



Ocena wzbogalności flotacyjnej rudy złota

Aldona KRAWCZYKOWSKA¹⁾

¹⁾ Dr inż.; AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Mickiewicza 30, Kraków, Polska; email: aldona.krawczykowska@agh.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki wzbogacania rudy złota. Do badań wykorzystano dwie próbki rudy, znacznie różniące się zawartością tego pierwiastka. Zostały one poddane operacjom przygotowawczym, polegającym głównie na głębokim rozdrobnieniu i klasyfikacji. Porównano wyniki wzbogacania flotacyjnego próbek w dwóch różnych układach wzbogacania: bezpośrednio po rozdrobnieniu oraz po wstępnym wzbogaceniu na stole koncentracyjnym. Flotacja okazała się efektywną metodą wzbogacania badanej rudy, uzyskane koncentraty cechują się wysokimi zawartościami złota, natomiast w odpadach pozostały śladowe jego ilości. Ponadto analiza wyników wykazała, że wprowadzenie wzbogacania grawitacyjnego przed procesem flotacji wpłynęło pozytywnie na jakość flotowanych koncentratów.

Słowa kluczowe: ruda złota, flotacja, wzbogacanie grawitacyjne

Wprowadzenie

Złoto w przeważającej części pochodzi z samodzielnych złóż, w których występuje przede wszystkim w postaci rodzimej. Pozostała część jest pozyskiwana ze złóż innych metali, jako produkt uboczny na różnych etapach ich wzbogacania i przetwarzania. Poza formami rodzimymi złota spotykane są jego podstawnienia w minerałach srebra, połączenia z tellurem, kwarcem lub siarczkami (wtrącenia w pirycie, galenie) (Tomanec, Blagojev, 2016). Ważnym źródłem złota są też porfirowe złoża miedzi (Agorhom i in., 2015).

Charakterystyczne właściwości fizyczne i chemiczne złota pozwalają na jego wydzielenie z nawet bardzo ubogich złóż z dobrym skutkiem. Zwykle wzbogacanie rud złota obejmuje operacje przerobcze takie jak rozdrabnianie, klasyfikację oraz metody fizyczne i fizykochemiczne wzbogacania, które są operacjami przygotowawczymi przed przeróbką hydrometalurgiczną (Łuszczkiewicz, 1999).

Flotacja jest metodą powszechnie stosowaną w przeróbce rud złota. Wybór tej metody determinują m.in. zwykle bardzo drobna mineralizacja rud złota, jak również naturalne właściwości hydrofobowe, a zatem naturalna flotowalność złota rodzimego (Allan, Woodcock, 2011). Złożoność procesu, chęć lepszego zrozumienia zjawisk zachodzących w zawieszynie flotacyjnej, różnorodność czynników wpływających na wyniki flotacji, powodują, że znanych jest wiele badań, mających na celu poprawę efektywności tego procesu.

Wybór technologii wzbogacania zależy od formy występowania, okruszczenia oraz wielkości ziaren w jakich występuje składnik użyteczny. Badania dowodzą, że w każdej niemal rudzie złota przynajmniej część tego metalu występuje w formie, która umożliwia jego odzyskanie na drodze wzbogacania grawita-

cyjnego. Wykorzystanie tych metod jest uzasadnione względami ekonomicznymi, nawet w przypadku odzyskania zaledwie kilku procent z całości metalu (Mączka i in., 2003). Wzbogacanie grawitacyjne stosowane jest w zakładach przeróbki rud złota jako operacja wstępna (przed flotacją) lub kontrolna (po flotacji) dla odzysku tzw. grubego złota, które ze względu na rozmiary ziaren nie flotuje. Również w zakładach gdzie stosowane jest ługowanie złota wzbogacanie grawitacyjne często stanowi operację uzupełniającą.

W niniejszym artykule podjęto się porównania wyników wzbogacania flotacyjnego rudy złota bezpośrednio po jej odpowiednim rozdrobnieniu oraz poprzedzonego operacją separacji na stole koncentracyjnym.

Materiał do badań

Badaniom podlegały dwie próbki rudy złota, wstępnie wzbogacone mechanicznie w miejscu wydobywania. Dostarczone próbki różniły się między sobą przede wszystkim koncentracją złota, dlatego zostały oznaczone jako: próbka nr 1 – bogata ($\alpha_{1Au} = 2442$ p.p.m.) oraz nr 2 – uboga ($\alpha_{2Au} = 283$ p.p.m.).

