

Wiesław MĄCZKA, Adam PIESTRZYŃSKI
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

EFEKTYWNOŚĆ FLOTACJI ZŁOTA W OBIEGU MIELENIA ZWR „POLKOWICE”

Streszczenie. Przeprowadzono grawitacyjne wzbogacanie odpadów z flotacji rudy złota w obiegu mielenia. Wykonano badania mineralogiczne koncentratu grawitacyjnego. Badania wykazały, że rozmiar ziaren złota i agregatów złota z innymi minerałami osiąga 0.35 mm.

EFFICIENCY OF GOLD FLOTATION IN GRINDING CIRCUIT AT POLKOWICE ORE BENEFICIATION PLANT

Summary. Gravity concentration for tailings of gold ore flotation in the grinding circuit was performed. Gravity concentrate was examined under microscope in reflected light. Test shows that grains of gold and its aggregates attain 0,35 mm.

1. Wstęp

Ruda miedzi eksploatowana w kopalniach KGHM Polska Miedź SA poza podstawowym metalem zawiera szereg metali towarzyszących, w tym również metali szlachetnych.

Zawartości metali towarzyszących są niskie i ulegają znacznym wahaniom, tym niemniej ze względu na znaczne ilości przerabianej rudy ich odzysk przynosi znaczący efekt ekonomiczny.

Ze względu na znaczne rozproszenie pierwiastków towarzyszących oraz z powodu niewielkich rozmiarów minerałów będących ich nośnikami przeróbka rud miedzi prowadzona jest według technologii przygotowanej przede wszystkim pod kątem nastawionym wyłącznie na odzysk minerałów miedzi. Pozostałe metale odzyskiwane są tylko dzięki podobnemu do

minerałów miedzionośnych zachowaniu w procesie flotacji. W związku z tym przechodzą one do koncentratu miedzionośnego. Umożliwia to ich odzysk w procesach metalurgicznych.

Uzysk metali towarzyszących jest znacznie niższy od uzysku miedzi. Uzysk srebra w procesie flotacji wynosi około 80%, a dla pozostałych metali jest znacznie niższy.

Niektóre metale towarzyszące, szczególnie zaś metale szlachetne, są wyjątkowo trudne do zbilansowania, ponieważ dokładność oznaczenia ich zawartości w rudzie oraz produktach flotacji jest bardzo niska. Do metali tych należą przede wszystkim Au, Pt i Pd.

Średnie wskaźniki wzbogacania złota w zakładach wzbogacania rud KGM Polska Miedź SA w latach 1990-1994 zestawiono w tabeli 1 [Piestrzyński i inni 1996]. Z przedstawionych danych wynika, iż uzysk złota średnio we wszystkich zakładach wzbogacania rud KGHM jest niższy o około 20% od uzysku srebra i około 30% niższy od uzysku miedzi. Najwyższą zawartością złota w omawianym okresie charakteryzowała się ruda wzbogacana w ZWR ZG Polkowice. W zakładzie tym osiągnięto również najwyższy uzysk tego metalu w koncentracie.

Tabela 1

Średnie wskaźniki wzbogacania złota w KGHM Polska Miedź SA w latach 1990-1994

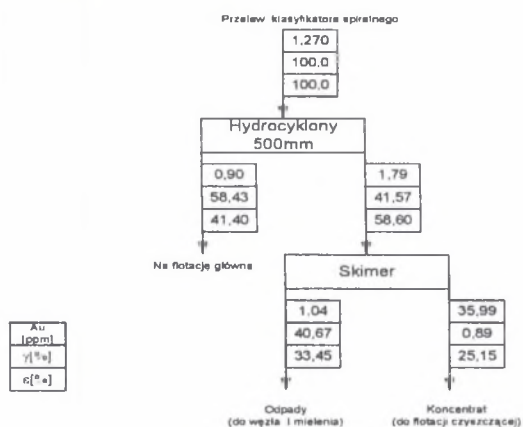
Nazwa zakładu	Zawartość Au w nadawie [ppm]	Zawartość Au w koncentracie [ppm]	Uzysk Au [%]
ZG Lubin	0,0222	0,209	56,90
ZG Polkowice	0,0332	0,3792	71,70
ZG Rudna	0,0174	0,1158	42,20
Srednia dla KGHM	0,0232	0,2133	57,86

2. Przemysłowa próba wzbogacania pozabilansowej rudy miedzi

W ZWR „Polkowice” w okresie od 11.04 do 14.04.1998 przeprowadzono przemysłową próbę wzbogacania pozabilansowej rudy miedzi o stosunkowo wysokiej zawartości złota (tzw. próba wielkanocna). Według informacji DKJ „Polkowice” ruda ta zawierała 1,36 ppm Au (Petryka 1997). W czasie trwania tej próby flotację złota w obiegu mielenia prowadzono według schematu przedstawionego na rysunku 1.

