

SCHEMAT TECHNOLOGICZNY WZBOGACANIA UBOGIEJ RUDY ILMENO-MAGNETYTOWEJ

UKD 553.494.2+553.311:622.778+622.765

Złoże rud żelaza i tytanu pochodzenia magmatyczno-likwacyjnego należą w skali światowej do rzadko eksploatowanych surowców. Jedno z ciekawszych złóż tego typu występuje w Finlandii w miejscowości Otanmäki. Złoże to jest przedmiotem eksploatacji, a z wydobytego surowca w wyniku stosowania ciekawej i dość skomplikowanej technologii wzbogacania magnetycznego i flotacyjnego produkowany jest wysokiej jakości koncentrat magnetytowy, ilmenitowy i pirytowy. Koncentrat magnetytowy z kolei stanowi surowiec dla produkcji na drodze hydrometalurgicznej pięciotlenku wanadu.

Ze względu na aktualność zagadnienia ewentualnej eksploatacji i przeróbki tego typu surowca w kraju w niniejszym artykule omówione będą niektóre aspekty wzbogacania ubogiej rudy ilmeno-magnetytowej. Na podstawie badań laboratoryjnych zaprojektowano schemat technologiczny wzbogacania. Omówiono również istniejącą technologię wzbogacania we wspomnianym już zakładzie przeróbki w Otanmäki. Elementem nowym w artykule jest również wprowadzenie do zapisu schematu technologicznego obok tradycyjnego sposobu metody opartej o teorię grafów.

TECHNOLOGIA WZBOGACANIA RUDY ILMENO-MAGNETYTOWEJ W OTANMÄKI (6)

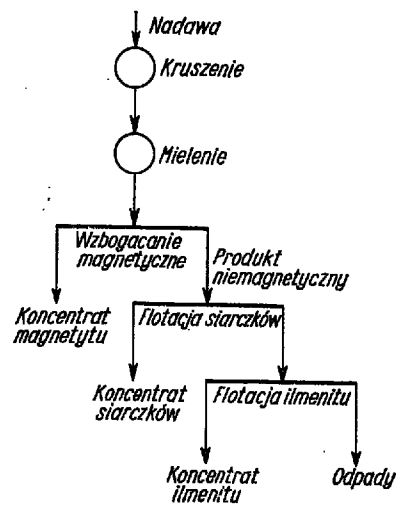
Podstawowym składnikiem użytecznym eksploatowanej w Otanmäki rudy — jest magnetyt i ilmenit. Skale płonną tworzą plagioklasy. W cieście skały płonnej tkwią wprysnięcia magnetytu i ilmenitu o średniej wielkości 0,1—0,2 mm. Na ryc. 1 podano nierozwinięty schemat technologiczny wzbogacania. Przedmiotem szczególnego zainteresowania technologów jest oczywiście schemat technologiczny rozwinięty. Na ryc. 2 podano rozwinięty schemat technologiczny wzbogacania rudy w Otanmäki (bez kruszenia i wzbogacania wstępnego). Ryc. 3 ukazuje schemat technologiczny odpowiadający ryc. 2, jak: graf stanów i czynności. Zasady konstruowania tego ostatniego podane są w dalszej części artykułu. Jak ze schematów przedstawionych na ryc. 1, 2, 3 wynika ruda surowa po jej wydobyciu kierowana jest do rozdrobnienia wstępnego. Następnie, w wyniku wstępnego wzbogacania magnetycznego, wydziela się pewną ilość ostatecznych odpadów. Koncentraty wstępnego wzbogacania magnetycznego kierowane są kolejno do mielenia, a następnie do wzbogacania magnetycznego. W wyniku tych operacji otrzymuje się ostateczny koncentrat magnetytowy i produkt nie magnetyczny zawierający siarczki i ilmenit.

W rezultacie stosowania flotacji — wydziela się najpierw koncentrat pirytu, a następnie koncentrat ilmenitu.

