



INŻYNIERIA MINERALNA

Kazimierz St. SZTABA^{*)}

^{*)} Prof. zw. dr hab. inż.; Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica, Wydział Górniczy, Zakład Przeróbki Kopaliny, Ochrony Środowiska i Utylizacji Odpadów; Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel.: (0-12) 617-20-52, faks: (0-12) 617-21-98, e-mail: sztaba@uci.agh.edu.pl

RECENZENCI: prof. dr hab. Jerzy SABLİK; doc. dr hab. inż. Wiesław BLASCHKE

Streszczenie

Naturalne surowce pochodzenia mineralnego tylko wyjątkowo mają właściwości umożliwiające ich bezpośrednie użycie do rozmaitych celów praktycznych. Zwykle jednak właściwości takie są dalekie od użytkowych. Wymagało to już od początku zainteresowania człowieka tymi – powszechnie używanymi i z reguły niemożliwymi do zastąpienia – surowcami, dokonywania określonych, wstępnych operacji utylizujących pozyskaną kopalinę, w wyniku których otrzymywano dopiero właściwe surowce mineralne. Zespół tych operacji to przeróbka kopaliny, a bardziej prawidłowo – z uwzględnieniem przerabiania z ich pomocą coraz powszechniej także surowców już uprzednio przetworzonych: wtórnych i odpadowych – przeróbka surowców mineralnych. Od najbardziej pierwotnych czynności selektywnego, ręcznego wybierania – wprost ze złoża – użytecznych kawałków kopaliny, technologia tych operacji przeszła bardzo intensywny rozwój, wykształcając się stopniowo w całkowicie odrębną dziedzinę technologiczną, usytuowaną pomiędzy eksploatacją kopaliny, a wszelkiego rodzaju technologiami przetwórczymi, dającymi w ostatecznym wyniku surowce lub produkty użytkowe. W tej chwili nie istnieją już praktycznie kopaliny, a zwłaszcza surowce wtórne, które nie wymagałyby zastosowania wstępnej przeróbki w procesie utylizacji. Różnorodność składników użytecznych występujących w materiałach pierwotnych i ich właściwości, wywołały konieczność sięgania do złożonego zespołu procedur technologicznych przejmowanych z różnych obszarów inżynierii procesowej i dostosowywanych do niepowtarzalnej specyfiki omawianych surowców, a także opracowywania całkowicie odrębnych rozwiązań technologicznych, wykorzystujących osiągnięcia praktycznie wszystkich nauk podstawowych, z których wiele czerpie z kolei inspirację do rozwoju niektórych kierunków, właśnie z potrzeb przeróbki kopaliny. Współczesny rozwój tej dziedziny tak dalece odbiega od tradycyjnie pojmowanej przeróbki kopaliny – zwłaszcza od pierwotnego zakresu tak zwanej przeróbki mechanicznej – że uzasadnia w pełni przyjęcie, iż w rzeczywistości istnieje już nowa dyscyplina – inżynieria mineralna.

1. Wprowadzenie

Naturalne surowce pochodzenia mineralnego najczęściej nie wykazują cech umożliwiających ich bezpośrednie użycie do rozmaitych celów praktycznych. Ich skład i inne właściwości są z oczywistych względów bardzo dalekie od użytkowych. Przykładowo: większość metali z grupy nieżelaznych pozyskuje się obecnie z rud o paroprocentowych, a nawet znacznie niższych zawartościach tych metali. Rudy takie w stanie surowym nie mają walorów użytkowych. Konieczność wstępnego przygotowywania dotyczy obecnie już praktycznie wszystkich kopaliny, a także wszystkich – bez wyjątku – materiałów odpadowych, będących potencjalnymi surowcami wtórnymi. Stąd już od początku zainteresowania człowieka tymi surowcami – powszechnie używanymi i w przeważającej większości przypadków niemożliwymi do zastąpienia – dokonywano określonych, wstępnych operacji utylizujących pozyskaną kopalinę, w wyniku których otrzymywano dopiero właściwe surowce mineralne. Obejmując ogół tych wstępnych operacji, przeróbka kopaliny stanowiła więc zawsze niezbędny etap procesów użytkowania bogactw kopalnych, pośredni pomiędzy eksploatacją i przetwórstwem. Dostosowuje ona naturalne charakterystyki kopaliny wydobywanych ze złóż przy użyciu technik górniczych, a także powstające bie-

żąc lub zdeponowane już poprzednio, różnorodne materiały odpadowe, do wymagań jakie wynikają ze specyfiki procesów prowadzonych w zakładach przetwarzających materiały pochodzenia mineralnego, na głęboko przekształcone surowce oraz wyroby nadające się już do dalszego, bezpośredniego użytkowania – energię, metale, wyroby chemiczne, ceramiczne i inne – bez których niepodobna wyobrazić sobie funkcjonowanie gospodarki, a także normalne warunki naszego życia.

Intencją autora niniejszego opracowania jest przedstawienie miejsca i ewolucji przeróbki surowców mineralnych w ciągu procesów zagospodarowywania tych surowców. Intensywne przemiany w poglądach i zasadach prowadzenia działań gospodarczych, wymagają sprecyzowania jej zadań w zmieniających się realiach i określenia jej możliwości.

Informacje i uwagi zawarte w tym opracowaniu są kierowane nie tylko do osób zajmujących się przeróbką surowców mineralnych w codziennej pracy zawodowej, tak w zakładach przemysłowych, jak innych jednostkach, w tym naukowo-badawczych. Dla nich jest to bowiem codzienność. Właśnie oni jednak wielokrotnie zwracają uwagę na stanowczo zbyt małe upowszechnianie wśród specjalistów związanych z działalnością opartą na zagospodaro-

wywaniu surowców pochodzenia mineralnego, informacji o stanie przeróbki – ale też i o wymagających podjęcia i rozwiązania jej zadaniach. Przynajmniej ogólne informacje o tym, czym jest przeróbka, jakimi dysponuje możliwościami i czym może służyć w rozwiązywaniu zadań wynikających przy przetwarzaniu rozmaitych materiałów, posiadających cechy komplikujące to przetwarzanie, dorównujące tym, jakie są właściwe surowcom mineralnym, powinno się przedstawiać – w świetle sformułowanych w dalszym ciągu opracowania, uwag o szerokich, potencjalnych możliwościach wykorzystywania metod przeróbki w innych obszarach technologii przetwórczej – szerszemu gronu osób, związanych z rozmaitymi gałęziami przemysłów przetwórczych, a także w ogóle interesujących się problemami rozwoju technologii. Przedstawienie takiej informacji także jest zamiarem autora i wpłynęło na koncepcję układu i treści opracowania. Jego ograniczona objętość, przy mnogości wątków i odrębnych obszarów tematycznych, jakie zawiera przeróbka, a jednocześnie chęci przedstawienia przynajmniej części z nich w minimalnym chociażby rozwinięciu, wywołały konieczność dokonania określonego wyboru. Stąd poszczególne zagadnienia nie są tu rozwinięte w jednakowym, a nawet zbliżonym stopniu. Czytelnicy zechcą wybaczyć autorowi dokonanie dość arbitralnego wyboru, z preferencją w przedstawianiu tych tematów, jakie są mu szczególnie bliskie tak z uwagi na wieloletnie zajmowanie się nimi we własnej pracy naukowej i w dydaktyce, jak z przekonania o ich poważnych perspektywach rozwojowych lub wadze dla rozwoju gospodarki.

2. Ewolucja przeróbki surowców mineralnych

Wypada przypomnieć, że cały złożony ciąg procesów, jakiemu jest poddawana kopalina od złoża (pierwotnego – powstałego w wyniku naturalnych procesów złożotwórczych, lub wtórnego – antropogenicznego) do otrzymanego z niej produktu rynkowego, składa się z reguły z kilku etapów. Są nimi:

- 1) poszukiwanie i rozpoznanie złóż kopaliny użytecznych oraz kwalifikowanie ich do zagospodarowania,
- 2) wydobywanie kopaliny, realizowane metodami eksploatacji górniczej,
- 3) przeróbka kopaliny z uzyskiwaniem surowców mineralnych o określonym przeznaczeniu, przebiegająca w zakładach przerobczych (zakładach przeróbki rud, węgla, a także innych kopaliny),
- 4) przetwarzanie otrzymanych surowców mineralnych, będących najczęściej – (a w przypadku rud, węgla i surowców chemicznych – wyłącznie)

- otrzymywanymi jako produkty przeróbki kopaliny – koncentratami zawartych w niej składników użytecznych, na surowce do produkcji przedmiotów (materiałów) bezpośrednio użytkowych,
- 5) produkcja przedmiotów (materiałów) bezpośrednio użytkowych – konsumpcyjnych i niekonsumpcyjnych,
- 6) użytkowanie przedmiotów (materiałów),
- 7) zagospodarowywanie odpadów użytkowych, w tym przetwarzanie ich na surowce wtórne.

