

**Tytan** (łac. *titanium* – Ti) – pierwiastek grupy IV układu okresowego pierwiastków z rodziny pobocznej tytanowców (4a – Ti, Zr, Hf). W przyrodzie nie występuje w stanie wolnym. Posiada pięć izotopów trwałych:  $^{46}\text{Ti}$ ,  $^{47}\text{Ti}$ ,  $^{49}\text{Ti}$ ,  $^{50}\text{Ti}$ . Rozpowszechnienie w skorupie ziemskiej ocenia się na 0,5% wag. Występuje w postaci wielu minerałów w formie skoncentrowanej w skałach wylewnych, a także w formie rozproszonej w każdej niemal glebie. Minerale tytanu zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Tytan – kopaliny

Nazwa	Wzór chemiczny	Teor. zaw. $\text{TiO}_2$ [%]	Ukł. kryst.	Twardość	Gęstość
Substancja $\text{TiO}_2$ :		85–100			
Rutyl	$\text{TiO}_2$	dom. Nb, Ta, Fe, Cr, Sn	tetr.	5,5–6,0	4,2–4,3
Brookit	$\text{TiO}_2$	dom. Nb, Fe	romb.	5,5–6,0	4,12
Anataz	$\text{TiO}_2$	dom. Nb, Fe	tetr.	5,5–6,0	3,89
Ilmenit	$\text{FeTiO}_3$	31,6% Ti 36,8% Fe	tryg-	5,0–6,0	4,5–4,7
Ulvit (ulvöspinel)	$(\text{Fe}^{2+}\text{Ti}^{4+})\text{Fe}^{2+}\text{O}_4$	35,72	reg.	6,0	4,3–4,8
Tytanomagnetyt i magnetyt tytanonośny	kryształy mieszane szeregu magnetyt-ulwit, a także prod. ich odmieszania	do 7,6% Ti			
Tytanomaghemit	produkty odmieszania tytanomagnetytu	do 52,56			
Tytanohematyt	$(\text{Fe}, \text{Ti})_2\text{O}_3$	do 52,56			
Perowskit	$\text{CaTiO}_3$	58,76 dom. Nb do 26% Sr do 22% Ce do 11%		5,5–6,0	3,9–4,1
oraz	dysanalit, latrappit łoparyt, niobołoparyt loveringit, lucshyt, zirkelit	$\text{ABO}_3$ A = Na(Mg), Ca, Sr, Ce, Th B = Fe(Mn), Ti, Si, Nb, Ta	Rudy Nb, Ta  ZRz. i in.		
Tytanit (sfen)	$\text{CaTi}[\text{O}   \text{SiO}_4]$	40,76 dom. Y, U, Th, Sr, Ba, Nb, Ta, V, Sn, Al, Fe	jedn.	5,0–5,5	3,4–3,6
Leukoksen	produkt wietrzenia minerałów Ti; mieszanina				

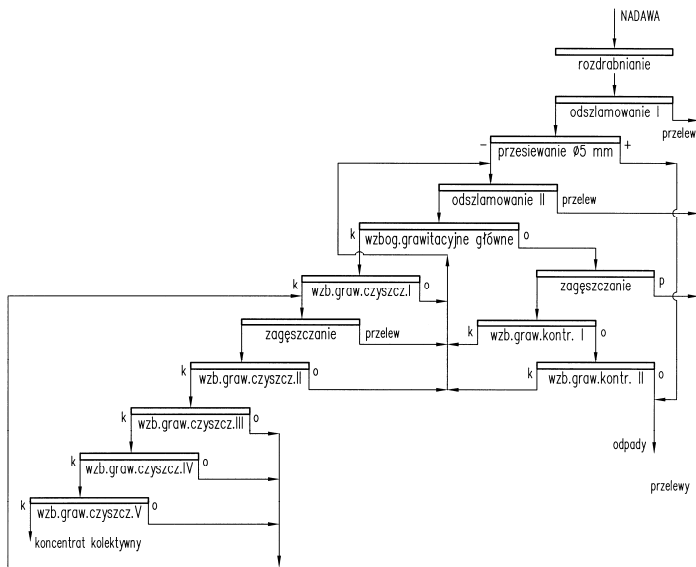
## Przeróbka mechaniczna

Przeróbce mechanicznej poddaje się wszystkie rudy tytanu. Najczęściej stosowane są sposoby wzbogacania grawitacyjnego, magnetycznego, elektrostatycznego i flotacja.

**Wzbogacanie grawitacyjne** przy przeróbce kopaliny ze złóż okrucowych służy głównie do wydzielenia kolektywnych koncentratów minerałów ciężkich, a przy przeróbce rud ze złóż pierwotnych w przypadku występowania ilmenitu w postaci wprysnięć w skałę płonnej lub w magnetycie. Jest ono obok wzbogacania magnetycznego operacją

główną. W przypadku gdy ilmenit występuje w postaci drobnych wprysnięć lub w postaci roztworu stałego w magnetycie służy do wydzielenia kolektywnego koncentratu magnetytowo-tytanowego. Wzbogacanie grawitacyjne bywa też stosowane jako operacja czyszcząca produkty otrzymane innymi metodami rozdzielania.

Wzbogacanie grawitacyjne kopaliny ze złóż okrucowych tytanu prowadzi się głównie przy zastosowaniu wzbogacalników zwojowych lub wzbogacalników strumieniowo-wachlarzowych. Przykładowy schemat wzbogacania wstępnego piasków tytanowo-



Rys. 1. Schemat wzbogacania wstępnego piasków tytanowo-cyrykonowych

cyrykonowych przedstawiono na rys. 1. Obejmuje on operacje przygotowawcze (rozdrabnianie i odszlamowanie), a następnie grawitacyjne wzbogacanie główne wraz z operacjami czyszczącymi produkty. Schemat przedstawia zakład, w którym zastosowano

wzbogacalniki strumieniowo-wachlarzowe. Podobne rozwiązania stosowane są przy wydzielaniu minerałów ciężkich we wzbogacalnikach zwojowych. Stopień rozwinięcia schematu zależy od osiąganych rezultatów w poszczególnych węzłach procesu. Przy zastosowaniu wzbogacalników zwojowych, pracujących w układzie wzbogacania głównego, w wyniku którego otrzymuje się ostateczne odpady, a koncentrat wstępny poddany jest dwustopniowemu oczyszczaniu. Osiągnięte w poszczególnych węzłach rezultaty zestawiono w tabeli 2. Rodzaje stosowanych urządzeń do wydzielania koncentratu kolektywnego minerałów ciężkich z piasków tytanowo-cyrykonowych omówiono pod hasłem dotyczącym przeróbki mechanicznej kopaliny cyrykonu. Wyniki wzbogacania tych rud przy zastosowaniu wzbogacalników strumieniowo-wachlarzowych, zwojowych i stołów koncentracyjnych zestawiono w tabeli 3.

