i 6.2) wyposażonej w wymienne cztery listwy udarowe oraz wymienne, o różnych kształtach ruszty odbojowe z regulowaną szczeliną wylotową. Test przeprowadza się na próbce 20–30 kg o uziarnieniu 4–16 mm, którą rozdrabnia się w kruszarce przy zadanej prędkości obrotowej wirnika, np. 3500 obr/min, odnotowując pobór mocy w trzech fazach, tj. dolotu kruszywa z zasobnika, właściwego (ustabilizowanego) rozdrabniania i końcowego wyjścia materiału z zasobnika. Fazy procesu rozdrabniania regulowane są przez zasuwę i zamontowane na niej przełączniki elektroniczne (rys. 6.4). Odnotowuje się czas rozdrabniania i masy próbek uzyskanych w trzech fazach rozdrabniania, moc, prędkość wirnika oraz masy listew udarowych zważonych przed testami i po testach. Dodatkowo wykonuje się analizę granulometryczną uzyskanych produktów i określa zawartość pyłów poniżej 2,8 mm.



Rys. 6.4. Zasuwa z przełącznikami i zbiornikami na produkty (fot. T. Gawenda)

W dalszym etapie obliczane są: zużycie listew, czyli ścieralność udarowa, wydajność, moc netto oraz właściwe zużycie energii. Do projektowania urządzenia lub odpowiedniego doboru maszyny pod względem oczekiwań klienta bierze się pod uwagę dodatkowo zawartość powstałych pyłów w testowanej próbce, stopień rozdrobnienia, prędkość obrotową wirnika, szczelinę wylotową, rodzaj płyt odbojowych oraz parametry oczekiwanych produktów (np. pożądaną wielkość uziarnienia produktów). Za pomocą opracowanego przez firmę modelu matematycznego określa się optymalne konstrukcje kruszarek (gabaryty i kształt wirnika, liczbę i kształt płyt odbojowych i mielących, liczbę listew udarowych i rodzaj tworzywa), moc silnika oraz parametry eksploatacyjne, takie jak: prędkość obrotowa wirnika, szczelina wylotowa, kąt nachylenia płyt odbojowych. Po zainstalowaniu kruszarki w warunkach przemysłowych wykonywane są wstępne próby oraz zbierane okresowo odczyty pracy urządzeń w rejestrato-

rze elektronicznym (pobór mocy, prędkość obrotowa wirnika, przerób, przestoje). Wyniki są transferowane do komputera i służą do dalszych obliczeń i weryfikacji ewentualnych błędów.

Podczas projektowania układów technologicznych i doboru określonych urządzeń należy pamiętać, że nieodpowiednio dobrane parametry kruszarki mają wpływ na jej eksploatację, np. zużycie energii, albo eksploatację elementów roboczych, co w efekcie wpływa na jakość produktów (kształt i wielkość ziarn) (Gawenda 2010a, b, c).

## **6.2. Ocena wpływu wybranych parametrów technologicznych kruszarek oraz właściwości nadawy na efektywność procesu rozdrabniania**

### **6.2.1. Ogólne relacje pomiędzy właściwościami skał a efektami rozdrabniania**

Jak już wspomniano, znajomość rozkładu wielkości uziarnienia i kształtu ziarn produktów rozdrabniania jest istotna do prawidłowego doboru maszyn oraz projektowania układów technologicznych. Różne kruszarki, wykorzystujące różne elementarne działania sił kruszących surowce o zróżnicowanych właściwościach, będą decydować o finalnych parametrach kruszyw. Na proces rozdrobnienia ziarna istotny wpływ mają wytrzymałość skał i odkształcenia powstające w procesie obciążenia. Wytrzymałość skał może być określona energią potrzebną do zainicjowania i rozwoju spękań lub do stworzenia krytycznych naprężeń rozciągających.

Energię rozdrabniania w warunkach laboratoryjnych można wyliczyć zarówno dla ziarn regularnych i nieregularnych, ale uzyskany efekt rozdrabniania (skład ziarnowy i kształt) jest trudny do przewidzenia. Jeszcze trudniej jest przewidzieć parametry użytkowe nowo powstałych ziarn, jakie określa się w badaniach właściwości kruszyw (nasiąkliwość, mrozoodporność, wytrzymałość na rozdrabnianie LA), badając ściskanie lub udar pojedynczych próbek np. tylko testem brazylijskim. Na przykład badania przemysłowe wykazują, że kruszywa rozdrobnione w kruszarkach udarowych (za pomocą udaru) odznaczają się mniejszą liczbą nabytych spękań w stosunku do kruszyw powstałych w kruszarkach szczękowych (za pomocą ściskania) (Gawenda 2013c). Podczas obciążenia w materiale powstają naprężenia rozrywające, ściskające i ścinające; zależą one między innymi od liczby punktów przyłożenia obciążenia, intensywności i szybkości narastania obciążenia. Z tego powodu niektóre sposoby charakteryzowania właściwości skał pod względem ich wykorzystania przy doborze maszyn w warunkach przemysłowych mogą być nieefektywne lub wątpliwe ze względu na branie pod uwagę regularne formy pojedynczych próbek, które nie występują w kruszeniu rzeczywistym (test brazylijski, doświadczenie Herza) (Wiegiel, Li 1967; Brożek i in. 1995; Stankiewicz 2002).

Test brazylijski jest z fizycznego punktu widzenia analogiczny do rozdrabniania w kruszarkach szczękowych, walcowych czy stożkowych i stanowi bardzo wygodną metodę pomiaru wytrzymałości skał na rozrywanie (Hudson i in. 1972). Polega on na osiowym ścisnaniu dysku (rys. 6.5). W środku dysku powstają naprężenia rozrywające, prowadzące

do zniszczenia próbki. Naprężenia te są indukowane przez działanie ściskające. Zgodnie z liniową teorią sprężystości maksymalne naprężenia rozrywające  $\delta_r$  powstają w kierunku prostopadłym do kierunku obciążenia. Ich wartość wyraża się wzorem:

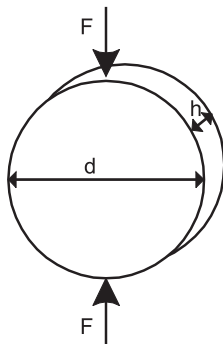
$$\delta_r = \frac{2F}{\pi dh} \quad (6.1)$$

gdzie:

$F$  – wartość siły niszczonej,

$d$  – średnica dysku,

$h$  – grubość dysku.



**Rys. 6.5.** Punktowy sposób przyłożenia siły w teście brazylijskim

Doświadczenie wykazuje, że wartości naprężeń krytycznych, prowadzących do zniszczenia ziarna, uzyskane metodą ściskania zarówno w teście brazylijskim, jak i próbie Herza, nie odbiegają od uzyskiwanych metodą udarową (Shipway, Hutchings 1993a). Ze względu na to, że takie badanie właściwości surowców jest technicznie łatwiejsze, do pomiarów właściwości przyjęto metodę wykorzystującą powolne ściskanie (Broch, Franklin 1972; Hudson i in. 1972; Chirone, Massimilla 1989; Clark 1993; Shipway, Hutchings 1993b).

Pierwsze badania dotyczące określenia wytrzymałości nieregularnych ziarn zapoczątkowano w latach 50. ubiegłego wieku (Protodiakonow, Woblikow 1957). Wykazano, że występuje pewna zależność statystyczna pomiędzy wytrzymałością ściskanych ziarn regularnych i nieregularnych. Protodiakonow i Woblikow przedstawili zależność między wielkością siły niszczonej  $F$  w próbie ściskania nieregularnego ziarna a jego masą  $m$ , według wzoru:

$$F \cong km^{0,67} \quad (6.2)$$

gdzie  $k$  jest współczynnikiem proporcjonalności (wskaźnikiem wytrzymałości), którego wartość zależy od właściwości mechanicznych surowca. Wartość współczynnika  $k$  Protodiakonow przyjął jako miarę wytrzymałości ziarn nieregularnych, która jest równa:

$$\delta_1 = k\rho^{0,67} \quad (6.3)$$

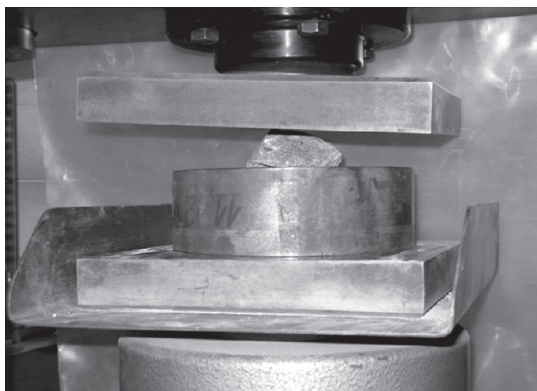
gdzie  $\rho$  jest gęstością ziarna.

Pomiędzy tak wyliczoną wytrzymałością ziarn nieregularnych a wytrzymałością walców  $\delta$  o średnicy 3 cm i wysokości 4,5 cm, uzyskaną w próbie jednoosiowego ściskania (rys. 6.5), istnieje statystyczna zależność (Protodiakonow, Woblikow 1957):

$$\delta_1 \cong 0,20\delta \quad (6.4)$$

potwierdzona później przez Iliwickiego i Nikolina (1961).

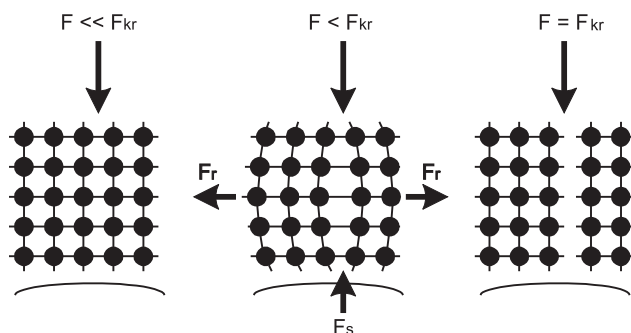
W przypadku rozdrabniania warstwowego w kruszarkach obciążanych jednocześnie różnymi siłami (zgniataniem, ścieraniem i udarem), modele matematyczne wiążące właściwości fizyczno-mechaniczne pojedynczych próbek skał o regularnych czy nieregularnych kształtach ze skutkami rozdrabniania, sprowadzają się do określenia prawdopodobieństwa rozdrabniania i nie zawsze mogą być wykorzystane w praktyce przemysłowej. Dlatego w ostatnim czasie Alona Nad (2014) podjęła analizę rozdrabniania warstwowego na podstawie efektów rozdrabniania pojedynczych nieregularnych ziarn występujących w warunkach przemysłowych przy grupowym (warstwowym) rozdrabnianiu ziarn w kruszarkach. Autorka dokonała oceny wpływu właściwości wytrzymałościowych, określanych za pomocą jednoosiowego ściskania pojedynczych nieregularnych ziarn (rys. 6.6), na zużycie energii w procesie rozdrabniania oraz na parametry funkcji krzywej składu ziarnowego. Analiza efektów rozdrabniania wykazała, że istnieje możliwość oceny rozdrabniania warstwowego w kruszarkach, w których dominuje zgniatanie ziarn, czyli w szczękowych o gładkich szczękach, stożkowych i walcowych, a więc możliwość symulowania procesów przemysłowych w warunkach laboratoryjnych oraz na tej podstawie możliwość oszacowania zużycia energii na rozdrabnianie z uwzględnieniem właściwości wytrzymałościowych ziarn.



**Rys. 6.6.** Jednoosiowe ściskanie pojedynczych ziarn między dwiema płytami w prasie hydraulicznej Toni Technik (fot. T. Gawenda)

W procesie rozdrabniania pod wpływem siły kruszącej zostają pokonane siły wewnętrzne wiązania cząstek, co powoduje rozpad skały, czyli zwiększenie powierzchni właściwej rozdrabnianego materiału, liczebności ziarn, zmianę kształtu ziarn, a nawet zmianę podatności na rozdrabnianie.

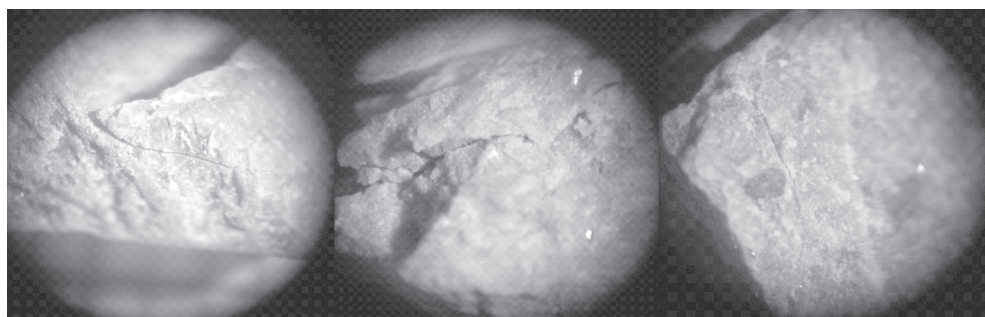
Uwzględniając mechaniczne rozdrabnianie surowców skalnych, rozróżnia się deformację sprężystą i plastyczną ciał. Ciała stałe podlegają odkształceniom sprężystym tylko pod działaniem niewielkich sił. Działanie większych sił wywołuje zarówno odkształcenia sprężyste, jak i trwałe (nieodwracalne). Ciała ulegające odkształceniom trwałym można podzielić na plastyczne i kruche. Podczas deformacji ciał, zachodzącej pod wpływem działania obciążeń zewnętrznych, jony przemieszczają się w sieci krystalicznej. Przeciwdziałają się temu siły oddziaływania elektrostatycznego, co powoduje pojawienie się wewnętrznych sił sprężystych (naprężeń) (rys. 6.7). Jeżeli siła działająca na ziarno jest niewielka, to powoduje ona deformację ziarna i powstanie w nim naprężeń, które są proporcjonalne do siły nacisku i odwrotnie proporcjonalne do powierzchni nacisku. Tworzące się naprężenia powodują pojawienie się w ziarnie sił ściskających  $F_s$ , wywołujących obszary kompresji, oraz sił rozrywających  $F_r$ , wywołujących obszary rozciągające atomy, które tworzą ziarno. Deformacja sprężysta znika po usunięciu obciążeń zewnętrznych. Zwiększanie siły nacisku na ziarno i przekazywanie mu coraz większej energii podwyższa naprężenia ziarna aż do chwili, gdy naprężenia przekroczą siły adhezji, czyli spójności międzycząsteczkowej, co prowadzi do pęknięcia wiązań i rozpadu ziarna (Drzymała 2001). Według Lewickiego (Lewicki i in. 2012) siły kohezji obliczone dla jednorodnych ciał stałych wynoszą od 1 do 10 GPa. W praktyce nie ma maszyn rozdrabniających, które wytwarzałyby tak duże naprężenia w materiale, a zatem przyczyn rozdrabniania należy się doszukiwać w tych defektach struktur materiałów, które obniżają jego wytrzymałość mechaniczną.



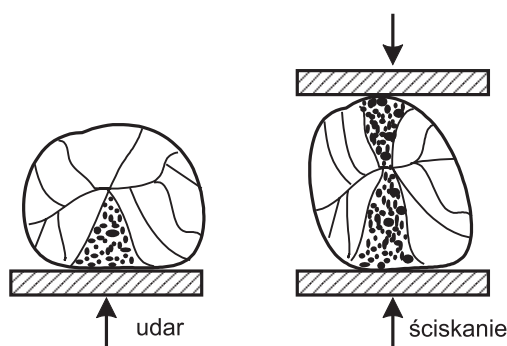
**Rys. 6.7.** Siły ściskające  $F_s$  i siły rozrywające  $F_r$  prowadzące do rozpadu ziarn według Drzymały (2001)

W ciałach kruchych defektami są istniejące mikropęknięcia lub inne nieciągłości, wady struktury jak dyslokacje, defekty upakowania, mikropory, wprysnięcia innych minerałów, wokół których następuje koncentracja naprężeń podczas rozciągania. W materiałach kruchych wyróżnić można trzy typy szczelin: objętościowe, powierzchniowe i krawędziowe (rys. 6.8). Najbardziej prawdopodobnym miejscem powstawania szczelin są warstwy powierzchniowe na granicy kontaktu rozdrabnianego ziarna ze ściskającym lub uderzającym przedmiotem (rys. 6.9). W niektórych ciałach stałych pęknięcia mogą powstać przez poślizg plastyczny. W przypadku rozdrabniania przez ściskanie ciał szczeliny będą się rozwijać w pobliżu deformacji plastycznych.





**Rys. 6.8.** Obrazy ziarn wapienia ze szczeliną krawędziową (z lewej), objętościową (w środku) i powierzchniową (z prawej) (Gawenda, Skotnicki 2008)



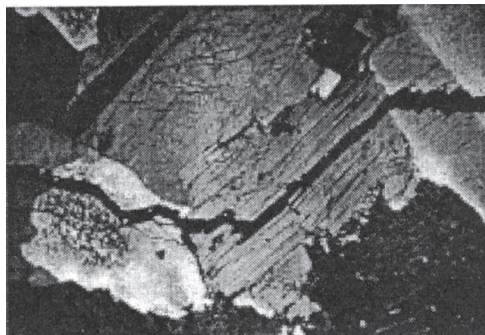
**Rys. 6.9.** Model oddziaływania na ziarno elementem roboczym za pomocą udaru i ściskania

Należy również zwrócić uwagę, że na właściwości wytrzymałościowe istotny wpływ wywierają struktura i tekstura z wewnętrznymi wadami budowy w postaci szczelin, które decydują o śródziarnowym lub międzyziarnowym pękaniu skały (rys. 6.10). Są to szczeliny wewnątrzkrystaliczne, których szerokość wynosi od  $10^{-11}$  do  $10^{-6}$  cm, jak również szczeliny w międzykrystalicznym spoiwie (cemencie), których szerokość dochodzi do  $10^{-2}$  cm, oraz szczeliny powstałe w procesach metamorficznych, których szerokość zawiera się w granicach od  $10^{-4}$  do 10 cm. Występowanie szczelin obniża parametry wytrzymałościowe skał i powoduje ich kruchość, czyli małą zdolność do odkształceń trwałych (Sokołowski 1978; Bromowicz 2001).

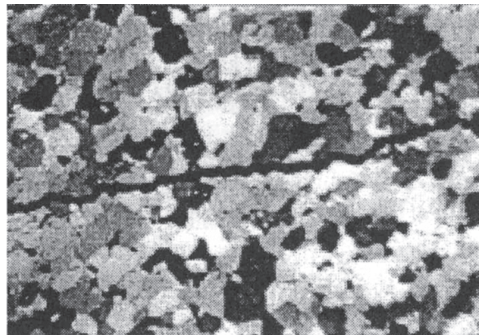
Wartość użytkowa skał stanowiących surowce przemysłu budowlanego i drogowego uzależniona jest od ich właściwości petrograficznych, w szczególności od struktury i tekstury, składu mineralno-chemicznego oraz stopnia świeżości (zwietrzienia).

W pracach dokumentacyjnych złóż oceniane są właściwości fizyczno-mechaniczne na próbkach pobranych z wierceń lub też naturalnych odsłoneń. Przy ocenie jakości kruszyw oznaczenia wykonuje się na materiale poddanym procesom kruszenia. Są one wynikiem urabiania skał materiałami wybuchowymi oraz kruszenia w procesie przeróbki dającym kruszywo łamane o odpowiedniej granulacji.

a)



b)



**Rys. 6.10.** Budowa wewnętrzna skał a sposoby pękania w próbie brazylijskiej:  
a) pękanie śródziarnowe; b) pękanie międzyziarnowe (Sokołowski 1978)

Przy określaniu właściwości tych surowców, a także ich produktów, podaje się zwykle gęstość właściwą i objętościową, a także porowatość, nasiąkliwość, wytrzymałość na ściskanie, ścieralność, odporność na zamrażanie, zwięzłość czy odporność na rozdrabnianie. Spośród wymienionych cech jedną z najważniejszych jest wytrzymałość na ściskanie, która wynosi od około 1 MPa dla porowatych i lekkich wapieni do około 400 MPa dla niektórych bazaltów czy kwarcytów. Grubokrystaliczne skały wykazują przeważnie mniejszą wytrzymałość niż skały drobnokrystaliczne. Skały o zaznaczającej się teksturze równoległej wykazują anizotropię wytrzymałości. Skały nasycone wodą wykazują na ogół niższą wytrzymałość niż skały suche. Niektóre skały po wydobywaniu i wysuszeniu twardnieją (Gabzdyl 1983).

W ocenie wyników badań wytrzymałości skał należy również uwzględnić fakt odprężania się skał po uwolnieniu ich z ciśnienia górotworu. Zgodnie z literaturą (Bromowicz 2001) kruszywa łamane mają niższe gęstości pozorne, a zwłaszcza wyższe nasiąkliwości w porównaniu do kopaliny, z której powstały. Stwierdzono zmniejszanie się gęstości pozornej i wzrost nasiąkliwości we frakcjach kruszywa o drobniejszym uziarnieniu. Silniej zaznacza się to w przypadku skał reprezentujących kopaliny o gorszych właściwościach fizyczno-mechanicznych. Wytrzymałość na miażdżenie kruszywa jest wyraźnie związana z wytrzymałością na ściskanie kopaliny. Jest ona najwyższa w kruszywach ze złóż o wysokich wytrzymałościach na ściskanie ziarn urobku.

Ze skały o dużej wytrzymałości na ściskanie, powyżej 150 MPa, w procesie kruszenia otrzymuje się materiał o stosunkowo równomiernym rozkładzie poszczególnych frakcji. W przypadku skał o średniej wytrzymałości (w granicach 80–150 MPa) wychód frakcji drobnych, wielkościami nieprzekraczających 0,3–0,4 maksymalnej wielkości ziarna, wrasta nawet do 70% całości udziału. Skały o niskiej wytrzymałości (w granicach 30–80 MPa) kruszą się w ten sposób, że frakcje drobne, wielkościami nieprzekraczające 0,3–0,4 maksymalnej wielkości ziarna, stanowią do 80% całości udziału.

Dwudziestoletnie badania laboratoryjne prowadzone przez Ferdinanda Cipo w Tiranie na około 10 tysiącach próbek oraz na obserwacjach 1240 próbek skał magmowych ultra-



zasadowych (m.in. dunity, harzburgity, piroksenity, serpentynity), zasadowych (m.in. gabro-diabazy, spility migdałowe z migdałami kalcytu lub kwarcu), obojętnych (m.in. dioryty kwarcowe, plagiogranity) i kwaśnych (m.in. granity, kwarcyty) z różnych złóż umożliwiły wykazanie relacji pomiędzy właściwościami skał magmowych a ich jednoosiowym ściskaniem. Autor pracy (Cipo 2003) dowodzi, że wytrzymałość skał (w tym przypadku) magmowych na jednoosiowe obciążenie zależy od budowy strukturalno-teksturowej skał i od wtórnych zmian zachodzących w minerałach skałotwórczych.

Cipo uzasadnił, że wytrzymałość badanych próbek zależała od ich właściwości, takich jak: porowatość, wilgotność, kąt tarcia wewnętrznego, moduł Younga, liczba Poissona.

Wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie zmieniała się w bardzo szerokim zakresie, w zależności od zmian w budowie strukturalno-teksturowej skał: w skałach ultrazasadowych wynosiła od 40 do 130 MPa, w skałach zasadowych od 33 do 142 MPa, w skałach obojętnych od 45 do 155 MPa, a w skałach kwaśnych od 45 do 175 MPa.

Moduł Younga miał wyższe wartości w skałach ultrazasadowych i zasadowych niż w skałach obojętnych i kwaśnych i zmieniał się w przedziale od około 10 do ponad 50 GPa. Liczba Poissona zmieniała się w granicach od 0,16 do 0,23 w skałach ultrazasadowych, od 0,16 do 0,25 w skałach zasadowych i obojętnych oraz od 0,17 do 0,22 w skałach kwaśnych.

## **6.2.2. Analiza rozkładu wielkości i kształtu uziarnienia kruszyw w zależności od rodzajów maszyn**

W ostatniej dekadzie przeprowadzono szereg badań naukowych dotyczących wpływu parametrów technologicznych kruszarek na efektywność procesu rozdrabniania oraz sposobu optymalizacji składu ziarnowego i kształtu ziarn w produktach rozdrabniania surowców skalnych (Gawenda 2004; Naziemiec 2006; Trybalski, Krawczykowski 2006; Gawenda 2010a, b, Gawenda 2011c). Badania obejmowały zarówno produkcję kruszyw gruboziarnistych stosowanych w drogownictwie i budownictwie, jak i produkcję kruszyw drobnoziarnistych w przemyśle budowlanym (wypełniacze) i energetycznym (sorbenty).

W tabeli 6.2 zestawiono rodzaje parametrów konstrukcyjnych oraz eksploatacyjnych różnych kruszarek, które mają istotne znaczenie. Przykładowo najważniejszymi parametrami konstrukcyjnymi kruszarek szczękowych są: wielkość wlotowa gardzieli, kąt nachylenia płyty rozporowej, rodzaj trajektorii ruchu szczęki, skok szczęki i prędkość obrotowa wału mimośrodowego. Parametry te są dobierane na etapie projektowania maszyny do produkcji odpowiednich surowców, dlatego podczas eksploatacji nie są regulowane. Do parametrów eksploatacyjnych kruszarek szczękowych należą: szczelina wylotowa oraz profil poprzeczny i podłużny płyt. O ile szczelinę wylotową reguluje się często w zależności od potrzeb uziarnienia i stopnia zużycia okładzin, o tyle profile okładzin można uzyskać tylko przy wymianie zużytych płyt na nowe. Na wydajność kruszarki wpływa wielkość szczeliny wylotowej i otworu wlotowego. Na rozkład uziarnienia kruszyw najbardziej wpływa wielkość szczeliny wylotowej kruszarki i rodzaj rowkowania szczęk (kształt przekroju poprzecznego) (Naziemiec i in. 2008).

**Tabela 6.2**

Zestawienie najważniejszych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych kruszarek

Rodzaj kruszarki	Parametry konstrukcyjne	Parametry eksploatacyjne
Szczękowa	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wielkość wlotowa gardzieli,</li> <li>– kąt nachylenia płyty rozporowej,</li> <li>– skok szczęki,</li> <li>– kąt uchwyty,</li> <li>– trajektoria ruchu szczęki,</li> <li>– prędkość obrotowa wału mimośrodowego</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– szczelina wylotowa,</li> <li>– profil podłużny i poprzeczny okładzin</li> </ul>
Stożkowa	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wielkość wlotowa gardzieli,</li> <li>– skok stożka,</li> <li>– kąt uchwyty,</li> <li>– ukształtowanie komory roboczej</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– szczelina wylotowa,</li> <li>– prędkość obrotowa stożka</li> </ul>
Walcowa	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wielkość wlotowa gardzieli,</li> <li>– kąt uchwyty,</li> <li>– średnica i długość walców,</li> <li>– ukształtowanie powierzchni walców,</li> <li>– liczba walców</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– szczelina wylotowa,</li> <li>– prędkość obrotowa walców</li> </ul>
Młotkowa	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wielkość wlotowa gardzieli,</li> <li>– liczba wirników,</li> <li>– średnica i długość wirnika,</li> <li>– kształt i masa młotków,</li> <li>– liczba młotków,</li> <li>– kąt nachylenia płyt odbojowych,</li> <li>– kształt i liczba płyt odbojowych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wielkość oczka rusztu,</li> <li>– prędkość obrotowa wirnika</li> </ul>
Listwowa	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wielkość wlotowa gardzieli,</li> <li>– ukształtowanie komory wlotowej,</li> <li>– liczba wirników,</li> <li>– średnica i długość wirnika,</li> <li>– kształt i liczba listew,</li> <li>– kąt nachylenia płyt odbojowych,</li> <li>– kształt i liczba płyt odbojowych</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wielkość szczeliny kalibracyjnej,</li> <li>– prędkość obrotowa wirnika</li> </ul>
HPGR	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wielkość wlotowa gardzieli,</li> <li>– średnica i długość rolek,</li> <li>– ukształtowanie powierzchni rolek</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– prędkość obrotowa rolek,</li> <li>– siła nacisku rolki,</li> <li>– wielkość szczeliny zerowej</li> </ul>

Tabela 6.3 przedstawia przykładowy wpływ najważniejszych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych kruszarek na efekty ich pracy. Należy podkreślić, że nieodpowiednio dobrane parametry urządzenia decydują o jego eksploatacji, np. zużyciu energii albo elementów roboczych, a w efekcie o jakości produktów. Kształt i uziarnienie kruszyw mają decydujący wpływ na wytrzymałość betonu i zaprawy oraz podbudowy i nawierzchni drogowej, co zostało omówione w rozdziale 2.

**Tabela 6.3**

Wpływ najważniejszych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych na efekty pracy kruszarek

<b>Parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne</b>	<b>Efekty</b>
Zwiększenie szczeliny wylotowej	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zwiększenie przepustowości (wydajności),</li> <li>– zmniejszenie stopnia rozdrobnienia,</li> <li>– wzrost grubszego uziarnienia produktu</li> </ul>
Ruch złożony szczęki lub ruch prosty szczęki	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wzrost zawartości ziarn nieforemnych tylko w drobnych klasach,</li> <li>– wzrost udziału ziarn w grubych klasach,</li> <li>– zwiększona wydajność,</li> <li>– zwiększone zużycie szczęk</li> </ul>
Zamiana szczęk o profilu gładkim na szczęki rowkowane	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wzrost zawartości ziarn foremnych,</li> <li>– mniejsze zużycie energii,</li> <li>– zwiększenie udziału klas drobnych,</li> <li>– wzrost stopnia rozdrobnienia</li> </ul>
Zwiększenie prędkości obrotowej wirnika	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wzrost drobniejszego uziarnienia produktu,</li> <li>– zwiększenie stopnia rozdrobnienia,</li> <li>– zwiększenie zużycia elementów roboczych,</li> <li>– zwiększenie zużycia energii,</li> <li>– zmniejszenie wydajności</li> </ul>
Większa liczba płyt odbojowych i listew udarowych	<ul style="list-style-type: none"> <li>– wzrost drobniejszego uziarnienia,</li> <li>– zwiększenie stopnia rozdrobnienia,</li> <li>– wzrost zużycia elementów roboczych,</li> <li>– zwiększenie zużycia energii</li> </ul>

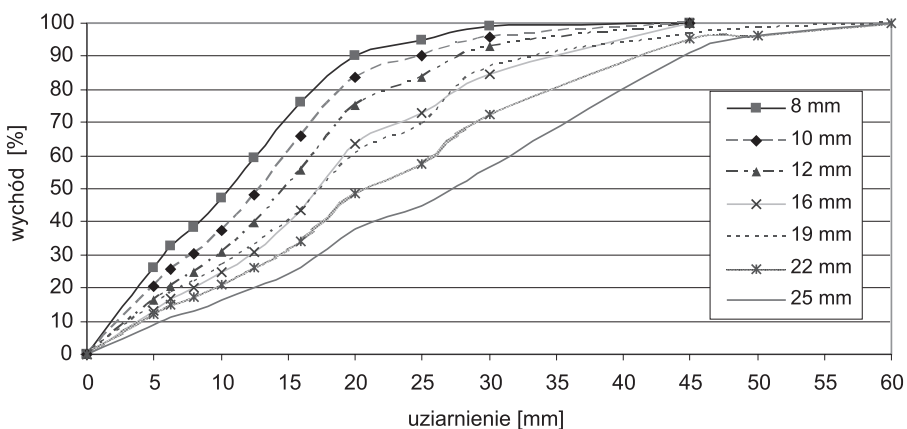
Jak wspomniano, struktura, tekstura i łupliwość skał wpływają na wielkość ziarn produktów oraz decydują o ich kształcie, który rzadko jest sześcienny lub kulisty. W produktach kruszenia przeważają ziarna nieregularne, blaszkowate i igiełkowate, co powoduje, że produkty te zawierają ziarna o rozmiarach znacznie większych niż maksymalna szerokość szczeliny wylotowej kruszarki. Maksymalna wielkość ziarn zależy od wytrzymałości skały oraz od rodzaju kruszarki (Grzelak 1973, 1995).

W przypadku kruszarek szczękowych i skał o dużej wytrzymałości maksymalny wymiar ziarn produktów kruszenia jest średnio około 2,5 razy większy od maksymalnej szerokości szczeliny wylotowej kruszarki. Przy kruszeniu skał o średniej wytrzymałości maksymalny wymiar ziarna jest około 2 razy większy od maksymalnej szerokości szczeliny. Przy skałach o niskiej wytrzymałości stosunek ten wynosi około 1,8. Kruszarki stożkowe do kruszenia wstępnego i średniego dają produkty kruszenia o jeszcze większym stosunku maksymalnego wymiaru ziarna do maksymalnej szerokości szczeliny kruszarki. Wartości te odpowiednio wynoszą: 3,0; 2,6 i 2,2. Kruszarki stożkowe do kruszenia drobnego (tzw. granulatory) dają produkty zawierające ziarna o wymiarach maksymalnych: 2,2; 1,7 i 1,5 razy przekraczających maksymalną szczelinę kruszarki. Podane literaturowe zależności według Eugeniusza Grzelaka (1973) nie są jednak regułą, nie wiadomo również, dla jakich rodzajów okładzin prowadzono badania. Przy doborze określonych urządzeń należy zawsze przetestować roz-

drabnianie konkretnych surowców i ustalić charakterystyki ziarnowe. Przykładowe badania zostały przeprowadzone w kruszarce szczękowej o ruchu złożonym typu L44.41 firmy Makrum w laboratorium Katedry Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców AGH. Badania wykonano dla dwóch rodzajów surowców skalnych o średniej wytrzymałości na ściskanie około 140 MPa (chalcedonit) i wysokiej wytrzymałości około 200 MPa (porfir). Uśrednione wyniki dla obu materiałów zaprezentowano na rysunku 6.11.

Dla największej wartości szczeliny wylotowej 25 mm maksymalne uziarnienie produktu dochodziło do 60 mm, czyli ziarno maksymalne jest 2,4-krotnie większe od szczeliny. Dla najmniejszej szczeliny wylotowej  $d_{max}/e$  wyniosło 4,1, a więc im drobniejsze kruszenie materiału (zadana mniejsza szczelina wylotowa), tym stosunek maksymalnej wielkości ziarna produktu kruszenia do szczeliny jest większy.

Wychody materiału dla uziarnienia większego od nastawianej szczeliny wylotowej wahały się w granicach 55–62%. Zawartość klasy najdrobniejszej (0–5 mm) dla szczeliny 8 mm wynosiła 26% i zmalała do 8% dla szczeliny 25 mm. Oczywiście jest, że wraz ze wzrostem szczeliny wylotowej maleje udział ziarn drobnych w produktach rozdrabniania i wzrasta udział ziarn grubych. Kwalifikowany uśredniony 80-procentowy stopień rozdrobnienia wyniósł 4,1.



**Rys. 6.11.** Średni skład granulometryczny rozdrobnionego porfiru i chalcedonitu w kruszarce L44.41 w zależności od wielkości szczeliny wylotowej (Michulec 2009)

Analiza zawartości ziarn nieforemnych w zależności od wielkości szczeliny wylotowej (dla chalcedonitu) wykazała, że największą zawartość ziarn nieforemnych powyżej 80% otrzymano we frakcji najdrobniejszej (4–5 mm) dla wszystkich zadanych wielkości szczeliny wylotowej za wyjątkiem  $e = 12$  mm (68,4%). Wraz ze wzrostem wielkości klasy ziarnowej uzyskanej przy danej szczelinie wylotowej maleje zawartość ziarn nieforemnych (najgrubsze klasy nie mają ziarn nieforemnych) (tab. 6.4). Wraz ze wzrostem uziarnienia produktu oraz szczeliny wylotowej zawartość ziarn nieforemnych (wskaźnik płaskości) maleje. Zależność ta jest również zachowana dla porfiru. Im drobniejszy produkt powstaje w wyniku rozdrabniania, tym mniej uzyskuje się ziarn foremnych.

**Tabela 6.4**

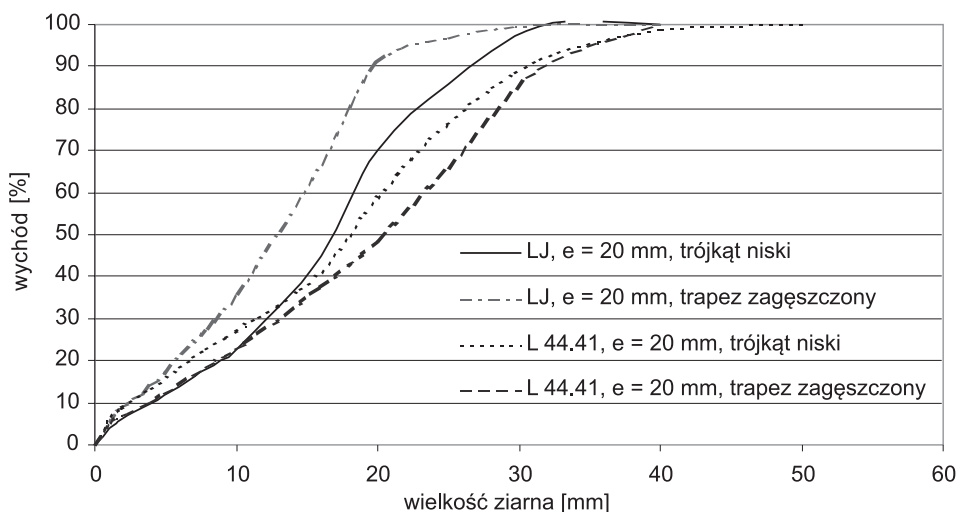
Zawartość ziarn nieforemnych oraz wskaźnik płaskości w produktach rozdrabniania chalcedonitu w zależności od wielkości szczeliny wylotowej (Jachym 2009)

Klasa ziarnowa [mm]	Sito szczelinowe [mm]	Procentowe zawartości ziarn nieforemnych dla szczelin wylotowych							
		$e = 8$	$e = 10$	$e = 12$	$e = 14$	$e = 16$	$e = 19$	$e = 22$	$e = 25$
4–5	2,5	86,6	83,3	68,4	82,5	82,2	81,5	81,7	82,1
5–6,3	3,15	23,5	24,5	33,0	27,5	25,5	26,2	30,1	31,3
6,3–8	4	20,3	21,7	33,5	26,1	28,5	26,3	24,6	35,4
8–10	5	17,8	23,2	35,1	21,9	28,8	26,8	30,6	37,7
10–12,5	6,3	15,2	18,9	23,6	21,3	27,4	21,6	26,8	35,8
12,5–16	8	14,8	20,8	22,2	13,2	24,2	20,2	19,4	31,8
16–20	10	12,6	8,4	15,6	9,5	13,0	10,0	12,6	14,8
20–25	12,5	13,3	16,4	16,7	18,6	10,8	5,7	17,1	13,4
25–30	16	5,9	13,9	13,7	12,2	8,3	6,5	10,0	8,7
30–45	20	0,0	8,1	12,8	8,2	4,4	9,6	4,5	4,9
45–50	25	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	6,8	0,0	0,0
50–60	31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
>60	–	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Wskaźnik płaskości $K$ [%]		37,2	31,1	28,9	27,3	25,6	23,4	23,1	18,6

Na podstawie analizy badań doświadczalnych w kruszarce szczękowej L44.41 można dojść do wniosku, że szczelina wylotowa wpływa bezpośrednio na wielkość uziarnienia produktu oraz na kształt ziarn w produktach. Przeprowadzono także badania dotyczące wpływu różnych profili podłużnych i poprzecznych okładzin na kształty i wielkości otrzymywanych ziarn produktów (Naziemiec, Gawenda 2006).

W kruszarkach o złożonym ruchu szczęki uzyskuje się kruszywo o większym udziale ziarn grubych w stosunku do kruszarek o ruchu prostym, co wynika z trajektorii ruchu szczęki (rys. 6.12). Wpływ ukształtowania powierzchni okładzin na ogólny udział ziarn nieforemnych uzyskanych w produktach w kruszarkach o złożonym ruchu szczęki jest mniejszy niż w kruszarkach o ruchu prostym.

Nie stwierdzono natomiast wpływu prędkości obrotowej wału mimośrodowego na skład ziarnowy i zawartość ziarn nieforemnych (próby przeprowadzono przy prędkościach 280, 320, 360, 400 i 440 obr/min) (Gawenda 2004).

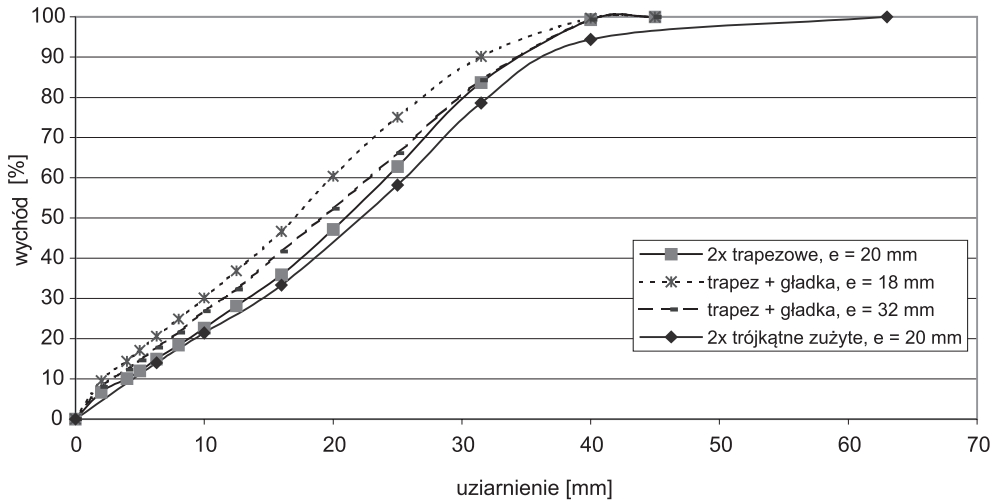


**Rys. 6.12.** Krzywe składu ziarnowego produktów uzyskanych w kruszarkach szczękowych (Naziemiec, Gawenda 2006)

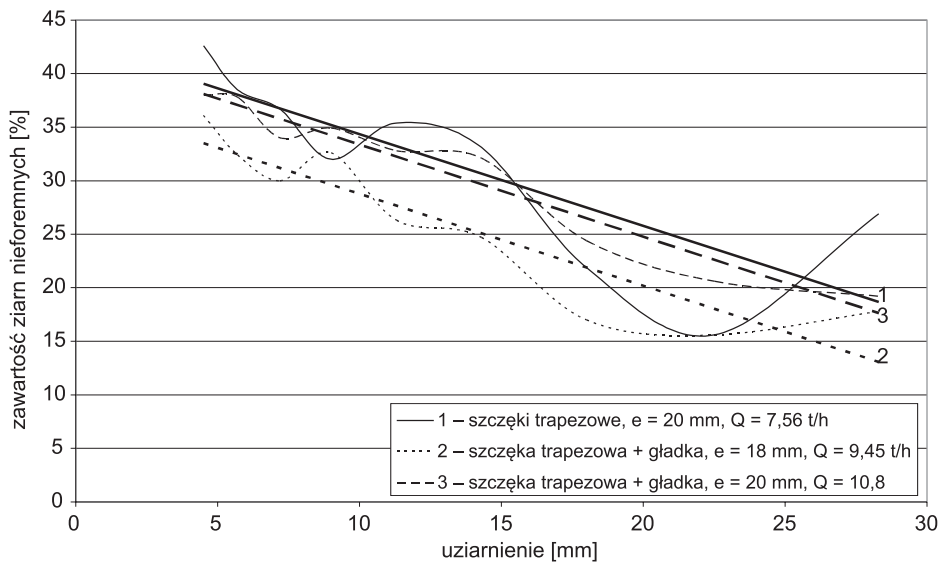
Przebadano także kombinację zestawów szczęk o różnych profilach poprzecznych:

- obie szczęki z rowkami trapezowymi, szczelina wylotowa 20 mm,
- obie szczęki z rowkami trójkątnymi zużytymi, szczelina wylotowa 20 mm,
- szczęka z rowkami trapezowymi + szczęka gładka, szczelina wylotowa 30 mm,
- szczęka z rowkami trapezowymi + szczęka gładka, szczelina wylotowa 32 mm.

Wyniki w formie wykresów zamieszczono na rysunkach 6.13 oraz 6.14. Z przeprowadzonych badań kruszenia wynika, że dla szczęk kombinowanych (gładka + rowkowana) uzyskano korzystniejsze efekty rozdrabniania. Powiększając znacznie szczelinę wylotową  $e$  w przypadku szczęk kombinowanych uzyskano zwiększone powierzchnie pola przekroju szczeliny, co w efekcie przyniosło znaczny wzrost wydajności (25–40%). Równocześnie uzyskano drobniejszy produkt (większy stopień rozdrobnienia) i mniejszą zawartość ziarn nieforemnych niż dla obu szczęk rowkowanych. Wartości średniego ziarna ( $d_{50}$ ) produktów procesu kruszenia za pomocą płyt kombinowanych (gładka + rowkowana z zębami trapezowymi) były niższe od kilku do kilkunastu procent (7,6–18,7%) w porównaniu z obydwojema płytami rowkowanymi. Zawartość ziarn nieforemnych dla płyt kombinowanych również była niższa niż dla obu płyt rowkowanych. Zauważono także, że ten sam układ płyt niesymetrycznych (gładka + rowkowana) wpływał na zwiększenie wydajności procesu rozdrabniania, ponieważ grawitacyjny przepływ materiału przez komorę kruszenia jest łatwiejszy (mniejsze opory tarcia o powierzchnie płyt) niż w przypadku zestawu płyt rowkowanych.



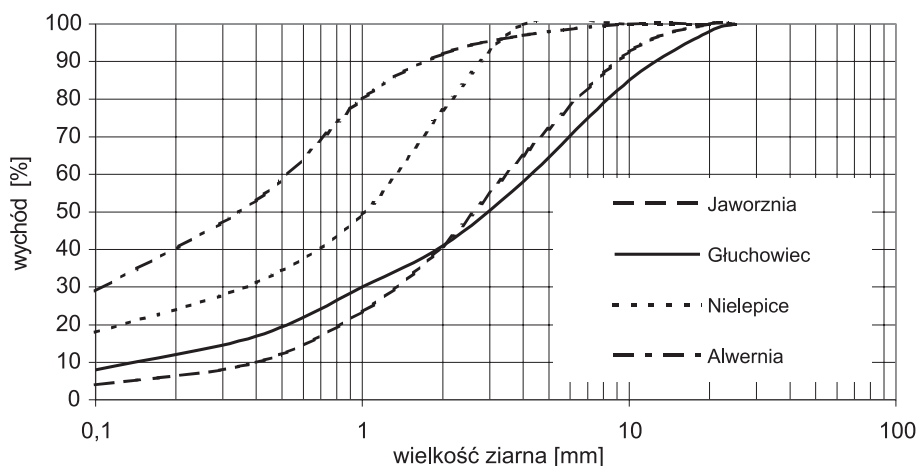
**Rys. 6.13.** Skład ziarnowy produktów kruszenia dla różnych zestawów szczęk kruszarki szczękowej (Naziemiec i in. 2008)



**Rys. 6.14.** Zawartość ziarn nieforemnych w produktach kruszenia dla różnych okładzin kruszarki szczękowej L44.41 (Naziemiec i in. 2008)

W przypadku kruszarek młotkowych głównymi parametrami są prędkość obrotowa wirnika, liczba i kształt młotków osadzonych na wirniku, ukształtowanie płyt odbojowych (jeśli występują) oraz wielkość oczka rusztu. Granulacja produktów otrzymywanych z kruszarek młotkowych zależy głównie od szerokości szczelin rusztu i odległości młotków od

powierzchni rusztu. Istotna jest również prędkość liniowa młotków. Znane są przykłady stosowania kruszarek młotkowych w celu poprawy kształtu ziarn kruszyw i rozbijania suchych zanieczyszczeń gliniastych. Prędkość liniowa młotków przy takim przeznaczeniu kruszarki wynosi zwykle około 20 m/s. Na rysunku 6.15 przedstawiono składy ziarnowe wapienia uzyskane w kruszarce młotkowej Makrum typu 41.98. Kluczowe znaczenie podczas rozdrabniania odgrywa twardość surowca. Pod wpływem udaru twardszy wapień ulega większemu rozdrobnieniu. Przy rozdrabnianiu tego samego surowca w kruszarkach szczękowych lub stożkowych efekty rozdrabniania nie byłyby tak silnie zróżnicowane.



**Rys. 6.15.** Krzywe składu ziarnowego produktów wapienia uzyskanych w kruszarce młotkowej Makrum typu 41.98 (Naziemiec, Gawenda 2006)

Kruszarki udarowe listwowe należą do najczęściej stosowanych w procesie produkcji kruszyw. Charakteryzują się niskim ciężarem jednostkowym, dużą wydajnością, niskim zużyciem energii i zapewniają uzyskanie kruszyw o najmniejszej ilości ziarn nieforemnych (do kilku procent). Podobnie jak kruszarki młotkowe mogą równocześnie odgrywać rolę w pewnym sensie urządzenia wzbogacającego, ponieważ pozbawiają surowce skalne zanieczyszczeń ilastych. Kruszarki udarowe są również wygodne do instalowania w mobilnych zestawach kruszących.

Zalecane prędkości liniowe listew udarowych wynoszą dla skał osadowych 30–50 m/s, a dla skał magmowych 20–35 m/s (Naziemiec, Gawenda 2006). W praktyce skały magmowe kruszone są przy prędkościach listew wyższych niż wymienione wartości. Istotna jest możliwość zmiany prędkości obrotowej wirnika, ponieważ pozwala to na łatwe dostosowanie parametrów pracy kruszarki do oczekiwanych efektów. Przykładowo, jak pokazano w tabeli 6.5, w celu uzyskania jak największej ilości klasy ziarnowej 2–8 mm z nadawy 5–90 mm, przy stałej szczeliny wylotowej 40 mm, korzystniej było obniżyć prędkość liniową wirnika do 37 m/s, ponieważ umożliwiło to podniesienie przerobu kruszarki do 105 Mg/h i uzyskanie przy tej wydajności 36,8 Mg/h wymaganej klasy.

