

PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF A MIXED-TYPE SULPHIDE-OXIDE ORE FROM A PORPHYRY-COPPER DEPOSIT

Teodora Yankova, Irena Grigorova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: teodora.qnkova@mgu.bg

ABSTRACT. Porphyry-copper deposits have significant economic importance as the primary source of copper. Laboratory studies were performed to determine the grindability of a mixed type of sulphide-oxide ore from a porphyry-copper deposit by a particle size analysis carried out at different grinding time (5, 7, 10, 13, 17, 22 min) of the ore feed. The liberation degree of the ore minerals in the different fractions of the milled ore has been determined by microscopic studies. The distribution of component Cu by fractions of the ore, ground to 65% of the 0.080 mm class was determined. A laboratory Bond test was performed, and the Bond Work Index was determined. The results of the conducted research show that the studied mixed sulphide-oxide ore is characterised by relatively easy grindability.

Key words: physico-mechanical properties, mixed type sulphide-oxide ore.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧНИ СВОЙСТВА НА СМЕСЕН ТИП СУЛФИДНО-ОКСИДНА РУДА ОТ МЕДНОПОРФИРНО НАХОДИЩЕ

Теодора Янкова, Ирена Григорова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Меднопорфирните находища имат важно икономическо значение като основен източник на метала мед. Проведени са лабораторни изследвания за изучаване смилаността на смесен тип сулфидно-оксидна руда от меднопорфирно находище, като е извършен зърнометричен анализ при различна продължителност на смилане (5, 7, 10, 13, 17, 22 min) на изходната руда. Степента на разкриване на рудните минерали в различните класи на смляната руда е определена с помощта на микроскопски изследвания. Определено е разпределението на Cu по класи на рудата, смляна до 65% класа 0.080 mm. Проведен е лабораторен тест на Бонд и е изчислен индексът на работата на Бонд. Резултатите от извършените изследвания показват, че изучаваната смесена сулфидно-оксидна руда се характеризира с относително лесна смиланост.

Ключови думи: физико-механични свойства, смесен тип сулфидно-оксидна руда.

Въведение

Меднопорфирните находища имат важно икономическо значение като основен източник на метала мед в глобален мащаб. От тези находища се извършва 3/4 от световния добив на мед, като освен това се получават и други ценни метали – Mo, Au, Ag (Sillitoe, 2010; John and Taylor, 2016). Меднопорфирните находища съдържат бедни руди, с ниско съдържание на мед, но експлоатацията им е най-ефективна, поради наличието на голямо количество рудни запаси, открит способ за добив и получаването на странични продукти от ценни, съпътстващи метали, на места с по-голям икономически потенциал от доминиращия метал мед (Dilles and John, 2021).

С цел оптимизация на производствения процес, ключов елемент са предварителните проучвания и подготовката на рудата. Според Grigorova et al. (2020) включването на всяка налична предварителна информация за изследваното находище може значително да подобри качеството на продукцията. Подробната предварителна информация за изследвания тип руда е важна за качеството и прецизирането на производствения процес (Grigorova and Korjev, 2020).

В някои случаи в меднопорфирните находища се наблюдава вторична вертикална зоналност, като резултат от супергенни процеси. Над първичните сулфидни руди, разположени в дълбочина, се образуват зона на вторично сулфидно обогатяване и окислителна зона (Богданов, 1987). Трите типа руди – първични сулфидни, вторични сулфидни и оксидни руди, имат различен минерален състав и съответно различни физико-химични и флотационни характеристики.

В настоящата работа са отразени резултатите от извършените лабораторни изследвания за изучаване на физико-механичните свойства на смесен тип сулфидно-оксидна руда от меднопорфирно находище с цел разработване на ефективни технологии за получаване на меден концентрат с високи технологични показатели. Минералният и химичен състав на сулфидно-оксидната руда, както и формите на присъствие на медта в рудата, са определени предварително в началния етап на провежданите изследвания (Янкова, 2023).

Методи и материали

Лабораторните изследвания са извършени за изучаване на смилаността на смесения тип сулфидно-оксидна руда

и за определяне степента на разкриване (либерализация) на медните минерали, пирита и нерудните фази. Определен е енергийният индекс на Бонд. Всички изследвания са извършени върху материал от техноложка проба, съставена от сондажни ядки, с наличие на смесен тип руди от сондажите, с които е проучено меднопорфирното находище.

Зърнометричният анализ на изходната руда е извършен с лабораторна вибрационна ситова машина Analysete 3 с набор от лабораторни сита със следните размери на отворите на пресевните повърхности: 2.5 mm, 1.25 mm, 0.500 mm, 0.250 mm, 0.125 mm и 0.080 mm. Проведени са тестове за установяване на зависимостта между продължителността на смилане и едрината на смления продукт. Опитите са извършени при продължителност на смилане 5, 7, 10, 13, 17 и 22 min.

