

Kobalt (łac. *cobaltum* – Co) – pierwiastek przejściowy rozpoczynający dodatkową rodzinę 8₂ (kobaltowce) i należący zarazem do triady żelaza (Fe, Co, Ni). W stanie wolnym stanowi metal o barwie srebrzystobiałej z niebieskawym połyskiem. Ma jeden izotop trwały ⁵⁹Co. Duże znaczenie w technice izotopowej ma izotop ⁶⁰Co (T_{1/2} = 5,27 lat). Jest on stosowany jako źródło promieniowania jonizującego w tzw. bombach kobaltowych. Kobalt ma wtórne minerały z analogami niklowymi. Pokażne koncentracje Co znajdują się w kruszczach miedzi. Koncentruje się również w koncentracjach manganowych na dnie mórz i oceanów.

Główne minerały kobaltu zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Kobalt – Kopaliny

Nazwa	Wzór chemiczny	Teor. zaw. Co [%]	Ukł. kryst.	Twardość	Gęstość
Pentlandyt kobaltowy	(Ni, Co, Fe) ₉ S ₈	do 15	reg.	4	ok. 5,8
Siegenit	(Ni, Co) ₃ S ₄	do 20	reg.	5	4,8–5,0
Linneit	Co ₃ S ₄	57,96	reg.	4,5–5,5	4,8–5,8
Carrolit	(Co, Cu) ₃ S ₄	do 20	reg.		
Saffloryt	CoAs ₂	28,23	romb.	4,5–5,0	7,2–7,4
Skutterudyt	CoAs ₃	28,43	reg.	6	6,8
Smaltyn	(Co, Ni)As ₃	5–16	reg.	6	6,8
Glaukodot	(Co, Ni) AsS		reg.	5,5–6	6,5
Chatmanit	(Fe, Ni, Co)As ₃	do 4	reg.	6	6,8
Kobaltyn	CoAsS	35,53	reg.	5,5	6,33
Heterogenit	CoOH		tryg.		
Sferokobaltyt	CoCO ₃		tryg.		
Erytryn	Co ₃ [AsO ₄] ₂ · 8H ₂ O	37,54	jedn.	1,5–2,5	3,06
Asbolan – odm. czerni manganowej		do 17	zbity	1–1,5	

Przeróbka mechaniczna

Spośród około 30 minerałów Co praktyczne znaczenie w procesach przeróbki mechanicznej ma tylko około 10. Są to kobaltyn, glaukodot, linneit, smaltyn, erytryn, rzadziej skutterudyt, saffloryt, carrolit, heterogenit, siegenit. Spotyka się je najczęściej poprzrastane z pirytem, pirotynem, arsenopirytem i in. Rudy będące źródłem kobaltu podzielić można na dwa typy:

- rudy, w których kobalt występuje w postaci własnych minerałów łącznie z innymi składnikami użytecznymi (rudy Cu-Co, Ag-Co, As-Co). Odzysk minerałów Co możliwy jest na drodze wzbogacania flotacyjnego lub grawitacyjno-flotacyjnego,
- rudy, w których kobalt tworzy izomorficzną domieszkę w innych minerałach lub drobne wprysnięcia własnych faz mineralnych. Często występuje łącznie z niklem. Jego odzysk jest możliwy w procesach metalurgicznych.

Kobalt często jest zasocjowany z żelazem i arsenem. Drobne wprysnięcia jego minerałów spotyka

się także w sfalerycie. Uzysk tak występującego kobaltu zależy od wzbogacalności minerałów, w których występuje. Zawartość kobaltu w koncentratkach bywa różna, zależy od wzbogacalności przerabianej rudy, minimalnie wynosi > 0,45% Co.

Główną metodą wzbogacania rud Co jest flotacja. Wzbogacenie grawitacyjne przy zastosowaniu osadzarek i stołów koncentracyjnych jest operacją uzupełniającą lub kontrolną, rzadko czynnością główną. Kobaltyn flotuje się za pomocą ksantogenianów, aeroflotów, merkaptabenzotiazolu, aktywatorem jest siarczan miedzi, depresorem siarczek sodu. Tlenki kobaltu flotowane są ksantogenianami, a depresowane są siarczkiem baru i poprzez podgrzewanie mętów. Linneit flotuje się ksantogenianami przy pH ≥ 7, jest on aktywowany siarczanem miedzi, a depresowany siarczkiem sodu. Zbiieracze dobiera się w zależności od minerałów Co i od rodzaju przyjętego schematu flotacji. Przy flotacji kolektywnej odczynnikami zbierającymi są ksantogenian etylowy i amylowy, a dla utlenionych minerałów kwasy tłuszczowe (olej talowy, olej palmowy). W przypadku flotacji

