

# Empleo de electrodos de pasta de carbono (CPE) para evaluar las interacciones entre un mineral de galena y los reactivos típicos del proceso de flotación

Employing of carbon paste electrodes (CPE) to evaluate the interactions between a galena mineral and typical reagents of flotation process

J. Germán-Landa, G. Urbano-Reyes, V. E. Reyes-Cruz, J. A. Cobos Murcia  
J. C. Juárez-Tapia, M. Reyes-Pérez

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

## Abstract:

An analysis is presented to evaluate the interactions of the galena mineral (PbS) and the typical reagents of the flotation process, using carbon paste electrodes (CPE) and electrochemical techniques. Comparative studies of voltammetry and resting potential variation were performed to evaluate the interactions between galena and sodium n-isopropyl xanthate (NaIPX), with and without prior conditioning. Tests with the blank solution (without xanthate) and the blank electrode (CPE-without mineral) were used to analyze the adsorption of xanthate and the reaction mechanisms between the species, at different pH. Analysis determined that xanthate adsorption occurs at potentials between -0.25 and 0.05 V, while flotation is favored at potentials between -0.05 to 0.05 V, due to the resting potential is close to the potential for the formation of  $Pb(X)_2$ ,  $S^0$  or  $X_2$ . Preconditioning of galena mineral surface with depressants, limits the kinetics of the xanthate adsorption process and the formation of hydrophobic species.

## Keywords:

Flotation, sulfide minerals, galena, xanthate adsorption, electrochemical oxidation.

## Resumen:

Se presenta un análisis para evaluar las interacciones del mineral de galena (PbS) y los reactivos típicos del proceso de flotación, usando electrodos de pasta de carbono (CPE) y técnicas electroquímicas. Se realizaron estudios comparativos de voltametría y variación del potencial de reposo para evaluar las interacciones entre la galena y n-isopropil xantato de sodio (NaIPX), con y sin acondicionamiento previo. Las pruebas con la solución en blanco (sin xantato) y electrodo en blanco (CPE-sin mineral) se utilizaron para analizar la adsorción del xantato y los mecanismos de reacción entre las especies, a diferente pH. El análisis determinó que la adsorción de xantato ocurre a potenciales entre -0.25 y 0.05 V, mientras que la flotación se ve favorecida en potenciales entre -0.05 a 0.05 V, debido a la cercanía entre el potencial de reposo y el potencial de formación de  $Pb(X)_2$ ,  $S^0$  o  $X_2$ . El acondicionamiento previo de la superficie mineral de galena con depresores, limita la cinética del proceso de adsorción de xantato y la formación de especies hidrófobas.

## Palabras Clave:

Flotación, minerales de sulfuro, galena, adsorción de xantato, oxidación electroquímica.

## 1. Introducción

La galena (PbS) es uno de los minerales de sulfuro más importantes para la extracción de plomo, por lo que se han

desarrollado varias investigaciones para maximizar la eficiencia de los procesos de extracción. Esto debido a que, en la naturaleza este mineral está asociado generalmente con mezclas complejas en los depósitos de sulfuros polimetálicos (Pb-Cu-Zn). Una de

Autor para la correspondencia: [gustavo\\_urbano@uaeh.edu.mx](mailto:gustavo_urbano@uaeh.edu.mx)

Correos electrónicos: [josegermanlanda0497@gmail.com](mailto:josegermanlanda0497@gmail.com) (J. Germán-Landa), [gustavo\\_urbano@uaeh.edu.mx](mailto:gustavo_urbano@uaeh.edu.mx) (G. Urbano-Reyes), [reyescruz16@yahoo.com.mx](mailto:reyescruz16@yahoo.com.mx) (V. E. Reyes-Cruz), [jose\\_cobos@uaeh.edu.mx](mailto:jose_cobos@uaeh.edu.mx) (J. A. Cobos Murcia), [jcjuarez@uaeh.edu.mx](mailto:jcjuarez@uaeh.edu.mx) (J. C. Juárez-Tapia), [mreyes@uaeh.edu.mx](mailto:mreyes@uaeh.edu.mx) (M. Reyes-Pérez).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5461-4030> (G. Urbano-Reyes), <https://orcid.org/0000-0003-2984-850X> (V. E. Reyes-Cruz), <https://orcid.org/0000-0002-9946-5785> (J. A. Cobos Murcia), <https://orcid.org/0000-0001-7058-1670> (J. C. Juárez-Tapia), <https://orcid.org/0000-0003-3843-2397> (M. Reyes-Pérez).

