

KRUSZYWA MINERALNE

t. 7



Oficyna Wydawnicza
Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2024

Kruszywa mineralne

t. 7



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2024

Redaktor naukowy

Wojciech GLAPA

Recenzenci

Wiesław KOZIOŁ

Daniel SARAMAK

Redaktor techniczny

Stanisław GANCARZ

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właścicieli praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2024

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.edu.pl>

e-mail: oficwyd@pwr.edu.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-7493-268-4

Druk i oprawa: beta-druk, www.betadruk.pl

SPIS TREŚCI

Ireneusz R. BAIC, Wiesław KOZIOŁ, Artur MIROS, Wydobycie kruszyw w latach 1993–2022. Tendencje zmian i prognozy	5
Mirosław BAJDA, Ryszard BŁAŻEJ, Monika HARDYGÓRA, Dariusz WOŹNIAK, Nowe trendy związane z badaniami połączeń taśm przenośnikowych stosowanych w kopalniach kruszyw	17
Beata FIGARSKA-WARCHOŁ, Marek REMBIŚ, Analiza porównawcza wybranych cech wapieni w aspekcie ich stosowania do produkcji kruszyw	27
Tomasz GAWENDA, Daniel SARAMAK, Uwarunkowania skuteczności procesu przesiewania dla zmiennego udziału ziaren drobnych w nadawie i rodzaju sit	43
Stefan GÓRALCZYK, Problematyka uwalnianych alkaliów z kruszyw w betonie	59
Arkadiusz GRZEŚKOWIAK, Odczuwalność a szkodliwość drgań parasejsmicznych wywołanych robotami strzałowymi	67
Katarzyna GUZIK, Jarosław KAMYK, Alicja KOT-NIEWIADOMSKA, Potencjalnie strategiczne złoża piasków i żwirów do produkcji kruszyw oraz metodyka ich wyboru	79
Urszula KAŹMIERCZAK, Marek W. LORENC, Rewitalizacja terenów w górnictwie surowców skalnych	95
Paulina LAUDACKA, Żaklina KONOPACKA, Dagmara SOLATYCKA, Marcin PIERSIAK, Ocena obciążenia układu mięśniowo szkieletowego dla stanowisk pracy w zakładach górnictwa skalnego	113
Tomasz LIZOŃ, Analiza możliwości lokalizacji pływających instalacji fotowoltaicznych w akwenach poeksploatacyjnych	127
Łukasz MACHNIAK, Konrad SŁOWIŃSKI, Wpływ audytów krajobrazowych województw na prowadzenie działalności górniczej	143
Jerzy MALEWSKI, Struktura nakładów inwestycyjnych i kosztów operacyjnych maszyn podstawowych w projekcie instalacji przeróbki kruszyw	149
Kamila NIEMIEC, Paweł STRZAŁKOWSKI, Marcin BARANOWSKI, Czynniki stresogenne u pracowników w górnictwie skalnym na przykładzie KOSD S.A. w Niemodlinie	159
Paweł PIETKIEWICZ, Nabywanie gruntów rolnych położonych nad złożami kopalin w świetle przepisów ustawy o kształtowaniu ustroju rolnego	167
Agata STEMPKOWSKA, Tomasz GAWENDA, Magdalena STASZEWSKA, Lekkie kruszywo alternatywne. Specyfika, parametry, możliwości zastosowania	175
Paweł STRZAŁKOWSKI, Erwin WESOŁOWSKI, Maciej KUBICA, Kamila NIEMIEC, Zmody- fikowane badania odporności na rozdrabnianie kruszywo pochodzenia magmowego	189
Autorzy	198

CONTENTS

Ireneusz R. BAIC, Wiesław KOZIOŁ, Artur MIROS, Aggregate extraction in the years 1993–2022. Trends of change and forecasts	5
Mirosław BAJDA, Ryszard BŁAŻEJ, Monika HARDYGÓRA, Dariusz WOŹNIAK, New trends related to tests of conveyor belts used in aggregate mines	17
Beata FIGARSKA-WARCHOŁ, Marek REMBIŚ, Comparative analysis of selected limestone fea- tures in terms of its use for the production of aggregates	27
Tomasz GAWENDA, Daniel SARAMAK, Conditions of the effectiveness of the screening process for the variable share of fine grains in the feeder and the type of screen	43
Stefan GÓRALCZYK, Problems of alkalis released from aggregates in concrete	59
Arkadiusz GRZEŚKOWIAK, Perceptibility and harmfulness of paraseismic vibrations caused by rock blasting	67
Katarzyna GUZIK, Jarosław KAMYK, Alicja KOT-NIEWIADOMSKA, Potentially strategic deposits of sand and gravel for aggregate production and methodology of their selection	79
Urszula KAŻMIERCZAK, Marek W. LORENC, Reclamation and development of post rock mining areas – good practices continued	95
Paulina LAUDACKA, Żaklina KONOPACKA, Dagmara SOLATYCKA, Marcin PIERSIAK, The assessment of musculoskeletal system burden application at work stations in rock mining companies	113
Tomasz LIZOŃ, Analysis of location possibilities for floating photovoltaic installations in post-mining water basins	127
Łukasz MACHNIAK, Konrad SŁOWIŃSKI, The impact of landscape audits of voivodeship on mining activities	143
Jerzy MALEWSKI, Structure of the capital expenditures and operating costs of basic machines in some project of aggregate processing plant	149
Kamila NIEMIEC, Paweł STRZAŁKOWSKI, Marcin BARANOWSKI, Stress factors in employ- ees in rock mining on the example of The Kopalnie Odkrywkowe Surowców Drogowych S.A. in Niemodlin	159
Paweł PIETKIEWICZ, Acquisition of agricultural land located over proven mineral deposits in light of the provisions of the law on formation of the agricultural system	167
Agata STEMPKOWSKA, Tomasz GAWENDA, Magdalena STASZEWSKA, Lightweight alter- native aggregate. Characteristics, parameters, application possibilities	175
Paweł STRZAŁKOWSKI, Erwin WESOŁOWSKI, Maciej KUBICA, Kamila NIEMIEC, Modi- fied resistance to fragmentation tests on aggregates of igneous origin	189
Authors	198