selektywnej w cyklu flotacji minerałów Cu stosuje się aerofloty, a w cyklu pirytowym – ksantogeniany. Dobrym zbieraczem i równocześnie odczynnikiem pianotwórczym jest krezyłowy aeroflot nr 25. Depresorami siarczków kobaltu są wapno, cyjanki, siarczki sodu w dużych dawkach. Depresję minerałów Co powoduje także długotrwała aeracja mętów. Aktywatorami siarczków kobaltu są siarczan miedzi i kwas siarkowy. Ilość odczynników flotacyjnych dozowanych w procesach flotacji zależy od rodzaju przetwarzanej rudy oraz zastosowanego schematu technologicznego.

Wzbogacanie rud Cu-Co

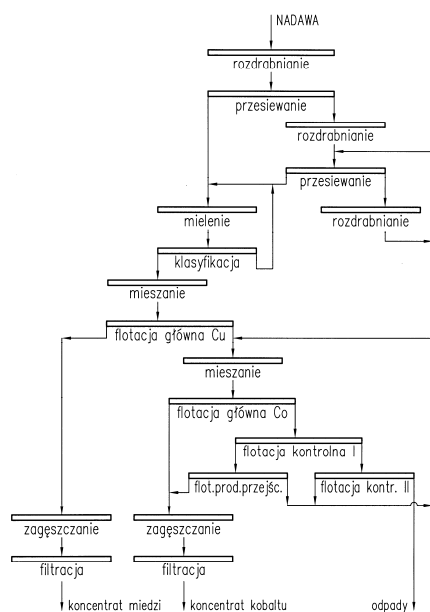
Rudy Cu-Co są głównym źródłem kobaltu. Problemem jest oddzielenie minerałów Co. Flotacyjne ich wydzielenie jest znacznie tańsze niż bezpośrednia przeróbka metalurgiczna. Z tego też powodu wszędzie tam gdzie to jest możliwe główne ilości minerałów Cu i Co rozdzielane są metodami przeróbki mechanicznej. W warunkach przemysłowych stosuje się schematy flotacji selektywnej lub kolektywno-selektywnej.

Wzbogacanie wg schematu **flotacji selektywnej** (rys. 1) prowadzi się wówczas, gdy minerały Co tworzą ziarna oraz gdy są one powierzchniowo utlenione. Rudy składające się z chalkopiryty, linneitu i kobaltowego pirytu, a także rudy z carrolitem rozdrabnia się do uziarnienia około 50% ziaren <0,074 mm, a następnie kieruje do cyklu flotacji minerałów Cu. Flotację prowadzi się w jednej operacji głównej, w wyniku której otrzymuje się końcowy koncentrat Cu. W przypadku występowania dużych ilości talku przed flotacją minerałów Cu prowadzi się jego flo-

tację za pomocą tylko odczynnika pianotwórczego – oleju sosnowego (15 g/t). Minerale Co depresuje się wapnem (600–850 g/t; pH środowiska wynosi 10,8–11,3) lub cyjankami (25–40 g/t) i sześciometafosforanem sodu (5 g/t), minerały Cu flotuje się za pomocą aeroflotu nr 208 (30–40 g/t) oraz metyloizobutylokarbinolu (15–30 g/t). Odpady flotacji miedzi kieruje się do cyklu flotacji minerałów Co, gdzie aktywuje się je siarczanem miedzi (40–275 g/t) i flotuje ksantogenianem amyłowym (400 g/t) lub izopropylowym (60–500 g/t). Odczynnikiem pianotwórczym jest olej sosnowy (5–10 g/t). Piryt kobaltowy wyflotowuje się ksantogenianem izopropylowym z odpadów flotacji kobaltu po poddaniu ich działaniu kwasu siarkowego (490–600 g/t), obniżając pH do 9,0. Przykładowe wyniki wzbogacania metodą flotacji selektywnej zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki wzbogacania rud Cu-Co metodą flotacji selektywnej