Ruda po zmieleniu w układzie mielenia kierowana była do klasyfikacji w hydrocyklonach o średnicy 500 mm. Wylew hydrocyklonów skierowany był do operacji wzbogacania flotacyjnego w tzw. skimerze. Wylew ten w stosunku do nadawy wzbogacony był w Cu i Au. Wzbogacenie w Au jest dosyć znaczne. Stopień wzbogacenia w stosunku do

rudy surowej wynosił 1,3, ponieważ wylew hydrocyklonów zawierał 1,79 ppm Au. Uzysk Au w wylewie hydrocyklonu wynosił około 60%.



Rys. 1. Schemat flotacji złota w obiegu mielenia ZWR Polkowice

Fig. 1. Flowsheet of gold flotation in grinding circuit at the Polkowice Ore Beneficiation Plant

Wzbogacenie wylewu hydrocyklonów w Au stanowi efekt wynikający z wysokiej gęstości tego metalu. W trakcie procesu klasyfikacji ciężkie ziarna złota mimo niewielkich rozmiarów pod wpływem działania siły odśrodkowej ze względu na znaczną masę przechodzą do wylewu hydrocyklonów. Jednocześnie uzysk Au w koncentracie operacji, jaką jest wzbogacanie w skimerze, wynosi tylko około 25%. Może to być spowodowane niewystarczającym uwolnieniem ziaren złota lub też znacznymi ich rozmiarami, a co za tym idzie, wysokim ciężarem ziaren złota, który ujemnie wpływa na ich flotowalność. Złoto, które nie zostało wyflotowane w skimerze, powraca do układu mielenia. Ze względu na jego wysoką kowalność może tutaj zostać „rozklepane” na cienkie blaszki. Taka forma występowania złota powinna ułatwiać jego odzysk pod warunkiem, że jego ziarna nie są zbyt duże.

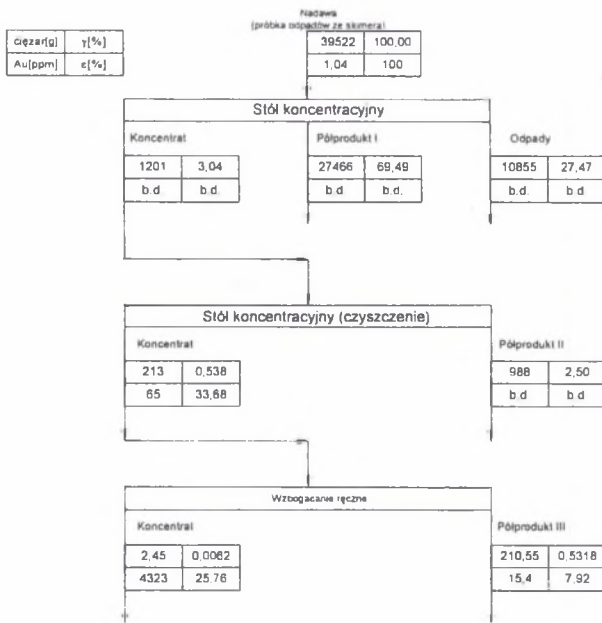
3. Badania laboratoryjne odpadów ze skimera

W celu wyjaśnienia przyczyn niskiej flotowalności złota w obiegu mielenia postanowiono przeprowadzić badania mineralogiczne frakcji ciężkiej wydzielonej z odpadów ze skimera. W celu uzyskania frakcji ciężkiej przeprowadzono wzbogacanie grawitacyjne odpadów na laboratoryjnym stole koncentracyjnym o powierzchni płyty około 0,3 m², a

następnie wzbogacanie ręczne wykorzystując miskę do płukania złota typu „złób koreański”. Płyta stołu wykonana była z aluminium i posiadała listwowanie równoległe do krawędzi odbioru produktów. Schemat wzbogacania grawitacyjnego odpadów ze skimera przedstawiono na rysunku 2.