Tomasz GAWENDA
Daniel SARAMAK

AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami

UWARUNKOWANIA SKUTECZNOŚCI PROCESU PRZESIEWANIA DLA ZMIENNEGO UDZIAŁU ZIAREN DROBNYCH W NADAWIE I RODZAJU SIT

W artykule omówiono czynniki wpływające na proces przesiewania oraz najważniejsze wskaźniki wykorzystywane do oceny efektywności tego procesu. Na podstawie przeprowadzonych testów przesiewania nadawy w warunkach przemysłowych, które były prowadzone przy różnych wydajnościach oraz dla zmiennego uziarnienia nadaw przedstawiono efekty procesu przesiewania. Zwrócono uwagę na wykorzystywane wskaźniki ziarna podziałowego oraz wielkości sita niosące pewne problemy w obliczeniach skuteczności. Do tego celu posłużono się przykładem procesu przesiewania przeprowadzonym w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem przesiewacza z sitami o różnej budowie otworów sitowych.

1. WSTĘP – ISTOTA KLASYFIKACJI SITOWEJ

Procesy kruszenia oraz mielenia surowców mineralnych są ściśle związane z procesami klasyfikacji. Nowoczesne technologie rozdrabniania, na przykład wykorzystujące prasy walcowe wysokociśnieniowe charakteryzują się bardzo wysokim udziałem ziaren drobnych w produktach. Należy wtedy w możliwie efektywny sposób odseparować ziarna drobne w myśl zasady „nic zbytecznie nie kruszyć”, ale też z uwagi na oszczędności energetyczne młynów, których efektywność spada przy wzroście udziału drobnych frakcji w nadawie. Również zbyt duży udział ziaren drobnych w produkcji górnym (podziarno) źle pracującego przesiewacza może mieć bardzo negatywny wpływ na prawidłową pracę urządzenia w kolejnym stadium rozdrabniania.

W przypadku rozdrabniania rud miedzi istotą klasyfikacji jest także selektywne wydzielanie drobnych frakcji do kolejnych etapów wzbogacania, bądź ich przygotowania do dalszego rozdrabniania i klasyfikacji oraz ponownego wzbogacania, tak aby nie rozdrobnić zbyt wielu składników użytecznych. Chodzi tu więc o uzyskanie z nadawy pewnej klasy (frakcji) o założonych granicach rozmiarów ziaren spełniających warunki procesu wzbogacania (flotacji).

Podstawą realizacji przesiewania jest doprowadzenie wszystkich ziaren przesiewanego materiału do kontaktu z powierzchnią sita z otworami o określonym kształcie i wielkościach. Powierzchnia sitowa w wykonaniu technicznym nosi nazwę sita lub rusztu. Ziarna drobniejsze od otworów sita przesiewają się przez nie, tworząc dolny (drobny) produkt, a ziarna większe od otworu sita tworzą górny (gruby) produkt. Ponieważ przesiewanie jest procesem stochastycznym, uzależnionym także od stanu technicznego przesiewacza oraz zainstalowanych sit, a w warunkach przemysłowych nigdy nie zachodzi idealnie, to dlatego w produktach przesiewania pojawia się nadziarno i podziarno. Nadziarno to udział grubych ziaren występujących w produkcie dolnym (podsitowym), a podziarno to udział ziaren drobnych (niedosianych) występujących w produkcie górnym (nadsitowym). Jest to nomenklatura często mylona z produktami nadsitowymi i podsitowymi przesiewacza.

Zadania szczegółowe procesu klasyfikacji sitowej w konkretnych układach technologicznych przeróbki mogą być bardzo różnorodne. Proces ten może występować jako [1, 6]:

- operacja przygotowawcza, w wyniku której nie otrzymuje się jeszcze efektu końcowego założonego dla całego układu technologicznych procesów, jakim poddaje się dany materiał, ale która warunkuje bądź ułatwia przeprowadzenie kolejnych operacji technologicznych, np. wydzielenie klas ziarnowych do wzbogacania grawitacyjnego, oddzielenie na mokro ziaren najdrobniejszych na sitach w procesie odmulania materiału, wydzielenie w procesie rozdrabniania z produktu mialkiego (drobnego) ziarn grubych i ponowne skierowanie go do mielenia,
- operacja główna, której wynik decyduje bezpośrednio o osiągnięciu końcowego celu realizacji układu procesów przerobczych, np. produkcja kruszyw mineralnych (także sorbentów) o określonych klasach ziarnowych; również produkcja rozmaitych piasków dla konkretnych zastosowań; to także uszlachetnianie kruszyw przez wydzielenie zanieczyszczeń gliniastych i ilastych.
- operacja uzupełniająca, której celem jest nadanie dodatkowych i szczególnych właściwości produktom operacji głównej przed przekazaniem ich odbiorcom, np. odsiewanie ziaren nienormowych kruszyw mineralnych, czy przesiewanie odwadniające lub oczyszczające [2, 6].

Spośród różnych rodzajów przesiewaczy najbardziej rozpowszechnione są przesiewacze wibracyjne.

2. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA PROCES PRZESIEWANIA

Przesiewanie materiałów uziarnionych na sitach stwarza w warunkach przemysłowych dosyć sporo problemów. Proces technologiczny klasyfikacji mechanicznej

w przesiewaczach uzależniony jest od trzech podstawowych charakterystycznych czynników, tj. od:

- parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych przesiewacza,
- właściwości fizycznomechanicznych przesiewanych surowców,
- sposobu prowadzenia procesu przesiewania.

Do pierwszej grupy można zaliczyć między innymi wielkość pokładu sita, kąt nachylenia sita, rodzaj, kształt i wielkość otworów sitowych, parametry dynamiczne przesiewacza, stan techniczny przesiewacza oraz sit. Do drugiej grupy należą wilgotność nadawy, wielkość uziarnienia i udział ziaren drobnych, zawartość zanieczyszczeń (domieszek ilastych), wilgotność. Do trzeciej należą procesy przesiewania na sucho i mokro, czas przesiewania, grubość warstwy materiału, wydajność, układy nadsobne, posobne lub mieszane sit itp.