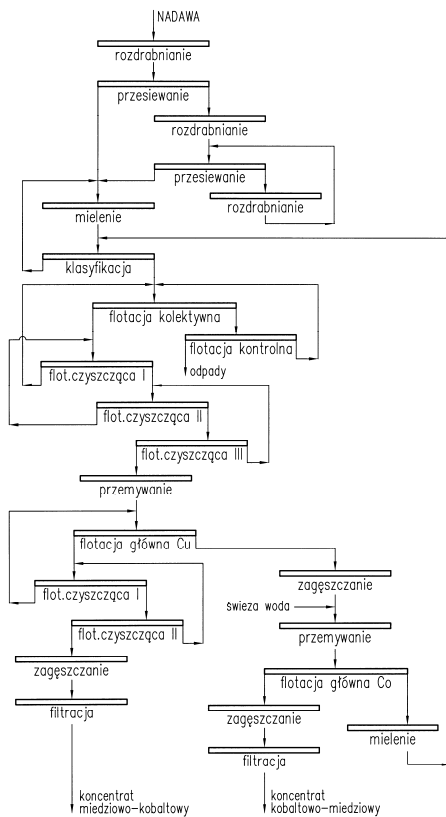
Produkt	Zawartość, %		Uzysk, %	
	Cu	Co	Cu	Co
Nadawa	5,70	2,08	100,00	100,00
Koncentrat miedzi	30,33	1,34	89,40	10,80
Koncentrat kobaltu	4,27	16,32	6,70	70,30
Odpady	0,85	0,68	3,90	18,90
Nadawa	4,67	0,25	100,00	100,00
Koncentrat miedzi	33,84	0,27	93,30	13,72
Koncentrat kobaltu	3,30	3,57	3,99	79,80
Odpady	0,16	0,02	2,71	6,48
Nadawa	4,20	0,15	100,00	100,00
Koncentrat miedzi	32,00	0,15	95,00	15–20
Koncentrat kobaltu	2–4	2,50	1–3	70,00
Nadawa	4,77	0,37	100,00	100,00
Koncentrat miedzi	34,60	0,40	93,00	13,90
Koncentrat kobaltu	3,10	4,20	4,60	80,70
Odpady	0,14	0,03	2,40	5,40



Rys. 1. Schemat flotacji selektywnej rud Cu-Co

Flotacja kolektywno-selektywna stosowana bywa w przypadkach rud o małej zawartości kobaltu. Rudy rozdrabnia się do uziarnienia 90% ziaren <0,074 mm, a następnie podaje do flotacji kolektywnej, wydzielając do koncentratu wszystkie siarczki za pomocą ksantogenianu butylowego. Koncentrat kolektywny dokładnie przemywa się i bez dodatku odczynników wydziela się flotacyjnie koncentrat Cu-Co. Aby obniżyć zawartość kobaltu, depresuje się jego minerały cyjankiem sodu (400 g/t) i wapnem (2000 g/t). Odpady cyklu miedziowego po zagęszczeniu przemywa się, po czym flotuje się z nich minerały Co ksantogenianem butylowym (250 g/t) i olejem sosnowym (50 g/t), otrzymując koncentrat Co-Cu. Miedź od kobaltu oddziela się w procesie

metalurgicznym, w którym korzystniej jest przerabiać koncentrat, zawierający 2,4% Co niż zawierający około 1% Co, a takim byłby uzyskany wcześniej koncentrat kolektywny. Schemat kolektywno-selektywnej flotacji pokazano na rys. 2, a uzyskiwane wyniki zestawiono w tabeli 3.



Rys. 2. Schemat flotacji kolektywno-selektywnej rud Cu-Co

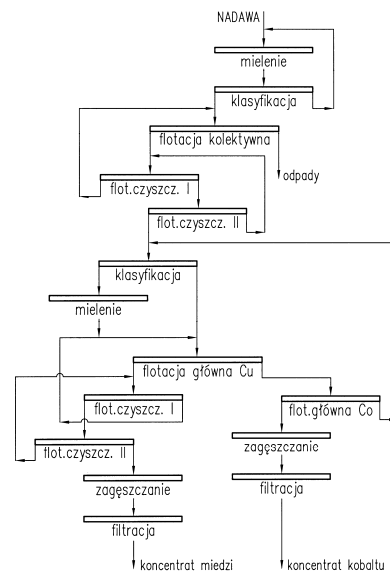
Tabela 3. Wyniki wzbogacania rud Cu-Co metodą flotacji kolektywno-elektrowej

Produkt	Zawartość, %					
	Cu	Co	Fe	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃
Nadawa	3,2	0,14	2,5	1,5	45,0	12,0
Koncentrat miedziowo-kobaltowy	56,8	0,65	10,4	24,0	4,2	1,2
Koncentrat kobaltowo-miedziowy	35,7	2,40	7,8	17,5	21,0	5,0
Odpady	0,4	0,05	—	—	—	—

