

## INNOWACYJNE TECHNOLOGIE PRODUKCJI SUROWCÓW SKALENIOWYCH

### INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF THE PRODUCTION OF FELDSPAR RAW MATERIALS

Ewa Lewicka - Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków

*Mimo, iż skalenie należą do najpowszechniej występujących w przyrodzie minerałów skalotwórczych, złoża kopalni skaleniowych najwyższej czystości należą do rzadkości, a i te są w znacznej mierze wyczerpane. Rosnące w ostatnich kilkunastu latach zapotrzebowanie na surowce skaleniowe, zwłaszcza ze strony przemysłu ceramicznego i szklarskiego, powoduje zainteresowanie wykorzystaniem ich źródeł poorestniej jakości, a zarazem poszukiwanie technologii umożliwiających pozyskanie z nich surowców o pożądanym parametrach. Wymagania odbiorców, dotyczące przede wszystkim jak najniższego udziału tlenków barwiących i odpowiedniej zawartości alkaliów, a także coraz bardziej rygorystyczne normy środowiskowe, stymulowały rozwój fizycznych metod wzbogacania kopalni skaleniowych. Największy postęp nastąpił w zakresie stosowania metod separacji magnetycznej. Dzięki wdrożeniu do praktyki przemysłowej nowoczesnych urządzeń, m.in. nadprzewodzących separatorów wysokogradientowych oraz separatorów o wysokiej intensywności pola magnetycznego, takich jak separatory rolkowe wyposażone w magnesy stałe z udziałem pierwiastków ziem rzadkich (RER) oraz matrycowe filtry magnetyczne, możliwe jest obecnie skuteczne usuwanie zanieczyszczeń nawet bardzo drobnoziarnistych o niskiej podatności magnetycznej (paramagnetycznych), a co za tym idzie otrzymanie koncentratów o odpowiedniej czystości z kopalni o niskim udziale skaleni, w tym materiałów uznawanych dotychczas za odpadowe. Separacja magnetyczna może stanowić alternatywę dla energochłonnych i zagrażających środowisku metod chemicznych, a zwłaszcza powszechnie stosowanej flotacji. Artykuł omawia najbardziej zaawansowane, innowacyjne rozwiązania stosowane w procesie produkcji surowców skaleniowych, a także przykłady wykorzystania nowoczesnych technologii w praktyce światowej. Przedstawia również mniej rozpowszechnione, ale dające dobre rezultaty techniki uszlachetniania kopalni skaleniowych, takie jak separacja tryboelektrostatyczna, ługowanie biologiczne i selektywna flokulacja.*

*Despite feldspar belong to the most abundant rock forming minerals, deposits of high purity ore are scarce and even those are largely depleted. The increasing demand for feldspar upon recent several years, especially in the ceramic and glass industries, resulted in interest in its sources of lower quality and search for new processing technologies to obtain products of required quality specifications. The customers' requirements referring basically to the lowest possible content of colouring oxides and adequate percentage of alkalis, along with increasingly strict environmental standards, stimulated the development of physical treatment methods of feldspar ore. The most spectacular progress was observed in case of magnetic separation. The implementation into industrial practice of modern equipment such as high gradient superconductive separators and high intensity magnetic separators, e.g. permanent magnetic rare earth roll separators (RER) and matrix magnetic filters, enabled effective removal of very fine contaminants of low magnetic susceptibility (paramagnetic). Consequently, feldspar concentrates of proper quality could be obtained from poor feldspar ores and materials previously recognized as waste. Magnetic separation could be an alternative for energy-consuming and environmentally unfriendly chemical based methods, such as froth flotation that is so far commonly used for feldspar ore purification. The article discusses the most advanced, innovative solutions employed in the production of feldspar raw materials, giving examples of modern technologies that are utilized in the industrial practice. There are also presented beneficiation techniques of lesser popularity, but giving promising results, such as triboelectrostatic separation, bioleaching, and selective flocculation.*

#### Wprowadzenie

Największymi odbiorcami surowców skaleniowych są przemysły: ceramiczny i szklarski. W przemyśle ceramiki szlachetnej i technicznej surowce te są stosowane jako topniki. Ich obecność powoduje powstanie w wysokiej temperaturze takiej ilości fazy ciekłej, która zapewnia odpowiednie zagęszczenie wypalnego tworzywa [1]. Jakość koncentratów skaleniowych, wykorzystywanych do mas ceramicznych jest oceniana na podstawie sumarycznej zawartości alkaliów ( $K_2O+Na_2O$ ), modułu alkaliczności ( $K_2O:Na_2O$ ) i udziału zanieczyszczeń barwiących, zwłaszcza związków żelaza i tytanu. Z uwagi na przebieg procesu zagęszczania masy w stosunkowo niskiej temperaturze zazwyczaj wskazane jest stosowanie surowca skaleniowego o module alkaliczności ok. 1. W produkcji cien-