Należy zauważyć, że przynajmniej w trzech spośród tych etapów: przeróbki kopaliny (3), przetwarzania surowców (4) i zagospodarowywania odpadów użytkowych (7), występują określone operacje i procesy (układy operacji) technologiczne, zmieniające właściwości produktów etapu poprzedzającego zgodnie z potrzebami realizacji docelowo założonego sposobu użytkowania kopaliny i jej właściwości, wyznaczających zarówno etapowanie zagospodarowania, jak i niezbędne sposoby działania. Zadania zagospodarowania odpadów – w tym przetwarzania ich w surowce wtórne, wchodzące do ciągu produkcyjnego we właściwym miejscu (też w sensie gałęzi produkcji), występują nie tylko w etapie 7). Ten dotyczy tylko odpadów pokonsumpcyjnych (też np. komunalnych). W etapach 2), 3), 4) i 5) powstają natomiast z reguły odpady produkcyjne, których zagospodarowanie jest ważną częścią gospodarki surowcami, nie stanowi jednak jej odrębnego, spójnego etapu. Najczęściej odpady przetwarzane na surowce wtórne są materiałem wejściowym dla odrębnych ciągów technologicznych, zawierających w zasadzie tylko odpowiedniki etapu przeróbki.

Podział ciągu procesów zagospodarowywania kopaliny na wymienione etapy wynika z jego wyjątkowej złożoności, wymagającej sekwencyjnego określania i osiągania w kolejnych etapach celów cząstkowych, przybliżających stopniowo cele końcowe owego zagospodarowania. Cele cząstkowe wymienione poprzednio (pozyskanie kopaliny – 2), otrzymanie z niej surowca dla przemysłu przetwórczego – 3) oraz przekształcenie go w produkt wysoko przetworzony – w szczególności rynkowy: metal, energię itp. – 4)) wymagają zastosowania całkowicie odrębnych rozwiązań technologicznych i niezbędnych do ich realizacji środków technicznych. Taki układ i charakterystyka etapów zagospodarowywania kopaliny, są wynikiem długotrwałej ewolucji, przebiegającej w ciągu wielu wieków ich gospodarczego wykorzystywania.

W odległej przeszłości ręcznie wybierane bogate kawałki metali rodzimych, później ich rud, a także różnych innych surowców mineralnych (skalnych, w tym ozdobnych, później węgla itp.), były bezpo-

średnio kierowane do ówczesnych, prymitywnych procesów przetwórczych bądź wprost użytkowane. Sposób pozyskiwania surowców mineralnych łączył więc w sobie początkowo zadania wydobywania kopaliny i selektywnego „produktowania” koncentratu. W miarę ubożenia oraz zwiększania się rozproszenia i zmniejszania uziarnienia użytecznych składników surowców dostępnych eksploatacji, przy szybko rosnącym popycie, taka praktyka wkrótce stała się niemożliwa do utrzymania i etapem niezbędnym do wykorzystania kopaliny stała się przeróbka, o specyficznych rozwiązaniach technologicznych. Etap przeróbki stawał się stopniowo coraz bardziej samodzielnym i wyraźnie wyodrębnionym funkcjonalnie od etapu wydobywania.

Utrzymująca się stale – z naturalnych powodów – tendencja wyczerpywania się złóż bogatszych, zawierających kopaliny łatwiejsze do zużytkowania, a z drugiej strony, zwiększający się wraz z rozwojem nauki i techniki zakres wykorzystywania składników kopaliny innych niż tzw. składnik główny (dla pozyskania którego podejmuje się w ogóle jej eksploatację: metal w rudzie, składniki palne węgla kopalnych itp.), powodują, że owo etapowanie ewoluuje w dalszym ciągu, stwarzając stopniowo nowe jakościowe sytuacje. Taka ewolucja wykazuje następujące podstawowe cechy i kierunki:

- 1) rozwijanie i doskonalenie stosowanych metod,
- 2) zbliżanie się technologii etapów przeróbki i przetwórstwa, które łączą wspólne – aczkolwiek o odrębnie określanych celach cząstkowych – zadania przetwarzania materiału wejściowego (kopaliny – produktu eksploatacji górniczej) z wyraźnym eksponowaniem nadania mu cech surowca użytkowego,
- 3) ogromnie złożony zespół właściwości wielu ważnych kopaliny, przy zróżnicowanych wymaganiach odbiorców surowców mineralnych co do ich charakterystyki, spowodował i wywołuje nadal silny rozwój metod i rozwiązań technologicznych, wykorzystywanych do realizacji celów w etapie przeróbki,
- 4) rozwiązania te obejmują coraz obszerniejszy wachlarz operacji należących do najszerzej rozumianej dziedziny inżynierii procesowej, dostosowywanych do złożonej charakterystyki surowców mineralnych i pozwalają na wykorzystywanie – przede wszystkim do selektywnego wydzielania składników przerabianego materiału – coraz większego zakresu ich właściwości fizycznych, fizykochemicznych i chemicznych,
- 5) rozwój technologii inspirowany ciągłym rozwojem konstrukcji maszyn i urządzeń technologicznych,
- 6) wymienione zjawiska stymulują postęp w metodyce i praktyce identyfikacji i oceny, tak mate-

riałów, jak operacji jednostkowych, jak też złożonych procesów technologicznych, wraz z rozwijaniem możliwości i środków sterowania nimi, w szczególności sterowania optymalizującego,

- 7) dodatkowe zadania wynikają ze zwiększającego się udziału w gospodarce surowcami, materiałów wtórnych, w tym odpadów produkcyjnych i pożytkowych: ich rosnące znaczenie gospodarcze i różnorodność, a także specyficzne właściwości, wywołują konieczność dalszego rozszerzenia zakresu działania klasycznych rozwiązań przeróbki,
- 8) wymienione okoliczności stopniowo dezaktualizowały pierwotne pojęcie a nawet nazwę przeróbki kopaliny – od dłuższego czasu proponuje się używanie innych nazw, bardziej pojemnych znaczeniowo, jak: inżynieria mineralna, technologia mineralna i inne – określają one już nie tylko zespół działań technologicznych służących wstępnemu przetwarzaniu kopaliny, lecz też innych materiałów o zbliżonych do nich właściwościach, na surowce niezbędne do wytwarzania produktów użytkowych, autor tych uwag skłania się do używania określenia inżynieria mineralna, aczkolwiek ważniejsze od nazwy jest możliwe jasne i zrozumiałe określenie zakresu i zadań omawianej dyscypliny,

Należy zauważyć, że w przypadku kopaliny etap ten jest pierwszym, ściśle technologicznym etapem ich przetwarzania, wywołującym nieodwracalne zmiany ich cech pierwotnych.

- 9) wszystkie wymienione okoliczności doprowadziły do skupienia w obszarze inżynierii mineralnej – obejmującej również cały zakres klasycznej przeróbki kopaliny – nie spotykanej gdzie indziej różnorodności rozwiązań technologicznych, pozwalających na tworzenie elastycznych układów procesowych, dostosowanych do realizowania bardzo różnorodnych i specyficznie określonych celów,
- 10) stwarza to także wyjątkowe możliwości penetracji innych obszarów przedmiotowych – niż związane z surowcami pochodzenia mineralnego – w których można zastosować, lub adaptować operacje technologiczne opracowane dla zadań przeróbki kopaliny, a następnie również surowców wtórnych, bez szukania od nowa rozwiązań niezbędnych dla tych obszarów. Liczne przykłady dotyczą przeróbki wstępnej różnych stałych materiałów uziarnionych, określonych zadań technologicznych inżynierii środowiska przyrodniczego i innych.

Od wszystkich pracujących w przemyśle i w jednostkach badawczych i rozwojowych, a także w sferze kształcenia specjalistów, zależy w znaczącym stopniu, czy i jak te potencjalne możliwości

zastosowania osiągnąć przeróbki, zostaną wykorzystane.