Wzbogacanie pirytowych rud Cu-Co

Rudy pirytowe Cu-Co zawierają piryt, magnetyt, chalkopiryt, pirotyt, pentlandyt, wtórne minerały Cu, w niektórych przypadkach kobaltyn. Wzbogaca się je według schematów flotacji kolektywno-selektywnej lub selektywnej. Flotację **kolektywno-selektywną**

proceed się wówczas, gdy minerały Co związane są głównie z pirytem (rys. 3). Rudę rozdrabnia się do uziarnienia 50–60% ziaren <0,074 mm i poddaje flotacji kolektywnej przy pH = 8–8,2 za pomocą ksantogenu butylowego (40–100 g/t) i oleju sosnowego (30–60 g/t). Dokładne przestrzeganie ustalonego doświadczalnie reżimu flotacji jest konieczne, gdyż nadmiar odczynników wpływa na przebieg późniejszej flotacji selektywnej minerałów Cu, powodując straty kobaltu w koncentracie Cu. Do koncentratu kolektywnego trafia 50–55% pirotytu i 90–92% pirytu. Koncentrat kolektywny po domieleniu do 72% ziaren <0,074 mm rozdziela się flotacyjnie w dwóch ujęciach, depresując piryt wapnem w flotacji głównej Cu (900–1000 g/t) i do 1100 g/t w operacjach czyszczących. Przy zbyt dużych dawkach wapna może nastąpić depresowanie minerałów Cu, a przy zbyt małych kobalt przechodzi do koncentratu Cu. Odpady flotacji miedzi, będące produktem kobaltowym, kieruje się do flotacji głównej kobaltu w celu poprawy jego jakości. Można ją poprawić, stosując wzbogacanie magnetyczne w celu usunięcia magnetytu. W wyniku wzbogacania otrzymuje się koncentrat Cu z 26–27% Cu i 0,045% Co oraz koncentrat pirytowo-kobaltowy z 0,53% Co i 0,3% Cu.



Rys. 3. Schemat flotacji kolektywno-selektywnej rud Cu-Co-Fe

Flotację **selektywną** stosuje się, gdy występują w rudzie minerały Co, np. kobaltyn. Wydziela się kolejno koncentraty Cu, pirytowo-pirotynowy i Co. Minerale Cu flotuje się dwuetylowym i drugorzędowym dwubutylowym dwutiofosforanem przy pH = 10, siarczki żelaza – ksantogieniem amylowym i merkaptabenzotiazolem. Odpady flotacji siarczków żelaza poddaje się działaniu małej ilości siarczku sodu, następnie kwasu siarkowego i ponownie siarczku sodu. Flotację kobaltu

proceedzi się przy pH = 4 ksantogenianem amyłowym i olejem sosnowym.

Największą trudnością przy wzbogacaniu rud pirytowych Cu-Co jest oddzielenie minerałów Co od piryty. Opracowano kilka sposobów prowadzenia takiego procesu. Należą do nich:

- mieszanie koncentratu z wapnem (1000 g/t) przez 5 min, a następnie przez 20 min z siarczkiem sodowym, dwukrotne zagęszczanie i przemywanie świeżą wodą. Tak przygotowany koncentrat poddaje się aeracji przez 2 godz., a potem prowadzi się flotację miedziowo-pirytową. Produkt nieflotujący jest koncentratem Co,
- koncentrat kobaltowo-pirytowy poddaje się prażeniu w temperaturze 425–450°C przez 1,5–2 godz. w celu utworzenia warstewek tlenków żelaza na piryty, po wyprażeniu prowadzi się flotację kobaltu przy pH = 3,5–4, podając odczynnik w postaci emulsji. Zbieraczem jest Minerec A (200–250 g/t), odczynnikiem pianotwórczym – B-23 (250 g/t), stabilizatorem – Syntex M (15 g/t). Tym sposobem można uzyskać koncentrat zawierający około 22% Co przy uzysku ponad 90%. Jest to proces drogi.