Wymienione czynniki wpływają na siebie wzajemnie decydując o jakości oraz wydajności procesu przesiewania, a także o prawidłowej współpracy pozostałych maszyn (zwłaszcza kruszarek i młynów), stąd istotne jest, aby przy projektowaniu lub modernizacji układu przesiewania, a także właściwym sterowaniu procesem poznać i uwzględnić wszystkie czynniki mające związek z przesiewaniem [1, 4–7].

W tabeli 1 scharakteryzowano najistotniejsze wielkości determinujące proces przesiewania.

Tabela 1. Charakterystyka wielkości determinujących proces klasyfikacji sitowej
Table 1. Characteristics of parameters determining the screen classification process

Wielkości		
wejściowe regulujące	zakłócające	wyjściowe
– grubość warstwy materiału na sicie (obciążenie przesiewacza) – rozmiar i kształt oczek sita – wielkość klasyfikatora – natężenie przepływu wody natryskowej – kąt nachylenia sita – amplituda i częstota drgań – wskaźnik podrzutu sita	– skład ziarnowy nadawy – zawartość domieszek ilastych – wilgotność nadawy – kształt ziaren – twardość surowca – stan techniczny przesiewacza i sita – współczynnik przeswitu sita – rodzaj powierzchni sitowej	– zawartość nadziarna i podziarna – wydajność przesiewania – wychód produktu górnego i dolnego – skuteczność przesiewania – sprawność przesiewacza – ziarno podziałowe – ostrość rozdziału

3. WYBRANE WSKAŹNIKI OCENY EFEKTYWNOŚCI PROCESU KLASYFIKACJI

Oceną skuteczności technologicznej procesu klasyfikacji mechanicznej (przesiewania) jest obliczenie i analiza wskaźników technologicznych wyników procesu, jak

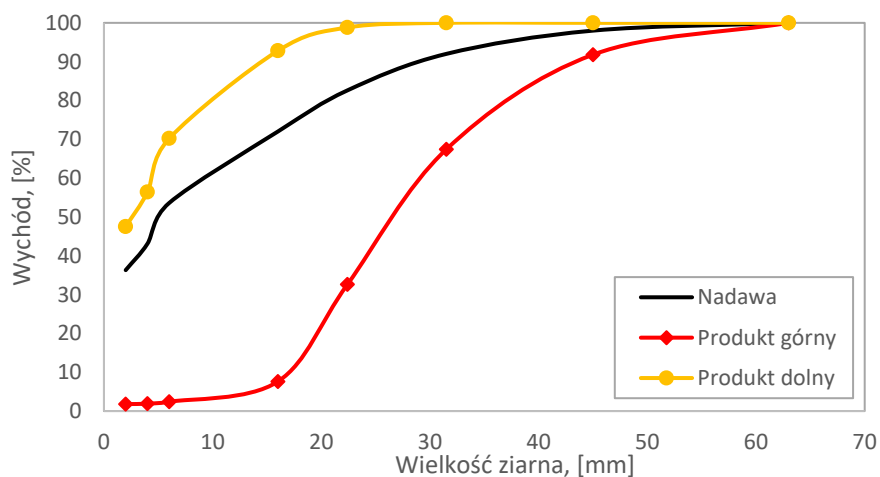
jakość i wychody produktów. Wskaźnikami jakości produktów są zawartości w nich określonych klas ziarnowych, a więc w szczególności klasy drobnej ($d < d_T$ lub d_{50}) w produkcie dolnym a_{dd} i klasy grubej ($d > d_T$ lub d_{50}) w produkcie górnym a_{gg} oraz jako ich dopełnienia, zawartości podziarna w produkcie górnym a_{gd} i nadziarna w produkcie dolnym a_{dg} (objaśnienia pod tab. 3).

Do oceny technologicznych kryteriów skuteczności procesu przesiewania bierze się pod uwagę skuteczności: jakościową, ilościową i ogólną, przy czym liczba wzorów określających skuteczność wg K. Sztaby [6] przekracza sto, zaś w praktyce przyjęto używać kilka podstawowych wzorów. W tym celu przeprowadza się opróbowanie procesu przesiewania nadawy oraz produktów, a następnie wykonuje się analizy granulometryczne.

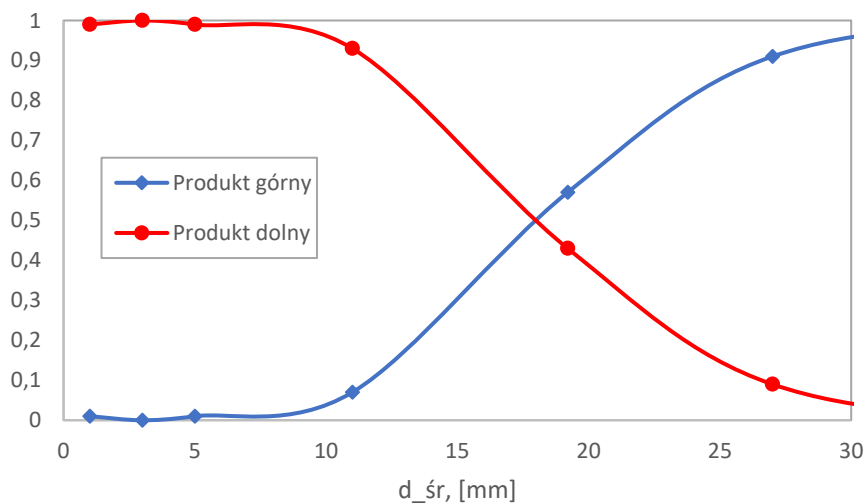
W celu określenia skuteczności przesiewania oblicza się współrzędne i tworzy krzywe składu ziarnowego (tab. 2) oraz liczby i krzywe rozdziału w celu określenia ostrości (dokładności) rozdziału i ziarna podziałowego d_{50} (rys. 1, 2). Zamieszczone dane w tabeli 2 oraz rysunki 1 i 2 pochodzą z przeprowadzonych testów opróbowania rudy miedzi w układzie technologicznym rozdrabniania w kruszarkach młotkowej i stożkowej oraz przesiewania w przesiewaczu wibracyjnym jedno pokładowym przy wielkości sit $d_T = 16$ mm przygotowującego nadawę do mielenia (rys. 3). Opróbowywany przesiewacz pracował przy różnych wydajnościach podanych w tab. 3.