kościenej porcelany stołowej o wysokiej białości i porcelany elektrotechnicznej wymagane są natomiast surowce o jak najwyższym module alkaliczności (odpowiednio  $>2$  i  $>5$ ), wysokiej zawartości alkaliów - min. 8,5% (dla gorszych gatunków min. 6,5%), zawartości  $Fe_2O_3+TiO_2$  nie przekraczającej 0,2% oraz stosunku  $Na_2O:CaO$  nie niższym niż 5,25 [2]. Surowce skaleniowe stosowane w masach ceramicznych przeznaczonych do produkcji porcelany technicznej, wyrobów porcelitowych i fajansowych mogą zawierać od 0,2 do 0,4%  $Fe_2O_3$ , natomiast w produkcji wyrobów kamionkowych dopuszcza się wyższą zawartość  $Fe_2O_3$  (0,4-0,6% dla kamionki szlachetnej, powyżej 0,6% - dla kamionki sanitarnej i budowlanej).

W przemyśle szklarskim surowce skaleniowe pełnią rolę nośnika  $Al_2O_3$ , który wpływa na zmniejszenie współczynnika rozszerzalności cieplnej oraz poprawę wytrzymałości mecha-

nicznej i odporności wyrobów na oddziaływanie czynników zewnętrznych. W recepturze szkła płaskiego i opakowań szklanych wymagany udział  $Al_2O_3$  wynosi 1,5-3%, a w przypadku niektórych włókien szklanych - do 15% [3]. Użycie w zestawie szklarskim surowców skaleniowych o wysokim udziale  $Na_2O$  umożliwia zmniejszenie zużycia syntetycznej sody oraz obniżenie temperatury topienia. Z tego względu stosuje się surowce o charakterze sodowo-potasowym i sodowym (moduł alkaliczności  $<1$ ) i sumie alkaliów  $>8\%$ . Istotnym kryterium przydatności tych surowców do produkcji szkła jest również udział tlenków barwiących. Dla surowców skaleniowych wykorzystywanych w produkcji szkła bezbarwnych zawartość  $Fe_2O_3$  nie powinna przekraczać 0,2%, natomiast w przypadku szkła barwnych może być ona wyższa - do 1,0%.

Dobór technologii wzbogacania kopalni skaleniowych oraz ich podatność na uszlachetnianie determinuje ilość i rodzaj składników mineralnych, forma ich występowania oraz wielkość ziaren. Najłatwiej wzbogacaniu poddają się kopaliny gruboziarniste. Wraz ze spadkiem wielkości ziaren wzrastają zwykle trudności z uzyskaniem koncentratów o pożądanych parametrach i usunięciem zanieczyszczeń. Obniża się także uzysk minerałów użytecznych, a rośnie ilość powstających odpadów. W ostatnich kilkunastu latach nastąpił jednak znaczny postęp w zakresie przeróbki i uszlachetniania kopalni o drobny uziarnieniu.

### Główne operacje przeróbki i wzbogacania kopalni skaleniowych

Do podstawowych operacji wzbogacania kopalni skaleniowych należą:

- rozdrabnianie połączone z klasyfikacją ziarnową na sucho lub na mokro, zapewniające odpowiedni skład granulometryczny,
- przemywanie, szlamowanie i odmulanie w celu obniżenia udziału niepożądanych minerałów ilastych i zanieczyszczeń drobnoziarnistych;
- wzbogacanie elektromagnetyczne, bądź rzadziej – klasyfikacja hydrauliczna, wzbogacanie na stołach koncentracyjnych, mechaniczne ocieranie ziaren, obróbka chemiczna itp., prowadzące do usunięcia mik i innych minerałów zawierających żelazo i tytan,
- wzbogacanie flotacyjne.

Jednym z głównych celów procesu wzbogacania jest obniżenie udziału tlenków barwiących, zwłaszcza związków żelaza, co osiąga się w pewnym stopniu na drodze rozdrabniania połączonego z klasyfikacją ziarnową. Wysoką efektywność usuwania zanieczyszczeń gwarantują m.in. najnowszej generacji wibracyjne przesiewacze pokładowe typu Stack Sizer firmy Derrick (rys. 1). Urządzenia te składają się z maksymalnie 5 umieszczonych nad sobą pokładów sitowych. Ich wydajność może sięgać 250 t/h na jeden pokład. Są one zasilane równocześnie przez wielostrumieniowy dystrybutor nadawy. Rozwiązanie to, należące do najbardziej innowacyjnych wśród technik klasyfikacji na mokro, przyczyniło się do znacznej poprawy skuteczności zarówno przesiewania, jak i dalszych etapów wzbogacania w wielu zakładach produkcyjnych na świecie.