BADANIA NAD WZBOGACALNOŚCIĄ UBOGIEJ RUDY ILMENO-MAGNETYTOWEJ (2, 4)

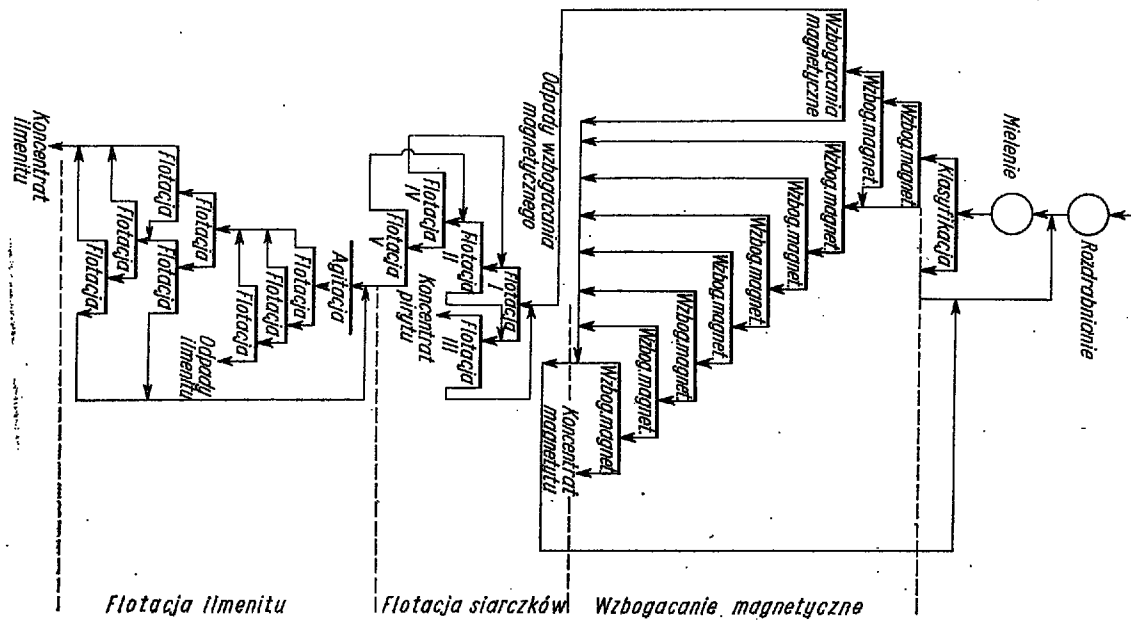
1. Ważniejsze informacje dotyczące składu chemicznego i mineralnego badanego surowca.

Surowiec, stanowiący przedmiot badań, zwany rudą ilmeno-magnetytową, należy do rzadko występujących złóż pochodzenia magmatyczno-likwacyjnego. Skalami macierzystymi są: noryty, anortozyty i gabbro, w skład których wchodzi pirokseny, plagioklasy, hornblenda, mika i inne. Głównym minerałem użytecznym jest tytanomagnetyt. Tak określono postać występowania magnetytu impregnowanego drobnymi wprysnięciami ilmenitu, głównie w formie lamelkowatych wkładek o grubości od kilku do kilkumastu mikromów. Wielkość kryształów magnetytu waha się w bardzo szerokościach granicach od spora-