Tabela 2. Przykładowe analizy składu ziarnowego nadawy oraz produktów przesiewania
Table 2. Exemplary analyses of particle size distribution for feed and screening products

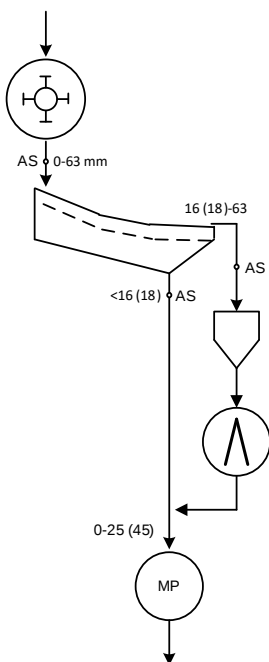
Sito, [mm]	Nadawa			Produkt górny			Produkt dolny			Krzywe rozdziału		
	masa [g]	wychód [%]	dyst. [%]	masa [g]	wychód [%]	dyst. [%]	masa [g]	wychód [%]	dyst. [%]	prod. górny	prod. dolny	d_{sr} sita [mm]
2	2689	36,3	36,3	309	1,8	1,8	2380	47,5	47,5	0,01	0,99	1,0
4	471	6,8	43,1	22	0,1	1,9	449	9,0	56,4	0,00	1,00	3,0
6	770	10,5	53,6	80	0,5	2,4	690	13,8	70,2	0,01	0,99	5,0
16	2036	18,4	72,0	901	5,2	7,6	1135	22,6	92,8	0,07	0,93	11,0
22,4	4596	10,6	82,6	4295	24,9	32,6	301	6,0	98,8	0,57	0,43	19,2
31,5	6059	9,4	92,0	6001	34,8	67,4	58	1,2	100,0	0,91	0,09	27,0
45	4202	6,0	98,0	4202	24,4	91,8	0	0,0	100,0	1,00	0,00	38,3
63	1411	2,0	100,0	1411	8,2	100,0	0	0,0	100,0	1,00	0,00	54,0
Suma	22234	100		17221	100		5013	100				
Wychód	100				24,5			75,5		$d_{50} = 18,0$ mm		



Rys. 1. Krzywe składu ziarnowego nadawy i produktów przesiewania na podstawie tab. 2
Fig. 1. Particle size distribution curves for the feed and screening products, based on Table 2



Rys. 2. Krzywe rozdziału podstawie danych z tab. 2, $d_{50} = 18$ mm
Fig. 2. Partition curves based on Table 2, $d_{50} = 18$ mm



Rys. 3. Schemat układu rozdrabniania i przesiewania przygotowującego nadawę rudy miedzi do mielenia (AS – miejsce poboru próbek i przeprowadzenia analizy sitowej)

Fig. 3. Scheme of crushing and screening circuit preparing the copper ore for grinding operations (AS – sampling point)

3.1. SKUTECZNOŚĆ PRZESIEWANIA W ZALEŻNOŚCI OD UZIARNIENIA NADAWY I WYDAJNOŚCI PROCESU

Skuteczność jakościowa oparta jest bezpośrednio na ocenie jakości produktów procesu. Najprostszą ocenę jakościową produktu dolnego daje nam zawartość w nim klasy drobnej a_{dd} , wg wzoru (oznaczenia wzorów zamieszczono pod tab. 3) [6]:

$$Sj_1 = a_{dd} [\%] \quad (1)$$

i analogicznie dla produktu górnego, zawartość klasy grubej

$$Sj_2 = 100 - a_{gd} [\%]. \quad (2)$$

W tabeli 2 zamieszczono wyniki obliczeń skuteczności jakościowej, która zgodnie ze wzorem (1) jest wysoka, wynosi 97–98%. Skuteczność wg wzoru (2) dla najwyższego przerobu 984 Mg/h jest bardzo niska – 58%, co oznacza, że 42% podziarna zostało niedosiane. Pozostałe skuteczności dla badanych prób nie są wysokie (ok. 84%), co oznacza, ok. 16% podziarna.

Skuteczność ilościową szacuje się na podstawie ilości materiału poszczególnych klas ziarnowych przechodzących do produktów, zwykle w odniesieniu do sytuacji teoretycznej (optymalnej). Jej ocena jest bardziej jednoznaczna niż ocena skuteczności jakościowej. Określenie skuteczności ilościowej sprowadza się zwykle do pojęcia uzysku ε , tj. stosunku ilości pewnego składnika (klasy ziarnowej) zawartego w produkcie właściwym dla tego składnika do całkowitej ilości tego składnika w nadawie. Przy ocenie skuteczności procesu bierze się pod uwagę z reguły uzysk klasy drobnej ε_d w produkcie dolnym, określając skuteczność ilościową [6]:

$$S_{I_1} = \gamma_d \frac{a_{dd}}{a_{nd}} = \varepsilon_d [\%]. \quad (3)$$

Wyniki obliczonych skuteczności dla równania (3) zestawiono w tabeli 3. Ponieważ uzysk klasy drobnej ε_d w produkcie dolnym nie dotyczy w zasadzie ziarn, które pozostały niedosiane, stąd wysokie wartości skuteczności na poziomie ok. 97%.