Uzyskanie produktów skaleniowych o najwyższej czystości wymaga zastosowania separacji magnetycznej lub flotacji minerałów zawierających Fe i Ti. W procesie wzbogacania

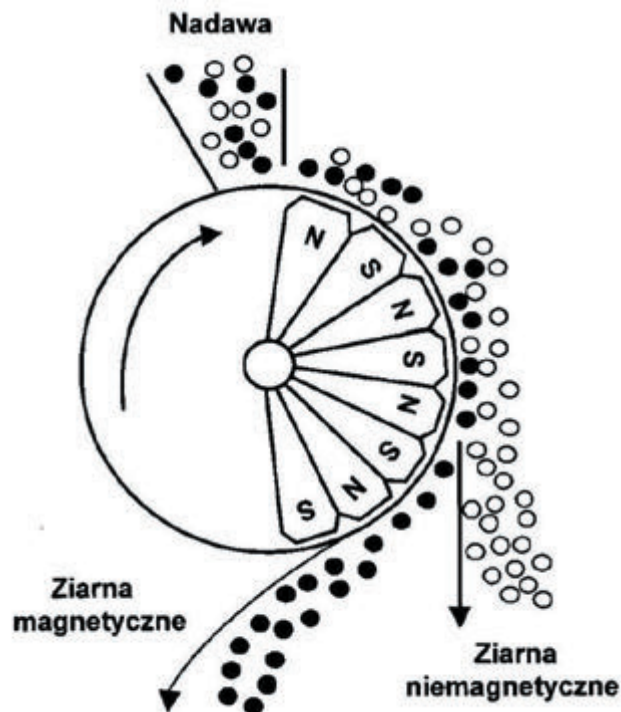


Rys. 1. Pięciopokładowy przesiewacz wibracyjny typu Stack Sizer firmy Derrick

Fig. 1. Stack Sizer five deck vibration screen of Derrick Co.

elektromagnetycznego kluczowe znaczenie ma forma i wielkość zanieczyszczeń barwiących oraz ich podatność magnetyczna.

Im niższa podatność magnetyczna cząstek tym wyższe natężenia pola są wymagane: w przypadku cząstek paramagnetycznych konieczne jest użycie natężeń rzędu 6000-20000 gausów, podczas gdy cząstki silnie magnetyczne można wyseparować w polu o natężeniu 400-600 gausów. W dotychczasowej praktyce przemysłowej separację magnetyczną prowadzono najczęściej na sucho (rys. 2), w końcowym etapie procesu technologicznego wzbogacania kopalni skaleniowych,



Rys. 2. Separacja magnetyczna na sucho

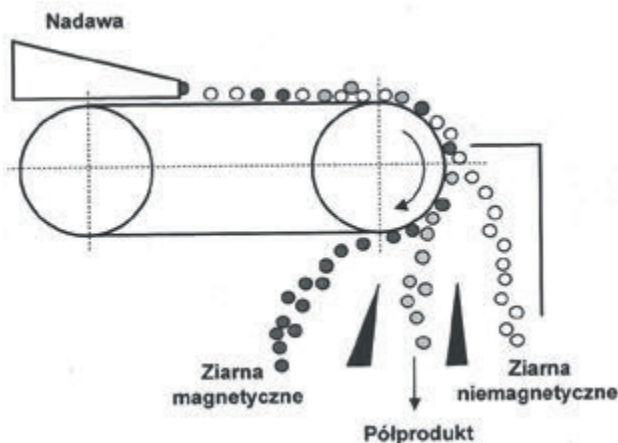
Fig. 2. Dry magnetic separation

natomiast podstawową metodę usuwania większości zanieczyszczeń stanowiła flotacja.

W metodzie wzbogacania elektromagnetycznego na sucho za najkorzystniejsze uziarnienie uważa się frakcję 0,1-0,5 mm.