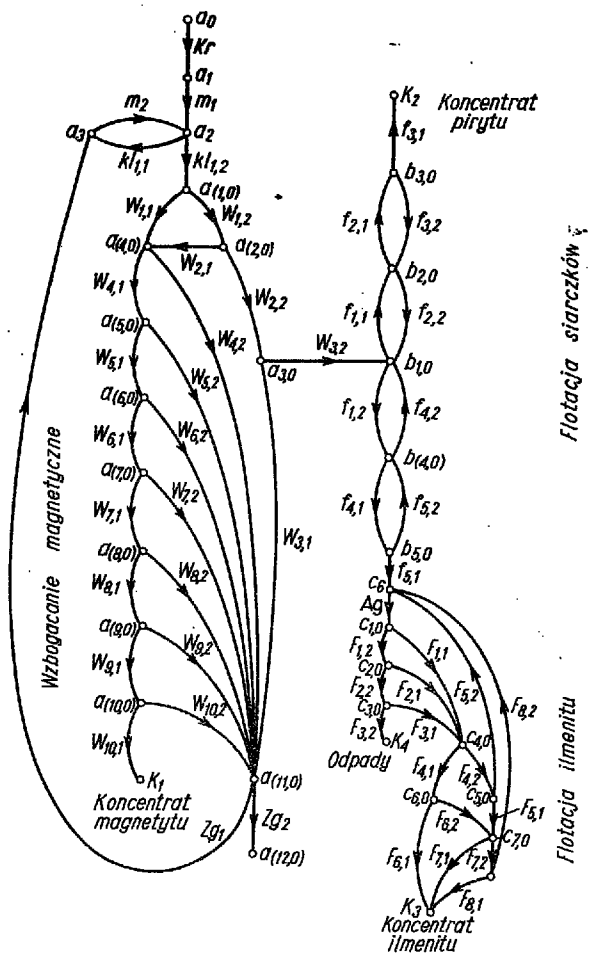
Ryc. 1. Schemat technologiczny wzbogacania rudy ilmeno-magnetytowej w Otanmäki.

Fig. 1. Technological scheme of ilmenite-magnetite ore concentration (Otanmäki deposit).



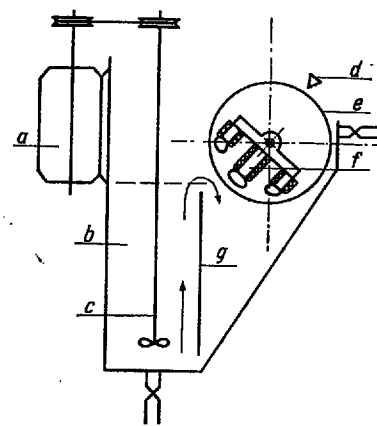
Ryc. 2. Rozwinięty schemat technologiczny wzbogacania rudy ilmeno-magnetytowej w Otanmäki.

Fig. 2. Developed technological scheme of ilmenite-magnetite ore concentration (Otanmäki).



Ryc. 3. Rozwinięty schemat technologiczny z ryc. 2 jako graf stanów i czynności.

Fig. 3. Developed technological scheme of Fig. 2 as a graph of states and operations.



Ryc. 4. Schemat separatora magnetycznego.

a — silnik, b — komora agitacyjna, c — miesznadło, d — zgarniacz koncentratu, e — bęben, f — elektromagnes, g — przegroda.

Fig. 4. Scheme of magnetic separator.

a — motor, b — agitation chamber, c — agitator, d — scraper of concentrate, e — drum, f — electromagnet, g — partition.

dycznych okazów około 3 mm do wprysnąć rzędu kilkudziesięciu mikronów. Obok magnetytu w rudzie występuje ilmenit, tworząc kryształy o zmiennej wielkości, gdzie największe okazy, podobnie jak magnetyt, osiągają wielkość 3 mm, do wprysnąć kilkudziesięciu mikronów. W rudzie występują jeszcze siarczki — piryt, pinotyn, chalkopiryt. W oparciu o rozeznanie mineralogiczne rudy i badania laboratoryjne opracowano technologię wzbogacania magnetycznego i flotacyjnego.