Fecha de recepción: 29/06/2020, Fecha de aceptación: 22/08/2020, Fecha de publicación: 05/10/2020

<https://doi.org/10.29057/aactm.v7i7.6190>



las técnicas más utilizadas para separar y concentrar minerales de sulfuro es el proceso de flotación [1]. Sin embargo, la eficiencia de la flotación de los sulfuros polimetálicos (Pb/Cu/Zn) depende en gran medida del tipo de interacciones entre las fases en la superficie del mineral y los reactivos químicos utilizadas para el acondicionamiento. En donde el pH operativo del medio acuoso y el potencial interfacial afectan fuertemente el proceso [2-3]. El xantato es uno de los colectores más comúnmente utilizados para la flotación de minerales de sulfuro, mientras que el SO<sub>2</sub> y algunos polisacáridos (como la dextrina y almidón) se utilizan como depresores del mineral PbS [4-9]. También se utiliza bisulfito de amonio (NH<sub>4</sub>HSO<sub>3</sub>) como depresor del PbS para la separación selectiva con los sulfuros polimetálicos (Pb/Cu/Zn), debido a que disminuye la adsorción del xantato sobre la superficie del mineral [10, 11].

La combinación de técnicas electroquímicas y espectroscópicas proporciona un enfoque útil para dilucidar los mecanismos de interacción entre los reactivos orgánicos y la superficie mineral [5, 11]. Se han realizado varios estudios sobre la flotación del sistema galena-xantato (PbS-X). Algunos autores informan que las interacciones tienen lugar a través de una serie de procesos electroquímicos, que involucran la oxidación del xantato y su posterior adsorción en la superficie de la galena [10, 12-13], dixantógeno, (X)<sub>2</sub>, como producto de oxidación [14] y productos de plomo xantato (Pb(X)<sub>2</sub>) [15-17]. Otros autores estimaron que los productos de la superficie consisten en una película mixta de dixantógeno y xantato de plomo; siendo estas especies las responsables de aumentar la hidrofobicidad de la superficie mineral, lo que mejora la flotación [16, 19-20]. La formación de dixantógeno y xantato de plomo ha sido confirmada por varias técnicas espectroscópicas, como XPS, Microscopía de Fuerza Atómica (AFM), FTIR y ATR / FTIR [1, 16, 21-22]; así como por técnicas electroquímicas [11]. Finalmente, algunos autores informaron que estas especies pueden reaccionar con el medio acuoso para producir hidróxidos de plomo, Pb(OH)<sub>2</sub> [15, 16].

Hoy en día, las técnicas electroquímicas se han convertido en una de las herramientas más poderosas para estudiar las interacciones entre las fases en la superficie del mineral y las diferentes especies químicas en el proceso de flotación de los minerales de sulfuro [1, 11]. Sin embargo, el uso de estas técnicas, requiere de una buena conductividad eléctrica. La mayoría de los minerales de sulfuro tienen su característica de semiconductividad y algunos no presentan esta propiedad [23]. En el caso de los electrodos sólidos de sulfuros minerales, que se han utilizados tradicionalmente para evaluar los procesos de flotación, se presentan algunos problemas como el efecto de percolación sobre la conductividad del electrodo que provoca una caída de potencial debido a cambios en la resistencia de corriente (IR) en la interfaz; así como baja reproducibilidad y baja sensibilidad. En este caso, con el uso de electrodos de pasta de carbono (CPE) estos efectos disminuyen [23], permitiendo la aplicación de las técnicas electroquímicas para analizar las interacciones entre un mineral de galena y los reactivos típicos

del proceso de flotación, lo cual hasta el momento no se ha reportado en la literatura.