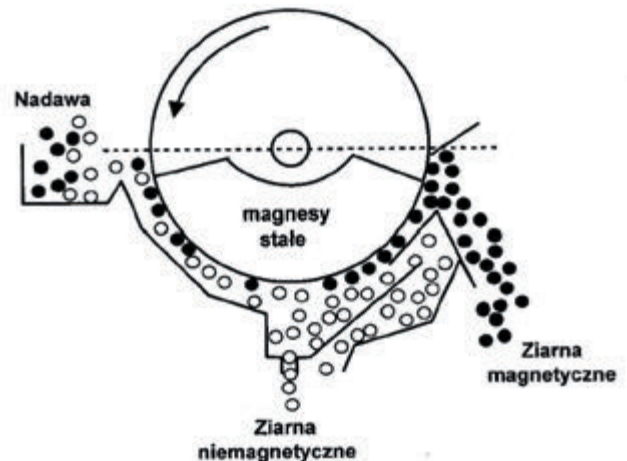
Ziarna  $<0,1$  mm zakłócają prawidłowy przebieg tego procesu i dlatego w starszych technologiach usuwane były na drodze separacji powietrznej, bądź przez odmulanie. Wiadomo również, że w najdrobniejszych frakcjach ziarnowych powstających w procesie rozdrabniania skał zasobnych w skalenie następuje koncentracja minerałów maficznych. Dla leukogranitów i granitów usunięcie z rozdrobnionego materiału frakcji  $<0,1$  mm powoduje obniżenie udziału  $Fe_2O_3$  od kilku do 75% [2]. Obecnie w celu oczyszczenia suchej nadawy o uziarnieniu 20-45  $\mu m$ , wymaganym w produkcji wyrobów porcelanowych, stosowane są wibracyjne filtry magnetyczne, wyposażone w elektromagnesy generujące pole magnetyczne o natężeniu bazowym od 5000 do 10000 gausów (najczęściej około 6500 gausów) [4]. Należą one do separatorów wychwytyjących (matrycowych), w których matrycę stanowią elementy ferromagnetyczne (np. wełna ze stali nierdzewnej) umieszczone w przestrzeni roboczej separatora. Cząstki wykazujące właściwości magnetyczne (również paramagnetyczne) osadzają się na elementach ferromagnetycznych, podczas gdy pozostałe, niemagnetyczne ziarna mineralne są odbierane poza matrycę. W celu usunięcia minerałów o właściwościach paramagnetycznych z kopaliny o uziarnieniu  $>80$   $\mu m$  również w stanie suchym stosuje się separatory rolkowe wyposażone w magnesy stałe z udziałem pierwiastków ziem rzadkich RER. Natężenie pola może w nich sięgać nominalnie 13000 gausów (zwykle 6000 gausów). Separatory rolkowe to najpopularniejsze spośród separatorów o wysokiej intensywności pola magnetycznego, stosowane do oczyszczania kopaliny skaleniowych z zanieczyszczeń magnetycznych. Składają się z głowicy zbudowanej z naprzemiennie umieszczonych dysków stalowych i magnesów wykonanych z ziem rzadkich oraz ultracienkiej taśmy (0,15 mm), którą transportowana jest nadawa (rys. 3). Grubsze frakcje mogą być również wzbogacane w separatorach bębnowych, w których szczytowe natężenie pola magnetycznego sięga 11500 gausów. Są to jednak urządzenia coraz rzadziej stosowane w nowoczesnych układach technologicznych produkcji surowców skaleniowych.

Znacznie skuteczniejszym niż metoda sucha sposobem usuwania najdrobniejszych zanieczyszczeń barwiących jest separacja magnetyczna na mokro, w której wzbogacany materiał ma postać szlamu (rys. 4). W metodzie tej możliwe jest bowiem uzyskanie wyższych natężeń pola magnetycznego, nawet  $>10000$  gausów, tj.  $>1$  T (zwykle 0,25-1 T), niż w przypadku separacji magnetycznej na sucho. Pozwala to na wydzielenie



Rys. 3. Schemat działania separatora rolkowego RER  
Fig. 3. Scheme of rare-earth roll (RER) separator

zanieczyszczeń o niskiej podatności magnetycznej i uziarnieniu 1-10  $\mu m$  [5]. Separacja na mokro może być prowadzona przy użyciu separatorów magnetycznych wysokiej intensywności typu WHIMS, a także filtrów wysokiej intensywności HI i separatorów wysokogradentowych HGMS, do których należą np. filtry magnetyczne HGF. Wymienione urządzenia należą do separatorów matrycowych wyposażonych w magnesy stałe. W porównaniu z konwencjonalnymi elektromagnesami generują one silniejsze pole magnetyczne, gwarantujące skuteczne wydzielenie również ultradrobnych cząstek bardzo słabo magnetycznych.



Rys. 4. Separacja magnetyczna na mokro  
Fig. 4. Wet magnetic separation

Przykładowo: matryca separatora HGF, w której z przepływającej zawiesiny wychwytywane są cząstki magnetyczne, znajduje się w polu magnetycznym generowanym przez uzwojenie solenoidu, wykonanego z dobrego przewodnika, np. aluminium lub miedzi. Matryca wzmacnia wartość natężenia pola, a przede wszystkim zawiera elementy gradientotwórcze (kolektory ferromagnetyczne, np. wełna ze stali nierdzewnej) wymuszające odpowiedni kierunek ruchu cząstek magnetycznych i ich wychwycenie ze strumienia nadawy. Pozostałe cząstki stanowiące produkt niemagnetyczny są odbierane poza matrycę. Wysoka wydajność i skuteczność wysokogradentowych filtrów magnetycznych HGF została potwierdzona na drodze licznych testów przeprowadzonych przez firmę Eriez, m.in. na próbkach kopaliny skaleniowych pochodzących z Turcji [5]. Najlepsze rezultaty uzyskano dla kopaliny o uziarnieniu  $<150$   $\mu m$  wzbogaconych w skalenie potasowe, zawierających 2,5%  $Fe_2O_3$ . W wyniku dwustopniowej separacji magnetycznej udział tlenku żelaza zmniejszył się do  $<0,14\%$ . Próbowano wzbogacania magnetycznego na mokro poddawano również dwa gatunki tureckich skaleni sodowych o różnym uziarnieniu: 100-500  $\mu m$  i  $>250$   $\mu m$ , każdy o zawartości 0,21%  $Fe_2O_3$ . W wyniku separacji magnetycznej przy użyciu filtra HGF (w polu o natężeniu 0,65 T) udział tlenku żelaza obniżył się do 0,027%, podczas gdy w rezultacie przeprowadzonej równoległej flotacji uzyskano koncentrat z 0,026%  $Fe_2O_3$ . Separacja magnetyczna okazała się zatem bardziej efektywnym ekonomicznie wariantem oczyszczania kopaliny skaleniowych ze związków żelaza niż skomplikowana pod względem technologicznym, uciążliwa dla środowiska i kosztowna flotacja.