Już realizowane stosowanie metod wywodzących się z przeróbki w rozmaitych dziedzinach gospodarki i życia społecznego, prowadzą jednak w skrajnych przypadkach do prób ograniczania przeróbki jako całości do wąsko wyodrębnianych zadań (np. tylko jako wstępnej części procesu metalurgicznego – z ograniczeniem jej wyłącznie do przeróbki rud – czy tylko jako pewnej części zadań inżynierii środowiska – z ograniczeniem do przetwarzania odpadów, mającego zresztą głównie znaczenie gospodarcze – i inne próby ograniczeń) przy jednoczesnym traktowaniu jej bardzo często, tradycyjnie i zupełnie już anachronicznie, jedynie jako integralnej części górnictwa – bez dostrzegania i uznawania jej zasadniczej odrębności funkcjonalnej i technologicznej – a stąd nawet prognozowaniu stopniowego zaniku przeróbki wobec przewidywanego przez niektórych, zmniejszania się roli górnictwa kopalni (wydobycia surowców pierwotnych). Powoduje to, że rozległych obszarów potencjalnych zastosowań operacji przerobczych często się nie dostrzega i nie eksponuje, a możliwości nie wykorzystuje, często niepotrzebnie podejmując opracowywanie „nowych” rozwiązań różnych zadań technologicznych.

3. Rozwój technologii i techniki przeróbki surowców mineralnych

Wspomniane, występujące tu i ówdzie tendencje wiązania przeróbki tylko z wąskimi zadaniami dotyczącymi procesów utylizacji poszczególnych surowców, występowały jako reguła w przeszłości. Można sobie wyobrazić, że np. pierwotny wytwórca narzędzi krzemienych w żadnej mierze nie był zainteresowany przygotowaniem do ostatecznego uformowania czegokolwiek innego, niż ręcznie wybieranych buł krzemienych, czy podobnego materiału pozyskiwanego ze złoża litej skały. Pomijając dalej okres, dla którego brak świadectw pisanych, zauważmy, że pierwsze w ogóle dzieło traktujące o wykorzystywaniu surowców pochodzenia mineralnego – *De Re Metallica* Georgiusa Agricoli, opublikowane po raz pierwszy w XVI wieku – którego VIII tom traktuje o przeróbce, wiąże ją z procesami pozyskiwania metali, w niewielkim stopniu z użytkowaniem w niektórych z tych procesów węgla kamiennego. Nawet dziewiętnastowieczne – pierwsze w świecie dzieło traktujące przeróbkę, jako odrębny dział technologii i techniki, zawierające opisy rozwiązań technologicznych i wzory do dotyczących ich obliczeń, z których wiele ma wartość trwałą, a niektóre są używane do dziś – opracowanie Paula von Rittingera: *Lehrbuch der Aufbereitungskunde*,

dotyczyło przede wszystkim węgla kamiennego, aczkolwiek owe do dziś aktualne jego stwierdzenia i prawa, mają zastosowanie ogólne i wchodzą obecnie do kanonu podstaw przeróbki. Ogólnie należy stwierdzić, że wąskie pojmowanie zakresu przeróbki wynikało zawsze z aktualnego stanu działów gospodarki opartych na wykorzystywaniu surowców mineralnych, a zwłaszcza z braku dostrzegania istnienia, lub potrzeby uwzględniania – znowu uwarunkowanemu przez aktualny stan gospodarki surowcami – różnorodnych powiązań pomiędzy zagospodarowywaniem ich poszczególnych grup. Taki stan był czymś oczywistym dopóty, dopóki w przeróbce poszczególnych surowców występowały wyłącznie rozwiązania dostosowywane indywidualnie do specyficznych właściwości tych surowców, a także do oczekiwanych wyników procesu przeróbki: właściwości koncentratów przeznaczonych do dalszego przetwarzania lub (i) użytkowania. Już jednak chronologicznie pierwsze polskie dzieło dotyczące przeróbki, jakim jest czterotomowa „Przeróbka mechaniczna użytecznych ciał kopalnych” Henryka Czeczotta wydana w latach 1930 do 1937 – już po przedwczesnej śmierci autora – przede wszystkim na podstawie konspektów jego wykładów prowadzonych w drugim i trzecim dziesięcioleciu naszego wieku, najpierw w Petersburskim (Leningradzkim) Instytucie Górniczym, a następnie – po przyjeździe do Polski – w Akademii Górniczej, traktuje przeróbkę jako zespół operacji wykorzystywanych w procesach przerabiania wszelkich kopalni.

Taka zmiana w traktowaniu przeróbki: w kierunku uogólniania jej rozwiązań, opracowywania i stosowania bardziej skutecznych – często bardzo złożonych – procesów: układów operacji technologicznych, opracowywania operacji opartych na nie stosowanych poprzednio zasadach, wreszcie zwracania coraz większej uwagi na efektywność – technologiczną i ekonomiczną – procesów przerobczych, następowała w wyniku rozwoju i ewolucji opartych z jednej strony na wzroście potrzeb społecznych, kształtujących popyt na produkty przemysłów wykorzystujących surowce mineralne, a z drugiej na umożliwiających formułowanie nowych jakościowo składników owego popytu i stwarzających realne możliwości ich zaspokajania, rozwoju nauki i techniki.

Dotychczasowe rozważania pozwalają na pewne usystematyzowanie następujących głównych uwarunkowań i tendencji ewolucji inżynierii mineralnej¹:

¹ rozwój omawianych zjawisk ma charakter ciągły, skąd i ich opisywane skutki nadal ewoluują w sposób nie będący przedmiotem przedstawianych uwag – stąd też użycie czasu teraźniejszego w ich opisie

- a) zwiększanie zapotrzebowania na produkty przetwarzania surowców mineralnych²; zmiany dotyczą zarówno ilości, jak i – przede wszystkim – jakości, w tym rozszerzania asortymentu takich produktów, włącznie z powstawaniem ich zupełnie nowych grup,
- b) wzmożone wyczerpywanie złóż, począwszy od zawierających kopaliny – jak wcześniej wspomniano – o najwyższej wartości użytkowej i najłatwiejszych do pozyskania i przetworzenia; możliwości uzupełniania zarejestrowanych zasobów dzięki nowym odkryciom geologicznym są z reguły niemożliwe do przewidzenia, a przede wszystkim mają swój naturalny kres³,
- c) łącznym wynikiem zjawisk wymienionych w punktach a) i b) jest między innymi konieczność obniżania tak zwanej granicy wielkości zasobów przemysłowych oraz kryteriów bilansowości złoża określonych zarówno ilościowo (wielkość złoża przydatnego do eksploatacji, z uwzględnieniem jej warunków geologiczno-górnicych), jak jakościowo (zawartość i sposób występowania w kopalinie składników użytecznych – zwłaszcza rodzaj i postać oraz stopień rozproszenia ich nośników),
- d) konieczność pozyskiwania coraz większej liczby składników – zawartych w kopalinie nierzadko nawet w ilościach bardzo niewielkich, czy wręcz śladowych – niezbędnych do licznych nowych zastosowań wynikających z postępu nauki i techniki,
- e) narastanie ilości materiałów odpadowych powstających przede wszystkim na etapie przeróbki kopaliny; zrozumiałe, że ilość tych odpadów złożonych ze składników kopaliny nie znajdujących bezpośredniego zastosowania, lub występujących w ilościach niemożliwych do zbilansowania z zapotrzebowaniem, jest tym większa, im większa jest ilość przerabianej kopaliny i im jest ona uboższa w składniki użyteczne,
- f) konieczność sprostania podstawowym zadaniom przeróbki w aspekcie treści punktów c), d) i e), wymaga wspomnianego już poprzednio opracowywania nowych operacji technologicznych i ich układów, budowy niezbędnych do ich realizacji maszyn i urządzeń, a także tworzenia systemów i układów kontroli procesów zapewniających właściwy przebieg przemysłowych procesów technologicznych, wraz z urządzeniami niezbędnymi do ich budowy.

² dotyczy to również innych surowców, których nie omawia się w niniejszym opracowaniu

³ należy wspomnieć oczywistą i już powszechnie uświadomianą nieodtworzalność zasobów kopaliny

W permanentnym procesie dostosowywania możliwości przeróbki do wymagań chwili, poszczególne grupy jej operacji, wykonywane aby osiągnąć cele jednostkowe, składające się na cel ogólny całego procesu technologicznego, przechodziły różnorodne etapy rozwoju. W ujęciu bardzo uproszczonym można je przedstawić jak następuje.