Por lo tanto, el enfoque de este trabajo fue evaluar las interacciones entre un mineral de galena y los reactivos típicos del proceso de flotación (almidón cáustico, bisulfito de amonio/39% en peso de SO<sub>2</sub> y xantato isopropílico de sodio) en solución, empleando electrodos de pasta de carbono para verificar la viabilidad de la técnica. El análisis incluyó voltametría cíclica y mediciones de potencial de reposo a circuito abierto (OCP). Se discutieron el tipo y el alcance de la adsorción de xantato, los efectos de especies en solución y el efecto del acondicionamiento previo aplicado a la superficie del mineral de galena, sobre su flotabilidad.

## 2. Desarrollo experimental

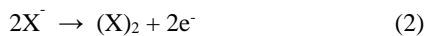
Se recolectaron y seleccionaron muestras de galena con una pureza de 98.6% en peso del distrito minero de Charcas, ubicado en San Luis Potosí (México). Estas muestras se molieron en un mortero de ágata y se tamizaron a <74 μm (tamaño de malla -200). Se utilizó una celda electroquímica típica de tres electrodos a temperatura ambiente, usando una varilla de grafito sólido como electrodo auxiliar, un electrodo de calomel saturado (SCE) como electrodo de referencia y un electrodo de pasta de carbono (CPE) como electrodo de trabajo en todos los experimentos. El electrodo de trabajo (CPE) se elaboró utilizando el polvo del mineral de galena obtenido (malla -200), grafito con un tamaño de partícula de 2 a 15 μm con un 99,9995% de pureza (Alfa-Aesar™) y aceite de silicón utilizado como agente aglutinante que tiene una densidad de 0,963 g/ml (viscosidad de 200 cSt a 25 °C). Todos los valores potenciales se informaron con respecto al electrodo de hidrógeno estándar (SHE, E = SCE + 0.245 V). El área expuesta del electrodo de trabajo fue de 0.1 cm<sup>2</sup>, produciéndose una superficie renovada antes de cada experimento extrayendo 1 cm de la pasta y nivelando la superficie con papel de lija (1200 #).

La solución de electrolito de soporte fue 1 × 10<sup>-3</sup> mol / L KCl; esta concentración se eligió para evitar la interferencia de las reacciones electroquímicas del mineral y la complejación de los iones metálicos (es decir, Pb). La concentración de xantato acuoso fue de 1 × 10<sup>-3</sup> mol / l, que se agregó como xantato isopropílico de sodio (NaIPX) a diferentes valores de pH (6, 8 y 10). Esto también se usó en un estudio previo [16] para obtener una respuesta electroquímica detectable, que no afecta a las especies de xantato adsorbidas en minerales de sulfuro [11]. Aunque esta concentración de xantato era más alta que la utilizada en la práctica, era necesario obtener una respuesta electroquímica detectable. En este sentido, Chernyshova [16] demostró que las especies de xantato adsorbidas en minerales de sulfuro eran independientes de la concentración de xantato mediante análisis de espectroscopia infrarroja de reflexión total atenuada (ATR-IR). La superficie mineral (electrodo de trabajo) se acondicionó sumergiendo el electrodo durante 40 minutos en

una solución de una mezcla de bisulfito de amonio/39% en peso de SO<sub>2</sub> (Separcon®) y 42 mg / l de almidón cáustico, en lo sucesivo denominado método de acondicionamiento 1. Todas las soluciones utilizadas se prepararon utilizando agua desionizada. Los estudios electroquímicos se realizaron utilizando un potenciostato/galvanostato PAR 263A controlado por el software PowerSuit®.

### 3. Resultados y Discusión

La Fig. 1 muestra las respuestas voltamétricas obtenidas para el electrodo de galena en (i) 1 × 10<sup>-3</sup> mol/L de xantato y 1 × 10<sup>-3</sup> mol/L KCl, (ii) en la solución en blanco (1 × 10<sup>-3</sup> mol/L KCl) y (iii) método de acondicionamiento 1 (que actúan como agentes modificadores de superficie y como depresor de galena) en 1 × 10<sup>-3</sup> mol/L de xantato y 1 × 10<sup>-3</sup> mol/L KCl. El voltamperograma (iv) muestra la respuesta voltamétrica típica del electrodo CPE en blanco (grafito en polvo con aglutinante sin mineral de galena) en la solución en blanco (1 × 10<sup>-3</sup> mol/L KCl), con fines comparativos. La exploración se inició desde el potencial de circuito abierto (OCP) en dirección positiva a una velocidad de barrido de 10 mV • s<sup>-1</sup>. La curva (i) a pH 6, 8 y 10 muestra un primer proceso de oxidación (O1), que comienza desde el OCP (E = -0.156 V, -0.246 V y -0.236 V, respectivamente) y termina en ~ 0.05 V. De acuerdo con la literatura, es muy probable que este proceso corresponda a la oxidación y adsorción de xantato por la reacción 1 [11-12], lo cual se apoya también debido a la ausencia de este proceso en los voltamperogramas con la solución en blanco (ii) y el electrodo en blanco (iv).