Jedną z bardziej zaawansowanych technologicznie odmian separatorów wysokogradentowych są separatory pulsacyjne

typu SLon firmy Outokumpu Technology (Outotec). Mechanizm ich działania opiera się na wykorzystaniu kombinacji siły pola magnetycznego, pulsacji oraz siły grawitacji [6]. Matryca tego separatora składa się z regularnie rozmieszczonych stalowych włókien o wysokiej podatności magnetycznej, zainstalowanych prostopadle do strumienia magnetycznego. Pozwala to na uzyskanie wyższych wartości natężenia pola magnetycznego oraz gradientu generowanego strumienia magnetycznego aniżeli w przypadku matryc separatorów innych typów (WHIMS). Cząstki wchodzące w skład wzbogacanej zawiesiny, dzięki mechanizmowi pulsowania nie ulegają agregacji, co zapobiega blokowaniu matrycy, ułatwiając wychwytywanie w niej najmniejszych drobin o właściwościach paramagnetycznych i słabo magnetycznych oraz swobodny przepływ pozostałych ziaren. Metoda ta umożliwia m.in. uzyskanie koncentratów skaleniowych o wartości rynkowej z materiałów uznawanych dotychczas za odpadowe oraz kopaliny o niskim udziale skaleni.

Według najnowszych tendencji, związanych z unikaniem metod chemicznych przez producentów skaleni, metody separacji magnetycznej na mokro są coraz częściej brane pod uwagę jako bezpieczniejsza ekologicznie i efektywniejsza kosztowo alternatywa dla flotacji. Ta ostatnia wymaga bowiem zastosowania reagentów o agresywnym charakterze chemicznym, takich jak HF i H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pełniące funkcję depresorów kwarcu i aktywatorów skaleni) czy związki organiczne (w roli zbieracza), do których należą sole niektórych amin alifatycznych, również odznaczające się znaczną toksycznością i wysoką ceną. Z użyciem tych substancji wiąże się korozja urządzeń oraz wysokie koszty utrzymania i konserwacji maszyn. Flotacja charakteryzuje się ponadto wysokim zużyciem energii, a także prowadzi do powstania dużej ilości ścieków, wymagających neutralizacji. Mimo tych mankamentów jest ona nadal stosowana m.in. w Finlandii, Norwegii i Niemczech, umożliwia bowiem nie tylko wydatne obniżenie udziału składników niepożądanych, ale także rozdzielenie skaleni od kwarcu, a uzyskany produkt skaleniowy charakteryzuje się wymaganą, wysoką zawartością alkaliów. Rozdział skaleni potasowych od sodowych, prowadzący do otrzymania surowca o podwyższonym module alkalności, uzyskuje się na drodze flotacji selektywnej. Jedyny na świecie przykład zastosowania selektywnej flotacji skaleni na skalę przemysłową stanowił układ wzbogacania kopaliny pegmatytowej w zakładzie Lillesand firmy Sibelco Nordic w Norwegii (produkcję wstrzymano w połowie 2011 r.).

Jedną z rzadko stosowanych, choć znanych od połowy lat czterdziestych ubiegłego wieku, alternatywnych dla flotacji metod oddzielania skaleni od kwarcu jest separacja tryboelektrostatyczna [7]. Metoda ta wykorzystuje tzw. efekt tryboelektryczny, który polega na uzyskiwaniu przeciwnych ładunków elektrycznych przez ziarna różnych minerałów na skutek ocierania. Drobin o różnych ładunkach są przyciągane przez elektrody podłączone do wysokiego napięcia (odpowiednio +50 i -50kV) w separatorze tryboelektrostatycznym (np. Carpc T-Stat firmy Outokumpu Technology). Wzbogacanie tą metodą wymaga odpowiedniego przygotowania surowca, tj. podgrzania do temperatury 100-120°C w celu osuszenia powierzchni ziaren i przyspieszenia wymiany elektronów. Podgrzany materiał jest mieszany w mieszalniku obrotowym w obecności lotnego HF, pod wpływem którego następuje transfer elektronów z ziaren skaleni do ziaren kwarcu. Te ostatnie, zyskując ładunek ujemny są przyciągane do dodatniej elektrody