Skuteczność technologiczna ogólna uwzględnia zarówno jakość produktów, jak i efekty rozdziału ilościowego składników nadawy pomiędzy te produkty. Jej określenie sprowadza się do wzoru Hancocka definiującego również sprawność przesiewacza [6]:

$$S_H = 10^4 \frac{(a_{nd} - a_{gd})(a_{dd} - a_{nd})}{a_{nd}(a_{dd} - a_{gd})(100 - a_{nd})} [\%]. \quad (4)$$

Jak można zauważyć, skuteczność technologiczna obliczona wg Hancocka jest niezadowalająca i w każdym przypadku opróbowania nie przekroczyła 90%. Dla najwyższej wydajności przesiewacza (984 Mg/h) wyniosła zaledwie 72% (tab. 3).

Tabela 3. Wyniki obliczonych skuteczności procesu przesiewania
na podstawie opróbowania w warunkach przemysłowych

Table 3. Results of the calculated screening efficiencies based on plant scale sampling

Wydajność [Mg/h]	γ_d [%]	a_{dd} [%]	a_{dg} [%]	a_{nd} [%]	a_{gd} [%]	a_{gg} [%]	d_{50} [mm]	S_{j1} [%]	S_{j2} [%]	S_{i1} [%]	S_H [%]
378	73,4	98	2	78	15	85	21,5	98	85	92	89
432	84,4	98	2	86	17	83	21,8	98	83	98	85
443	78,0	98	2	80	15	85	20,3	98	85	98	88
704	75,5	97	3	77	16	84	18,0	97	84	97	85
984	62,9	97	3	77	42	58	18,5	97	58	97	72

γ_d – wychód produktu dolnego, %,

a_{dd} – zawartość ziaren drobnych w produkcie dolnym, %,

a_{dg} – zawartość ziaren grubych w produkcie dolnym (nadziarno w produkcie dolnym), %,

a_{nd} – zawartość ziaren drobnych w nadawie, %,

a_{gd} – zawartość ziaren drobnych w produkcie górnym (podziarno w produkcie górnym), %,

a_{gg} – zawartość ziaren grubych w produkcie górnym, %,

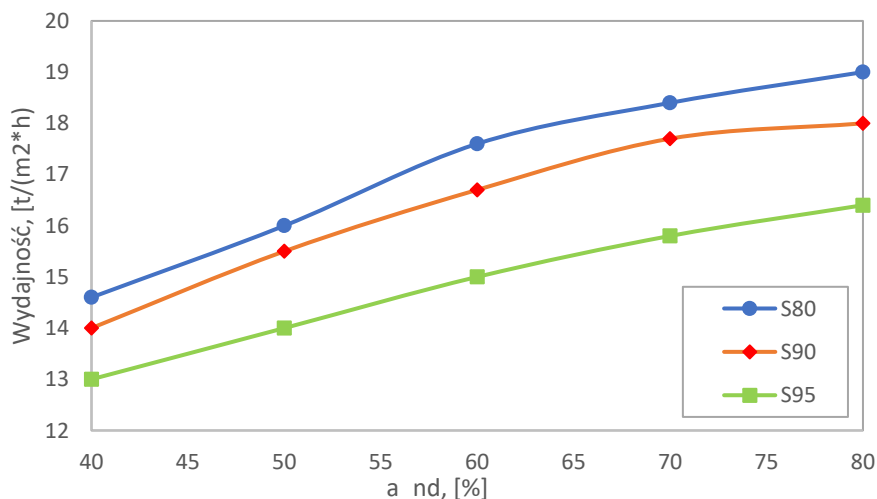
d_{50} – ziarno podziałowe, mm,

d_T – wielkość oczka sita, mm,

d – wielkość ziarna, mm,

$S_{j1}, S_{j2}, S_{i1}, S_H$ – skuteczności według wzorów (1)–(4).

Na rysunku 4 zilustrowano zależność wydajności jednostkowej od różnej zawartości klasy drobnej w nadawie, dla różnych wartości osiągniętej skuteczności. Można stwierdzić, że im większa jest w nadawie zawartość klasy drobnej, tym większa jest wydajność, ale im wyższa wydajność tym skuteczność procesu przesiewania mniejsza.

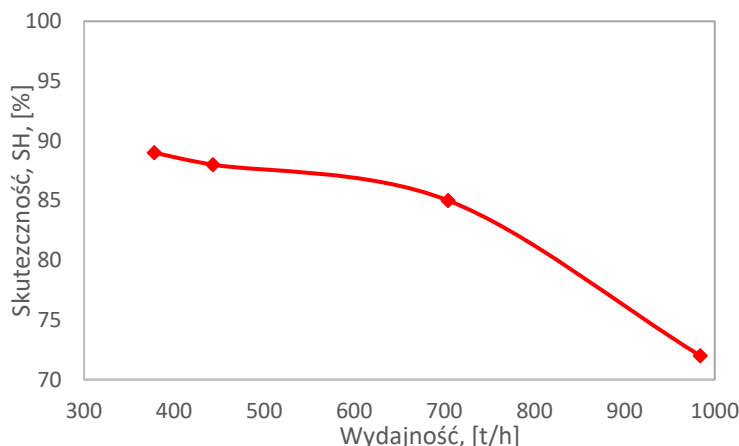


Rys. 4. Wpływ zawartości klasy drobnej (a_{nd}) w nadawie na wydajność jednostkową przesiewania przy ustalonej skuteczności procesu przesiewania $S = 80\%$, 90% i 95%

Fig. 4. Impact of a yield of fine particles in the feed (a_{nd}) on the specific screening productivity at given process efficiency $S = 80\%$, 90% , and 95%