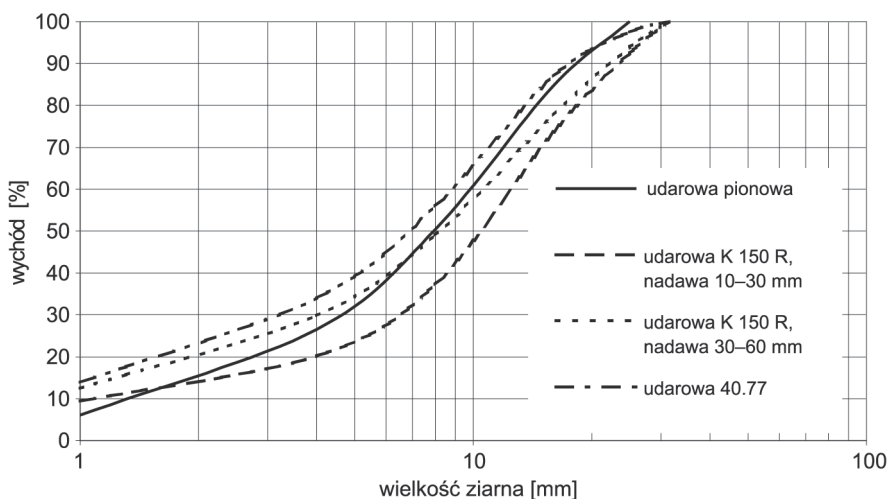


**Tabela 6.5**

Parametry pracy kruszarki udarowej listwowej SBM według Löwego (2010)

Prędkość liniowa wirnika [m/s]	Udział klasy 2–8 mm [%]	Wydajność kruszarki [Mg/h]	Ilość docelowo uzyskanej klasy [Mg/h]
37	35	105	36,8
41	41	90	36,9
45	45	80	32

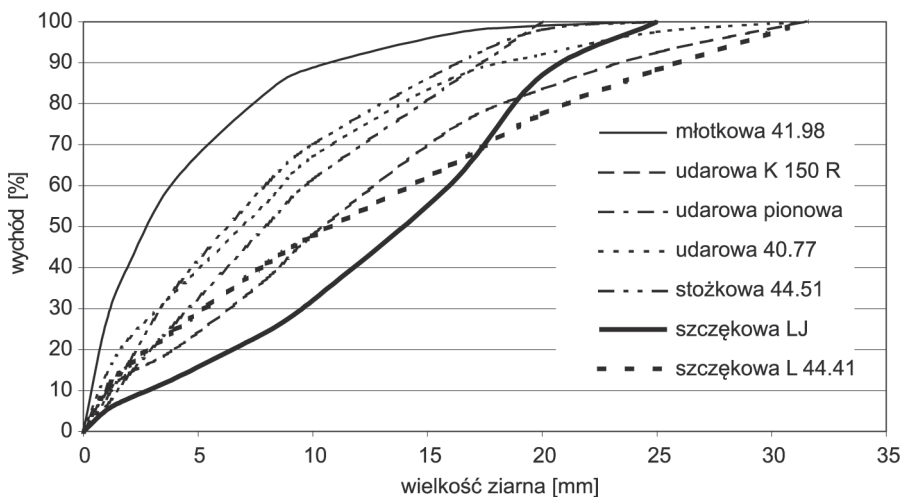
Na rysunku 6.16 przedstawiono składy ziarnowe dla produktów otrzymanych z kruszarek udarowych: 40.77 Makrum dla dolomitu przy prędkości liniowej 40 m/s; K 150 R Mifama dla wapienia przy prędkości liniowej 30 m/s; z wałem pionowym dla chalcedonitu.



**Rys. 6.16.** Krzywe składu ziarnowego produktów wapienia uzyskanych w kruszarkach udarowych listwowych różnego typu (Naziemiec, Gawenda 2006)

Na rysunku 6.17 zestawiono krzywe składu ziarnowego produktów otrzymanych z różnych kruszarek przeznaczonych do pracy z różnymi surowcami skalnymi. Kształty krzywych świadczą o silnym zróżnicowaniu uzyskiwanych produktów, dlatego ważny jest odpowiedni dobór maszyn i ich parametrów pracy. Przykładowo, w celu wyprodukowania kruszyw o większym udziale klas grubszych należy zastosować kruszarki szczękowe, z kolei kruszarki młotkowe i udarowe będą dawać duże ilości ziarn najdrobniejszych.

W tabeli 6.6 zestawiono dane dotyczące zawartości ziarn nieforemnych dla omawianych kruszarek. Łatwo zauważyć, że najwięcej foremnych ziarn uzyskuje się z kruszarek udarowych, następnie stożkowych, a najmniej ze szczękowych.



**Rys. 6.17.** Krzywe składu ziarnowego uzyskane w różnych typach kruszarek (wartości uśrednione dla wapienia, porfiru, diabazu i piaskowca) (Naziemiec, Gawenda 2006)

**Tabela 6.6**

Zawartość ziarn nieforemnych (wskaźnik płaskości) w produktach uzyskanych w różnych kruszarkach (Naziemiec, Gawenda 2006)

Frakcja kruszywa [mm]	Średnia zawartość ziarn nieforemnych [%]						
	kruszarki udarowe	kruszarki stożkowe		kruszarki szczękowe			
	40.77 40.76	44.51 granulator	Nordberg granulator	LJ – prosty ruch szczęki		L 44.41 – złożony ruch szczęki	
				rowki trójkątne	rowki trapezowe	rowki trójkątne	rowki trapezowe
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

W pracy (Nowak, Gawenda 2006) przedstawiono warunki i wyniki wielostadialnych procesów rozdrabniania w dwóch wybranych zakładach produkcji kruszyw bazaltowych znajdujących się na Dolnym Śląsku. Bazaltowe surowce skalne przeznaczone są w całości do produkcji kruszyw łamanych najwyższej 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 klince 4–31,5 mm i tłucznie 31,5–63 mm. Zakłady produkują zbliżone asortymenty, w większości przeważają grysy. Schematy technologiczne zakładu A oraz zakładu B pokazano w rozdziale 5 na ry-

sunku 5.9. W tabeli 6.7 zestawiono dane dotyczące maszyn kruszących na poszczególnych stadiach oraz wielkości szczeliny wylotowej, uziarnienia nadawy i produktu.

**Tabela 6.7**

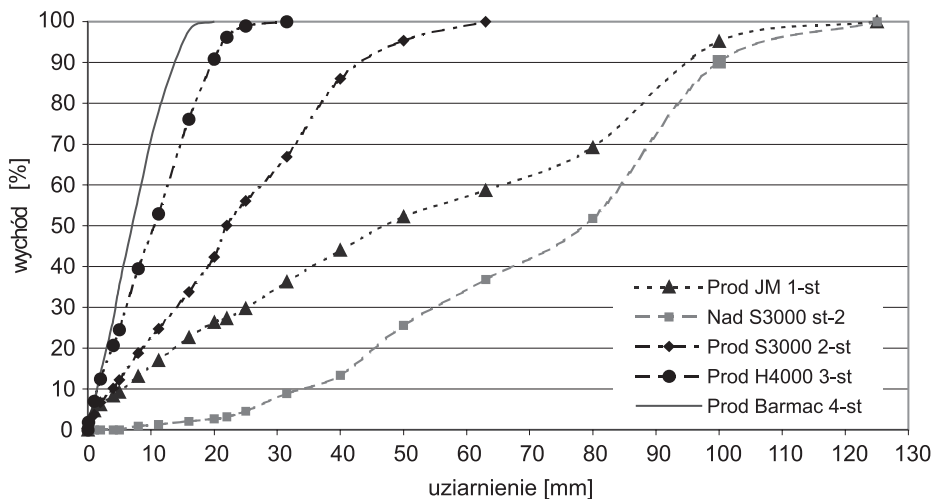
Rodzaje kruszarek zainstalowanych w wybranych zakładach produkcji kruszyw bazaltowych (Nowak, Gawenda 2006)

Stadium rozdrabniania	Zakład	Rodzaj kruszarki	Szczelina wylotowa $e$ [mm]	Uziarnienie nadawy $D$ [mm]	Uziarnienie produktu $d$ [mm]
Pierwsze	A	szcękowa JM	95	0–500	0–125
	B	stożkowa Krupp	>100	0–1000	0–250
Drugie	A	stożkowa Svedala Superior 3000	38	8–125	0–63
	B	stożkowa Krupp	90	28–250	0–100
Trzecie	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
Czwarte	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

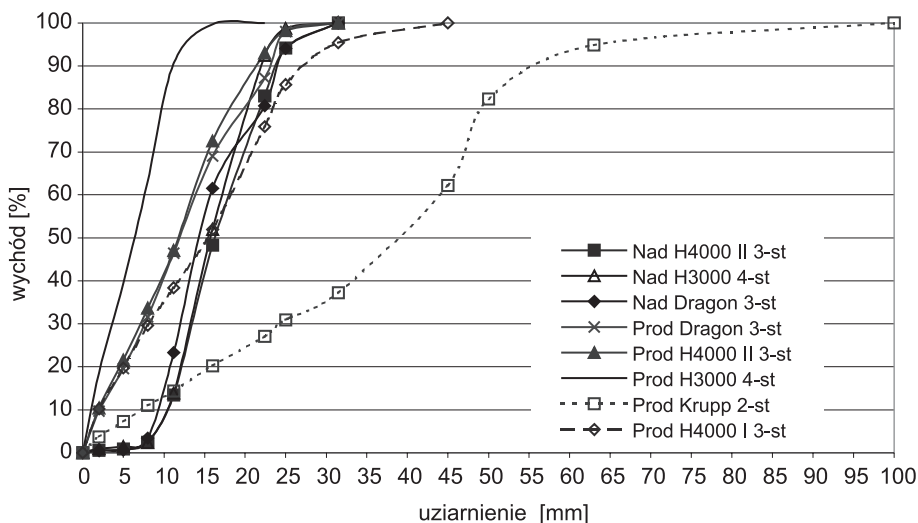
W celu określenia wpływu parametrów pracy kruszarek na uzyskiwane wyniki rozdrabniania wykorzystano dane pochodzące z opróbowania ciągów technologicznych w czasie pięciu miesięcy produkcji kruszyw (zakład A) oraz w okresie letnim i zimowym (zakład B).

Na rysunkach 6.18 i 6.19 przedstawiono otrzymane w poszczególnych stadiach rozdrabniania w zakładach A i B składy granulometryczne produktów kruszenia. Analiza wykresów krzywych składu ziarnowego pozwala zauważyć zdecydowaną różnicę w uziarnieniu produktów uzyskiwanych w drugim stadium prowadzenia procesu w zakładach A i B. Różnicowanie 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 (kruszarła H4000 I). Jest to część mieszanego układu z zawrotem produktu nadsitowego z trzeciego stadium do kruszarek pracujących w układzie równoległym również na trzecim stadium rozdrabniania.

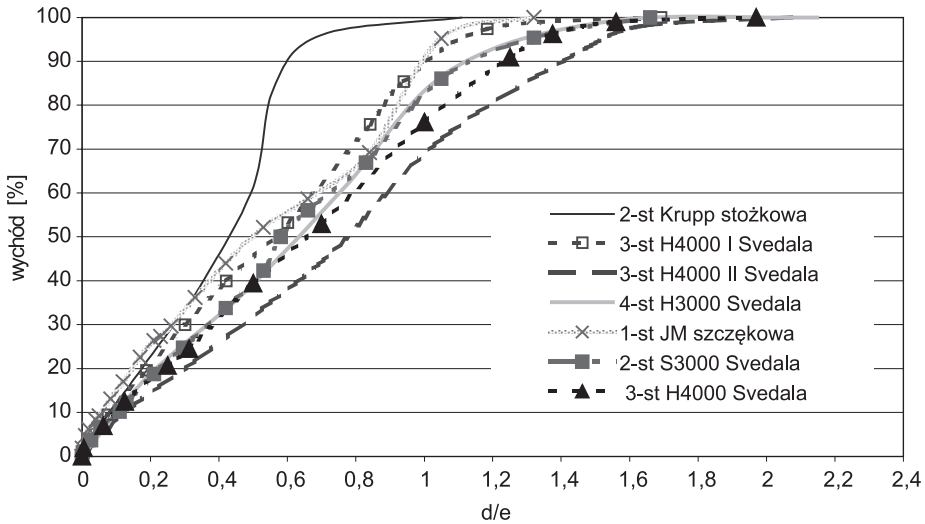


Rys. 6.18. Skład ziarnowy nadawy i produktów rozdrabniania – zakład A (Nowak, Gawenda 2006)



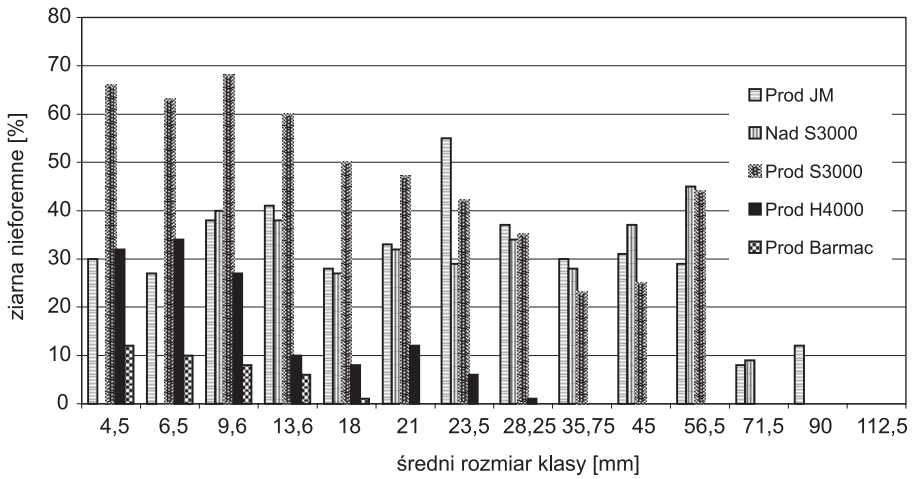
Rys. 6.19. Skład ziarnowy nadawy i produktów rozdrabniania – zakład B, okres letni (Nowak, Gawenda 2006)

Rysunek 6.20 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.

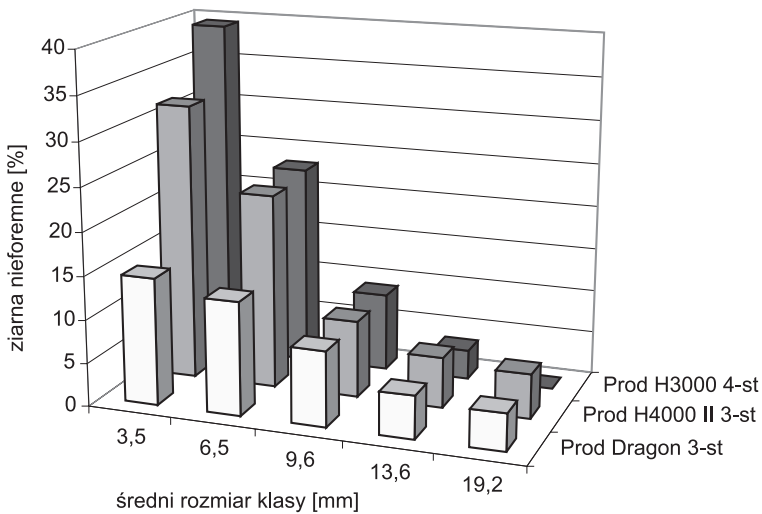


**Rys. 6.20.** Skład ziarnowy produktów rozdrabniania w odniesieniu do wielkości szczeliny wylotowej  $e$  – zakłady A i B (Nowak, Gawenda 2006)

Udziały ziarn nieforemnych w poszczególnych frakcjach ziarnowych produktów rozdrabniania pokazano na rysunkach 6.21 (zakład A) i 6.22 (zakład B). Na rysunku 6.21 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 6.22 (przykładowo dla okresu letniego) wynika, że najniższą zawartością ziarn nieforemnych charakteryzuje się produkt rozdrabniania w kruszarce udarowej Dragon (trzecie 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 (z wyjątkiem frakcji <8 mm), co można ewentualnie powiązać ze zmniejszeniem szczeliny wylotowej kruszarki H3000 w tym okresie.



Rys. 6.21. Udział ziarn nieforemnych w poszczególnych frakcjach ziarnowych produktów rozdrabniania – zakład A (Nowak, Gawenda 2006)



Rys. 6.22. Udział ziarn nieforemnych w poszczególnych frakcjach ziarnowych wybranych produktów rozdrabniania – zakład B, okres letni (Nowak, Gawenda 2006)

W tabeli 6.8 podano uzyskane w kolejnych stadiach kruszenia na różnych liniach technologicznych stopnie rozdrobnienia  $S_{80}$  i  $S_{50}$  oraz wskaźniki kształtu ziarn w produktach kruszarek.

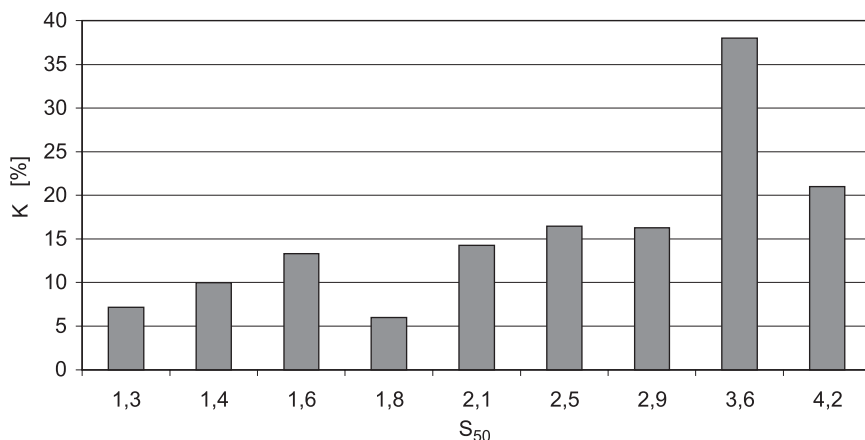
Zamieszczone w tabeli dane umożliwiają określenie zależności wskaźnika kształtu od stopnia rozdrobnienia. Zależność tę przedstawiono na rysunku 6.23. Jak widać, najwyższe stopnie rozdrobnienia charakteryzują kruszarki pracujące we wstępnych stadiach procesu, ale

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 rozdrobnieniu w kruszarce S3000.

**Tabela 6.8**

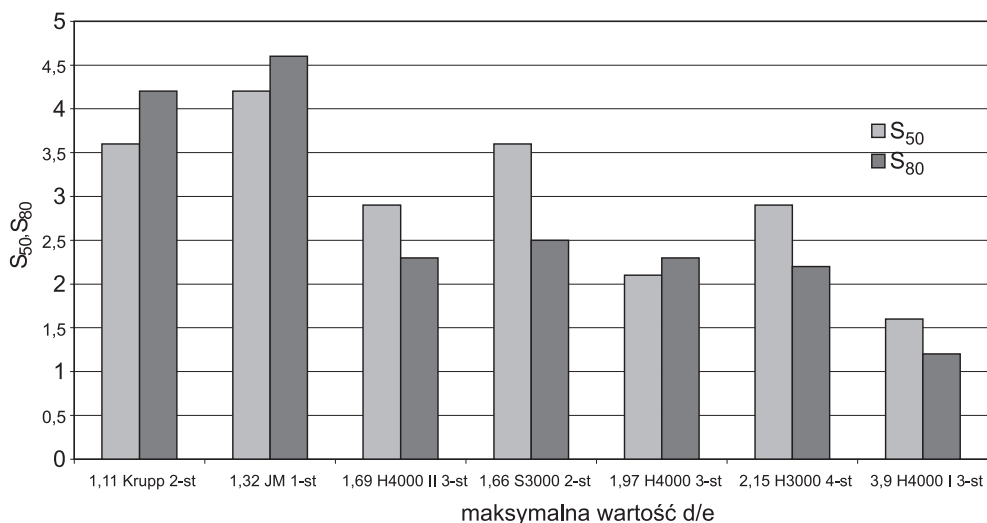
Stopnie rozdrobnienia  $S_{80}$  i  $S_{50}$  oraz współczynniki kształtu  $K$  uzyskane w kolejnych stadiach rozdrabniania (Nowak, Gawenda 2006)

Zakład	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



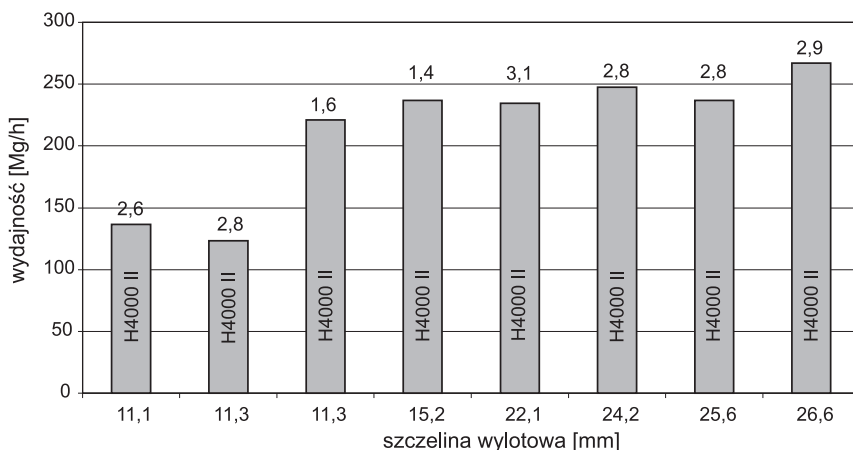
**Rys. 6.23.** Zależność wskaźnika kształtu  $K$  od stopnia rozdrobnienia  $S_{50}$  (Nowak, Gawenda 2006)

Pokazana na rysunku 6.24 zależność stopni rozdrobnienia od maksymalnej wartości  $d/e$  pozwala zauważyć, że odznaczające się najwyższym stopniem rozdrobnienia kruszarki: szczękowa 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 oraz wzrasta zawartość ziarn większych od szczeliny kruszarki w produkcie rozdrabniania.



Rys. 6.24. Zależność stopni rozdrobnienia od maksymalnej wartości  $d/e$  (Nowak, Gawenda 2006)

Na rysunku 6.25 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 gruboziarnistych, co prowadzi również do zwiększenia stopnia rozdrobnienia. Im wyższy stopień rozdrobnienia, tym niższa wydajność.



Rys. 6.25. Wydajność kruszarek stożkowych H4000 w zależności od wielkości szczeliny wylotowej i stopnia rozdrobnienia – zakład B (Nowak, Gawenda 2006)



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

Analiza efektywności kilkustadialnego rozdrabniania na przykładzie skał bazaltowych w wybranych zakładach produkcji kruszyw pozwala na sformułowanie ważnych wniosków.

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.

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).

Wskaźnik kształtu ziarn w produktach rozdrabniania maleje wraz ze zmniejszeniem się stopnia rozdrobnienia. Możliwe jest więc zapewnienie prawidłowego kształtu ziarn produktów rozdrabniania przez stosowanie w technologii produkcji kruszyw większej liczby stadiów kruszenia, w szczególności do rozdrabniania końcowego.

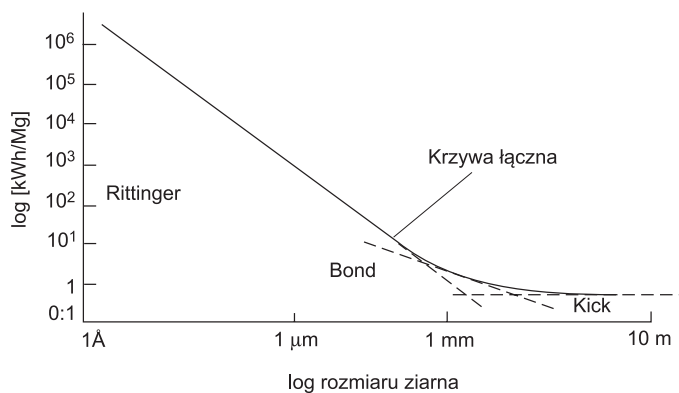
### **6.2.3. Analiza energochłonności i wydajności maszyn w zależności od rodzajów maszyn**

Charakterystyczną cechą współcześnie projektowanych zakładów przerobczych jest ich wysoka wydajność i stosunkowo niska energochłonność. Doskonalenie nowoczesnych rozwiązań budowy konstrukcyjnej urządzeń oraz komponentów tworzyw, z których wykonywane są podzespoły i elementy robocze, stwarza możliwości wydłużenia ich pracy, zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych oraz eliminację maszyn rezerwowych. Coraz częściej maszyny takie dzięki automatycznej regulacji i zdalnemu sterowaniu można łatwo dostosować do zmiennych warunków pracy, są wygodne i bezpieczne w obsłudze.

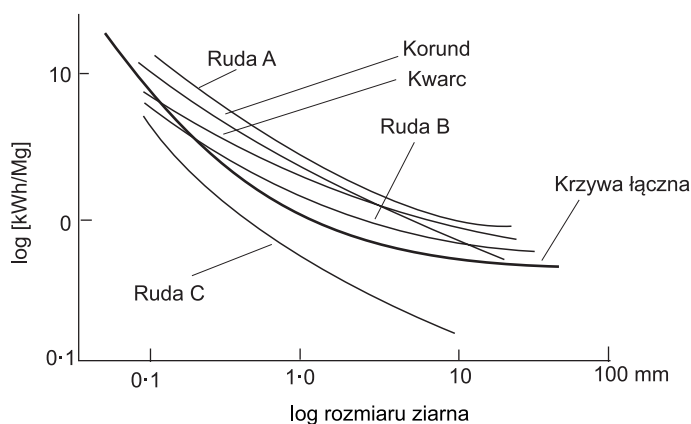
Do oceny poprawności funkcjonowania instalacji oraz porównywania jej z innymi służą wskaźniki techniczno-technologiczne i ekonomiczne. Prawidłowo dobrana moc silnika wraz z optymalnym kształtem elementów roboczych do rozdrabnianych surowców skalnych umożliwia osiągnięcie wysokiej sprawności maszyny i uzyskania najlepszego wskaźnika faktycznego zużycia energii do mocy znamionowej.

Zgodnie z teoriami energetycznymi Rittingera, Kicka i Bonda, im drobniejszy chcemy uzyskać produkt i większy stopień rozdrobnienia, tym więcej energii musimy włożyć w pracę rozdrabniania (Saramak i in. 2010; Tumidajski i in. 2010). Hukki uważa, że zależność pomiędzy zużywaną energią a wymiarem ziarn jest złożeniem wzorów Rittingera, Bonda i Kicka. Jeżeli krzywe reprezentujące prawa tych autorów wykreślimy w skali logarytmicznej w zakresach od 1  $\mu\text{m}$  do 5 mm, a następnie do 10 cm, otrzymujemy uśrednioną krzywą

zachowującą zależności otrzymane w praktyce (rys. 6.26 i 6.27). Prawo Rittingera można stosować z dostateczną dokładnością w zakresie 10–1000  $\mu\text{m}$ . Dla ziarn mniejszych niż 10  $\mu\text{m}$  przedłużone rozdrabnianie nie wpływa na zmianę pola powierzchni (Lowrinson 1974).



**Rys. 6.26.** Krzywe charakteryzujące wielkość ziarna i zapotrzebowanie energetyczne w zakresach teorii Rittingera, Bonda i Kicka według (Lowrinson 1974)



**Rys. 6.27.** Krzywe eksperymentalne dla wybranych materiałów według (Lowrinson 1974)

Praktycznym podejściem do oceny energetycznej procesu rozdrabniania jest wyznaczenie indeksu pracy Bonda na podstawie ilości energii zużywanej w rzeczywistości.

Zgodnie z teorią Bonda, jeżeli  $W$  jest energią zużytą podczas rozdrabniania, mierzoną w kilowatogodzinach na megagramy,  $W_e$  wyliczonym wskaźnikiem Bonda,  $F$  i  $P$  ziarnami charakterystycznymi 80% w nadawie i produkcie (mierzonymi w mikrometrach), to:

$$W = 10 \cdot W_e (P^{-1/2} - F^{-1/2}) \quad [\text{kWh/Mg}] \quad (6.5)$$

W tabeli 6.9 zestawiono wyliczone indeksy pracy Bonda ( $W_e$ ) dla wapieni (Lowrinson 1974). Wiadomo, że wapień ma z reguły bardzo zróżnicowane właściwości fizyczno-mechaniczne, jednak często jest to materiał wykorzystywany przez wiele zakładów do testowania swoich urządzeń z uwagi na jego dostępność oraz możliwość testowania w każdej kruszarce. W tabeli podano także całkowitą energię potrzebną na rozdrobnienie nadawy o danym uziarnieniu do produktu o pożądanym uziarnieniu.

**Tabela 6.9**

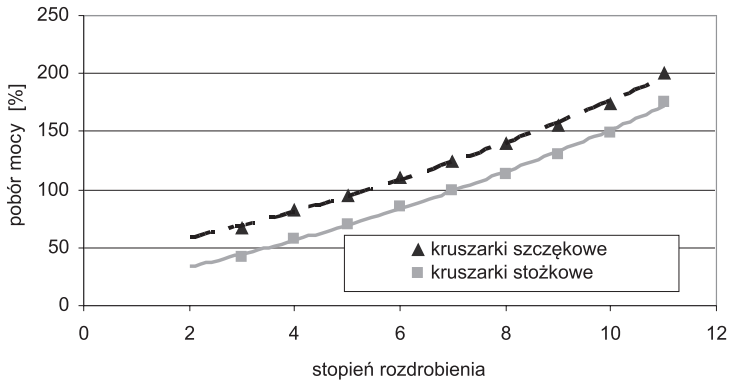
Wyliczone indeksy pracy Bonda ( $W_e$ ) oraz zapotrzebowanie energetyczne ( $W$ ) dla różnych typów maszyn zgodnie ze wzorem 6.5 (Lowrinson 1974)

Typ maszyny	Wielkość ziarn nadawy $F$ [mm]	Wielkość ziarn produktu $P$ [mm]	$\frac{1}{P^{1/2}} - \frac{1}{F^{1/2}}$ , $S$	Zużyta energia $W$ (kWh/Mg)	$\frac{W}{10 \cdot S}$ , $W_e$
Kruszarka szczękowa	$76 \cdot 10^4$	$127 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,94	58
	$122 \cdot 10^4$	$305 \cdot 10^3$	$0,9 \cdot 10^{-3}$	0,27	30
Kruszarka stożkowa	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3$	$12,5 \cdot 10^{-3}$	7,463	60
	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	0,45	14
	$12 \cdot 10^4$	$12 \cdot 10^3$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	1,28	21
Kruszarka walcowa	$508 \cdot 10^2$	$64 \cdot 10^2$	$8,0 \cdot 10^{-3}$	0,75	9
	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^2$	$30,7 \cdot 10^{-3}$	1,46	5
Kruszarka młotkowa udarowa	$103 \cdot 10^4$	$25 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,22	22
	$610 \cdot 10^3$	$1525 \cdot 10^2$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,40	31

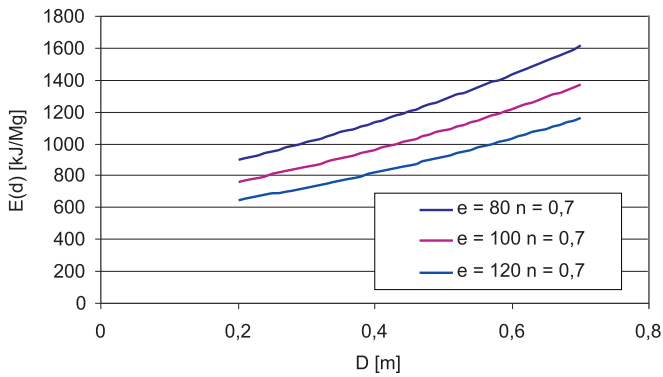
Wartości uzyskane w urządzeniach o różnych gabarytach mają bardzo szerokie zakresy zmienności, ale dają się zauważyć pewne prawidłowości. Najbardziej energochłonne są kruszarki szczękowe (średnia wartość indeksów pracy Bonda  $W_e$  wynosi 44) i stożkowe (indeks pracy Bonda  $W_e$  dochodzi do 60, średnia wartość wynosi 32), średnią ilość energii zużywają kruszarki młotkowe (średnia wartość  $W_e$  wynosi 27), a najmniej energii pochłaniają kruszarki walcowe (średnia wartość  $W_e$  wynosi 7). Trzeba mieć jednak na uwadze, że nie każda kruszarka będzie się nadawać do wszystkich rodzajów surowców skalnych o bardzo zróżnicowanych właściwościach wytrzymałościowych.

Na rysunku 6.28 przedstawiono wpływ stopnia rozdrobnienia na pobór mocy przez kruszarki stożkowe i szczękowe. Wraz ze zwiększeniem stopnia rozdrobnienia materiału następuje wzrost zużycia energii. Pobór mocy przez kruszarki szczękowe w analizowanym przypadku był wyższy o około 25% w porównaniu do kruszerek stożkowych.

Na rysunku 6.29 przedstawiono przebieg zmian zużycia energii dla kruszarek szczękowych, w zależności od wielkości szczeliny wylotowej  $e$  i wielkości nadawy  $D$ , przy wypełnieniu komory kruszenia  $n$  równym 0,7. Widoczny jest wzrost zużycia energii dla zmniejszającej się wielkości szczeliny wylotowej, a więc dla wzrastającego stopnia rozdrobnienia. Zależności funkcyjne z rysunku 6.29 przedstawiono w układzie przestrzennym na rysunku 6.30. Parametry eksploatacyjne urządzenia, a więc zmniejszenie szczeliny wylotowej kruszarki i wzrost wielkości uziarnienia nadawy, wpływają na zwiększenie zużycia energii.

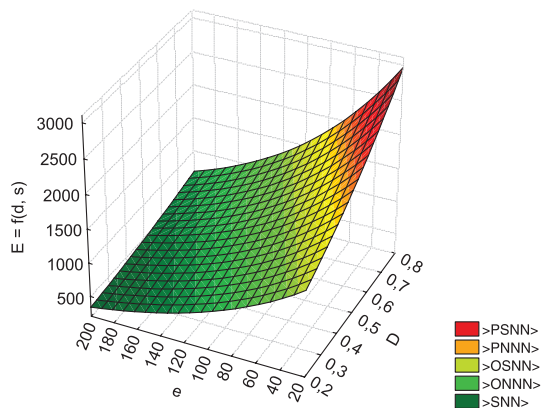


Rys. 6.28. Zależność względnej mocy kruszenia od stopnia rozdrobnienia (Naziemiec, Saramak 2012)



Rys. 6.29. Zależność zużycia energii od wielkości średniego ziarna nadawy  $D$ , dla różnych wartości szczeliny wylotowej  $e$  kruszązki szczękowej i stopnia wypełnienia komory roboczej  $n$  (Naziemiec, Saramak 2012)

$$\text{Funkcja} = 1016,3 \cdot \exp(1,171 \cdot x - 0,0082 \cdot y + 0,4261 \cdot 0,7)$$



Rys. 6.30. Zużycie energii przez kruszązki szczękowe w funkcji wielkości szczeliny wylotowej  $e$  i wielkości ziarna nadawy  $D$  (Naziemiec, Saramak 2012)

W tabelach 6.10–6.14 przedstawiono przykładowe podstawowe charakterystyki parametrów konstrukcyjno-technologicznych różnych typów i rodzajów kruszarek produkowanych przez firmę PSP Engineering. Zaprezentowano kruszarki szczękowe, stożkowe, udarowe listwowe z wałem poziomym i pionowym oraz młotkowe. W zależności od wielkości szczeliny wylotowej oraz gardzieli wlotowej urządzenia wzrasta wydajność oraz zapotrzebowanie na moc silnika elektrycznego. Na podstawie danych zawartych w tabelach 6.10–6.14 wyznaczono na wykresach teoretyczne jednostkowe zapotrzebowanie na energię w zależności od wydajności dla kruszarek różnych rodzajów (rys. 6.31).

**Tabela 6.10**

Parametry technologiczne wybranych kruszarek szczękowych produkcji PSP Engineering

Typ kruszarki	Otwór wlotowy [mm]	Szczelina wylotowa [mm]	Wydajność [Mg/h]	Moc silnika [kW]
DCJ 1032	500 × 300	20–70	16–60	30
DCJ 1033	700 × 300	15–50	18–60	45
	700 × 500	30–110	37–140	45
DCJ 1031	900 × 600	40–170	65–285	75
DCJ 1039	1000 × 700	50–180	105–395	90
DCJ 1021	1000 × 800	63–200	140–460	110
DCJ 1028	1200 × 1000	85–230	200–580	132
DCJ 1029	1400 × 1120	100–250	275–730	160
DCJ 1038	1600 × 1250	120–300	500–990	200

**Tabela 6.11**

Parametry technologiczne wybranych kruszarek stożkowych produkcji PSP Engineering

Typ kruszarki	Maksymalna wielkość ziarna nadawy [mm]	Szczelina wylotowa [mm]	Wydajność [Mg/h]	Moc silnika [kW]
KDC 22 HP	188	19–35	80–180	75–90
KDC 23 VP	270	25–50	135–300	110–132
KDC 23 HP	220	20–42	120–265	
KDC 25 EP	430	30–65	240–590	200
KDC 25 VP	330	30–63	240–560	160–200
KDC 25 HP	260	24–52	190–460	
KDC 26 VP	430	35–65	340–800	250–315
KDC 26 HP	345	25–55	250–680	
KDC 26 SH	280	25–55	230–650	
KDC 36 SP	220	20–45	220–600	250–315

**Tabela 6.12**

Parametry technologiczne wybranych kruszarek udarowych listwowych produkcji PSP Engineering

Typ kruszarki	Otwór wlotowy [mm]	Maksymalna wielkość ziarna nadawy [mm]	Wydajność [Mg/h]	Moc silnika [kW]
ODH 0907	600 × 670	500	30–70	45–75
ODH 0910	600 × 1000	500	60–120	75–110
ODH 0913	600 × 1324	600	90–160	75–160
ODH 1110	760 × 1000	800	110–200	110–200
ODH 1113	760 × 1324	800	120–250	132–250
ODH 1313	970 × 1324	900	200–300	160–315
ODH 1316	970 × 1655	1000	250–380	200–400
ODH 1616	1250 × 1655	1500	300–550	315–630
ODH 1623	1250 × 2310	1500	450–800	450–1000
ODH 2023	1570 × 2310	2000	600–1000	630–1200
ODH 2030	1570 × 2966	2000	900–1400	1000–1750
ODH 2530	2000 × 2966	2500	1000–1800	1250–2250
ODX 1160	400 × 740	150	30–50	45–90
ODX 1163	600 × 1390	300	130–180	160–250

**Tabela 6.13**

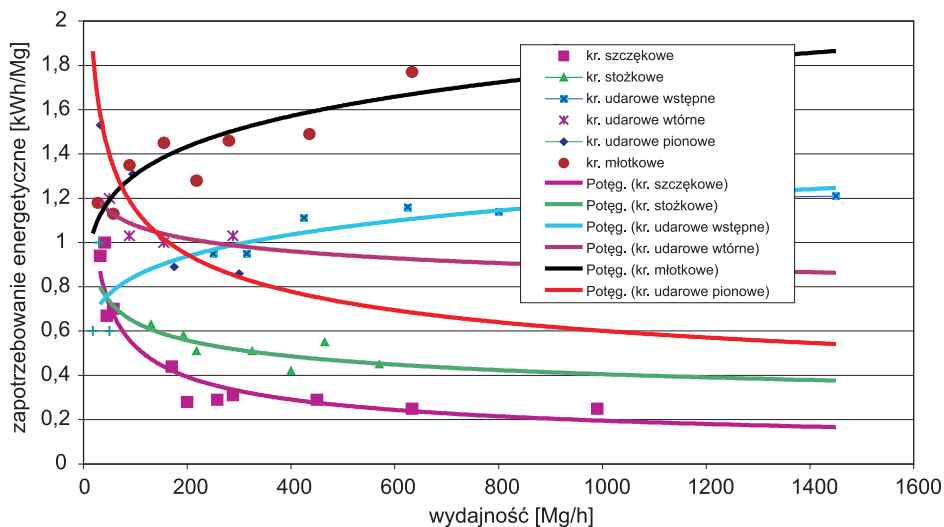
Parametry technologiczne wybranych kruszarek udarowych wertykalnych produkcji PSP Engineering

Typ kruszarki	Otwór wlotowy [mm]	Prędkość obrotowa wirnika [m/s]	Wydajność [Mg/h]	Moc silnika [kW]
ODV 1183 S/SM	32	80	10–50	37–55
ODV 1186 S/SM	50	75	50–140	90–160
ODV 1186 M	50	75	50–140	90–160
ODV 1187 S/SM	70	75	100–250	110–200
ODV 1187 M	70	75	100–250	110–200
ODV 1188 S/SM	70	70	150–450	200–315
ODV 1188 M	70	70	150–450	200–315

**Tabela 6.14**

Parametry technologiczne wybranych kruszarek młotkowych produkcji PSP Engineering

Typ kruszarki	Otwór wlotowy [mm]	Prędkość obrotowa wirnika [m/s]	Wydajność [Mg/h]	Moc silnika [kW]
OKD 1150	300	25	20–35	30–35
OKD 1151	300	25	45–70	55–75
OKD 1152	600	25	70–100	100–130
OKD 1153.1	900	25	130–180	200–250
OKD 1153.2	900	25	190–250	250–315
OKD 1154	1200	25	240–320	320–500
OKD 1155	1500	25	370–500	500–800
OKD 1156	1800	25	550–720	1000–1250
OKD 1158	1800	25	720–1110	1400–2000



**Rys. 6.31.** Teoretyczne jednostkowe zapotrzebowanie na energię w zależności od wydajności dla kruszarek różnych typów produkowanych przez firmę PSP Engineering

Analizując wykresy (rys. 6.31) oraz parametry technologiczne wybranych kruszarek (tab. 6.10–6.14), można zauważyć, że kruszarki szczękowe odznaczają się najmniejszą jednostkową energochłonnością w stosunku do wydajności, natomiast najbardziej energochłonne są kruszarki młotkowe. Odwołując się do wcześniejszych rozważań i obliczeń, można się jednak doszukać odwrotnych zależności wynikających z teorii rozdrabniania. Kruszarki pracujące na wstępnych stadiach kruszenia rozdrabniają grube ziarna, dając gru-

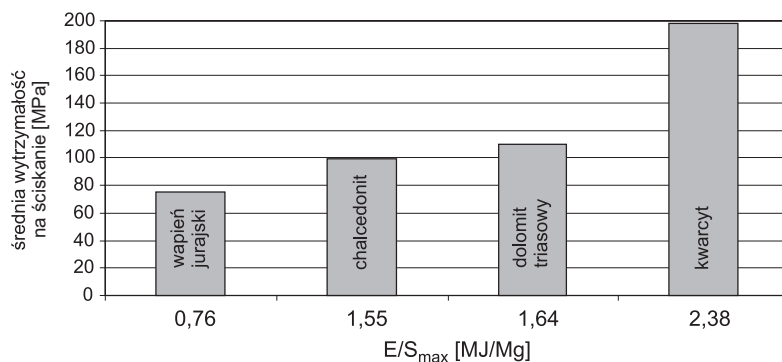
boziarniste produkty, a więc ich zapotrzebowanie na energię będzie mniejsze niż kruszarek pracujących na wtórnych i ostatnich stadiach rozdrabniania. Zgodnie z tym przyjmuje się zasady doboru maszyn do projektowanych układów rozdrabniania. W takich instalacjach na wstępnych stadiach instaluje się właśnie kruszarki szczękowe i stożkowe, wykorzystując znane prawa elementarnych działań kruszących jak zgniatanie i ścieranie, a na ostatnich stadiach rozdrabniania kruszarki udarowe.

Należy wziąć także pod uwagę, że przedstawione na wykresach zależności na zapotrzebowanie energetyczne odniesione są do wydajności znamionowej urządzenia według mocy zainstalowanego silnika. Oznacza to, że w praktyce zużycie rzeczywiste energii będzie niższe w zależności od poboru mocy przez silnik, pomniejszone o wartość wskaźnika związaną ze sprawnością. W celu obliczenia wskaźnika rzeczywistego zużycia energii do mocy znamionowej silnika kruszarki najlepiej jest zarejestrować całkowite zużycie energii w znanym okresie pracy. W tabeli 6.15 zestawiono wskaźniki energetyczne kruszarki młotkowej i stożkowej w instalacji produkcji grysów dolomitowych, przy których kruszarki stożkowe podczas pracy wykorzystywały około 50% swojej mocy zainstalowanej.

**Tabela 6.15**

Wskaźniki energetyczne dla kruszenia dolomitu

Kruszarka	Moc silnika [kW]	Pobór energii [kWh]	Liczba godzin pracy kruszarek	Wskaźnik zużycia energii na godzinę pracy	Wskaźnik rzeczywistego zużycia energii do mocy znamionowej
Młotkowa	320	437 572	2248	194,65	0,61
Stożkowa	500	653 203	2647	246,77	0,49



**Rys. 6.32.** Wpływ wytrzymałości surowców na wskaźnik zużycia energii w układach mobilnych z kruszarkami szczękowymi (Gawenda 2013a)



Zużycie rzeczywiste energii jest także uzależnione od właściwości wytrzymałościowych skały (wytrzymałość na ściskanie, zwięzłość, twardość itp.). Na przykładzie obliczonych wskaźników dla kruszarek szczękowych pracujących w instalacjach mobilnych w warunkach przemysłowych (Gawenda 2013a) wyznaczono zależności dotyczące zapotrzebowania na jednostkową energię poniesioną na rozdrobienie jednej tony nadawy przy jej jednokrotnym pomniejszeniu uziarnienia (energia/stopecznie rozdrobienia) w odniesieniu do właściwości fizyczno-mechanicznych surowca (rys. 6.32). Do opisu właściwości rozdrabnianych surowców przyjęto średnie wytrzymałości na ściskanie (MPa). Z zależności tych wynika, że im twardszy materiał, tym większe zużycie energii potrzebnej do uzyskania produktu o podobnym uziarnieniu.

## **6.3. Analiza energochłonności produkcji kruszyw łamanych w instalacjach mobilnych i stacjonarnych**

### **6.3.1. Uwarunkowania stosowania instalacji mobilnych i stacjonarnych do produkcji kruszyw**

Układy technologiczne przeróbki mechanicznej kruszyw mineralnych dostosowywane są do uwarunkowań geologicznych złóż surowców skalnych. Układy takie, czy to jedno-, czy wielostadialne, mogą być zabudowane stacjonarnie, mobilnie lub semimobilnie (kontenerowo).

Obserwowany od kilkunastu lat duży wzrost zastosowania mobilnych instalacji przeróbczych w zestawach kruszących, przesiewających lub łączonych jest wynikiem ich szeregu zalet. Przede wszystkim takie instalacje są:

- łatwe do transportu drogowego i przemieszczania w kopalni,
- łatwe i szybkie w przygotowaniu do eksploatacji,
- łatwe do pozyskania lub nabycia przy wykorzystaniu dostępnych form kredytowych, leasingowych, wynajmu, usług,
- nie są obiektami budowlanymi, stąd nie wymagają pewnych pozwoleń i zatwierdzeń.

W przypadku zakładów górnictwa skalnego przejezdne zestawy przeróbcze pracują zarówno w kopalniach na wyrobisku, jak i przy odzysku i przeróbce materiału ze zwalowisk. Łatwość przemieszczania omawianych zestawów umożliwia ich okresowe zastosowanie w danym miejscu, gdzie mogą być wykorzystane do prac o charakterze usługowym na rzecz danej kopalni. Mobilność omawianych zestawów przeróbczych umożliwia ich zastosowanie w miejscach trudno dostępnych, np. terenach górskich lub leśnych. Zastosowanie przejezdnych i przewoźnych zestawów kruszących i sortujących znacznie usprawnia organizację produkcji szczególnie w recyklingu i ogranicza kosztowny transport nadawy do procesu przeróbki, jak i gotowego produktu (Naziemiec 2009a).

Często instalacje mobilne w okresie wzmożonego bądź okresowego zapotrzebowania na kruszywa są alternatywnym wspomaganie zakładu stacjonarnego ze względu na wymienione zalety. Tak więc decyzje o wyborze instalacji mobilnej czy stacjonarnej niekoniecznie muszą być podejmowane na zasadzie wzajemnego ich wykluczenia. Instalacje mogą się wzajemnie uzupełniać, dając możliwość szybkiej reakcji czasowej i uruchomienia pełnego procesu

przeróbczego w momencie, gdy zakład stacjonarny jest dopiero w budowie, o czym pisze Mariola Stefanicka (2011), a także dopasowania się zakładu do warunków geologicznych i litologicznych złoża, gdy wymagane są wielostadialne układy o zróżnicowanych rodzajach maszyn rozdrabniających, jak w przypadku kopalni Jażwica i Laskowa (Gawenda i in. 2013a).

Od kruszarek i przesiewaczy montowanych w mobilnych zestawach wymaga się podobnych cech jak w przypadku urządzeń stacjonarnych. W przypadku zestawów mobilnych zwraca się szczególną uwagę na wysokość zabudowy urządzenia i jego masę. Obniżenie obu tych parametrów zwiększa możliwość zastosowania urządzenia przeróbczego na zestawie przejezdny czy kontenerowym.

Na zestawach mobilnych, najczęściej gąsienicowych, montowane są urządzenia kruszące i przesiewacze. W skład zestawu wchodzi zwykle kosz zasypowy, podajnik, kruszarka, przesiewacz i przenośniki taśmowe. Kosz zasypowy często jest wyposażony w ruszt oddzielający nadgabaryty z nadawy. Jako urządzenia podające mogą być stosowane podajniki wibracyjne rusztowe, mające za zadanie odsiew wstępny przed procesem kruszenia, a tym samym umożliwiające oddzielenie materiału drobnego (np. zawierającego zwiększoną ilość zanieczyszczeń). Wstępnie odsiany produkt odprowadzany jest przenośnikiem taśmowym na oddzielny skład. Produkt nadsitowy z klasyfikacji wstępnej kierowany jest do kruszarki. Jako urządzenia podające materiał z kosza załadowczego stosowane są także przenośniki taśmowe.

Podobnie jak w przypadku kruszarek, na zestawach mobilnych mogą być montowane urządzenia przesiewające. Najczęściej montowane są przesiewacze wielopokładowe z różnego rodzaju pokładami sitowymi. Zestaw sortujący może posiadać własny kosz zasypowy z urządzeniem podającym lub współpracować z innymi urządzeniami transportującymi nadawę do przesiewania.

Jak pokazuje przegląd branży europejskich producentów maszyn przeróbczych Markt-focus Brecher (2013), w zestawach mobilnych stosowane są kruszarki szczękowe, udarowe listwowe i stożkowe, a więc takie, które są najbardziej przydatne w przeróbce kruszyw. Natomiast w wypadku instalacji stacjonarnych oferowane są dodatkowo kruszarki walcowe i młotkowe ze względu na bardziej specyficzne lub odmienne warunki złożowe surowców mineralnych. W zestawach mobilnych i stacjonarnych mogą być montowane dodatkowe urządzenia takie jak separatory magnetyczne do usuwania elementów metalowych czy instalacje zraszania ograniczające zapylenie. Przejezdne i przewoźne jednostki kruszące i sortujące są zasilane z zewnętrznej sieci elektrycznej lub są wyposażone w silniki spalinowe wysokoprężne. Zastosowanie silników spalinowych w zestawach mobilnych umożliwia ich pracę w dowolnym miejscu, także w terenie, gdzie nie ma doprowadzonej energii elektrycznej.

Przykładową charakterystykę zestawów mobilnych firmy Kleemann przedstawiono w tabeli 6.16. W celu dodatkowego porównania scharakteryzowano także kruszarki stacjonarne szczękowe i udarowe. Zaprezentowane parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne maszyn pokazują cały zakres funkcjonalności możliwej do uzyskania w przypadku racjonalnego ich doboru do projektowanej instalacji, niezależnie czy ma to być układ mobilny, czy stacjonarny. Oznacza to, że w celu osiągnięcia najlepszych efektów produkcji kruszyw należy racjonalnie wybrać rodzaj urządzenia z zestawu typoszeregu produkowanych maszyn.