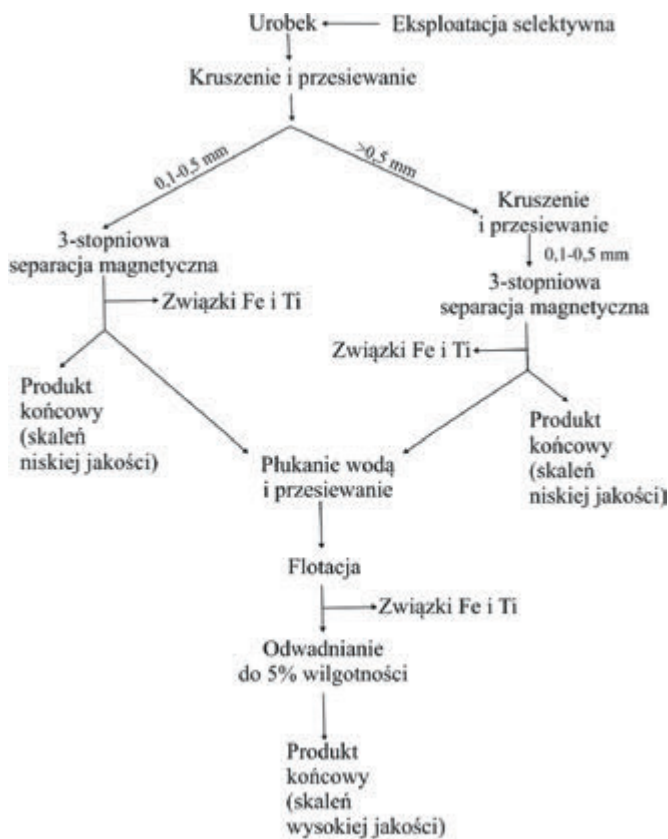
komory separatora, a dodatkowo naładowany produkt skaleniowy gromadzi się przy anodzie. Zaletą tej metody jest prostota oraz niezależność parametrów uzyskiwanych produktów od warunków prowadzenia procesu, podczas gdy efektywność i skuteczność flotacji w dużym stopniu zależy od stałości składu mineralnego i ziarnowego kopaliny oraz temperatury i czystości użytej wody. W dużo mniejszym stopniu oddziałuje ona również na środowisko, bowiem prowadzona jest na sucho, bez użycia amin (jak flotacja), a ilość HF jest pod ścisłą kontrolą. Nadmiar kwasu jest neutralizowany przy użyciu skrubera, którego produkt, nierozpuszczalny osad (CaF), po odfiltrowaniu jest bezpiecznie składowany.

Wśród sposobów obniżania udziału najdrobniejszych zanieczyszczeń żelazistych (w odniesieniu do których inne metody nie dają pożądanego rezultatu) zainteresowanie budzi biolugowanie, które prowadzi się za pomocą mikroorganizmów heterotroficznych, np. bakterii beztlenowych. Jego skuteczność potwierdziły m.in. badania wykonane w skali laboratoryjnej na próbkach leukogranitu i granitów słowackich przy użyciu bakterii ze szczepu *Bacillus* [8]. Metabolity, głównie kwasy organiczne (kwas szczawiowy), wydzielane przez bakterie hodowane na pożywce z melasy (będącej źródłem węgla organicznego), powodują zniszczenie struktury krystalicznej minerałów krzemianowych i uwolnienie wtrąceń żelazistych. W toku trwającego 95 dni eksperymentu zawartość żelaza w badanych próbkach obniżyła się o 35-60%. Należy jednak stwierdzić, że zastosowanie biolugowania na skalę przemysłową wymagałoby optymalizacji przebiegu tego procesu oraz dokładnego poznania natury zjawisk zachodzących w czasie jego trwania.

Obiecujące wyniki dają również próby usuwania żelaza metodą selektywnej flokulacji przy zastosowaniu skrobi [9]. W procesie tym ma miejsce adsorpcja molekuł flokulanta (skrobi) na ziarnach minerałów Fe-nośnych. Zjawisko to zachodzi najskuteczniej w zawiesinie zdyspergowanych cząstek kopaliny o wielkości <20 µm przy pH rzędu 10-12. Odpowiednie pH zapewnia uzyskanie ładunku powierzchniowego przez minerały żelaza oraz zapobiega adsorpcji skrobi na ziarnach skaleni. W rezultacie drobin (flokuly) zanieczyszczeń barwiących ulegają sedymentacji, a okruchy skaleni pozostają w zawiesinie. Metoda ta może być skuteczna w odniesieniu do materiałów o bardzo drobnym uziarnieniu, w stosunku do których konwencjonalne metody usuwania minerałów żelaza, takie jak sortowanie, separacja magnetyczna i flotacja, nie zdają egzaminu.