Podstawowym warunkiem wzbogacenia materiału surowego – koncentrowania użytecznych składników, których nośniki (minerały) są mniej lub bardziej rozproszone w masie wydobytej kopaliny – jest ich oddzielenie od pozostałej – płonnej – części nadawy. Wymaga to rozdrobnienia całego urobku w stopniu wyznaczonym przez rozkład ziarn owoych składników, podlegających koncentrowaniu. Również przygotowanie kopaliny do produkcji materiałów o określonym uziarnieniu – np. z grupy zwiększonych surowców skalnych, wielu substancji syntetycznych i innych – wymaga ich rozdrobnienia, często do uzyskania pożądanego składu ziarnowego (kruszywa i inne wypełniacze) lub do uziarnienia bardzo, a nawet skrajnie drobnego (proszki ściernie, pigmenty itp.). Zdecydowana większość materiałów podlegających przeróbce, wymaga rozdrobnienia: wstępnego, a najczęściej również międzyoperacyjnego, także w kilku stadiach w dalszym przebiegu procesu. Z drugiej strony, operacje rozdrabniania, prowadzące się do niszczenia pierwotnej struktury materiału, w większości przypadków o znacznej wytrzymałości mechanicznej, są najbardziej energochłonnymi operacjami przeróbczymi. Ta cecha rozdrabniania jest znana od dawna. Wspomniany już Henryk Czeczott sformułował między innymi stałe aktualną zasadę: „nie rozdrabniać nic zbytecznego”. Omawiana już tendencja zmniejszania się zarówno uziarnienia, jak i stopnia rozproszenia składników użytecznych w surowcach pierwotnych – przede wszystkim metalonośnych w rudach metali nieżelaznych – powoduje coraz większy udział energii na rozdrabnianie w całkowitym zużyciu energii w procesie przeróbczym. Nie od rzeczy jest wspomnieć także o szczególnych wymaganiach wobec właściwości materiałów konstrukcyjnych, używanych do budowy maszyn do rozdrabniania. Jedną z ważnych cech surowców wtórnych (zwłaszcza odpadów procesów przeróbczych i przetwórczych), podkreślanych przy uzasadnianiu konieczności ich wykorzystywania, jest ich bardzo znaczne – na ogół – rozdrobnienie, osiągnięte w poprzednio prowadzonych procesach, eliminujące w poważnym stopniu potrzebę ponoszenia nakładów energetycznych na rozdrabnianie, zwłaszcza na szczególnie energochłonne, bardzo drobne mielenie. Oszczędności energii zużywanej na rozdrabnianie (kruszenie i mielenie) uzyskuje się prowadząc te operacje wielostadialnie

z nadziarnem, ze stopniowym usuwaniem z ciągu rozdrabniania części materiału, która osiągnęła już wymagane uziarnienie (operacje klasyfikacji ziarnowej), albo nie zawierającej już znaczącej ilości składników użytecznych (np. wzbogacanie grawitacyjne wstępnie skruszonych rud cynkowo-olowowych, z wydzieleniem ubogiej frakcji jako odpady, flotacja wstępna w obiegach mielenia rud, z odrębnym wzbogacaniem otrzymanych produktów o zróżnicowanej zawartości metali, z których tylko uboższe wymagają dalszego domielania oraz inne układy przemienne mielenia i wzbogacania itp.), stosowanie różnych rozwiązań samomielenia lub mielenia bryłowego i wywodzących się z nich, oszczędzających tak – w pewnym stopniu – energię, jak – przede wszystkim – konstrukcje młynów i używane mielniki. Coraz częściej zastępuje się tradycyjne operacje mielenia mielnikowego, mieleniem w specjalnie do tych celów skonstruowanych kruszarkach (młynach) walcowych, o bardzo dużym nacisku walców i dużych wydajnościach, w których – poza innymi właściwościami – realizuje się korzystne ze względów energetycznych, mielenie skrępowane. W przypadkach, w których nie zakłóca to dalszych etapów procesu (głównie flotacji), i nie wpływa na jakość produktów końcowych, stosuje się niekiedy środki chemiczne zmniejszające napięcie powierzchniowe fazy stałej, podobnego typu, jak używane np. w wiertnictwie; ich zastosowanie jest jednak w przeróbce bardzo niewielkie, ogranicza się głównie do niektórych surowców skalnych. Szczególna rola rozdrabniania i jego energochłonność usprawiedliwiają nieco szersze potraktowanie tej operacji.

Operacje o celach przeciwnych do rozdrabniania, to kawałkowanie. Wspominam o nich w tym miejscu, aby zamknąć omawianie grupy operacji służących modyfikacji składu ziarnowego materiału poprzez zmianę wielkości ziarn. Wśród operacji kawałkowania – łączenia drobnych ziarn materiału w większe – wyróżnia się: grudkowanie, brykietowanie wraz z kompaktowaniem⁴ oraz spiekanie (aglomerację). W tej kolejności na ogół układają się ich zakresy zastosowania, koszty (tak inwestycyjne, jak eksploatacyjne – zwłaszcza zużycie energii), a także – mniej konsekwentnie – możliwości użytkowania produktów odpowiadających potrzebom. Operacje kawałkowania, stosowane zwykle w dość ograniczonej liczbie, ściśle określonych przypad-

⁴ takie określenie tej operacji jest przejęte bezpośrednio z języków krajów, w których jej stosowanie było rozwijane wcześniej, nb. najczęściej do kawałkowania materiałów innych niż mineralne; można mieć zastrzeżenie co do jego pełnej poprawności językowej, na razie jednak brak rozsądnych propozycji jego zastąpienia

ków, będą zapewne szerzej rozwijane i stosowane w miarę wzrostu zakresu utylizacji surowców odpadowych o drobnym uziarnieniu.

Klasyfikacja ziarnowa realizowana jako przesiewanie lub klasyfikacja przepływowa, jest typową operacją rozdzielczą, której obydwie główne rodzaje łączy wyłącznie cel, jakim jest wydzielenie klasy ziarnowej – grupy ziarn o wielkościach zawartych w określonym przedziale. Różne są natomiast ich podstawy, urządzenia, a także właściwości eksploatacyjne. Pomijając ogólnie znane informacje wypada tylko zauważyć, że wybór zależy z reguły od wielkości ziarn ale także od szczegółowych preferencji dotyczących dokładności rozdziału i wydajności operacji. Przesiewanie odbywające się dwuwymiarowo – na zaopatrzonej w otwory powierzchni sitowej – odznacza się zdecydowanie większą dokładnością osiągania zamierzonej granicy rozdziału, przy znacznie mniejszej wydajności (gwałtownie malejącej ze zmniejszaniem się wielkości odsiewanych ziarn). Klasyfikacja przepływowa realizowana w podstawowym etapie operacji (oprócz samego odbioru produktów) przestrzennie, zapewnia znacznie większą wydajność przy mniejszej jednak dokładności rozdziału oraz – w przypadku materiałów niejednorodnych pod względem gęstości ziarn (i ich kształtów) – mniej jednoznacznie określonej jego granicy. Podstawowe kierunki rozwoju przesiewania to zwiększanie wydajności operacji i zmniejszanie możliwych do praktycznego stosowania przemysłowego, wielkości otworów sit. Specyficzne zadania dotyczą wpływu na zmniejszanie utrudniających przesiewanie oddziaływań powierzchniowych pomiędzy ziarnami: kapilarnych (przesiewanie materiałów wilgotnych – o zawartości wody najczęściej w granicach od kilku do kilkunastu procent) i adhezyjnych (przesiewanie suchych proszków); w obu przypadkach zjawiska te są tym bardziej znaczące, im drobniejsze są ziarna (wartości graniczne w obu przypadkach są zupełnie różne). Główne sposoby działań podejmowanych w celu osiągnięcia tych celów, to konstrukcja przesiewaczy o złożonych, trójwymiarowych charakterystykach ruchu sita, a także tak zwanych „sit probabilistycznych” (o znacznie mniejszej jednak precyzji określania granicy rozdziału), pomocnicze stosowanie przedmuchu powietrzem (analogicznie do stosowanego od dawna przesiewania na mokro – z wodą jako ośrodkiem wspomagającym transport ziarn przez otwory sita i eliminującym wpływ zjawisk adhezyjnych) i inne.