Wzbogacanie grawitacyjne rud złóż pierwotnych może być prowadzone dla klas gruboziarnistych przy zastosowaniu osadzarek, cyklonów z cieczą ciężką dla klasy 6–1 mm. Metody te służą głównie do usunięcia znacznej ilości odpadów i przygotowania do dalszej przeróbki wstępnych kolektywnych koncentratów. Z metod grawitacyjnych

Tabela 2. Wyniki rozdziału kopaliny ze złóż okruchowych metodą grawitacyjną we wzbogacalnikach zwojowych

Minerał	Nadawa, %	Koncentrat, %		
		wstępny	I czyszczenie	II czyszczenie
Magnetyt	0,5	1,8	2,3	2,5
Ilmenit	6,8	27,8	43,7	65,9
Ilmeno-rutyl	0,9	3,0	3,6	5,5
Granat	8,2	17,5	15,1	7,9
Pirokseny i amfibole	21,4	31,7	25,5	7,3
Rutyl	0,5	2,0	2,9	4,4
Cyrykon	0,6	2,5	3,8	6,1
Kwarc	61,1	13,9	5,1	0,4

Tabela 3. Wyniki wzbogacania kopaliny ze złóż okruchowych metodami grawitacyjnymi

Wyszczególnienie	Wzbogacalnik zwojowy	Wzbogacalnik strumieniowo-wachlarzowy		Stół koncentracyjny
		szeregowy	stożkowy	
Zawartość minerałów ciężkich w nadawie	12,20	12,51	11,8	11,8
<b>Koncentrat:</b>				
Wychód	30,20	20,90	21,2	16,9
Zawartość minerałów ciężkich	37,10	55,24	51,5	56,3
Uzysk minerałów ciężkich	92,30	92,30	93,0	80,4
<b>Odpady:</b>				
Wychód	69,80	79,10	78,8	83,1
Zawartość minerałów ciężkich	1,35	1,22	1,2	2,8

zastosowanie znalazły stoły koncentracyjne (wzbogacanie czyszczące w węzle wzbogacania magnetycznego rud tytano-magnetytowych), a także osadzarki i stoły koncentracyjne przy przeróbce rud perowskitowych w tych przypadkach, gdy nie jest prowadzone wzbogacanie flotacyjne.

**Wzbogacanie magnetyczne** jest jednym z podstawowych procesów w przeróbce rud tytanu. Stosuje się je jako operację główną, do czyszczenia koncentratów oraz rozdzielania koncentratów kolektywnych otrzymywanych innymi metodami przeróbczymi. Ilmenit posiada właściwości magnetyczne, ilmenorutyl jest słabo magnetyczny, natomiast rutyl jest niemagnetyczny. Rutyl zanieczyszczony związkami żelaza posiada słabe właściwości magnetyczne.

Przy wzbogacaniu koncentratów kolektywnych zawierających minerały ciężkie można stosować wzbogacalniki o wzrastającym natężeniu pola magnetycznego, otrzymując kolejne frakcje zawierające:

- magnetyt, znaczną część ilmenitu, część chromitu,
- część ilmenitu, znaczną ilość chromitu i granatów, trochę turmalinu,
- trochę chromitu, granatu i ilmenitu, turmalin i monacyt, mało leukoksen,
- resztę turmalinu i monacytu, leukoksen, magnetyczny rutyl, zanieczyszczony związkami żelaza cyrkon,
- rutyl, cyrkon, kwarc.

Wzbogacanie rud ilmenitowo-magnetytowych wymaga rozdrobnienia poniżej 1 mm i usunięcia najdrobniejszych ziaren przez odpylanie lub odmulanie. Dobre rezultaty osiąga się przy rozdziale nadawy na wąskie klasy ziarnowe. Rezultaty rozdzielania kolektywnego koncentratu ilmenitowo-magnetytowego pokazano w tabeli 4.

Rutyl i cyrkon (niemagnetyczne) można rozdzielać przy pomocy wzbogacania magnetycznego

w silnym polu po uprzednim prażeniu redukującym, które powoduje zwiększenie właściwości magnetycznych rutylu 25–50 razy.

**Wzbogacanie elektrostatyczne** służy głównie do rozdzielania minerałów wchodzących w skład koncentratów kolektywnych. Rozdziela się minerały przewodzące, np. ilmenit, rutyl, leukoksen, tantalit, wolframit, od minerałów nieprzewodzących – cyrkonu, monacytu, granatu, scheelitu, kwarcu. Najczęściej stosuje się wzbogacanie elektrostatyczne do oddzielenia cyrkonu od rutylu i cyrkonu od ilmenitu. Używa się wzbogacalników elektrostatycznych płytowe, bębnowe i koronujące. Wzbogacany materiał kierowany jest do suszenia, a następnie rozdzielany na klasy ziarnowe w celu poprawy wyników rozdziału. Przykładowe wyniki rozdziału we wzbogacalniku bębnowym koronującym koncentratu ilmenitowo-magnetytowego pokazano w tabeli 5.

Kolektywne koncentraty przeróbki kopalni ze złóż okrucowych przed wzbogacaniem elektrostatycznym często poddaje się mechanicznemu ocieraniu przy dużej gęstości pulpy, następnie przemywa się wodą i suszy. Ma to na celu oczyszczenie powierzchni minerałów, co poprawia selekcję rozdziału. Przykładowe wyniki rozdziału piasków tytanowo-cyrkonowych metodą wzbogacania elektrostatycznego pokazano w tabeli 6.