**Tabela 6.16**

Charakterystyka mobilnych i stacjonarnych kruszarek produkcji firmy Kleemann

Parametry	Kruszarki				
	mobilne			stacjonarne	
	szczękowe	stożkowe	udarowe	szczękowe	udarowe
<b>Specyfikacja transportowa</b>					
Wysokość [m]	3,2–4,2	3,9–4,3	3,6–4,1	–	–
Szerokość [m]	3,0–3,7	3,4–4,5	3,0–4,5	–	–
Długość [m]	12,1–24,0	16,0–19,5	15,0–27,0	–	–
Masa [Mg]	33,0–80,0	45,0–69,0	36,0–180,0	–	–
Czas montażu [h]	0,5	2,0–3,0	0,5–1,0	–	–
<b>Specyfikacja techniczna</b>					
Silnik*	DH, DE	DE	DE	E	E
Moc silnika [kW]	228–460	356–481	291–541	30–315	110–500
Prędkość obrotowa [ $\text{min}^{-1}$ ]	220–280	738–1030	573–802	170–350	530–1486
Średnica wirnika [m]	–	–	1,0–1,05	–	0,9–1,6
Długość wirnika [m]	–	–	1,0–1,95	–	0,4–2,0
Min. szczelina wylotowa [m]	0,05–0,16	–	–	0,01–0,20	–
Wys. zabud. [m]	3,8–8,4	4,5–9,6	4,1–9,6	1,8–5,3	1,6–5,5
Szer. zabud. [m]	5,0–9,0	4,0–6,4	4,6–9,0	1,5–4,5	0,67–3,1
Dług. zabud. [m]	11,8–28,0	17,0–24,0	16,5–27,0	1,3–5,5	1,85–4,7
Poj. zasobnika [ $\text{m}^3$ ]	5,0–20,0	11,0–16,0	4,0–20,0	–	–
Masa całkowita [Mg]	–	–	–	3,6–170,0	8,2–76,6
Wielkość komory wlotowej [ $\text{m} \times \text{m}$ ]	$1,0 \times 0,63$ – $1,6 \times 1,25$	–	$1,0 \times 0,8$ – $2,0 \times 2,1$	$0,63 \times 0,23$ – $2,1 \times 1,6$	$0,39 \times 0,14$ – $2,03 \times 2,5$
<b>Surowiec (material)</b>					
Rodzaj nadawy**	1,2,3,4,5	2,3,4,5	1,2,3,4,5	2,3,4,5	1,2,3,4,5
Przec. wydajność [Mg/h]	170–900	150–350	250–800	13–1500	35–750
Wielkość projekcyjna uziarnienia nadawy [ $\text{m} \times \text{m}$ ] lub średnica [m]	$0,95 \times 0,60$ – $1,40 \times 1,10$	0,19–0,30	$0,20 \times 0,60$ – $1,50 \times 0,80$	$0,15 \times 0,14$ – $1,65 \times 1,25$	0,04–1,50
Wielkość projekcyjna uziarnienia produktu [ $\text{m} \times \text{m}$ ] lub średnica [m]	$0,06 \times 0,18$ – $0,20 \times 0,45$	–	$0 \times 0,02$ – $0 \times 0,08$	$0,02 \times 0,04$ – $0,25 \times 0,45$	$0 \times 0,04$ – $0 \times 0,10$

\* silnik: D = diesel, DE = diesel elektryczny, DH = diesel hydrauliczny, E = elektryczny, H = hydrauliczny

\*\* rodzaj nadawy: 1 – odpady zwięzłe, 2 – żwir, 3 – surowce skalne miękkie (inne niż żwir), 4 – surowce skalne średnio twarde (inne niż żwir), 5 – surowce skalne twarde (inne niż żwir)

Dobierając rodzaj urządzenia, należy mieć na uwadze:

- miejsce urządzenia w stadium rozdrabniania (wielkość uziarnienia nadawy),
- pożądane efekty rozdrabniania (jakość uzyskanych produktów), co związane jest z zakresem możliwości regulacji parametrów eksploatacyjnych,
- rodzaj surowca (właściwości fizyczno-mechaniczne), które decydują o zastosowaniu elementarnych działań kruszących (udar, ścieranie, ściskanie), a więc o wyborze rodzaju kruszarki.

W prawidłowym doborze rodzaju kruszarki i instalacji należy kierować się także charakterystyką zakładu, w którym będą wykorzystane (wielkość i rodzaj złoża, sposób eksploatacji, wielkość produkcji, zapotrzebowania odbiorców) oraz obszar czasowo-przestrzenny zakładu.

Po spełnieniu tych zasadniczych wymagań dokonuje się dalszych weryfikacji możliwości maszyn, tj. wydajności, energochłonności, eksploatacji (żywności elementów roboczych, kosztów eksploatacji itp.), a także kosztów inwestycji określonych przez producenta, co nie jest łatwym zadaniem ze względu na sporą możliwość wyboru rządzeń. W pracy (Gawenda 2010c) dokonano przeglądu maszyn i ich producentów, wskazując na ich liczbę sięgającą kilkudziesięciu firm produkujących takie maszyny w samej Europie. Nakłady inwestycji oraz koszty eksploatacji mogą sugerować wybór rodzaju układu, typu urządzenia czy marki producenta.

### **6.3.2. Porównanie pracy wybranych instalacji mobilnych i stacjonarnych pod względem efektywności energetycznej**

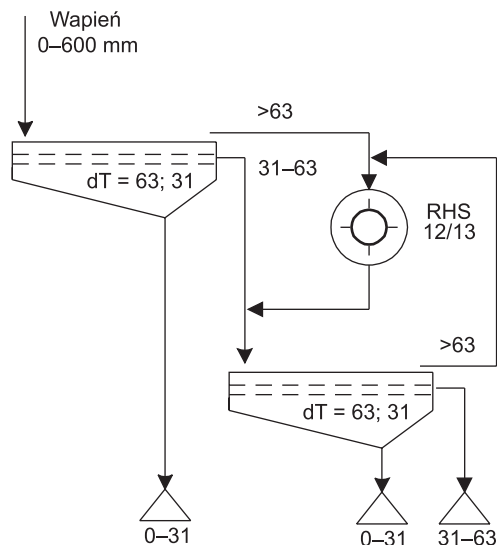
#### **6.3.2.1. Charakterystyka wybranych układów instalacji stosowanych do produkcji kruszyw**

Ze względu na omawiane różne układy mobilne pracujące w kraju i zagranicą, jak i stacjonarne pracujące w kraju, które są zasilane olejem napędowym i energią elektryczną, do prawidłowego porównania wskaźników efektywności ich pracy przyjęto, że 1 kWh energii elektrycznej odpowiada 3,6 MJ, a kaloryczność (wartość opałowa) jednego litra oleju napędowego wynosi około 38 MJ. W celu obliczenia kosztów przyjęto kurs 1 € = 4,16 zł oraz cenę jednego litra ON = 5,81 zł. W ocenie brano pod uwagę wskaźniki omówione w rozdziale 5, takie jak koszty zużycia paliwa lub energii elektrycznej, jednostkowe zużycie energii, maksymalnie stopnie rozdrobnienia oraz wskaźnik będący ilorazem zużycia energii i maksymalnego stopnia rozdrobnienia przy jednokrotnym pomniejszeniu nadawy o masie jednej tony.

#### **Produkcja kruszyw wapiennych w układzie mobilnym z kruszarką udarową Remax 1348**

Na rysunku 6.33 przedstawiono schemat technologiczny układu mobilnego Remax firmy SBM Mineral Processing, który produkuje kruszywa wapienne bezpośrednio na wyrobisku. Maksymalne uziarnienie nadawy wynosi 600 mm, a uziarnienie produktu 0–63 mm podlega roz-

klasyfikowaniu na trzy frakcje kruszyw. Wydajność układu wynosi ponad 220 Mg/h, przy czym ilość materiału podlegającego rozdrobieniu w kruszarce wynosi około 200 Mg/h. Układ składa się z kruszarki udarowej wirnikowej RHS12/13 o średnicy wirnika 1200 mm, prędkości liniowej elementów udarowych 30 m/s i mocy silnika 160 kW zasilanego agregatem Diesla 300 kVA. Nadawa odsiewana jest wstępnie na wibracyjnym podajniku rusztowym na dwie frakcje, tj. <31 mm zawierającą zanieczyszczenia i 31–63 mm kierowaną na przesiewacz dwupokładowy wibracyjny KQ 14/38-2. Surowiec gruboziarnisty (>63 mm) jest rozdrabniany w kruszarce i następnie przesiewany. W przesiewaczu dwupokładowym produkowane jest kruszywo w dwóch klasach ziarnowych 0–31 i 31–63 mm; produkt nadsitowy kierowany jest w zawrocie do ponownego dokruszenia w kruszarce. Cały układ (tab. 6.17) zużywa około 28 l ON/h, co przy przerobie 200 Mg/h generuje koszty 39,2 €/h (163,07 zł/h), a zużycie paliwa 0,14 l/Mg. Maksymalny stopień rozdrobnienia dla układu wynosi 9,5.



Rys. 6.33. Schemat mobilnej instalacji produkcji kruszyw wapiennych Remax 1348 (Gawenda 2013a)

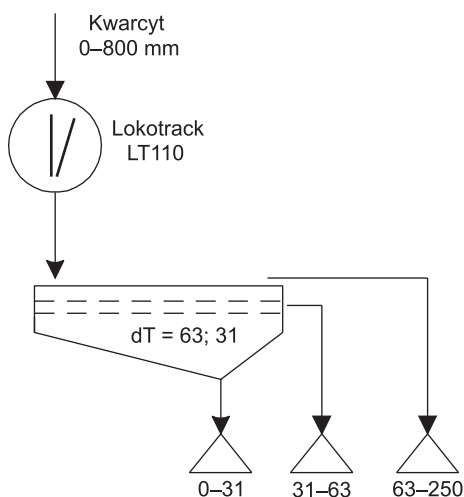
Tabela 6.17

Wskaźniki pracy układu mobilnego z kruszarką udarową Remax 1348 (Gawenda 2013a)

Zużycie paliwa na godzinę [l/h]	Przerób [Mg/h]	Zużycie paliwa na tonę [l/Mg]	Koszt zużycia paliwa [zł/Mg]	Zużycie energii na tonę [MJ/Mg]
28	200	0,14	0,81	5,32

## Produkcja kruszyw kwarcytowych w układzie mobilnym z kruszarką szczękową Lokotrack LT110, współpracującym z układem stacjonarnym trójstadialnym

Układ mobilny produkcji kruszyw kwarcytowych składa się z mobilnej kruszarki szczękowej Lokotrack LT110 Metso Minerals i przesiewacza mobilnego Powerscreen Warrior 1800 (rys. 6.34). Wydajność układu technologicznego wynosi 300 Mg/h. Maksymalna wielkość uziarnienia nadawy dochodzi do 800 mm, a produktu do 250 mm. Maksymalny stopień rozdrobnienia wynosi 3,2. Uzyskiwane produkty rozdrabniania są rozsiewane na trzy frakcje: 0–31,5; 31,5–63 i 63–250 mm.



Rys. 6.34. Schemat mobilnej instalacji produkcji kruszyw kwarcytowych z kruszarką szczękową Lokotrack LT110 (Gawenda 2013a)

W tabeli 6.18 zestawiono dane dotyczące przerobu i zużycia paliwa w wybranym okresie dla kruszarki oraz przesiewacza. Ilość zużytego paliwa dla obu maszyn w tym okresie wyniosła 22 769 l, a przerób 113 845 Mg, co daje wskaźnik zużycia paliwa 0,2 l/Mg. Zużycie energii wynosi 7,6 MJ/Mg.

Tabela 6.18

Wskaźniki pracy układu mobilnego z kruszarką szczękową Lokotrack LT 110 (Gawenda 2013a)

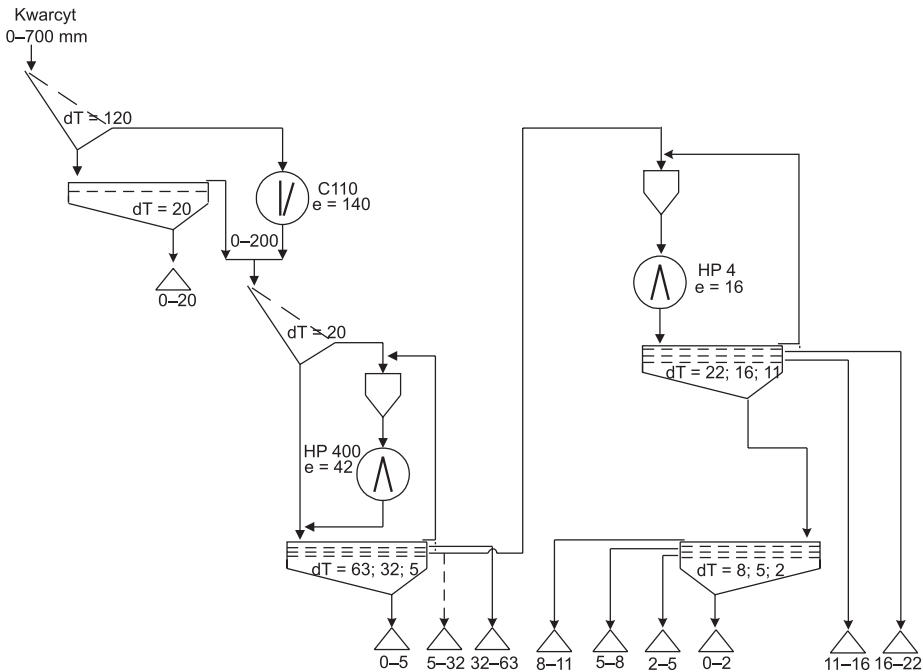
Ilość zużytego paliwa [l]	Przerób [Mg]	Zużycie paliwa na tonę [l/Mg]	Koszt zużycia paliwa [zł/Mg]	Zużycie energii na tonę [MJ/Mg]
22 769	113 845	0,20	1,16	7,60

W zależności od warunków złożowych, jeśli materiał nie jest zanieczyszczony, to frakcje 31,5–63 i 63–250 mm są kierowane do zbiornika międzyoperacyjnego i do zakładu stacjonarnego. Z materiału zanieczyszczonego produkuje się mieszankę 0–63 mm, a frakcja

63–250 mm jest kierowana do układu stacjonarnego. W ten sposób układ mobilny współpracujący z układem stacjonarnym stanowi jego uzupełnienie.

Do stacjonarnego zakładu kierowana jest nadawa o uziarnieniu 0–700 mm w ilości około 400 Mg/h wraz z materiałem pochodzącym z mobilnego zestawu. Uproszczony schemat układu stacjonarnego przedstawiono na rysunku 6.35. Surowiec odsiewany jest wstępnie na wibracyjnym podajniku rusztowym i materiał powyżej 120 mm kruszony jest w kruszarce szczękowej C110 Metso Minerals do maksymalnego uziarnienia produktów 200 mm. Produkty przekruszone oraz częściowo wcześniej odsiane (20–120 mm) są gromadzone, a następnie kierowane do zbiornika buforowego przed podajnikiem i kruszarką stożkową HP400 Nordberg pracującą na drugim stadium. Następnie rozdrobniony materiał wraz z drobnym odsianym materiałem w podajniku jest przesiewany na przesiewaczu wibracyjnym trójpokładowym TS403 Nordberg. Produkt nadsitowy >63 mm jest zawracany do drugiego stadium kruszenia. Produkty 32–63 i 5–32 mm mogą tworzyć gotowe asortymenty lub opcjonalnie są kierowane do trzeciego stadium rozdrabniania w granulatorze stożkowym HP4 Nordberg. Po rozdrobnieniu produkty są klasyfikowane w dwóch przesiewaczach trójpokładowych TS403 Nordberg. W ten sposób cały układ zapewnia produkcję kruszyw w dziewięciu różnych asortymentach handlowych. Całkowity stopień rozdrobnienia dla układu wynosi 11,1.

Roczne zużycie energii elektrycznej wyniosło 2 604,13 MWh przy przerobie 761 316 Mg. Jednostkowe zużycie energii elektrycznej dla całego układu wyniosło 3,42 kWh/Mg (12,3 MJ/Mg). Koszt energii elektrycznej wynosi 1,22 zł/Mg przy cenie 0,36 zł/kWh (tab. 6.19).



**Rys. 6.35.** Stacjonarny trójstadiowy układ technologiczny produkcji kruszyw kwarcytowych (Gawenda 2013a)

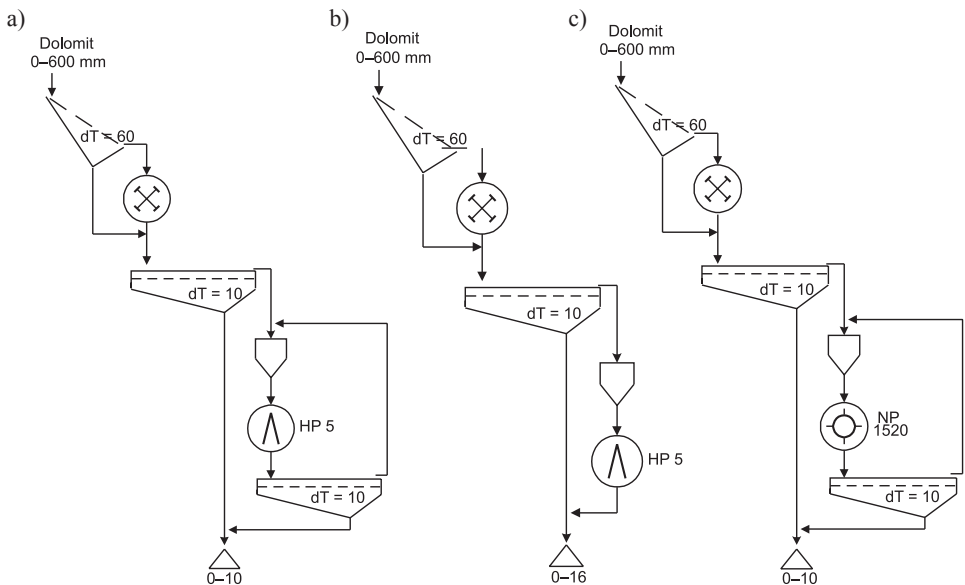
**Tabela 6.19**

Wskaźniki pracy układu stacjonarnego trójstadijalnego produkcji kruszyw kwarcytowych (Gawenda 2013a)

Ilość zużytej energii elektrycznej [MWh]	Koszt energii elektrycznej [zł]	Przerób [Mg]	Zużycie energii elektrycznej [kWh/Mg]	Koszt energii [zł/kWh]	Koszt zużycia energii elektrycznej [zł/Mg]	Zużycie energii na tonę [MJ/Mg]
2604,13	926 433,57	761 316,00	3,42	0,36	1,22	12,30

**Produkcja kruszyw dolomitowych w układzie stacjonarnym dwustadijalnym z kruszarkami udarowymi i stożkowymi**

Na rysunku 6.36 zaprezentowano dwustadijalne stacjonarne układy rozdrabniające dolomity. Pierwsze stadium układu technologicznego składa się z czterech równolegle pracujących kruszarek udarowych wirnikowych 40.99 firmy Makrum o wydajności 500 Mg/h każda i czterech przesiewaczy wibracyjnych typu PZ odsiewających drobny materiał z nadawy. Wskaźnik zużycia energii dla kruszarek wynosi 0,47 kWh/Mg, a dla przesiewaczy 0,05 kWh/Mg. Maksymalne uziarnienie nadawy wynosi 600 mm, a uziarnienie produktu dochodzi do 50 mm. Maksymalny stopień rozdrobnienia dla pierwszego stadium wynosi 12.



**Rys. 6.36.** Dwustadijalne układy stacjonarne produkcji kruszyw dolomitowych (Gawenda 2013a): a) z kruszarkami stożkowymi w zamkniętym układzie – produkt <10 mm; b) z kruszarkami stożkowymi w otwartym układzie – produkt <16 mm; c) z kruszarkami udarowymi w zamkniętym układzie – produkt <10 mm



Drugie stadium rozdrabniania surowca, które zostało przedstawione na rysunku 6.36 w trzech różnych wariantach, jest przykładem koncepcyjnego opracowania przez firmę Metso Minerals układów otwartych i zamkniętych produkujących kruszywa mineralne o uziarnieniu 0–10 lub 0–16 mm. Produkt uzyskany z kruszarek z pierwszego stadium o uziarnieniu 0–50 mm cechuje się wysokim udziałem klasy drobnej (<10 mm; około 60%), dlatego układy technologiczne przewidują odsiewanie materiału przed zainstalowanymi kruszarkami drugiego stadium rozdrabniania.

Instalacja pierwsza składa się z czterech granulatorów stożkowych typu Nordberg H5 z zawrotem, dwóch przesiewaczy typu MF 3,6 × 8,5 SD zainstalowanych przed układem kruszenia oraz dwóch przesiewaczy typu MF 3,0 × 7,3 SD w zamkniętym układzie kruszenia (rys. 6.36a). Druga instalacja składa się z dwóch kruszarek tego samego typu bez zawrotu materiału oraz dwóch przesiewaczy typu MF 3,6 × 8,5 SD zainstalowanych przed układem kruszenia (rys. 6.36b). W skład trzeciego układu zamkniętego wchodzi trzy kruszarki udarowe listwowe NP1520, dwa przesiewacze typu MF 3,6 × 8,5 SD przed układem kruszenia i dwa przesiewacze typu MF 3,0 × 7,3 SD w zamkniętym układzie kruszenia (rys. 6.36c). Dodatkowo instalacje wyposażone są w zbiorniki buforowe zapewniające ciągłe podawanie nadawy oraz układy podające i obierające produkty. W układzie z zawrotem materiału i przesiewaczami jednopokładowymi można uzyskać produkt do 10 mm. W układzie bez zawrotu przewiduje się uziarnienie kruszywa poniżej 16 mm.

W tabeli 6.20 zestawiono dane technologiczne dotyczące dwóch rodzajów kruszarek firmy Metso Minerals zastosowanych w układach zamkniętych i otwartych. Zaprezentowanymi wartościami parametrów są: maksymalna wydajność, maksymalne uziarnienie nadawy i moc. W nawiasach podano prognozowane wydajności maszyn oraz wyliczone na tej podstawie zużycia energii kWh/Mg przy przyjętym wskaźniku mocy rzeczywiście pobieranej do mocy znamionowej silnika wynoszącej 0,6. Na podstawie krzywych składu ziarnowego nadawy i produktów obliczono stopnie rozdrobnienia.

**Tabela 6.20**

Parametry techniczno-technologiczne kruszarek firmy Metso Minerals uwzględnionych w stacjonarnych układach technologicznych drugiego stadium kruszenia (Gawenda 2013a)

Nazwa i typ kruszarki	Parametry techniczno-technologiczne						
	wydajność maks. (prog.) [Mg/h]	maks. nadawa [mm]	moc [kW]	produkt [mm]	stopień rozdr. $S_{max}$	liczba maszyn	zużycie energii [kWh/Mg]
Stożkowa Nordberg HP5 układ zamknięty	– (214)	330	450	0–10	5,0	4	1,26
Stożkowa Nordberg HP5 układ otwarty	– (307)	330	450	0–16	3,3	2	0,88
Udarowa listwowa NP 1520 układ zamknięty	350 (285)	200	400	0–10	5,0	3	0,84

Analizując wskaźniki pracy kruszarek stożkowych i udarowych listwowych w drugim stadium układu zamkniętego, należy podkreślić, że proces rozdrabniania jest mniej energochłonny w kruszarkach udarowych (0,84 kWh/Mg) w stosunku do stożkowych (1,26 kWh/Mg) (tab. 6.20). Kruszarki udarowe mają zainstalowaną moc o 50 kW mniejszą od mocy kruszarek stożkowych, a produkt uzyskany w kruszarkach udarowych jest znacznie grubszy niż w granulacjach stożkowych, co oznacza niższy stopień rozdrobnienia. W takiej sytuacji układ zamknięty z kruszarkami udarowymi wymaga większej krotności obiegu materiału, aby rozdrobnić i rozklasyfikować kruszywo do uziarnienia poniżej 10 mm.

W tabeli 6.21 przedstawiono bilans wskaźników energetycznych stacjonarnych dwustadialnych układów produkcji kruszyw dolomitowych. Całkowity maksymalny stopień rozdrobnienia dla układów zamkniętych wynosi 60, a dla układu otwartego 40. Przyjęty i oszacowany koszt zużycia energii elektrycznej przez zakład wyniósł 0,36 zł/kWh. Proces dwustadialnego rozdrabniania w układzie zamkniętym z kruszarką udarową jest najmniej energochłonny w stosunku do pozostałych układów, gdyż przy maksymalnym stopniu rozdrobnienia surowca równym 60 zużywa się energię 5,3 MJ/Mg.

**Tabela 6.21**

Bilans energetyczny stacjonarnych dwustadialnych układów produkcji kruszyw dolomitowych zaprezentowanych na rysunku 6.36 (Gawenda 2013a)

Wskaźnik	Układ A	Układ B	Układ C
Zużycie energii przez poszczególne urządzenia [kWh/Mg]:			
– kruszarka udarowa młotkowa 40.99 Makrum	0,47	0,47	0,47
– przesiewacz PZ,	0,05	0,05	0,05
– przesiewacz MF 3,6 × 8,5 SD,	0,055	–	0,055
– przesiewacz MF 3,0 × 7,3 SD,	–	0,073	–
– kruszarka stożkowa HP5,	1,26	0,88	–
– kr. udarowa listowa NP1520,	–	–	0,84
– przesiewacz MF 3,6 × 8,5 SD	0,055	–	0,055
Zużycie energii elektrycznej ogółem [kWh/Mg]	1,89	1,47	1,47
Koszt zużycia energii elektrycznej [zł/Mg]	0,68	0,52	0,52
Zużycie energii [MJ/Mg]	6,8	5,3	5,3
Stopień rozdrobnienia $S_{\max}$	60	40	60

### 6.3.2.2. Analiza pracy wybranych układów instalacji mobilnych i stacjonarnych

W tabeli 6.22 zestawiono porównanie wskaźników z dziewięciu wybranych układów mobilnych i stacjonarnych produkujących różne kruszywa łamane. Zużycie paliwa w układach mobilnych wynosi od 0,14 do 0,25 l/Mg rozdrabnianego surowca, natomiast zużycie energii elektrycznej w stacjonarnych układach wynosi od 1,47 do 3,42 kWh/Mg w zależności od rodzaju rozdrabnianego surowca oraz zastosowanego typu kruszarki.

**Tabela 6.22**

Zestawienie wskaźników technologiczne układów mobilnych i stacjonarnych produkcji kruszyw  
(Gawenda 2013a)

Układ	Zużycie paliwa na tonę [l/Mg]	Koszt zużycia paliwa [zł/Mg]	Zużycie energii elektrycznej [kWh/Mg]	Koszt zużycia energii elektrycznej [zł/Mg]	Stopień rozdrobnienia $S_{max}$	Zużycie energii $E$ na tonę [MJ/Mg]	Wskaźnik $W_j$ [MJ/Mg]
Mobilny Remax, zamknięty	kruszywa wapienne, kruszarzka udarowa listwowa RHS12/13 oraz przesiewacz (rys. 6.33)						
	0,14	0,81	(1,48)	–	9,5	5,32	0,56
Mobilny otwarty	kruszywa wapienne, kruszarzka szczękowa MC 120 Kleemann oraz przesiewacz						
	0,14	0,81	(1,48)	–	7	5,32	0,76
Mobilny otwarty	kruszywa dolomitowe, kruszarzka szczękowa Terex Pegson Premiertrak 1100 × 650 oraz przesiewacz						
	0,25	1,47	(2,64)	–	5,8	9,50	1,64
Mobilny otwarty	kruszywa krzemionkowe, kruszarzka szczękowa Extec C12 oraz przesiewacz						
	0,22	1,28	(2,32)	–	5,4	8,36	1,55
Mobilny otwarty	kruszywa kwarcytowe, kruszarzka szczękowa LT110 oraz przesiewacz (rys. 6.34)						
	0,20	1,16	(2,11)	–	3,2	7,60	2,38
Stacjonarny 3-stad. zamknięty	kruszywa kwarcytowe, kruszarzka szczękowa C110, stożkowe HP400 i HP4 oraz przesiewacze (rys. 6.35)						
	–	–	3,42	1,22	11,1	12,3	1,11
Stacjonarny 2-stad. zamknięty	kruszywa dolomitowe, kruszarzki udarowe młotkowe, stożkowe HP5 oraz przesiewacze (rys. 6.36a)						
	–	–	1,89	0,68	60,0	6,8	0,11
Stacjonarny 2-stad. otwarty	kruszywa dolomitowe, kruszarzki udarowe młotkowe, stożkowe HP5 oraz przesiewacze (rys. 6.36b)						
	–	–	1,47	0,52	40,0	5,3	0,13
Stacjonarny 2-stad. zamknięty	kruszywa dolomitowe, kruszarzki udarowe młotkowe, udarowe listwowe NP oraz przesiewacze (rys. 6.36c)						
	–	–	1,47	0,52	60,0	5,3	0,09

Uwagi: wartości podane w nawiasach dotyczą teoretycznego zużycia energii urządzeń zasilanych olejem napędowym po przeliczeniu kaloryczności paliwa (3,6 MJ = 1 kWh). Przyjęty i oszacowany koszt zużycia energii elektrycznej wynosi 0,36 zł/kWh

Ponieważ układy rozdrabniają surowce o różnych zakresach wielkości uziarnienia i produkują zróżnicowane produkty, do oceny efektywności takich układów zestawiono maksymalne stopnie rozdrobnienia. Instalacje mobilne to układy jednostadialne, a więc stopnie rozdrobnienia nie są wysokie i wahają się od 3,2 do 9,5. W przeciwieństwie do układów stacjonarnych dwu- i trójstadialnych stopnie rozdrobnienia mają większe wartości i wynoszą od 11,1 do 60. Stopień rozdrobnienia jest uzależniony od wielkości uziarnienia nadawy i uzyskiwanych produktów, właściwości fizyczno-mechanicznych surowca i parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych maszyny. W przypadku urządzeń mobilnych parametrami determinującymi są: szczelina wylotowa i prędkość obrotowa wirnika. Również rodzaj układu decyduje o wielkości stopnia rozdrobnienia – w układach zamkniętych uzyskano większe stopnie rozdrobnienia niż w układach otwartych (Naziemiec, Gawenda 2007a; Saramak i in. 2010; Gawenda 2012b).

Na podstawie wyników zużycia paliwa oraz energii elektrycznej, wyrażonych za pomocą wskaźnika energetycznego w dżulach na tonę rozdrobnionego surowca, dla każdego układu uzyskano kolejny wskaźnik  $W_j$  jako iloraz zużycia energii i maksymalnego stopnia rozdrobnienia. Jest to wskaźnik określający zapotrzebowanie energetyczne (MJ) na rozdrobnienie jednej tony surowca przy jednokrotnym pomniejszeniu jej uziarnienia. Im wartość wskaźnika jest mniejsza, tym układ jest bardziej energooszczędny.

Analizując omawiane układy pod względem energochłonności, łatwo można zauważyć, że korzystniej jest stosować wielostadialne układy rozdrabniania i klasyfikacji. Wskaźnik jednostkowego zużycia energii o wartości 0,09 MJ/Mg, potrzebnej do jednokrotnego pomniejszenia uziarnienia nadawy, odnotowano dla układu stacjonarnego dwustadialnego składającego się z dwóch kruszarek udarowych, produkującego kruszywa dolomitowe. Instalacja tych maszyn tworzy układ zamknięty (z zawrotem materiału).

Warto zauważyć, że spośród rozpatrywanych układów najkorzystniejsze okazały się układy z zawrotami – zarówno stacjonarne, jak i mobilne. Ciekawe jest porównanie dwóch układów mobilnych produkujących kruszywa wapienne. Oba układy mają ten sam wskaźnik zużycia paliwa 0,14 l/Mg. Układ zamknięty z kruszarką udarową listwową SBM (rys. 6.33, tab. 6.22) rozdrabnia wapień karboński (wytrzymałość na ściskanie dochodzi do 150 MPa), twardszy od wapienia jurajskiego (wytrzymałość na ściskanie poniżej 90 MPa) rozdrabnianego w układzie otwartym z kruszarką szczękową Kleemann. Mimo że układ z zawrotem rozdrabnia twardszy surowiec, to stopień rozdrobnienia jest większy, a więc uzyskuje się wskaźnik zapotrzebowania energetycznego mniejszy o 0,20 MJ/Mg. Podobne zależności występują w przypadku układów otwartego i zamkniętego, produkujących te same kruszywa dolomitowe (rys. 6.36a i 6.36b, tab. 6.22) i składających się z tych samych maszyn. Wskaźnik zużycia energetycznego dla układu zamkniętego wyniósł 0,11 MJ/Mg, a dla otwartego 0,13 MJ/Mg, poza tym zastosowanie zamkniętych układów kruszenia daje możliwości lepszego jakościowo uzyskania produktu w sposób kontrolowany.

Również dane dotyczące zapotrzebowania energetycznego w przypadku układów rozdrabniających bardzo twarde kwarcyty w tym samym zakładzie przerobczym (rys. 6.34 i 6.35) pozwalają stwierdzić, że korzystniejszy pod względem zapotrzebowania energetycznego jest układ stacjonarny, gdyż zużycie energii wynosi w nim 1,11 MJ/Mg i jest mniejsze w porównaniu z układem mobilnym aż o 1,27 MJ/Mg.

Porównując trzy rodzaje stosowanych kruszarek – udarowe, szczękowe, stożkowe – należy podkreślić, że najmniejszym jednostkowym zużyciem energii charakteryzują się kruszarki udarowe.

## **6.4. Analiza wpływu różnych rodzajów układów na jakość produkowanych kruszyw łamanych**

### **6.4.1. Metody obliczania zawrotu materiału**

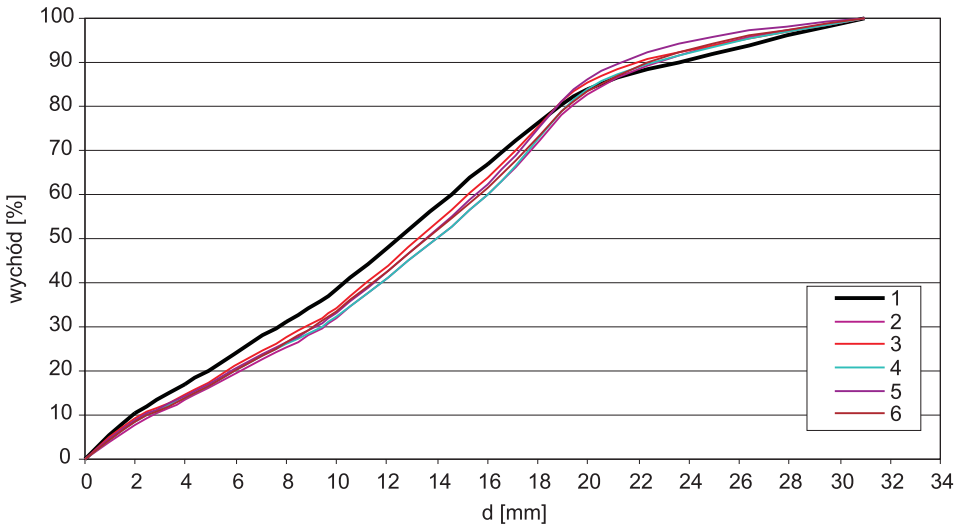
Prawidłowy dobór maszyn i urządzeń oraz znajomość charakterystyk produktów decyduje nie tylko o wydajności procesu produkcji kruszyw, ale również o ich jakości.

W układach rozdrabniania z zamkniętym obiegiem przepływ materiału jest znacznie dłuższy niż wymagałoby tego rozdrobnienie materiału dożądanego uziarnienia w obiegu otwartym, ponieważ produkt grubszy po klasyfikacji jest zwracany ponownie do kruszenia. W efekcie osiąga się pewne korzyści, takie jak: brak nadmiernego przekruszenia materiału, likwidowanie produktu nadsitowego, obniżenie zużycia energii, zwiększenie możliwości uzysku wymaganej klasy ziarnowej oraz poprawa jakości produktów pod względem wzrostu odporności na rozdrabnianie kruszyw i zwiększenia udziału zawartości ziarn foremnych.

W rozdziale 5 na rysunku 5.1 przedstawiono cykle technologiczne rozdrabniania z przesiewaniem. Zgodnie z literaturą (Grzelak 1973; Kurdowski 1981) ideę takich układów można wyjaśnić na przykładzie przepływu konkretnej ilości materiału. Załóżmy, że chcemy uzyskać produkt o uziarnieniu 0–16 mm (rys. 5.1). Jeżeli z kruszarki szczękowej przy szczelinie wylotowej 12 mm otrzymamy uziarnienie 0–31,5 mm, jak na rysunku 6.37 (pogrubiona krzywa 1), wówczas frakcja powyżej 16 mm stanowi 33%, a frakcja poniżej 16 mm 67%. W cyklu otwartym (jak na rys. 5.1a) ilość doprowadzonej nadawy równa się przepustowości kruszarki. W cyklu zamkniętym (rys. 5.1b) teoretycznie 33%, a praktycznie około 40% początkowej nadawy wróci ponownie do kruszarki (skuteczność przesiewania w warunkach laboratoryjnych wyniesie 100%, a w warunkach przemysłowych będzie o kilka do kilkunastu procent mniejsza). Tak więc w drugim cyklu (krzywa nr 2) ilość doprowadzonej nadawy z zewnątrz powinna wynieść tylko 60% przepustowości, bo pozostałe 40% wraca do kruszarki z przesiewacza (nadal biorąc pod uwagę warunki przemysłowe).

Z kolei w trzecim cyklu kruszenia (krzywa nr 3) do kruszarki z zewnątrz będziemy musieli dostarczyć jeszcze mniejszą ilość nadawy w zależności od tego, czy uziarnienie produktu grubego z zawrotu po drugim cyklu kruszenia będzie miało wpływ na uziarnienie otrzymywanych produktów w kolejnych cyklach rozdrabniania, czy też nie. Po pewnym czasie ilość zwracanego materiału do kruszarki staje się stała.

Należy pamiętać, że ilość zwracanego materiału zależy głównie od wielkości szczeliny wylotowej i oczka na sicie przesiewacza.



**Rys. 6.37.** Krzywe składu ziarnowego chalcedonitu uzyskane po kolejnych cyklach kruszenia (4–6) z zawrotem w kruszarce L44.41,  $e = 12$  mm,  $N = 70\text{--}100$  mm, według schematu na rysunku 5.1b (Naziemiec, Gawenda 2007a)

W celu właściwego doboru urządzenia rozdrabniającego o odpowiedniej wydajności konieczne jest ustalenie ilości materiału krążącego w obiegu zamkniętym, czyli krotności obiegu, co jest bardzo kłopotliwe, gdyż wymaga długotrwałych badań w warunkach przemysłowych.

Ilość zawracanego materiału wpływa na obciążenie przesiewacza i kruszarki, a w instalacjach przemiałowych na obciążenie młyna i separatora, a także urządzeń transportowych. Układ przedstawiony na rysunku 5.1c charakteryzuje się najmniejszym obciążeniem kruszarki, ponieważ trafia do niej tylko materiał pozbawiony ziarn drobnymi.

Właściwie dobrane urządzenie klasyfikujące powinno dawać ostrą granicę rozdziału, co oznacza, że do produktu drobnego nie powinny przechodzić ziarna grube i w zawrocie z klasyfikatora powinno być jak najmniej materiału drobnego o granulacji odpowiadającej produktowi finalnemu.

Krotność obiegu definiuje się jako iloraz ilości materiału zawracanego do ilości świeżej nadawy. W procesach przemiału np. wapienia krotność obiegu osiąga wysokie wartości (2–2,6), a dla kruszenia materiałów w kruszarkach jest zdecydowanie niższa.

W procesach rozdrabniania krotność obiegu można ustalić z różnych wzorów. W przypadku obiegu materiału w układzie kruszarka-przesiewacz (rys. 6.38) są spełnione zależności:

$$Q_n = Q_d$$

$$Q_d + Q_g = Q_{zn}$$

$$a_{dd} \cdot Q_d + a_{gd} \cdot Q_g = a_{nd} \cdot Q_{zn}$$

$$Q_g = Q_d \frac{a_{dd} - a_{nd}}{a_{nd} - a_{gd}}$$

Krotność obiegu można obliczyć jako ułamek przyrostu zawracanej masy:

$$k_1 = \frac{Q_g}{Q_n} = \frac{Q_g}{Q_d} \quad (6.6)$$

lub znając zawartość frakcji jako:

$$k_2 = \frac{a_{dd} - a_{nd}}{a_{nd} - a_{gd}} \quad (6.7)$$

W przypadku obiegu materiału w układzie przesiewacz-krusząca (rys. 6.39) są spełnione zależności:

$$Q_n = Q_d$$

$$Q_g = Q_z$$

$$a_{dd} \cdot Q_d + a_{gd} \cdot Q_g = a_{nd} \cdot Q_{zn} + a_{pd} \cdot Q_z$$

$$a_{dd} \cdot Q_d + a_{gd} \cdot Q_g = a_{nd} \cdot Q_{zn} + a_{pd} \cdot Q_g$$

$$Q_g = Q_d \frac{a_{dd} - a_{nd}}{a_{pd} - a_{gd}}$$

Wówczas krotność obiegu można obliczyć jako przyrost zawracanej masy:

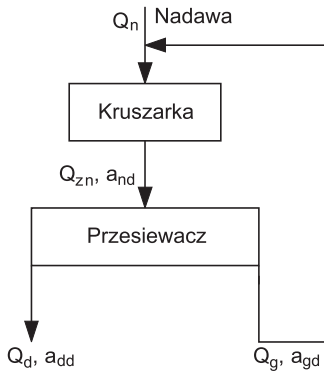
$$k_3 = \frac{Q_g}{Q_n} = \frac{Q_g}{Q_d} \quad (6.8)$$

lub znając zawartość frakcji jako:

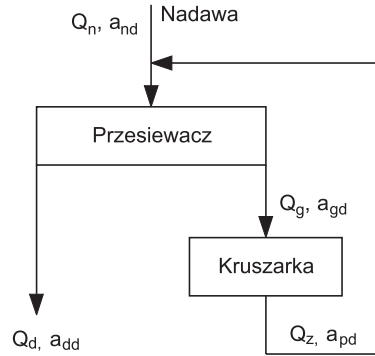
$$k_4 = \frac{a_{dd} - a_{nd}}{a_{pd} - a_{gd}} \quad (6.9)$$

gdzie:

- $Q_n$  – nadawa pierwotna (świeża) [Mg/h],
- $Q_d$  – produkt dolny (końcowy) [Mg/h],
- $Q_g = Q_z$  – produkt górny po klasyfikacji, zawrotu [Mg/h],
- $Q_{zn}$  – nadawa po połączeniu z zawrotem [Mg/h],
- $a_{nd}$  – zawartość ziarn drobnych w nadawie do klasyfikacji dla układu krusząca-przesiewacz według rysunku 6.38 [%] oraz zawartość ziarn drobnych w pierwotnej nadawie do klasyfikacji dla układu przesiewacz-krusząca według rysunku 6.39 [%],
- $a_{dd}$  – zawartość ziarn drobnych w produkcie dolnym [%],
- $a_{gd}$  – zawartość ziarn drobnych w produkcie górnym [%],
- $a_{pd}$  – zawartość ziarn drobnych w produkcie kruszenia według rysunku 6.39 [%].



**Rys. 6.38.** Schemat obiegu materiału w układzie kruszarka-przesiewacz



**Rys. 6.39.** Schemat obiegu materiału w układzie przesiewacz-kruszarka

Na podstawie wzorów (6.6)–(6.9) łatwo ocenić krotność obiegu dla pracującej instalacji. Powstaje jednak pewne utrudnienie związane z obliczeniami np. dla projektowanego węzła. W takiej sytuacji zawsze można posłużyć się charakterystykami ziarnowymi produktów (krzywymi składu ziarnowego) dla danego urządzenia rozdrabniającego. W zależności od tego, jak dokładnymi krzywymi składu ziarnowego dysponujemy, możemy uzyskać mniej lub bardziej dokładne wyniki obliczeń. Skład ziarnowy produktu z kruszarki będzie się zmieniał zależnie od składu ziarnowego nadawy, chociaż zwykle przyjmuje się, że skład ziarnowy nadawy nie wpływa na skład ziarnowy produktu.

W produkcji kruszyw stosowana jest następująca procedura ustalania ilości materiału krążącego w obiegu zamkniętym. Partię kruszywa przewidzianą do rozdrabniania należy podzielić na co najmniej sześć próbek o jednakowej masie. Pierwszą próbkę rozdrabnia się przy ustalonej szczeliny wylotowej i odsiewa materiał gruby. Następnie materiał gruby miesza się z drugą próbką i całość rozdrabnia w tych samych warunkach. Powyższe czynności powtarza się sześciokrotnie. Nadawa otrzymana po ostatnim cyklu rozdrabniania jest próbką takiego kruszywa, które będzie krążyć w cyklu zamkniętym.

W celu prześledzenia omawianych zależności przeprowadzono następujący eksperyment (Naziemiec, Gawenda 2007a). Do kruszarki szczękowej L44.41 o złożonym ruchu szczęki podawano do rozdrabniania chalcedonit o granulacji 70–100 mm, według schematu na rysunku 5.1b. Kruszarka pracowała przy szczeliny wylotowej  $e = 12$  mm. Po procesie kruszenia materiał był przesiewany w celu wykonania analiz składu ziarnowego produktów, po czym zawracano do obiegu materiał  $>16$  mm (pierwsza seria) i  $>12,5$  mm (druga seria). Wyniki z pierwszej serii przedstawiono w tabeli 6.23, a krzywe składu ziarnowego charakteryzujące poszczególne operacje kruszenia przedstawiono na rysunkach 6.37 i 6.40.

W tabeli 6.23 zestawiono wskaźniki opisujące wielkość zawrotu dla sześciu cykli kruszenia z zawrotem materiału grubego. Ilość zawracanego materiału ustalono, ważąc zawracane klasy ziarnowe w poszczególnych cyklach kruszenia. Procent zawracanego materiału obrazuje stosunek masy zawracanego produktu górnego do całkowitej masy nadawy w danym cyklu kruszenia (pierwsza pozycja w tabeli 6.23). Z kolei procentowy przyrost zawracanej



masy stanowi stosunek masy zawracanego produktu górnego do masy świeżej nadawy ( $k_1$ ) – wzór (6.6). Wyniki zmiany tego wskaźnika przedstawiono na rysunku 6.41. Krotność obiegu ( $k_2$ ) została wyliczona ze wzoru (6.7), wynikającego z bilansu frakcji drobnych.

**Tabela 6.23**

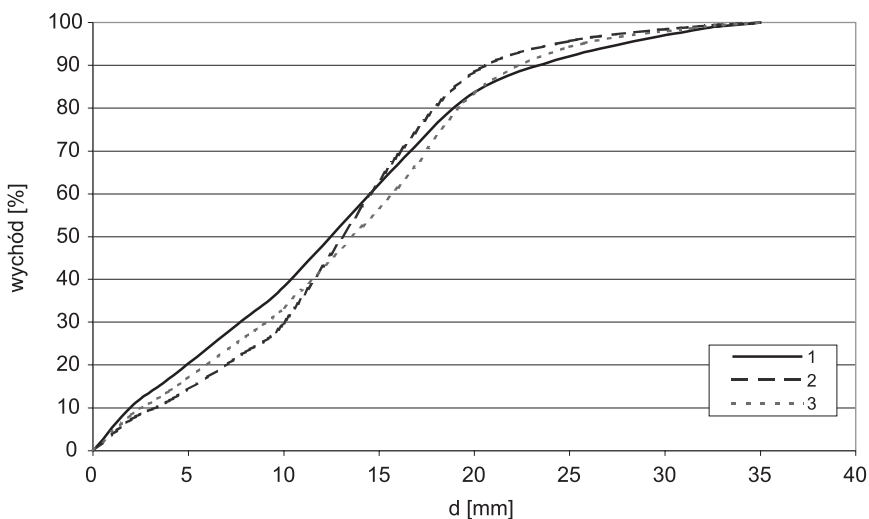
Zestawienie wskaźników charakteryzujących wielkość zawrotu w kolejnych cyklach kruszenia (Naziemiec, Gawenda 2007a)

Numer cyklu kruszenia	1	2	3	4	5	6
Procent zawracanego materiału	33	40	36	40	38	39
Procentowy przyrost zawracanej masy ( $k_1$ ) według wzoru (6.6)	33	53	55	62	60	62
Procentowarotność obiegu ( $k_2$ ) według wzoru (6.7)	49	67	56	66	60	63

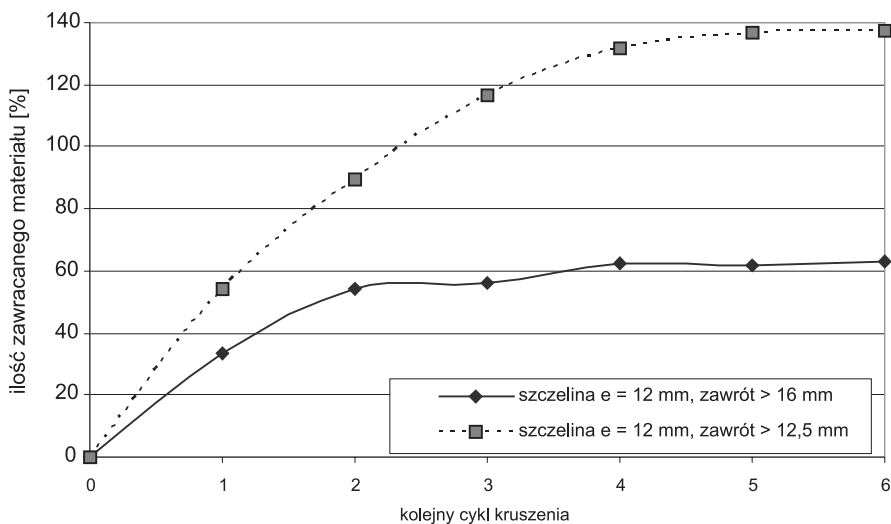
Na rysunku 6.37 widać, że krzywa 1 obrazująca pierwszy cykl kruszenia (bez zawrotu materiału) różni się od pozostałych krzywych składów ziarnowych produktów (2–6). Krzywe 2–6 układają się względem siebie podobnie. W pierwszym cyklu kruszenia w komorze kruszarki znajdował się tylko materiał gruby (70–100 mm). W następnych cyklach kruszenia w komorze znajdował się materiał gruby i materiał drobny o granulacji >16 mm. Tym samym komora kruszenia była dokładniej wypełniona i zmieniły się warunki kruszenia. W efekcie krzywe składu ziarnowego różnią się od siebie głównie zawartością klas średnich.