Además, es probable que se forme algo de dixantógeno (X)<sub>2</sub>, en la superficie de la galena por la reacción 2 [14], debido a su proximidad al potencial reversible (potencial de reposo) para el par X/X<sub>2</sub> [16, 17], ver Figura 2. En esta figura (Fig. 2) se observa que el potencial de reposo (OCP) para los 3 valores de pH (6, 8 y 10), se encuentran dentro de un rango entre -0.1 y 0.05 V, y es donde el proceso de oxidación O1 (Fig. 1) alcanza sus valores máximos de corriente. Además, se observa que cuando el OCP tiende a estabilizarse a valores cercanos a 0.0 V en los diferentes valores de pH, existe cierta relación con los valores máximos de corriente del proceso de oxidación O1, lo cual puede tener relación con su flotabilidad del mineral.

Por otra parte a potenciales entre ~ 0.05 V y ~ 0.1 V, la corriente aumenta muy poco (Figura 1, curva i); sin embargo, Toperi y Tolun [19] consideraron esta zona como de mayor contacto de burbuja debido a la formación de Pb(X)<sub>2</sub> y S<sup>0</sup>, dando como resultado un aumento de la flotabilidad [20]. Por lo tanto, es probable que el Pb(X)<sub>2</sub> y S<sup>0</sup> se formen por precipitación química

de acuerdo a la reacción 3 [16, 25] y, en menor contribución por la reacción electroquímica 4 [13-14, 16-17, 25].

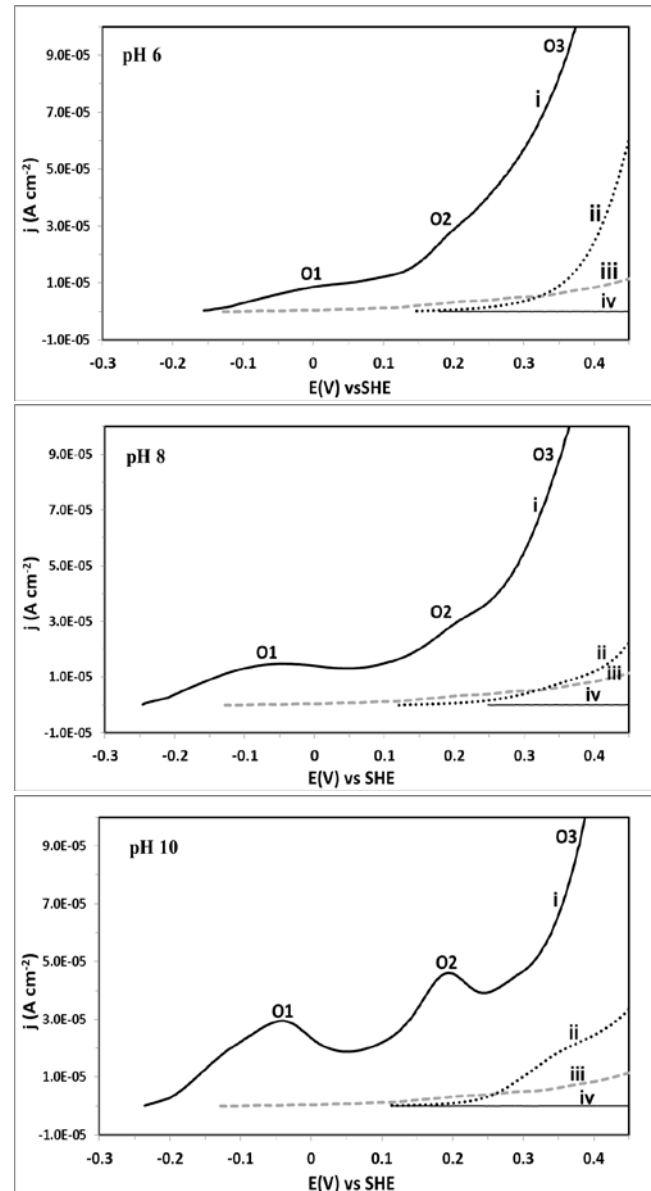
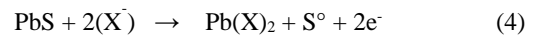
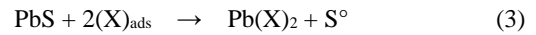