W warunkach przemysłowych rozdział koncentratów kolektywnych prowadzony jest przez kombinowane wzbogacanie magnetyczne i elektrostatyczne. Opracowano dwa warianty rozdziału minerałów. W pierwszym (rys. 2) minerały koncentratu kolektywnego kierowane są do wzbogacania magnetycznego w urządzeniu o niskim natężeniu pola. Wydzielany jest ilmenit. Pozostały materiał kierowany jest do wzbogacania elektrostatycznego, w którym rozdziela się rutyl od cyrkonu i monacytu. Rozdzielone produkty czyści się we wzbogacalnikach magnetycznych o wysokim natężeniu pola. W ten sposób usuwa się z produktu

Tabela 4. Wyniki rozdziału koncentratu kolektywnego ilmenitowo-magnetytowego metodą wzbogacania magnetycznego na sucho

Klasa ziarnowa, mm	Koncentrat	Wychód, %	Zawartość, %		Uzysk, %	
			TiO <sub>2</sub>	Fe	TiO <sub>2</sub>	Fe
1–0,15	Kolektywny	100,0	13,8	55,0	100,0	100,0
	Ilmenitowy	24,1	43,6	38,2	76,4	15,6
	Magnetytowy	75,9	4,3	60,7	23,6	84,4
0,15–0,06	Kolektywny	100,0	17,6	56,0	100,0	100,0
	Ilmenitowy	36,7	47,6	32,0	100,0	21,0
	Magnetytowy	63,3	ślady	70,0	–	79,0
0,15–0	Kolektywny	100,0	19,3	55,8	100,0	100,0
	Ilmenitowy	40,0	46,7	36,5	97,0	26,0
	Magnetytowy	60,0	1,0	68,8	3,0	74,0

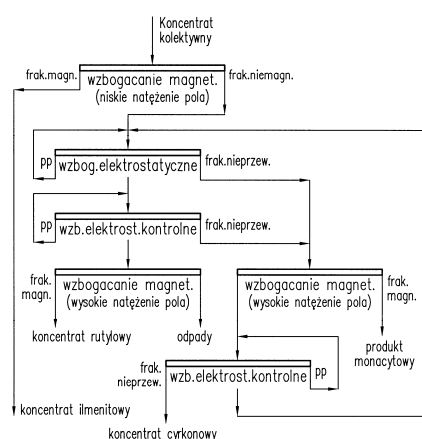
Tabela 5. Wyniki rozdziału rudy ilmenitowo-magnetytowej metodą wzbogacania elektrostatycznego

Klasa ziarnowa, mm	Produkt	Wychód, %	Zawartość, %		Uzysk, %	
			TiO <sub>2</sub>	Fe	TiO <sub>2</sub>	Fe
1–0,15	Nadawa	100,0	9,5	42,7	100,0	100,0
	Koncentrat	41,4	13,0	54,9	57,2	53,0
	Produkt pośredni	36,3	9,9	44,7	38,1	38,2
	Odpady	22,3	2,0	16,7	4,7	8,8
0,15–0,06	Nadawa	100,0	11,2	40,5	100,0	100,0
	Koncentrat	37,0	16,9	55,7	55,5	51,2
	Produkt pośredni	25,6	16,5	53,4	37,4	33,8
	Odpady	37,4	2,2	16,3	7,1	15,0
0,15–0	Nadawa	100,0	13,9	41,3	100,0	100,0
	Koncentrat	33,0	20,5	54,8	48,6	43,8
	Produkt pośredni	21,0	19,2	51,6	28,6	26,2
	Odpady	46,0	6,9	21,9	22,8	30,0

Tabela 6. Wyniki rozdziału piasków tytanowo-cyrkonowych metodą wzbogacania elektrostatycznego

Minerał	Nadawa, %	Fracja przewodząca, %	Fracja nieprzewodząca, %
Magnetyt	0,9	0,8	–
Ilmenit	67,9	86,7	1,3
Ilmeno-rutyl	4,0	3,6	–
Granat	7,2	0,8	28,8
Piroksen i amfibole	7,9	0,8	26,3
Rutyl	4,0	7,7	2,6
Cyrkon	6,5	0,4	24,2
Kwarc	1,6	–	5,6
Monacyt	ślady	–	1,2

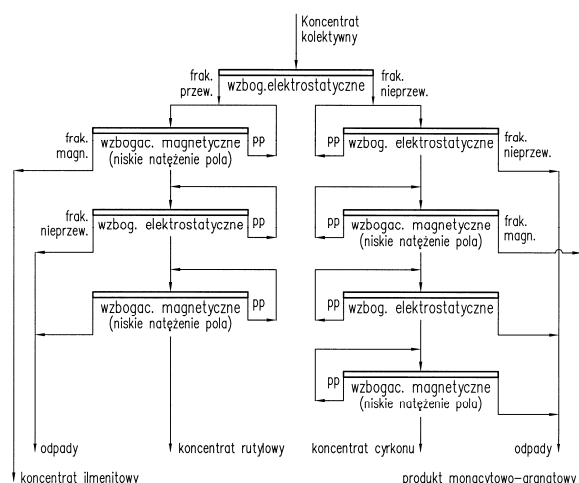
rutylowego niemagnetyczne odpady, a także rozdziela się cyrkon od monacytu.