Na rysunku 6.41 można zauważyć, że proces ustabilizował się mniej więcej po czwartym cyklu kruszenia. Po pierwszym cyklu kruszenia ilość zawracanego materiału wynosiła 33%, a po szóstym cyklu zawrót wynosił 62% (skuteczność przesiewania wynosiła 100%). Z rysunku widać, że wielkość zawrotu szybciej się ustaliła przy zawracaniu materiału powyżej 16 mm, a więc przy mniejszej ilości zawracanego materiału. Zestawienie wartości krotności obiegu ( $k$ ), jakie uzyskano dla różnych warunków procesu kruszenia, przedstawiono w tabeli 6.24.

W tabeli 6.24 pod pozycją 1 podano wartość krotności obiegu  $k_2$  obliczonej ze wzoru (6.7) na podstawie krzywej składu ziarnowego dla materiału uzyskanego po pierwszym cyklu kruszenia (bez zawrotu). Pod pozycją 2 podano wartość  $k_2$  obliczoną z tego samego wzoru, lecz na podstawie krzywej składu ziarnowego materiału po szóstym cyklu kruszenia w obiegu zamkniętym (kruszenie z zawrotem). Pod pozycją 3 podano rzeczywistą wielkość  $k_1$  ustaloną na podstawie pomiarów masy zawracanego materiału dla ziarna podziałowego  $d_T = 12,5$  mm i  $d_T = 16$  mm. Zarówno w pierwszym, jak i drugim przypadku uzyskano różne wartości wskaźników  $k_1$  i  $k_2$ . Najmniejszą dokładność uzyskano dla wartości  $k_2$  podanej w pozycji 1. Stosując krzywą składu ziarnowego dokładniej charakteryzującą produkty kruszenia, w pozycji 2 uzyskano wyniki bardziej zbliżone do uzyskanych w przeprowadzonym eksperymencie. Widać stąd, że na dokładność uzyskanych wyników w istotny sposób wpływa znajomość charakterystyki badanych urządzeń (w tym przypadku składu ziarnowego produktów, który ulega zmianom w zależności od warunków prowadzenia procesu).



**Rys. 6.40.** Składy ziarnowe produktów uzyskanych w kruszarce szczękowej przy szczelinie  $e = 12$  mm; 1 – po pierwszym cyklu kruszenia, 2 – po szóstym cyklu kruszenia przy zawrocie  $>12,5$  mm, 3 – po szóstym cyklu kruszenia przy zawrocie materiału  $>16$  mm (Naziemiec, Gawenda 2007a)



**Rys. 6.41.** Wzrost ilości zawracanego materiału w kolejnych cyklach kruszenia (Naziemiec, Gawenda 2007a)

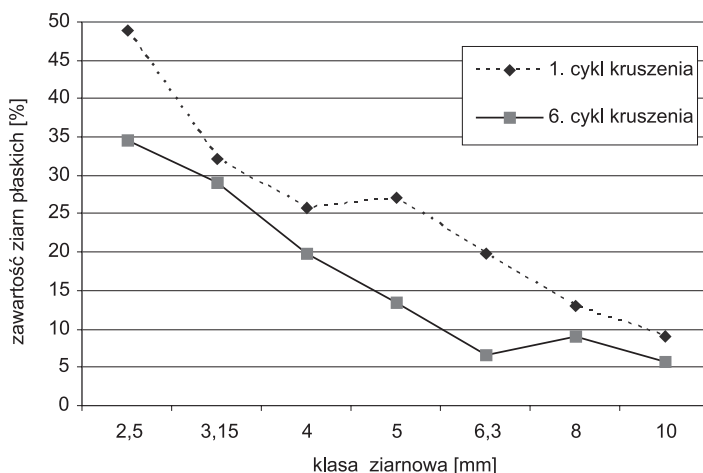
**Tabela 6.24**

Krotność obiegu materiału w kruszarce szczękowej w procesie kruszenia przy szczelinie wylotowej  $e = 12 \text{ mm}$  i przesiewie na sicie o oczkach  $16 \text{ mm}$  i  $12,5 \text{ mm}$  (Naziemiec, Gawenda 2007a)

Sposób obliczenia ilości zawracanego materiału	Krotność obiegu $k$	
	$d_T = 12,5 \text{ mm}$	$d_T = 16 \text{ mm}$
$k_2$ obliczone ze wzoru (6.7) na podstawie krzywej składu ziarnowego 1 (materiał po pierwszym cyklu kruszenia)	1,00	0,49
$k_2$ obliczone ze wzoru (6.7) na podstawie krzywej składu ziarnowego po 6 cyklu kruszenia (dla odpowiedniej wielkości oczka sita)	1,17	0,63
$k_1$ ustalone przez ważenie materiału w poszczególnych cyklach zawrotu i kruszenia – zgodnie ze wzorem (6.6)	1,38	0,62

### 6.4.2. Analiza efektów rozdrabniania kruszyw w układzie zamkniętym i otwartym

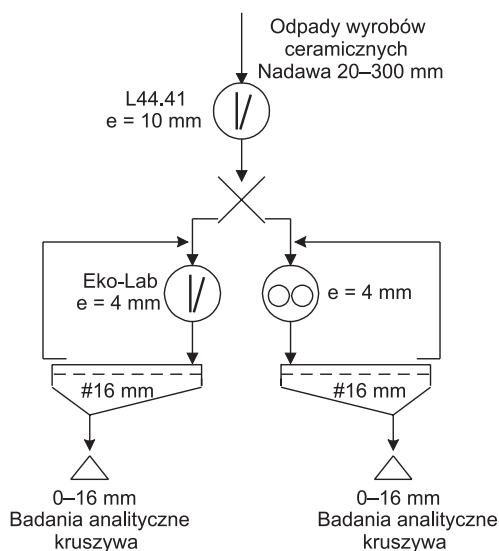
Wykorzystując uzyskane produkty w różnych etapach kruszenia, zgodnie ze schematami na rysunkach 5.1a i 5.1b, określono wpływ zawrotu materiału na zawartość ziarn nieforemnych w produktach. Okazuje się, że korzystniejsze jest rozdrabnianie materiału z zamkniętym obiegiem. Ponieważ przy zawrocie wypełnienie komory kruszenia jest większe, ziarna płaskie, jako słabsze, ulegają łatwiejszemu rozkruszeniu, co z kolei wpływa na poprawę ich kształtu. Na rysunku 6.42 przedstawiono zawartość ziarn nieforemnych w produkcie po pierwszym cyklu kruszenia w obiegu otwartym i po szóstym cyklu kruszenia w obiegu zamkniętym. Zawartość ziarn nieforemnych określono za pomocą wskaźnika płaskości przy użyciu sit szczelinowych.



**Rys. 6.42.** Porównanie zawartości ziarn nieforemnych powstałych w procesie kruszenia chalcedonitu w cyklu zamkniętym i otwartym (Naziemiec, Gawenda 2007a)

Prawidłowo zaprojektowane układy rozdrabniania z obiegiem zamkniętym pozwalają kontrolować przepływ materiału, a także podnosić jakość produktu. Zawartość ziarn płaskich w produkcie po szóstym cyklu kruszenia, czyli po ustabilizowaniu się przepływu materiału w układzie zamkniętym w zależności od klasy ziarnowej, była niższa o 4–15% niż dla produktu kruszonego w układzie otwartym (po pierwszym cyklu kruszenia).

Przeprowadzono także badania w laboratorium polegające na rozdrabnianiu odpadów wyrobów ceramicznych w dwustadialnych układach technologicznych i klasyfikacji według schematu zaprezentowanego na rysunku 6.43 (Gawenda i in. 2013b). W tym celu wykorzystano doświadczalną kruszarkę szczękową (typu L44.41), laboratoryjną kruszarkę szczękową (Eko-Lab) i laboratoryjną dwuwalcową kruszarkę o walcach gładkich, a także przesiewacz.

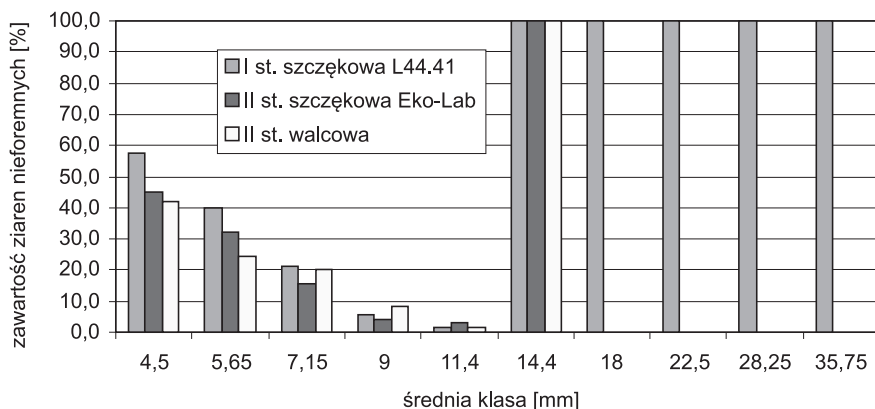


**Rys. 6.43.** Schemat technologiczny rozdrabniania i klasyfikacji odpadów wyrobów ceramicznych (Gawenda i in. 2013b)

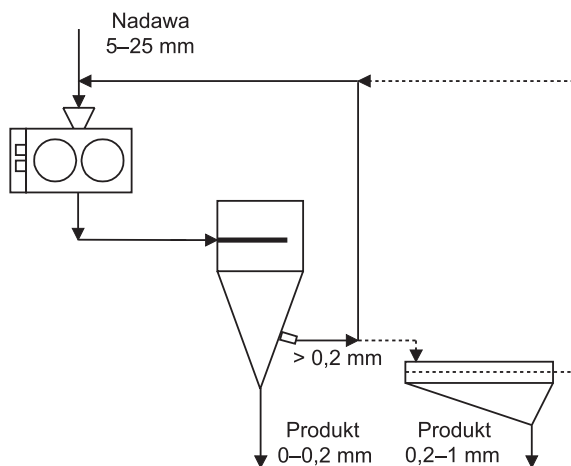
Na podstawie badań analitycznych stwierdzono, że produkt uzyskany w pierwszym stadium kruszenia charakteryzował się uziarnieniem 0–40 mm oraz największą zawartością ziarn nieforemnych (63%), natomiast oba produkty uzyskane w drugim stadium kruszenia uziarnieniem 0–16 mm, przy czym kruszywa uzyskane w kruszarce walcowej miały większy udział ziarn drobnych oraz mniejszą zawartość ziarn nieforemnych (14%) niż w kruszarce szczękowej (22%).

Największą zawartością ziarn nieforemnych, wynoszącą 100%, charakteryzowały się frakcje grubsze (>16 mm), natomiast najmniejszy udział ziarn nieforemnych miały klasy 8–12,8 mm – do kilku procent (rys. 6.44). Uzyskane kruszywo w kruszarce pierwszego stadium rozdrabniania miało wszystkie ziarna nieforemne w grubszych klasach powyżej 16 mm. Takie efekty rozdrabniania wynikają z trudności zmiany kształtu nadawy z ziarn

płaskich stanowiących płytki ceramiczne na ziarna kubiczne. Przyczyną może być brak niedostatecznego oddziaływania szczęk kruszarki, spowodowany większą szerokością szczeliny wylotowej wraz ze skokiem szczęki niż wynosiła grubość płytki. Natomiast zawrót produktu nadsitowego na drugim stadium spowodował większe oddziaływanie ziarn między sobą a powierzchniami szczęk.



**Rys. 6.44.** Zawartość ziarn nieforemnych dla średnich klas ziarnowych w produktach kruszenia uzyskanych po pierwszym i drugim stadium kruszenia (Gawenda i in. 2013b)



**Rys. 6.45.** Schemat obiegu materiału w HPGR i klasyfikatorach

Znajomość składu ziarnowego oraz ilości zawracanego materiału ma istotne znaczenie przy optymalizacji procesu produkcji kruszyw, zwłaszcza drobnoziarnistych o wąskim zakresie uziarnienia. Przykładowo w pewnej instalacji przemysłowej z prasą walcową i separatorem dynamicznym, pokazanej na rysunku 6.45, uzyskiwano mączkę drobnoziarnistą 0–0,2 mm

i gruboziarnistą 0,2–1 mm (według nowego nazewnictwa stosowanego w normach dotyczących kruszywo było to kruszywo wypełniające i kruszywo drobne). Z instalacji, w której rozdrabniany był kamień o granulacji 5–25 mm, uzyskiwano w separatorze 28 Mg/h frakcji 0–0,2 mm i około 3 Mg/h frakcji 0,2–1mm. Skład ziarnowy nadawy, produktów i zawrotu z separatora przedstawiono w tabeli 6.25. W trakcie poszukiwań sposobu zwiększenia ilości produkowanej frakcji 0,2–1 mm okazało się, że zawrót z separatora zawiera w swym składzie ponad 30% frakcji 0,2–1 mm. Klasa ziarnowa ta zawracana do prasy walcowej ulegała niepotrzebnie dalszemu rozdrobieniu i trafiała do produktu najdrobniejszego, dlatego w instalacji zabudowano przesiewacze do klasyfikacji materiałów drobnoziarnistych i skierowano na nie zawrót z separatora (na rysunku 6.45 obieg w schemacie zaznaczono linią przerywaną). Pozwoliło to na odzysk klasy 0,2–1 mm, zawartej w zawrocie, i tym samym na ponad trzykrotne zwiększenie uzysku produktu tej klasy ziarnowej w instalacji przemiałowej.

**Tabela 6.25**

Skład ziarnowy produktów z instalacji przemiałowej z prasą walcową i separatorem

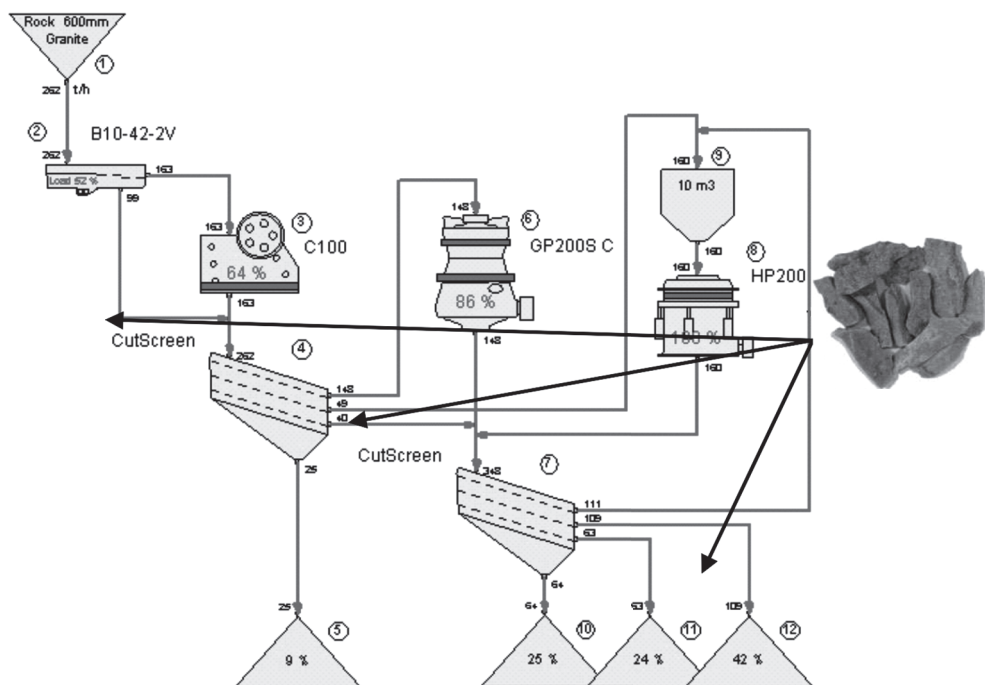
Klasa ziarnowa [mm]	Skład ziarnowy [%]			
	wychód z prasy walcowej	zawrót z separatora	produkt drobny z separatora 0–0,2 mm	produkt gruby z separatora 0,2–1 mm
0–0,04	6	4,5	47	6
0,04–0,09	7	4,4	45	7
0,09–0,15	4,5	4,3	7	12
0,15–0,3	6,5	4,6	1	25
0,3–0,5	7	6,2	–	20
0,5–1,2	11	14,4	–	30
1,2–20	58	61,6	–	–
Ilość [Mg/h]	–	–	28	3

### 6.4.3. Analiza efektów rozdrabniania kruszyw w układzie selektywnym i nieselektywnym

Układy selektywne i nieselektywne wykorzystywane są w produkcji kruszyw mineralnych w celu poprawy jakości kruszyw lub zwiększenia wydajności układu. Praca układu nieselektywnego polega na odsiewaniu pewnej klasy ziarnowej najczęściej w pierwszym stadium bez poddawania jej procesom rozdrabniania. Natomiast w układzie selektywnym każdy wydzielony na przesiewaczu strumień materiału podlega rozdrabnianiu w układzie zamkniętym, przy czym do zawrotu może być kierowana także frakcja materiału o uziarnieniu mniejszym od maksymalnej wielkości ziarna wylotowego z kruszarki, a nawet nastawy szczeliny wylotowej kruszarki. Taka zawracana drobna frakcja nosi nazwę łoża. Procesy rozdrabniania surowców skalnych z udziałem łoża są wykorzystywane zarówno do produkcji kruszyw drobnoziarnistych, jak i gruboziarnistych. Na przykład w układach z wysokociś-

nieniowymi prasami walcowymi łoże stosuje się w celu zwiększenia efektywności procesu rozdrabniania przez zwiększenie upakowania (stopnia wypełnienia) nadawy i zwiększenia ciśnienia rozdrabniania pomiędzy ziarnami w gardzieli prasy (Gudat i in. 2000; Unland, Kleeberg 2006; Gawenda, Skotnicki 2008).

Procesy rozdrabniania z zawrotem materiału wraz z łożem niekiedy są stosowane w produkcji kruszyw mineralnych w celu zmniejszenia zawartości ziarn nieforemnych. Takie badania prowadziła firma Metso Minerals w kruszarce szczękowej i granulatorach stożkowych produkujących grysy (Eloranta 2006). Do tego celu wykorzystano dwa układy trójstadiowe. W pierwszym układzie (rys. 6.46) dwa pierwsze stadia kruszarek pracowały w układach otwartych. Granulator stożkowy na trzecim stadium pracował w obiegu zamkniętym z pełnym obciążeniem. Wszystkie maszyny połączone tak, aby maksymalizować wydajność, która wynosiła 262 Mg/h. Jak widać na rysunku, drobne, płaskie cząstki obecne w nadawie nie były rozdrabniane w żadnej kruszarce i otrzymany produkt końcowy był słabej jakości.

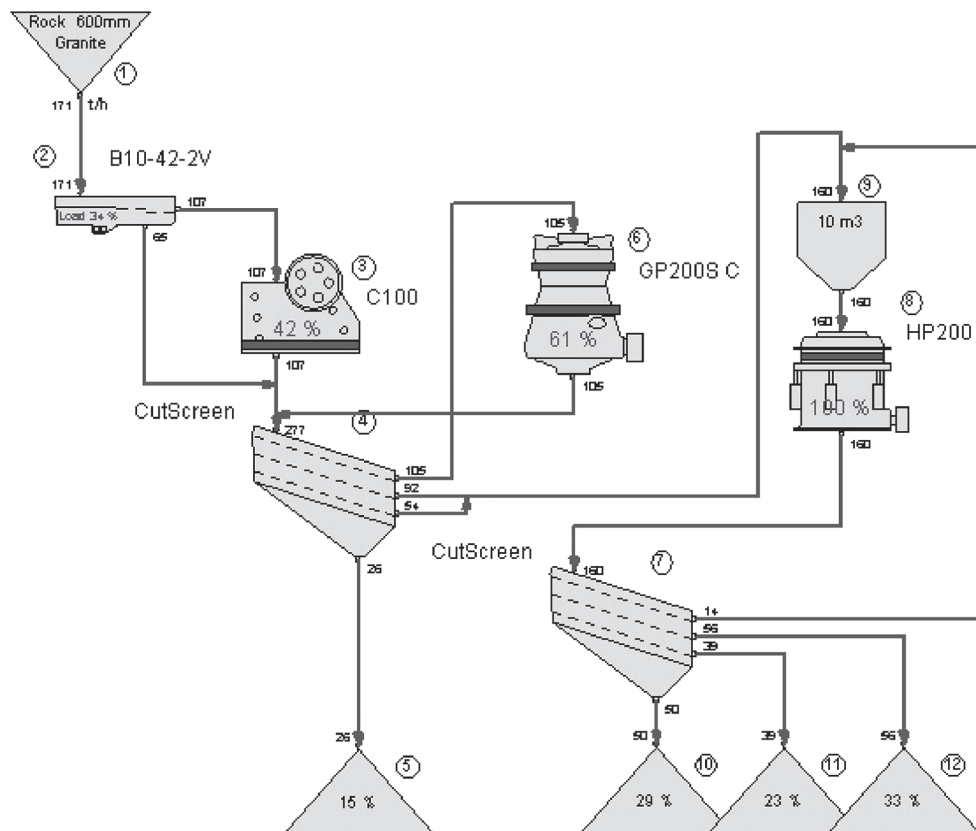


Rys. 6.46. Układ trójstadiowy z nieselektywnym obiegiem materiału (Eloranta 2006)

W drugim układzie na pierwszym stadium (rys. 6.47) kruszarka szczękowa pracowała w układzie otwartym. Pozostałe kruszarki pracowały w obiegu zamkniętym, przy czym granulator stożkowy na trzecim stadium pracował z pełnym obciążeniem (rys. 6.46). Taki układ odznaczał się jednak mniejszą wydajnością, która wynosiła 171 Mg/h, ale uzyskiwano w nim

maksymalne zawartości ziarn foremnych. Warto zwrócić uwagę, że na schemacie przedstawionym na rysunku 6.46 produkt dolny z drugiego pokładu sitowego pierwszego przesiewacza był łączony z produktem dolnym pierwszego pokładu i kierowany do granulatora stożkowego.

Porównanie zawartości ziarn nieforemnych dla obu układów przedstawia tabela 6.26.



Rys. 6.47. Układ trójstadialny z selektywnym obiegiem materiału (Eloranta 2006)

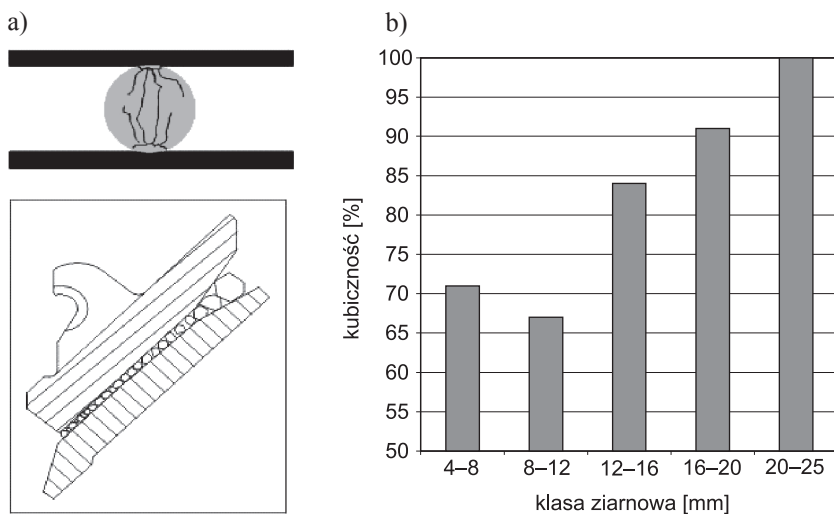
Tabela 6.26

Zawartość ziarn nieforemnych produktów uzyskanych na różnych stadiach rozdrabniania dla różnych układów technologicznych (Eloranta 2006)

Stadium kruszenia	Procentowa zawartość ziarn nieforemnych w klasach ziarnowych			
	układ nieselektywny		układ selektywny	
	5–10 mm	10–20 mm	5–10 mm	10–20 mm
Drugie	50	30	nie dotyczy	nie dotyczy
Trzecie	20	15	15	10
Końcowy produkt	34	22	15	10



Na podstawie badań stwierdzono, że kruszenie frakcji materiału w wąskim zakresie uziarnienia bez udziału ziarn drobnych, tak jak pokazano na rysunku 6.48a, powodowało wysokie udziały zawartości ziarn foremnych, ale tylko w klasach grubszych, natomiast niskie wskaźniki kubiczności – w klasach drobnych (rys. 6.48b). Zjawisko to wyjaśnia rysunek 6.48a, który przedstawia pojedyncze modelowe ziarno znajdujące się w komorze kruszarki pomiędzy dwoma płaszczyznami okładzin. Istnieje duże prawdopodobieństwo rozpadnięcia się takiego ziarna na mniejsze części o nieforemnym kształcie. W badaniach zaobserwowano, że w takich warunkach w ziarnach występują pęknięcia nie tylko powierzchniowe, ale również pęknięcia wewnętrzne i mikrorysy. Na skutek defektów strukturalnych kruszywa odznaczają się gorszymi parametrami fizyczno-mechanicznymi, zwłaszcza jeżeli chodzi o podatność na rozdrabnianie oraz nasiąkliwość czy mrozoodporność.

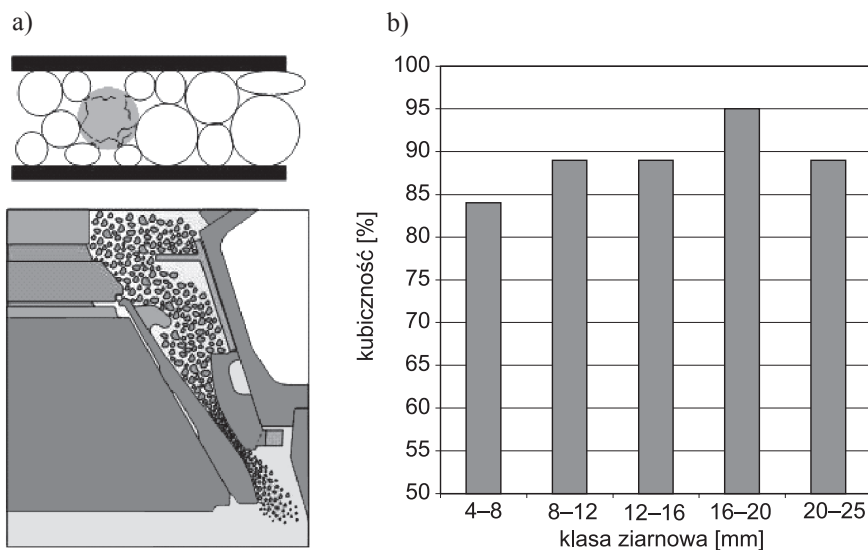


**Rys. 6.48.** Model produkcji grysów w granulatorze stożkowym bez udziału łoża w nadawie (a); zawartości ziarn foremnych w produktach rozdrabniania uzyskane dla tego modelu (b) (Eloranta 2006)

Na rysunku 6.49a pokazano możliwość produkcji grysów z udziałem łoża w nadawie, w ilości około 15–25% ziarn drobnych o wielkości mniejszej od wielkości szczeliny wylotowej (z wyłączeniem ziarn o wielkości poniżej 0,5 mm). W tym przypadku wskaźnik zawartości ziarn foremnych w najdrobniejszych klasach polepszył się o kilkadziesiąt procent (rys. 6.49b). Jak widać na rysunku 6.49a, łoże pełni funkcję tzw. poduszki, chroniąc jednocześnie ziarno grube przed „zmęczeniem”, czyli zbyt silną ingerencją elementów roboczych kruszarki. W takim procesie produkcji kruszyw mineralnych prawidłowe ziarna generalnie nie ulegają nadmiernemu zniszczeniu, a za to najczęściej pod wpływem nacisku ziarn drobniejszych łamią się ziarna płaskie lub podłużne.

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 dużych stopni rozdrobnienia), 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 ziarn drobnych. Często jednak źle dobrane parametry przesiewacza pracującego przed kruszarką mogą wpływać na niewłaściwy skład ziarnowy nadawy do granulatora, na co zwrócono szczególną uwagę w podrozdziale 6.6, który został poświęcony błędom polegających na niewłaściwym doborze parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych maszyn.



**Rys. 6.49.** Model produkcji gryswów w granulatorze stożkowym z udziałem łoża w nadawie (a); zawartości ziarn foremnych w produktach rozdrabniania uzyskane dla tego modelu (b) (Eloranta 2006)

#### 6.4.4. Ocena możliwości wykorzystania układów selektywnej przeróbki odpadów do produkcji kruszyw o polepszonej jakości

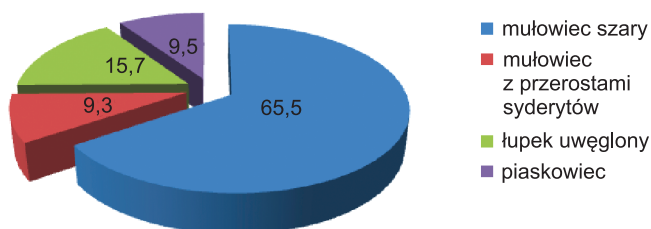
W ostatniej dekadzie pojawiło się wiele publikacji dotyczących możliwości zagospodarowania odpadów przywęglowych. Publikacje te opracowano na podstawie licznych badań na przykład realizowanych w ramach projektów badawczych typu foresight, jak „Priorytetowe i innowacyjne technologie zagospodarowania odpadów pochodzących z górnictwa węgla kamiennego” (Góralczyk 2009a; Stankiewicz 2009; Baic, Góralczyk 2010; Baic i in. 2011) czy „Scenariusze rozwoju technologicznego przemysłu wydobywczego węgla kamiennego” (Dubieński i in. 2006; Lutyński, Osoba 2007; Tumidajski i in. 2008; Turek i in. 2008; Dulewski 2009; Lutyński, Blaschke 2009; Lutyński 2010). Jedną z wielu możliwości zagospodarowania odpadów przywęglowych jest produkcja kruszyw zastępujących w niektórych przypadkach kruszywa łamane wydobywane w kopalniach odkrywkowych zwięzłymi surowcami skalnymi i żwirowymi. Kruszywa takie, po wcześniejszym rozpoznaniu właściwości, ocenie przydatności i przeróbce mają zastosowanie m.in. w budownictwie hydrotechnicznym (obwałowania

rzek, umocnienie kanałów żeglugowych) czy w budownictwie komunikacyjnym (nasypy kolejowe i drogowe).

Właściwości wyprodukowanych kruszyw zależą przede wszystkim od typów litologicznych złóż i są zróżnicowane w kopalniach, ale przy odpowiednio dobranej technologii ich przeróbki polegającej na selektywnym rozdrabnianiu i przesiewaniu można uzyskać dobrej jakości kruszywa spełniające wymagania normowe. Przykładowo kruszywa frakcjonowane klasy II może produkować KWK „Marcel” z przeznaczeniem dla budownictwa drogowego na warstwy podbudów i warstwy ulepszanego podłoża, pod warunkiem przeróbki nadawy kruszarkami udarowymi, oddzieleniu frakcji <4 mm oraz bieżącej kontroli strat prażenia klas drobnych (Gawenda, Olejnik 2008).

W badaniach prowadzonych w AGH wykorzystywano układy selektywnej przeróbki do produkcji kruszyw o polepszonej jakości pochodzących z odpadów przywęglowych z KWK „Piast” (Gawenda 2009d; Gawenda, Momot 2012; Momot, Gawenda 2013a, b).

Spośród wydzielonych typów litologicznych z odpadów przywęglowych uzyskanych po wzbogacaniu w cieczach ciężkich największy udział stanowił mułowiec szary w ilości ponad 65% (rys. 6.50). Obserwacje makroskopowe odpadów pozwoliły stwierdzić, że mułowiec szary miał najlepsze własności wytrzymałościowe w stosunku do pozostałych typów litologicznych i w najmniejszym stopniu uległ samorozdrobnieniu podczas wzbogacania oraz transportu na składowisko. Jego skład ziarnowy charakteryzował się przewagą (około 90%) ziarn grubych powyżej 100 mm.



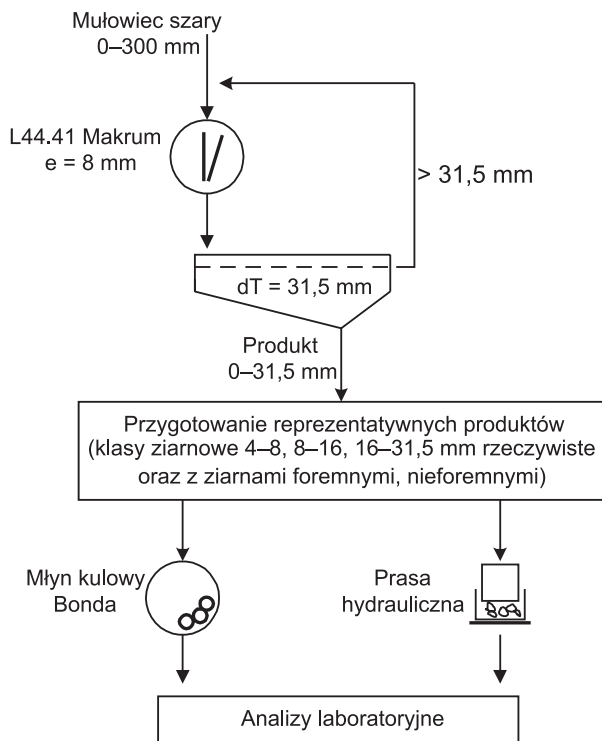
**Rys. 6.50.** Udział procentowy poszczególnych typów litologicznych w odpadach przywęglowych z KWK „Piast” (Momot, Gawenda 2013a)

Przeprowadzone badania laboratoryjne zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 6.51 dotyczyły analizy własności mułowca szarego o uziarnieniu 0–300 mm rozdrabnianego w kruszarce szczękowej w układzie zamkniętym do uziarnienia produktu <31,5 mm.

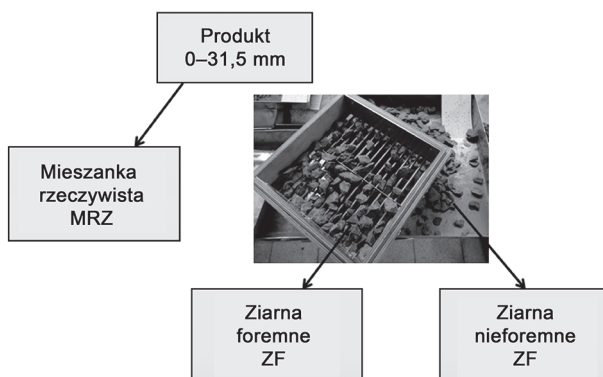
Produkt rozdrabniania podzielono na dwie reprezentatywne próbki zgodnie ze schematem na rysunkach 6.51 i 6.52, z których jedną nazwano mieszanką rzeczywistą (MRZ) – stanowił ją rzeczywisty produkt, a drugą podzielono za pomocą sit szczelinowych na ziarna foremne (ZF) i nieforemne (ZN). Powstałe w ten sposób próbki poddano analizie sitowej w celu wydzielenia trzech klas ziarnowych: 4–8, 8–16 i 16–31,5 mm.

Uzyskano w ten sposób dziewięć próbek, które następnie poddano badaniu podatności na rozdrabnianie w młynku Bonda przy 100 obrotach, a także badaniu polegającym na miażdżeniu

kruszyw w maszynie wytrzymałościowej. Do miążdżenia zastosowano siłę odpowiadającą około 80% wytrzymałości na ściskanie mułowca. Oznaczenie wytrzymałości na miążdżenie wykonano według normy PN-78/B-06714 dotyczącej badania kruszyw mineralnych.



**Rys. 6.51.** Schemat badań laboratoryjnych przeprowadzonych na mułowcu szarym (Momot, Gawenda 2013a)



**Rys. 6.52.** Schemat przygotowania próbek do dalszych badań (Momot, Gawenda 2013a)

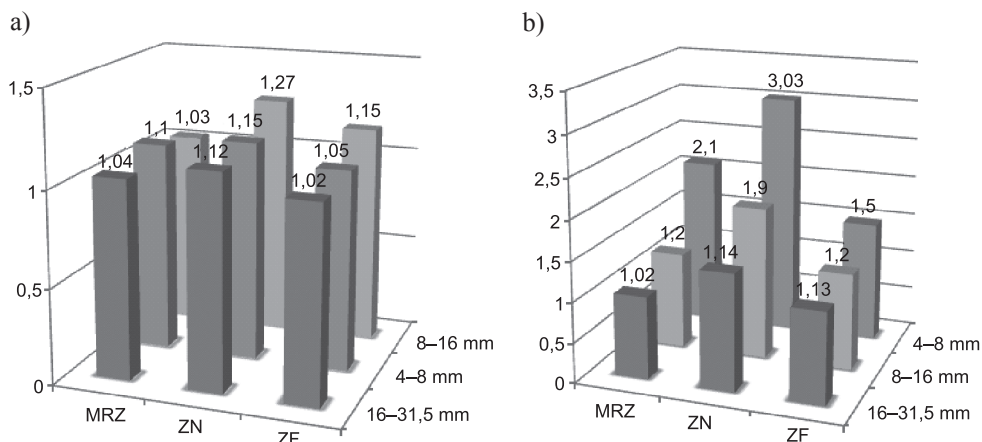
W wyniku mielenia w młynku Bonda, będącego konkurencyjną metodą wobec mielenia w młynku Los Angeles, uzyskano dla produktów zawierających ziarna foremne składy ziarnowe grubsze nawet o 20% w stosunku do ziarn nieforemnych i około 8% w stosunku do mieszanki rzeczywistej, co potwierdzają także stopnie rozdrobnienia (tab. 6.27 i rys. 6.53).

**Tabela 6.27**

Stopnie rozdrobnienia 20-procentowe i 80-procentowe uzyskane po zmieleniu w młynku Bonda (Momot, Gawenda 2013a)

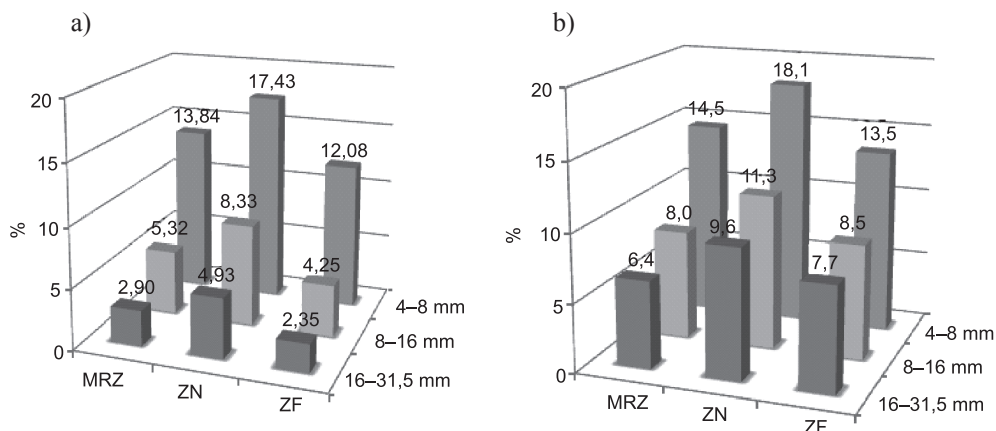
Stopień rozdrobnienia	MRZ	ZN	ZF
$S_{20}$	2,10	3,03	1,50
$S_{80}$	1,10	1,15	1,05

Na rysunku 6.53b zestawiono stopnie rozdrobnienia 20-procentowe, które informują o tym, ile przybyło ziarn w klasach drobnych. Można zaobserwować wyraźne różnice – największymi wartościami stopni rozdrobnienia charakteryzują się klasy drobne (4–8 mm), a najmniejszymi klasy grube o uziarnieniu 16–31,5 mm. Najwyższy stopień rozdrobnienia dla wszystkich frakcji miał ziarna nieforemne.



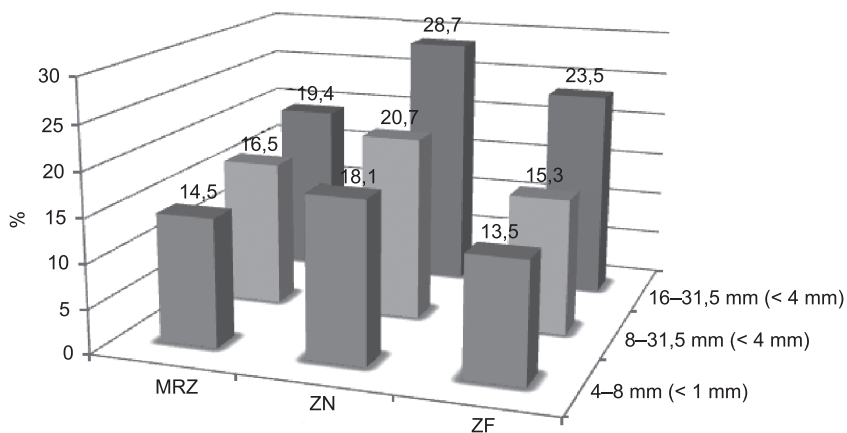
**Rys. 6.53.** Stopnie rozdrobnienia produktów mielenia w młynku Bonda dla poszczególnych frakcji: a) 80-procentowy; b) 20-procentowy (Momot, Gawenda 2013a)

Na rysunku 6.54a przedstawiono udział procentowy klasy ziarnowej <1 mm (pyłów) w produktach mielenia. Z analiz wynika, że najłatwiej uległy rozdrobnieniu ziarna najdrobniejsze (4–8 mm). Jest to związane z faktem, że drobne kruszywa wymagają „krótszej drogi do przebycia”, aby stać się pyłem. Ma to związek również z krótkim czasem mielenia, jakiemu poddano wszystkie próbki. Podobne wyniki otrzymano dla produktów procesu miazdzenia (rys. 6.54b). Największą ilością pyłów <1 mm charakteryzowała się klasa najdrobniejsza.



**Rys. 6.54.** Udział pyłów <1 mm w produktach: a) po procesie mielenia w młynku Bonda; b) po miazdzeniu w prasie (Momot, Gawenda 2013a)

Okazuje się jednak, że stosując metodę oznaczania wytrzymałości kruszyw mineralnych na miazdzenie, otrzymano odwrotne wyniki, co widoczne jest na poniższym wykresie (rys. 6.55).



**Rys. 6.55.** Wskaźnik rozkruszenia  $X_r$  dla produktów miazdzenia (Momot, Gawenda 2013a)

Zgodnie ze wzorem (6.10) obliczono wskaźnik rozkruszenia  $X_r$ :

$$X_r = \frac{m_1}{m} \cdot 100\% \quad (6.10)$$

gdzie:

$m_1$  – masa próbki o wymiarach ziarn poniżej sita kontrolnego [g],  
 $m$  – masa całej próbki [g].

We wzorze (6.10) uwzględniono przyrost masy produktu miażdżenia poniżej sita kontrolnego:

- klasa 4–8 mm: <1 mm;
- klasa 8–16 mm: <2 mm;
- klasa 16–31,5 mm: <4 mm.

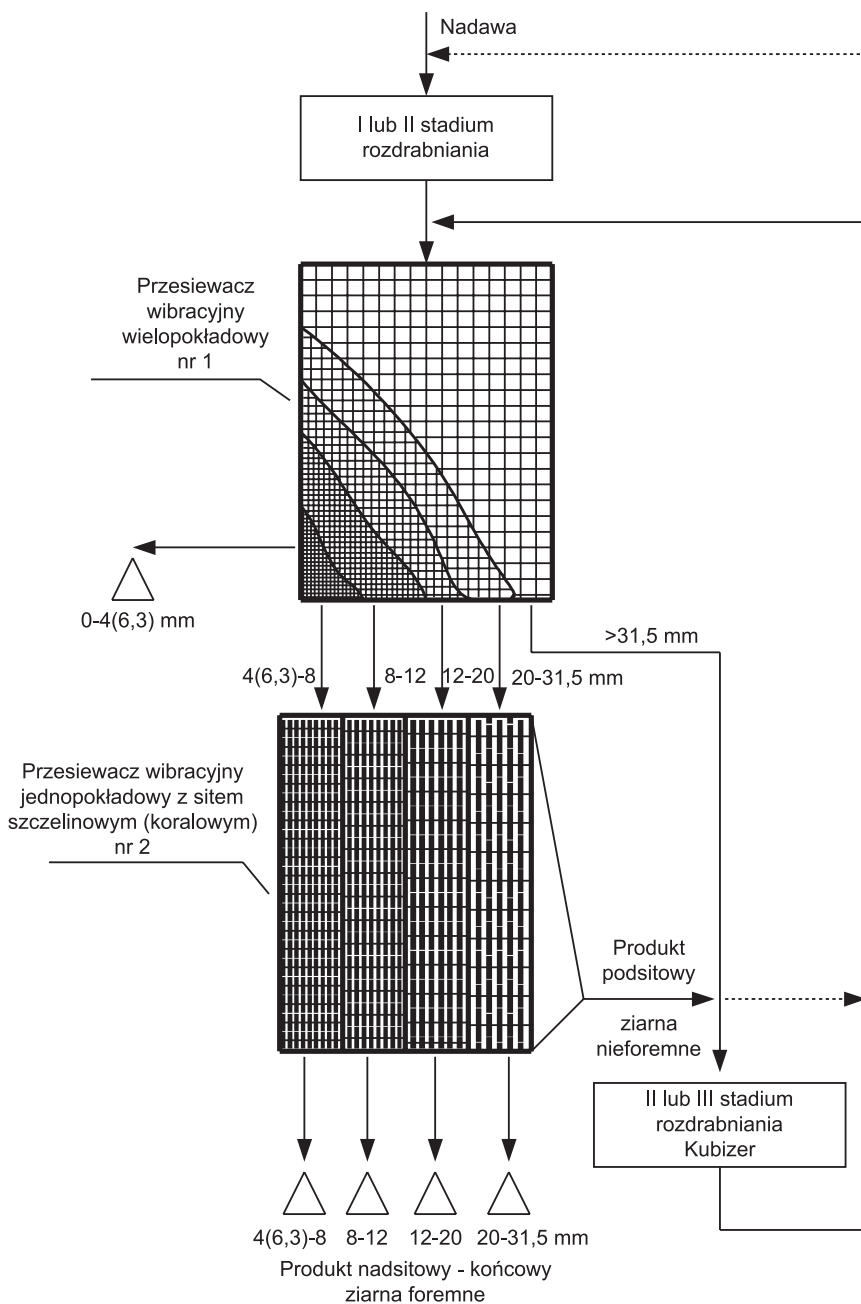
Kruszywa drobne (4–8 mm) są najodporniejsze i odznaczają się najniższą wartością wskaźnika  $X_r$  (najmniejszym przyrostem klasy poniżej 1 mm). Jest to zgodne z naturą zjawiska: im drobniejsze ziarno i więcej stadiów rozdrabniania będzie miało za sobą, tym jest mocniejsze i wymaga zużycia większej energii do jego rozdrobnienia.

Podsumowując, z odpadów przywęglowych z KWK „Piast”, pochodzących ze wzbogacania w cieczach ciężkich, po zastosowaniu sita o oczku 100 mm, selektywnie wydzielono z nadawy na wstępnym etapie przesiewania około 90% mułowca w klasie 100–300 mm. Proces technologiczny przeróbki odpadów przywęglowych na kruszywo powinien prowadzić do otrzymania maksymalnej ilości ziarn foremnych. Jednym z rozwiązań, zgodnie z koncepcją opisaną w podrozdziale 6.4.5, może być ponowne kierowanie wydzielonych na sitach szczelinowych ziarn nieforemnych do kubizerów, które korygują ziarna do kształtu foremnego przy niewielkim stopniu rozdrobnienia. Metoda selektywnej przeróbki odpadów przywęglowych pozwoliła uzyskać wskaźnik rozkruszenia dla ziarn foremnych równy około 13%, a więc jest on zbliżony do kruszyw dolomitowych czy wapiennych, który wynosi 12,7–18,2%.

#### **6.4.5. Analiza produkcji kruszyw w układzie z zamkniętym obiegiem selektywnego i posobnego procesu przesiewania i rozdrabniania**

Jak wiadomo z poprzednich podrozdziałów, najpopularniejszymi rozwiązaniami technologicznymi w niewielkich zakładach przeróbki surowców skalnych, a zwłaszcza przeróbki odpadów pochodzących z przemysłu budowlanego, górniczego i drogownictwa, cieszą się instalacje mobilne i stacjonarne jedno- lub dwustadialne. O ile instalacje stacjonarne pracują w układach zamkniętych, to instalacje mobilne najczęściej pracują w układach otwartych przeważnie z jedną kruszarką, zazwyczaj szczękową, rzadziej stożkową lub listwową udarową. Takie rozwiązanie jest podyktowane przede wszystkim względami ekonomicznymi małej firmy, co odbija się negatywnie na jakości produktu. Owszem, na rynku istnieją instalacje mobilne umożliwiające zawrót materiału, jak chociażby maszyna typu Remax z kruszarką wirnikową udarową listwową lub stożkową firmy SBM MP (rys. 6.33), ale zakładów wyposażonych w tego typu instalacje jest niewiele.

Aby usprawnić proces technologiczny produkcji kruszyw w prostych instalacjach, można wyposażyć układ w dodatkowy przesiewacz z sitem szczelinowym i zawracać produkt podsitowy do ponownego rozdrabniania. Na rysunku 6.56 przedstawiono schemat zaprojektowanego przez autora niniejszej monografii takiego innowacyjnego układu do produkcji kruszyw o zwiększonej zawartości ziarn foremnych, zgłoszonego w UP (Gawenda 2014a) i dokładniej opisanego w podrozdziale 5.3.



**Rys. 6.56.** Koncepcja układu produkcji kruszyw z zamkniętym obiegiem selektywnego procesu posobnego przesiewania i rozdrabniania



Układ został tak zaplanowany, że przy zastosowaniu tylko jednej kruszarki (nawet pomimo jej wady polegającej na produkcji kruszyw z największą, dochodzącą do 30%, ilością ziarn nieforemnych w stosunku do innych kruszarek, których zawartość takich ziarn podano w tabeli 6.4) można uzyskać finalne kruszywa z zawartością nie więcej niż 2–3% ziarn nieforemnych. Układ wymaga tylko zastosowania przesiewaczy wibracyjnych z sitami o oczkach kwadratowych nr 1 i szczelinowych nr 2 (rys. 6.56) 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 rozdrabniane w tej samej kruszarce lub na wtórnym stadium kruszenia udarem, np. w kubizerze, co wpłynęłoby jeszcze korzystniej na jakość produktu. Zawartość ziarn nieforemnych w produktach finalnych będzie zależeć od sprawności przesiewacza z sitem szczelinowym, a zwłaszcza od stosunku wielkości (rozmiaru) frakcji ziarnowej i szczeliny sita. Sito szczelinowe powinno mieć wymiar oczka równy połowie ziarna maksymalnego (zasada  $d_{\max}/2$ ). Ponieważ udział ziarn nieforemnych maleje wraz ze wzrostem wielkości klasy ziarnowej, o czym wspomniano w podrozdziale 6.2.2 (rys. 6.14, 6.22, tab. 6.4), to odsiewanie ziarn nieforemnych w grubszych klasach będzie łatwiejsze i skuteczniejsze. We wstępnych badaniach laboratoryjnych, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 6.56, przebadano najdrobniejszą klasę ziarnową (6,3–8 mm), aby zweryfikować słuszność idei i ustalić maksymalną zawartość ziarn nieforemnych, jakie mogłyby się pojawiać w produktach końcowych.