Figure 1. Ramificación anódica de los voltamperogramas obtenidos para un electrodo CPE de PbS en soluciones de: (i) KCl 0.001 M y NaIPX 0.001 M, (ii) solución en blanco de KCl 0.001 M, (iii) acondicionamiento 1 en KCl 0.001 M y NaIPX 0.001 M, y (iv) CPE en blanco en la solución en blanco (KCl 0.001 M), en dirección positiva a 10 mV s<sup>-1</sup> a pH 6, 8 y 10.

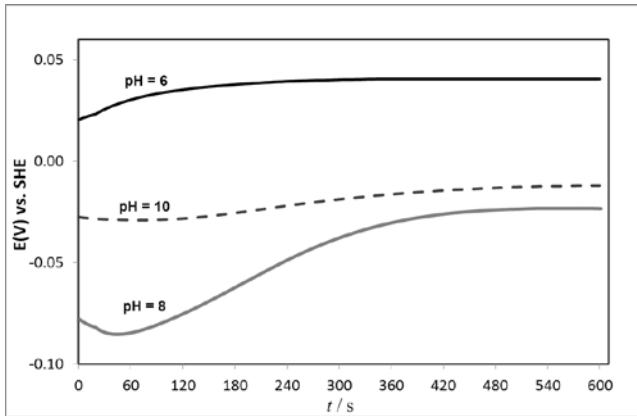
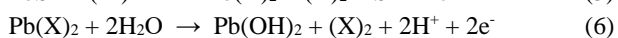
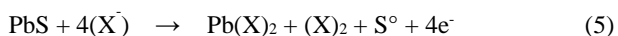


Figure 2. Variación del potencial de reposo (OCP) del electrodo CPE de galena en función del tiempo, en solución con  $1 \times 10^{-3}$  mol/L de xantato.

A potenciales más positivos (por encima de 0,1 V y hasta aproximadamente 2.5 V), la curva (i) a pH 6, 8 y 10 muestra la presencia de un proceso de oxidación, O2, con un aumento de la corriente. En estos potenciales, el xantato continúa reaccionando con la superficie de la galena para formar más cantidad de  $Pb(X)_2$  y una rica capa de azufre elemental ( $S^0$ ), mediante la reacción 4. Esto como resultado de la descomposición oxidativa de galena a +0.1 V, como se ha observado en la oxidación de la galena en ausencia de xantato [22, 23].

Posteriormente, se observó un proceso de oxidación O3 (por encima de 0.25 V), con un aumento importante de la corriente, donde (de acuerdo a algunos autores) ocurre la formación de xantato de plomo, dixantógeno y azufre, mediante la reacción 5 [16]. Sin embargo, se ha reportado también que por arriba de potenciales de +0.3 V el xantato de plomo reacciona con el medio causando su descomposición y la síntesis de hidróxido de plomo, y  $(X)_2$ , mediante la reacción 6 [15-16]; lo cual también reduciría su flotabilidad.