Klasyfikacja przepływowa jest jedną z licznych realizacji procesów przepływowych. Ich istota polega na wykorzystywaniu złożonego układu sił działających na ziarna znajdujące się w rzeczywistym

ośrodku płynnym (ciekłym lub gazowym) – przede wszystkim: siły masowej (grawitacyjnej lub odśrodkowej) i powierzchniowej (oporu ośrodka) wywołujących ruch ziarn i określających charakterystykę tego ruchu, w szczególności jego prędkość, będącą cechą rozdziału ziarn. Główne realizacje procesów przepływowych, to klasyfikacja przepływowa, zagęszczanie zawiesin i wzbogacanie grawitacyjne. Ścisłejsze powinowactwo występuje przede wszystkim pomiędzy klasyfikacją i zagęszczaniem⁵. Można określić zagęszczanie jako przypadek skrajny klasyfikacji, w którym przelew (produkt o drobniejszym uziarnieniu), nie zawiera w ogóle – w założeniu – fazy stałej. Z drugiej strony można klasyfikację uznawać za niedokładnie przeprowadzoną operację zagęszczania, w której przelew zawiera fazę stałą o uziarnieniu drobnym w stosunku do drugiego produktu – wylewu. Aczkolwiek takie wiązanie obu tych operacji może być uzasadnione tylko w przypadku tak zwanych operacji poziomoprądowych – wśród operacji klasyfikacji pionowoprądowej brak odpowiedników zagęszczania – to jednak potwierdza je ewolucja rozwiązań technicznych. Obserwuje się interesującą, wyraźną tendencję, stopniowego wykorzystywania do klasyfikacji przepływowej, urządzeń stosowanych – z reguły w ogóle pierwotnie skonstruowanych – do celów zagęszczania. Dotyczyło to kolejno: osadników strumieniowych, hydroseparatorów, hydrocyklonów, wirówek sedymentacyjnych i zagęszczaczy warstwowych (lamelowych). Wszystkie są używane obecnie w obu zastosowaniach: do klasyfikacji i do zagęszczania. Wyjątek stanowią zagęszczacze promieniowe, jakie można uważać za rozwinięcie hydroseparatorów, i nieliczne inne, mniej rozpowszechnione urządzenia do sedymentacji o specyficznych zastosowaniach. Ostatnio coraz częściej wykorzystuje się do klasyfikacji sita łukowe (i ich rozwinięcia – np. sita stożkowe OSO) – łączące w działaniu przesiewanie i odśrodkową klasyfikację przepływową – również używane początkowo tylko do zagęszczania. I na odwrót: do zagęszczania zawiesin o grubszym uziarnieniu fazy stałej, stosuje się z powodzeniem klasyfikatory mechaniczne zwojowe (rzadziej innych typów). Techniczne wykonanie, a zwłaszcza eksploatacja podobnych urządzeń różnią się w przypadku ich stosowania do klasyfika-

⁵ dotyczy to głównie procesów przepływowych przebiegających w ośrodku ciekłym, aczkolwiek można wskazać analogiczne przykłady wśród operacji prowadzonych w ośrodku gazowym – tu odpowiednikiem zagęszczania zawiesiny jest osadzanie pyłu zawieszzonego w gazie: sedymentacyjne odpylanie gazów, a cieczą klasyfikację przepływową zastępuje – co zrozumiacie – poziomoprądową klasyfikacją gazową (separacja pneumatyczna)

cji i do zagęszczania, ale podstawowe konstrukcje pozostają takie same, a podstawy działania – identyczne. Zastosowanie wszystkich takich urządzeń do zagęszczania wykazuje jednak w stosunku do klasyfikatorów zasadniczą odmienność w obszarze osiągniętych koncentracji, a stąd i prędkości ziarn. W odróżnieniu od klasyfikacji, prowadzonej na ogół w warunkach opadania skrępowanego (bardzo rzadko swobodnego) lecz z zachowaniem dość znacznej możliwości ruchów ziarn względem siebie, niezbędnej dla koncentrowania się ziarn o zróżnicowanych wielkościach w obszarach, w których tworzą się produkty: wylew i przelew, w przypadku zagęszczania koncentrację produktu zagęszczonego doprowadza się najczęściej do poziomu, w którym indywidualne ruchy ziarn są poważnie, a nawet skrajnie ograniczone (opadanie kolektywne) i rozwarstwianie grupy ziarn według ich prędkości – podstawa klasyfikacji – nie jest już możliwe. Ponadto w przypadku zagęszczania w celu przyspieszenia dochodzenia układu do stadium opadania kolektywnego i tworzenia się osadu fazy stałej – początkowo luźnego, następnie podlegającego kompresji – stosuje się środki pomocnicze, najczęściej flokulanty – powierzchniowo czynne związki chemiczne – wywołujące agregację ziarn w duże zespoły – flokuły – o odpowiednio dużej prędkości sedymentacji. W tym miejscu można wspomnieć o możliwości wywoływania i wykorzystywania do rozdziału znajdujących się w zawieszynie ziarn o różnych właściwościach fizykochemicznych powierzchni, flokulacji selektywnej, należącej już do operacji wzbogacania.

Omówione dotychczas operacje służą regulacji składu ziarnowego – rozdrabnianiu i kawałkowaniu – oraz klasyfikacji ziarnowej i odwadnianiu sedymentacyjnemu. Odwadnianie osadu o stopniu kompresji, przy którym nie jest już możliwe dalsze zagęszczanie sedymentacyjne, nawet z wykorzystaniem siły odśrodkowej jako siły masowej, może się odbywać kolejno⁶ w operacjach: filtracji – usuwania wody pod wpływem różnicy ciśnień poprzez nieprzenikliwą dla ziarn przegrodę porowatą – oraz suszenia – odparowywania wody, najczęściej z doprowadzeniem ciepła: jest to – po rozdrabnianiu – najbardziej energochłonna spośród operacji stosowanych w przeróbce bardziej powszechnie. Bardzo wielkie zużycie energii w operacji suszenia termicznego wywołuje stałe poszukiwanie możliwości jego eliminacji z zastąpieniem wystarczająco efektywną

⁶ kolejność najczęściej występująca przy odwadnianiu materiałów drobnouziarnionych: sedymentacja, filtracja, suszenie; etapy te zapewniają kolejno coraz większy stopień usuwania wody, są jednak coraz bardziej energochłonne; niektóre z nich można pominąć

filtracją – wyłącznie ciśnieniową. Filtracja ta może być także wspomagana przez siły kapilarne osiągające niezbędne wartości na powierzchni przegród filtracyjnych o skrajnie drobnych porach (np. filtry ceramiczne). W eliminowaniu suszenia na rzecz filtracji osiągnięto już poważne postępy, wykorzystywane w warunkach przemysłowych.

Cała dotychczas przedstawiona część niniejszego rozdziału dotyczy operacji technologicznych, w wyniku których otrzymuje się określoną postać surowca. Jest to wystarczające w wielu przypadkach, w których użyteczność surowca jest określona przez jego uziarnienie (surowce skalne, w tym ilaste, wspomniane już materiały ściernie, wypełniacze i pigmenty, wśród nich liczne produkty syntezy chemicznej i inne materiały, w tym np. poddawane kawałkowaniu aby nadać im bardziej wygodną postać rynkową). W takich przypadkach proces technologiczny może składać się wyłącznie z omówionych operacji, obejmowanych często wspólnym określeniem przeróbki mechanicznej⁷. W zdecydowanej większości przypadków⁸ nie realizują one jednak najważniejszego z reguły zadania przeróbki, jakim jest skoncentrowanie w jednym (lub kilku) produktach operacji rozdzielczej, składnika (składników) użytecznego, dla którego pozyskania podejmuje się eksploatację kopaliny lub wtórną utylizację materiału odpadowego.

Jest to zadaniem obszernej grupy operacji wzbogacania. Operacje te grupuje się zwykle według właściwości fizycznych, fizykochemicznych, rzadziej chemicznych, które na tyle różnicują składniki nadawy podlegające rozdziałowi, że można je wykorzystywać do przeprowadzenia ich rozdziału. Różnorodność tych właściwości i ich wzajemne związki, a także dołączanie do nich – w miarę postępu nauki i możliwości realizacyjnych – innych właściwości, dotychczas nie wykorzystywanych, umożliwiają nieustannie dopełnianie tych grup, ich łączenie, czy wy-

⁷ dodatkowym, ważnym elementem tego zespołu operacji, jest jeszcze uśrednianie; jego rola w procesach przerobczych polega na ujednorodnianiu składu nadawy (często też produktów końcowych – w tym tworzeniu mieszanek o zadanych właściwościach); nie można jednak uważać uśredniania za uniwersalny zamiennik selektywności w prowadzeniu przeróbki materiałów o niejednorodnych charakterystykach; bliższe omówienie tej kwestii wykracza poza ramy niniejszego opracowania

⁸ poza niektórymi spośród wspomnianych już surowców ilastych, produktami mielenia selektywnego i innymi sporadycznie występującymi surowcami; nb. określone klasy ziarnowe materiału nadawy także mogą być owymi „składnikami użytecznymi”, jednak w tej części opracowania chodzi o składniki wyróżniane jako odrębne fazy mineralne – z reguły nośniki metali lub innych interesujących pierwiastków itp.

odrębnianie nowych. Ogólnie można powiedzieć, że rozwój operacji wzbogacania polega na wykorzystywaniu wszelkich możliwych różnic we właściwościach podlegających wyodrębnianiu składników surowca pierwotnego, do realizacji tego zamierzenia. Wykorzystywana w tym celu właściwość składników nosi nazwę cechy rozdziału – jest ona także podstawą wspomnianego już wyróżniania grup operacji wzbogacania⁹. Ogólną tendencją w rozwijaniu poszczególnych operacji jest zwiększanie ich precyzji – zapewnianie efektywnego przeprowadzania operacji przy coraz mniejszych różnicach wartości cechy rozdziału i w bardziej złożonym układzie warunków, w którym istotną rolę odgrywa uziarnienie nadawy, którego zmniejszanie się jest – jak to już uzasadniono – jedną z głównych tendencji w ewolucji cech przerabianych materiałów. Szczególne miejsce w procesach przeróbki operacji wzbogacania – którym z reguły są w danym procesie przyporządkowane operacje przeróbki mechanicznej jako przygotowawcze lub uzupełniające – jest przyczyną, dzięki której wiedza o operacjach wzbogacania jest znacznie szersza i bardziej upowszechniona, niż o operacjach przeróbki mechanicznej. Pozwala to na jeszcze bardziej syntetyczne niż w przypadku tych ostatnich, przedstawienie ich przeglądu.