Wzbogacaniu grawitacyjnemu poddano próbkę odpadów ze skimera o ciężarze bliskim 40 kg. W wyniku wzbogacania grawitacyjnego otrzymano koncentrat wzbogacony ponad 60-krotnie w Au, przy czym uzysk tego metalu w koncentracji wyniósł 33,7%. Ręczne wzbogacenie tego koncentratu pozwoliło na otrzymanie bardzo bogatego w złoto produktu.

Wybrane produkty otrzymane na stole koncentracyjnym poddano analizie chemicznej, a koncentrat otrzymany w wyniku wzbogacania ręcznego poddano analizie mineralogicznej.



Rys. 2. Schemat wzbogacania grawitacyjnego odpadów ze skimera
Fig. 2. Gravity separation flowsheet of skimer tailings

4. Metody badań mineralogicznych

Badania mineralogiczne zostały wykonane na próbkach otrzymanych przez ręczne, grawitacyjne wzbogacanie koncentratu otrzymanego na stole koncentracyjnym. W wyniku takiego wzbogacania otrzymano koncentrat ciężki o wadze 2.45 g. Z koncentratu wykonano

preparaty polerowane do badań w świetle odbitym. Badania mineralogiczne przeprowadzono pod mikroskopem kruszcowym OPTIPHOT firmy Nikon.

5. Wyniki badań mikroskopowych

W badanych próbkach stwierdzono dwie asocjacje minerałów:

- asocjację typową dla rud miedzi,
- asocjację typową dla stref wtórnie utlenionych.

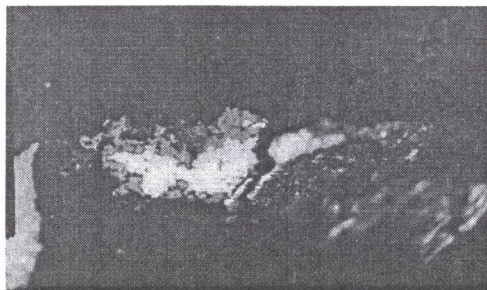
Obecność obydwu asocjacji wskazuje, że w tak zwanej próbce „wielkanocnej” procesowi przeróbczemu poddane zostały skały o mieszanym składzie. Były to typowe rudy miedzi składające się ze skał węglanowych i łupków miedzionośnych oraz wtórnie utlenione skały występujące w tej samej pozycji geologicznej, co typowe rudy miedzi. W przybliżeniu można ocenić, że procesowi przeróbki poddano urobek o składzie około 70% objętościowych skał zawierających okruszcowanie złotem i około 30% obj. typowej rudy miedzi. Należy zatem przyjąć, że urobek poddany przeróbce w próbce wielkanocnej zawierał niższe zawartości Au, niż wynikało to z uśrednienia analiz chemicznych wykonanych tylko dla skał okruszczonych złotem.

Skład mineralny pierwszej asocjacji jest identyczny jak w typowych rudach miedzi. Główne minerały kruszczowe koncentratów grawitacyjnych to chalkozyn, digenit, bornit, chalkopiryt, kowelin, tennantyt, galena, sfaleryt, piryt oraz zrosty tych minerałów.

Głównymi minerałami drugiej asocjacji są Au rodzime, hematyt oraz kowelin, chalkopiryt, bornit i chalkozyn. Identyczna asocjacja została dokładnie opisana, na podstawie preparatów wykonanych z surowych próbek skalnych, w pracach Piestrzyński, Banaszak, Oszczepalski, Rydzewski, Speczik (1996); Piestrzyński, Pieczonka (1997a, b); Piestrzyński, Pieczonka (1998a, b); Piestrzyński, Pieczonka, Głuszek, Michalik (1998); Piestrzyński, Pieczonka (2000), Piestrzyński, Pieczonka (2001a, b, c); Piestrzyński, Pieczonka (2002 w druku). Złoto rodzime tworzy z tymi minerałami zrosty (fot. 1, 2, 3) oraz występuje w postaci drobnych, kilkumikronowych wrostków. Wielkość największych agregatów przekracza nawet 0.3 mm. Au rodzime tworzy również trwale zrosty z kwarcem (fot. 4, 5). W niektórych przypadkach (fot. 9) wygięcie blaszek złota wskazuje, że ziarna złota rodzimego zostały najprawdopodobniej zgniecione podczas procesu mielenia wraz z ziarnami kwarcu. Wielkość samodzielnych, największych zaobserwowanych ziaren złota przekracza 200 μm (fot. 6, 7).