W ramach wstępnych badań przeprowadzono analizę składu ziarnowego oraz analizę mineralogiczną.

2.1. Analiza składu ziarnowego

Ze względów technologicznych z badanych rud odsiano klasę ziarnową powyżej 0,8 mm, która zakłócała laboratoryjne procesy wzbogacania. Jej udział stanowił w rudzie bogatej i ubogiej w złoto odpowiednio: 3 i 6% całkowitej masy, a zawartość złota, odpowiednio poniżej 0,1 p.p.m. i 638 p.p.m. Analizę granulometryczną nadaw wykonano przy użyciu laserowego analizatora cząstek Analysette 22 firmy Fritsch, a wyniki przedstawiono w postaci krzywych składu ziarnowego (rys. 1).



Rys. 1. Krzywe składu ziarnowego badanych próbek rudy złota po odsianiu klasy > 0,8 mm
 Fig. 1 Particle size composition curves for gold ore samples after removal the size fraction > 0.8 mm

2.2. Badania mineralogiczne

W celu ustalenia składu mineralnego wykorzystano następujące metody: XRD (proszkowa dyfraktometria rentgenowska), FTIR (spektrometria w podczerwieni z transformacją Fouriera) oraz SEM-EDS (skaningowa mikroskopia elektronowa z mikroanalizą chemiczną).

Badania rentgenostrukturalne próbki nr 1 pokazały, iż składa się ona z takich minerałów jak: kwarc, goethyt, skalenie oraz niewielkie ilości minerałów ilastych typu illit.

Próbka nr 2 ma odmienny charakter mineralogiczny i oprócz powszechnego kwarcu składa się z większych ilości minerałów ilastych takich jak illit i kaolinit. Zawiera także pewne ilości goethytu i kalcytu, oraz nieduże ilości rutylu.

2.3. Oznaczenia zawartości złota

Wszystkie analizy zawartości złota wykonano metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej (ASA) na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej.

Podstawą ilościowych oznaczeń metodą ASA jest fakt, że absorpcja promieniowania zależy od liczby wolnych atomów w środowisku absorbującym, a ta liczba zależy od całkowitego stężenia analizowanego pierwiastka w próbce. Absorpcyjna spektrometria atomowa wykazuje wiele zalet, dzięki którym należy do najczęściej stosowanych technik analitycznych. Odnacza się dużą selektywnością i dużą wykrywalnością. Bardzo niskie granice wykrywalności wielu pierwiastków sprawiają, że ASA nadaje się szczególnie do oznaczeń ich śladowych stężeń. Podstawową wadę ASA stanowi konieczność użycia indywidualnej lampy do każdego oznaczanego pierwiastka oraz utrudnione oznaczanie pierwiastków występujących w wysokich stężeniach.

Wyniki oznaczeń złota metodą ASA przedstawiono na schematach jakościowo-ilościowych (rys. 2 i 3).

Próbki do badań rudy bogatej 1 i ubogiej 2, po odsianiu klasy >0,8mm (produkt dolny przesiewacza) zawierały odpowiednio: 2518 i 260 p.p.m. złota.

Metodyka badań

Przedmiotem badań była ocena flotowalności rudy złota. Porównano wyniki wzbogacania flotacyjnego dwóch próbek znacznie różniących się zawartością złota w dwóch układach technologicznych: flotacja bezpośrednio po rozdrobnieniu oraz flotacja koncentratów ze stołu koncentracyjnego po ich selektywnym rozdrobnieniu.

Produkt w klasie (0÷0,8mm) stanowił właściwy materiał do badań. Został on podzielony na reprezentatywne próbki przeznaczone do zaplanowanych doświadczeń. Wydzielono również próbkę rezerwową oraz analityczną, w której określono skład ziarnowy i zawartości złota. Probki do badań rudy bogatej i ubogiej zawierały odpowiednio 2518 p.p.m. i 260 p.p.m. złota. Zawartość złota w początkowych próbkach rud zbilansowano na podstawie wyników próbek produktu górnego i dolnego przesiewania, zgodnie ze wzorem:

$$\gamma_d \cdot Au_d + \gamma_g \cdot Au_g = 100 \% \cdot \alpha_{Au}$$

gdzie:

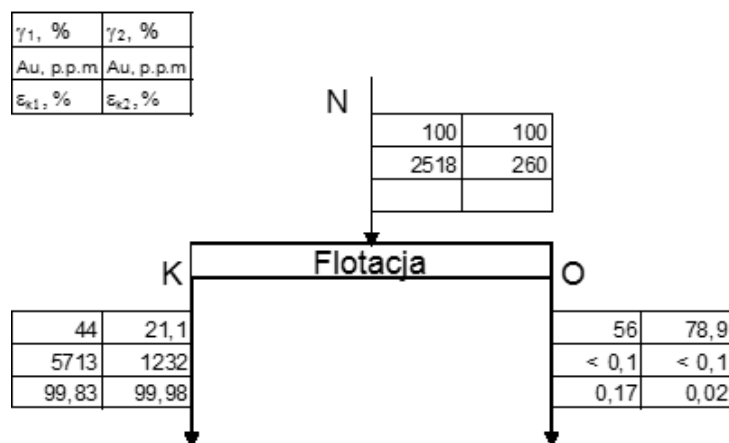
α_{Au} – zawartość złota w dostarczonych próbkach rudy, p.p.m.,

γ_d – udział procentowy produktu dolnego przesiewania (97; 94%),

γ_g – udział procentowy produktu górnego przesiewania (3; 6%),

Au_d – zawartość złota w produkcie dolnym przesiewania (2518; 260 p.p.m.),

Au_g – zawartość złota w produkcie górnym przesiewania (<0,1; 638 p.p.m.).



Rys. 2. Schemat jakościowo-ilościowy flotacji rud złota

Fig. 2 Qualitative and quantitative scheme for flotational beneficiation of gold ore

Zawartość złota w próbce bogatej (1) określono zatem na poziomie 2442 p.p.m. a w próbce ubogiej (2) – 283 p.p.m.

Efekty wzbogacania rud oceniano wskaźnikami jakościowymi i ilościowymi procesów. Analizowano zawartości złota Au, udziały procentowe γ produktów (wychody), oraz uzyski złota ε w poszczególnych produktach wzbogacania. Wyniki analiz i obliczeń przedstawiono na schematach ilościowo-jakościowych dla poszczególnych operacji wzbogacania (rys. 2 i 3).

Przyjęte oznaczenia:

Au – zawartość złota w poszczególnych produktach, p.p.m.,

γ – udział procentowy danego produktu z poszczególnych operacji wzbogacania,

$\varepsilon = \gamma \cdot (\text{zawartość Au w produkcie}) / (\text{zawartość Au w nadawie})$ – uzysk złota w danym produkcie, %.

3.1. Badania flotacyjne

Wyniki analiz granulometrycznych rud złota (rys. 1) wykazały, że prawie zupełnie pozbawione były ziaren bardzo drobnych ($< 71 \mu\text{m}$), niezbędnych do procesu flotacji. Próbkę rud poddano więc mieleniu do optymalnego uziarnienia. W trakcie mielenia zaobserwowano dla rudy bogatej istotne wydłużenie czasu jego trwania, szczególnie w końcowym etapie selektywnego domielania, co wskazuje na mniejszą jej podatność na mielenie w stosunku do rudy ubogiej. Odmienność tych rud potwierdziły także badania mineralogiczne. Produktem mielenia był materiał o uziarnieniu poniżej $71 \mu\text{m}$, gdzie wartość $d_{90} < 50 \mu\text{m}$.

Testy flotacyjne prowadzono w standardowej laboratoryjnej maszynie flotacyjnej z komorą o pojemności 1 dm^3 . Koncentracja objętościowa części stałych wynosiła $\beta = 400 \text{ g/dm}^3$.

Rudę wraz z wodą mieszano w komorze flotacyjnej przez 30 minut bez dostępu powietrza, w celu dokładnego zwilżenia materiału. Następnie dozowano odczynniki flotacyjne oraz regulator kwasowości, stale kontrolując pH mętów. Czas agitacji odczynników flotacyjnych wynosił 5 minut. Po tym czasie następował właściwy proces flotacji trwający 15 minut.

Wybór odczynników flotacyjnych wykorzystanych w badaniach poprzedzony był szerokim przeglądem literatury w tematyce flotacji rud złota (Łuszczkiewicz, 1999; Teague i in., 1999; Chrysosoulis, Dimov, 2004; Dunne, 2005). Ponadto praktyka przemysłowa wskazuje, że stosowane do wzbogacania siarczkowych rud miedzi ksantogeniany skutecznie wzbogacają minerały złota, które przechodzą do koncentratu miedziowego.