Materiał rozdrobniony w kruszarce szczękowej typu L44.41 został rozklasyfikowany na przesiewaczu wibracyjnym dwupokładowym, tak żeby można było wydzielić wąską klasę ziarnową 6,3–8 mm. Klasa ta zawierała około 76% ziarn foremnych i 24% ziarn nieforemnych. W kombinacji układu posobnego przesiewaczy z sitami o oczkach kwadratowych i szczelinowych zastosowano cztery rodzaje następujących sit szczelinowych (rys. 5.18) w celu określenia na nich efektywności odsiewania ziarn nieforemnych (tab. 6.28):

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

W wyniku przesiewania klasy 6,3–8 mm (tab. 6.28) zawartość wychodu ziarn foremnych (tzw. czystość odsiewu korzystnych ziarn) podniesiono z 76,1% do 97,2%, co oznacza, że w produkcie końcowym klasa ta będzie zawierać zamiast około 24%, tylko 2,8% ziarn nieforemnych, przy skuteczności przesiewania (według Hancocka) 92,5%. Uzysk ziarn nieforemnych odnotowany na poziomie 7,4% również jest najniższy (im bliższy zeru, 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 ziarn nieforemnych uzyskano dla sita poliuretanowego z oczkami poprzecznie ukształtowanymi, gdyż w produkcie końcowym w klasie 6,3–8 mm pozostaje około 18% ziarn nieforemnych.

**Tabela 6.28**

Rozkład zawartości ziarn foremnych (ZF) i nieforemnych (ZN) w klasie ziarnowej 6,3–8 mm w zależności od rodzaju sita szczelinowego przedstawionego na rysunku 5.18

Rodzaj sita	Wychód [%]		Wychód [%]				Zawartość w produkcie końcowym [%]		Uzysk [%]	Skuteczność [%]
	$\gamma_g$	$\gamma_d$	$\frac{\gamma_g}{ZF}$	$\frac{\gamma_d}{ZF}$	$\frac{\gamma_g}{ZN}$	$\frac{\gamma_d}{ZN}$	ZF Pk	ZN Pk	$\epsilon_{ZN}$	$SH_{ZN}$
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

Zgodnie z ideą produkcji kruszyw o podwyższonej zawartości ziarn foremnych w układzie z zamkniętym obiegiem selektywnego procesu posobnego przesiewania i rozdrabniania, możliwe jest obniżenie zawartości ziarn nieforemnych z kilkudziesięciu procent do co najmniej 2–3% w każdej klasie ziarnowej. 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. Połączeniu 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 6.26 dla zbliżonej klasy ziarnowej 5–10 mm zawartość ziarn nieforemnych wyniosła 15%, warto zauważyć, że uzyskane wyniki są ponad pięciokrotnie wyższe. Również w układzie do produkcji kruszyw bazaltowych (rys. 6.22) w kubizerze Dragon na trzecim stadium rozdrabniania w klasie 5–8 mm uzyskano 13% ZN, a w granuladorach stożkowych typu H3000 i H4000 Svedala na trzecim i czwartym stadium aż 23% ZN, a więc wartości te są ponad ośmiokrotnie większe.

Skuteczność odsiewu zależeć będzie od rodzaju sit szczelinowych i wielkości szczelin w stosunku do wielkości 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 trzech do czterech, na pewno mniej będzie krążyć ziarn 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 do około 1 kWh/Mg rozdrabnianego kruszywa oraz koszty zużycia elementów roboczych kruszarek wynoszących od około 0,2–0,5 zł/Mg. Natomiast koszty związane z eksploatacją dodatkowego przesiewacza są niewielkie i będą wynosić

około 15–35 zł/1000 Mg przesiewanego kruszywa w zależności od rodzaju przesiewacza i użytych sit (dane przyjęte na podstawie zrealizowanych badań przemysłowych i ekspertyz). W najbliższym czasie planuje się prowadzenie badań w tym zakresie, łącznie z wykorzystaniem sit szczelinowych koralowych w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych.

Należy podkreślić, że zaletą omawianego układu poza oszczędnościami energetycznymi jest możliwość selektywnego wydzielania dowolnych klas ziarnowych oraz ziarn foremnych i nieforemnych w tych klasach, bez zbytecznego ich przekruszania, co niestety ma miejsce w tradycyjnych wielostadialnych układach. 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 i zminimalizowanie ryzyka ich nadmiernego rozdrobnienia.

## **6.5. Ocena wpływu doboru kruszarek w różnych stadiach rozdrabniania na jakość kruszyw łamanych**

Dobór maszyn rozdrabniających i układów technologicznych jest bardzo istotny przy optymalizacji produkcji kruszyw zarówno w nowo projektowanych zakładach przeróbki, jak i w już funkcjonujących. Istotne jest wówczas, czy kruszarka pracująca na pierwszym stadium może mieć wpływ na końcowe efekty procesu, skoro po niej będą pracować kolejne kruszarki, ile takich stadiów rozdrabniania i klasyfikacji powinno być oraz czy uziarnienie produktu po pierwszym stadium rozdrabniania i klasyfikacji będzie miało wpływ na pracę kruszarki na kolejnym stadium. Podrozdziały 6.5 i 6.6. omawiają te zagadnienia, odwołując się do autorskich badań i doświadczeń zebranych na podstawie wieloletnich praktyk.

W ramach realizowanego projektu „Fabryka Inżynierów”<sup>1</sup> zostały przeprowadzone badania (według planu i schematu zaprezentowanego na rysunku 6.57) w austriackiej firmie SBM Mineral Processing GmbH w Laakirchen oraz w zakładzie przeróbki łamanych kruszyw żwirowych w kopalni Viecht znajdującej się w Ohlsdorf, będącej własnością korporacji Asamer. Podjęte badania dotyczyły ustalenia wpływu różnego rodzaju kruszarek znajdujących się w różnych stadiach rozdrabniania układów technologicznych na efekty końcowe procesu, w tym na jakość produktów rozdrabniania. Porównaniu podlegały następujące układy kruszenia (rys. 6.57):

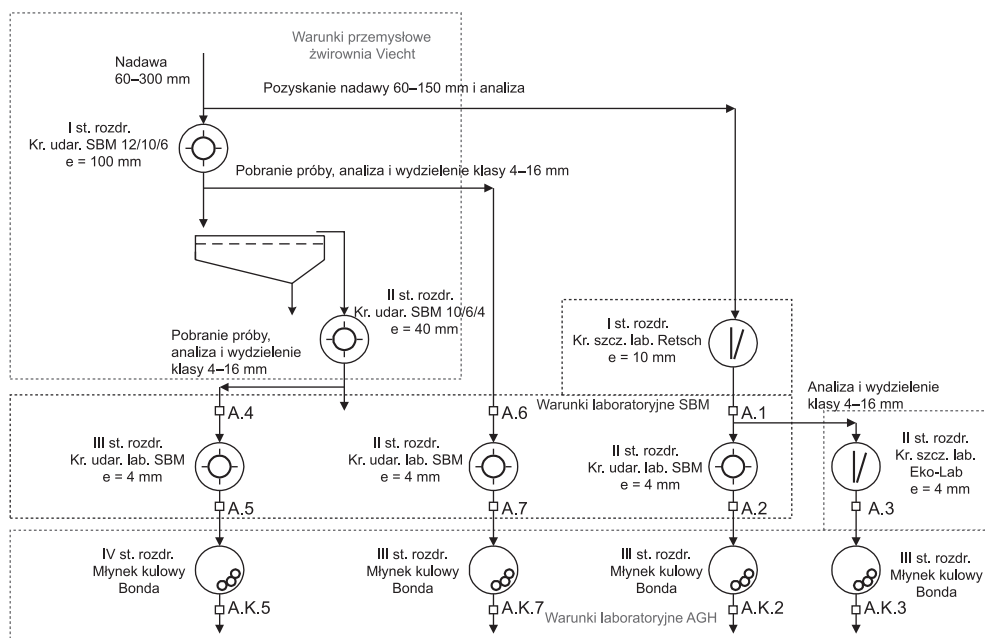
- trójstadialny wyposażony w kruszarki udarowe,
- dwustadialny wyposażony w kruszarki udarowe,
- dwustadialny wyposażony w kruszarkę szczękową oraz udarową,
- dwustadialny wyposażony w kruszarki szczękowe.

---

<sup>1</sup> Projekt „Fabryka Inżynierów” realizowany przez Akademię Górniczo-Hutniczą im. S. Staszica w Krakowie współfinansowany był ze środków Unii Europejskiej, z Europejskiego Funduszu Społecznego, w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki. Priorytet IV Szkolnictwo wyższe i nauka. Działanie 4.1 Wzmocnienie i rozwój potencjału dydaktycznego uczelni oraz zwiększenie liczby absolwentów kierunków o kluczowym znaczeniu dla gospodarki opartej na wiedzy. Poddziałanie 4.1.1. Wzmocnienie potencjału dydaktycznego uczelni.

Pobrane próbki pochodziły bezpośrednio ze złoża jako nadawa do procesu technologicznego produkcji kruszyw oraz z procesu technologicznego z kruszarek udarowych listwowych produkcji SBM MP. W pierwszym stadium rozdrabniania pracowała kruszarka udarowa listwowa typu 12/10/6 z sześcioma listwami udarowymi i szczelinie wylotowej 100 mm; w drugim stadium rozdrabniania – kruszarka udarowa listwowa typu 10/6/4 z czterema listwami udarowymi i szczelinie wylotowej 40 mm.

Dla poszczególnych materiałów wykonano analizy granulometryczne, oznaczono zawartości ziarn nieforemnych w klasie 5–25 mm, a po wydzieleniu reprezentatywnych prób klasy 4–16 mm przeprowadzono rozdrabnianie w kruszarce udarowej laboratoryjnej produkcji SBM (rys. 6.1 i 6.2). Wykorzystanie takiej unikatowej kruszarki udarowej umożliwiającej rejestrowanie parametrów pracy pozwoliło ocenić wpływ kruszarek użytych we wcześniejszych stadiach kruszenia na efektywność pracy tej kruszarki w ostatnim stadium kruszenia.



Rys. 6.57. Schemat przeprowadzonych badań (Gawenda 2013c)

Każdy z wymienionych układów kruszenia został zakończony stadium mielenia w laboratorium AGH, w którym wykorzystano młynek kulowy Bonda. Do oceny efektów rozdrabniania po wstępnym i średnich stadiach kruszenia wykorzystano wskaźniki zawartości ziarn nieforemnych (wskaźnik płaskości), udział pyłów <1 mm w produktach, stopnie rozdrobnienia oraz zużycie energii, natomiast do oceny efektów rozdrabniania w ostatnim stadium rozdrabniania zastosowano wskaźnik udziału pyłu <1 mm uzyskanego w przypadku mielenia kruszywa w młynku Bonda po jego stu obrotach. Szczegółowe analizy badań zostały opublikowane w artykule (Gawenda 2013c).

Zauważono, że w wyniku wielostadialnego rozdrabniania uzyskuje się mniejszą zawartość ziarn nieforemnych, których udział świadczy o lepszej jakości kruszyw (układ trójstadialny z kruszarkami udarowymi, według schematu przedstawionego na rysunku 6.57). Najgorszą jakość kruszyw uzyskano w kruszarce szczękowej na pierwszym stadium rozdrabniania, zawartość ziarn nieforemnych wyniosła ponad 26%. Wartość ta po rozdrobnieniu w kruszarce udarowej zmalała do 5,5% (tab. 6.29), co świadczy o dużym wpływie elementarnego działania kruszącego, jakim jest udar, oraz o jego dominacji nad ściskaniem w zakresie drobnego rozdrabniania (układ dwustadialny wyposażony w kruszarkę szczękową oraz udarową, według schematu przedstawionego na rysunku 6.57).

**Tabela 6.29**

Zestawienie efektów rozdrabniania dla produktów uzyskanych w kruszarce laboratoryjnej udarowej SBM (Gawenda 2013c)

Parametry	Nazwa próbki		
	próbka A2, rozdrabniana w kr. szczękowej Retsch – I st., udarowej lab. – II st.	próbka A5, rozdrabniana w kr. udarowej 12/10/6 – I st., kr. udarowej 10/6/4 – II st., udarowej lab. – III st.	próbka A7, rozdrabniana w kr. udarowej 12/10/6 – I st. udarowej lab. – II st.
Prędkość wirnika [m/s]	32,99	32,99	32,99
Wydajność [Mg/h]	1,24	1,22	1,22
Pobór mocy netto [kW]	1,14	1,13	1,08
Zużycie energii [kWh/Mg]	0,92	0,93	0,88
Jednostkowe zużycie energii $W_j = (\text{kWh/Mg})/S_{80}$	0,46	0,42	0,38
Stopień rozdr. $S_{80}$	2,0	2,2	2,3
Zawartość ZN przed rozdr. $K$ [%]	26,4	5,7	8,6
Zawartość ZN po rozdr. $K$ [%]	5,5	4,3	4,6
Zawartość pyłów <1 mm [%]	24,2	22,4	23,3

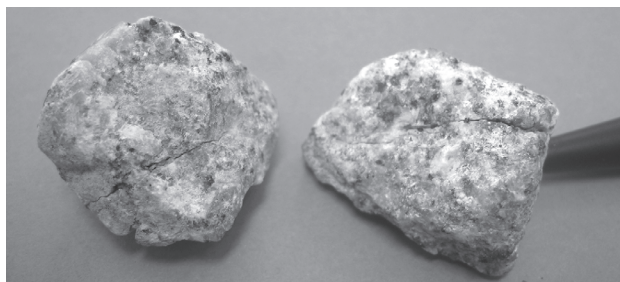
Podczas wykonywanych testów rozdrabniania w kruszarce udarowej laboratoryjnej SBM rejestrowano licznikiem czas rozdrabniania, prędkość obrotową wirnika, wydajność i pobór mocy w celu porównania wpływu oddziaływania kruszarek we wcześniejszych stadiach kruszenia na proces kruszenia w ostatnim stadium kruszenia. Uzyskane wyniki zestawiono w tabeli 6.29. Okazuje się, że w układzie trójstadialnym kruszenie surowca rozdrabnianego wcześniej w dwóch kruszarkach udarowych wymaga zużycia większej ilości energii (tj. 0,93 kWh/Mg,  $W_j = 0,42$  kWh/Mg) przez kruszarkę testową udarową SBM w porównaniu z układem dwustadialnym, w którym wcześniej rozdrabniany był materiał tylko w jednej kruszarce udarowej oraz odsiewany. Tu zużycie energii było najniższe i wyniosło 0,88 kWh/Mg,  $W_j = 0,38$  kWh/Mg.

Rozdrabnianie materiału w układzie dwustadialnym z kruszarką szczękową wymaga najwyższego zużycia energii jednostkowej (tj. 0,92 kWh/Mg,  $W_j = 0,46$  kWh/Mg). Warto podkreślić, że wartość zużycia energii dla kruszarki odczytana z licznika nie uwzględnia stopnia rozdrobnienia (charakterystyki nadawy i produktów), co może być przyczyną fałszywej interpretacji analizowanych wyników. Dlatego wprowadzony wskaźnik  $W_j$  określa dla każdej próby miarodajne zużycie energii wyrażone w kilowatogodzinach na megagram dla jednokrotnie rozdrobnionego 80-procentowego ziarna.

Badania podatności przemiałowej w młynku kulowym Bonda wykazały, że największym przyrostem klasy drobnej <1 mm wynoszącym 9,6% w procesie przemiału odznaczało się kruszywo wyprodukowane w samych kruszarkach szczękowych (układ dwustadialny według schematu przedstawionego na rysunku 6.57). Przyczyną tego zjawiska jest zwiększona zawartość ziarn nieforemnych w tych kruszywach oraz występujące osłabienia ziarn w postaci mikro- lub makropęknięć powstałe na skutek elementarnej siły zgniatającej ziarna pomiędzy szczękami kruszarki pracującymi w sposób cykliczny.

W przypadku uderzenia materiału rozdrabnianego przez elementy wirujące maszyny powstają fale podłużne rozchodzące się z prędkością nawet 5000 m/s i fale poprzeczne przemieszczające się z trzykrotnie mniejszą prędkością. Drgania wewnętrzne materiału powodują propagację pęknięć i szczelin z prędkością powiększania się defektów struktury wynoszącą 50–60% prędkości fal poprzecznych (tj. około 800–1000 m/s) (Lewicki i in. 2012). W stosunku do prędkości elementów roboczych maszyn rozdrabniających, która dla kruszarek udarowych wynosi do 70 m/s, prędkość propagacji defektorów jest bardzo duża. Mimo że czas pomiędzy kolejnymi uderzeniami jest relatywnie długi i wystarczający do zanikania fal podłużnych i poprzecznych, to wielokrotność cykli uderzenia w stosunku do kruszarek zgniatających (szczękowa, walcowa, stożkowa) jest wystarczająca, aby uzyskać bardzo szybki rozpad skały wzdłuż propagacji defektów. Dlatego kruszywa rozdrobnione za pomocą udaru odznaczają się mniejszą liczbą nabytych pęknięć w procesie rozdrabniania.

Układ odsiewający surowiec przed wstępnym stadium kruszenia, rozdrabniający materiał tylko w kruszarkach szczękowych (bez rozdrabniania w kruszarce udarowej), będzie przyczyniać się do produkcji kruszyw o niskiej jakości. Przykładem są ziarna kruszywa granitowego (rys. 6.58), których pęknięcia są widoczne gołym okiem. Kruszywo to produkowane było w warunkach przemysłowych w granulatorze szczękowym pracującym na końcowym stadium rozdrabniania, co potwierdza niekorzystny wpływ tej kruszarki na cały układ produkcji kruszyw.



**Rys. 6.58.** Pęknięte ziarna kruszywa granitowego uzyskane w kruszarce szczękowej (Gawenda 2013c)



Jak wiadomo, produkcja takich kruszyw gruboziarnistych dla budownictwa czy drogownictwa jest niepożądana, ale łącząc w układzie kruszarki szczękowe z innymi maszynami, np. wysokociśnieniowymi prasami walcowymi (HPGR), można taki układ wykorzystać do przygotowania półproduktów do procesu mielenia przy produkcji kruszyw bardzo drobnych (mączek) (Gawenda, Saramak 2010; Naziemiec i in. 2010c; Saramak 2011a, b).

Podsumowując, należy stwierdzić, że uzyskanie lepszej jakości kruszyw jest możliwe dzięki stosowaniu układów wielostadialnych. Duża liczba stadiów rozdrabniania surowca powoduje, że w kolejnych stadiach staje się on odporniejszy na kruszenie i wymaga zwiększenia zużycia energii w celu doprowadzenia do wymaganego uziarnienia. Świadczy o tym fakt, że kruszywa otrzymane w wyniku wielostadialnego rozdrabniania selektywnego odznaczają się większą wytrzymałością. Najkorzystniejsze są tu kruszarki udarowe.

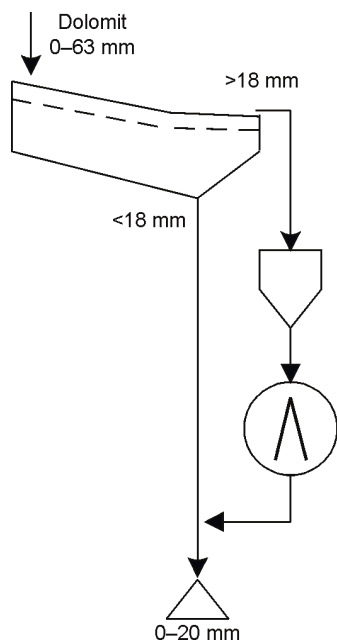
Przedstawione badania dotyczące oceny efektów rozdrabniania surowców skalnych w różnych kruszarkach i stadiach kruszenia pokazują metodykę oraz podstawowe zasady doboru optymalnej pracy układów produkcji kruszyw dla budownictwa, drogownictwa oraz przemysłu cementowo-wapienniczego, a także w przygotowaniu rud do procesu wzbogacania przez kruszenie i mielenie. Wskaźniki jakościowe mogą posłużyć w kontroli, modelowaniu i optymalizacji procesów rozdrabniania przeróbki różnych surowców (Trybalski, Krawczykowski 2006).

## **6.6. Błędy popełniane w doborze maszyn oraz ich eksploatacji**

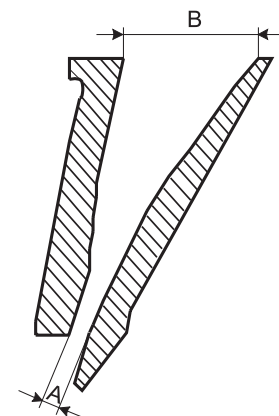
### **6.6.1. Niewłaściwa nadawa i parametry pracy urządzeń**

W badaniach przemysłowych dotyczących analizy współpracy przesiewacza wibracyjnego z kruszarką stożkową typu HP700 w układzie otwartym, zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 6.59, poszukiwano przyczyny nieprawidłowej pracy urządzeń, w wyniku której uzyskiwane kruszywo dolomitowe przekraczało wymagane uziarnienie 20 mm. Ograniczenia panujące w zakładzie przerobczym nie pozwalały na przebudowę układu z zawrotem materiału, co umożliwiłoby kontrolę produktu, który charakteryzował się zmiennym zakresem uziarnienia dochodzącym nawet do 40 mm. Analiza układu obejmowała określenie składów ziarnowych nadawy do procesu przesiewania oraz wszystkich produktów, a także weryfikację efektywności pracy układu przesiewania i rozdrabniania (skuteczność i wydajność) w zależności od parametrów pracy urządzeń, zgodnie z dopuszczeniami zawartymi w dokumentacji techniczno-rozruchowej (DTR).

Kruszarki stożkowe Nordberg HP (High Performance) charakteryzują się odpowiednio dobranymi wielkościami prędkości obrotowej głowicy, skoku i rozwiązaniami przestrzeni komory kruszenia. Kruszarki tego typu pełnią rolę granulatorów stożkowych pracujących na ostatnich stadiach kruszenia, służących do poprawy zawartości ziarn foremnych w kruszywach. O kształcie granuli kruszywa decyduje ukształtowanie krótkiej komory roboczej kruszarki tworzącej przestrzeń u wylotu w jej dolnej części pomiędzy „prawie” równoległymi płaszczyznami stożków. Jest to typowa budowa dla wszystkich granulatorów stożkowych oferowanych przez różnych producentów (rys. 6.60).



**Rys. 6.59.** Schemat rozdrabniania dolomitu w granulatorze stożkowym współpracującym z przesiewaczem



**Rys. 6.60.** Ukształtowanie stożków i przestrzeń komory wlotowej kruszarek serii HP

Kruszarki stożkowe wcześniej były produkowane w wersjach HP 200, 300, 500 i 700. Obecnie na rynku są oferowane w wersji HP 100, 200, 300, 400, 500 i 800. Podczas doboru takich kruszarek do instalacji produkcji kruszyw należy pamiętać, że (Metso Minerals 2008):

- minimalną nastawą szczeliny kruszarki jest szczelina, przy której kruszarka pracuje bez uderzania wykładzin o siebie; w zależności od wersji kruszarki nastawa minimalna może się zmieniać,
- wielkość otworu wlotowego B występuje przy najmniejszej nastawie szczeliny A (tab. 6.30, rys. 6.60),
- maksymalna wielkość brył nadawy waha się w granicach 80–100% wymiaru B w zależności od wielkości kruszarki i materiału.

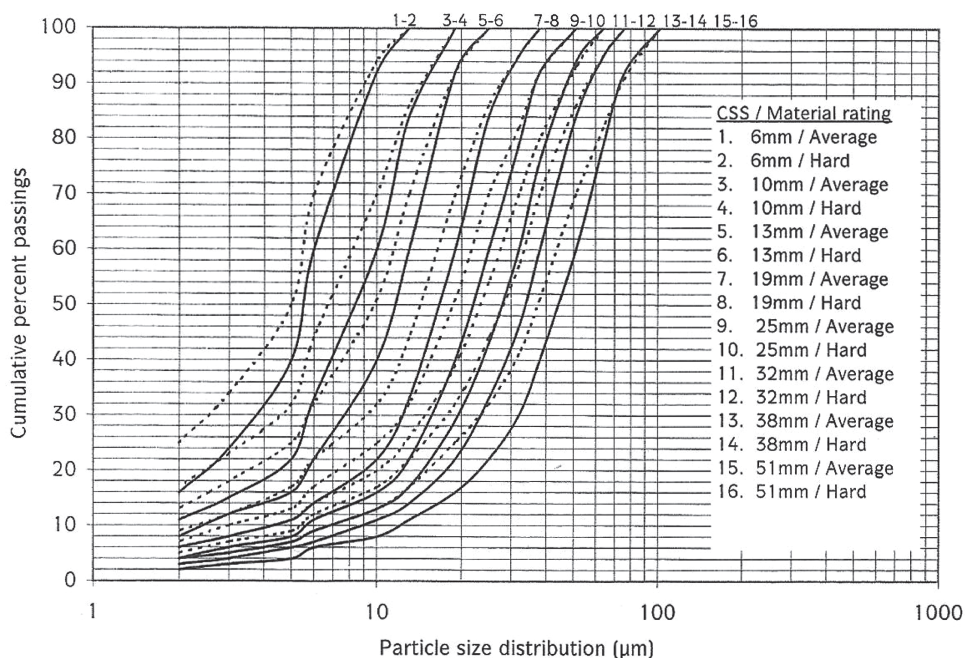
Wykresy uziarnienia produktów czy wydajności kruszarek stożkowych są tworzone jako narzędzie aplikacyjne służące do poprawnego wykorzystania możliwości kruszarek HP (rys. 6.61, tab. 6.31). Podane wydajności odnoszą się do materiału o gęstości nasypowej 1600 kg/m<sup>3</sup>. Kruszarka jest elementem całego układu technologicznego, dlatego jej wydajność zależy częściowo od odpowiedniego doboru i poprawnej pracy podajnika, przenośnika, przesiewaczy, konstrukcji nośnej, silników elektrycznych, napędów i zasobników.



**Tabela 6.30**

Parametry otworów wlotowych i wylotowych wybranych kruszarek stożkowych Nordberg HP (Metso Minerals 2008 i 2009)

Model kruszarki	Kruszenie	Komora			
		standardowa [mm]		z krótką głowicą [mm]	
		nastawa min. „A”	otwór wlotowy „B”	nastawa min. „A”	otwór wlotowy „B”
HP100	bardzo drobne	–	–	6	20
	drobne	–	–	9	50
	średnie	–	–	9	70
	grube	–	–	13	100
	bardzo grube	–	–	21	150
HP500	drobne	16	133	6	35
	średnie	20	204	8	40
	grube	25	286	10	57
	bardzo grube	30	335	13	95
HP800	drobne	16	219	5	33
	średnie	25	267	10	92
	grube	32	297	13	155
	bardzo grube	32	353	–	–



**Rys. 6.61.** Krzywe składu ziarnowego produktów dla kruszarek serii HP (DTR 1993)

**Tabela 6.31**

Wydajności kruszarek wyrażone w megagramach na godzinę w zależności od typu urządzenia i szczeliny wylotowej (Metso Minerals 2008)

Typ	Wielkość szczeliny wylotowej „A” przy wydajności kruszarki pracującej w obiegu otwartym									
	6 mm	10 mm	13 mm	16 mm	19 mm	22 mm	25 mm	32 mm	38 mm	51 mm
HP200	73-82	91-109	127-145	141-168	163-181	172-195	186-213	204-231	222-249	–
HP300	86-95	113-127	154-177	191-213	218-236	236-254	254-272	259-295	277-313	308-340
HP600	150-177	195-222	249-277	295-322	340-367	363-390	390-417	431-467	476-508	535-562
HP700	263-281	227-354	363-408	454-481	531-562	571-599	590-635	680-707	753-780	862-907

Należy pamiętać, że do najważniejszych czynników, które mogą obniżać wydajność, pogarszać niezawodność kruszarki, a także powodować nieodpowiednie uziarnienie produktów, należą (Metso Minerals 2008):

- niewłaściwy dobór przesiewacza w układzie zamkniętym lub otwartym przed kruszarką,
- brak równomiernego rozkładu nadawy na obwodzie komory kruszenia,
- zawartość zanieczyszczeń lepkich w nadawie kruszarki (ił, glina, ziemia itp.),
- udział frakcji drobnych w nadawie do kruszarki o granulacji mniejszej niż nastawa wielkości szczeliny wylotowej kruszarki w ilości przekraczającej 10% wydajności,
- zbyt duża wilgotność nadawy,
- segregacja materiału w komorze kruszarki ze względu na nierównomierny udział poszczególnych frakcji w nadawie,
- brak regulacji podawania nadawy,
- niewłaściwe wykorzystanie mocy zainstalowanej,
- nieodpowiednia wydajność przenośnika,
- nieodpowiedni obszar wylotowy pod kruszarką,
- ekstremalnie twarda i gęsta nadawa,
- praca kruszarki przy mniejszej niż zalecana prędkości wału pośredniego przy pełnym obciążeniu.

Zwiększony udział drobnych ziarn w nadawie kierowanej do kruszarki w warunkach przemysłowych bardzo często pojawia się w przypadku niewłaściwej pracy przesiewacza o zbyt niskiej skuteczności przesiewania. W tym celu dokonano analizy pracy przesiewacza.

Okazało się, że praca przesiewacza przed kruszarką była niewłaściwa, ponieważ miał on ograniczoną – zablokowaną powierzchnię sitową, nadawa zasilana była nierównomiernie, ponieważ kosz zsykowy był umieszczony w złym miejscu, a przerób surowca był zbyt duży w stosunku do jego maksymalnej możliwości technicznej na poziomie 700 Mg/h.

Niska sprawność przesiewacza (skuteczność procesu przesiewania według Hancocka) powodowała wysoką zawartość podziarna w produkcie górnym. Przy zbyt wysokiej wydajności (ok. 1000 Mg/h) nastąpił znaczny wzrost do 42% podziarna (tab. 6.32), dlatego należałoby unikać przesiewania przy wyższej wydajności niż umożliwia to przesiewacz. Na ostrość rozdziału wpływa wielkość przerobu przesiewacza. Im większa wydajność, tym mniej dokładny jest proces rozdziału. Zwykle w warunkach technicznych współczynnik  $k$ , nie przekracza 0,72, dlatego proces przesiewania przy wydajności 378 i 432 Mg/h można uznać za dość dokładny, najgorzej proces przebiegał przy największym przerobie.

Na rysunku 6.62 przedstawiono charakterystyki składu ziarnowego nadawy rozdrabnianej w kruszarce stożkowej zasilanej ze zbiornika buforowego oraz produktów uzyskanych po rozdrabnianiu. Na podstawie zebranych wyników obliczono dopuszczalne średnie wydajności pracy kruszarki w zależności od szczeliny wylotowej.

Następnie na podstawie zaleceń zawartych w katalogach DTR (1993, 2000) obliczono udział frakcji drobnych w nadawie o granulacji mniejszej niż nastawa kruszarki w ilości przekraczającej 10% wydajności. Wyniki zestawiono w tabeli 6.33, a przykładowy tok obliczeń wygląda następująco. Nadawa do kruszarki (próbka nr 25.09) (wysoki przerób o wydajności 580,5 Mg/h) zawierała 32% drobnych ziarn poniżej szczeliny wylotowej, która wynosiła

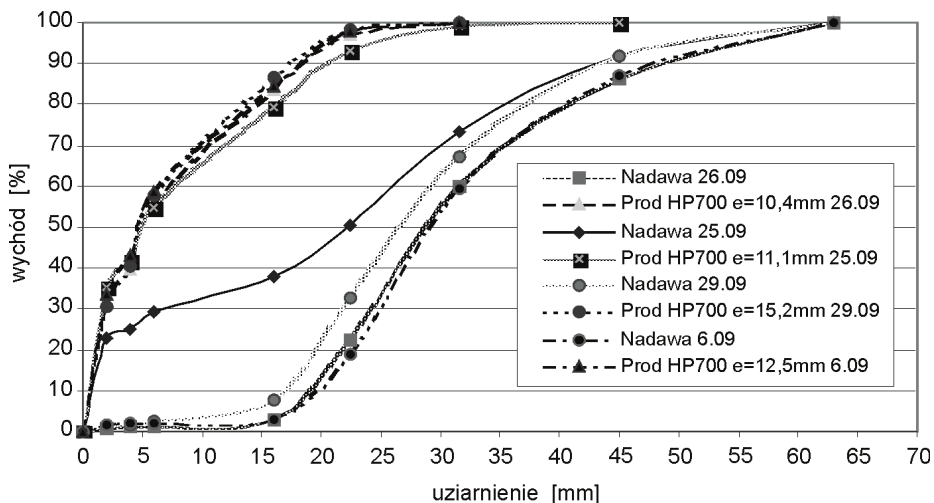
11,1 mm (rys. 6.62). Wiadomo, że ta kruszarka przy szczelinie wylotowej 11 mm może pracować z maksymalną wydajnością około 354 Mg/h (tab. 6.33). Zatem:

- $32\% \times 580,5 \text{ Mg/h} = 185,8 \text{ Mg/h}$  = masa ziarn drobnych w nadawie kierowanych do rozdrabniania (przerobu) w kruszarce w ciągu godziny,
- $354 \text{ Mg/h} \times 10\% = 35,4 \text{ Mg/h}$  = dopuszczalna zawartość ziarn drobnych w nadawie kierowanych do rozdrabniania (przerobu) w kruszarce w ciągu godziny,
- $185,8 \text{ Mg/h} / 35,4 \text{ Mg/h} = 5$  = wskaźnik przekroczenia, który mówi, że dopuszczalny udział ziarn drobnych w nadawie w przypadku kruszarki stożkowej został przekroczony pięciokrotnie.

**Tabela 6.32**

Zestawienie wyników z procesu przesiewania (Gawenda 2012c)

Przerób [Mg/h]	Wychód prod. dolnego $\gamma_d$ [%]	Udział podziarna $a_{gd}$ [%]	Ziarno podziałowe $d_{50}$ [mm]	Skuteczność $S_H$ [%]	Dokładność rozdziału $k_r$ [-]	Imperfekcja $I$ [-]	Ostrość rozdziału $E_p$ [mm]
378	73,4	15	21,5	89	0,75	0,14	3,0
432	84,4	17	21,8	85	0,73	0,15	3,3
443	78,0	15	20,3	88	0,71	0,17	3,4
704	75,5	16	18,0	85	0,63	0,23	4,2
984	62,9	42	18,5	72	0,54	0,28	5,1



**Rys. 6.62.** Krzywe składu ziarnowego nadawy do kruszarki stożkowej HP700 oraz uzyskanych produktów (Gawenda 2012a)

Warto również zwrócić uwagę (tab. 6.33) na opróbowania nr 25.09 i 26.09, które wykazały, iż kruszarka była zasilana nadawą ze znacznie większą wydajnością, niż umożliwiał jej na to przerób uzależniony nastawą szczeliny wylotowej. Wniosek nasuwa się taki, że szczelina wylotowa nie miała poziomu zadanego, lecz znacznie większy. A więc mógł to być efekt nadmiernego zużycia okładzin lub podnoszenia się stożka podczas pracy na skutek przeciążenia kruszarki (rozwieranie się szczeliny).

**Tabela 6.33**

Charakterystyka udziału ziarn drobnych w nadawie przy uwzględnieniu parametrów pracy kruszarki HP700 (Gawenda 2012a)

Nr opróbowania	Przerób [Mg/h]	Szczelina wylotowa [mm]	Dopuszczalna wydajność* [Mg/h]	Ilość frakcji drobnych** [Mg/h]	Krotność przekroczenia
6.09	328,3	12,5	360	9	0,3
25.09	580,5	11,1	354	186	5
26.09	554,4	10,4	350	11	0,3
29.09	434,3	15,2	454	26	0,6

\* dopuszczalna wydajność w zależności od szczeliny wylotowej,

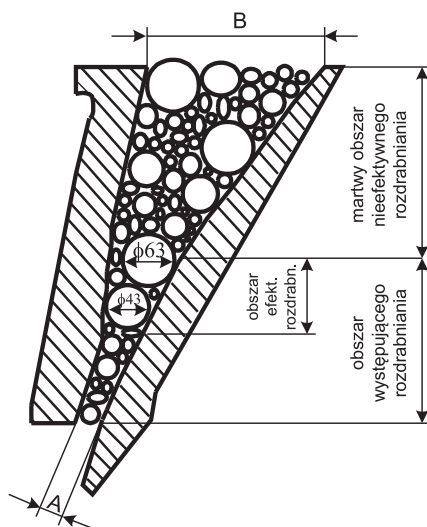
\*\* średnie udziały frakcji drobnych w nadawie o granulacji mniejszej niż nastawa szczeliny wylotowej kruszarki w ilości przekraczającej 10% wydajności

Na podstawie przeprowadzonych analiz opróbowań zaobserwowano zróżnicowane uziarnienie nadawy dochodzące do 10% dla ziarn grubych (powyżej 20 mm). Największym zróżnicowaniem odznaczała się nadawa (opróbowanie nr 25.09) pochodząca po przesiewaniu surowca przy największym obciążeniu przesiewacza, która miała 38% podziarna w produkcie górnym, tj. 30–35% drobnych ziarn więcej niż w pozostałe dni opróbowania. Skuteczność technologiczna procesu przesiewania według Hancocka była najniższa i wynosiła 72%. Udział ziarn drobnych praktycznie nie wpłynął na zwiększenie przyrostu ziarn najdrobniejszych podczas rozdrabniania w kruszarce, przeciwnie – zwiększona o 30–35% różnica drobnych ziarn w nadawie w stosunku do innych przerobów spowodowała utrudnienia procesu rozdrabniania. Należy zwrócić uwagę, że produkt nr 25.09 po przeróbce w kruszarce typu HP700 miał nieco więcej ziarn grubszych w klasie 6–31 mm. Potwierdziło to przypuszczenie, że ziarna drobne w nadawie nie tylko nie przyniosły większego przyrostu klas najdrobniejszych, lecz jeszcze utrudniły rozdrabnianie grubszych ziarn w kruszarce i spowodowały nadmierne zużycie stożków.

Zbyt duża ilość tak drobnych ziarn poniżej szczeliny wylotowej kruszarki przyczyniała się do powstawania łoża ziarnowego (tzw. poduszki), które rozpraszało siły zgniatające, w wyniku czego nie dochodziło do zgniatania, lecz nadmiernego wzajemnego ścierania się ziarn o siebie i płaszcze stożków. Duże ziarna otoczone drobnymi nie miały wystarczającego kontaktu z elementami roboczymi okładzin stożków.

Na rysunku 6.63 zaprezentowano szkic komory roboczej kruszarki stożkowej HP700, w której wówczas zachodził proces kruszenia surowca. Ponieważ ziarno maksymalne nadawy

dochodziło do średnicy 63 mm, udział najgrubszej klasy ziarnowej 45–63 mm dochodził do około 15%, a komora robocza kruszarki była zaprojektowana na maksymalne uziarnienie 160–180 mm przy szczelinie wylotowej 15 mm (tab. 6.31), to w górnej przestrzeni gardzieli kruszarki występował martwy obszar nieefektywnego rozdrabniania. W tej strefie ziarna oddziaływały na siebie, a najdrobniejsze tworzyły między większymi ziarnami poduszkę uniemożliwiającą efektywne zgniatanie, a pozwalającą na swobodne przemieszczanie się ziarn w tej części gardzieli. Zamiast najefektywniejszego zgniatania dochodziło tylko do mieszania i ścierania się ziarn. W środkowej części przestrzeni roboczej kruszarki występowała strefa najefektywniejszego rozdrabniania, ale niestety był to najkrótszy odcinek tego obszaru, którego długość wynosiła zaledwie 17% całej długości komory.



**Rys. 6.63.** Model przemieszczania się nadawy w komorze roboczej kruszarki stożkowej HP700 (Gawenda 2012a)

Mając na uwadze, że nadawę do rozdrabniania stanowiły ziarna, z których średnio około 35% należało do klasy 31,5–63 mm, a resztę stanowiły ziarna drobniejsze, łatwo można dowieść, że strefa, w której występowało efektywne rozdrabnianie, stanowiła tylko 48% całości przestrzeni roboczej pomiędzy okładzinami kruszarki. Zatem dla przebiegu procesu rozdrabniania podawanej nadawy nie musiałaby istnieć ponad połowa długości górnej gardzieli kruszarki, przy założeniu, że kruszarka miałaby pracować przy szczelinie wylotowej 15 mm.

Ponadto należy również podkreślić, że zbyt duża ilość podziarna pochodząca z niewłaściwego przesiewania oraz ścierania się w górnej części martwego obszaru przestrzeni roboczej powodowała utworzenie się w środkowej części komory warstwy zbitego materiału utrudniającej sprawne przedostawanie się najdrobniejszych cząstek ziarn w głąb dolnej części komory roboczej kruszarki. Taki efekt powodował największe zużycie właśnie

tej środkowej części komory roboczej, a powstający w niej klin zwartego surowca wywierał krytyczne naciski na stożki, rozwierając je tak jak niepożądany złom metalowy.

Rozważając ten problem, należy stwierdzić, że wielkość maksymalnego ziarna produktu rozdrabniania nie jest determinowana wielkością uziarnienia nadawy, ale wielkością szczeliny, dlatego należy podkreślić, że niedopasowana nadawa (trzykrotnie mniejsza od założonej konstrukcyjnie dla kruszarki przy szczelinie 15 mm) będzie powodować nierównomierne obciążenie płaszczy stożków i niewłaściwą eksploatację granulatora stożkowego.

Na istotność zasilania kruszarki stożkowej materiałem zawierającym dużą ilość ziarn drobniejszych od wielkości szczeliny wylotowej wskazują prace prowadzone aktualnie w firmie Sandvik, będącej potentatem w produkcji kruszarek. Najnowsze komory kruszenia kruszarek stożkowych są tak zaprojektowane, aby możliwy był jak najszybszy przepływ materiału drobnego, a tym samym, aby ograniczone zostało nadmierne ścierające działanie materiału drobnego znajdującego się w komorze.

Analizując składy ziarnowe produktów przedstawionych na rysunku 6.61, stwierdzono, że wychód ziarn powyżej 10 mm będzie zawsze wynosił 30–40% (tab. 6.34). Kruszarka przy szczelinie 13 mm będzie dawała ponad połowę wychodu ziarn większych od 10 mm i ziarna maksymalne do 25 mm.

**Tabela 6.34**

Udziały ziarn powyżej 10 mm w produktach rozdrabniania w zależności od szczeliny wylotowej według producenta kruszarki (DTR 1993)

Szczelina wylotowa [mm]	Udział ziarn >10 mm [%]
6	6–8
8	około 20
10	30–40
13	50–60

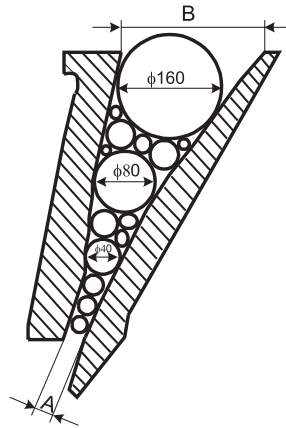
Prawidłowy proces rozdrabniania jest definiowany prostą zależnością pomiędzy wielkością szczeliny wylotowej a stopniem rozdrobnienia: im mniejsza szczelina wylotowa, tym większy stopień rozdrobnienia. W przeanalizowanych próbach ustalono brak korelacji pomiędzy wielkością szczeliny wylotowej a stopniem rozdrobnienia, co świadczyło o wysokiej zmienności uziarnienia nadawy albo braku możliwości dotrzymania prawidłowej wielkości szczeliny wylotowej kruszarki. W tego typu kruszarkach stożkowych 90-procentowy stopień rozdrobnienia powinien dochodzić do 5, w przeanalizowanych próbach kruszarka osiągała średnio połowę tej wartości (tab. 6.35).

Na rysunku 6.64 zaprezentowano szkic komory roboczej kruszarki stożkowej HP700, w której pokazano prawidłowy sposób przemieszczania się ziarn nadawy podczas rozdrabniania. Podczas procesu występuje optymalne rozdrabnianie ziarn na długości całej przestrzeni roboczej, w której występują oddziaływania sił kruszących takie jak zgniatanie i ścieranie. Proces grupowego rozdrabniania ziarn, czyli międzyziarnowego oddziaływania ziarn na siebie, jest w ten sposób minimalizowany i przynosi największe korzyści.

**Tabela 6.35**

Stopnie rozdrobnienia uzyskane dla kruszarki HP700 (Gawenda 2012a)

Nr opróbowania	Stopień rozdrobnienia		Szczelina wylotowa $e$ [mm]
	$S_{90}$	$S_{50}$	
6.09	2,6	6,0	12,5
25.09	2,1	4,6	11,1
26.09	2,7	5,9	10,4
29.09	2,5	5,5	15,2



**Rys. 6.64.** Model przemieszczania się maksymalnego ziarna w komorze roboczej kruszarki stożkowej HP700 przy założonej szczeliny wylotowej 15 mm (Gawenda 2012a)

Na podstawie badań wykazano, że optymalna praca kruszarki stożkowej będzie zależec przede wszystkim od udziału i wielkości uziarnienia nadawy, która musi być dostosowana do wielkości komory wlotowej i wylotowej kruszarki. Wzrost uziarnienia nadawy (ziarn grubych) w gardzieli kruszarki i jej równierne rozłożenie na całej długości stożków ułatwia przejście ziarn drobnych w dolne obszary gardzieli, w efekcie przyspieszając opuszczenie przez nie komory roboczej, co ograniczy tworzenie się poduszki ziarn drobnych – klina rozwierającego stożki. Grubsza nadawa zmniejszy stopień upakowania (zagęszczenia) materiału w gardzieli kruszarki i na całej długości przestrzeni roboczej będzie dominować zginiatanie nad ścieraniem.

Przykładowo, dla wielkości szczeliny wylotowej w kruszarce wynoszącej 10 mm zalecono zwiększenie maksymalnego uziarnienia nadawy do 91 mm (tab. 6.36). Wtedy wydajność kruszarki przy szczelini 10 mm nie powinna być większa niż około 390 Mg/h.

Nawiązując do wcześniejszych rozważań, wykazano, że zawartość frakcji drobnych w nadawie do kruszarki o granulacji mniejszej niż nastawa szczeliny wylotowej nie powinna być większa od 10% jej wydajności. Należałoby więc zadbać o prawidłowy proces przesiewania, czyli przygotowania nadawy do kruszarki, gdyż najgorszy wpływ ma zbyt duży udział ziarn drobnych.



**Tabela 6.36**

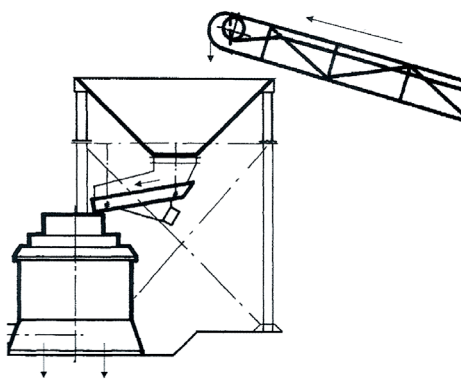
Charakterystyka parametrów warunkujących poprawną pracę kruszarki HP700 (Gawenda 2012a)

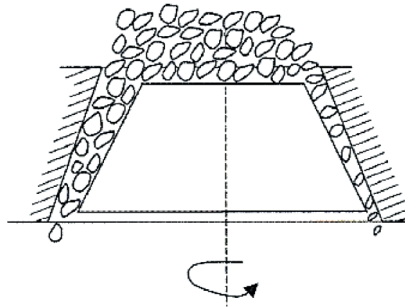
Szczelina wylotowa [mm]	Dopuszczalna wydajność [Mg/h]	Maksymalne ziarno nadawy [mm]	Maksymalne ziarno produktu [mm]
5	381	38	16
10	390	91	19
13	450	153	23

### 6.6.2. Nieodpowiednie zasilanie nadawą i odbiór produktu

Poza niewłaściwym uziarnieniem nadawy, na efektywność pracy w kruszarce może negatywnie wpływać wiele innych czynników, na które należy zwracać uwagę podczas eksploatacji kruszarki. Najważniejsze jest, aby urządzenie było odpowiednio zasilane. Skuteczny sposób zasilania nadawą granulatora stożkowego pokazano na rysunku 6.65, gdzie surowiec do rozdrabniania dostarczany jest za pomocą dozownika wibracyjnego, umożliwiającego płynną regulację wydajności. Gwarantuje to optymalny przebieg procesu rozdrabniania w komorze kruszarki, ze względu na płynne utrzymanie stałego i pełnego stopnia wypełnienia komory kruszarki (rys. 6.66). Jeżeli zasilanie kruszarki nadawą odbywa się z większej wysokości, to materiał nie niszczy (nie ściera) okładziny stożka oraz, spadając centralnie, jest rozsypywany symetrycznie na obwodzie komory roboczej.

Także w przypadku zasilania kruszarek udarowych wirnikowych ważne jest centralne i równomierne zasilanie materiałem kruszarki. Niestety czasami można spotkać eksploatowaną kruszarkę bez kosza zasypowego, gdzie materiał podawany jest bezpośrednio z taśmociągu (rys. 6.67) lub z taśmociągu do kosza, ale z bocznym doprowadzeniem (rys. 6.68). Takie rozwiązania powodują nierównomierną oraz niecentralną dystrybucję materiału na elementy robocze kruszarki, w wyniku czego następuje boczne zużycie listew osadzonych na wirniku.

**Rys. 6.65.** Zasilanie kruszarki nadawą (Wodziński 2009)



**Rys. 6.66.** Prawidłowe wypełnienie komory kruszarki stożkowej (Wodziński 2009)



**Rys. 6.67.** Brak kosza zasypowego w kruszarce wimnikowej (Löwe 2010)



**Rys. 6.68.** Boczne (nierównomierne) zasilanie kosza zasypowego (Löwe 2010)



**Rys. 6.69.** Brak prawidłowego połączenia rynny odprowadzającej produkt z taśmociągami (Löwe 2010)



**Rys. 6.70.** Zablokowana kruszarka i rynna odprowadzająca produkt (Löwe 2010)

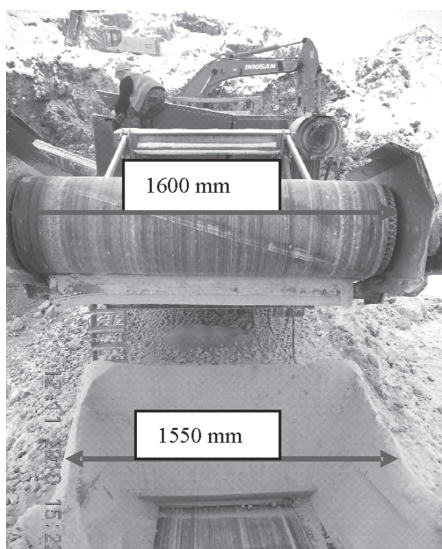
Z kolei brak prawidłowego połączenia rynny odprowadzającej skruszony produkt z taśmociągiem, jak pokazano na rysunku 6.69, w jednym zakładzie przerobczym doprowadził do zablokowania komory roboczej w kruszarce rewersyjnej udarowej (rys. 6.70). W takim przypadku z rynny zsuwającej produkt powinien trafiać do skrzyni zamontowanej na taśmociągu. Bardzo ważny jest także kierunek odprowadzania produktu spod kruszarki wirnikowej horizontalnej. Jeśli taśmociąg umiejscowiony jest pod kruszarką i pracuje wzdłużnie, to kierunek transportu produktu powinien być zgodny z kierunkiem obrotu wirnika.