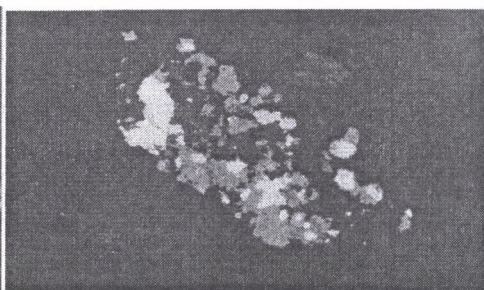
Obok dużych ziaren stwierdzono również samodzielne ziarna o wielkościach mniejszych od 50 μm (fot. 8). Duża liczba zaobserwowanych dużych ziaren złota rodzimego, powyżej 50 μm oraz obecność różnorodnych zrostów świadczy o małej skuteczności wzbogacania w skimerze.

W badanych próbkach frakcji ciężkiej stwierdzono również duże ilości wydłużonych ziaren miedzi metalicznej. Ziarna te swoim kształtem przypominają fragmenty drutu



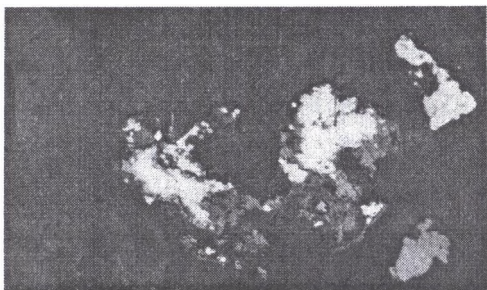
Fot. 1. Zrost Au rodzimego (żółte, centrum agregatu) z hematytem (szary, zewnątrz część agregatu). Część agregatu ułożona jest w innej płaszczyźnie. Światło odbite, wielkość agregatu 350 μm

Phot. 1. An intergrowth of native Au (yellow, inner part of the aggregate) with haematite (grey, outer part of the aggregate). The right part of the aggregate extends out of focus. Reflected light, the size of the aggregate is 350 μm



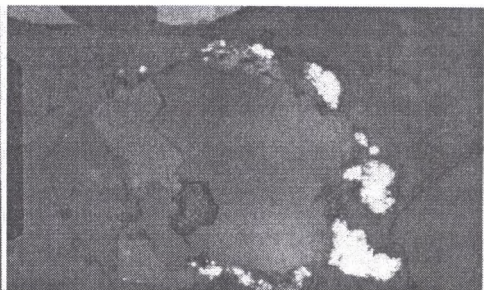
Fot. 2. Agregat ziarnowy składający się z wielu zrostów Au rodzimego (jasnożółte) z hematytem (szary). Światło odbite, wielkość agregatu 370 μm

Phot. 2. An aggregate composed of numerous intergrowths of native gold (light yellow) with haematite (grey). Reflected light, the size of the aggregate is 370 μm



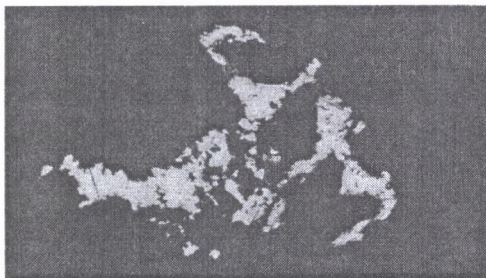
Fot. 3. Agregat ziarnowy składający się ze zrostów Au rodzimego (jasnożółte) z siarczkami miedzi: digenitem i kowelinem (niebieskie). Światło odbite, wielkość agregatu 320 μm

Phot. 3. An aggregate composed of intergrowths of native gold (light yellow) with copper sulphides: digenite and covellite (blue). Reflected light, the size of the aggregate is 320 μm