Wzbogacanie rud utlenionych i mieszanych rud siarczkowo utlenionych Cu-Co

Rudy te w zasadzie kieruje się od razu do przeróbki metalurgicznej (rudy bogate) lub hydro-metalurgicznej (rudy ubogie). Poddawać je jednak można także procesom przeróbki mechanicznej. Składają się z malachitu, chryzokoli, chalkozynu, bornitu, chalkopiryty, heterogenitu, kobaltowego wadu, carrolitu. Wyróżnia się rudy utlenione oraz mieszane siarczkowo-utlenione. Wydziela się z nich siarczkowe i utlenione koncentraty Co-Cu, których nie poddaje się dalszemu rozdzielaniu.

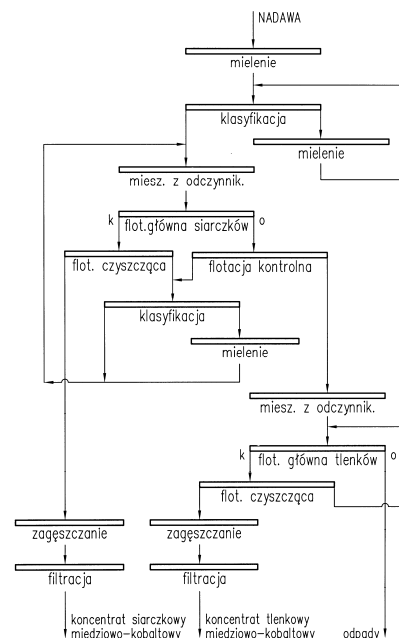
Utleniona ruda jest rozdrabniana do uziarnienia 60% ziaren <0,074 mm. Nadawa flotowana jest według schematu flotacji kolektywnej. Zbieraczami są hydrolizowany olej palmowy (800–1200 g/t), olej talowy (40–60 g/t), depresorami skały płonnej są szkło wodne (350–500 g/t) i soda (500–600 g/t). Otrzymuje się koncentrat Co-Cu o parametrach podanych w tabeli 4.

Rudy mieszane utlenione i siarczkowe rozdrabnia się do 70% ziaren <0,074 mm i flotuje najpierw siarczki, a następnie minerały utlenione (rys. 4). Po rozdrobnieniu rudę miesza się ze szkłem wodnym (150 g/t), które spełnia rolę peptyzatora i regulatora pH. W węźle flotacji siarczków stosuje się ksantogenian etylowy (80 g/t) i olej sosnowy (70 g/t). W węźle flotacji minerałów utlenionych dokonuje się siarczkowania za pomocą sulfohydratu sodu (1200 g/t) i flotuje minerały ksantogenianem amyłowym (50 g/t). Odczynnikiem pianotwórczym i zarazem

zbierającym jest olej talowy (10 g/t) i olej naftenowy (100 g/t). Wyniki wzbogacania przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki wzbogacania utlenionych i mieszanych rud Cu-Co

Ruda	Produkt	Zawartość, %		Uzysk, %	
		Cu	Co	Cu	Co
Utleniona	Nadawa	2,31	2,06	100,0	100,0
	Koncentrat	10,40	7,90	82,2	70,1
	Odpady	0,50	0,75	27,8	29,9
Mieszana siarczkowo-tlenkowa	Nadawa	6,00	0,24	100,0	100,0
	Koncentrat siarczkowy	46,20	0,45	46,7	11,2
	Koncentrat tlenkowy	19,00	0,76	34,4	34,0
	Odpady	1,35	0,16	18,9	54,8

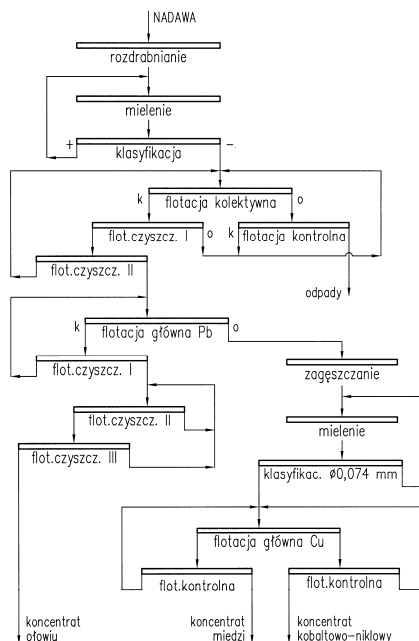


Rys. 4. Schemat wzbogacania mieszanych siarczkowych i utlenionych rud Cu-Co

Wzbogacanie rud polimetalicznych

Rudy polimetaliczne zawierają galenę, chalkopiryty, piryty, markasyty i siegenity, a skałą płonną jest kwarc i dolomit. Schemat wzbogacania rud Cu-Pb-Co-Ni pokazano na rys. 5. Kolektywny koncentrat wydzielany jest w środowisku zasadowym w celu częściowego usunięcia siarczków żelaza do odpadów. Po flotacjach czyszczących dodaje się do koncentratu cyjanki i flotuje minerały Pb, uzyskując koncentrat o zawartości 78–80% Pb, 1% Cu i 0,5% Ni + Co. Odpady po zagęszczeniu i domieleniu do uziarnienia 60% ziaren <0,074 mm kieruje się do flotacji mine-