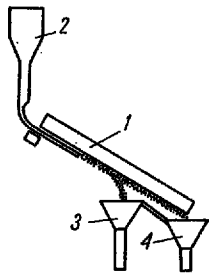
2. Wzbogacanie magnetyczne. Schemat separatora magnetycznego do wzbogacania na mokro przedstawia ryc. 4. Jak z niego wynika jest to w zasadzie separator typu Gröndal ze specjalnie wykształconą komorą agitacyjną. Funkcja takiego rozwiązania jest

podwójna. W pierwszej kolejności przez intensywną agitację mieszaniny rudy i wody w przestrzeni roboczej separatora poprawia się warunki separacji, poprzez korzystniejsze kształtowanie się floku magnetycznych. Z drugiej zaś strony separator ten może być zastosowany do pracy w warunkach separacji półciągłej, tj. przez umieszczenie w komorze całej podlegającej separacji próbki, a następnie odbieranie tylko frakcji magnetycznej, przy czym odpady (frakcja niemagnetyczna) pozostają w komorze.

W wyniku przeprowadzonych prób wzbogacania za pośrednictwem tego separatora uzyskano koncentrat magnetytowy o zawartości żelaza rzędu 65–67% przy uzysku żelaza (w formie Fe_3O_4) rzędu 90% oraz odpady wzbogacania magnetycznego zawierające ilmenit. Odpady te stanowiły przedmiot oddzielnych badań na wzbogalność dla wydzielenia koncentratu siarczkowego i koncentratu ilmenitu.

Na ryc. 5 podano schemat separatora płytowego z rudy ilmeno-magnetytowej można obok koncentratu pośrednictwem prądu trójfazowego (9). Za pośrednictwem tego separatora uzyskano koncentrat o zawartości żelaza w granicach od 59 do 63%.

3. Wzbogacanie flotacyjne. Jak już wspomniano, z rudy ilmeno-magnetytowej można obok koncentratu magnetytowego otrzymać koncentrat siarczków (głównie piryt) oraz koncentrat ilmenitu. Flotacja siarczków nie następuje praktycznie większych trudności i odbywa się według klasycznych zasad flotacji dla tego typu surowca. Oddzielenie ilmenitu od towarzyszącej mu skały pionnej w postaci plagioklazów, piroksenów, biotytów i amfiboli, przy bardzo drobnych wprysnięciach ilmenitu jest operacją

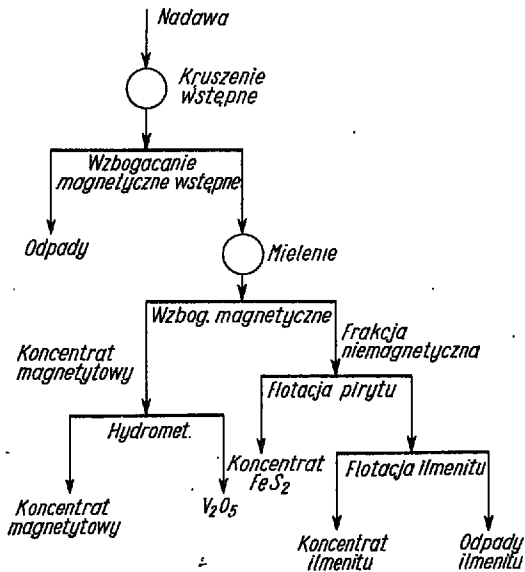


Ryc. 5. Schemat separatora płytowego.

1 — płyta elektromagnetyczna, 2 — zbiornik nadawy, 3 — zbiornik dla frakcji niemagnetycznej, 4 — zbiornik dla frakcji magnetycznej.

Fig. 5. Scheme of platy separator.

1 — electromagnet plate, 2 — feed container, 3 — container for non-magnetic fraction, 4 — container for magnetic fraction.