Rys. 2. Schemat rozdziału koncentratów kolektywnych metodą magnetyczno-elektrostatyczną

W drugim wariantcie (rys. 3) koncentrat kolektywny kierowany jest do wzbogacania elektrosta-

tycznego, rozdzielającego minerały przewodzące od nieprzewodzących. Następnie oddzielne frakcje rozdziela się magnetycznie. Frakcje przewodzące rozdziela się we wzbogacalnikach magnetycznych o nis-



Rys. 3. Schemat rozdziału koncentratów kolektywnych metodą elektrostatyczno-magnetyczną

kim natężeniu pola w celu wydzielenia ilmenitu; rutyl czyści się kolejno elektrostatycznie i magnetycznie. Frakcje nieprzewodzące, zawierające cyrkon i monacyt, rozdziela się we wzbogacalniku o niskim natężeniu pola; jeżeli w rudzie jest mało monacytu, produkt cyrkonowy czyści się kolejno we wzbogacalniku magnetycznym o wysokim natężeniu pola, a następnie we wzbogacalniku elektrostatycznym. Drugi wariant stosuje się przy dużych ilościach minerałów magnetycznych, zwiększając wydajność wzbogacalników magnetycznych i poprawiając uzysk minerałów magnetycznych. Oba schematy stosowane są w praktyce przemysłowej różniąc się czasami rozwiązaniami fragmentów poszczególnych węzłów.

**Wzbogacanie flotacyjne** stosuje się przy wzbogacaniu drobnoziarnistych minerałów tytanu z piasków złóż okruchowych oraz przy wzbogacaniu minerałów tytanu z rud złóż pierwotnych. Znajduje również zastosowanie do uzyskiwania koncentratów siarczków Fe, Cu, Co i Ni, które współwystępują w tych ostatnich.

Ilmenit flotuje się przy pomocy kwasów organicznych często razem z alkilosiarczanami. Flotacja kwasami tłuszczowymi i mydlami jest mało selektywna, z tego też powodu dużą rolę odgrywają regulatory procesu i pH środowiska. Jako zbieracze najczęściej stosuje się kwas oleinowy (0,45 kg/t), olej talowy (0,3 kg/t), olej naftenowy (0,45 kg/t). Można stosować także kwasy żywiczne i kwasy naftenowe. Ilmenit dobrze flotuje się przy  $\text{pH} = 5-7,5$ , w niektórych przypadkach flotacja dobrze przebiega w zakresie  $\text{pH} = 3,5-9,5$  przy użyciu kwasów oleinowych. W praktyce ilmenit flotuje się w słabo kwaśnym lub obojętnym środowisku (flotacja główna  $\text{pH} = 6-6,5$ , flotacja czyszcząca  $\text{pH} = 5-5,5$ ). Powyżej  $\text{pH} = 10,5$  ilmenit nie flotuje. Regulatorami procesu są NaF powodujący depresję granatu i apatyty oraz  $\text{H}_2\text{SO}_4$  jako regulator środowiska. Zużycie tych odczynników wynosi około 1,25 kg/t. Zamiast NaF można stosować dwuchromian potasowy (0,2 kg/t). Właściwości flotacyjne ilmenitu z różnych złóż są różne. Związane to jest z jego własnościami powierzchniowymi. Po obróbce kwasem siarkowym flotowalność ilmenitu wzrasta i staje się zbliżona dla rud różnych złóż. Flotacja ilmenitu poprawia się po odszlamowaniu nadawy, a także po wstępnym mechanicznym otarciu powierzchni. Wskazane jest zmiekczenie wody. Główne straty  $\text{TiO}_2$  przypadają na odpady flotacji ilmenitu. Można go też oddzielić od minerałów krzemianowych odwrotną flotacją zbieraczami kationowymi. W środowisku kwaśnym flotuje się krzemiany zbieraczem emulsol 660 B (jodek laurylpirydyny).

Rutyl flotuje się przy pomocy różnych zbieraczy, przy czym duże znaczenie ma pH pulpy. Kwas oleinowy, oleinian sodowy, mydło naftenowe stosuje

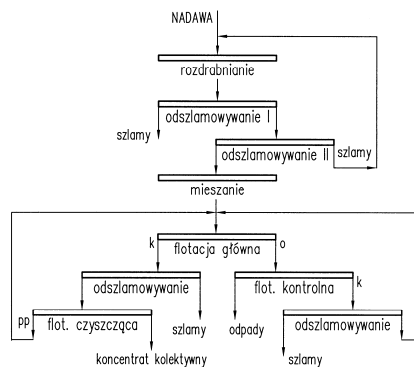
się w słabo kwaśnym środowisku; utlenione petrolatum przy  $\text{pH} = 3-3,5$ ; alkilosiarczan sodu w środowisku kwaśnym, w celu podwyższenia selektywności flotacji rutylu stosuje się kombinację kwasów tłuszczowych z aminami, np. kwas oleinowy z dwucykloheksyloaminą, jednoheksyloaminą, kupferonem i oksyną. W mieszaninach z dwucykloheksyloaminą można część kwasu oleinowego zastąpić tańszym odczynnikiem sops-tekem. Rutyl i ilmenit dobrze flotują kwasem oleinowym po uprzedniej obróbce pulpy tlenem (aeracja), natomiast obróbka azotem nieznacznie depresuje te minerały. Rutyl depresuje się przy  $\text{pH}$  powyżej 3. Najkorzystniej depresję prowadzić przy użyciu sody i szkła wodnego. Silnym depresorem jest krochmal (20–30 kg/t). Rutyl depresuje się także kwasem solnym. W celu zapewnienia selektywności depresji rutylu stosuje się kolejne dawkowanie sody, a następnie dodaje się krochmalu. Aktywację rutylu po depresji wyższymi środkami przeprowadza się dodając kwas siarkowy do doprowadzenia do naturalnego środowiska.

Perowskit flotuje się przy pomocy kwasów tłuszczowych w zasadowym i neutralnym środowisku, nie otrzymując jednak wysokiego uzysku. Efektywność flotacji wzrasta po obróbce małymi ilościami kwasu siarkowego, a następnie przemyciu nadawy. Najczęściej stosuje się kwas oleinowy, olej talowy, techniczne szare mydło, odczynnik IM-50. W przypadku znacznej ilości kalcytu prowadzi się flotację kalcytu, a następnie flotację perowskitu kwasem hydroksamowym. Depresorami perowskitu jest szkło wodne w niedużych dawkach oraz soda, aktywatorami – chromian i dwuchromian sodowy.