Kolejny problem nieodpowiedniego zasilania nadawą i odbioru produktów może wynikać z niewłaściwie dobranych urządzeń. Taki przypadek odnotowano w kopalni kruszyw wapiennych, gdzie kruszywo trafiające z kruszarki do kosza zasypowo-podającego w przesiewaczu powodowało przeciążanie taśmociągu, a w następstwie automatyczne blokowanie taśmociągu w tym koszu oraz zbyt szybkie przecieranie się taśmy.

Podczas eksploatacji współpracujących obu mobilnych maszyn w miejscach przesypu kruszywa część drobnego materiału nie trafiała bezpośrednio do kosza, lecz spadała na jego krawędzie i poza obrys kosza (rys. 6.71). Zjawisko to również negatywnie wpływało na układanie się stosu materiału na taśmie, ponieważ znaczna część kruszywa uderzała w boczne ściany kosza oraz gumowe listwy uszczelniające i jednocześnie zalegając na nich, obniżała prędkość transportową. Ponadto taśma podająca kruszywo z kruszarki do kosza miała szerokość 1600 mm, a kosz zasypowy 1550 mm (rys. 6.72). Prędkość taśmociągu kruszarki wynosząca 1,33 m/s była na tyle duża, że trajektoria lotu kamienia wyrzuconego z części bocznej taśmy mogła wykraczać poza ściany boczne kosza zwłaszcza przy niewielkim niewspółosiowym ustawieniu obu zestawów i drgań instalacji.



**Rys. 6.71.** Gromadzenie się drobnego kruszywa w miejscu przesypu z taśmociągu kruszarki do kosza zasypowego przesiewacza (fot. T. Gawenda)

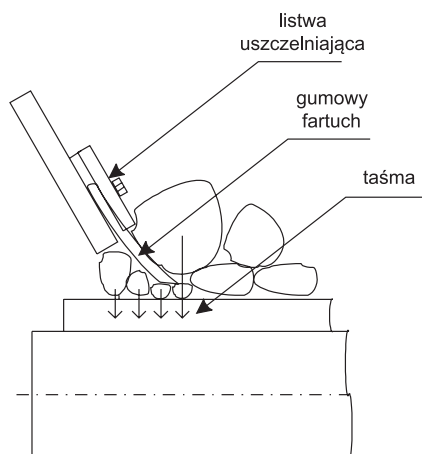


**Rys. 6.72.** Widok taśmociągu kruszarki i kosza zasypowego przesiewacza (fot. T. Gawenda)

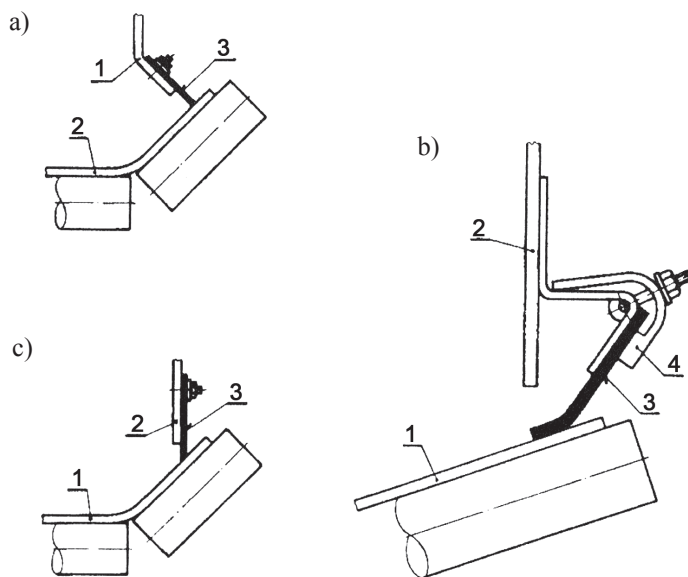
Niewłaściwe umieszczenie gumowych listew uszczelniających przenośnik taśmowy wewnątrz kosza zasypowego powodowało, że urobek dociskał taśmę uszczelnienia do taśmy przenośnika, co prowadziło do powstawania dwóch niekorzystnych zjawisk. Po pierwsze, w miejscu tym prędkość urobku spadała do wartości bliskiej 0 oraz narastała warstwa przesuwanego urobku. Po drugie, pod taśmę uszczelniającą dostawały się drobne ziarna materiału skalnego. Urobek, dociskając taśmę uszczelniającą, dociskał również ziarna skalne pod taśmą, co powodowało wycieranie się taśmy przenośnika na całej jej długości, aż do wystąpienia awarii. Efekt ten pokazują rysunki 6.73 i 6.74. Umieszczenie stalowej listwy (mocującej uszczelnienie) po wewnętrznej stronie bocznej ściany kosza również jest niekorzystne, gdyż zwiększa opory przepływu urobku. Prawidłowe zamocowanie listwy uszczelniającej pokazano na rysunku 6.75.



**Rys. 6.73.** Efekt wycierania się taśmy oraz sposób montażu bocznego gumowego fartucha i listwy uszczelniającej (fot. T. Gawenda)



**Rys. 6.74.** Ideowy szkic niekorzystnego oddziaływania kruszywa na boczne uszczelnienie taśmociągu podczas transportu w jednostce sortującej



**Rys. 6.75.** Usytuowanie listwy uszczelniającej przy zestawach krążnikowych sztywnych: a) prostopadłe do powierzchni taśmy; b) pionowe; c) sztywne do powierzchni taśmy; 1 – taśma, 2 – płyta ograniczenia bocznego, 3 – gumowa listwa uszczelniająca, 4 – osadzenie listwy uszczelniającej (Żur, Hardygóra 1996)

Z danych katalogowych (DTR 2009) wynikało, że maksymalna wydajność zestawu przesiewającego mogła wynosić 500 Mg/h, a wydajność zestawu kruszącego 700 Mg/h. Dla parametrów wytrzymałościowych wapienia dolomitycznego (140–160 MPa) wydajność dla kruszarki przyjęto około 600 Mg/h. Samo zestawienie powyższych wielkości wskazuje na nieodpowiedni dobór obu maszyn. Wydajność zestawu przesiewającego powinna być większa od wydajności zestawu kruszącego, ponieważ przesiewacz występuje za kruszarką. Mówiąc o wydajności zestawu przesiewającego, należy brać pod uwagę wydajność transportową przenośników taśmowych, jak i wydajność przesiewacza, zapewniającą wysoką skuteczność przesiewania.

Uwzględniając warunki pracy obu maszyn, w jakich mogłyby pracować przy maksymalnych wydajnościach, oraz warunki „niekorzystne”, tj. zawartość zanieczyszczeń gliniastych w nadawie i wilgotność surowca, należy podkreślić, że dobór obu zestawów mobilnych nie pozwalał na prowadzenie procesu rozdrabniania i klasyfikacji w sposób optymalny. Nawet jeżeli w czasie opróbowania zmniejszono wydajność obu instalacji do 480 Mg/h, to i tak przenośnik taśmowy podający urobek na przesiewacz nie mógł pracować z wydajnością umożliwiającą płynne odbieranie materiału z zestawu kruszącego, ze względu na zbyt małą prędkość transportową przenośnika wynoszącą 0,28 m/s, co w efekcie prowadziło do nadmiernego gromadzenia się urobku i dociskania listwy do taśmy, a następnie do awarii.

Podana przez producenta w instrukcji obsługi prędkość taśmociągu, która wynosiła 0,28 m/s, była zdecydowanie za niska i nawet ewentualne jej podwyższenie przez prze-

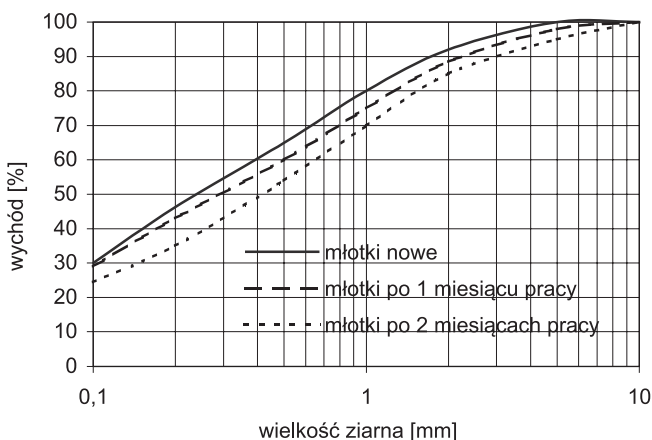


miennik częstotliwości do maksymalnej wartości 0,39 m/s, jaka wówczas występowała, nie rozwiązało problemu. Aby zlikwidować przyczynę niekorzystnego zasilania przesiewacza z kruszarki, należało zwiększyć prędkość taśmy podajnika do 0,49 m/s przy wydajności około 500 Mg/h, usunąć wadę mocowania bocznego uszczelnienia fartucha oraz usprawnić załadunek kosza zasypowego z przenośnika odbierającego materiał przekruszony (Gawenda, Naziemiec 2010).

### 6.6.3. Zużycie elementów roboczych kruszarek

Ważnym zagadnieniem jest zużywanie się elementów roboczych kruszarek. Brak kontroli stanu technicznego oraz wymiany zużytych szczęk, młotków, kowadeł, listew czy płyt odbojowych itp. będzie powodować problemy w dalszej eksploatacji całego układu, zmiany jakości produktów oraz przestoje związane z awarią urządzeń i niespodziewanymi remontami.

Jest to szczególnie istotne w kruszarkach udarowych, w których elementy robocze z dużą prędkością uderzają w rozdrabniany materiał, zużywając się przy tym zbyt szybko. W takich przypadkach dochodzi do wzrostu wielkości uziarnienia w produktach otrzymywanych, zmiany kształtu ziarn i spadku wydajności na skutek narastania surowca w komorze roboczej aż do jego całkowitego zablokowania. Na rysunku 6.76 pokazano, że młotki po dwóch miesiącach pracy produkują znacznie grubszy kruszywa o uziarnieniu do 9 mm, zamiast do 5 mm



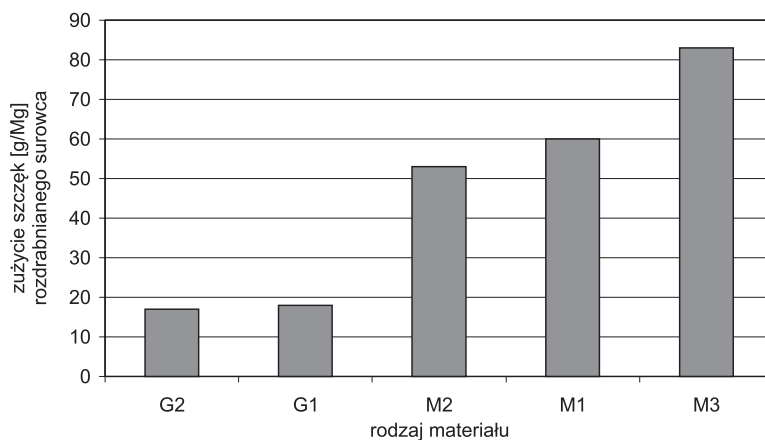
Rys. 6.76. Krzywe składu ziarnowego wapienia dla kruszarki młotkowej 41.98 (ruszt 5 mm) przy różnych stadiach zużycia (Naziemiec, Gawenda 2006)

W tabeli 6.37 podano charakterystykę metali używanych na elementy robocze kruszarek, a na rysunku 6.77 przedstawiono stopień zużycia elementów kruszarek zależnie od materiału zastosowanego na wykonanie szczęk przy rozdrabnianiu diabazu. Można zauważyć, że największe zużycie okładzin szczęk wystąpiło dla stali manganowej M3 (bez dodatku chromu). Zwiększona zawartość chromu w stopach podwyższa żywotność szczęk.

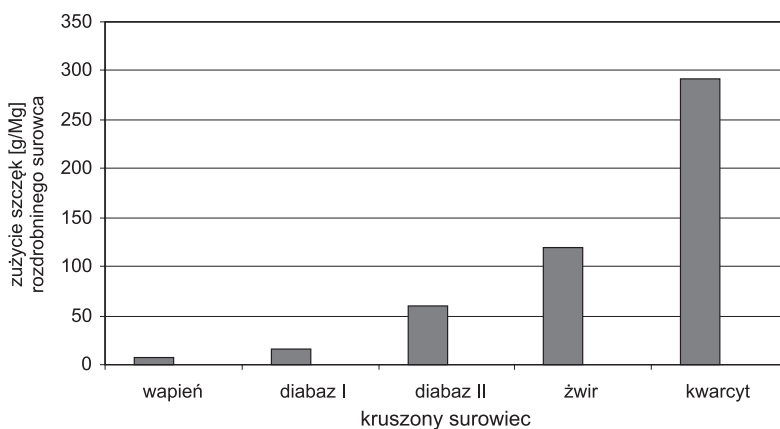
**Tabela 6.37**

Skład materiałów stosowanych na wykładziny szczęk (Wermter 1988)

Material	Skład [%]			
	C	Mn	Cr	Mo
Stal manganowa M1	1,2–1,3	12–13	1,3–1,4	–
Stal manganowa M2	1,4	18,7	2,4	–
Stal manganowa M3	1,05	13	–	1,1
Staliwo G1	2,5–2,7	–	27	–
Staliwo G2	2,8–3,4	–	14–16	3–3,2



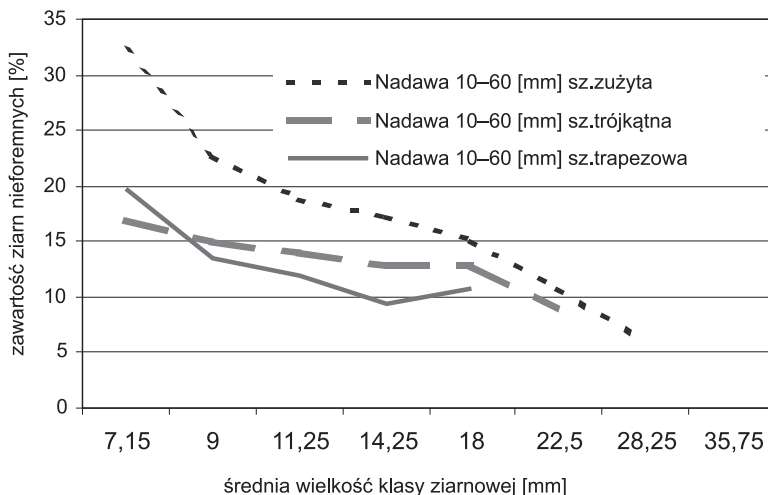
**Rys. 6.77.** Zużycie wykładzin szczęk przy kruszeniu diabazu w zależności od rodzaju tworzywa (Naziemiec, Gawenda 2006)



**Rys. 6.78.** Zużycie wykładzin szczęk kruszarki szczękowej wykonanych ze stali manganowej M1 przy kruszeniu różnych materiałów (Naziemiec, Gawenda 2006)

Rysunek 6.78 przedstawia zużycie szczęk ze stali manganowej M1 w zależności od rodzaju rozdrabnianego surowca. Kwarcyt, charakteryzujący się największą abrazywnością wśród pozostałych skał, wykazuje największą ścieralność okładzin.

Analiza otrzymanych wyników badań pozwoliła na sformułowanie istotnego wniosku: na szczękach o przekroju trapezowym uzyskano najmniejsze zawartości ziarn nieforemnych, natomiast największe obserwowano na szczękach zużytych. Różnica ta dla drobnych klas dochodzi nawet do 25% (rys. 6.79), co jest bardzo niekorzystne dla jakości drobnoziarnistych kruszyw.



Rys. 6.79. Zawartości ziarn nieforemnych uzyskanych przy różnych powierzchniach szczęk (Naziemiec, Gawenda 2006)

#### 6.6.4. Nieodpowiednia współpraca kruszarek na różnych stadiach rozdrabniania

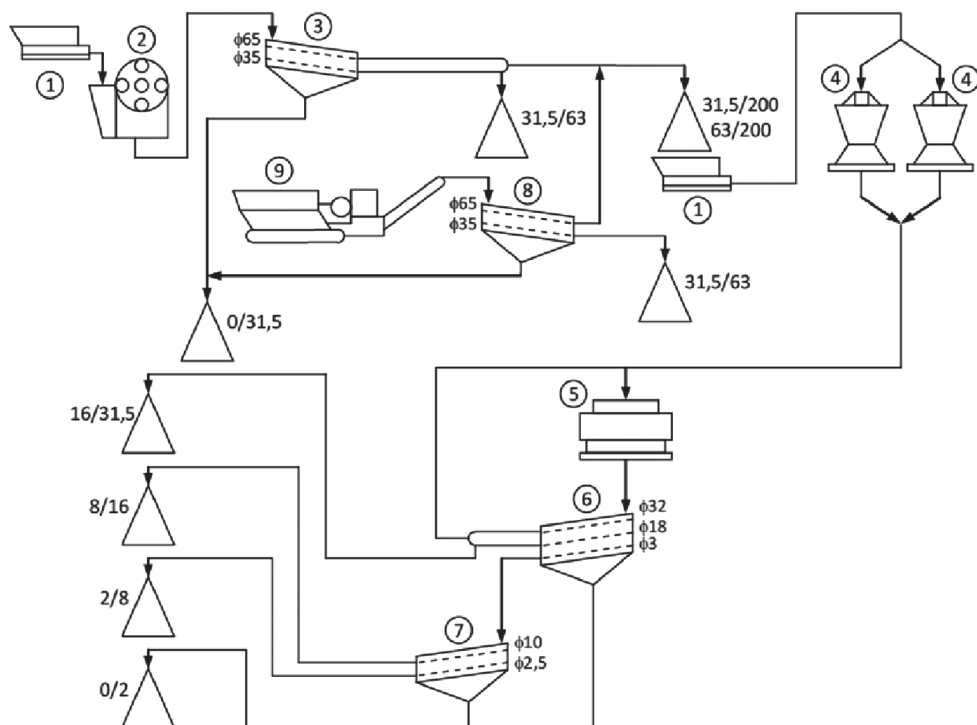
W artykule (Gawenda i in. 2013a) dokonano analizy pracy instalacji przerobczych produkujących wapienne i dolomitowe kruszywa mineralne na przykładzie kopalń w Jaźwicy i Laskowej. Wprowadzony w pracy (Gawenda 2013a) wskaźnik  $W_j$  umożliwia miarodajne określenie zużycia energii przez kruszarkę w stosunku do jej efektywnej pracy związanej z jakością rozdrobnionego produktu. Przykładowo samo zużycie energii przez dwie różne kruszarki (szczękową i stożkową) może być bardzo podobne, ale odniesienie ich wyników zużycia energii do stopnia rozdrobnienia (wkładu pracy na pomniejszenie ziarna z nadawy do produktu) może wykazać, że któraś kruszarka pracuje mniej efektywnie lub nieefektywnie do swoich możliwości.

W kopalni Jaźwica eksploatacja jest prowadzona w czterech zakładach przerobczych, (dwóch zakładach stacjonarnych i dwóch mobilnych). W kopalni w Laskowej eksploatacja jest prowadzona w dwóch stacjonarnych zakładach przerobczych.



Instalacja technologiczna w zakładzie przeróbczym Jaźwica II, zaprezentowana na rysunku 6.80, składa się z następujących urządzeń:

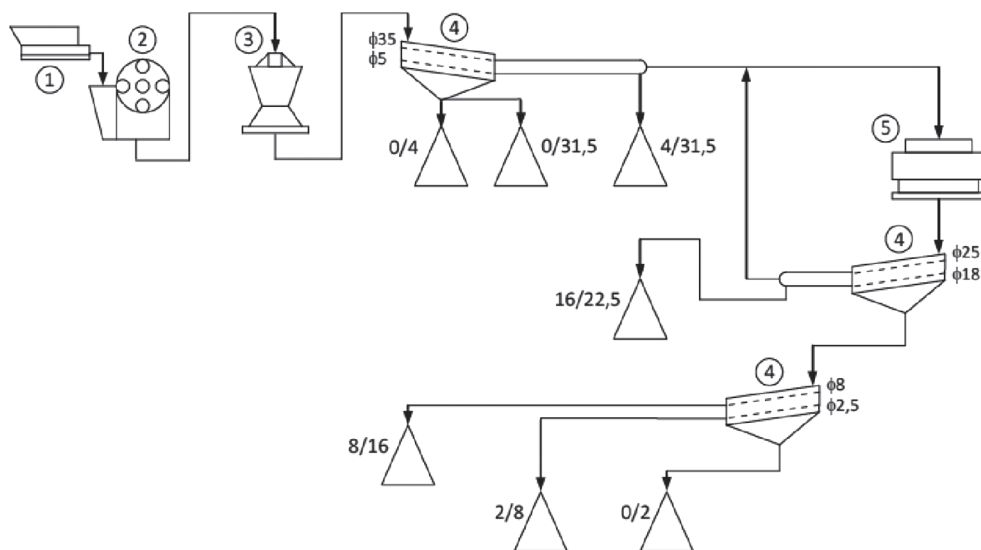
- stacjonarnej kruszarki szczękowej MFL STE120-100 pracującej w układzie otwartym,
- dwóch stacjonarnych kruszarek stożkowych 10.44 pracujących w układzie otwartym,
- mobilnej kruszarki szczękowej STE 108/75 T-V pracującej w układzie otwartym, zasilanej energią elektryczną i silnikiem spalinowym,
- stacjonarnej kruszarki udarowej MagImpact 2700 pracującej w układzie zamkniętym,
- czterech stacjonarnych przesiewaczy wibracyjnych dwupokładowych.



**Rys. 6.80.** Schemat technologiczny zakładu przeróbczego Jaźwica II; 1 – podawacz szufladowy, 2 – kruszarka szczękowa STE120-100, 3 – przesiewacz dwupokładowy WK2, 4 – kruszarka stożkowa 10.44, 5 – kruszarka udarowa MagImpact 2700, 6 – przesiewacz trójpokładowy WK3, 7 – przesiewacz dwupokładowy WPB 821, 8 – przesiewacz dwupokładowy SG2P, 9 – kruszarka mobilna STE 108/75 T-V (Gawenda i in. 2013a)

Instalacja technologiczna w zakładzie przeróbczym Laskowa II, zaprezentowana na rysunku 6.81, składa się z następujących urządzeń:

- stacjonarnej kruszarki szczękowej Makrum 40.17 pracującej w układzie otwartym,
- stacjonarnej kruszarki stożkowej DKT 1200 pracującej w układzie otwartym,
- stacjonarnej kruszarki udarowej MagImpact 2100 pracującej w układzie zamkniętym,
- trzech stacjonarnych przesiewaczy wibracyjnych dwupokładowych.



**Rys. 6.81.** Schemat zakładu przerobczego Laskowa II; 1 – podawacz szufladowy, 2 – kruszarka szczękowa 40.17, 3 – kruszarka stożkowa DKT 1200, 4 – przesiewacz dwupokładowy WK-2, 5 – kruszarka udarowa MagImpact 2100 (Gawenda i in. 2013a)

**Tabela 6.38**

Wskaźniki pracy układów stacjonarnych zasilanych energią elektryczną (Gawenda i in. 2013a)

Rodzaj kruszarki	Rodzaj układu	Zużycie energii elektr. [kWh/Mg]	Koszt zużycia energii elektr. [zł/Mg]	Zużycie energii $E$ na tonę [MJ/Mg]	Stopień rozdr. $S_{\max}$	Wskaźnik $W_j = E/S_{\max}$ [MJ/Mg]
Szczękowa MFL STE120-100 (Jaźwica II)	otw.	0,87	0,32	3,13	6,0	0,52
Szczękowa Makrum 40.17 (Laskowa II)	otw.	0,49	0,18	1,76	5,0	0,35
Stożkowa 10.44 (Jaźwica II)	otw.	0,42	0,16	1,52	1,6	0,95
Stożkowa DKT 1200 (Laskowa II)	otw.	0,49	0,18	1,76	1,2	1,47
Udarowa MagImpact 2700 (Jaźwica II)	zam.	1,20	0,35	4,32	4,0	1,08
Udarowa MagImpact 2100 (Laskowa II)	zam.	1,52	0,56	5,46	5,6	0,98

W analizie układów technologicznych wzięto pod uwagę kruszarki stacjonarne pracujące w układach otwartych i zamkniętych zasilanych energią elektryczną. Wyniki analiz przedstawiono w tabeli 6.38. Najniższe koszty zużycia energii elektrycznej odnotowano dla kruszarek szczękowych pracujących w układach otwartych. Kruszarki te pracują na pierwszych stadiach rozdrabniania i wykorzystują w pełni swoje możliwości, osiągając największy stopień rozdrobnienia dochodzący do 6,0. Wskaźniki dla kruszarek  $W_j$  wynoszą 0,35–0,52 MJ/Mg (tj. 0,10–0,15 kWh/Mg).

Kruszarki udarowe MagImpact, będące kubizerami pracującymi z zawrotem materiału na ostatnim stadium rozdrabniania, również pracują efektywnie. Ich zużycie energii wynoszące 0,98–1,08 MJ/Mg (0,27–0,30 kWh/Mg), dwukrotnie wyższe od zużycia energii przez kruszarki szczękowe, jest związane z dużym obciążeniem i z potrzebą zużycia większej energii na rozdrobnienie drobniejszych frakcji w celu wytworzenia nowej, znacznie większej powierzchni właściwej produktów zgodnie z teorią Rittingera i Bonda.

Kruszarki stożkowe w układzie otwartym pracują nieefektywnie. Ich wskaźniki  $W_j$  w porównaniu z pozostałymi urządzeniami są bardzo wysokie (zwłaszcza w przypadku kruszarki DKT 1200) i wynoszą 0,95–1,47 MJ/Mg (0,26–0,41 kWh/Mg). Mając na uwadze układ technologiczny w Jaźwicy II i Laskowej II oraz pracujące kruszarki stożkowe, z których produkty są kierowane bez odsiewania bezpośrednio do kubizera, należałoby przeprowadzić ich optymalizację, tak aby zwiększyć ich efektywność, czyli poprawić uzyskanie drobniejszych produktów. Maksymalne stopnie rozdrobnienia są niewielkie, gdyż wynoszą odpowiednio 1,6 i 1,2 (tab. 6.38). W takiej sytuacji kruszarki praktycznie zużywają tylko energię oraz elementy robocze. Zmniejszenie szczeliny wylotowej kruszarek stożkowych spowodowałoby zwiększenie stopnia rozdrobnienia oraz umożliwiłoby obniżenie zużycia energii w kubizerach, które mogłyby pracować przy możliwie mniejszych stopniach rozdrobnienia, np. trzech. Z analiz przedstawionych w podrozdziale 6.2 wynika, że na wzrost udziału ziarn foremnych w produktach finalnych wpływa większa liczba stadiów rozdrabniania oraz mniejsze stopnie rozdrobnienia maszyn.

W tabeli 6.39 porównano wskaźniki zużycia energii i parametry uzyskiwanych kruszyw. Pierwotnie instalacje składały się z dwóch stadiów rozdrabniania, ale ze względu na zbyt dużą zawartość ziarn nieforemnych – w kruszarkach stożkowych ponad 20% – oraz wysoką podatność na rozdrabnianie – LA około 24% – układy zmodyfikowano, wyposażając je w kubizery. Po modernizacji obie instalacje składają się z trzech stadiów (w podobnej konfiguracji) układów rozdrabniania otwartych i zamkniętych wraz z przesiewaniem, przy czym instalacja w Jaźwicy II ma dodatkowy mobilny układ rozdrabniania oraz przesiewania. Ta dodatkowa instalacja sprawia, że wskaźnik  $W_j$  zużycia energii potrzebnej na rozdrobnienie jednej tony surowca przy jednokrotnym pomniejszeniu uziarnienia nadawy jest wyższy o 0,51 MJ/Mg od wskaźnika dla instalacji w Laskowej II. Ponadto w wyniku rozdrabniania materiału w trzecim stadium zmniejszono wskaźnik podatności na rozdrabnianie LA nawet o 7%, a udział ziarn nieforemnych o kilkanaście procent (tab. 6.39).

Należy podkreślić, że zwiększenie efektywności pracy kruszarek stożkowych w obu zakładach obniżyłoby wskaźnik zużycia energii  $W_j$ , zwłaszcza dla instalacji w zakładzie Jaźwica II wskaźnik ten byłby zdecydowanie niższy, ponieważ w większości rozdrabniany wapień dewoński charakteryzuje się mniejszą wytrzymałością na ściskanie, mniejszą

zawartością krzemionki i większą podatnością na rozdrabnianie LA w stosunku do dolomitu dewońskiego rozdrabnianego w instalacji w zakładzie Laskowa II.

**Tabela 6.39**

Zestawienie wskaźników dla instalacji w zakładach Jaźwica II i Laskowa II (Gawenda i in. 2013a)

<b>Wskaźniki/parametry</b>	<b>Jaźwica II wapień dewoński</b>	<b>Laskowa II dolomit dewoński</b>
$W_j = E/S_{\max}$ bez przesiewaczy [MJ/Mg]	3,31	2,80
$W_j = E/S_{\max}$ z przesiewaczami [MJ/Mg]	3,65	3,57
Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa]	88	110
Średnia zawartość SiO <sub>2</sub> [%]	2,47	6,23
Średnia ogólna podatność na rozdrabnianie LA [%]	28,9	21,5
Średnia podatność na rozdrabnianie LA po kruszarce stożkowej [%]	24,5	24,0
Średnia podatność na rozdrabnianie LA po kruszarce udarowej [%]	19,5	17,0
Zawartość ziarn nieforemnych po kruszarce stożkowej [%]: – w klasie 2–8 mm, – w klasie 8–16 mm	17–21 18–19	17–22 17–19
Zawartość ziarn nieforemnych po kruszarce udarowej [%]: – w klasie 2–8 mm, – w klasie 8–16 mm	5–10 12–13	6–1 8–11

## 7. Modele matematyczne procesów rozdrabniania

W literaturze dotyczącej procesu rozdrabniania materiałów uziarnionych występują dwie kategorie badań: badanie procesu rozdrabniania dużych zbiorowości ziarn w określonym urządzeniu rozdrabniającym (nazywanego umownie makroprocesem rozdrabniania) oraz badanie procesu rozdrabniania pojedynczych ziarn (mikroprocesu rozdrabniania lub rozdrabniania swobodnego). Zarówno dla procesów rozdrabniania skrapowanego, jak i swobodnego prowadzone są prace zmierzające do określenia wzorów opisujących krzywe składu ziarnowego produktów rozdrabniania. Opracowanie zasad przewidywania (prognozowania) składu ziarnowego pozwoliłoby na właściwe rozwiązywanie zagadnień sterowania i kontroli procesami rozdrabniania oraz projektowania układów rozdrabniania i klasyfikacji. Idealnym rozwiązaniem omawianego problemu byłoby podanie ogólnych wzorów określających skład ziarnowy produktów rozdrabniania, których parametry byłyby funkcjami właściwości materiału (np. gęstości, modułu Younga, liczby Poissona itp.), a także byłyby zależne od rodzaju urządzenia rozdrabniającego (ogólniej – działania kruszącego). Niestety w literaturze można spotkać tylko częściowe rozwiązania w tym zakresie (Lowrison 1974). Istniejące wzory opisujące skład ziarnowy rozdrabniania skrapowanego Rosina–Rammlera, Gaudina–Schuhmanna–Andriejewa i inne (Lowrison 1974; Lynch 1997) są rezultatem badań empirycznych i nie są znane prawa wiążące ich parametry z właściwościami materiału czy urządzenia rozdrabniającego.

Modele Kołmogorowa i Epsteina (Kołmogorow 1941; Epstein 1948), które prowadzą do logarytmiczno-normalnego rozkładu wielkości ziarn produktu, są modelami ściśle teoretycznymi i nie biorą pod uwagę właściwości fizyczno-mechanicznych ziarn. Możliwość ich uwzględnienia dają modele rozdrabniania pojedynczych ziarn. W literaturze znane są modele Gilvary’ego (1961), Gaudina–Meloya (1962), Meloya (1963) oraz Meloya–Gumtza (1969), oparte na różnych założeniach dotyczących przebiegu procesu kruszenia ziarna. Ostatni z tych modeli jest rozwiązaniem najogólniejszym, opartym tylko na metodach rachunku prawdopodobieństwa, przy czym właściwości materiału i rodzaj działania kruszącego uwzględniane są w funkcji gęstości rozłożenia powierzchni kruszenia w danym ziarnie.

## 7.1. Ogólny macierzowy model procesów rozdrabniania

Przyjmuje się powszechnie, że model macierzowy polegający na analizie przepływu kruszonej masy każdej klasy nadawy do klas drobniejszych został po raz pierwszy zaproponowany przez Broadbenta i Callcotta w 1956 roku (Broadbent, Callcott 1956).

Przyjmując, że przez  $f_i$  oznaczmy udziały, wyrażone w procentach lub jednostkach masy poszczególnych klas w nadawie, a odpowiednio przez  $p_i$  udziały klas w produkcie kruszenia oraz przez 1 klasę ziarn najgrubszych, a przez  $n + 1$  klasę ziarn najdrobniejszych, to wyniki procesu kruszenia można zaprezentować tak jak w tabeli 7.1.

**Tabela 7.1**

Podstawowe wyniki procesu rozdrabniania (Brożek i in. 1995)

Klasa	Udziały klas w nadawie	Udziały klas w produkcie
1	$f_1$	$p_1$
2	$f_2$	$p_2$
:	:	:
$n$	$f_n$	$p_n$
$n + 1$	$f_{n + 1}$	$p_{n + 1}$

Klasa ( $n + 1$ ) jest zbiorem ziarn przechodzących przez sito o najmniejszych oczkach. W trakcie procesu rozdrabniania ziarna wszystkich klas ulegają rozdrobnieniu z pewnym prawdopodobieństwem i ziarna pokruszone przechodzą do klas drobniejszych lub pozostają w klasie rozdrabnianej. Przy takim rozumieniu procesu rozdrabniania bilans mas klas nadawy i produktu można zapisać tak jak w tabeli 7.2.

**Tabela 7.2**

Charakterystyka bilansu rozdrabniania według klas produktów (Brożek i in. 1995)

Klasa	Udział w nadawie	Klasa 1	Klasa 2	:	Klasa $n$	Klasa $n + 1$
1	$f_1$	$p_{1,1}$	0	:	0	0
2	$f_2$	$p_{2,1}$	$p_{2,2}$	:	:	0
:	:	:	:	:	0	0
$n$	$f_n$	$p_{n,1}$	$p_{n,2}$	:	$p_{n,n}$	0
$n + 1$	$f_{n+1}$	$p_{n+1,1}$	$p_{n+1,2}$	:	$p_{n+1,n}$	$p_{n+1,n+1}$

Kolumna pierwsza podaje rozdział produktu rozdrabniania pierwszej klasy nadawy między poszczególne klasy; druga kolumna – podział produktu kruszenia drugiej klasy itd. Poszczególne elementy  $p_{ij}$  oznaczają przepływ materiału z klasy  $j$ -tej do  $i$ -tej.

Należy zauważyć, że:

- 1) suma  $\sum_{i=1}^{n+1} f_i$  przedstawia masę nadawy (lub jeden przy stosowaniu wychodów)
- 2) wychody masowe klas produktu mogą być określone przez sumowanie elementów w kolejnych wierszach tabeli.

Element  $p_{ij}$  można zapisać także jako  $p_{ij} = x_{ij}f_j$ , gdzie  $x_{ij}$  przedstawia ułamek ziarn z  $j$ -tej klasy nadawy, które trafiają do  $i$ -tej klasy produktu. Przyjmujemy umownie, że  $p_{ij} = p_{i,j}$  przy czym znak „, ,” w indeksie będziemy stosować tylko w przypadku omijania kłopotów interpretacyjno-edytorskich. Możemy wtedy zapisać układ równań:

$$\begin{aligned} x_{11}f_1 + 0 + \dots + 0 &= p_1 \\ x_{21}f_1 + x_{22}f_2 + 0 + \dots + 0 &= p_2 \\ &\vdots \\ x_{n1}f_1 + x_{n2}f_2 + x_{n3}f_3 + \dots + x_{n,n-1}f_n &= p_n \end{aligned}$$

Jeżeli masy (udziały) klas nadawy i produktu potraktujemy jako macierze o wymiarach  $n \times 1$ , to mamy:

$$p = X \cdot f \tag{7.1}$$

gdzie:

- $p, f$  – macierze mas (udziałów) klas produktów i nadawy,
- $X$  – macierz trójkątna elementów  $x_{ij}$  określonych wyżej.

Jest rzeczą oczywistą, że klasy nadawy i produktów powinny mieć te same granice, przy czym wygodnie jest, gdy granice te określa jedna skala sit (np.  $\sqrt{2}$ ).

Takie podejście do opisu procesu rozdrobnienia ma sens, gdy możliwe jest wyznaczenie macierzy  $X$ , co z kolei wiąże się z koniecznością przyjęcia pewnych założeń. Można przyjąć, że ziarna każdej wielkości mają pewne prawdopodobieństwo rozdrobnienia, przy czym prawdopodobieństwo to może zależeć od wielkości ziarna. Oznacza to, że tylko pewna część ziarn jest wybierana (selekcjonowana) do rozdrobnienia (Brożek i in. 1995).

Jeżeli  $S_i$  jest ułamkiem ziarn w najgrubszej klasie, która została wybrana do kruszenia, to masa ziarn o tej wielkości, która ulegnie rozdrobnieniu, wynosi  $S_1f_1$ , a dla klasy  $i$ -tej mamy analogicznie  $S_n f_n$  i można to zapisać:

$$\begin{bmatrix} S_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & S_2 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & S_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 f_1 \\ S_2 f_2 \\ \vdots \\ S_n f_n \end{bmatrix}$$

Jeżeli przez  $S$  oznaczymy diagonalną macierz selekcji, to iloczyn  $S \cdot f$  oznacza macierz kolumnową ilości ziarn, które uległy skruszeniu. Pozostałe ziarna przechodzą przez proces jako nierozdrobnione i można je przedstawić iloczynem  $(I - S) \cdot f$ , gdzie  $I$  jest macierzą jednostkową o wymiarze  $n \times n$  (Brożek i in. 1995).

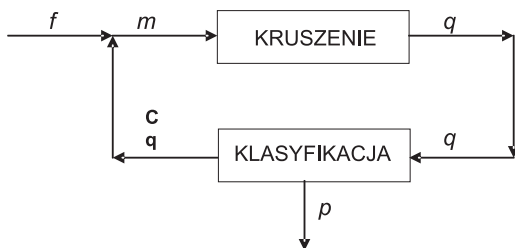
Jeżeli przez  $X$  będziemy rozumieć macierz prawdopodobieństw przejścia rzeczywiście kruszonych ziarn do klas produktów, to  $X$  możemy zastąpić symbolem  $B$  i zapisać równanie:

$$p = B \cdot S \cdot f + (I - S) \cdot f \quad (7.2)$$

lub:

$$p = [B \cdot S + I - S] \cdot f$$

Warto zauważyć, że w opisie macierzowym procesu rozdrabniania interesuje nas praktycznie wynik zakończonego procesu (model statyczny). Oznacza to, że nie jest dla nas istotne, czy ziarno przeszło przez przestrzeń roboczą po jednym akcie kruszenia, czy po kilku aktach, i czy zmniejszyło swoje rozmiary. Można jednak rozpatrywać proces usuwania ziarn z przestrzeni roboczej kruszarki (ziarn mniejszych niż szczelina robocza kruszarki), który może być porównywany do procesu klasyfikacji, co można zilustrować graficznie (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Ilustracja zamkniętego obiegu rozdrabniania w modelu macierzowym (Brożek i in. 1995)

Na podstawie tej idealizacji możemy zapisać następujące równania macierzowe:

$$p = (I - C) \cdot q$$

lub:

$$p = (I - C) \cdot (B \cdot S + I - S) \cdot m \quad (7.3)$$

Mamy także:

$$m = f + C \cdot q$$

$$m = f + C \cdot (B \cdot S + I - S) \cdot m$$



$$f = [I - C \cdot (B \cdot S + I - S)] \cdot m$$

$$m = [I - C \cdot (B \cdot S + I - S)]^{-1} \cdot f \quad (7.4)$$

W efekcie z zależności (7.3) i (7.4) mamy:

$$p = (I - C) \cdot (B \cdot S + I - S) \cdot [I - C \cdot (B \cdot S + I - S)]^{-1} \cdot f \quad (7.5)$$

Jeżeli zjawisko klasyfikacji nie występuje, jak np. w przypadku rozdrabniania swobodnego, to  $C$  staje się macierzą zerową i równanie (7.5) przechodzi w (7.2) (Brożek i in. 1995).

Przy założeniu takiego samego rozdrabniania poszczególnych klas można próbować wyznaczyć macierz  $B$  eksperymentalnie. Zostały zaproponowane trzy metody: wykorzystanie znaczników promieniotwórczych, metoda substytucji i metoda obliczeniowa, przy czym dwie pierwsze metody były w badaniach ukierunkowane tylko na procesy przemiału w młynach kulowych, natomiast trzecia dodatkowo była weryfikowana w kruszarce szczękowej i może być wykorzystana w produkcji kruszyw łamanych (Brożek i in. 1998).

### Wykorzystanie znaczników promieniotwórczych

Najprostszym sposobem zaznaczenia klasy ziarnowej podlegającej badaniu jest wykorzystanie izotopów radioaktywnych. Wyodrębniona z nadawy klasa ziarnowa poddawana jest napromienianiu, a następnie po połączeniu z nadawą podlega rozdrabnianiu w badanym urządzeniu. Radioaktywność poszczególnych klas ziarnowych produktu rozdrabniania pozwala na określenie rozproszenia znacznika w klasach. Zaletą tej metody jest użycie znacznika, który ma taką samą podatność na rozdrabnianie jak pozostały materiał, dzięki czemu proces rozdrabniania przebiega w normalnym środowisku.

### Metoda substytucji

Jeśli przyjmiemy założenie, że skład ziarnowy produktu powstającego przez rozdrobnienie dowolnej klasy uwarunkowany jest składem ziarnowym i fizycznymi właściwościami klas otaczających, nie zależy natomiast od charakterystyki rozpatrywanej klasy, to można zastąpić materiał badanej klasy materiałem mającym taką samą charakterystykę granulometryczną, ale odmienny skład mineralogiczny, który jest łatwy do odzyskania z uzyskiwanego produktu rozdrabniania. Hipoteza ta jest prawdziwa wówczas, gdy badana klasa ziarnowa jest odpowiednio wąska oraz nie stanowi więcej niż 10% ładunku urządzenia rozdrabniającego w dowolnym momencie. Hipoteza ta została zweryfikowana dla procesu mielenia przez G. Huyeta (1975). Przeprowadzono serię badań, wykorzystując tę samą rudę, przy czym badania wykonywano na nadawie naturalnej, jak również takiej, gdzie jedna klasa została zastąpiona minerałem wskaźnikowym – magnetytem. Na podstawie tych badań stwierdzono, że krzywe składu ziarnowego produktów mielenia nadawy naturalnej oraz nadawy zawierającej podstawioną klasę są bardzo podobne.

Badania te potwierdziły postawioną hipotezę, tj. wykazały, że możliwe jest określenie składu ziarnowego produktu uzyskanego z rozpatrywanej klasy ziarnowej w określonych warunkach przez zastąpienie rozpatrywanej klasy ziarnowej materiałem wskaźnikowym łatwym do odzyskania z produktu.

### **Metoda obliczeniowa**

Omówiona wcześniej metoda substytucji nie może być zastosowana w każdych warunkach. Jeśli skład ziarnowy produktu uzyskiwanego z pewnej klasy zależy jedynie od środowiska rozdrabniania, to można wyobrazić sobie ustalenie składu ziarnowego produktu powstającego z rozpatrywanej klasy przez wykorzystanie różnicy uziarnienia w produktach.

Przypuśćmy, że dysponujemy nadawą kompletną oraz nadawą, z której usunięto klasę braną pod uwagę. Jeśli obie nadawy zostały rozdrobnione w identycznych warunkach, to rozkład rozpatrywanej klasy ziarnowej może być ustalony na podstawie różnicy pomiędzy składami ziarnowymi uzyskanych produktów rozdrabniania. Stosunki mas brakujących w poszczególnych klasach (określonych różnic) do sumarycznego braku mas (z założenia równego masie usuniętej próbki) są miarą prawdopodobieństw przejść fragmentów ziarn wybranej klasy do klas produktu (prawdopodobieństw geometrycznych) (Brożek i in. 1997).

Wyniki badań dotyczących zastosowania tej metody w analizie procesu mielenia wykazały dobrą zgodność z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu metody substytucji. Zauważono, że przy krótkim czasie mielenia produkt klasy branej pod uwagę może być znaleziony jedynie w najbliższych drobniejszych klasach ziarnowych (udział klas przechodzących do klas najdrobniejszych jest mniejszy niż błąd spowodowany opróbowaniem i analizą sitową).

Gdy proces mielenia prowadzony jest z wykorzystaniem małych ilości badanego materiału, wówczas metoda obliczeniowa jest mniej dokładna niż metoda substytucji. Dlatego też używana jest w warunkach laboratoryjnych tylko wtedy, gdy niemożliwe jest wykorzystanie metody substytucji.

Metodę tę zastosowano także w procesie kruszenia (Brożek i in. 1997). Badania polegały na rozdrabnianiu wapienia z Czatkowic oraz dolomitu z Siewierza, w których ze względu na porównawczy charakter postanowiono przyjąć określony (naturalny) skład ziarnowy za bazy. Rozdrabnianie prowadzono w kruszarce szczękowej o wielkości szczeliny wypustowej 5 mm i 80-procentowym wypełnieniu komory roboczej.

W pierwszej części badań określano prawdopodobieństwo przejścia masy ziarn klasy 10–12,5 mm do odpowiednich klas produktu kruszenia oraz sprawdzono dokładność metody obliczeniowej. W stosunku do próbki bazowej (pierwszej) usunięto 25% masy ziarn klasy 10–12,5 mm w próbce drugiej, 50% w próbce trzeciej, 75% w próbce czwartej i 100% w próbce piątej. Po sprawdzeniu metody wykonano drugą serię badań. W tym celu przygotowano dziesięć próbek, przy czym w każdej próbce usuwano 50% masy kolejnej klasy, poczynając od klasy najgrubszej (w stosunku do próbki bazowej). W ten sposób przygotowane próbki poddano rozdrabnianiu w kruszarce szczękowej w warunkach identycznych z poprzednimi.

Ostatnią częścią eksperymentu było przeprowadzenie trzech rozdrabnień dolomitu – próbki bazowej o takim samym składzie jak skład próbki bazowej wapieni, próbki, z której usunięto 50% masy klasy 10–12,5 mm, oraz próbki z usuniętą w 50% klasą 12,5–16 mm (w porównaniu z próbką bazową).

Na podstawie uzyskanych wyników, które przedstawiono w pracy (Brożek i in., 1997), można stwierdzić, że usuwanie 50, 75 lub 100% ziarn danej wąskiej klasy nie zmienia

zasad rozchodzenia się ziarn tej wąskiej klasy po innych klasach produktu. Usunięcie 25% ziarn danej klasy jest zbyt małe i przez to obciążone dużym błędem, na co zwracał już uwagę autor metody, Huyet (1975). Wyniki doświadczeń stanowiły podstawę do przyjęcia w dalszych badaniach 50-procentowego usuwania kolejnych klas w stosunku do próbki bazowej, zaczynając od klasy najgrubszej. Okazało się, że w każdym przypadku dwie klasy najgrubsze rozdrabniane są całkowicie i wyniki rozdrabniania wszystkich próbek są identyczne. Taki wynik nie podważa koncepcji, że efekty rozdrabniania nie zależą od stopnia usunięcia wybranej klasy, ale mogą być skutkiem tego, że kruszarka szczękowa pracuje na swój określony sposób, dając skład ziarnowy produktu w niewielkim stopniu zależny od składu ziarnowego nadawy.

Interesującym okazało się, że próbki nadawy, z których usuwano całkowicie klasy najgrubsze, cechują się powstawaniem ziarn „grubych” w produkcie, co może być związane z „niedokruszaniem” kilku nietypowych ziarn, dającym niewielką nadwyżkę wychodu w klasach grubszych produktów (objaw braku łamania ziarn grubych przez wzajemny docisk). W klasach pośrednich nie występowały nieregularności kształtu ziarn w postaci ziarn płaskich, co można tłumaczyć dostatecznym upakowaniem tych ziarn w przestrzeni roboczej, ale z kolei po usunięciu dolnej klasy najdrobniejszej w nadawie i skruszeniu okazało się, że wystąpił efekt „przekruszenia” materiału. Może to być wynikiem pojawienia się dodatkowych działań ścierających pomiędzy większymi ziarnami po wypadnięciu (odklasyfikowaniu) ziarn mniejszych od szczeliny wypustowej kruszarki.

Próba wyznaczenia prawdopodobieństw przejść do innych klas ziarnowych dla wyników rozdrabniania dolomitu skończyła się niepowodzeniem, ponieważ materiał ten był dość niejednorodny. Ziarna grube były płaskie, wydłużone oraz zwięzłe, zaś drobniejsze bardziej elipsoidalne oraz porowate. Rozdrabnianie tych dwóch rodzajów ziarn daje odmienne cechy uzyskiwanych produktów w klasach średnich. Uzyskane wyniki dla wapienia (materiał zdecydowanie jednorodny) oraz dolomitu podkreślają istotę metody substytucji, w której pożądane jest zastąpienie wybranej klasy ziarnowej tą samą klasą ziarnową innego materiału, ale o własnościach wytrzymałościowych zbliżonych do własności materiału zastępowanego.

## **7.2. Statystyczne (stochastyczne) modele składu ziarnowego**

W przeróbce surowców mineralnych wykorzystywanych jest wiele wzorów aproksymujących krzywe składu ziarnowego. Najważniejsze z nich zostaną omówione poniżej.

Wzór Rosina–Rammlera powstał w 1933 roku i był używany tylko do opisu składu ziarnowego surowców (zwłaszcza węgla). W latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia Weibull zastosował ten wzór we włókiennictwie i rozkład zmiennej losowej, której dystrybuanta opisana jest tym wzorem, nosi nazwę rozkładu Weibulla. Rozkład ten służy także do opisu rozkładu minimów w próbce (Tumidajski, Wieniewski 1988; Tumidajski 1993; Foszcz i in. 2000).