Jako odczynnik zbierający zastosowano więc mieszaninę ksantogenianów sodowych: etylowego i izobutyloвого ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OCSSNa}$ i $\text{C}_4\text{H}_9\text{OCSSNa}$), które należą do tiolowych odczynników flotacyjnych w ilości 100 g/Mg rudy, natomiast odczynnikiem pianotwórczym był NASFROTH 245B – w ilości 40 g/Mg rudy. W celu regulacji pH dodawano kwas chlorowodorowy HCl, w takiej ilości, aby początkowy zasadowy odczyn zawiesiny obniżyć z pH 7,6–8 do pH pomiędzy 5 a 6.

Z otrzymanych produktów: koncentratów i odpadów, po wysuszeniu pobrano próbki do analiz na zawartość złota. Na schemacie (rys. 2) przedstawiono wyniki wzbogacania dla rudy nr 1 i 2.

Realizując powyższy schemat wzbogacania – na podstawie rzeczywistych wyników – otrzymano z rudy bogatej (1) 44,0% koncentratu (wychód γ_1), w którym zawartość złota wynosiła 5713 p.p.m. Do koncentratu przeszło zatem niemal 100% złota zawartego w nadawie. Jednocześnie otrzymano 56,0% odpadów, w których zawartość złota wynosiła poniżej 0,1 p.p.m. Do pro-

duktu odpadowego przeszła więc śladowa ilość złota zawarta w nadawie.

Dla rudy ubogiej (2) wyniki były następujące: otrzymano 21,1% koncentratu (wychód γ_2), w którym zawartość złota wynosiła 0,1232 p.p.m. Jednocześnie otrzymano 78,9% odpadów, w których zawartość złota wynosiła poniżej 0,1 p.p.m.

Analiza wyników badań flotacyjnych wykazała, że metoda ta jest bardzo skuteczna. W odpadach obu rud wykryto zaledwie śladowe ilości złota ($< 0,1$ p.p.m.). Jednak selektywność koncentratów była dość niska.

Aby dobrać optymalne parametry prowadzenia procesu flotacji należałoby wykonać próby dla różnych warunków i zbadać ich wpływ na wyniki końcowe, zmieniając np. czas flotacji, ilość i rodzaj odczynników flotacyjnych, gęstość mętów flotacyjnych, pH mętów flotacyjnych, skład ziarnowy nadawy. Z całą pewnością jakość koncentratów można by poprawić wprowadzając do układu flotację czyszczącą.

3.2. Badania w układzie technologicznym stół koncentracyjny – flotacja

Kolejny etap doświadczeń miał na celu ocenę wpływu wprowadzenia wzbogacania grawitacyjnego do układu. Przegląd światowych rozwiązań w temacie wzbogacania rud złota wyraźnie wskazuje, że jest to częsta praktyka. Niemal każda kopalnia złota w Australii w układzie technologicznym ma odzysk grawitacyjny w układzie rozdrabniania.

W wielu publikacjach autorzy szczegółowo omawiają korzyści, płynące z zastosowania wzbogacania grawitacyjnego na różnych etapach procesu wzbogacania złota, zarówno przed procesem flotacji czy też ługowania, jak również do wydzielenia grubiej uziarnionych minerałów złota zawartych w odpadach po przetwarzaniu chemicznym. Wśród metod wzbogacania grawitacyjnego wymienia się tradycyjne osadzarki, stoły koncentracyjne, stożki Reicherta, spirale, ale również urządzenia wykorzystujące pole działania siły odśrodkowej, jak: wzbogacalniki Falcona czy Knelsona, bądź też osadzarki Kelsey'a (Laplante, Gray, 2005; Tufan i in. 2011; Önel, Tanriverdi, 2016)

Separację grawitacyjną wykonano na stole koncentracyjnym typu Wilfley o powierzchni rowkowanej (I etap) oraz gładkiej (II etap) w układzie dwustopniowego wzbogacania. Pole powierzchni roboczej stołu wynosiło 0,45 m². Parametrami regulowanymi były: kąt nachylenia płyty stołu oraz ilość wody splukującej. Koncentraty ze stołu poddano selektywnemu mieleniu w celu uzyskania uziarnienia odpowiedniego do flotacji ($< 71\mu\text{m}$, $d_{90} < 50\mu\text{m}$).

Parametry flotacji tak przygotowanych koncentratów grawitacyjnych były takie same jak w przypadku głównych flotacji rud złota. Schemat tych badań oraz wyniki ilościowo-jakościowe przedstawiono na rys. 3.