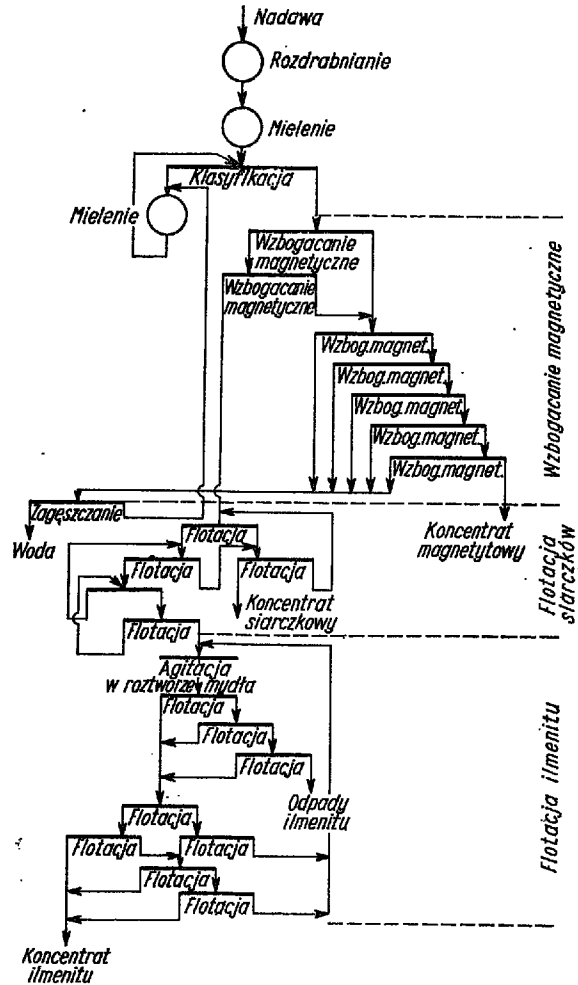
Ryc. 6. Schemat nierozwinięty wzbogacania rudy ilmeno-magnetytowej.

Fig. 6. Non-developed scheme of ilmenite-magnetite ore concentration.

dosyć trudną w praktyce. Wyniki badań z zakresu flotacji ilmenitu opublikowano w pracy (5). W tym miejscu należy tylko wzmiankować, że przed właściwym procesem flotacji nadawę poddaje się długotrwałej agitacji w odpowiednio przygotowanym roztworze soli kwasów tłuszczowych przy określonym pH i odpowiedniej zawartości części stałych w roztworze. Stężenie natomiast soli kwasów tłuszczowych w roztworze, z którego następuje właściwa flotacja, jest znikome, prawie równe zero. Na ogół flotację prowadzi się w ten sposób, aby w pierwszej fazie wydzielić ostateczne odpady (patrz ryc. 7 i 8, a następnie poprzez czyszczenie — ostateczny koncentrat ilmenitu. W rezultacie przeprowadzonych badań uzyskano koncentrat o zawartości 40% TiO_2 .

SCHEMAT TECHNOLOGICZNY WZBOGACANIA I JEGO ANALIZA

Schemat technologiczny wzbogacania obejmuje operacje wstępne, tj. kruszenie i mielenie rudy i operacje główne: wzbogacanie magnetyczne i flotacyjne. Zatem z przedmiotowego surowca można otrzymać wysokiej jakości koncentrat magnetytowy, kolektywny koncentrat siarczkowy i koncentrat ilmenitu. Koncentrat magnetytowy stanowi surowiec dla produkcji pięciotlenku wanaadu. Zespólny schemat wzbogacania ubogiej rudy ilmeno-magnetytowej przedstawiono na ryc. 6. Schemat technologiczny rozwinięty podano na ryc. 7 i 8. Schemat podany na ryc. 8 stanowi graf stanów i czynności.



Ryc. 7. Schemat technologiczny wzbogacania ubogiej rudy ilmeno-magnetytowej.

Fig. 7. Technological scheme of poor ilmenite-magnetite ore concentration.