Dystrybuanta rozkładu Weibulla (RRB) ma postać (dla zmiennej losowej oznaczającej wielkość ziarna  $D$ ):

$$\Phi(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{d_0}\right)^n\right], \quad d \geq 0 \quad (7.6)$$

gdzie:

$n$  – tzw. parametr kształtu,

$d_0$  – parametr skali (wielkością ziarna charakterystycznego).

Dystrybuanta ta w układzie funkcyjnym ( $\ln d, \ln \ln(1/1 - \Phi)$ ) jest prostą i oszacowanie parametrów można uzyskać metodą najmniejszych kwadratów dla prostej  $y = ax + b$ , gdzie  $x = \ln d, y = \ln \ln(1/1 - \Phi), a = n, b = -n \ln d_0$ .

Wyznaczone wartości średnie  $E(D)$  oraz wariancja  $V(D)$  są związane z parametrami  $n$  i  $d_0$  następującymi wzorami:

$$E(D) = d_0 \Gamma\left(\frac{1}{n} + 1\right), \quad V(D) = d_0^2 \left\{ \Gamma\left(\frac{2}{n} + 1\right) - \left[ \Gamma\left(\frac{1}{n} + 1\right) \right]^2 \right\} \quad (7.7)$$

gdzie:  $\Gamma(p) = \int_0^{\infty} x^{p-1} e^{-x} dx$  jest funkcją gamma (stabilcowaną).

W wielu pracach (Cardu i in. 1993; Gawenda 2004, Tumidajski i in. 2006; Naziemiec i in. 2008) dotyczących kruszenia materiałów uziarnionych stosowano z powodzeniem formę dystrybuanty rozkładu cenzurowanego Weibulla w postaci:

$$\Phi(d) = 1 - \exp\left[-c \left(\frac{d}{d_{\max} - d}\right)^n\right], \quad 0 \leq d \leq d_{\max} \quad (7.8)$$

gdzie:

$d_{\max}$  – maksymalna wielkość ziarna w produkcie kruszenia,

$c, n$  – parametry.

Od bardzo dawna stosowany jest rozkład Gaudina–Andriejewa–Schuhmanna, którego dystrybuanta opisywana jest wzorem:

$$\Phi(d) = \left(\frac{d}{d_{\max}}\right)^k, \quad 0 \leq d \leq d_{\max} \quad (7.9)$$

W układzie funkcyjnym ( $\ln d, \ln \Phi$ ) równanie dystrybuanty przedstawia prostą  $y = ax + b$ , której parametry pozwalają wyznaczyć parametr kształtu i parametr skali, tzn.:

$$k = a; \quad d_{\max} = \exp\left(-\frac{b}{k}\right)$$

Wartość średnia  $E(D)$  oraz wariancja  $V(D)$  są związane z parametrami  $k$  i  $d_{\max}$  wzorami:

$$E(D) = \frac{k}{k+1} d_{\max}, \quad V(D) = \frac{k d_{\max}^2}{k+2} - \frac{k^2 d_{\max}^2}{(k+1)^2} \quad (7.10).$$

### Rozkład logarytmiczno-normalny

Jeżeli przez  $m$  i  $\sigma$  oznaczymy odpowiednio  $E[\lg D]$  oraz  $V[\lg D]$ , to w układzie funkcyjnym  $(\lg d, \phi(u))$  dystrybuanta rozkładu logarytmiczno-normalnego przedstawia prostą  $y = ax + b$ , której parametry są związane z parametrami rozkładu wzorami:

$$a = \frac{1}{\sigma}, \quad b = -\frac{m}{\sigma}$$

Wartość średnia  $E(D)$  oraz wariancja  $V(D)$  związane są z  $m$  i  $\sigma$  wzorami:

$$E(D) = \exp\left(\frac{m}{M} + \frac{\sigma^2}{2M^2}\right) \quad V(D) = [E(x)]^2 \left[ \exp\left(\frac{\sigma^2}{M^2}\right) - 1 \right] \quad (7.11)$$

gdzie  $M = 0,4343$ .

Aproksymacja dystrybuant empirycznych przeprowadzana jest zwykłą metodą najmniejszych kwadratów, przy linearyzacji proponowanych postaci wzorów.

Jedyną racjonalną oceną dokładności aproksymacji jest tzw. odchylenie resztowe wyznaczane ze wzoru:

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{p_s} (\Phi_e(d_i) - \Phi_t(d_i))^2}{p_s - 2}} \quad (7.12)$$

gdzie:

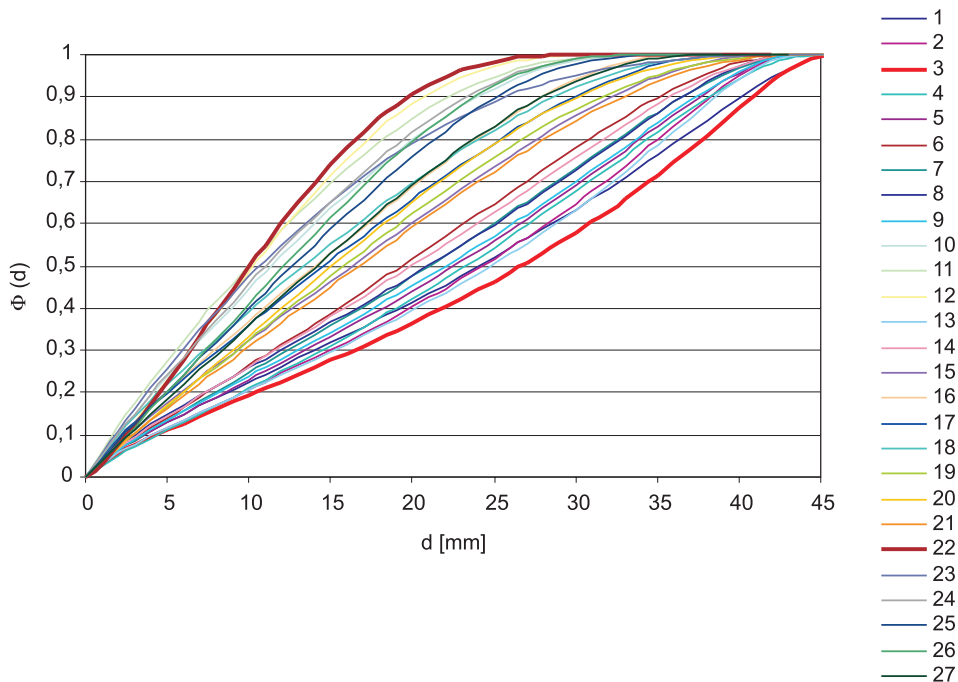
- $p_s$  – liczba użytych sit o wielkościach oczek  $d_i$
- $\Phi_e(d_i), \Phi_t(d_i)$  – odpowiednio wartości dystrybuanty empirycznej i dystrybuanty wyznaczanej wzorem aproksymującym dla wielkości ziarn  $d_i$ .

Jeśli przyjmiemy, że skład ziarnowy produktów rozdrabniania zależy od właściwości materiału rozdrabnianego (wektor  $\bar{W}$ ) oraz charakterystyk urządzenia rozdrabniającego (wektor  $\bar{X}$ ), to można stosować dwie metody modelowania statystycznego składów ziarnowych: bezpośrednią lub pośrednią.

Metodą bezpośrednią wyznacza się zależność między wychodem wybranej klasy  $\gamma$  a wektorami  $\bar{W}$  i  $\bar{X}$ , czyli  $\gamma = \gamma(\bar{W}, \bar{P})$ .

Jeżeli wzór aproksymujący krzywą składu ziarnowego produktu wykazuje dużą zbieżność z wynikami rzeczywistymi, to wtedy można wiązać jego wielkości parametrów z właściwościami materiału i charakterystykami technologicznymi urządzenia rozdrabniającego i na ich podstawie wyznaczyć ze wzoru wychody klas lub ziarna charakterystyczne (metoda pośrednia). Takie podejście było stosowane do opisu procesu rozdrabniania, przy czym techniki modelowania zależały od charakteru prowadzonych badań (Gawenda 2004).

W pracy (Gawenda 2004) charakterystyki krzywych składu ziarnowego produktów rozdrabniania (rys. 7.2) zostały wykorzystywane do modelowania procesów rozdrabniania i pozwoliły prognozować składy ziarnowe produktów na podstawie parametrów pracy kruszarek i właściwości fizyczno-mechanicznych rozdrabnianego materiału, wykorzystując do tego celu model cenzurowanego rozkładu Weibulla (7.8) (Cardu i in. 1993).



**Rys. 7.2.** Obszar możliwych wykresów dystrybuanty  $\Phi(d)$  cenzurowanego rozkładu Weibulla w badanej kruszarce szczękowej (piaskowiec) (Gawenda 2004)

W przypadku kruszarki szczękowej interesującymi zależnościami mogą być (dla parametrów wzoru (7.8)) (Gawenda, 2004):

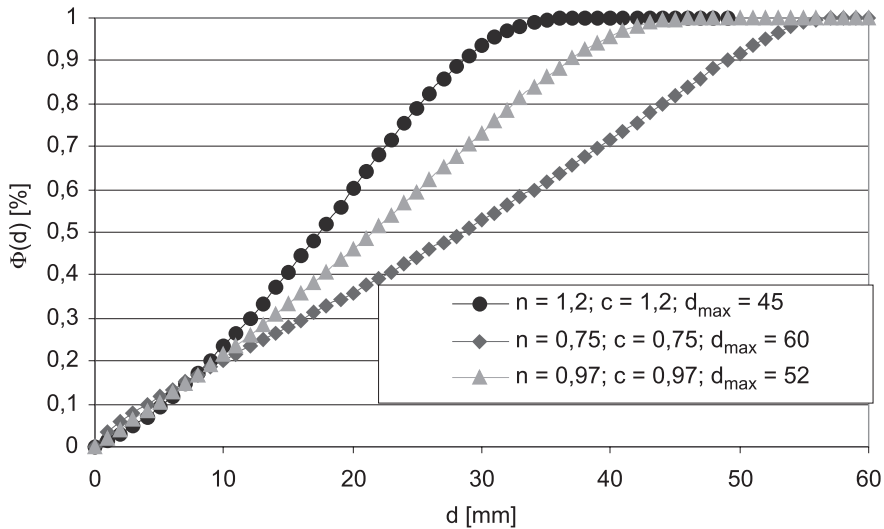
$$k = f_i(d, w, P, e, s, f) \quad (7.13)$$

gdzie:

- $k$  – parametr we wzorze (7.8), tzn.  $n, c, d_{\max}$  lub  $d_{50}$  i  $d_{80}$ , a także wychody wybranych klas, np.  $\gamma_{<20^\circ}$
- $d$  – wielkość charakteryzująca średni rozmiar ziarn nadawy,
- $w$  – wypełnienie przestrzeni roboczej,
- $P$  – charakterystyka wytrzymałości ziarn (np. liczba Poissona, wskaźnik Protodionowa),
- $e$  – szerokość szczeliny wylotowej kruszarki szczękowej,
- $s$  – skok szczęki,
- $f$  – częstotliwość drgań szczęki.

Z uwagi na cele modelowania matematycznego procesu rozdrabniania w analizie współczynników korelacji najważniejszymi stają się korelacje między zmiennymi niezależnymi ( $e, s, f, P$ ) a zmiennymi zależnymi ( $n, c, d_{\max}, d_{50}, d_{80}, \gamma_{<20}$ ).

Na podstawie znajomości odpowiednich równań regresji uzyskanych z wcześniejszych eksperymentów możliwe jest przewidywanie wyników rozdrabniania w kruszarkach szczękowych przy uwzględnieniu znajomości nastawień parametrów technologicznych kruszarki i właściwości fizyczno-mechanicznych surowców. Przykładowo na rysunku 7.3 przedstawiono obszar między skrajnymi wykresami dystrybuant opisujących graniczne krzywe składu ziarnowego produktów uzyskanych w eksperymencie (Tumidajski i in. 2003a, b).



Rys. 7.3. Obszar możliwych wykresów dystrybuanty  $\Phi(d)$  uciętego rozkładu Weibulla w badanej kruszarkie szczękowej (Tumidajski i in. 2003a, b)

Można powiedzieć, że zmiana wartości parametrów technologicznych kruszarki szczękowej może doprowadzić do uzyskania krzywej składu ziarnowego produktu, której wykres musi leżeć w prezentowanym na rysunku obszarze. Jak widać, kruszarki szczękowe nie pozwalają na regulację wychodów klas drobnych, można natomiast w dużym zakresie regulować wychody klas pośrednich i wielkość ziarna maksymalnego ( $d_{\max}$ ).

Autorzy prac (Pudło, Szlachetowski 1988; Pudło, Szlachetowski 1991) przyjęli założenie, że rozkład Weibulla opisuje skład ziarnowy mielonego materiału po dowolnym czasie mielenia  $t$  i wyznaczali parametry tych rozkładów jako zależne od tego czasu, czyli określali zależności  $n(t)$  i  $d'_0(t)$  (parametry wzoru (7.6)).

Na podstawie danych empirycznych uzyskali oni następujące zależności:

$$d_0(t) = d_0 + \frac{t - t_0}{at + b}$$

$$n(t) = n_0 + \frac{t - t_0}{a_1 t + b_1}$$
(7.14)

gdzie:

$d_0$  i  $n_0$  – parametry wzoru (7.6) opisującego skład ziarnowy nadawy do młyna,  
 $t_0 = 0$ ,  
 $a, b, a_1, b_1$  – współczynniki wyznaczone z danych empirycznych.

W pracy (Brożek i in. 1995) rozważano opis efektów rozdrabniania przez ściskanie w prasie hydraulicznej nieregularnych ziarn wapienia i porfiru w wąskich klasach ziarnowych. Jako dystrybuantę rozkładu wielkości ziarn produktów zaproponowano wzór:

$$\Phi_1(d) = a_1 d^{b_1} \exp(c_1 d)$$
(7.15)

gdzie:  $a_1, b_1, c_1$  są parametrami wyznaczanymi z danych empirycznych.

Okazało się, że dla wszystkich klas ziarnowych rozdrabnianych materiałów można użyć tego wzoru w postaci:

$$\Phi(x) = Ax^B \exp(Cx); \quad x = \frac{d}{d_n}$$
(7.16)

gdzie:

$d_n$  – średnia wielkość ziarna klasy nadawy,  
 $A, B, C$  – parametry wzoru.

Uzyskano dla nich następujące zależności:

$$A(\bar{\sigma}) = k_1 (\bar{\sigma} - \bar{\sigma}_{\min})^w$$

$$C(\bar{\sigma}) = \frac{k_2}{(\bar{\sigma})^u}$$

$$B(\bar{\sigma}) = \text{const}$$
(7.17)

gdzie:  $k_1, k_2, w, u, \sigma_{\min}$  są parametrami określanymi empirycznie, a  $\bar{\sigma}$  siłą nacisku kruszącego.

Prace omówione wyżej prowadzone były w ściśle określonych warunkach i stanowią fragmentaryczny komentarz do pracy urządzeń rozdrabniających. Opis pracy tych urządzeń wymaga uzależnienia parametrów wzorów opisujących krzywe składu ziarnowego od parametrów pracy maszyn rozdrabniających i właściwości materiałów.



### 7.3. Koncepcja modeli ekonometrycznych pracy kruszarek i układów rozdrabniania

Do opisu pracy przemysłowych kruszarek można stosować aproksymację wzorów Schuhmanna, Rosina–Rammlera–Bennetta (Weibulla) oraz cenzurowanego rozkładu Weibulla (wzory (7.9), (7.7) i (7.8)). Najważniejszą, podlegającą zmianie w warunkach przemysłowych, wielkością w kruszarkach jest rozmiar szczeliny wylotowej. Mając dane z przeprowadzonych eksperymentów – składy ziarnowe produktów przy ustalonym rozmiarze szczeliny  $e$ , dla dwóch pierwszych wzorów można przeprowadzić aproksymację dla zestawów danych  $\left(\frac{d}{e}, \Phi(d)\right)$  i uzyskać oceny dla parametrów wzorów  $\Phi(d) = A\left(\frac{d}{e}\right)^k$  oraz  $\Phi(d) = 1 - e^{-c\left(\frac{d}{e}\right)^n}$ , a następnie uzależnić parametry od szczeliny wylotowej  $e$ . Takie podejście do modelowania składów ziarnowych w kruszarkach oparte na aproksymacji według wzoru RRB (7.7) stosował Malewski (2013, 2014), a według wzoru (7.8) Gawenda (2004), Gawenda i in. (2005), Saramak (2013).

W przypadku cenzurowanego rozkładu Weibulla (7.8) w celu określenia ziarna maksymalnego  $d_{\max}$  należy przeprowadzić cykl aproksymacji, przyjmując z pewnym krokiem wartości  $d_{\max}$  większe od największego oczka sita wykorzystanego w analizie składów ziarnowych produktów rozdrabniania (na którym pozostaje jeszcze materiał). Wielkość  $d_{\max}$  powinna wskazać minimalny błąd aproksymacji w cyklu; otrzymane parametry wzoru należy uzależnić od  $e$ .

Konstruując model matematyczny procesu rozdrabniania, przyjmijmy, że na wyjściu z kruszarki otrzymujemy produkt rozdrobniony, a następnie podzielony (rozklasyfikowany na  $m$  sortymentów, których ceny sprzedaży są znane). Można przyjąć zgodnie z doniesieniami literaturowymi (Svedensten, Evertsson 2005), że celem modelowania jest maksymalizacja zysku określonego wzorem:

$$Z = \sum_{i=1}^m \left( c_m - \mu_m \left( K_{\text{tona}} + \frac{K_{\text{godz}}}{Q} \right) - K_{p \text{ tona}} \right) Q \gamma_m \quad (7.18)$$

gdzie:

- $c_m$  – cena  $m$ -tego sortymentu,
- $K_{\text{godz}}$  – koszt stały na godzinę,
- $K_{\text{tona}}$  – koszt zmienny na tonę,
- $K_{p \text{ tona}}$  – koszt początkowy (transportu, przesiewania) na tonę,
- $\mu_m$  – mnożnik (zmienny dla surowca),
- $\gamma_m$  – wychód  $m$ -tego sortymentu,
- $Q$  – wydajność kruszarki,  $Q = 75(2e + s)L\phi\rho$ ,
- $L$  – długość paszczy wlotowej,
- $e$  – szerokość szczeliny wylotowej,
- $s$  – skok szczęki,
- $\phi$  – współczynnik wypełnienia komory,
- $\rho$  – gęstość rozdrabnianego materiału.

Wychody sortymentów określa się na podstawie przyjętej dystrybuanty jako odpowiednie różnice. Specyfikacja wzoru zależy od interpretacji użytkownika, zwłaszcza podział kosztów ( $\mu_m$ ). Użycie odpowiednich programów komputerowych (Tumidajski i in. 2009) pozwala na przeprowadzenie stosownych obliczeń – wyznaczenie optymalnego schematu końcowego.

Wyznaczanie takiego schematu może być bardzo efektywne poprzez wykorzystanie folderów informacyjnych opracowanych przez producentów maszyn, które m.in. zawierają charakterystyki składu ziarnowego produktów rozdrabniania uzależnione od wielkości szczelin wylotowych kruszarek. Można wykorzystać wspomnianą aproksymację krzywych składu ziarnowego produktów, tak jak robi to Malewski (2013, 2014), używając wzoru  $\Phi(d) = 1 - e^{-cd^n}$  ( $n$  i  $c$  – parametry). W następnym podrozdziale zostaną przedstawione modele układów technologicznych produkcji kruszyw na podstawie prezentowanych przez producenta charakterystyk pracy kruszarek (PSP Engineering).

## 7.4. Modele układów technologicznych produkcji kruszyw mineralnych

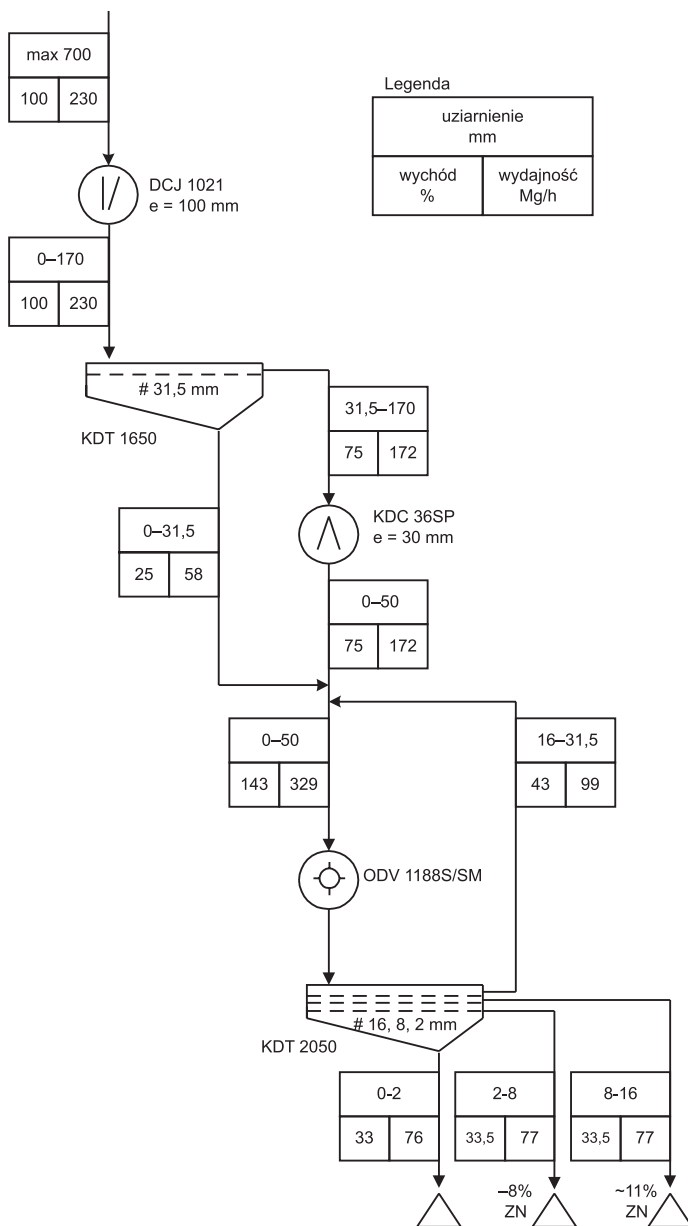
Na rysunku 7.4 (układ I) przedstawiono schemat ilościowo-jakościowy konwencjonalnego układu trójstadijalnego produkcji kruszyw granulowanych (grysów) o uziarnieniu 2–8 i 8–16 mm i wydajności 230 Mg/h. Produkt 0–2 mm to klasa ziarnowa powstała w wyniku przekruszenia, którego udział należy ograniczać. Układ składa się z kruszarki szczękowej, stożkowej oraz udarowej wertykalnej (kubizera) oraz dwóch przesiewaczy wibracyjnych jedno- i wielopokładowych.

Rysunki 7.5 (układ II) i 7.7 (układ IV) prezentują schematy ilościowo-jakościowe trójstadijalnych układów produkcji grysów <16 mm z zamkniętym obiegiem selektywnego i posobnego procesu przesiewania i rozdrabniania, które zostały zbudowane na założeniach układu I. Układ II składa się z tych samych maszyn oraz zainstalowanego dodatkowo przesiewacza wibracyjnego szczelinowego o rozmiarach szczelin 4 i 8 mm, natomiast układ IV na drugim i trzecim stadium rozdrabniania ma kruszarki stożkowe (granulatory). Zadaniem sit szczelinowych jest odsiewanie ziarn nieforemnych, które są ponownie dokruszane w kruszarce (kubizerze lub granulatorze stożkowym) wraz z produktem nadsitowym >16 mm.

Na rysunku 7.6 (układ III) przedstawiono schemat ilościowo-jakościowy dwustadijalnego układu produkcji grysów <16 mm z zamkniętym obiegiem selektywnego i posobnego procesu przesiewania i rozdrabniania. Układ składa się z kruszarki szczękowej, dwóch kruszarek udarowych listwowych z wałem poziomym, przesiewacza wibracyjnego wielopokładowego i przesiewacza wibracyjnego z sitem szczelinowym 4 i 8 mm. Układy II, III i IV stanowią graficzną prezentację projektów wynalazczych autora (Gawenda 2013b, Gawenda 2014a).

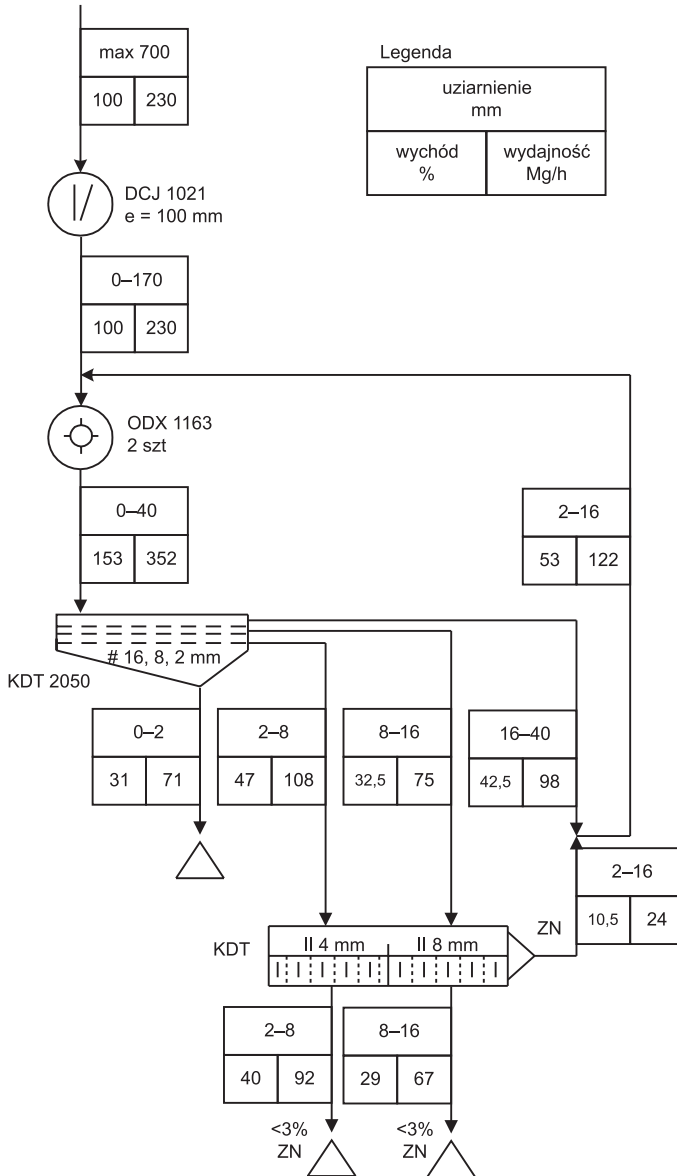
W tabeli 7.3 zestawiono prognozowane wskaźniki technologiczne procesu rozdrabniania kruszyw w czterech różnych układach technologicznych przy uwzględnieniu danych z tabel 6.10–6.13. W tabeli 7.3 podano moc zainstalowaną wybranych kruszarek i przesiewaczy, przerób poszczególnych urządzeń, stopnie rozdrobnienia, zawartości ziarn nieforemnych w klasach 2–8 i 8–16 mm oraz wychody i wydajności tych klas oraz klasy piaskowej <2 mm. Układy II, III i IV są korzystniejsze od układu I, gdyż charakteryzują się mniejszą ilością

powstających piasków <2 mm i mniejszą zawartością ziarn nieforemnych w produktach końcowych. Ze względu na zastosowanie posobnego układu przesiewaczy z sitami szczelinowymi można wyeliminować ziarna nieforemne w produktach końcowych z 8 i 11% do poniżej 3%, co w typowych układach jest niemożliwe do osiągnięcia w tak drobnych klasach ziarnowych.

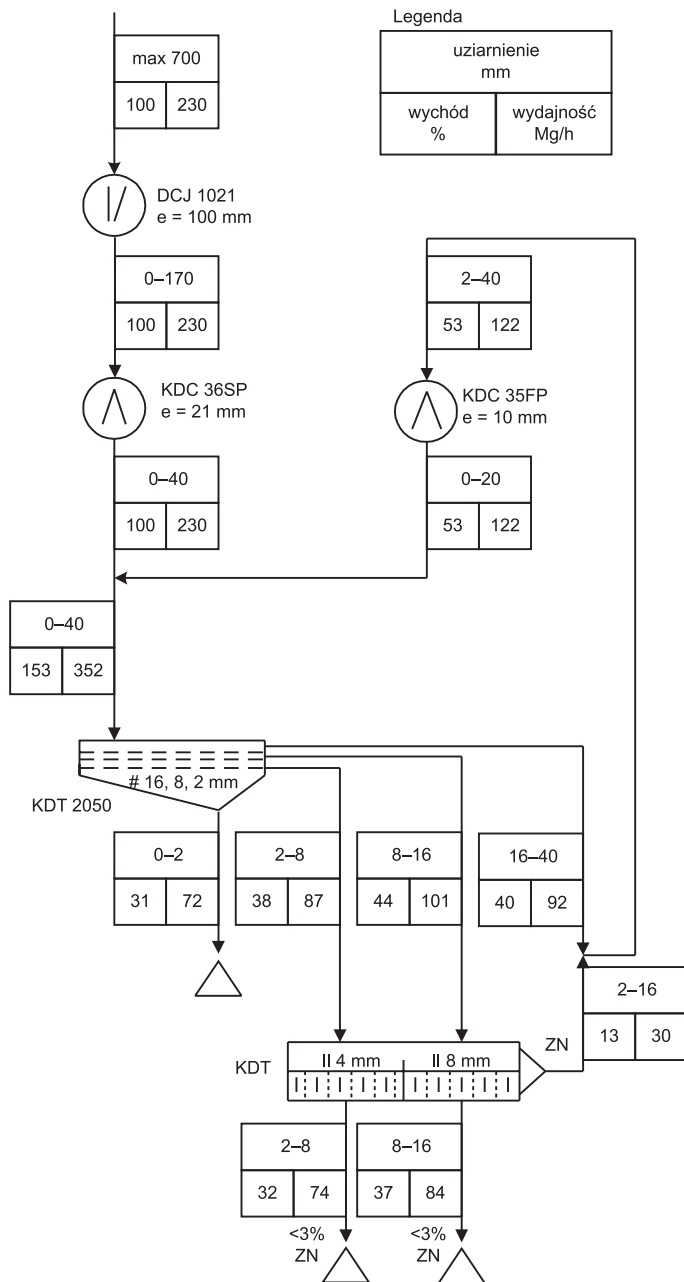


Rys. 7.4. Układ I – konwencjonalny trójstadialny układ produkcji grysów <16 mm





Rys. 7.6. Układ III – dwustadialny układ produkcji grysów <math><16\text{ mm}</math> z zamkniętym obiegiem selektywnego i posobnego procesu przesiewania i rozdrabniania



Rys. 7.7. Układ IV – trójstadiowy układ produkcji grysów <16 mm z zamkniętym obiegiem selektywnego i posobnego procesu przesiewania i rozdrabniania

**Tabela 7.3**

Zestawienie wskaźników technologicznych procesu rozdrabniania kruszyw

Układ i stadium rozdr.	Urządzenie	Moc [kW]	Przerób [Mg/h]	Wskaźnik zużycia energii [kWh/Mg]	Całkowite zużycie energii dla układu [kWh/Mg]	Maks. stopień rozdr.	Zawartość ziarn nieforemnych [%]		Wychód, [%] / wydajność [Mg/h]		
							2-8 mm	8-16 mm	0-2 mm	2-8 mm	8-16 mm
I układ	I stad. k. szczękowa	110	230	0,310	2,10	4,1	35	33/76	33,5/77	33,5/77	
	II stad. przesiewacz	15	230	0,048		-	-				
	II stad. k. stożkowa	250	172	1,060		3,4	20				
	III stad. k. udarowa wert.	260	329	0,680		3,1	8				
II układ	III stad. przesiewacz	18	330	0,041	1,78	-	-	29/67	30/69	41/94	
	I stad. k. szczękowa	110	230	0,310		4,1	35				
	II stad. przesiewacz	15	230	0,048		-	-				
	II stad. k. stożkowa	250	172	1,060		4,5	20				
III układ	III stad. przesiewacz	18,5	418	0,033	1,72	-	-	31/72	40/92	29/66	
	III stad. k. udarowa wert.	150	188	0,670		2,4	8				
	III stad. przesiew. szczel.	11	186	0,044		-	<3				
	I stad. k. szczękowa	110	230	0,310		4,1	35				
IV układ	II stad. k. udarowa horyz.	400	353	0,950	1,77	10,6	15	31/72	40/92	29/66	
	II stad. przesiewacz	15	353	0,031		-	-				
	II stad. przesiew. szczel.	11	183	0,044		-	<3				
	I stad. k. szczękowa	110	230	0,310		4,1	35				
IV układ	II stad. k. stożkowa	250	230	1,793	1,77	4,3	20	31/72	32/74	37/84	
	II stad. przesiewacz	18	340	0,039		-	-				
	II stad. k. stożkowa	160	122	0,957		2,5	20				
	II stad. przesiew. szczel.	11	188	0,043		-	<3				

W tabeli 7.3 zestawiono także wskaźniki zużycia energii dla poszczególnych urządzeń, przy przyjętym wskaźniku rzeczywistej mocy pobieranej do mocy znamionowej silnika wynoszącym 0,65 dla kruszarek szczękowych, 0,73 dla kruszarek stożkowych i 0,84 dla kruszarek udarowych. Wskaźniki te, podobnie jak zawartości ziarn nieforemnych, są średnimi wartościami, jakie występowały w warunkach rzeczywistych w zakładach przeróbki kruszyw mineralnych podczas opróbowań i analiz przemysłowych (Gawenda 2013a; Gawenda i in. 2013a). W tabeli 7.3 podano także całkowite zużycie energii dla każdego układu. Wartości te uzyskano w odniesieniu do całkowitej mocy zainstalowanej w danym układzie i przerobie całkowitym 230 Mg/h przy uwzględnieniu średniego wskaźnika zużycia energii wszystkich urządzeń wynoszącego 0,74. Układ II w porównaniu do układu I charakteryzuje się mniejszym zużyciem energii o 0,32 kWh/Mg, układ III w porównaniu do I układu o 0,38 kWh/Mg, a układ IV w porównaniu do I układu o 0,33 kWh/Mg. Takie korzystne wyniki uzyskano w wyniku zmniejszenia mocy w danym układzie, które było możliwe z uwagi na to, że część kruszyw foremnych w klasach <16 mm nie musi być powtórnie rozdrabniana, a układ III ma tylko dwa stadia rozdrabniania. Zainstalowane dodatkowe przesiewacze z sitami szczelinowymi wymagają niewielkiego zużycia, około 0,044 kWh/Mg.

W tabeli 7.4 zestawiono porównanie trzech układów technologicznych pod względem kosztów zużycia energii oraz elementów roboczych maszyn. Wartości obliczono na podstawie średnich wskaźników otrzymanych z przeprowadzonych ekspertyz (Gawenda i in. 2009, Gawenda i in. 2011). Koszt zużycia energii 1 kWh to 0,40 zł. Koszt zużycia elementów roboczych przyjęto następująco:

- kruszarka szczękowa 0,15 zł/Mg,
- kruszarka stożkowa 0,20 zł/Mg,
- kruszarka udarowa horyzontalna 0,56 zł/Mg,
- kruszarka udarowa wertykalna 0,46 zł/Mg,
- przesiewacz 0,018 zł/Mg.

**Tabela 7.4**

Porównanie kosztów i oszczędności układów technologicznych

Wskaźnik	Układ			
	I	II	III	IV
Zużycie energii [kWh/Mg]	2,10	1,78	1,72	1,77
Różnica zużycia energii względem I układu [kWh/Mg]	0	+0,32	+0,38	+0,33
Oszczędności zużycia energii względem I układu [zł/Mg]	0	+0,128	+0,152	+0,132
Koszt zużycia elementów roboczych maszyn [zł/Mg]	0,846	0,864	0,746	0,586
Oszczędności w zużyciu elementów roboczych względem I układu [zł/Mg]	0	-0,018	+0,100	+0,260
Razem oszczędności [zł/Mg]	0	+0,110	+0,252	+0,392
Oszczędność roczna przy wydajności zakładu 300 000 Mg/rok [zł/rok]	0	+33 000	+75 600	+117 600

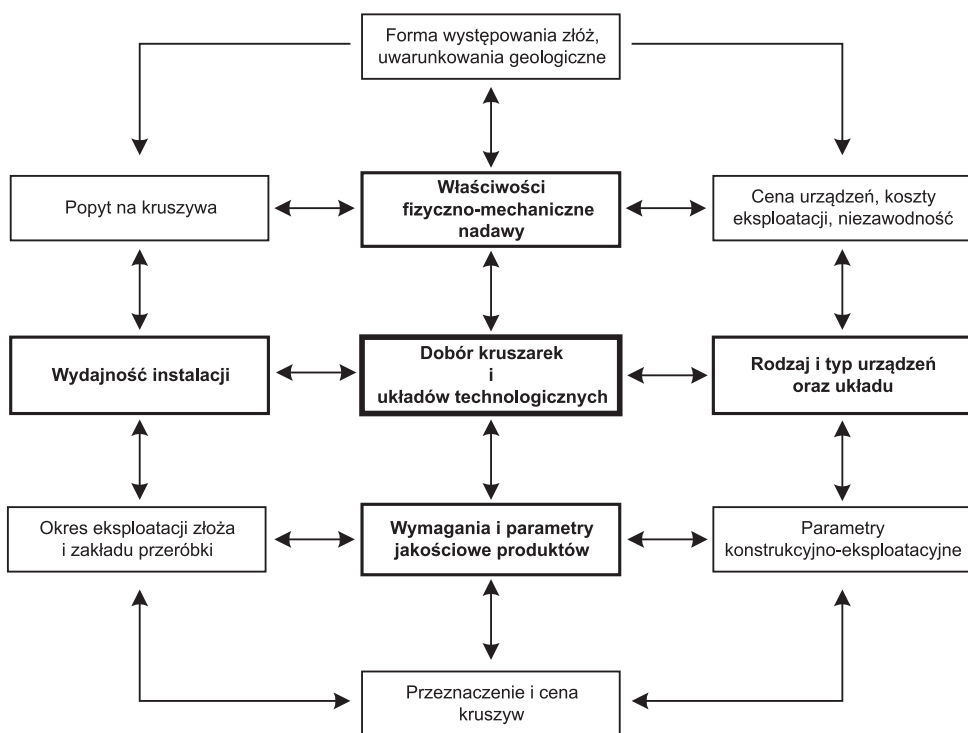
gdzie: (+) oszczędność, (-) straty



Spośród zaprezentowanych czterech układów technologicznych produkcji kruszyw wszystkie układy z zamkniętym obiegiem selektywnego i posobnego procesu przesiewania i rozdrabniania są korzystniejsze od konwencjonalnego układu I. Najkorzystniejszy okazuje się układ IV, ponieważ roczne oszczędności przy założonej wydajności zakładu 300 000 Mg/rok wynoszą około 117 000 zł. Należy podkreślić, że w szacunkach nie uwzględniono awarii i napraw remontowych maszyn, kosztów obsługi urządzeń oraz zakupu dodatkowych przesiewaczy czy odstąpienia od zakupu kruszarki stożkowej, której cena jest około 10-krotnie wyższa od ceny przesiewacza. Korzyści z zastosowania układu II, III i IV wynikają także z uzyskiwania kruszyw o bardzo niskiej zawartości ziarn nieforemnych (poniżej 3%) oraz o 4 i 2% mniejszej zawartości klasy 0–2 mm.

## 8. Podsumowanie

Zasady doboru kruszarek i układów technologicznych do produkcji kruszyw łamanych muszą być oparte na szczegółowej analizie wielu czynników. Do najważniejszych z nich, zgodnie z zaprezentowanym rysunkiem 8.1, należą właściwości fizyczno-mechaniczne surowca, parametry jakościowe produktów, rodzaj urządzeń i układu oraz wydajność instalacji przeróbczej, które wpływają pośrednio lub bezpośrednio na siebie oraz pozostałe czynniki. Przykład na rysunku 8.1 może posłużyć jako schemat analityczny do projektowania, modernizacji lub optymalizacji układu technologicznego, uwzględniający składowe czynniki uwarunkowań złożowych, eksploatacyjnych i produkcyjnych, które zostały omówione w poszczególnych rozdziałach niniejszej monografii.



Rys. 8.1. Ogólne czynniki wpływające na dobór kruszarek i układów technologicznych

Dobór układów technologicznych powinien uwzględniać uwarunkowania geologiczne złóż dla kopalń odkrywkowych (kamieniołomów) oraz żwirowo-piaskowych wraz z wymaganiami produktowymi. W niniejszej monografii wyróżniono trzy takie podstawowe modele instalacji do produkcji kruszyw (podrozdz. 5.2), tj:

- 1) ze zwięzłych surowców skalnych o podstawowym uziarnieniu produktów 0–63 (120) mm, (w wąskich zakresach uziarnienia lub o ciągłym uziarnieniu w zakresie 0–31,5 (63) mm),
- 2) z surowców żwirowo-piaskowych 0–31,5 (63) mm, rozklasyfikowanych na różne frakcje, które również mogą być przekruszone (częściowo łamane); ewentualnie z surowców piaskowych 0–1 (2) mm, rozklasyfikowanych na drobne frakcje ziarnowe,
- 3) z surowców silnie zanieczyszczonych pochodzących ze zwięzłych surowców skalnych lub żwirowo-piaskowych, jako model do produkcji kruszyw uszlachetnionych determinowany jakością produktów.

O stopniu zaawansowania technologii decydują rodzaj litologiczny surowca i jego właściwości fizyczno-mechaniczne, które są charakteryzowane wielkością uziarnienia urobku (ziarno maksymalne lub średnie, punkt piaskowy itp.), zwięzłością, urabialnością i twardością, stopniem zanieczyszczenia surowca i rodzajem zanieczyszczeń. Ponadto w doborze maszyn i układów muszą być uwzględnione wymagania jakościowe produktów dotyczące wielkości i kształtu ziarn, czystości gotowych kruszyw (zawartość pyłów i zanieczyszczeń obcych), a także inne wytyczne określone przez odpowiednie normy (dotyczące właściwości fizyczno-chemicznych i mechanicznych) (podrozdz. 2.7).

W zależności od występowania nadkładu o silnie zróżnicowanych właściwościach zwietrzałych skał i stopnia zanieczyszczeń stosuje się odsiewanie wstępne na wyrobisku bądź w zakładzie przeróbczym. Proces produkcji kruszyw oparty jest na wielostadialnym rozdrabnianiu w kruszarkach oraz na wielostadialnym przesiewaniu materiału z zawrotem do kruszarki lub skierowaniem surowca do kruszarki w kolejnym stadium. W zależności od wielkości uziarnienia nadawy stosuje się taką liczbę stadiów rozdrabniania i przesiewania, aby cały materiał rozdrobnić do wymaganego uziarnienia końcowego produktów takich jak tłuczeń, kliniec czy kruszywa łamane granulowane.

W przypadku eksploatacji skał zwięzłych lub luźnych żwirowych zanieczyszczonych surowcami ilastymi konieczne jest wprowadzenie operacji uszlachetniania, czyli odsiewu wstępnego i wzbogacania, jak również płukanie i odwadnianie. Z procesami płukania prowadzonymi w różnego rodzaju urządzeniach płuczących (płuczki mieczowe, bębnowe, hydrauliczne, przesiewacze płuczące) wiązane są procesy odwadniania produktów i oczyszczania wody. Są to operacje technologiczne, które znacznie podnoszą koszty przeróbki i produkcji kruszyw (podrozdz. 5.2).

Prawidłowy wybór rodzaju układów technologicznych jest kluczowy w projektowanej instalacji (podrozdz. 5.1), ponieważ musi uwzględniać rodzaje i typy maszyn (rozdz. 4) charakteryzujących się różnymi parametrami konstrukcyjno-eksploatacyjnymi, wydajnościami itp., dostosowanymi do zmiennych właściwości fizyczno-mechanicznych nadawy. W tabeli 8.1 zestawiono rodzaje i charakterystyki układów technologicznych wykorzystywanych do produkcji kruszyw łamanych. Układy te mają zarówno wady, jak i zalety, które w przypadku zrealizowania określonego celu mogą nabierać różne znaczenie.

**Tabela. 8.1**

Charakterystyka układów technologicznych

Rodzaj układu	Zalety	Wady
Otwarty	wyższa wydajność, unikanie nadmiernej ilości pyłów, minimalizacja zużycia energii i elementów roboczych maszyn	brak kontroli nad pojawiającym się nadziarnem w produktach, niższa jakość kruszyw, wyższy udział ziarn nieforemnych
Zamknięty	możliwość ograniczania powstawania nadmiernej ilości pyłów, zmniejszenie zużycia energii, lepsze parametry wytrzymałościowe kruszyw, wyższa zawartość ziarn foremnych, kontrola nadziarna w produktach	niższa wydajność, konieczność zastosowania urządzeń o większej wydajności niż w układzie otwartym
Hybrydowy	wyższa efektywność rozdrabniania, zmniejszenie zużycia energii, lepsze parametry wytrzymałościowe kruszyw, wyższa zawartość ziarn foremnych, kontrola nadziarna i podziarna w produktach, łatwość dostosowania się do zmiennych właściwości nadawy	wymagana zaawansowana kontrola i sterowanie procesem
Jednostadialny	prostość układu i obsługi, niskie koszty inwestycyjne, wysoka wydajność	ograniczone zastosowanie, niska jakość kruszyw
Wielostadialny	zaawansowana technologia, wysoka wydajność, wysoka jakość kruszyw, niskie koszty jednostkowego zużycia energii	wymagana zaawansowana kontrola i sterowanie procesem, wysokie nakłady inwestycyjne
Szerogowy	mniejsza liczba zabudowanych maszyn, niższe koszty inwestycyjne	prześcieje w przypadku awarii lub remontu
Równoległy	ograniczenie prześciejów w przypadku awarii lub remontu, wyższa jakość i różnorodność produktów	wyższe nakłady inwestycyjne, większa liczba zabudowanych maszyn
Selektywny	możliwość utworzenia zawrotu kruszywa, wyższa wytrzymałość i zawartość ziarn foremnych, mniejsza ilość pyłów	mniejsza wydajność, zaawansowany układ
Nieselektywny	wyższa wydajność, mniej skomplikowany technologicznie	niższa jakość kruszyw
Pracujący na sucho	brak konieczności zaopatrzenia w wodę, prosty i tani układ, mniejsza liczba maszyn, brak konieczności odwadniania lub suszenia produktów	niższa skuteczność procesu przesiewania (podziarno), możliwość wzrostu zanieczyszczeń, duża wrzliwość na zmianę właściwości nadawy (wilgotność, zanieczyszczenia ilaste), konieczność eliminowania zapylenia
Pracujący na mokro	wyższa skuteczność oczyszczania kruszywa z zanieczyszczeń ilastych i pyłu, wyższa skuteczność przesiewania (wyższa ostrość rozdziatu i mniejsza zawartość podziarna), ograniczenia w zastosowaniu dla niektórych kruszyw, brak zapylenia	konieczność stosowania gospodarki wodno-mulowej, większe zużycie energii, wymagany dostęp do wody, konieczność odwadniania produktów, większa liczba maszyn

W zależności od rodzaju układu technologicznego procesy kruszenia prowadzone są w układach jedno-, dwu- lub wielostadialnych (rozdz. 5, podrozdz. 6.4, 6.5). Układy wielostadialne na wstępnych stadiach kruszenia wyposażone mogą być w kruszarki szczękowe, stożkowe (żyratory) lub udarowe (horyzontalne) listwowe lub młotkowe. Na wtórnych i końcowych stadiach rozdrabniania pracują najczęściej kruszarki stożkowe (granulatory), udarowe z wałem poziomym i pionowym (kubizery pracujące w systemie kamień-kamień lub kamień-metal), rzadziej granulatory szczękowe (podrozdz. 6.5).

Odpowiedni dobór rodzaju kruszarki z uwzględnieniem przesiewacza (klasyfikatora) zainstalowanego przed kruszarką lub po kruszarce pozwoli osiągnąć uziarnienie o pożądanych wychodach poszczególnych klas ziarnowych (podrozdz. 6.4). Prawidłowo pracujący przesiewacz ma również wpływ na wydajność układu, jakość kruszyw oraz prawidłowe funkcjonowanie pozostałych współpracujących maszyn (żywność) (podrozdz. 6.6).

Kruszarki dobiera się odpowiednio do właściwości fizyczno-mechanicznych danego surowca, uwzględniając przede wszystkim jego cechy decydujące o podatności na różne rodzaje działań kruszących. Materiały twarde korzystnie jest rozdrabniać metodą udarową, mniej twarde przez zgniatanie, miękkie przez zgniatanie, łamanie lub ścieranie, a ilaste i lepkie przez ścieranie. Do rozdrabniania ziarn grubych stosuje się zgniatanie, do średnich – zgniatanie lub udar, do drobnych ścieranie lub udar (rozdz. 4 i podrozdz. 6.1).

Niezależnie od zróżnicowanej twardości skał należy zwracać uwagę na optymalizację procesu rozdrabniania z uwzględnieniem dostosowania wielkości uziarnienia urobku oraz maszyn rozdrabniających i przesiewających współpracujących ze sobą na każdym stadium (podrozdz. 6.6). Istotnym problemem optymalizacji układu są maksymalne ziarna występujące w urobku nadawy, których ilość może być znaczna lub ograniczona, co ma istotne znaczenie dla doboru odpowiedniej kruszarki wstępnego kruszenia, charakteryzującej się określonym rozmiarem komory wlotowej. W przypadku niewielkiej ilości ziarn nadgabarytowych korzystnie jest dobrać kruszarkę dostosowaną do wielkości mniejszego rozmiaru maksymalnego ziarna w nadawie, np. do wielkości ziarna  $d_{95}$ . Występujące wtedy ryzyko zaklinowania się ziarn nadawy w mniejszej gardzieli kruszarki (celowo dobranej, tańszej i wydajniejszej) można zniwelować przez dokruszanie ziarn nadgabarytowych ( $d_{95} - d_{\max}$ ) młotem hydraulicznym.

Prawidłowo dobrana moc silnika oraz optymalny kształt elementów roboczych do rozdrabnianych surowców skalnych umożliwiają osiągnięcie wysokiej sprawności maszyny i optymalnego zużycia energii w odniesieniu do mocy znamionowej (podrozdz. 6.3). Do określania właściwości surowca stosuje się urządzenia analityczne, w których podczas prowadzonych prób testowych można określić energochłonność dobieranej maszyny, ścieralność udarową, abrazywność, kruszalność, gęstość, wilgotność, skład ziarnowy, zawartość ziarn nieforemnych (podrozdz. 6.1).