Por otra parte, una comparación de la curva i, ii y iii (Figura 1) a pH 6, 8 y 10, revela que cuando el mineral de galena se encuentra en un medio acuoso en presencia de especies orgánicas (xantato, separcon® y almidón), el OCP se desplaza a potenciales más negativos. Este hecho es atribuido a la adsorción e interacción de la superficie del mineral de galena con estas especies. Además, cuando el mineral de galena se acondicionó previamente con el método de acondicionamiento 1 a pH 6, 8 y 10, los procesos de oxidación O1, O2 y O3, no se observaron. Esto se atribuye a que la superficie del mineral de galena se modifica debido a la presencia de los reactivos (Separcon® y almidón) que impiden la libre adsorción de xantato y la oxidación de la superficie de la galena para la formación de dixantógeno ( $X_2$ ),  $Pb(X)_2$  o  $S^0$ . Es decir, la

presencia de estos reactivos (Separcon® o almidón cáustico) limita la cinética del proceso de adsorción y oxidación del xantato sobre la superficie de la galena, principalmente debido a la competencia entre estas especies por la superficie mineral, que dan origen a una superficie más hidrófila. Esto implicaría que no se produzcan las reacciones 1-5, las cuales son promotoras de la flotabilidad de la galena y por lo tanto, se genere un contacto débil de burbuja y una baja flotabilidad. Asimismo, se ha reportado en la literatura [26] que la galena responde bien a la flotación con colectores de tiol en un amplio rango de pH. Esto puede observarse también con el pico de oxidación O1 (Figura 1, curva i) donde ocurre la adsorción del ion xantato por quimisorción [17] y la proximidad que tiene el potencial de reposo (Figura 2) a pH 6, 8 y 10, para la formación de  $Pb(X)_2$  y  $S^0$ .

Finalmente, los resultados de este estudio permitieron determinar que el uso de electrodos de pasta de carbono (CPE), se puede implementar como una alternativa viable para hacer pruebas rápidas bajo distintas condiciones y con los diferentes reactivos de flotación. Esto con la finalidad de analizar y evaluar la flotabilidad de los minerales sulfurados, sobre todo cuando estos tienen una baja conductividad.

## Conclusiones

Los resultados permitieron demostrar que es posible analizar y evaluar las interacciones entre el mineral de galena y los reactivos típicos del proceso de flotación, empleando electrodos de pasta de carbono (CPE) bajo diferentes esquemas del proceso de flotación. Un análisis detallado de las interacciones entre la galena y los diferentes reactivos en solución, muestra que la mayor adsorción del xantato ocurre a potenciales entre -0.25 y 0.05 V. Mientras que la flotación de la galena se ve favorecida en una región de potenciales entre -0.05 V a +0.05 V en los diferentes valores de pH (6, 8, 10), debido a la proximidad que tiene el potencial de reposo con el potencial de formación de  $Pb(X)_2$ ,  $S^0$  o  $X_2$ . Finalmente, con el estudio se pudo determinar que el acondicionamiento previo de la superficie mineral de galena con Separcon® y almidón caustico limita la cinética del proceso de adsorción y oxidación del xantato sobre la superficie de la galena, lo que evitaría su flotabilidad.

## Agradecimientos

Los autores externan su gratitud a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por las facilidades otorgadas para el desarrollo de la presente investigación.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

## Referencias

[1] Fuerstenau DW. Advances in Flotation Technology, Society for Mining Metallurgy & Exploration, Englewood, Colorado, 1999; p. 3.