### Przykłady wzbogacania kopaliny skaleniowych na świecie

Tradycyjną metodą pozyskiwania wysokiej czystości surowców skaleniowych jest wzbogacanie flotacyjne. Prekursorem produkcji flotacyjnych koncentratów skaleniowych w Europie jest Finlandia. Znany od wielu lat na rynku międzynarodowym surowce marki FFF (*Finnish Flotation Feldspars*) otrzymuje się z pegmatytów w zakładzie przerobczym kopaliny skaleniowych firmy Sibelco Nordic w Kimito w pld.-zach. Finlandii. Urobek pegmatytowy jest poddawany trzystopniowemu kruszeniu do uziarnienia odpowiednio: 120 mm, 60 mm i 7-8 mm [10]. Tak rozdrobniona kopalina jest kierowana transportem hydraulicznym do zakładu wzbogacania, gdzie po zmieleniu na mokro w młynach walcowych do uziarnienia poniżej 0,6 mm i odmuleniu na sitach bębnowych jest poddawana flotacji. W pierwszym jej stadium usuwane są miki, a następnie przeprowadza się rozdział skaleni od kwarcu. Uzyskane produkty - po



Rys. 5. Schemat technologiczny wzbogacania kopaliny skaleniowej w zakładzie przerobczym firmy Kaltun w okręgu Hisarardi (wg [12], zmodyfikowany)

Fig. 5. Technological flow-sheet of feldspar beneficiation in the processing plant of Kaltun Co., Hisarardi region, Turkey [12, modified]

wysuszeniu - są poddawane separacji magnetycznej w celu usunięcia minerałów żelaza, a następnie mielone do odpowiedniej granulacji. W wyniku tych operacji uzyskuje się 9 gatunków surowców skaleniowych.

W Turcji koncentraty flotacyjne uzyskiwane są z kopaliny (zazwyczaj o czysto albitowym charakterze) selektywnie wydobytej ze złoża. Urobek jest kruszony i przesiewany w celu wydzielenia klasy ziarnowej poniżej 5 mm. Materiał ten jest następnie mielony do uziarnienia poniżej 500  $\mu\text{m}$  (lub  $<300\ \mu\text{m}$ ), co pozwala na uwolnienie zanieczyszczeń barwiących, których nośnikiem są miki, głównie biotyt ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), rutil ( $\text{TiO}_2$ ), tytanit ( $\text{CaTiSiO}_5$ ), niekiedy granaty, turmaliny i hornblenda. Miki mogą być usunięte na drodze dwustopniowej flotacji w środowisku kwaśnym przy użyciu amin jako aktywatorów kationowych (pH 2,5-3,5), a następnie kolektorów sulfonianowych (pH 3-4) [11]. Flotacja rutylu, który jest głównym i obficie występującym zanieczyszczeniem tureckich kopaliny skaleniowych, może być prowadzona przy użyciu soli kwasów tłuszczowych (np. oleinianu potasowego) w zakresie pH od 4 do 6, bądź – alternatywnie – za pomocą sulfonianu naftowego lub pierwszorzędowych amin kwasu tłuszczowego przy pH 2,5. Jako odczynnik flotacyjny o lepszym niż kwas tłuszczowy selektywnym działaniu w stosunku do rutylu może być użyty bursztynian alkilowy, bądź jego mieszanina z sulfonianami. Najwyższej czystości koncentraty skaleniowe pozyskiwane na drodze flotacji w zakładach jednego z największych producentów tureckich - firmy Esan, zawierają maks. 0,04-0,01%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i 0,02-0,05%  $\text{TiO}_2$ .

W praktyce przemysłowej etap flotacji skaleni bywa poprzedzony separacją magnetyczną minerałów wykazujących

właściwości magnetyczne, tj. będących nośnikami żelaza. Taki układ technologiczny działa w jednym z zakładów przerobczych tureckiej firmy Kaltun w okręgu Hisarardi (rys. 5).