Sfen flotuje się z rud apatytowo-sfenowych kwasem oleinowym (0,5 kg/t) rozpuszczonym w nafcie po uprzedniej flotacji apatyty mydłem naftenowym (0,1–0,15 kg/t) z dodatkiem szkła wodnego (0,2–0,3 kg/t).

Flotację minerałów tytanu z kopalni złóż okruchowych prowadzić można według schematu flotacji kolektywnej lub selektywnej. Kolektywną prowadzi się dla drobno uziarnionych minerałów ciężkich, w celu łącznego ich wydzielenia. Schemat flotacji kolektywnej pokazano na rys. 4. Obejmuje rozluźnienie materiału i dwustopniowe odszlamowywanie w hydrocyklonach, a następnie flotację główną, trwającą dwie do pięciu minut. Odpady flotacji głównej oczyszcza się flotacyjnie, wydzielając odpady i zwracając produkt pianowy po odszlamowaniu do flotacji głównej.

Produkt pianowy flotacji głównej po odszlamowaniu oczyszcza się flotacyjnie, wydzielając końcowy koncentrat kolektywny. Flotację prowadzi się przy pomocy kwasu oleinowego, mydła naftenowego, sopstoku, oleju talowego. Zużycie odczynników jest duże, dochodzi do 2–4 kg/t. Koncentraty kolektywne roz-

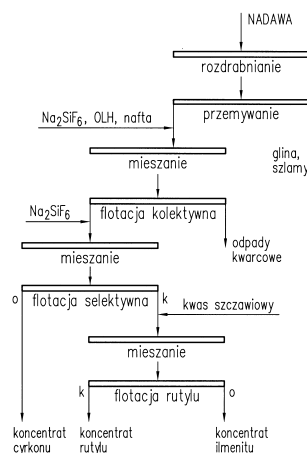


Rys. 4. Schemat flotacji kolektywnej minerałów ciężkich ze złóż okruchowych

dziela się metodą wzbogacania magnetycznego i elektrostatycznego. Można je też rozdzielić flotacyjnie. W pierwszym etapie desorbują się odczynniki flotacyjne z powierzchni minerałów przy pomocy siarczanu miedziowego i szkła wodnego w temperaturze 20°C, a następnie flotuje się cyrkon mydłem naftenowym lub desorbują się odczynnik (utlenione petrolatum) szkłem wodnym (12,5 kg/t) przez 15–30 min w temperaturze 60°C przy gęstej pulpie o stosunku 1:1 części stałych do wody, a następnie flotuje się cyrkon, monacyt, turmalin, staurolit bez dodatku odczynników. Produkt nie flotujący jest koncentratem tytanu zawierającym przykładowo 78%  $TiO_2$  przy uzysku 98%.

Flotację selektywną prowadzi się w celu rozdzielania kolektywnych koncentratów. Opracowano kilka wariantów selektywnej flotacji mającej na celu oddzielenie rutylu i ilmenitu od cyrkonu. Flotację cyrkonu przy równoczesnej depresji minerałów tytanu oraz flotację łączną minerałów tytanu przy depresji cyrkonu omówiono pod hasłem dotyczącym przeróbki mechanicznej cyrkonu. Flotacja selektywna pozwala również na otrzymanie trzech koncentratów: ilmenitowego, cyrkonowego i rutyłowego. Proces prowadzi się mieszając koncentrat kolektywny bez dostępu powietrza z kationowym zbieraczem IM-11 i kwasem szczawiowym w celu depresji ilmenitu. Następnie flotuje się łącznie cyrkon i rutil. Po depresji rutylu kwasem siarkowym przy intensywnej aeracji pulpy flotuje się cyrkon przy  $pH = 2$ .

Rozdział minerałów ciężkich złóż okruchowych prowadzić można także według schematu flotacji kolektywno-selektywnej. Przebieg i warunki flotacji pokazano na rys. 5, a osiągnięte wyniki wzbogacania zestawiono w tabeli 7.



Rys. 5. Schemat flotacji kolektywno-selektywnej drobnoziarnistych piasków tytanowo-cyrkonowych

Flotację minerałów tytanu z rud tytano-magnetytowych prowadzi się według następujących schematów:

- z odpadów wzbogacania magnetycznego po wydzieleniu magnetytu rozdziela się ilmenit od krzemianów,
- rozdzielanie ilmenitu od minerałów żelaza i krzemianów,
- selektywna flotacja ilmenitu z pozostawieniem w produkcie nieflotującym magnetytu i krzemianów.

Warunki flotacji zmienia się w zależności od charakteru przerabianych rud. Flotację ilmenitu prowadzi się przy pomocy oleju talowego (0,4–1,2 kg/t) z dodatkiem nafty (0,3–1,5 kg/t) lub olejów napędowych (1,5 kg/t) przy  $pH = 6,4–6,9$  (flotacja główna),  $pH = 5,6–6,2$  (flotacja czyszcząca I),  $pH = 4,8–5,5$  (flotacja czyszcząca II). Flotację prowadzi się z dodatkiem NaF (0,2–0,4 kg/t) lub  $Na_2SiF_6$  (0,1–0,2