Różnice właściwości mineralnych składników surowców najdawniej wykorzystywane do celów rozdziału, dotyczą ich gęstości. Jest ona podstawą operacji wzbogacania grawitacyjnego. Rozwój tych operacji przebiegał przez długi okres czasu wyłącznie jako procesów przepływowych – z wykorzystywaniem różnic prędkości ziarn względem ośrodka z preferencją gęstości w kształtowaniu się tej prędkości, z traktowaniem wielkości ziarn jako cechy drugorzędnej. Stąd oczywista przynależność operacji wzbogacania grawitacyjnego do obszernej grupy procesów przepływowych, już poprzednio omówionych. Siłą masową wykorzystywaną do realizacji operacji wzbogacania grawitacyjnego była przez długi czas – i w poważnej części przypadków jest nadal – siła ciężkości, skąd nazwa tej grupy operacji: wzbogacanie grawitacyjne, utrzymywana mimo coraz szerszego stosowania urządzeń, w których jako wywołująca ruch ziarn, występuje siła odśrodkowa¹⁰. Stosowane rozwiązania wykorzystują tak układy poziomoprądowe (w tym najwcześniejsze

⁹ cechą rozdziału w operacjach klasyfikacji ziarnowej jest wielkość ziarn, a w procesach przepływowych – ogólnie – prędkość charakterystyczna ziarn w ośrodku, zależna od ich charakterystyk fizycznych

¹⁰ w ogólności siłę odśrodkową stosuje się we wszelkich operacjach przepływowych w celu zwiększenia wartości działającej w nich siły masowej, co ma szczególne znaczenie przy przeróbce materiałów o drobnym uziarnieniu

grawitacyjne: rynny, śluzy, następnie także stoły koncentracyjne, stożki Reicherta itp. oraz odśrodkowe i o mieszanym układzie działających sił masowych: hydrocyklony wzbogacające, rynny spiralne i inne), jak pionowoprądowe (osadzarki, klasyfikatory wzbogacające). Znacznie później, po opanowaniu wytwarzania ośrodków ciekłych o podwyższonej gęstości (w stosunku do gęstości wody – „cieczy ciężkich”), można było w uzasadnionych przypadkach (uziarnienie materiału, zakres gęstości składników, koszt operacji itp.) oprzeć wzbogacanie grawitacyjne bezpośrednio na różnicach gęstości rozdzielanych składników surowca wejściowego. Uwarunkowania procesów przepływowych zachowały tu znaczenie dla prędkości zachodzenia rozdziału (stąd między innymi stosowanie siły odśrodkowej w celu jego przyspieszenia) oraz stabilizacji cieczy zawieszonych (właściwości fizyczne oraz prędkość i skutki, a zwłaszcza zapobieganie sedymentacji fazy stałej – obciążnika cieczy). Zakłócający wpływ wzajemnych oddziaływań ziarn na rozdział w warunkach wysokiej koncentracji fazy stałej, powodował w miarę zmniejszania się wielkości ziarn przerabianych surowców, zmniejszanie się skuteczności wzbogacania grawitacyjnego. Zmiany w zasadach realizacji jego operacji oraz w konstrukcji urządzeń (osadzarki drobnoziarnowe, hydrocyklony z autogeniczną¹¹ cieczą zawieszoną, rynny spiralne i stożki oraz inne urządzenia w rozmaitych wariantach i rozwinięciach pochodnych) umożliwiają dalsze stosowanie tych stosunkowo prostych i tanich operacji. Postęp w konstrukcjach stołów koncentracyjnych dobrze rokuje dla rozwoju zastosowań tych urządzeń realizujących wzbogacanie, w którym rozdział zachodzi na podstawie wielkości prędkości unoszenia – związanej z zjawiskami przepływowymi – oraz wielkości ziarn.

Charakterystyka kopalin polskich nie stwarza możliwości stosowania w podstawowych procesach ich wzbogacania, metod opartych na wykorzystaniu innych właściwości fizycznych składników przewidzianych do selektywnego wydzielania. Dotyczy to przede wszystkim właściwości magnetycznych i elektrycznych, podstaw jednoimiennych z nimi operacji wzbogacania. O ile jednak nie można ich zastosować jako głównej operacji wzbogacania, np. w przypadku wydzielania składników ferromagnetycznych, o tyle nie można przecenić ich roli w realizacji bardziej finyzyjnych zadań przeróbki różnych surowców. Można wymienić usuwanie niewielkich – często na granicy śladowych – zawartości niepożądanych składników żelazonośnych z surowców szklarskich i ceramicznych, możliwości precyzyjnego roz-

¹¹ w której obciążnikiem jest sam wzbogacany materiał

działu składników w procesach technologicznych przeróbki frakcji towarzyszących naturalnym kruszywom i piaskom, zawierających złożone mieszaniny minerałów ciężkich, otrzymywanych przy uszlachetnianiu tych surowców jako odpadowe, a będących potencjalnym źródłem licznych pierwiastków rzadkich i rozproszonych itp. Bardzo duże pole zastosowań tych operacji wiąże się z utylizacją różnych, nie tylko mineralnych, materiałów odpadowych. Podstawą takiego rozwoju zastosowań jest fakt bardzo wielkiego zróżnicowania właściwości magnetycznych i elektrycznych składników wymienionych materiałów, a warunkami dalsze rozwijanie omawianych operacji w kierunku zwiększenia natężenia pól magnetycznych (i elektrycznych¹²) działających w strefach rozdziału odnośnych urządzeń – z jego lokalnym zróżnicowaniem, np. w separatorach poligradientowych – powiększania efektywności energetycznej urządzeń (np. separatory elektromagnetyczne z uzwojeniem nadprzewodzącym), osiągnięcia wysokiej precyzji selektywnego wyprowadzania rozdzielonych frakcji itp. Wszystkie takie zadania są już realizowane i stopniowo wdrażane w praktyce przemysłowej. Stwarzają dobre prognozy dalszego rozwoju.

Flotacja i inne operacje fizykochemiczne są najczęściej stosowanymi operacjami wzbogacania materiałów drobno i bardzo drobno uziarnionych. Dzieje się tak dzięki ich wyjątkowej elastyczności – niespotykanej w innych przypadkach możliwości modyfikacji warunków przebiegu operacji, w tym i właściwości powierzchniowych ziarn rozdzielanych składników surowca, określających ich podatność na tworzenie agregatów z pęcherzykami powietrza, będącą w przypadku flotacji cechą rozdziału. Kilkakrotnie wspomniane zmniejszanie się przeciętnego uziarnienia przetwarzanych materiałów tym bardziej uzasadnia przypisywanie flotacji roli najbardziej powszechnie stosowanej operacji wzbogacania. Drogi rozwoju, wielorakość uwarunkowań i zastosowań flotacji (nie tylko w przeróbce surowców mineralnych) oraz warunków jej realizacji, wymagałyby oddzielnego opracowania, nawet w konwencji przyjętej dla niniejszego. Każda próba ich pobieżnego przedstawienia prowadziłyby do zniekształcających uproszczeń. W związku z tym autor zrezygnował z jej podjęcia, ograniczając się

¹² warunki stosowania wzbogacania elektrycznego (elektrostatycznego z wariantem tryboelektrycznym) są zasadniczo odmienne niż magnetycznego, jednak spodziewany z wielu względów, słabszy rozwój metod elektrycznych, nie uzasadnia ich szczegółowego wyodrębnienia w tak szkieletowym omówieniu; stąd ich łączne ujęcie w opisie metod wykorzystujących w dużym stopniu pokrewne właściwości materiałów

tylko do wymienienia głównych kierunków prac nad rozwojem tej operacji (w zasadzie – podobnie, jak w przypadku procesów przepływowych – grupy powiązanych ze sobą operacji), odpowiadających głównym celom częściowym tego rozwoju. Te kierunki to:

- rozszerzanie zakresu uziarnienia nadawy flotacyjnej, zarówno na ziarna grubsze (nawet kilkumilimetrowe) z rozwojem operacji rozdziału wykorzystujących obok flotacyjnych, inne właściwości materiału (np. flotograwitacja), jak i na ziarna drobniejsze od uważanych obecnie za jeszcze – ze względu na wielkość – flotujące; zmierzanie w kierunku coraz drobniejszych ziarn powinno umożliwić docelowo objęcie przez możliwości flotowania całego zakresu wielkości ziarn, od wymienionych poprzednio, do znajdujących się na granicy
- flotacji jonów – zwykle wymienianej łącznie z flotacją osadów – których rozwój stanowi kolejny, ważny kierunek rozwoju flotacji; w tym przypadku zastosowaniom do pozyskiwania składników użytecznych występujących w roztworze (przeprowadzanych do roztworu) towarzyszą ważne zastosowania do usuwania z roztworów – najczęściej odpadowych ścieków poprodukcyjnych wielu technologicznych procesów chemicznych – zanieczyszczających je substancji niepożądanych, a zwłaszcza szkodliwych; w poszczególnych przypadkach obydwie wymienione cele mogą występować łącznie,
- w obu wymienionych kierunkach celem wspólnym jest zwiększenie selektywności operacji, z jej wynikiem końcowym: podwyższeniem uzysków¹³ składników użytecznych, we właściwych dla nich koncentratkach operacji,
- wspólnym warunkiem osiągnięcia wymienionych celów jest opracowywanie i modyfikacja warunków technologicznych (odczynniki, stopień napowietrzenia, intensywność przebiegu zjawisk jednostkowych operacji), konstrukcyjnych (maszyny: ich konstrukcja, właściwości dynamiczne zachodzących w nich przepływów, zużycie ener-

¹³ podwyższenie selektywności rozdziału i uzysku składników jest ogólnym celem rozwoju wszystkich operacji rozdziałczych; wymienia się je przy flotacji z tego powodu, że w jej przypadku możliwości osiągnięcia tych celów często są uwarunkowane w sposób tak złożony, że sformułowanie zasad postępowania będzie wymagało dodatkowych badań podstawowych o znacznym zakresie; podobnie sposoby wzajemnego oddziaływania różnych czynników jednostkowych, ważnych dla osiągnięcia postulowanych celów, są w przypadku flotacji szczególnie złożone i dalekie od pełnego rozpoznania; podobnie kształtują się inne uwarunkowania, zwłaszcza ekonomiczne

gii) i eksploatacyjnych (praktyczne zasady prowadzenia operacji przemysłowych).

Stosunkowo niedawno rozpoczęło się bardziej zdecydowanie uzupełnianie procesów przeróbki technologicznymi operacjami chemicznymi. Są to przede wszystkim dostosowane do właściwości wydzielanych składników nadawy, operacje – tu głównie selektywne – roztwarzania i strącania lub selektywnej adsorpcji. Zakres ich wprowadzania do procesów przeróbczych nie jest jeszcze zbyt wielki, nie zawsze również jest ono uzasadnione. Niemniej, perspektywy stosowania tych operacji – częściowo przejmowanych z technologii chemicznej nieorganicznej, w tym z hydrometalurgii – rysują się na tyle wyraźnie, przede wszystkim jako operacji wspomagających procesy „klasyczne” (wzbogacanie ubogich produktów pośrednich, zawierających jednak dość znaczne ilości cennych składników, a trudne do wzbogacenia metodami typowymi dla przeróbki, przygotowywanie nadawy flotacji jonów i osadów itp.), że ich rozwijanie zasługuje na uwagę. Dotyczy to także procesów biotechnologicznych – wzbogacania biochemicznego, jakie może być uzupełniająca operacją pozyskiwania składników użytecznych, np. zawartych w niewielkich ilościach w zdeponowanych odpadach, rudach pozabilansowych i tym podobnych materiałach, a także operacją dezaktywacji składników szkodliwych (np. piryt w odpadach po wzbogacaniu zasiarczonego węgla) zawartych w takich materiałach.

Coraz bardziej precyzyjnie określone warunki przebiegu operacji technologicznych przeróbki, jakie mają dać wyniki, zgodne z również coraz bardziej dokładnie formułowanymi żądaniami odbiorców jej produktów (włącznie z określeniem dopuszczalnych odchyień) i ekonomicznymi zasadami działania zakładu, wymagają rygorystycznego dotrzymywania warunków przebiegu operacji i całego procesu technologicznego. Do tych warunków należy także zespół właściwości materiału wejściowego, ważnych dla przebiegu procesu. Te okoliczności stwarzają coraz większe wymagania wobec całego zespołu zadań identyfikacji i kontroli oraz sterowania operacjami i procesami technologicznymi. Podobnie jak w przypadku flotacji, nawet pobieżne rozwinięcie tego tematu wymaga odrębnego opracowania. Grupy zadań składające się na zespół identyfikacji i kontroli w przeróbce, obejmują:

- identyfikację właściwości materiałów przetwarzanych – zarówno wejściowych (nadawy procesu i ewentualnie materiałów pomocniczych), jak znajdujących się w różnych etapach procesu przetwarzania, aż do produktów końcowych,
- identyfikację stanu warunków i przebiegu poszczególnych operacji – zwłaszcza kluczowych

dla całości procesu: operacji głównych oraz bezpośrednio decydujących o właściwościach ich nadawy, operacji przygotowawczych (np. w bloku operacji przygotowania nadawy flotacyjnej); dotyczy to identyfikacji stanu wszystkich czynników wpływających na przebieg i wyniki procesu: technologicznych, maszynowych, energetycznych i innych,

- wykorzystywanie poprzednio wymienionych informacji do oceny stanu procesu, a w szczególności określanie parametrów opisu (modelu) procesu i – na podstawie wykorzystującego ten opis algorytmu sterowania, formułowanie wskazówek dotyczących dalszego prowadzenia procesu (funkcja doradztwa – wspomaganie działania nadzoru technologicznego, np. dyspozytora) lub (i) dokonywanie tych zmian (funkcja sterowania automatycznego),
- ocenę wyników procesu technologicznego; niezbędny do tego celu jest układ kryteriów oceny, z reguły technologicznych i ekonomicznych; jedno lub kilka spośród tych kryteriów ma charakter kluczowy dla formułowania opinii o wynikach pracy zakładu przeróbki; jest także podstawą formułowania funkcji celu w zadaniach optymalizacji procesu.

Wzgląd na szczególne właściwości surowców pochodzenia mineralnego: ich nieodtworzalność wobec omówionego już wyczerpywania złóż przy rosnącym popycie na zawarte w nich składniki użyteczne, wspomniana już unikalność składu (brak np. innego źródła pozyskiwania metali, surowców przetwarzanych przez nieorganiczny przemysł chemiczny i innych), ale także omówione już poprzednio, konsekwencje wydobywania kopaliny i powstawania w toku procesów ich zużytkowania odpadów, w przeważającej części składowanych na powierzchni ziemi, z określonymi konsekwencjami dla stanu środowiska przyrodniczego, doprowadziły w drugiej połowie bieżącego wieku do stopniowego formułowania konieczności kompleksowego wykorzystywania kopaliny, obejmującego między innymi zagospodarowanie odpadów i możliwie pełne wykorzystanie składników kopaliny. W licznych opracowaniach formułowano zasady takiego kompleksowego wykorzystywania i jego uwarunkowania. W wielu krajach Świata takie zasady gospodarowania kopalinią są w różnym stopniu zaawansowane. Realizacja jego zasad wymaga podjęcia przez inżynierię mineralną – wstępną fazę przetwarzania kopaliny w procesie jej zagospodarowania – rozległych zadań dodatkowych. Wynikają one przede wszystkim z konieczności uwzględnienia wieloskładnikowości kopaliny i prowadzenia utylizacji odpadów – często bardziej efektywnej w przypadku łącznego

zagospodarowywania różnorodnych odpadów występujących na danym obszarze. Pociąga to za sobą potrzebę dostosowywania do tych warunków zarówno operacji jak i procesów technologicznych (w tym projektowania takich procesów wraz z odpowiednim wyposażeniem projektowanego zakładu w maszyny i urządzenia, a także modernizacji istniejących zakładów), opracowywania i stosowania uwzględniających kompleksowe wykorzystanie surowca kryteriów oceny procesów oraz systemów kontroli i sterowania. Odpowiednie prace są wielu zadaniach w różnym stopniu zaawansowane.