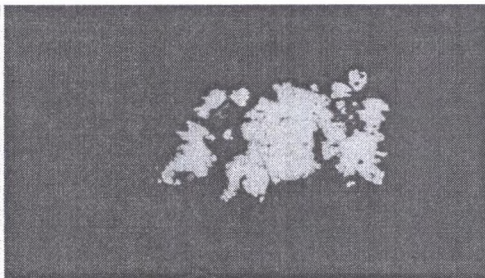
Fot. 4. Au rodzime na powierzchni ziarna kwarcu. Światło odbite, średnica największego ziarna złota wynosi 50 μm

Phot. 4. Native Au on the surface of a quartz grain. Reflected light, the size of the largest gold grain is 50 μm



Fot. 5. Agregat składający się z ziaren kwarcu „pozlepianych” nieregularnymi blaszkami Au rodzimego. Światło odbite, wielkość agregatu 380 μm zaś największe ziarno złota 150 μm

Phot. 5. An aggregate composed of quartz grains, „cemented” with irregular plates of native Au. Reflected light, the size of the aggregate is 380 μm , and the size of the largest gold grain is 150 μm



Fot. 6. Samodzielne ziarno Au rodzimego. Światło odbite, wielkość największego ziarna – 220 μm .

Phot. 6. An individual grain of native Au. Reflected light, the size of the largest gold grain is 220 μm



Fot. 7. Samodzielne ziarno Au rodzimego. Światło odbite, wielkość ziarna 280 μm

Phot. 7. An individual grain of native Au. Reflected light, the size of the largest gold grain is 280 μm



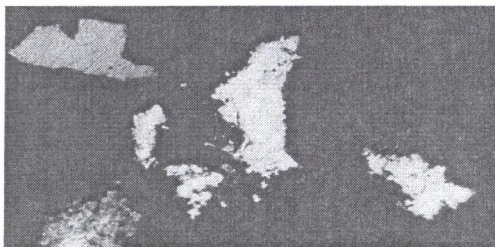
Fot. 8. Drobne ziarna Au rodzimego o wielkości 25-50 μm . Światło odbite

Phot. 8. Fine grains of native Au. Reflected light, the sizes of gold grains range from 25 to 50 μm

strzałowego. W jednym takim ziarnie zaobserwowano wzrostki żółtego metalu przypominającego złoto rodzime (fot. 10).

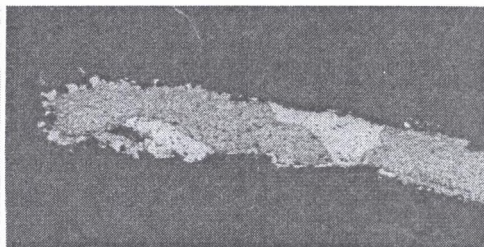
6. Flotowalność złota i dyskusja wyników

Badania dotyczące właściwości flotacyjnych złota o czystej powierzchni wskazują, że zbieraczami dla takiego złota są ksantogeniany, merkaptany i sole kwasów tłuszczowych.



Fot. 9. Agregat wieloziarnowy składający się z kwarcu i Au rodzimego. Światło odbite, wielkość największego ziarna złota wynosi około 250 μm

Phot. 9. An aggregate composed of quartz and native Au. Reflected light, the size of the largest gold grain is around 250 μm



Fot. 10. Zrost miedzi metalicznej (różowoczerwona) ze złotem metalicznym (żółte). Światło odbite, wielkość fragmentu około 450 μm

Phot. 10. An intergrowth of metallic copper (pink-reddish) with metallic gold (yellow). Reflected light, the size of the fragment is 450 μm .

W przypadku stosowania ksantogenianów korzystniejsze jest stosowanie ksantogenianów o dłuższym łańcuchu (np. ksantogenian butylowy).

Bezpośrednio po odkryciu powierzchni ziaren złota nie pokrywa się ona ksantogenianami. Adsorpcja zbieracza możliwa jest dopiero po pewnym czasie kontaktu z powietrzem lub wodą bogatą w rozpuszczony tlen. Ilość zbieracza na powierzchni ziaren złota rośnie wraz ze stężeniem tlenu oraz czasem kontaktu.