Tabela 7. Wyniki wzbogacania piasków tytanowo-cyrkonowych metodą flotacji

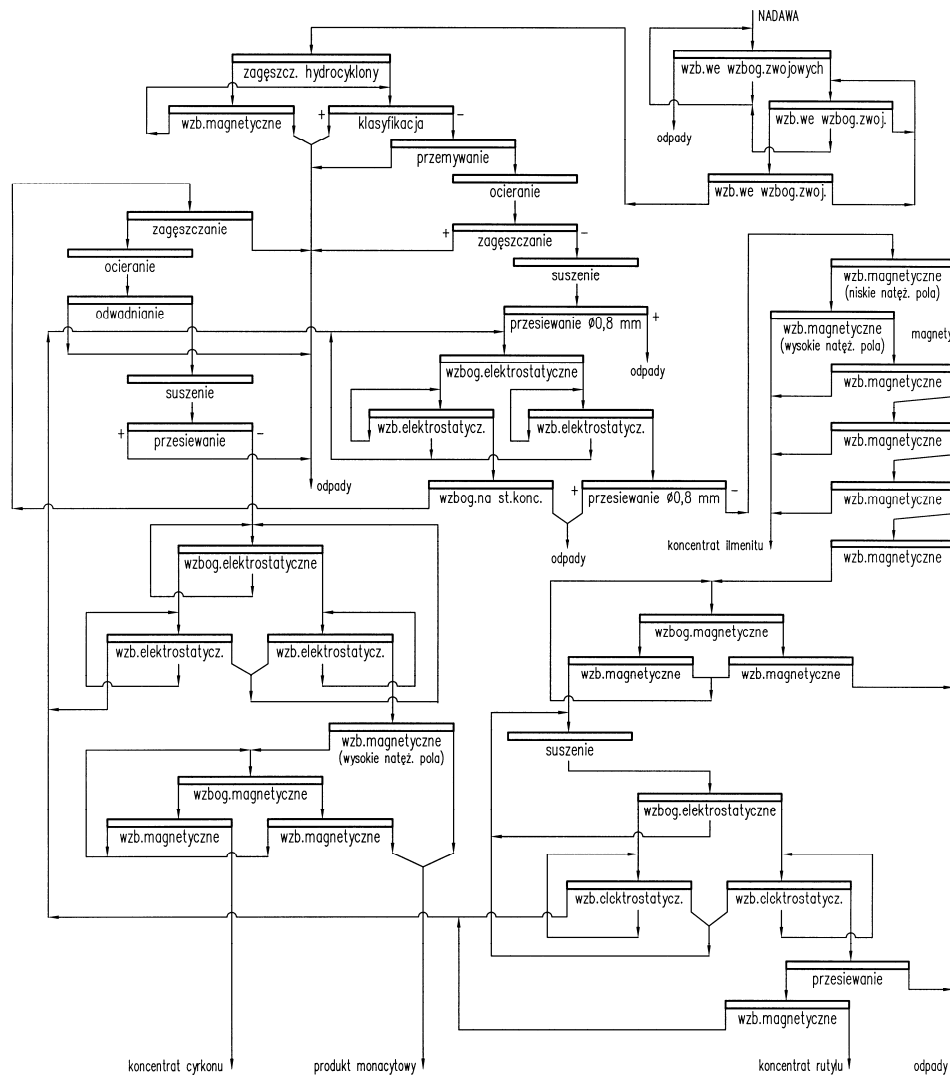
Produkt	Wychód, %	Zawartość, %		Uzysk, %	
		$TiO_2$	$ZrO_2$	$TiO_2$	$ZrO_2$
Nadawa	100,0	8,80	2,8	100,0	100,0
Koncentrat:					
rutyłowy	4,1	90,10	0,4	40,0	1,0
ilmenitowy	10,0	48,76	0,2	55,0	1,0
cyrkonowy	4,2	0,57	64,0	0,5	95,0
Odpady	81,7	0,48	0,1	4,5	3,0

kg/t),  $H_2SO_4$  (0,1–0,25 kg/t), czasem  $NH_4F$  lub  $HF$  (0,5 kg/t). W niektórych przypadkach korzystne jest stosowanie odczynników flotacyjnych w postaci emulsji, np.: olej talowy, nafta i emulgator etaksoł w stosunku 0,6:1,1:0,03. Stosowanie emulsji pozwala na prowadzenie flotacji bez wstępnego odszlamowywania, zwiększając uzyski ilmenitu. W tym przypadku proces przebiega przy niższych wartościach pH: flotacja główna pH = 5–5,2, flotacja czyszcząca I pH = 4,5, flotacja czyszcząca II pH = 4, flotacja czyszcząca III pH = 3,5.

W procesie flotacji największą trudność stanowi rozdzielanie ilmenitu od krzemianów żelaza. Stosowane odczynniki (mydła, żywice, kwasy tłuszczowe, kwas naftenowy, oleje wysokocząsteczkowe) dają mało selektywny rozdział przy niezadowalającym uzysku. Proces najczęściej prowadzony jest w środowisku kwaśnym (zużycie  $H_2SO_4$  do 5 kg/t) przy użyciu kwasu oleinowego. W celu zmniejszenia zawartości fosforu stosuje się NaF powodujące depresję apatytu. NaF

depresuje także granaty. Zdepresowanie granatów i innych krzemianów żelaza można uzyskać także, prowadząc flotację główną w środowisku neutralnym, następnie obróbce materiału kwasami i przemyciu oraz ponownej flotacji czyszczącej.

Przykład zakładu **wzbogacającego piaski nadmorskich rud okruszowych** kombinowaną metodą grawitacyjno-magnetyczno-elektrostatyczną pokazano na rys. 6. W zakładzie przerabiane są piaski, zawierające około 8% minerałów ciężkich, w tym ilmenit, rutil, cyrkon, monacyt. Wstępne wzbogacanie grawitacyjne, a następnie dwie operacje czyszczące prowadzone są w wodzie morskiej, na wzbogacalnikach zwojowych, w których wydziela się 85–90% ziaren odpadowych, wyrzucanych do morza. Kolektywny koncentrat jest zagęszczany w hydrocyklonach, a następnie kierowany do wzbogacania magnetycznego na mokro dla usunięcia magnetytu. Po wysuszeniu w temperaturze 600–750°C koncentrat ten zawierający jeszcze część kwarcu i piroksenu



Rys. 6. Schemat wzbogacania piasków nadmorskich kombinowaną metodą grawitacyjno-elektrostatyczno-magnetyczną

rozdziela się we wzbogalnikach elektrostatycznych w polu o wysokim natężeniu. Wyniki rozdzielania zamieszczono w tabeli 7.