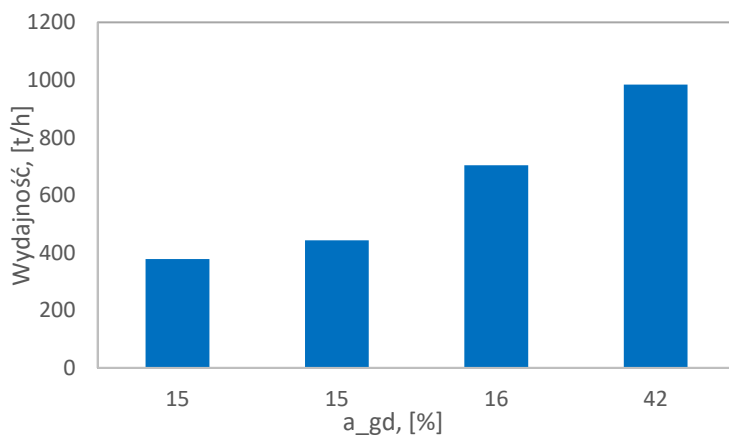
Podobną zależność dla przesiewanej rudy miedzi obrazuje wykres przedstawiony na rys. 5. Wraz ze wzrostem wydajności maleje skuteczność przesiewania oraz wzrasta procentowy udział ziaren drobnych w produkcie górnym przesiewania, czyli podziarna a_{gd} . W przypadku przekroczenia dopuszczalnego obciążenia przesiewacza, przy zbyt dużej wydajności zawartość podziarna może być bardzo wysoka. Takie efekty zauważono podczas testów prowadzonych na przesiewaczu wibracyjnym przy przerobie 984 t/h, podczas gdy jego maksymalna zdolność przerobowa wynosiła 700 t/h (rys. 6). Zawartość podziarna w produkcie górnym dochodząca do 42% jest bardzo niekorzystna, ponieważ negatywnie oddziałuje na pozostałą część układu

technologicznego, zwłaszcza na znajdujące się w nim kruszarkę (granulator stożkowy) [5].



Rys. 5. Zależność skuteczności wg Hancocka od wydajności przesiewania

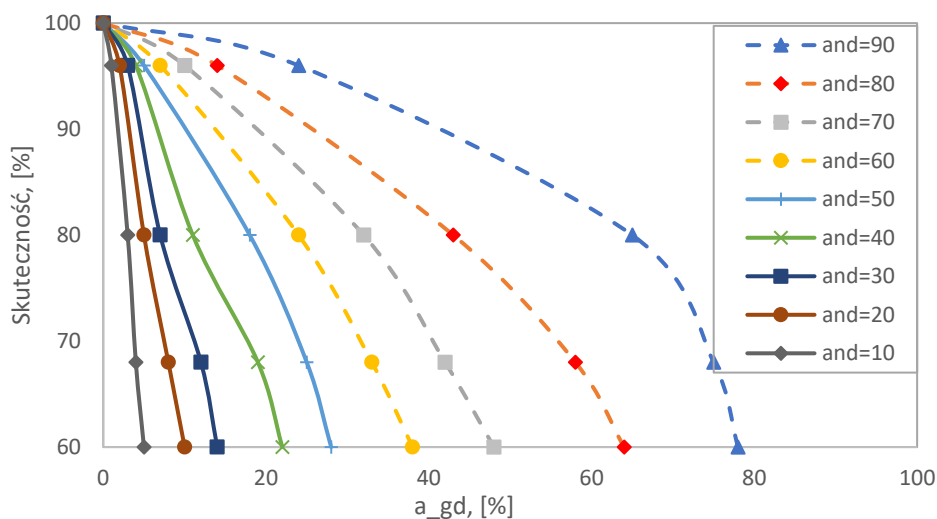
Fig. 5. Impact of screening efficiency according to Hancock on the screening productivity



Rys. 6. Zależność zawartości podziarna (a_{gd}) na wydajność przesiewania

Fig. 6. Impact of the undersize yield (a_{gd}) on the screening productivity

Na rysunku 7 przedstawiono zespół krzywych dla różnych zawartości klasy drobnej w nadawie (a_{nd}), w układzie współrzędnych wiążących skuteczność przesiewania i zawartość podziarna (a_{gd}). Uzyskanie skuteczności stu procentowej w warunkach przemysłowych praktycznie jest niemożliwe. Żeby ten warunek został spełniony, zawartości podziarna w produktach musiałyby być bliskie zeru.



Rys. 7. Zależność pomiędzy skutecznością przesiewania a zawartością klasy drobnej w nadawie (a_{nd}) i podziarna (a_{gd}) w produkcie górnym

Fig. 7. Relationship between the screening efficiency and the content of fine particles in the feed (a_{nd}) and undersize content (a_{gd}) in the oversize product

3.2. KRZYWE ROZDZIAŁU, 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 ziaren trafia do produktu dla siebie niewłaściwego.

Dla analizy wyników procesu klasyfikacji w oparciu o przeprowadzone opróbowanie stosuje się liczby rozdziału i krzywe rozdziału (rys. 2), które służą określeniu ziarna podziałowego d_{50} oraz wskaźników imperfekcji I i ostrości rozdziału E_p lub współczynnika dokładności rozdziału k_r ($k_r = d_{25}/d_{75}$).

Liczby rozdziału dla klas ziarnowych (frakcji) oblicza się wg formuły:

$$\text{liczba rozdziału} = \frac{\text{masa danej klasy ziarnowej w produkcie}}{\text{masa danej klasy ziarnowej w nadawie}}.$$

Liczbę rozdziału oznaczamy jako $T(d_{sr})$ lub $\tau(d_{sr})$

$$T(d_{sr}) = \frac{b}{a}, \quad (5)$$

$$\tau(d_{sr}) = \frac{c}{a}, \quad (6)$$

gdzie:

a, b, c – odpowiednio masy klas w nawie, produkcie I i produkcie II,
 d_{sr} – wartość średnia w klasie.