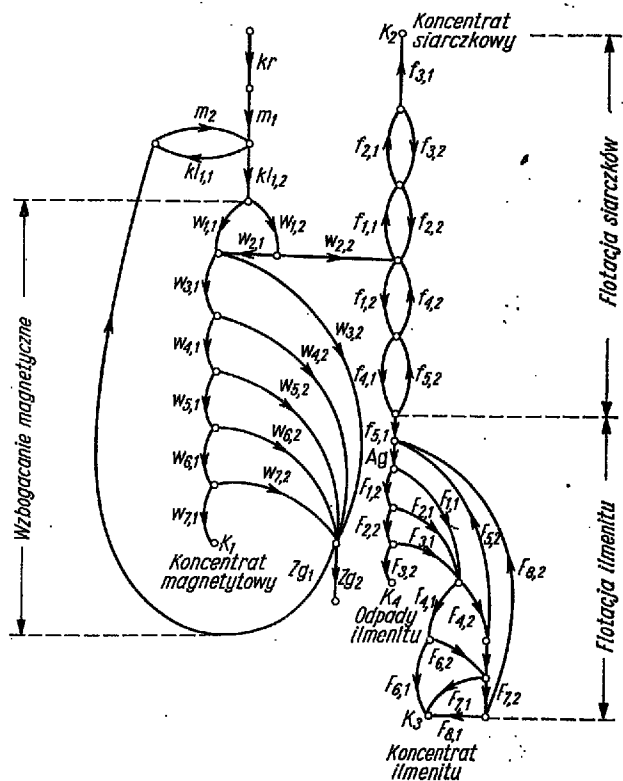
W szczególności ze schematu przedstawionego na ryc. 3 i 8 można odróżnić w sposób wyraźny strukturę wzbogacania magnetycznego i flotacyjnego, a w obrębie flotacji odróżnić odrębną strukturę flotacji siarczków oraz strukturę flotacji ilmenitu. Cechą charakterystyczną wzbogacania magnetycznego jest powtarzający się element przedstawiony na ryc. 9, gdzie wierzchołek a reprezentuje stan zbioru ziarn przed separacją, a k_1 i k_2 stan wytworzonych w wyniku separacji podzbiorów ziarn, różniących się oczywiście pod względem chemicznym, co do zawartości danego składnika użytecznego. Krawędzie $W_{1,1}$, $W_{1,2}$, $W_{2,1}$, $W_{2,2}$ reprezentują czynności dokonywane na zbiorach. Taki układ czterech wierzchołków i czterech krawędzi, typowy, jak to już wspomnieliśmy, dla procesu separacji magnetycznej, przedstawiony na ryc. 9, określa się terminem — kwartet. Z ryc. 8 i 3 można odczytać bardzo charakterystyczną strukturę flotacji siarczkowej. Charakterystycznym elementem tej struktury jest graf stanu i czynności przedstawiony na ryc. 10, składający się z dwóch wierzchołków i dwóch krawędzi. Element taki określa się terminem *dublet*.

Na ryc. 8 i 3 można również łatwo odróżnić strukturę procesu flotacji ilmenitu. Struktura ta różni się w istotny sposób od struktury flotacji siarczkowej. W pierwszej fazie występują elementy typu kwartetu — a więc struktura typowa dla procesu wzbogacania reprezentowanej przez krawędzie $F_{4,1}$, $F_{4,2}$ do $F_{8,1}$, $F_{8,2}$ występuje typ struktury zawierający dwie krawędzie i trzy wierzchołki (ryc. 11). Ten fragment grafu stanu i czynności przyjmuje się określać terminem — *dublet*. Symbole literowe oznaczają odpowiednie czynności dokonywane na zbiorach ziarn mineralnych. Stan zbioru ziarn w wierzchołku a_0 (ryc. 3) przechodzi po uprzednim kruszeniu (kr) do stanu reprezentowanego przez wierzchołek a_1 , ten z kolei poddawany jest procesowi mielenia (m_1) i przechodzi w stan reprezentowany przez wierzchołek (a_2). W wyniku klasyfikacji (kl) i wtórnego mielenia (m_2) stan zbioru ziarn mineralnych reprezentowanych przez wierzchołek a (1,0) poddawany jest operacji wzbogacania magnetycznego ($W_{1,1}$, $W_{1,2}$... $W_{10,1}$, $W_{10,2}$) do uzyskania ostatecznego koncentratu magnetytu (k_1). Odpady wzbogacania magnetycznego $W_{(s,2)}$ poddaje się następnie wzbogacaniu flotacyjnemu ($f_{1,1}$, $f_{1,2}$... $f_{8,1}$, $f_{8,2}$) w celu wyflotowania siarczków, a następnie flotacji ilmenitu ($F_{1,1}$, $F_{1,2}$... $F_{8,1}$, $F_{8,2}$) uzyskując odpowiednio koncentrat pirytu (k_2), koncentrat ilmenitu (k_3) i odpady ostateczne (k_4).