Przed procesem wzbogacania elektrostatycznego nadawę poddaje się mechanicznemu ocieraniu przy gęstości 80% części stałych przez około 10–20 min, w którym usuwa się z powierzchni minerałów pokrycie żelazowe i szlamowe, następnie przemywa się słodką wodą w celu usunięcia chlorków. Produkty rozdzielania we wzbogalniku elektrostatycznym kierowane są do oczyszczania – frakcja przewodząca do wzbogacania w celu otrzymania koncentratów ilmenitu i rutylu, frakcja nie przewodząca do rozdzielania kwarcu i granatów od cyrkonu i monacytu. Przebieg i rodzaj operacji czyszczących przedstawiono na rys. 6. W wyniku wzbogacania uzyskuje się produkty, których skład mineralny zestawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Wyniki wzbogacania piasków nadmorskich kombinowaną metodą grawitacyjno-magnetyczno-elektrostatyczną

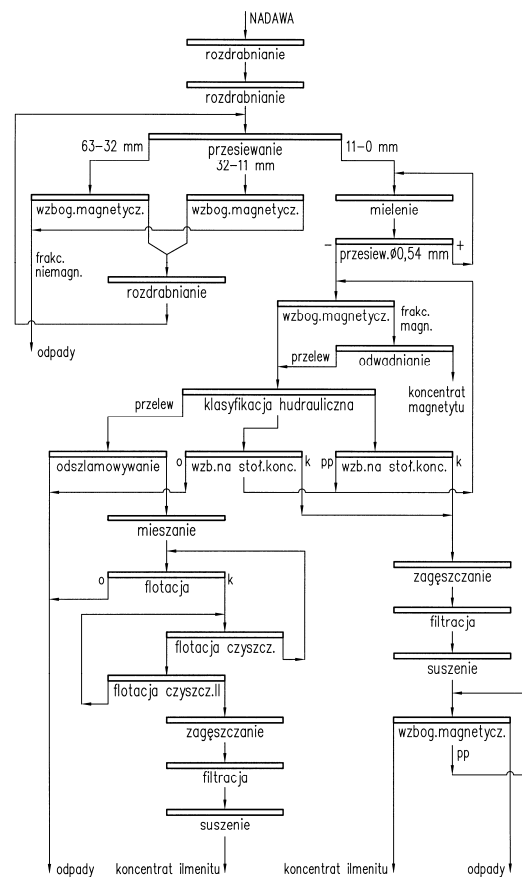
Minerał	Zawartość w koncentracie, %		
	ilmenitowym	rutylowym	cyrkonowym
Magnetyt	0,7	–	–
Ilmenit	97,6	0,4	–
Ilmeno-rutyl	0,6	1,0	–
Granat	–	0,3	0,1
Rutyl	0,9	98,1	0,2
Cyrkon	0,1	0,2	99,6
Kwarc	–	–	–
Monacyt	–	–	0,1

Przykłady innych zakładów wzbogacania złóż okruchowych zamieszczono pod hasłem dotyczącym przeróbki mechanicznej cyrkonu.

**Wzbogacanie rud tytanomagnetytowych** przeprowadza się następująco: wydzielanie ilmenitu z rud tytano-magnetytowych metodami przeróbczymi jest możliwe, gdy ilmenit występuje w postaci różnej wielkości ziaren wprysniętych w magnetycie lub minerałach skały płonnej. Drobn- i grubowprysnięte minerały wzbogaca się według schematu przeróbki magnetyczno-grawitacyjno-flotacyjnej. Z rud, w których ilmenit występuje w postaci rozproszonej w magnetycie lub w postaci roztworu stałego, metodami przeróbki można otrzymać na drodze magnetyczno-grawitacyjnej tylko koncentrat tytanowo-żelazowy do przeróbki metalurgicznej.

Przykładowy schemat wzbogacania rud tytanomagnetytowych zawierających wprysnięcia ilmenitu przedstawia rys.7. Ruda surowa rozdrabniana jest <63 mm i rozdzielana na klasy ziarnowe 63–32 mm, 32–11 mm, 11–0 mm. Grube klasy ziarnowe kierowane są do wzbogacania magnetycznego na sucho, w wyniku któ-

rego usuwa się około 15% odpadów. Frakcje magnetyczne łącznie z klasą 11–0 mm kierowane są do mielenia w młynach prętowych, pracujących w układzie zamkniętym z przesiewaczami wibracyjnymi. Klasa – 0,54 mm rozdzielana jest na mokro we wzbogalnikach magnetycznych. Frakcja magnetyczna jest koncentratem zawierającym 97% magnetytu. Frakcja niemagnetyczna po klasyfikacji wzbogacana jest na szlamowych stołach koncentracyjnych. Frakcje lekkie są końcowymi odpadami. Frakcje ciężkie ze stołów po dalszym czyszczeniu we wzbogalnikach magnetycznych są koncentratami ilmenitu. Przelewy klasyfikatorów i zagęszczaczy (klasa ziarnowa –0,074 mm) wzbogaca się flotacyjnie. Proces obejmuje flotację główną i dwie flotacje czyszczące. Stosuje się kwas oleinowy (0,4–0,5 kg/t), lekkie oleje naftowe (0,4–0,6 kg/t), fluorek sodowy (0,4 kg/t), kwas siarkowy (0,7–1,3 kg/t). Charakter środowiska: pH = 6,2 (flotacja główna), pH = 5,4–6 (flotacje czyszczące).