4. Perspektywy inżynierii mineralnej

Przedstawione informacje pozwalają – przy wszystkich poprzednich zastrzeżeniach co do ich ujęcia – sformułować ogólny pogląd o perspektywach inżynierii mineralnej. Zadania wynikające przy realizacji przetwarzania surowców pochodzenia mineralnego, o złożonej charakterystyce, w pełnojęściowe surowce, pozwoliły przeróbce kopaliny zgromadzić bardzo bogaty zespół rozwiązań technologicznych i sformułować podobny, uogólniony zespół zasad dotyczących postępowania przy przetwarzaniu materiałów o skomplikowanych właściwościach z celem otrzymania surowców o żądanych cechach. W wynikających stąd potencjalnych możliwościach mieści się nie tylko realizacja ogółu zadań wynikających w zakresie poszukiwania rozwiązań technologicznych niezbędnych we wstępnej fazie kompleksowego zagospodarowywania kopaliny, lecz też przedstawianie propozycji rozwiązań technologicznych utylizacji praktycznie każdego materiału, w tym odpadowego. Wykorzystywanie i dalsze rozwijanie tych możliwości – również w odniesieniu do materiałów tylko odlegle związanych z pierwotnymi kopalinią lub tylko mających właściwości podobne do surowców mineralnych – nie tylko zapewniają znaczne ułatwienie przetwarzania takich materiałów, lecz też osiąganie dalszego postępu w rozwoju nowej dyscypliny – inżynierii mineralnej – wywodzącej się z potrzeb górnictwa jako przeróbki kopaliny, ale stopniowo osiągającej wyniki znaczące dla realizacji zadań znacznie od tych potrzeb odległych.

5. Literatura (wybrane pozycje)

1. Agricola, G. Kempnicensis – *De Re Metallica Libri XII, quibus Officia, Instrumenta, Machinae...*, Liber VIII – Ludovico Regis Bazylea 1621 (I wydanie: Jeronymus Froben und Nicklaus Bischoff Bazylea 1557)
2. Banaszewski, T. – *Przesiewacze* – Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1990
3. Budryk, W. – *Przeróbka mechaniczna użytecznych ciał kopalnych, część ogólna* – Spółdzielnia Wydawnicza Pra-

- owników Technicznych Szkół Akademickich w Krakowie Kraków 1947
4. Budryk, W., Stepiński, W. – *Teoria przeróbki mechanicznej kopalin, cz.1 – Skrypty uczelniane AGH, PWN Kraków 1954*
 5. Cierpisz, S. – *Automatyzacja procesów przeróbki mechanicznej węgla – Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1980*
 6. Czeczott, H. – *Przeróbka mechaniczna użytecznych ciał kopalnych – Komitet Wydawniczy Dzieł śp. prof. Henryka Czeczotta Kraków t.1 1930, t.2 1931, t.3 1935, t.4 1937*
 7. Dietrych, J. – *Osadzarki – Państwowe Wydawnictwa Techniczne Katowice 1953*
 8. Laskowski, T., Błaszczczyński, S., Ślusarek, M. – *Wzbogacanie kopalin w cieczach ciężkich – Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1979*
 9. Ляценко, П. В. – *Гравитационные методы обогащения (мокрые процессы и воздушное обогащение) – Государственное Объединённое Научно-техническое Издательство Москва – Ленинград 1935*
 10. Nawrocki, J. – *Analityczno-graficzne metody oceny pracy wzbogacalników grawitacyjnych – Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1976*
 11. Nowak, Z. – *Hydrocyklony w przeróbce mechanicznej kopalin – Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1970*
 12. Nowak, Z. – *Gospodarka wodno-mułowa w zakładach przeróbki mechanicznej węgla – Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1982*
 13. zbiorowe – *Poradnik Górnika, wyd.2 t.5 – Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1976*
 14. Rittinger, P. Ritter von – *Lehrbuch der Aufbereitungskunde – Verlag von Ernst & Korn Berlin 1867*
 15. Sablik, J. – *Flotacja węgla kamiennych – Główny Instytut Górnictwa Katowice 1998*
 16. Stepiński, W. – *Teoria przeróbki mechanicznej kopalin, cz.2 – Skrypty uczelniane AGH, PWN Łódź 1955*
 17. Stepiński, W. – *Wzbogacenie grawitacyjne – Skrypt dla studentów szkół wyższych, PWN Warszawa 1964*
 18. Stepiński, W. – *Ekonomiczna ocena procesów wzbogacania węgla i rud – Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1973*
 19. zbiorowe – *V Sympozjum „Stan i perspektywy przeróbki surowców mineralnych w Polsce” – Sekcja Wykorzystania Surowców Mineralnych KG PAN, NOT – Komitet Naukowo-techniczny d.s. polityki surowcowej, AGH – Instytut Przeróbki i Wykorzystania Surowców Mineralnych, Koło SITG w Kowarach, Materiały: Zeszyty Naukowe AGH nr 1130 Górnictwo z. 130 Kraków 1987*
 20. Szczurowski, A., Sztaba, K., Trutwin, W. – *Kierunki rozwoju nauk górniczych – Archiwum Górnictwa t.30 z.3 1985 s.321-340.*
 21. Sztaba, K. – *Problemy kompleksowej utylizacji surowców mineralnych – Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały nr 5 Wrocław 1970 s.83-91*
 22. Sztaba, K. – *Wykorzystanie surowców towarzyszących i odpadowych; w: Surowce mineralne Polski – Nauka – Gospodarka, rozdział 8 – Ossolineum Wrocław 1983*
 23. Sztaba, K. – *Directions and Development Trends of Model Descriptions of Flow Processes – Archives of Mining Sciences (Archiwum Górnictwa) PAN t.38 z.2 1993 s.113-125*
 24. Sztaba, K. – *Przesiewanie – Śląskie Wydawnictwo Techniczne Katowice 1993*
 25. Taggart, A. F. – *Handbook of Mineral Dressing Ores and Industrial Minerals – New York 1956 (rozszerzony przekład rosyjski: Справочник по обогащению полезных ископаемых т.1-4 – Металлургиям Москва 1949 i lata następne)*
 26. Tumidajski, T. – *Zastosowanie metod statystycznych w analizie procesów przeróbki surowców mineralnych – Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1992*
 27. zbiorowe – *Wybór pism Witolda Budryka, t.2 – PWN Warszawa – Kraków 1977*

Pierwsza wersja opracowania pod tytułem „Przeróbka surowców mineralnych – inżynieria mineralna”, została przedstawiona na Międzynarodowej Konferencji Naukowej Akademia Górniczo-Hutnicza wobec wyzwań XXI wieku w kształceniu, badaniach naukowych i współpracy z przemysłem – Wydział Górniczy, Górnictwo – Praktyka i Nauka, Spojrzenie w XXI wiek, Kraków 24-25 czerwca 1999 r., i opublikowana w materiałach konferencji: Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 1999, s.131-148. W niniejszym opracowaniu dokonano szeregu zmian, uwypuklających najbardziej istotne stwierdzenia, a także skracając w niektórych miejscach zbyt obszernie omówienia. Tekst ten został przedstawiony na Konferencji KOMEKO 2000: Produkcja surowców mineralnych z uwzględnieniem problemów ochrony środowiska (Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG, Szczyrk 14-16 marca 2000 r.) i zamieszczony w materiałach tej konferencji

MINERAL ENGINEERING

Natural raw materials of mineral origin only exceptionally have properties which enable their direct application to various practical purposes. These, however, are quite distant from functional features. From the very beginning of man's interest in them this fact required certain introductory operations to be performed which utilized the gained mineral. Consequently, proper raw materials were obtained. The set of these operations constitutes processing of minerals and more precisely, taking into consideration processing of materials which have already been processed, i.e. recyclable materials and wastes, processing of mineral raw materials. Starting from the most primitive activities of manual selecting (straight from the deposit) of useful parts of the mineral the technology of these operations underwent a very intensive development, transforming gradually into a completely distinct technological discipline, situated between mining and processing technologies of any type, resulting finally in raw materials or useful products. At present there are practically no minerals and especially recyclable materials which would not require the application of initial processing in the utilisation process. The variety of useful components occurring in primary materials and their properties evoked the need to apply the complex set of technological procedures incorporated from different areas of process engineering and adapted to unrepeatability characteristics of the discussed raw materials and also the need of working out of completely separate technological solutions, applying the achievements of practically all basic sciences many of which are, in turn, inspired by the needs of mineral processing. The contemporary development of this discipline is so much different from traditionally perceived mineral processing, especially from the prima range of the so-called mechanical processing, that justifies an assumption that a new discipline has already appeared, i. e. mineral engineering.