Porównując schematy ryc. 3 i 8 stwierdzamy oprócz łatwości odczytywania struktury procesu możliwość łatwego porównywania różnych schematów. Podany schemat technologiczny dla ubogiej krzemowej rudy ilmeno-magnetytowej różni się tylko w kilku szczegółach od istniejącego schematu technologicznego wzbogacania rudy ilmeno-magnetytowej w Otamniaki. W szczególności różnice dotyczą jedynie procesu wzbogacania magnetycznego.

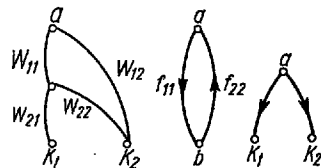
KILKA UWAG O KORZYŚCIACH STOSOWANIA TEORII GRAFÓW DO KONSTRUKCJI SCHEMATÓW TECHNOLOGICZNYCH

Przedstawione na ryc. 3 i 8 schematy technologiczne jako grafy stanów i czynności zapisane są przy użyciu minimum znaków (mianowicie punktów), które zwano wierzchołkami i odcinków zwanych krawędziami. Wierzchołek odpowiada pewnemu stanowi danego zbioru ziarn, a krawędź pewnej czynności dokonywanej na danym zbiorze ziarn mineralnych. Jak łatwo zauważyć schematy na ryc. 3 i 8 zapisane są wyłącznie za pośrednictwem takiego minimalnego układu znaków. Nie wnikając w elementy konstruowania całych schematów, które czytelnik może znaleźć w literaturze (1, 3, 7, 8), należy nadmienić, że tak narysowany graf stanu i czynności procesów technologicznych jest tworem abstrakcyj-



Ryc. 8. Schemat technologiczny wzbogacania ubogiej rudy ilmeno-magnetytowej jako graf stanów i czynności odpowiadający ryc. 7.

Fig. 8. Technological scheme of poor ilmenite-magnetite ore concentration, as a graph of states and operations corresponding to Fig. 7.



Ryc. 9. Fragment grafu stanu i czynności typowy dla wzbogacania magnetycznego.

Ryc. 10. Fragment grafu stanu i czynności typowy dla wzbogacania flotacyjnego typu siarczkowego.

Ryc. 11. Fragment grafu stanu i czynności tzw. dublet.

Fig. 9. Fragment of graph of state and operation, typical of magnetic separation.

Fig. 10. Fragment of graph of state and operation, typical of flotation concentration of sulphide type.

Fig. 11. Fragment of graph of state and operation, the so-called doublet.

nym ze względu na swe własne cechy. W tym fakcie tkwi niewątpliwie postęp w zakresie odzwonowywania procesów technologicznych za pośrednictwem elementów teorii grafów w porównaniu z tradycyjnymi sposobami zapisu.

Poprzez stosowanie szeregu pojęć i definicji z teorii grafów można za ich pośrednictwem dokonać ścisłej klasyfikacji schematów technologicznych oraz wzajemnego ich porównywania. Do pojęć i definicji

takich należy m.in.: łańcuch w grafie, krotność krawędzi, liczba cykломatyczna, stopień wierzchołka, cykl elementarny, punkt przegubowy, odległość wierzchołków, średnica grafu, centrum grafu itp.