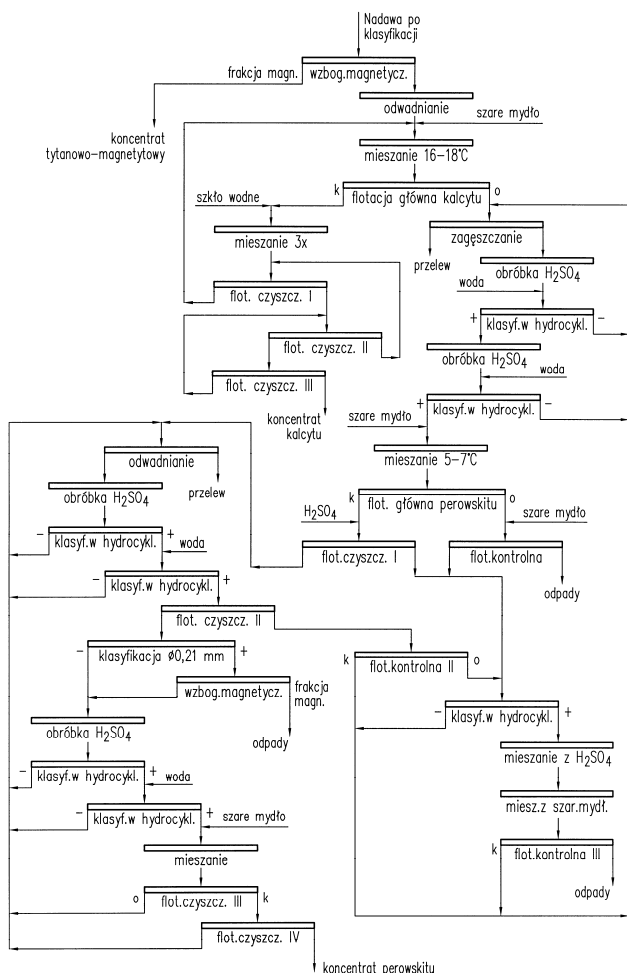


Rys. 7. Schemat wzbogacania rud tytanomagnetytowych

Koncentrat flotacyjny zawiera 46,5%  $TiO_2$ . Łączny koncentrat ilmenitu zawiera 45–47%  $TiO_2$  przy uzysku około 53%.

Przykłady innych zakładów wzbogacania rud tytanomagnetytowych zamieszczono pod hasłami dotyczącymi przeróbki mechanicznej żelaza oraz wanadu.

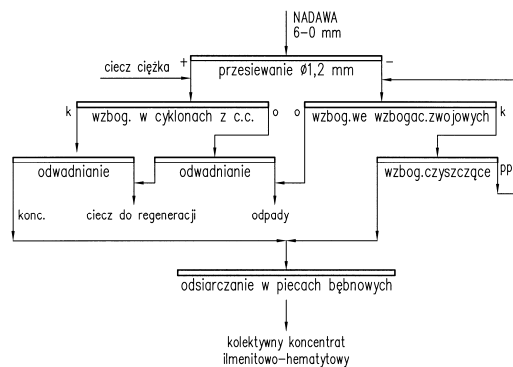




Rys. 8. Schemat wzbogacania rud perowskitowych

### Wzbogacanie rud perowskitowych i perowskito-tytanomagnetytowych przedstawiono na rys. 8.

Ruda po rozdrobnieniu i klasyfikacji kierowana jest do wzbogacania magnetycznego, gdzie wydziela się koncentrat magnetytowy lub tytanomagnetytowy, zawierający do 60% Fe i 7–8%  $TiO_2$ . Odpady wzbogacania się flotacyjnie. Jest to proces trudny, gdyż oprócz perowskitu występują kalcyt i sfen posiadające podobne właściwości flotacyjne. Po odszlamowaniu frakcje niemagnetyczne kieruje się do flotacji kalcytu, stosując jako zbieracz szare mydło techniczne w środowisku zasadowym, depresując perowskit szkłem wodnym. Produkt flotujący jest końcowym koncentratem kalcytu. Odpady flotacji kalcytu zagęszcza się i przemywa celem usunięcia zasad i szkła wodnego. Następnie materiał poddawany jest działaniu kwasu siarkowego (10–15 kg/t). Po usunięciu szlamów flotuje się perowskit szarym mydłem technicznym przy  $pH = 5,5-6$ . Odpady flotacji głównej perowskitu oczyszcza się trzykrotnie we flotacjach kontrolnych, natomiast koncentrat oczyszcza się czterokrotnie z uprzednią obróbką kwasem siarkowym przed każdą operacją. W wyniku wzo-



Rys. 9. Schemat wzbogacania rud ilmenitowo-hematytowych

gacania uzyskuje się koncentrat perowskitu, zawierający 48–50%  $TiO_2$  przy uzysku 70%. Sumaryczny uzysk tytanu (koncentraty tytanowy i tytanomagnetytowy) wynosi 82–85%.

Przykład wzbogacania rud ilmenitowo-hematytowych pokazano na rys. 9. Ruda surowa rozdrabniana jest poniżej 6 mm, a następnie rozdzielana na klasy 6–1,2 mm i 1,2–0 mm. Klasa +1,2 mm wzbogacana jest w cyklonach z ciężką cieczą. Obciążnikiem cieczy jest magnetyt. Produkty wzbogacania w cieczach ciężkich są produktami końcowymi. Układ regeneracji cieczy ciężkiej jest klasyczny. Klasa –1,2 mm wzbogacana jest dwustopniowo we wzbogacalnikach zwojowych. Proces nie jest dokładny ze względu na znaczne ilości skały płonnej. Koncentraty kolektywne ilmenitowo-hematytowe po prażeniu utleniającym (usunięcie siarki) rozdziela się metodami przeróbki metalurgicznej. Rudy te można wzbogacać również flotacyjnie, używając zbieraczy anionowych i kationowych, a także wzbogacać na stołach koncentracyjnych i we wzbogacalnikach magnetycznych z wysokim natężeniem pola. Procesy te są znacznie droższe w porównaniu z osiąganymi rezultatami. Z tego też powodu praktycznie nie są stosowane.

**Rudy apatytowo-sfenowe** (tytanitowe) można wzbogacać na drodze magnetyczno-flotacyjnej. Nadawę zawierającą 10–12%  $TiO_2$  rozdrabnia się poniżej 1 mm, a następnie rozdziela magnetycznie w celu usunięcia tytanomagnetytu oraz egirynu. Frakcja niemagnetyczna po domieleniu kierowana jest do flotacji apatytu. Mineral ten flotuje się mydłem naftenowym (0,1–0,15 kg/t) z dodatkiem (0,2–0,3 kg/t) szkła wodnego. Odpady flotacji apatytu kierowane są do flotacji sfenu. Zbieraczem jest kwas oleinowy (0,5 kg/t) rozpuszczony w nafcie. Koncentrat poddawany jest dwukrotnemu flotacyjnemu oczyszczaniu. Po filtracji i wysuszeniu koncentrat kierowany jest do oczyszczania magnetycznego w celu usunięcia resztek egirynu. Koncentrat końcowy zawiera 32%  $TiO_2$  przy uzysku do 75%.