Analizując wyniki wzbogacania osiągnięte na stole koncentracyjnym, należy stwierdzić, że metoda ta daje wyższe koncentracje złota niż sama flotacja. Zawartość złota w koncentraty rudy bogatej i ubogiej wynosi odpowiednio 14873 p.p.m. i 2297 p.p.m., natomiast do odpadów przeszło odpowiednio 27 i 130 p.p.m. Stąd też uzyskiwane w koncentraty są niższe niż te osiągnięte w procesie flotacji.

Realizując powyższy schemat wzbogacania – na podstawie rzeczywistych wyników – otrzymano z rudy bogatej 10,5% koncentratu (wychód γ_1), w którym zawartość złota wynosiła 22559 p.p.m, przy uzysku w koncentracji $\varepsilon = 96,2\%$ złota zawartego w nadawie. Jednocześnie otrzymano 5,9% odpadów flotacyjnych i 83,6% odpadów ze stołu koncentracyjnego, w których zawartość złota wynosiła odpowiednio: 1194 i 27 p.p.m. Do produktów odpadowych przeszło odpowiednio 2,9% i 0,9% złota zawartego w nadawie.

Dla rudy ubogiej wyniki były następujące: otrzymano 2,2% koncentratu (γ_2), w którym zawartość złota wynosiła 7516 p.p.m. Jednocześnie otrzymano 5% odpadów flotacyjnych i 92,8% odpadów ze stołu koncentracyjnego, w których zawartość złota wynosiła odpowiednio poniżej 0,1 i 130 p.p.m.

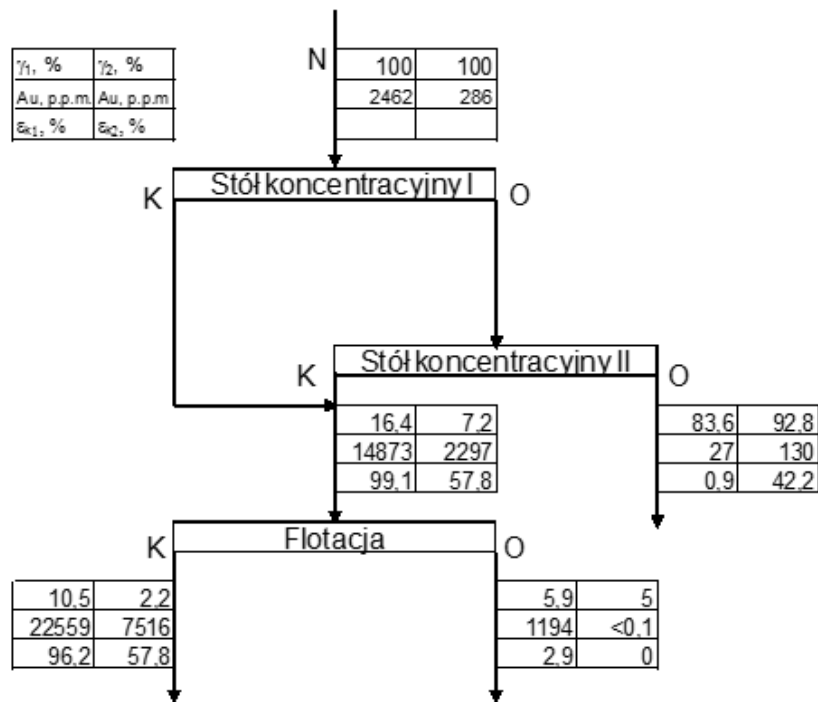
Analizując wyniki wzbogacania uzyskane w układzie technologicznym stół koncentracyjny – flotacja, jednoznacznie należy stwierdzić, że jest to sposób pozyskiwania bardzo selektywnych, bogatych koncentratów złota. W ostatecznych koncentraty osiągnięto najwyższe zawartości złota: 22559 p.p.m. dla rudy bogatej i 7516 p.p.m. dla rudy ubogiej, przy niewielkich ilościach koncentratów końcowych, odpowiednio 10,5% i 2,2%. Jedynie straty złota w odpadach dla rudy bogatej są zbyt duże. Aby je zminimalizować należałoby wykonać badania optymalizujące parametry tej flotacji.

Wnioski

W niniejszym artykule podjęto się oceny wzbogalności flotacyjnej rudy złota w dwu różnych układach technologicznych. Z przeprowadzonych badań wynika, że zarówno sama flotacja jak i flotacja poprzedzona separacją grawitacyjną przyniosły pozytywny efekt w procesie wzbogacania badanej rudy.

- Proces flotacji okazał się efektywną metodą wzbogacania. Uzyskane koncentraty cechują się wysokimi zawartościami złota, natomiast w odpadach pozostały śladowe jego ilości.