Jeżeli przez a_i, b_i, c_i oznaczmy udziały i -tych klas w odpowiednich produktach, a przez d_{sri} odpowiadającą im wartość średnią cechy rozdziału i przyjmiemy, że A, B, C są odpowiednio masami nadawy i produktów, to otrzymamy:

$$T(d_{sri}) = \frac{B \cdot b_i}{A \cdot a_i} = \gamma_I \frac{b_i}{a_i}, \quad (7)$$

$$\tau(d_{sri}) = \frac{C \cdot c_i}{A \cdot a_i} = \gamma_{II} \frac{c_i}{a_i}, \quad (8)$$

$$T(d_{sri}) + \tau(d_{sri}) = 1. \quad (9)$$

Ziarno podziałowe d_{50} jest to wielkość tych ziaren, które rozdzielają się do produktów rozdziału w równych ilościach, a więc ich prawdopodobieństwa przechodzenia do obu produktów są równe i wynoszą 50%. Mimo, iż w przypadku przesiewania wielkość otworu sita d_T wyznacza teoretyczną i przybliżoną granicę między uziarnieniem obu produktów, ograniczone prawdopodobieństwa odsiania (zwłaszcza ziaren 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 odcięta punktu krzywej o rzędnej 0,5 (rys. 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, co można rozumieć w taki sposób, 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 :

$$E_p = \frac{d_{75} - d_{25}}{2} [\text{mm}]. \quad (10)$$

Rozproszenie prawdopodobne określa szerokość takiego przedziału, zawierającego wartość przeciętną rozkładu d_{50} , że wewnątrz niego znajduje się połowa wszystkich elementów danego zbioru (w tym przypadku ziaren o określonym zachowaniu w trakcie procesu).

Również dla oceny pracy urządzenia stosuje się wskaźnik imperfekcji wyrażany wzorem:

$$I = \frac{E_p}{d_{50}}. \quad (11)$$

Im mniejsze są wartości tych wskaźników (bliższe zero), tym rozdział jest dokładniejszy. Kształt krzywej rozdziału (T), w przypadku przesiewania może być funkcją rodzaju otworów sita, wielkości powierzchni użytecznej sita, wskaźnika prześwitu, częstości drgań, amplitudy drgań rzeszota oraz składu ziarnowego.

Na podstawie uzyskanych wyników z opróbowień przemysłowych przedstawionych w tab. 4 można zauważyć, że na ostrość rozdziału ma wpływ wielkość przerobu nadawy kierowanej do przesiewania. Im większa wydajność tym mniej dokładnie zachodzi rozdział. Zwykle w warunkach technicznych współczynnik k_r nie przekracza 0,72, dlatego proces przesiewania przy wydajności 378 i 432 Mg/h można uznać za bardzo dokładny, najgorzej zachodził przy największym przerobie 984 Mg/h.

Tabela 4. Zestawienie wskaźników imperfekcji I i ostrości rozdziału E_p i współczynnika dokładności rozdziału k_r

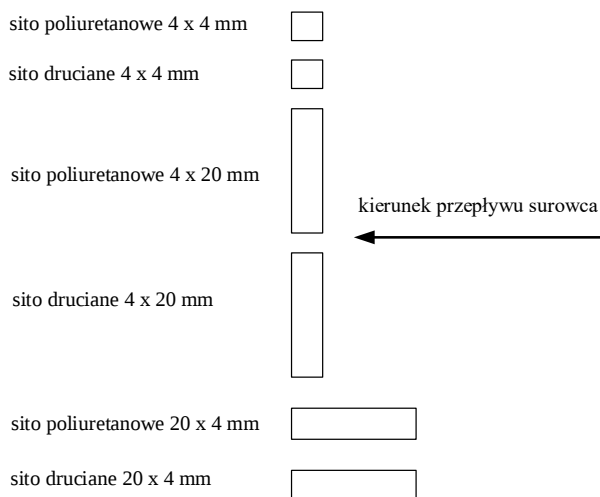
Table 4. Indices of the imperfection, I , separation sharpness E_p and separation accuracy k_r

Przerób [Mg/h]	E_p [mm]	I	k_r	a_{nd} [%]	a_{gd} [%]
378	3,0	0,14	0,75	78	15
432	3,3	0,15	0,73	86	17
443	3,4	0,17	0,71	80	15
704	4,2	0,23	0,63	77	16
984	5,1	0,28	0,54	77	42

3.3. SKUTECZNOŚĆ PRZESIEWANIA WZGLĘDEM WIELKOŚCI OTWORU SITA D_T A ZIARNA PODZIAŁOWEGO D_{50}

Jeżeli w pewnych warunkach procesów przemysłowych lub laboratoryjnych wykorzystuje się przesiewacz z sitem usytuowanym poziomo o oczkach kwadratowych, to bardzo często dla uproszczenia za ziarno podziałowe d_{50} przyjmuje się wartość oczka sita d_T , ponieważ wartości tych wskaźników są podobne. Problem ten nabiera dużego znaczenia, jeżeli chcemy obliczyć skuteczność, gdy pokład sitowy przesiewacza jest nachylony pod odpowiednim kątem, lub pokład jest łamany pod różnymi kątami, a zamiast oczek kwadratowych są inne, np. prostokątne czy kropłowe lub sita posiadają różne rozmiary. Wówczas należy dla każdej analizy opróbowania wyznaczyć faktyczne ziarno podziałowe z krzywej rozdziału, które może być zmienne w zależności od obciążenia przesiewacza i właściwości nadawy (tab. 3). Dla sita o rozmiarze oczka $d_T = 16$ mm osiągnięto ziarno podziałowe d_{50} w zakresie 18–21,8 mm.

W celu zobrazowania różnicy w ocenie skuteczności procesu klasyfikacji w oparciu o wielkość otworu sita d_T a ziarno podziałowe d_{50} przeprowadzono eksperyment procesu przesiewania [3]. Do tych badań użyto sześć rodzajów sit o tej samej wielkości d_T w zamierzeniu, żeby rozdział surowca następował przy wielkości granicznej 4 mm. Użyto sit druczanych i poliuretanowych o oczkach kwadratowych i prostokątnych, zgodnie z rys. 8. Wyniki z przeprowadzonych testów zaprezentowano w tab. 5.