rałów Cu, uzyskując koncentrat z 27–30% Cu. Odpady flotacji kontrolnej są koncentratem żelaza, zawierającym 2% Ni + Co. Koncentrat ten jest produktem finalnym mimo możliwości podwyższenia zawartości kobaltu poprzez zastosowanie jednego ze sposobów rozdziału kobaltu od siarczków żelaza.



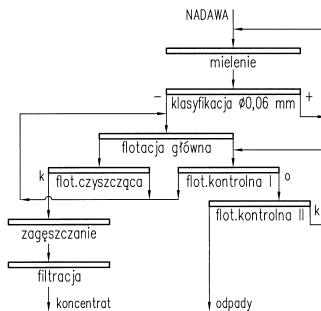
Rys. 5. Schemat wzbogacania rud polimetalicznych

Wzbogacanie arsenkowych rud Co-Ni-Bi

Rudy arsenkowe Co-Ni-Bi tworzą żyły, w których głównym minerałem jest kwarc, skałą płonna są łupki i granit. Składnikami użytecznymi są mieszaniny ziaren skutterudytu i chloantytu, zrosty smaltynu i nikielinu, kobaltyn, bizmut rodzimy, piryt, arsenopiryt. Większe ziarna wzbogaca się ręcznie, drobniejsze metodami grawitacyjnymi w osadzarkach i na stołach koncentracyjnych lub flotacyjnie. Wzbogacanie grawitacyjne daje mały uzysk kobaltu. Przy wzbogacaniu flotacyjnym rudę rozdrabnia się do uziarnienia 75% ziaren <0,06 mm, następnie wydziela się koncentrat kolektywny. Flotację prowadzi się przy pH = 6–6,5. Środowisko neutralne i zasadowe pogarsza rezultaty flotacji. Zbieraczem jest amyłowy ksantogonian sodu (600 g/t). Schemat wzbogacania pokazano na rys. 6, natomiast otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 5.

Wzbogacanie arsenkowych rud Co-Ag

Rudy Co-Ag są trudno wzbogacalne. Wymagają stosowania kombinowanego schematu grawitacyjno-

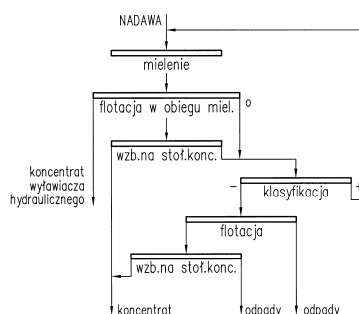


Rys. 6. Schemat wzbogacania rud As-Co-Ni-Bi

Tabela 5. Wyniki wzbogacania arsenkowych rud Co-Ni-Bi

Produkt	Zawartość, %		Uzysk, %	
	Co + Ni	Bi	Co + Ni	Bi
Nadawa	0,20	0,25	100	100
Koncentrat	3,40	3,60	90	95
Odpady	0,04	0,01	10	5

flotacyjnego. Przykładowy schemat wzbogacania takich rud pokazano na rys. 7. Rudę, zawierającą kobaltyn, smaltyn, erytryn (0,5–2% Co) oraz srebro rodzime, argentyt, dyskrazyt i inne minerały Ag (1,5–2,2 kg/t Ag), rozdrabnia się, po czym kieruje do jednosekcyjnej maszyny flotacyjnej włączonej w obieg mielenia i klasyfikacji. Gruboziarniste minerały Ag oddziela się w hydraulicznym wyławiaczu wbudowanym do maszyny flotacyjnej. Koncentraty kolektywne flotacji w cyklu mielenia i flotacji przelewów klasyfikatorów czyszczone są na stołach koncentracyjnych. Koncentrat taki zawiera 10–12% Co i 2,7–3 kg/t Ag, a odpady – 0,1% Co i 15 g/t Ag. Odpady ze stołów koncentracyjnych wykorzystane bywają jako topniki w hutach miedzi.



Rys. 7. Schemat wzbogacania rud As-Co-Ag