- [2] Buckley AN, Hope GA, and Woods R. Solid-Liquid Interfaces, Ed. by K. Wandelt and S. Thurgate, Topics Appl. Phys. 2003; 85: 61-66.
- [3] Fuerstenau M C, Jameson G J, Yoon RH. Froth flotation: a century of innovation. SME, Littleton, Colorado, 2007; p. 6.
- [4] Bolin N J, and Laskowski J S. Polysaccharides in flotation of sulphides. Part II. Copper/lead separation with dextrin and sodium hydroxide, International Journal of Mineral Processing. 1991; 33(1-4): 235-241.
- [5] Chander S, Khan A. Effect of sulfur dioxide on flotation of chalcopyrite, International Journal of Mineral Processing 2000; 58(1-4): 45-55.
- [6] Qi L, Yahui Z. Effect of calcium ions and citric acid on the flotation separation of chalcopyrite from galena using dextrin, Minerals Engineering 2000; 13(13): 1405-1416.
- [7] Raju G, Holmgren A, Forsling W. Adsorption of dextrin at mineral/water interface, Journal of Colloid and Interface Science, 1997; 193(2): 215-222.
- [8] Rath RK, Subramanian S. Adsorption, electrokinetic and differential flotation studies on sphalerite and galena using dextrin. International Journal of Mineral Processing 1999; 57(4): 265-283
- [9] Drzymala J, Kapusniak J, Tomasiak P. Removal of lead minerals from copper industrial flotation concentrates by xanthate flotation in the presence of dextrin, International Journal of Mineral Processing 2003; 70(1-4): 147-155.
- [10] Grano SR, Prestidge CA, Ralston J. Sulphite modification of galena surfaces and its effect on flotation and xanthate adsorption. International Journal of Mineral Processing, 1997; 52(1): 1-29.
- [11] Urbano G, Lázaro I, Rodríguez I, Reyes JL, Larios R, Cruz R. Electrochemical and spectroscopic study of interfacial interactions between chalcopyrite and typical flotation process reagents. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2016; 23(2): 127-136.
- [12] Richardson P. E, O'Dell C S. Semiconducting Characteristics of Galena Electrodes Relationship to Mineral Flotation, J. Electrochem. Soc. 1985; 132(6): 1350.
- [13] Woods R. Modern Aspects of Electrochemistry; [In] J. O. Bockris, B. E. Conway, R. E. White, Eds., Plenum Press: New York, 1996, No. 29, p. 401.
- [14] Woods R. In Principles of Mineral Flotation. The Wark Symposium; Jones, M. H., Woodcock, J. T., Eds.; Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AIMM): Parkville, Victoria, Australia, 1984; 91-116.
- [15] Dutra AJ, Espínola A, Sampaio J. A. Electrochemical depression of galena aiming at selective sulfide flotation. Journal of the Brazilian Chemical Society, 1997; 8(2): 193-196.
- [16] Chernyshova I. Anodic processes on a galena (PbS) electrode in the presence of n-butyl xanthate studied FTIR-Spectroelectrochemically, J. Phys. Chem. B, 2001; 105(34): 8185-8191.
- [17] Woods R. In Flotation; Fuerstenau, M. C., Ed.; American Institute of Mining and Petroleum Engineer, Inc.: New York, 1976; A. M. Gaudin Memorial Volume, Vol. 1, p. 298-333.
- [18] Moreno-Medrano ED, Casillas N, Cruz R, Lara-Castro R. Study of adsorption of sodium isopropyl xanthate on galena, Mes Electrochemistry As A Tool for Sustainable Development, 2011; 36(1): 463.
- [19] Toperi D, Tolun R. Electrochemical study and thermodynamic equilibria of the galena-oxygen-xanthate flotation system. Trans. Inst. Min. Metall. C, 1969; 78: 191-197.
- [20] Gardner JR, Woods R. Electrochemical investigation of contact angle and of flotation in the presence of alkylxanthates. II. Galena and pyrite surfaces. Australian Journal of Chemistry, 1977; 30(5): 981-991.
- [21] Leppinen JO, Basilio CI, Yoon RH. In-situ FTIR study of ethyl xanthate adsorption on sulfide minerals under conditions of controlled potential. International Journal of Mineral Processing, 1989; 26(3-4): 259-274.
- [22] Chernyshova I. In situ FTIR-spectroelectrochemical study of the anodic processes on a galena (PbS) electrode under open-air conditions in the absence and presence of n-butyl xanthate. Langmuir, 2002 18(18): 6962-6968.
- [23] Urbano G, Meléndez AM, Reyes VE, Veloz MA, González I. Galvanic interactions between galena-sphalerite and their reactivity. International Journal of Mineral Processing, 2007; 82(3): 148-155.
- [24] Buckley AN, Woods R. Identifying chemisorption in the interaction of thiol collectors with sulfide minerals by XPS: adsorption of xanthate on silver and silver sulfide. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1995; 104(2-3): 295-305.
- [25] Lekki J, Chmielewski T. Mechanizm sorpcji ksantogenu na powierzchni galeny w zakresie stężeń stosowanych w praktyce flotacyjnej, Fizykochem. Probl. Mineralurgii, 1989; 21: 127-140.
- [26] Fuerstenau MC, Miller JD, Kuhn MC. Chemistry of Flotation., Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. Inc, New York. 1985.