Flotowalność ziaren złota w znacznym stopniu uzależniona jest od ich rozmiarów i kształtu. Rezultaty flotacji wykazują, że ziarna o wymiarach przekraczających 0,1 mm flotują znacznie gorzej. Udział ziaren flotujących uzależniony jest od ich kształtu, struktury, gęstości mętów flotacyjnych, konstrukcji maszyny flotacyjnej i szeregu innych czynników.

Duże ziarna złota odzyskane w procesie flotacji mają najczęściej blaszkowatą formę. Do odpadów trafiają głównie ziarna o wysokim ciężarze oraz mało rozwiniętej powierzchni. Są to „pełne” ziarna o formie zbliżonej do kuli.

Praktyka wskazuje, że lepsze rezultaty flotacji uzyskuje się w maszynach pneumatycznych ze względu na spokojniejszy przepływ agregatów ziarno złota-pęcherzyk w kierunku powierzchni mętów.

Flotowalność ziaren złota występującego w formie zrostów jest stosunkowo słabo rozpoznana. Zachowanie złota w procesie flotacji zależy w tym przypadku od rodzaju minerałów, z którymi związane jest złoto. Zrosty złota z siarczkami podczas flotacji ze zbieraczami typowymi dla tych minerałów flotują bardzo efektywnie. Zrosty z innymi minerałami podczas flotacji zachowują się różnie w zależności od udziału złota w agregatach. Przy dużej ilości złota w agregacie jego wyflotowanie jest prawdopodobne, natomiast jeśli udział złota jest nieznaczny, to takie zrosty przechodzą do odpadów.

Wspólną cechą schematów flotacyjnych stosowanych dla wzbogacania rud złota jest skrócenie frontu flotacji czyszczących lub całkowity ich brak. Wiąże się to z faktem, iż trudnoflotujące ziarna złota (ziarna o dużych rozmiarach, zrosty itp.), które udało się odzyskać w koncentracie, bardzo łatwo jest stracić podczas operacji czyszczenia.

Z badań przeprowadzonych przez Łuszczkiewicza (1999) wynika, że po rozdrobieniu pozabilansowej rudy miedzi do uziarnienia $-0,3$ mm około 70% Au pozostaje w klasie $0,3-0,1$ mm, przy czym wychód tej klasy wynosi około 30%.

Badania przeprowadzone na odpadach pochodzących ze skimera wskazują, że uziarnienie ziaren złota uzyskiwane w wyniku I mielenia jest dalekie od optymalnego. Wielkość pojedynczych ziaren złota, jak również agregatów z innymi minerałami osiąga 0.35 mm, a zatem są one kilkakrotnie większe od ziaren dobrze flotujących.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają i uzupełniają wyniki badań Łuszczkiewicza.

Dla osiągnięcia wysokiego uzysku złota w procesie flotacji konieczne jest zmielenie rudy do uziarnienia $-0,07$ mm. Według Łuszczkiewicza zapewnia to osiągnięcie uzysku przekraczającego 90 % oraz koncentratów wzbogaconych w Au w stosunku do nadawy od 20 do 100 (200) razy.

7. Wnioski

Przemysłowa próba wzbogacania pozabilansowej rudy złota z rejonu kopalni Polkowice-Sieroszowice wskazała na niską efektywność odzysku złota w operacji flotacji w obiegu mielenia realizowanej w skimerze. Uzysk złota w koncentracie tej operacji wyniósł 25 %.

Główną przyczyną tego stanu rzeczy jest występowanie złota w postaci dużych ziaren, a także częściowo niewystarczające uwolnienie złota. Rozmiary ziaren złota w przygotowanych preparatach sięgają 350 μm , podczas gdy za górną granicę rozmiarów ziaren flotujących uważa się 50 μm .

Drugorzędną przyczyną niskiego uzysku złota w czasie flotacji w skimerze może być zbyt krótki czas kontaktu świeżo odkrytej powierzchni złota z tlenem, a co za tym idzie - mała ilość zbieracza na powierzchni ziaren złota.