Teoria grafów znalazła już liczne zastosowania w różnych dziedzinach nauki i techniki, jak: w transporcie w najogólniejszym słowa tego znaczeniu, automatyce, sterowaniu, elektrotechnice itd. W zakładzie przeróbki mechanicznej na sieć technologiczną nakładana jest sieć sterowania, energii, automatyki, przepływu materiałów itd. Możliwość wprowadzenia zapisu za pośrednictwem jednego pisma, różnych sieci, stanowi niezwykle ważny element unifikacji i integracji różnych dyscyplin naukowych.

WNIOSKI

W wyniku badań technologicznych nad wzbogaceniem rudy ilmeno-magnetytowej stwierdzono możliwość wytwarzania wysokojakościowych koncentratów magnetytu, ilmenitu i siarczków. Na podstawie badań laboratoryjnych zaprojektowano schemat technologiczny wzbogacania. Do konstrukcji schematów technologicznego wzbogacania wprowadzono elementy teorii grafów, wykazano korzyści wynikające ze stosowania teorii grafów w analizie schematów technologicznych. Schematy te jako grafy stanów i czynności pozwalają w sposób łatwy odczytywać strukturę schematu technologicznego, co w przypadkach tak skomplikowanych technologii jak technologia wzbogacania rudy ilmeno-magnetytowej jest rzeczą bardzo istotną. Istnieje także na równi z innymi dyscyplinami technicznymi i naukowymi, jak: auto-

SUMMARY

The article discusses some aspects of concentration of poor ilmenite-magnetite ore. On the basis of laboratory examinations, a technological scheme of concentration of home mineral raw materials has been projected. In addition, the existing technology of ore concentration applied at a dressing plant in Otanmäki (Finland) is presented, too. The introduction of a method (based on graph theory) into the record of technological scheme is a new element presented in the article.

matyka, transport, teoria informacji i fal możliwość jednolitego nowoczesnego zapisu struktury schematów technologicznych wzbogacania. Stanowi to niewątpliwie element postępu w zakresie unifikacji sposobów odwzorowania różnych procesów za pośrednictwem jednego specjalnego rodzaju pisma.

LITERATURA

1. Avondo-Bodino G. — Primienienie w ekonomikie teorii grafów. Izd. Progres. Moskwa, 1966.
2. Badania nad wzbogacalnością magnetytu Spraw. Inst. Metali Nieżel. w Głównicach, nr 211/ub/62.
3. Berge G. — Teoria grafów i jego primienienie. Izd. Inostronnoj Literatury. Moskwa, 1962.
4. Biernat J., Pilch W. — Wzbogacanie rudy ilmeno-magnetytowej. Arch. geol., nr 3236/106.
5. Biernat J., Pilch W. — Niektóre wyniki wzbogacania krajowych surowców tytanonośnych. Prz. geol. 1965, nr 5.
6. Finn W. K. — Beneficiation of Titanium Ores. Trans. of the International Mineral Dressing Congress. Stockholm, 1967.
7. Kolendowski J., Pilch W. — Wstępne rozważania nad stosowaniem pojęć teorii mnogości i teorii grafów w analizie schematów technologicznych. Arch. Górń. 1965, z. 3.
8. Oystein O. — Wstęp do teorii grafów. Warszawa, 1966.
9. Ptośiński Z. — Zasady działania oraz charakterystyka separatora płytowego. Biul. Zjedn. Energetyki. 1966, 3—4.

РЕЗЮМЕ

В статье рассматриваются некоторые данные по обогащению бедной ильмено-магнетитовой руды. На основании лабораторных исследований составлена схема технологического обогащения отечественного сырья. В статье приводится также технология обогащения, применяющаяся на обогатительной фабрике в Отанмаки (Финляндия). Кроме того приводится новый способ записи технологической схемы, использующий, кроме известного способа, также и теорию графов.