Proces wzbogacania urobku składa się z siedmiu etapów [12]. Trójstopniowej separacji magnetycznej, której głównym celem jest oczyszczenie kopaliny z biotyту, poddawana jest frakcja 100-500  $\mu\text{m}$ , uzyskana w wyniku rozdrobnienia urobku do  $<500\ \mu\text{m}$  i klasyfikacji ziarnowej (usuwanie frakcji  $<100\ \mu\text{m}$ ). Część produktów separacji magnetycznej stanowi przedmiot sprzedaży jako tzw. skałen niższej jakości. Pozostały materiał, po płukaniu wodą i przesiewaniu, poddawany jest flotacji, podczas której oddzielane są nieusunięte na etapie separacji magnetycznej zanieczyszczenia barwiące. Te ostatnie stanowią produkt pianowy flotacji, natomiast frakcję tonącą tworzy wysokiej czystości koncentrat skaleniowy. W celu uzyskania odpowiedniej wilgotności (5%) jest on kierowany do odwadniacza wirowego, a następnie na stół wibracyjny. Otrzymane koncentraty flotacyjne o charakterze sodowym znajdują zastosowanie głównie w przemyśle ceramicznym. Mają one wyższą wilgotność niż produkty samej separacji magnetycznej, które zwykle są wykorzystywane w przemyśle szklarskim. Jednym z najbardziej zaawansowanych technologicznie gatunków skaleni sodowego oferowanych przez firmę Kaltun jest marka *Premier grade* z 10,5%  $\text{Na}_2\text{O}$  i zredukowanym niemal do zera udziale tlenków barwiących (0,03%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i 0,05%  $\text{TiO}_2$ ), znajdujący zastosowanie zarówno w przemyśle ceramicznym, jak i szklarskim.

## Podsumowanie

Wyczerpywanie się zasobów kopaliny skaleniowych najwyższej czystości przy rosnących równocześnie wymaganiach odbiorców powoduje konieczność wykorzystania uboższych źródeł tych surowców, co wiąże się z koniecznością stosowania coraz bardziej zaawansowanych technologii przeróbki i wzbogacania. Dodatkową presję stanowią wciąż zaostrzane normy środowiskowe, których skutkiem jest poszukiwanie metod alternatywnych dla kosztownej i obciążającej środowisko flotacji, która nadal pozostaje podstawową metodą pozyskiwania koncentratów skaleniowych wysokiej czystości. Częściową lub nawet całkowitą z niej rezygnację umożliwiają najnowsze rozwiązania w zakresie fizycznych metod wzbogacania, a w szczególności separacja magnetyczna. Rozwój tych metod wyznaczony kierunek w metodologii procesów uszlachetniania kopaliny skaleniowych. Konkurencyjność separacji magnetycznej, zwłaszcza prowadzonej na mokro, w stosunku do flotacji potwierdziły badania prowadzone z wykorzystaniem kopaliny pochodzenia tureckiego. Interesującą alternatywą dla wzbogacania flotacyjnego stanowią również metody selektywnej flokulacji przy użyciu skrobi (usuwanie zanieczyszczeń żelazistych) oraz separacja tryboelektrostatyczna (rozdzielenie skaleni od kwarcu), te jednak nie znalazły dotychczas szerszego zastosowania.

*Praca powstała w ramach projektu pt. „Strategie i Scenariusze Technologiczne Zagospodarowania i Wykorzystania Złóż Surowców Skalnych” (Nr POIG.01.03.01-00-001/09), realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, lata 2007-2013, Priorytet 1, Działanie 1.3, Poddziałanie 1.3.1 Projektu rozwojowe.*

**Literatura**

- [1] Klein G., Application of feldspar raw materials in the silicate ceramic industry. *Interceram* 50, 2, 2001
- [2] Karaś J., Polesiński Z., Badania nad przeróbką i wykorzystaniem krajowych surowców skaleniowych. II Symposium „Stan przeróbki mineralnych surowców skalnych i chemicznych”. Wyd. AGH, Kraków, 1984
- [3] Wasylak J., Kucharski J., Rola tlenku glinu w szkłe i jego surowce. *Ceramika/Ceramics* 76, 2003.
- [4] Fears P., Magnetic separation: dry developments. *Industrial Minerals*, 6/2010.
- [5] Fears P., Magnetic separation: a flotation alternative. *Ind. Min.* 7/2007.
- [6] Dobbins M., Pulsation separation. *Industrial Minerals*, 6/2006
- [7] Sadowski J., Sherrell I., Dobbins M., Quartz & feldspar separation: a dry alternative. *Ind. Min.* 12/2008
- [8] Štyriaková I., Štyriak I, Malchovský P., Lovás M., Biological, chemical and electromagnetic treatment of three types of feldspar raw materials. *Miner. Eng.* 19, 2006
- [9] Dogu I., Arol A.I., Separation of dark-coloured minerals from feldspar by selective flocculation using starch. *Powder Tech.* 139, 2004
- [10] Larsson J., Venäläinen H., FFF-feldspar and FW-wollastonite in white porcelain tiles. *Ceramika/Ceramics* 60, 2000
- [11] Bayat O., Arslan V., Cebeci Y., Combined application of deferent collectors in the floatation concentration of Turkish feldspars. *Miner. Eng.* 19, 2006
- [12] Moores S., Turkey aspires to ceramic heights. *Ind. Min.* 11/2007

*Artykuł recenzował dr inż. Andrzej Witt*  
*Rękopis otrzymano 21.09.2011 r. \* 2217*



Fot. Ze zbiorów Pracowni NS w Poltegor-Institut