- Układ technologiczny stół koncentracyjny – flotacja pozwolił osiągnąć najwyższy stopień wzbogacania spośród wszystkich badanych metod. Okazał się najlepszą metodą wzbogacania rudy ubogiej, dla której uzyskano korzystne wyniki zarówno w koncentracji jak i odpadach. W rudzie bogatej natomiast układ ten generował istotne straty złota w odpadach, przy



Rys. 3. Schemat technologiczny wzbogacania rud złota w układzie technologicznym stół koncentracynowy – flotacja
 Fig. 3 The qualitative and quantitative scheme of gold ore beneficiation in the circuit: shaking table-flotation

intensywnym wzbogaceniu koncentratu. Wprowadzenie operacji wzbogacania grawitacyjnego do układu, w którym główną operacją jest flotacja jest uzasadnione z punktu widzenia jakości koncentratów.

- Wykonane badania miały charakter badań wstępnych. W celu określenia warunków optymalnych należałoby przeprowadzić badania dla szerokich zmian

warunków przebiegu operacji, takich jak m.in.: uziarnienie, koncentracja objętościowa części stałych nadawy, rodzaj odczynników flotacyjnych i ich ilość, czas flotacji.

- W celu poprawy jakości koncentratów flotacyjnych należałoby do zaproponowanego układu technologicznego włączyć flotację czyszczącą.

Literatura – References

1. AGORHOM E.A., LEM J.P., SKINNER W., ZANIN M.: Challenges and opportunities in the recovery/rejection of trace elements in copper flotation – a review. *Minerals Engineering*. Vol. 78, (2015): 45–47.
2. ALLAN G.C., WOODCOCK J.T.: A review of the flotation of native gold and electrum. *Minerals Engineering*. Vol. 14, No. 9 (2001): 931–962.
3. CHRYSSOULIS S.L., DIMOV S.S.: Optimized conditions for selective gold flotation by ToF-SIMS and ToF-LIMS. *Applied Surface Science*, No. 231–232 (2004): 265–268.
4. DUNNE R.: Flotation of gold and gold-bearing ores. *Developments in Mineral Processing*, Ed. Adams M.D., Vol. 15, Chapter 13, in *Advances in Gold Ore Processing*, (2005): 309–344.
5. LAPLANTE A., GRAY S.: Advances in gravity gold technology. *Developments in Mineral Processing*, Ed. Adams M.D., Vol. 15, Chapter 13, in *Advances in Gold Ore Processing*, (2005): 280–308.
6. ŁUSZCZKIEWICZ A.: Ocena flotowalności złotoonośnej pozabilansowej rudy miedzi. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, tom 155, Zeszyt Specjalny (1999): 197–209.
7. MĄCZKA W., PIESTRZYŃSKI A., PIECZONKA J.: Wzbogacanie grawitacyjne złota występującego w łupku czerwonym. *Inżynieria Mineralna – Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, No S. 3, (2003): 141–149
8. ÖNEL Ö., TANRIVERDI M.: The Use of Falcon Concentrator to Determine the Gravity Recoverable Gold (GRG) Content in Gold Ores. *Inżynieria Mineralna – Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, No 1(37), (2016): 189–194.
9. TEAGUE A.J., VAN DEVENTER J.S.J., SWAMINATHAN C.: A conceptual model for gold flotation. *Minerals Engineering*, Vol. 12, No. 9, (1999): 1001–1019.
10. TOMANEC R., BLAGOJEV M., 2016 – Concentration of Gold From Small Deposits in Serbia. *Inżynieria Mineralna – Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, No 1(37), (2016): 87–92.
11. TUFAN B., KAYA E., OYMAN T., SAYN Z.E., BATAR T.: Flowsheet assessment to recover more gold. *The Journal of Ore Dressing*, Vol. 13, No. 26, (2011): 5–14.

Assesment of the Gold Ore Floatability

The article presents the results of gold ore beneficiation process. Two samples of ore, significantly differed in terms of gold content, were utilized for investigations. Samples were subjected the preparatory operations, consisting of fine comminution and classification. There were compared the results of flotational beneficiation obtained in two different processing circuits: directly after grinding and after pre-concentration operation with using the shaking table. The flotation operation has proven to be an effective method of concentration for this type of ore, the obtained concentrates were of a high gold grade, while the gold contents in tails were very low. In addition, the analysis of the results showed that application of gravity concentration prior to flotation process positively influenced the quality of flotation concentrates.

Keywords: gold ore, flotation, gravity separation