Rys. 8. Rodzaje sit i różne ukształtowanie oczek w stosunku do kierunku przepływu surowca

Fig 8. Types of sieves and different shapes of holes to the direction of raw material flow

Tabela 5. Skuteczność przesiewania w zależności od rodzaju sita i ziarna podziałowego [3]

Table 5. Screening efficiency in relation to the type of sieve and the cut-screen [3]

Rodzaj sita	d_{50}	Skuteczność		d_T	Skuteczność	
		$S_i(3)^*$	$S_H(4)^*$		$S_i(3)^*$	$S_H(4)^*$
Poliuretanowe 4×4 mm	3,2	95,95	91,90	4,0	90,10	88,98
Druczane 4×4 mm	4,0	98,09	96,33	4,0	98,09	96,33
Poliuretanowe 4×20 mm	4,4	95,75	83,02	4,0	97,56	79,78
Druczane 4×20 mm	5,4	97,26	82,48	4,0	98,96	61,19
Poliuretanowe 20×4 mm	5,0	97,05	84,75	4,0	98,68	69,78
Druczane 20×4 mm	5,2	97,46	82,68	4,0	99,85	66,74

* W nawiasie numer zastosowanego wzoru.

Na podstawie otrzymanych wyników (tab. 5) można stwierdzić, że proces przesiewania przebiegł najkorzystniej na sicie metalowym druczanim o oczku kwadra-

towym 4×4 mm. Skuteczność ilościowa na tym sicie wyniosła 98%, a technologiczna wg Hancocka około 96%. Wartości tych skuteczności liczone dla ziarna podziałowego oraz wielkości oczka d_T były jednakowe, ponieważ wartości tych wskaźników były równe sobie i wynosiły 4 mm. Ale z eksperymentów okazało się, że w pozostałych przypadkach ziarna podziałowe i wielkości otworów nie są sobie równe, co wpływa na prawidłowe odczytywanie wskaźników z krzywych składu ziarnowego, a to z kolei rzutuje na poprawnie obliczoną skuteczność procesu klasyfikacji.

Najmniejszą skuteczność pod względem ilościowym (96%) przesiewania wykazało sito poliuretanowe o oczku kwadratowym 4×4 mm, przyczyną tego była najmniejsza ze wszystkich średnica ziarna podziałowego (3,2 mm) oraz mała powierzchnia czynna sita. Na podstawie skuteczności wyliczonych wg wzoru Hancocka, który oprócz ilości otrzymanych produktów bierze pod uwagę również ich jakość, najmniejszą skutecznością odznaczały się sita metalowe druciane (4×20 mm, 20×4 mm). Porównując sam kształt otworów w pokładzie sitowym gorzej sprawdzają się sita o oczkach 4×20 mm, czyli ukształtowane otwory poprzecznie do kierunku przepływu materiału. Jeśli zaś chodzi o rodzaj z jakiego wykonane są pokłady to korzystniejsze są sita poliuretanowe (przy odpowiednio dużych oczkach), ponieważ nie mają one tendencji do zablokowania się ziarnami trudnymi.

4. PODSUMOWANIE

W procesie klasyfikacji sitowej najistotniejszym czynnikiem determinującym rozdział ziaren na frakcje ziarnowe (produkt górny i produkt dolny) jest właściwy dobór sita o odpowiedniej wielkości oczka d_T . Przy czym należy pamiętać, że oczekiwana granica rozdziału podczas przesiewania, jaką jest ziarno podziałowe d_{50} może różnić się od wielkości oczka sita d_T , ponieważ na ziarno podziałowe wpływa szereg czynników determinujących proces rozdziału, np. kształt oczka sita, rodzaj sita, kąt nachylenia sita, parametry dynamiczne przesiewacza, obciążenie sita, grubość warstwy materiału na sicie, stan techniczny sit itp.

Z tych względów bardzo rzadko $d_T = d_{50}$ i obliczanie skuteczności procesu przesiewania względem przyjętego oczka sita będzie obarczone błędem i wynik nie będzie poprawny. Dlatego istotne jest prawidłowe wykreślenie krzywych rozdziału, odczytanie ziarna podziałowego d_{50} , którego wartość następnie nanosimy na układ współrzędnych z krzywymi składu ziarnowego i odczytujemy istotne wskaźniki ze wzorów na obliczanie skuteczności procesu przesiewania.

LITERATURA

- [1] BANASZEWSKI T., *Przesiewacze*, Wydawnictwo Śląsk, 1990.
- [2] BLASCHKE Z., BROŻEK M., MOKRZYCKI E., OCIEPA Z., TUMIDAJSKI T., *Zarys technologii procesów przeróbczych*. *Górnictwo*, cz. V, Wydawnictwa AGH. Skrypt uczelniany nr 768, Kraków 1981.
- [3] DUNIEC D., *Ocena skuteczności procesu przesiewania w zależności od wybranych parametrów pracy przesiewacza wibracyjnego*, Praca magisterska, Biblioteka AGH w Krakowie, Kraków 2015.
- [4] GAWENDA T., SARAMAK D., *Influence of selected work parameters of the rolling screen operation on screening effects*, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2014, Vol. 50 (1), 337–347.
- [5] GAWENDA T., *Analiza efektów rozdrabniania w granulatorze stożkowym w zależności od wielkości uziarnienia nadawy i jego obciążenia*, *Górnictwo i Geologia XVII*, Prace Naukowe Inst. Górnictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 134, Oficyna Wydawnicza PWR, Wrocław 2012, 71–83.
- [6] SZTABA K., *Przesiewanie*, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1993.
- [7] WODZIŃSKI P., *Przesiewanie i przesiewacze*, Monografie, Wydawnictwo Pol. Łódzkiej, Łódź 1997.

CONDITIONS OF THE EFFECTIVENESS OF THE SCREENING PROCESS FOR THE VARIABLE SHARE OF FINE GRAINS IN THE FEEDER AND THE TYPE OF SCREEN

The article discusses the factors influencing the screening process operation and the most important indicators that can be used for the determination of the effectiveness of the screening process. Based on the feed screening tests carried out in industrial conditions, which were carried out at various capacities and for variable particle size compositions of the feed, the effects of the screening process were presented. Particular attention was paid to the particle size indicators used and the sieve size, which may constitute certain problems in efficiency calculations. For this purpose, an exemplary screening process was carried out in laboratory conditions, and the screen with sieves of different structures of sieve holes was used in these investigations.



ISBN 978-83-7493-268-4