W praktyce bardzo często wykorzystuje się informacje o kształcie i wielkości uziarnienia produktów przy projektowaniu instalacji lub eksploatacji maszyn. Z tego powodu firmy zajmujące się produkcją maszyn rozdrabniających prowadzą doświadczalne badania pozwalające ustalić granulację produktów rozdrabniania w zależności od wielkości szczeliny wylotowej (podrozdz. 6.2). Dysponując pełnym zakresem danych dotyczących parametrów technologicznych maszyn oraz krzywych składów ziarnowych produktów rozdrabniania,

uzależnionych od szczeliny wylotowej lub prędkości obrotowej wału kruszarki, można przewidywać efekty pracy urządzeń przy wykorzystaniu modeli stochastycznych i ekonometrycznych (podrozdz. 7.2, 7.3).

Analizy produktów rozdrabniania są podstawą wyznaczania wielu wskaźników pracy układów technologicznych, dzięki którym istnieje możliwość weryfikacji poprawności i zasadności działania maszyn w węzłach technologicznych produkcji kruszyw. Dotyczy to zarówno projektowanych, jak i modernizowanych układów. W tym celu do porównywania i optymalizacji pracy układów lub poszczególnych maszyn powinno się uwzględnić (rozdz. 3):

- wskaźniki oceny jakości produktu rozdrabniania,
- wskaźniki określające wpływ efektywności pracy urządzeń na zmianę najważniejszych właściwości surowca,
- wskaźniki charakteryzujące procesy pod względem wydajności, zużycia energii lub elementów roboczych maszyn.

W celach porównawczych maszyn powinno się również odnotować parametry techniczno-konstrukcyjne maszyn, jak: wielkość komory roboczej i szczeliny wylotowej, prędkość wirujących elementów roboczych, moc silnika, powierzchnia sita, wielkość i kształt oczka sita, prześwit, amplituda i częstość drgań itp.

Porównania układów technologicznych produkujących kruszywa mineralne można dokonać na podstawie oceny efektów końcowych produktów jak wielkość i kształt uziarnienia, a także wskaźników (technologicznych, energetycznych, ekonomicznych) charakteryzujących pracę urządzeń w danym układzie, które mogą być również zależne od siebie. Energochłonność procesu rozdrabniania zależy od wydajności maszyn, która zależna jest od parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych urządzeń oraz właściwości fizyczno-mechanicznych surowca. Przy określaniu wydajności maszyny należy brać pod uwagę stopień rozdrobnienia uzyskany przy danym przerobie, a przy energochłonności ilość zużytej energii pozwalającą doprowadzić określoną jednostkę masy materiału do pożądanego uziarnienia w określonym czasie. Przy wyborze właściwych urządzeń należy kierować się także kolejnym bardzo ważnym wskaźnikiem, jakim jest żywotność elementów roboczych i koszty remontowe.

W celu porównania różnych maszyn (kruszarki i przesiewacze) pracujących w układach mobilnych i stacjonarnych z zawrotem lub bez zawrotu, w ocenie można wziąć pod uwagę koszty zużycia paliwa dla układów mobilnych lub energii elektrycznej dla układów stacjonarnych, jednostkowe zużycie energii (w przeliczeniu na dżule lub kilowatogodziny), maksymalne stopnie rozdrobnienia oraz proponowany przez autora pracy wskaźnik  $W_j$  [MJ/Mg], będący ilorazem zużycia energii i maksymalnego stopnia rozdrobnienia przy jednokrotnym pomniejszeniu uziarnienia nadawy o masie jednej tony surowca (rozdz. 3, 6.3).

W niniejszej monografii szczególną uwagę poświęcono produkcji kruszyw o zwiększonej zawartości ziarn foremnych. Mając na uwadze pewne reguły dotyczące procesów kruszenia, można w łatwy sposób usprawnić proces technologiczny, który może przynosić efekty ekonomiczne i technologiczne. Przykładowo wraz ze wzrostem wytrzymałości kruszyw (twardości, odporności na rozdrabnianie, wytrzymałości na ściskanie itp.) coraz trudniej jest nadać ziarnom kształt foremny w procesie rozdrabniania. Zjawisko to zaobserwowane w licznych badaniach określa kolejną regułę – największy udział ziarn nieforemnych pojawia się w najdrobniejszych

klasach ziarnowych. Dotychczasowe typowe układy produkcji kruszyw rozdrabniają surowce zarówno z ziarnami foremnyymi, jak i nieforemnymi, narażając gotowe produkty na zbyt częste przekruszanie ziarn, wzrost pyłów oraz większe zużycie energii i elementów roboczych kruszarek. W celu usprawnienia technologii autor zaproponował model produkcji kruszyw łamanych o wysokiej zawartości ziarn foremnych (co najmniej 98%) w układzie z zamkniętym obiegiem selektywnego procesu posobnego przesiewania i rozdrabniania bez konieczności zwiększania liczby stadiów rozdrabniania (według zgłoszeń patentowych) (podrozdz. 5.2). Dla przykładu porównano konwencjonalny trójstadiowy układ produkcji grysów <16 mm oraz trzy korzystniejsze innowacyjne układy technologiczne w postaci maszynowych schematów ilościowo-jakościowych. Najkorzystniejszy układ może przynieść około 117 000 zł rocznych oszczędności przy założonej wydajności zakładu 300 000 Mg/rok (podrozdz. 7.4).

# Literatura

1. Baic I., Góralczyk S. 2010: *Foresight w zakresie priorytetowych i innowacyjnych technologii zagospodarowania odpadów pochodzących z górnictwa węgla kamiennego*. Praca zbiorowa, red. nauk.: Klich A., Kozioł A., Monografia „Paliwo – Bezpieczeństwo – Środowisko”, ITG KOMAG, Gliwice, s. 31–43.
2. Baic I., Witkowska-Kita B., Lutyński A., Blaschke W., Kozioł W., Piotrowski Z. 2011: *Ocena innowacyjności technologii zagospodarowania odpadów pochodzących z górnictwa węgla kamiennego – metoda Delphi*. Przegląd Górniczy, t. 67, nr 5, s. 14–17.
3. Banaszewski T. 1971: *Wibracyjna kruszarka szczękowa*. Patent PRL nr 62930.
4. Banaszewski T. 1990: *Przesiewacze*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.
5. Beckmann G. 2003: *Auswahl von Brechertypen und Rohmaterialien zur Erzielung einer bestimmten Kornform-bzw. Korngrößenverteilung mit Hilfe der „Digitalen Bildverarbeitung“*. Brechen und Sieben in der Mineralrohstoffindustrie – Fachseminar 27–29 Februar. Bergmännischer Verband Österreichs, Technisch-Wissenschaftlicher Verein, Leoben.
6. Bęben A., Bogusz P., Głapa W., Marianowski J. 1988: *Maszyny i urządzenia do odkrywkowego urabiania surowców skalnych wybranymi technologiami*. Skrypty Uczelniane AGH nr 1130, Wydawnictwa AGH, Kraków.
7. Bęben A., Naziemiec Z., Olejarz J., Pabis J. 1997: *Perspektywy rozwoju górnictwa skalnego branży wiążących materiałów budowlanych w zakresie geologii i techniki urabiania*. Krajowy Kongres Górnictwa Skalnego, Kielce, 21–22 maja.
8. Blaschke S. 1981: *Przeróbka mechaniczna kopalni. Cz. I*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.
9. Blaschke Z., Brożek M., Mokrzycki E., Ociepa Z., Tumidajski T. 1983: *Górnictwo. Cz. V. Zarys technologii procesów przeróbczych*. Skrypty Uczelniane AGH nr 931, Wydawnictwa AGH, Kraków.
10. Brach I. 1963: *Podstawowe problemy w procesach rozdrabniania mineralów*. Ośrodek Wydawnictw IOMB, Warszawa.
11. Broadbent S.R., Callcott T.G. 1956: *A matrix analysis of processes involving particle assemblies*. Philosophical Transaction of the Royal Society of London, Serie A 249, s. 99–123.
12. Broch E., Franklin J.A. 1972: *The point-load strength test*. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, vol. 9, s. 669–697.
13. Bromowicz J. 2001: *Zakres zmian właściwości fizyczno-mechanicznych skał w procesie przeróbki kruszywa lamanych*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, nr 93, s. 13–31.



14. Brożek M., Mączka W., Tumidajski T. 1995: *Modele matematyczne procesów rozdrabniania*. Rozprawy Monografie nr 35, Wydawnictwa AGH, Kraków.
15. Brożek M., Tumidajski T., Włodarczyk W. 1997: *Pewne aspekty estymacji macierzy rozdrabniania w kruszarkach szczękowych*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, zeszyt specjalny, t. 13, s. 81–92.
16. Cardu M., Clerici C., Morandini A., Ocella E. 1993: *An experimental research on the comminution law and work index in jaw*. XVII International Mineral Processing Congress, Sydney 23–28 maja.
17. Chirone R., Massimilla L. 1989: *The application of Weibull theory to primary fragmentation of coal during devolatilization*. Powder Technology, vol. 57, s. 197–212.
18. Cipo F. 2003: *Badanie zależności pomiędzy właściwościami fizyczno-mechanicznymi skal magmowych a właściwościami geomechanicznymi magmowych masywów skalnych*. Górnictwo i Geoinżynieria, R. 27, z. 2, s. 135–160.
19. Clark J.H. 1993: *The role of rock fabric in controlling crushing strength. Numerical experiments*. Proc. XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney, 23–28 May, vol. 1, s.187–192.
20. Daniel M.J., Morrell S. 2004: *HPGR model verification and scale-up*. Minerals Engineering, vol. 17, s.1149–1161.
21. Dietrych J., Makary B., Nowak A., Sztaba K. 1976: *Klasyfikacja. Dział VI [w:] Poradnik górnika*, red. Z. Szczygieł-Antoniak, t. 5, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, s. 336–371.
22. Drzymała J. 2001: *Podstawy mineralurgii*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
23. Drzymała Z., Kurek B. 1985: *Problemy ujednolicenia maszyn kruszących*. Cement – Wapno – Gips, nr 5, s. 131–137.
24. Drzymała Z., Sidor J., Kaczmarczyk S., Macków E. 1986: *Kruszarka wibracyjna*. Patent PRL nr 133128.
25. DTR 1993: *Reference Manual a Nordberg Group Company*.
26. DTR 2000: *Crushing Plant Manual, Svedala Crushing and Screening*, Svedala.
27. DTR 2009: *Oryginalna instrukcja obsługi Mobiscreen MS 18 Z-AD Nr A K053 F20009618 A PL oraz Mobirex MR 170 Z Technische Informationen*, Wydawnictwo Kleemann GMBH.
28. Dubiński J., Turek M., Aleksa H. 2006: *Postęp w technologii i przeróbce mechanicznej węgla w polskich kopalniach. Innowacyjne systemy przerobcze surowców mineralnych*. Wydawnictwo Centrum Mechanizacji Górniczej KOMAG, Gliwice.
29. Duda W.H. 1975: *Zement Daten Buch*. Internationale Verfahrenstechniken der Zementindustrie, Bauverlag GMBH Wiesbaden und Berlin.
30. Dulewski J. 2009: *Konsekwencje dla przemysłu wydobywczego wynikające z nowych uwarunkowań prawnych dotyczących odpadów*. Przegląd Górniczy, nr 10, s. 27–32.
31. Dzik T., Gawenda T., Krawczykowska A., Krawczykowski D., Marciniak-Kowalska J. 2014: *Opracowanie i weryfikacja w skali pilotowej technologii ciśnieniowego zgazowania węgla w reaktorze z cyrkulującym złożem fluidalnym przy wykorzystaniu CO<sub>2</sub> jako czynnika zgazowującego. Cz. 1. Przygotowanie węgla do zgazowania naziemnego w gazogeneratorze fluidalnym z wykorzystaniem procesów mechanicznych inżynierii mineralnej – badania wstępne*. Wydawnictwo Grafpol, Wrocław.

32. Eloranta J. 2006: *Sposoby wpływania na jakość kruszyw*. VI Konferencja „Kruszywa Mineralne – Surowce – Rynek – Technologie – Jakość”, OWPW, Wrocław – Szklarska Poręba, 26–28 kwietnia 2006.
33. Epstein B. 1948: *Logarithmico-normal distributions in breakage of solids*. Industrial and Engineering Chemistry Research, vol. 40, s. 2289–2291.
34. Foszcz D., Włodarczyk W. 1999: *Wpływ warunków rozdrabniania dolomitów w kruszarkach szczękowych na skład ziarnowy produktów*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 15, zeszyt specjalny, s. 317–325.
35. Foszcz D., Saramak D., Tumidajski T. 2000: *Ocena metod aproksymacji krzywych składu ziarnowego produktów kruszenia*. II Ogólnopolska Konferencja „Operacje Mechaniczne Inżynierii Procesowej”. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej nr 838, Inżynieria Chemiczna i Procesowa, zeszyt 27, s. 77–84.
36. Frankiewicz W., Głapa W. 2007a: *Górnictwo i przeróbka kamienia łamanego* [w:] Ney R. (red.): *Surowce mineralne Polski. Surowce skalne. Kruszywa mineralne*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
37. Frankiewicz W., Głapa W. 2007b: *Górnictwo i przeróbka kruszyw naturalnych żwirowych i piaskowych* Ney R. (red.): *Surowce mineralne Polski. Surowce skalne. Kruszywa mineralne*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
38. Gabzdyl W. 1983: *Krajowe surowce skalne przemysłu kamienia budowlanego i kruszywa łamanego. Dział VI* [w:] *Poradnik górnika*, red. Z. Szczygieł-Antoniak, t. 5. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, s. 165–202.
39. Gaudin A.M., Meloy T.P. 1962: *Model and a comminution distribution equation for single fracture*. Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical Engineers, vol. 223, s. 44–43.
40. Gawenda T. 2004: *Ocena wpływu właściwości fizyko-chemicznych surowców skalnych i parametrów technologicznych kruszarek szczękowych na efekty rozdrabniania*. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków.
41. Gawenda T. 2009a: *Klasyfikacja drobnych piasków w klasyfikatorach przepływowych hydraulicznych poziomo- i pionowoprądowych*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 3, s. 60–66.
42. Gawenda T. 2009b: *Główne aspekty rozdrabniania twardych surowców mineralnych w wysokociśnieniowych prasach walcowych*. Górnictwo i Geoinżynieria, R. 33, z. 4, s. 89–100.
43. Gawenda T. 2009c: *Ocena innowacyjności mobilnego zestawu sortującego-kruszącego z kruszarką szczękową firmy Terex Pegson – model XR 400*. Ekspertyza wykonana dla firmy R.Z.T.C. Karpala, AGH, Kraków.
44. Gawenda T. 2009d: *Analiza zawartości ziaren nieforemnych w kruszywach pochodzących z odpadów przywęglowych uzyskiwanych w kruszarkach szczękowych*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 1, s. 22–27.
45. Gawenda T. 2010a: *Rozdrabnianie surowców skalnych w kruszarce szczękowej typu L44.41. Cz I*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 1, s. 68–72.
46. Gawenda T. 2010b: *Rozdrabnianie surowców skalnych w kruszarce szczękowej typu L44.41. Cz II*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 2, s. 37–42.
47. Gawenda T. 2010c: *Problematyka doboru maszyn kruszących w instalacjach produkcji kruszywa mineralnych*. Górnictwo i Geoinżynieria, R. 34, z. 4 s. 195–209.

48. Gawenda T. 2010d: *Kruszarki wirnikowe udarowe w produkcji kruszyw mineralnych*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 4, s. 66–71.
49. Gawenda T. 2011a (niepublikowane): *Określenie typowych układów przerobczych budowlanych kruszyw żwirowo-piaskowych i lamanych*. Praca realizowana w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka pt.: *Strategie i scenariusze technologiczne zagospodarowania i wykorzystania złóż surowców skalnych* (nr POIG.01.03.01-00-001/09).
50. Gawenda T. 2011b (niepublikowane): *Identyfikacja modelowych układów technologicznych i ich wskaźników przeróbki mechanicznej kruszyw*. Praca realizowana w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka pt.: *Strategie i scenariusze technologiczne zagospodarowania i wykorzystania złóż surowców skalnych* (nr POIG.01.03.01-00-001/09).
51. Gawenda T. 2011c (niepublikowane): *Analiza zależności energochłonności od wydajności dla wybranych układów przerobczych*. Praca realizowana w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka pt.: *Strategie i scenariusze technologiczne zagospodarowania i wykorzystania złóż surowców skalnych* (nr POIG.01.03.01-00-001/09).
52. Gawenda T. 2011d (niepublikowane): sprawozdanie ze stażu naukowo-technicznego w firmie SBM Mineral Processing GmbH w Laakirchen (Austria), odbytego w ramach projektu „Fabryka Inżynierów” Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki współfinansowanego z Europejskiego Funduszu Społecznego w terminie 1–31 lipca 2011 r., AGH Kraków.
53. Gawenda T. 2012a: *Analiza efektów rozdrabniania w granulatorze stożkowym w zależności od wielkości uziarnienia nadawy i jego obciążenia*. *Górnictwo i Geologia XVII*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej – Studia i Materiały 134, s. 71–83.
54. Gawenda T. 2012b: *Jaka kruszarka, taka jakość – rozdrabnianie kruszyw w różnych kruszarkach i wielostadialnych układach*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 5, s. 16–20.
55. Gawenda T. 2012c: *Przesiewanie w praktyce: ocena procesu*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 3, 42–47.
56. Gawenda T. 2013a: *Analiza porównawcza mobilnych i stacjonarnych układów technologicznych przesiewania i kruszenia*. *Rocznik Ochrona Środowiska*, t. 15, s. 1318–1335.
57. Gawenda T. 2013b: projekt wynalazczy pt.: *Sito do materiałów trudno przesiewalnych*. Opis zgłoszeniowy wynalazku nr PL.402726 A1 z dnia 11.02.2013 r. Pismo CTT-owi-1/200/2013 AGH Kraków. Opublikowano 12.11.2013 r. Biuletyn Urzędu Patentowego, nr 23, s. 10.
58. Gawenda T. 2013c: *Wpływ rozdrabniania surowców skalnych w różnych kruszarkach i stadiach kruszenia na jakość kruszyw mineralnych*. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 29, z. 1, s. 53–65.
59. Gawenda T. 2014a: projekt wynalazczy pt.: *Układ urządzeń do produkcji kruszyw foremnych*. Pismo CTT-owi-1/333/2013/100 z dnia 13.06.2013 r. AGH Kraków, nr P.408045 z dnia 28.04.2014 r.
60. Gawenda T. 2014b: projekt wynalazczy pt.: *Układ urządzeń do produkcji kruszyw nieforemnych*. Pismo CTT-owi-1/333/2013/100 z dnia 13.06.2013 r. AGH Kraków, nr P.408046 z dnia 28.04.2014 r.
61. Gawenda T. 2014c: *Nowe rozwiązanie konstrukcyjne sita – większe możliwości*. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „Nowoczesne Kopalnie Żwiru i Piasku”, Tarnów, 10–11 czerwca, Wydawnictwo BMP, Racibórz, s. 25–33.

62. Gawenda T., Momot N. 2012: *Ziarna bardziej foremne. Układy rozdrabniania i klasyfikacji a jakość kruszyw z odpadów przywęglowych*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 2, s. 18–22.
63. Gawenda T., Naziemiec Z. 2003: *Sposoby poprawy kształtu ziaren kruszyw mineralnych w kruszarkach szczękowych*. Inżynieria Mineralna, zeszyt specjalny nr S3, s. 115–124.
64. Gawenda T., Naziemiec Z. 2010 (niepublikowane): *Ocena pracy mobilnego przesiewacza typu MS18Z-AD firmy Kleemann użytkowanego w ZG „Kopalnia Łągów V” w Nowym Stawie*. Ekspertyza zlecona przez ZG „Kopalnia Łągów V” w Nowym Stawie.
65. Gawenda T., Olejnik T. 2008: *Produkcja kruszyw mineralnych z odpadów powęglowych w Kompanii Węglowej S.A. na przykładzie wybranych kopalń*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 24, z. 2/1, s. 27–42.
66. Gawenda T., Saramak D. 2010: *Wysokociśnieniowe prasy walcowe w przemyśle wapienno-cementowym*. Magazyn Autostrady: Budownictwo Drogowo-Mostowe, nr 11, s. 81–86.
67. Gawenda T., Saramak D. 2014: *Influence of selected work parameters of the rolling screen operation on screening effects*. Physicochemical Problems of Mineral Processing, vol. 50, iss. 1, s. 337–347.
68. Gawenda T., Skotnicki A. 2008: *Analiza wpływu wielkości uziarnienia nadawy na efekty rozdrabniania w kruszarkach walcowych*. Konferencja „Kruszywa Mineralne – Surowce – Rynek – Technologie – Jakość”, Prace Naukowe Instytutu Górnicztwa Politechniki Wrocławskiej, nr 121, Konferencje nr 50, OWPW s. 59–68.
69. Gawenda T., Saramak D., Tumidajski T. 2005: *Modele regresyjne rozdrabniania surowców skalnych w kruszarce szczękowej*. Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej, nr 22, seria Inżynieria Środowiska, s. 659–670.
70. Gawenda T., Naziemiec Z., Tumidajski T., Saramak D. 2006: *Sposoby optymalizacji składu ziarnowego i kształtu ziaren kruszyw mineralnych w produktach kruszarek szczękowych*. Górnictwo i Geoinżynieria, R. 30, z. 3/1, s. 109–124.
71. Gawenda T., Foszcz D., Saramak D., Naziemiec Z., Ranosz R., Tumidajski T., Trybalski K. 2009: *Analiza możliwości techniczno-technologicznych wprowadzenia II stopnia kruszenia w O/ZWR Rejon Rudna*. Ekspertyza zlecona przez KGHM Polska Miedź S.A., Kraków.
72. Gawenda T., Wodziński P., Naziemiec Z., Foszcz D., Saramak D., Ranosz R., Tumidajski T., Trybalski K. 2011: *Analiza możliwości optymalizacji II stopnia przesiewania (PWR3) w O/ZWR Lubin*. Ekspertyza zlecona przez KGHM Polska Miedź S.A., Kraków.
73. Gawenda T., Foszcz D., Głuc K. 2013a: *Comparison of energetic efficiency of stationary and mobile systems on the example of mineral aggregates production in Kieleckie Kopalnie Surowców Mineralnych S.A.* AGH Journal of Mining and Geoen지니어ing, vol. 37, no. 2, s. 25–41.
74. Gawenda T., Naziemiec Z., Walerak A. 2013b: *Badania wybranych właściwości kruszyw pochodzących z odpadów wyrobów ceramicznych oraz betonu z ich udziałem*. Rocznik Ochrona Środowiska, tom 15, nr 3, s. 2003–2021.
75. Gawenda T., Krawczykowski D., Marciniak-Kowalska J. 2014: *Opracowanie i weryfikacja w skali pilotowej technologii ciśnieniowego zgazowania węgla w reaktorze z cyrkulującym złożem fluidalnym przy wykorzystaniu CO<sub>2</sub> jako czynnika zgazowującego. Cz. 2: Rozdrabnianie, klasyfikacja granulometryczna i wzbogacanie węgla do zgazowania naziemnego w gazogeneratorze fluidalnym*. Wydawnictwo Grafpol, Wrocław.

76. Gilvary J.J. 1961: *Fracture of brittle solids. I. Distribution function for fragment size in single fracture (Theoretical)*. Journal of Applied Physics, vol. 32, s. 391–399.
77. Glapa W., Korzeniowski J. 2005: *Mały leksykon górnictwa odkrywkowego*. Wydawnictwa i Szkolenia Górnicze Burnat & Korzeniowski, Wrocław.
78. Góralczyk S. 2009a: *Badanie i diagnoza stanu obecnego rozwoju technologii w zakresie zagospodarowania odpadów w górnictwie*. Foresight OGWK, Warszawa.
79. Góralczyk S. 2009b: *Foresight a problematyka odpadów z górnictwa węgla kamiennego*. Przegląd Górniczy, nr 10, s. 7–15.
80. Góralczyk S., Kukielska D. 2010: *Jakość krajowych kruszyw*. Górnictwo i Geoinżynieria, R. 34, z. 4, s. 211–224.
81. Grzelak E. 1973: *Technologia kruszyw mineralnych*. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
82. Grzelak E. 1975: *Maszyny i urządzenia do przeróbki mechanicznej surowców mineralnych*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
83. Grzelak E. 1995: *Kruszywa mineralne. Poradnik*. Centralny Ośrodek Informacji Budownictwa, Warszawa.
84. Grześkowiak A. 2007: *Strzelanie doświadczalne jako sposób zwiększenia ładunku całkowitego MW odpalanego w serii*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Konferencje, vol. 119, nr 48, s. 73–85
85. Gudat G., Trauth M., Euglen I. 2000: *Erfahrungen mit verschiedenen Verschleißschutzkonzepten für Gutbett- Walzenmühlen*. ZKG International 53.
86. Hudson J.A., Brown E.T., Rummel F. 1972: *The controlled failure of rock discs and rings loaded in diametral compression*. International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences, vol. 9, s. 241–248.
87. Huyet G. 1975: *Mathematical model of wet grinding of ores*. XI International Mineral Processing Congress, Cagliari, vol. 4, s. 1–24.
88. Iliwickij A.A., Nikolin W.L. 1961: *K opriedleniju krieposti gornych porod na obrazkach nieprawilnoj formy*. Ugoł, no. 1, s. 34–36 [Иливицкий А.А., Николин В.Л. 1961: *К определению крепости горных пород на образках неправильной формы*. Угол, no. 1, с. 34–36].
89. Jachym B. 2009: *Analiza wskaźnika płaskości produktów rozdrabniania w kruszarce szczękowej w zależności od wielkości szczeliny wylotowej i właściwości fizyko-mechanicznych nadawy*. Praca magisterska, AGH, Kraków.
90. Jermolajew P.S. 1955: *O formie riflennij drobiaszczich плит щековых дробилок*. Механизация строительства, nr 3 [Ермолаев П.С. 1955: *О форме рифлэнний дробящих плит щековых дробилок*. Механизация строительства, no. 3].
91. Katalogi reklamowe firm: Metso Minerals, Magotteaux, Koeppern GmbH, Humboldt Wedag.
92. Kelsall D.F. 1964: *A study of breakage in a small continuous open circuit wet ball mill*. Proceedings VII International Mineral Processing Congress, New York, s. 33–42.
93. Kluzanczew B.W., Łogak Ł.I., Bogackij A.I. 1971: *Wlijanije konstrukcyj drobiaszczich плит na effiektivnost' raboty szczekowych drobilok*. Stroitelnyje i doroznyje maszyny, nr 7, s. 28–31 [Клушанцев Б.В., Логак Л.И., Богацкий А.И. 1971: *Влияние конструкций дробящих плит на эффективность работы щековых дробилок*. Строительные и орожные машины, no. 7, с. 28–31].



94. Kłopotek B. 2009: *Przepisy o odpadach wydobywczych*. Przegląd Górniczy 10, s. 16–22.
95. Kobiałka R., Naziemiec Z. 2000: *Flukanie surowców skalnych. Rozwiązania technologiczne oraz ocena ich funkcjonalności*. VII Krajowy Zjazd Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław 20–22.09.2009.
96. Kobiałka R., Naziemiec Z. 2004: *Odzysk kamienia użytkowego z odpadów złożowych*. Górnictwo i Geoinżynieria, R. 28, z. 2/1, s. 31–38.
97. Kobiałka R., Naziemiec Z. 2006: *Badania procesu kruszenia szczękami o różnym profilu poprzecznym*. Górnictwo i Geoinżynieria, R. 30, z. 3/1, s. 125–136.
98. Kobiałka R., Tumidajski T. 1999: *Wpływ wielkości szczeliny wypustowej kruszarki i częstotliwości wahań szczęki ruchomej na wyniki rozdrabniania*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 15, s. 327–334.
99. Koch S. 2007: *Porównanie kruszarki udarowej AP-VM firmy Hazemag z innymi systemami kruszenia w odniesieniu do produkcji wysokiej jakości piasków lamanych*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 4, s. 64–66.
100. Kołmogorow A.N. 1941: *O logaryfmiczeski-normalnom zakonie raspriedielenija razmierow czasti pri droblenii*. DAN SSSR, nr 31, s. 99–101 [Колмогоров А.Н. 1941: *О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении*. ДАН СССР, но. 31, с. 99–101].
101. Koziół W. (red.) 2013: *Scenariusze technologiczne pozyskiwania i zagospodarowania surowców skalnych w województwie małopolskim*. Wydawnictwa Poltegor-Instytut, Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław – Kraków.
102. Koziół W., Galos K. (red.) 2013: *Scenariusze zapotrzebowania na kruszywo naturalne w Polsce i w poszczególnych jej regionach*. Wydawnictwa Poltegor-Instytut, Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław – Kraków.
103. Koziół W., Machniak Ł. (red.) 2014a: *Scenariusze technologiczne pozyskiwania i zagospodarowania surowców skalnych w województwie śląskim*. Wydawnictwa Poltegor-Instytut, Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław – Kraków.
104. Koziół W., Machniak Ł. (red.) 2014b: *Scenariusze technologiczne pozyskiwania i zagospodarowania surowców skalnych w województwie opolskim*. Wydawnictwa Poltegor-Instytut, Instytut Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław – Kraków.
105. Koziół W., Piotrowski Z. 2009: *Aktualne kierunki zagospodarowania odpadów z udostępniania węgla kamiennego*. Przegląd Górniczy, nr 10, s. 36–39.
106. Kurdowski W. 1981: *Poradnik technologa przemysłu cementowego*. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
107. Lewicki P., Lenart A., Kowalczyk R., Pałacha Z. 2012: *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*. Wydawnictwo WNT, Warszawa.
108. Lowrison G.Ch. 1974: *Crushing and Grinding*. Butterworths, London.
109. Löwe J. 2010: *Klasyczne błędy przy planowaniu i eksploatacji kruszarek udarowych*. II Konferencja Naukowo-Techniczna pt.: „Nowoczesne Kopalnie Żwiru i Piasku”, Zegrze, 15–16 czerwca, materiały konferencyjne na nośniku CD, Wydawnictwo BMP.
110. Lutyński A. 2010: *Foresight w zakresie priorytetowych i innowacyjnych technologii zagospodarowania odpadów pochodzących z górnictwa węgla kamiennego*. Górnictwo i Geoinżynieria, R. 34, z. 4/1, s. 145–153.

111. Lutyński A., Blaschke W. 2009: *Aktualne kierunki zagospodarowania odpadów przerobczych węgla kamiennego*. Przegląd Górniczy, nr 10, s. 33–35
112. Lutyński A., Osoba M. 2007: *Problemy mechanicznej przeróbki węgla kamiennego w perspektywie roku 2020*. Materiały konferencji KOMTECH 2007, Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG, Gliwice.
113. Lynch A.J. 1997: *Mineral crushing and grinding circuits*. Amsterdam – Oxford – New York.
114. Malewski J. 2002: *Metoda obliczania wydajności kruszarek*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 97, s. 135–145.
115. Malewski J. 2013: *Licz i oszczędzaj. Projektowanie schematów technologicznych przeróbki skał. Cz. 1*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 6, s. 26–31.
116. Malewski J. 2014: *Licz i oszczędzaj. Projektowanie schematów technologicznych przeróbki skał. Cz. 2*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 1, s. 52–56.
117. Malewski J., Baszczyńska M. 2013: *Optymalizacja procesu przesiewania w przesiewaczach wielopokładowych*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 136, s. 99–108.
118. Malewski J., Rink P. 2012: *Urabianie w kopalniach odkrywkowych jako problem optymalizacyjny*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 134, s. 175–180.
119. Marktfocus Brecher 2013: *Aufbereitungs Technik*. Bauverlag BV GMBH, Guetersloh.
120. Mazela A. 1988: *Procesy kruszenia w kruszarkach udarowych*. IMBiGS, Warszawa.
121. Meloy T.P. 1963: *A three-dimensional derivation of the Gaudin size distribution equation*. Transactions of the Society of Mining Engineers, s. 447–448.
122. Meloy T.P., Gumtz G.D. 1969: *The fracture of single, brittle, heterogeneous particles – Statistical derivation of the mass distribution equation*. Powder Technology, vol. 2, s. 207–214.
123. Metso Minerals 2008: *Kruszarki stożkowe serii Nordberg HP*. Materiały reklamowe.
124. Metso Minerals 2009: *Większe bezpieczeństwo w kruszarkach Nordberg*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 2, s. 60–61.
125. Michulec T. 2009: *Ustalanie charakterystyk krzywych składu ziarnowego produktów rozdrabniania dla kruszarki szczękowej L44.41 dla różnych wielkości szczeliny wylotowej i rodzajów rozdrabnianych surowców*. Praca magisterska, AGH, Kraków.
126. Momot N., Gawenda T. 2013a: *Odpady po liftingu. Wpływ selektywnej przeróbki mechanicznej odpadów przywęglowych na jakość kruszyw*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 1, 44–48.
127. Momot N., Gawenda T. 2013b: *Podatność na rozdrabnianie kruszyw ze skał przywęglowych różnych typów litologicznych*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 2, s. 40–45.
128. MRC Doltech 2007: *Nowoczesne metody produkcji kruszyw lamanych*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 3, s. 48–49.
129. Nad A. 2014: *Analiza rozdrabniania warstwowego na podstawie efektów rozdrabniania pojedynczych ziaren*. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków.
130. Nawrocki J. 1974: *Budowa i eksploatacja kruszarek*. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 513, Gliwice.
131. Nawrocki J., Ryncarz A., Węglarczyk J. 1989: *Teoria i praktyka rozdrabniania*. Skrypty Uczelniane nr 1500, Politechnika Śląska, Gliwice.
132. Nazimiec Z. 2006: *Wpływ kształtu powierzchni płyt roboczych w kruszarkach szczękowych na skład ziarnowy i kształt ziaren produktów*. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków.

133. Naziemiec Z. 2009a: *Przejezdne, przewoźne czy stacjonarne instalacje przeróbcze*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 1, s. 64–68.
134. Naziemiec Z. 2009b: *Urządzenia odwadniające w kopalniach surowców mineralnych*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 2, s. 74–78.
135. Naziemiec Z., Gawenda T. 2005: *Produkcja kruszyw budowlanych z odpadów przerobczych przemysłu wapienniczego*. Prace Naukowe Instytutu Górnicztwa Politechniki Wrocławskiej. Konferencje, vol. 109, nr 41, s. 147–158.
136. Naziemiec Z., Gawenda T. 2006: *Ocena efektów rozdrabniania surowców mineralnych w różnych urządzeniach kruszących*. VI Konferencja „Kruszywa Mineralne – Surowce – Rynek – Technologie – Jakość”, OWPW, Wrocław – Szklarska Poręba, s. 83–94.
137. Naziemiec Z., Gawenda T. 2007a: *Badanie procesu kruszenia z zamkniętym obiegiem*. Kruszywa Mineralne: Surowce – Rynek – Technologie – Jakość, OWPW, Prace Naukowe Instytutu Górnicztwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, vol. 119, nr 48, s. 107–116.
138. Naziemiec Z., Gawenda T. 2007b: *Plukanie kruszyw*. Surowce i Maszyny Budowlane, nr 5, s. 30–34.
139. Naziemiec Z., Gawenda T., Łagowski J. 2010a: *Efektywność plukania kruszyw. Cz. 1*, Surowce i Maszyny Budowlane, nr 4, 60–63.
140. Naziemiec Z., Gawenda T., Łagowski J. 2010b: *Efektywność plukania kruszyw. Cz. 2*, Surowce i Maszyny Budowlane, nr 5, 59–64.
141. 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, 24–28 September, Beijing.
142. Naziemiec Z., Gawenda T., Tumidajski T., Saramak D. 2006: *The influence of transverse profile of crusher jaws on comminution effects*. XXIII International Mineral Processing Congress, Istanbul, September 3–8, vol. 1, s. 69–74.
143. Naziemiec Z., Saramak D., Gawenda T. 2010c: *Prasy walcowe w przeróbce surowców mineralnych*. Prace Naukowe Instytutu Górnicztwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, vol. 130, nr 31, s. 191–200.
144. Naziemiec Z., Saramak D. 2012: *Analiza energochłonności procesów rozdrabniania kruszyw mineralnych*. Prace Naukowe Instytutu Górnicztwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, vol. 134, nr 41, s. 209–220.
145. Neville A.M. 2000: *Właściwości betonu*. Polski Cement, Kraków.
146. Nieć M. 2007a: *Złoża kruszywa naturalnego żwirowego i piaskowego* [w:] Ney R. (red.): *Surowce mineralne Polski. Surowce skalne. Kruszywa mineralne*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
147. Nieć M. 2007b: *Złoża kopalin do produkcji kruszywa naturalnego łamanego* [w:] Ney R. (red.): *Surowce mineralne Polski. Surowce skalne. Kruszywa mineralne*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
148. Nowak A., Gawenda T. 2006: *Analiza porównawcza kruszarek w wielostadialnych układach rozdrabniania skał bazaltowych*. Górnicztwo i Geoinżynieria, R. 30, z. 3/1, s. 267–278.



149. Nowak E., Pałka E., Płocica M., Stanoch W., Szeliga A. 1999: *Procesy przemielenia i młyny w przemyśle cementowym. Tom I: Procesy i urządzenia*. Prace Instytutu Materiałów Budowlanych. Instytut Śląski w Opolu, Opole.
150. Nowak E., Pałka E., Płocica M., Stanoch W., Szeliga A. 2000: *Procesy przemielenia i młyny w przemyśle cementowym. Tom II: Młynownie*. Prace Instytutu Materiałów Budowlanych. Instytut Śląski w Opolu, Opole.
151. Nowakowska A. 2008: *Badanie wpływu wąskich przedziałów uziarnienia nadawy na skład granulometryczny produktów jej rozdrabniania w laboratoryjnej kruszarce szczękowej*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 24, z. 3/3, s. 223–231.
152. Osoba M. 2007: *Osadzarki wodne pulsacyjne KOMAG do przeróbki żwiru i piasku*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Konferencje, vol. 119, nr 48, s. 127–136.
153. Pahl M.H. 1993: *Praxiswissen Verfahrenstechnik – Zerkleinerungstechnik*. Fachbuchverlag Leipzig/Verlag TÜV Rheinland, Köln.
154. PIG-PIB 2012: *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce według stanu na 31.12.2011 r.* Wydawnictwa Państwowego Instytutu Geologicznego, Państwowego Instytutu Badawczego, Warszawa.
155. PN-78/B-06714: *Badanie kruszyw mineralnych. Oznaczanie wytrzymałości na miazdzenie*.
156. PN-EN 933-3:2012: *Badania geometrycznych właściwości kruszyw – część 3: Oznaczanie kształtu ziaren za pomocą wskaźnika płaskości*.
157. PN-EN 933-4:2008: *Badania geometrycznych właściwości kruszyw – część 4: Oznaczanie kształtu ziaren – wskaźnik kształtu*.
158. Poćwiardowski W., Wodziński P. 2011: *Przesiewanie surowców mineralnych na przesiewaczu zataczającym*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 132, s. 225–236.
159. Poćwiardowski W., Wodziński P., Kaniewska J. 2012: *Investigation of the Rolling Screen*. AGH Journal of Mining and Geoengineering, vol. 36, no. 4, s. 143–148.
160. PSP Engineering a.s.: *Systemy kruszenia i przesiewania surowców mineralnych i recyklingu*. Katalog dostępny na stronie [www.hard.com.pl/kruszkarki](http://www.hard.com.pl/kruszkarki).
161. Protodiakonow M.M., Woblikow W.C. 1957: *Opriedlenije kreposti gornych porod na obrazkach nieprawilnoy formy*. Ugoł, no. 4, s. 13–17 [Протодяконов М.М., Вобликов В.Ц. 1957: *Определение крепости горных пород на образках неправильной формы*. Угол, no. 4, с. 13–17].
162. Pudło W. 1976: *Procesy kruszenia i mielenia [w:] Poradnik górnika. Dział VIII*, red. Z. Szczygieł-Antoniak, t. 5, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, s. 587–634.
163. Pudło W., Szlachtowski A. 1988: *Stochastic characteristics of changes in the grain size during self-grinding of selected types of oxidized Zn-Pb ores*. Archives of Mining Sciences, vol. 33, s. 509–531.
164. Pudło W., Szlachtowski A. 1991: *Stochastic description of changes in the grain size of metallic components (Zn, Pb, Fe) during self-grinding of selected types of oxidized zinc-load ores*. Archives of Mining Sciences, vol. 36, s. 73–89.
165. Rajczakowski G., Żołądek T. 2011: *Roboty strzałowe z zastosowaniem zapalników elektronicznych i-kon w kopalni granitu „Gniewków”*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, vol. 132, nr 39, s. 237–248.

166. Rolla S. 1983: *Nowoczesne nawierzchnie betonowe*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
167. Saramak D. 2011a: *Technological issues of HPGR-pressure grinding rolls operation in ore comminution processes*. Archives of Mining Sciences, vol. 56, no. 3, s. 517–526.
168. Saramak D. 2011b: *The influence of chosen ore properties on efficiency of HPGR-based grinding circuits*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 27, z. 4, s. 33–44.
169. Saramak D. 2013: *Mathematical models of particle size distribution in simulation analysis of High-Pressure Grinding Roll operations*. Physicochemical Problems of Mineral Processing, vol. 49, no. 1, s. 121–131.
170. Saramak D., Gawenda T., Naziemiec Z., Foszcz D., Tumidajski T., Brożek M., Młynarczykowska A. 2014: *Opracowanie koncepcji modernizacji procesu kruszenia urobku poprzez zastosowanie wysokociśnieniowych pras walcowych (HPGR) w O/ZWR*. Praca badawczo-rozwojowa zlecona przez KGHM Polska Miedź S.A., AGH, Kraków.
171. Saramak D., Gawenda T., Naziemiec Z., Tumidajski T., Brożek M. 2013: *Energetyczno-technologiczna optymalizacja pracy nowoczesnych układów rozdrabniania surowców mineralnych z wysokociśnieniowymi prasami walcowymi z uwzględnieniem charakterystyki nadawy*. Projekt naukowo-badawczy finansowany ze środków finansowych Narodowego Centrum Nauki, nr N NS24466139.
172. Saramak D., Tumidajski T., Brożek B., Gawenda T., Naziemiec Z. 2010: *Aspekty projektowania układów rozdrabniania w przeróbce surowców mineralnych*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 26, z. 4, s. 59–69.
173. Schönert K. 1985: *Zur Auslegung von Gutbett-Walzenmühlen*. ZKG International 38.
174. Shipway P.H., Hutchings I.M. 1993a: *Attrition of brittle spheres by fracture under compression and impact loading*. Powder Technology, vol. 76, s. 23–30.
175. Shipway P.H., Hutchings I.M. 1993b: *Fracture of brittle spheres under compression and impact loading. II. Results for lead-glass and sapphire spheres*. Philosophical Magazine A, vol. 67, s. 1405–1421.
176. Sidor J. 1996: *Niektóre wyniki badań procesu bardzo drobnego kruszenia w kruszarce wibracyjnej*. IX Konferencja „Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych”, Zakopane, z. 3, s. 169–176.
177. Sidor J. 2007: *Possible use of the vibration jaw crusher for process of preparing the recycling & utilization of ceramic waste products*. Polish Journal of Environmental Studies, vol. 16, no. 3B, s. 451–454.
178. Sidor J., Mazur M. 2011: *Niektóre wyniki badań procesu kruszenia wibracyjnego surowców mineralnych. Nowoczesne metody eksploatacji węgla i skał zwięzłych*. Przegląd Górniczy, t. 67, nr 11, s. 106–111.
179. Sidor J., Mazur M. 2012: *Wpływ wybranych parametrów kruszarki wibracyjnej na proces kruszenia kwarcytu i diabazu*. Górnictwo Odkrywkowe, R. 53, nr 5–6, s. 31–40.
180. Sidor J., Mazur M. 2014: *Badania procesu rozdrabniania kryształu górskiego w wibracyjnej kruszarce szczękowej*. Materiały Ceramiczne, R. 66, nr 1, s. 32–36.
181. Stankiewicz J. 2002: *Algorytm prognozowania wychodów frakcji w produkcji kruszenia*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Konferencje, vol. 97, nr 33, s. 205–208.
182. Stankiewicz J. 2009: *Doświadczenia IMBIGS w wykorzystaniu odpadów górnictwa węgla kamiennego*. Przegląd Górniczy, nr 10, s. 40–44.

183. Stefanicka M. 2011: *Mobilne i stacjonarne układy przeróbcze na przykładzie kopalni „Pilawa Górna”*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, vol. 132, nr 39, s. 277–289.
184. Svedensten P., Evertsson C.M. 2005: *Crushing plant optimisation by means of a genetic evolutionary algorithm*. Minerals Engineering, vol. 18, s. 473–479.
185. Sztaba K. 1993: *Przesiewanie*. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
186. Szufflicki M., Malon A., Tymiński M. (red.) 2014: *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce według stanu na 31 XII 2013 r.* Wydawnictwa Państwowego Instytutu Geologicznego, Państwowego Instytutu Badawczego, Warszawa.
187. Trybalski K. 2013: *Kontrola, modelowanie i optymalizacja procesów technologicznych przeróbki rud*. Wydawnictwa AGH, Kraków.
188. Trybalski K., Krawczykowski D. 2006: *Modelowanie przemysłowego procesu mielenia rudy z wykorzystaniem energetycznych wskaźników oceny*. Górnictwo i Geoinżynieria, R. 30, z. 3/1, s. 327–346.
189. Trybalski K., Gawenda T., Naziemiec Z. 2006: *Optymalizacja składu ziarnowego i kształtu ziaren kruszyw mineralnych*. Sprawozdanie z projektu badawczego – własnego KBN, nr 4T12A03026, AGH, Kraków.
190. Tumidajski T. 1993: *Zastosowanie metod statystycznych w analizie procesów przeróbki surowców mineralnych*. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
191. Tumidajski T., Naziemiec Z. 2004: *Wpływ warunków procesu kruszenia na kształt ziaren kruszyw mineralnych*. IV Konferencja „Kruszywa Mineralne – Surowce – Rynek – Technologie – Jakość”, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław – Szklarska Poręba, 14–16 kwietnia, s. 163–175.
192. Tumidajski T., Wieniewski A. 1988: *Rozkłady wartości ekstremalnych w procesach przeróbczych*. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo, vol. 12, s. 171–178.
193. Tumidajski T., Gawenda T., Naziemiec Z., Saramak D. 2003a: *Problemy statystycznej analizy badań zmian składu ziarnowego produktów rozdrabniania*. Inżynieria Mineralna, zeszyt specjalny, nr S3, s. 16–25.
194. Tumidajski T., Gawenda T., Niedoba T. 2003b: *Prognosemöglichkeiten der Korngrösse von Zerkleinerungsprodukten in Backenbrechern*. Brechen und Sieben in der Mineralrohstoffindustrie – Fachseminar. Bergmännischer Verband Österreichs, Technisch-Wissenschaftlicher Verein, Leoben.
195. Tumidajski T., Gawenda T., Saramak D., Naziemiec Z. 2006: *Stochastic modelling and control of comminution processes in jaw crushers*. XXIII International Mineral Processing Congress, Istanbul, Turkey, 3–8 September, vol. 3, s. 1723–1728.
196. Tumidajski T., Gawenda T., Niedoba T., Saramak D. 2008: *Kierunki zmian technologii przeróbki węgla kamiennego w Polsce*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 24, z. 1/2, s. 245–258.
197. Tumidajski T., Foszcz D., Jamróz D., Niedoba T., Saramak D. 2009: *Niestandardowe metody statystyczne i obliczeniowe w opisie procesów przeróbki surowców mineralnych*. Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
198. Tumidajski T., Kasińska-Pilut E., Gawenda T., Naziemiec Z., Pilut R. 2010: *Badania energochłonności procesu mielenia oraz podatności na rozdrabnianie składników litologicznych polskich rud miedzi*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 26, z. 1, s. 61–72.

199. Turek M. (red.), Burtan Z., Drenda J., Kapiesz J., Kozieł A., Kudelko M., Trenczek S. 2008: *Scenariusze rozwoju technologicznego przemysłu wydobywczego węgla kamiennego*, Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
200. Unland G., Kleeberg J. 2006: *The normal load on roll surfaces of high pressure grinding rolls*. XXIII International Mineral Processing Congress, Istanbul, Turkey 3–8 September, vol. 1, s. 133–138.
201. Wermter K. 1988: *Verschleißminderung beim Brechen von Kies*. *Aufbereitungs-Technik*, nr 3.
202. Wilczek J., Dreger M., Przygoda M. 2009: *Badania i analiza porównawcza właściwości mieszanek niezwiązanych według norm PN-S-06102:1997 i PN-EN 13285:2003*. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Zakład Geotechniki i Fundamentowania, Warszawa.
203. Wodziński P. 1988: *Potrzeby, możliwości i perspektywy przesiewania bardzo drobno ziarnowego*. III Seminarium – Materiały Bardzo Drobno Uziarnione. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo, z. 140, s. 55–74.
204. Wodziński P. 1997: *Przesiewanie i przesiewacze*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź.
205. Wodziński P. 2008: *Przesiewanie kruszyw. Przesiewacze bębnowe czy płaskie?* *Surowce i Maszyny Budowlane*, nr 2, s. 70–74.
206. Wodziński P. 2009: *Przeróbka kopalin mineralnych w zestawach mobilnych*. *Surowce i Maszyny Budowlane*, nr 2, s. 49–53.
207. Wolska-Kotańska C. 2001: *Harmonizacja norm polskich i europejskich w zakresie metod badań kruszyw mineralnych*. „Kruszywa Mineralne, Surowce – Rynek – Technologie – Jakość”. Konferencja nr 20, Po lanica Zdrój, 18–20 kwietnia.
208. WT-1 2010: *Kruszywa do mieszanek mineralno-asfaltowych i powierzchniowych utrwaleń na drogach krajowych. Wymagania techniczne*. Załącznik nr 1 do zarządzenia nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 listopada 2010 r. w sprawie stosowania wymagań technicznych na drogach krajowych, Warszawa.
209. WT-2 2010: *Mieszanki mineralno asfaltowe – nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych. Wymagania techniczne*. Załącznik nr 2 do zarządzenia nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 listopada 2010 r. w sprawie stosowania wymagań technicznych na drogach krajowych, Warszawa.
210. WT-4 2010: *Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych. Wymagania techniczne*. Załącznik nr 3 do zarządzenia nr 102 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 listopada 2010 r. w sprawie stosowania wymagań technicznych na drogach krajowych, Warszawa.
211. Zawada J. 1998: *Wstęp do mechaniki procesów kruszenia*. Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom.
212. Zibulski H.D. 2009: *Forschung, Entwicklung und verfahrenstechnische Untersuchungen – Die Hazemag-Versuchsanlage*. *Aufbereitungs-Technik*, nr 5, s. 20–32.
213. Zieliński Z. 1983: *Korelacja parametrów technologicznych mechanicznego kruszenia i przesiewania materiałów skalnych stosowanych w budownictwie drogowym*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, zeszyt 228, Szczecin.
214. Żur T., Hardygóra M. 1996: *Przenośniki taśmowe w górnictwie*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.