LITERATURA

1. Piestrzyński A., Banaszak A., Oszczepalski S., Rydzewski A., Speczik S., 1996: Jakość złóża KGHM Polska Miedź SA w świetle najnowszych wyników badań. Sesja Naukowa: 40-lecie odkrycia złóż rud miedzi i 35-lecie KGHM Polska Miedź SA, 21-22 listopada 1996, Warszawa - Lubin, 24-29.
2. Piestrzyński A., Pieczonka J. 1997a.: Gold and PGE on an oxide-reducing interface in Lower Zechstein sediments of the Fore-Sudetic Monocline, SW Poland. In: Mineral Deposits: Research and Exploration, Heikki Papunen ed., Turku, 99-102.
3. Piestrzyński A., Pieczonka J., 1997b: Noble metals from the Kupferschiefer-type deposits, Lubin-Sieroszowice, SW Poland. In: Mineral Deposits: Research and Exploration, Heikki Papunen ed., Turku, 563-566.
4. Piestrzyński A., Pieczonka J., 1998a: Nowe minerały w złożu rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej: tetraaurykupryt, spionkopit, geeryt, yarrowit i naturalne stopy Ag-Hg. Prace Spec. PTMin., 10, 33-43.
5. Piestrzyński A., Pieczonka J., 1998b: Tetraauricupride from the Kupferschiefer type deposit, SW Poland - the first occurrence. Mineral. Polon. 29/1, 11-18.
6. Pieczonka J., Piestrzyński A., Głuszek A., Michalik A., 1998: Występowanie złota, platyny i palladu w obszarze złożowym Polkowice-Sieroszowice. Prace Spec. PTMin. 10, 71-87.
7. Pieczonka J., Piestrzyński A., 2000: Model genetyczny koncentracji złota w obszarze występowania złóż rud miedzi na monoklinie przedsudeckiej. Prace Spec. PTMin, 16, 55-82.
8. Piestrzyński A., Pieczonka J., 2001a: Red-bed gold deposit in the Fore-Sudetic Monocline, SW Poland: some facts and questions. In: Mineral Deposits at the Beginning of the 21st century A. Piestrzyński and et. al. eds. Balkema Publishers 2001, 811-814.
9. Pieczonka J., Piestrzyński A.: 2001b: Złoże złota na monoklinie przedsudeckiej – fakty i hipotezy. Kwart. AGH, Geologia, 27/2-4, 411-434.
10. Piestrzyński A., Pieczonka J., 2001c: Występowanie metali szlachetnych w strefie Redox w utworach dolnego cechsztynu, monoklina przedsudecka. W: Nauki o Ziemi w badaniach podstawowych, złożowych i ochronie środowiska na progu XXI wieku, Jubileusz 50-lecia Wyd. Geol., Geof. i Ochr. Środ., 237-240.
11. Petryka L., Mączka W., Kicki J., 1997: Izotopowa metoda oceny wzbogacalności złota i innych metali szlachetnych. W: Materiały IV Międzynarodowej Konferencji Przeróbki Rud Metali Nieżelaznych, Polanica 20-22.10.1997.
12. Petryka L., Mączka W., Kicki J., Badania odzysku złota i innych metali przy wykorzystaniu metod jądrowych. Prace Specjalne; Polskie Towarzystwo Mineralogiczne Zeszyt 12, 1998.
13. Łuszczkiewicz A., 1999: Ocena flotowalności złotonośnej pozabilansowej rudy miedzi. W: Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Tom 15, Zeszyt Specjalny 1999.
14. Piestrzyński A. i inni, 1996: „Monografia KGHM Polska Miedź SA” CBPM „Cuprum” Wrocław. Lubin 1996.
15. Fiszman M.A., Zelenow W.I., 1967: „Praktika obogaszczeniya rud cwietych i riedkich metalłow” Tom V. Niedra. Moskwa 1967.

Abstract

Results of gravity separation for a sample of tailings from beneficiation of subeconomic copper ore in the grinding circuit at the Polkowice Ore Beneficiation Plant have been presented. The product of gravity separation on a shaking table was used to prepare samples for mineralogical tests. The test shows that grains of gold attain 0.35 mm, while well floatable gold grains should be smaller than 0.05 mm. Therefore, the diameters of gold grains are too large to obtain good recovery of gold in the concentrate from the skimer. In order to obtain better recovery it is necessary to grind the gold ore much finer. Deeper grinding will produce gold grains with diameters adequate for good flotation and secure their better liberation.

Badania zostały sfinansowane częściowo z grantu KBN umowa AGH18.18.140874 oraz pracy statutowej AGH 11.11.100.238