Проведени са тестове за определяне разпределението на компонентите мед и сярa по класи на рудата, смляна до 65 % класа „-0.080 mm“, както и микроскопски изследвания за определяне степента на разкриване на медните минерали, пирит и нерудни фази, във фракциите на същата руда, смляна до 65 % класа „-0.080 mm“.

За определяне индекса на работата на Бонд е използвана стандартна Bond мелница с размери D x L = 305x305 mm; обем на мелницата 22.3 dm³; облицовка от гладка стомана; скорост на въртене 70 min⁻¹ (85% n_{кр.});

мелеща среда - стоманени сфери с обща маса 22.544 kg.

Зърнометрията на мелещата среда е следната: - 43 сфери с d = 38.10 mm; 67 сфери с d = 31.75 mm; 10 сфери с d = 25.40 mm; 71 сфери с d = 19.05 mm; 94 сфери с d = 15.87 mm.

Подготовката на техноложката проба за изследванията и определянето на физико-механичните свойства на смесения тип сулфидно-оксидна руда от меднопорфирно находище са извършени в лабораториите на катедра „Обогатяване и рециклиране на суровини“, Миннотехнологичен факултет на Минно-геоложки университет “Св. Иван Рилски“.

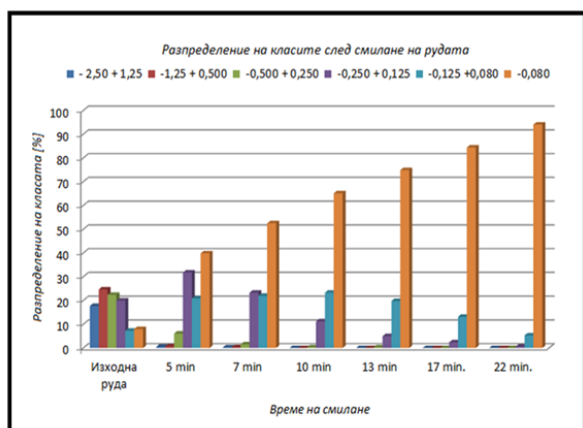
Резултати и дискусия

Изследване смилаемостта на рудата

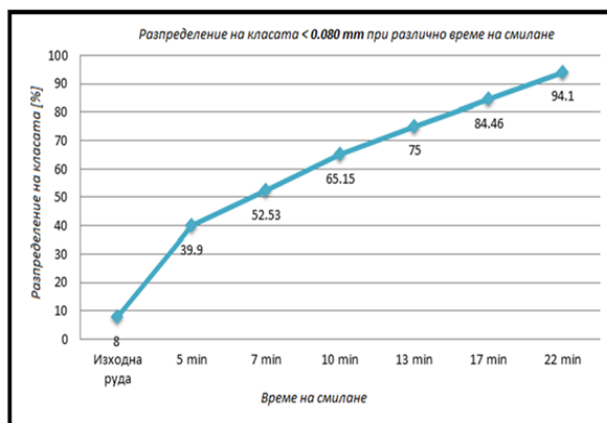
Резултатите от зърнометричния анализ, извършен на изходната сулфидно-оксидна руда и на получения смлян продукт след продължителност на смилане 5, 7, 10, 13, 17 и 22 min са представени в табл. 1 и на фиг. 1 и фиг. 2. Установява се, че необходимата продължителност на смилане на изходната руда за постигането на 65% класа - 0.080 mm е 10 минути (фиг. 3).

Таблица 1. Зърнометричен състав на сулфидно-оксидна руда, техноложка проба от меднопорфирно находище, при различна продължителност на смилане

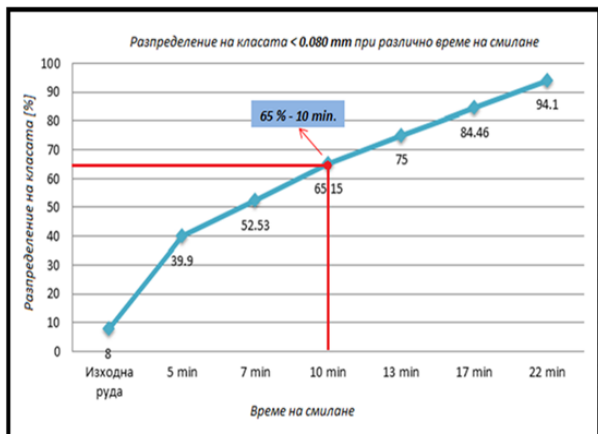
Изходна руда, класи (mm)	Добив, (%)	Време на смилане	Добив, (%)	Време на смилане	Добив, (%)	Време на смилане	Добив, (%)
- 2.50 + 1.250	17.70	5 min	0.55	7 min	0.30	10 min	0
- 1.250 + 0.500	24.66		0.73		0.36		0
- 0.500 + 0.250	22.35		6.10		1.51		0.30
- 0.250 + 0.125	20.02		31.81		23.30		11.22
- 0.125 + 0.080	7.27		20.91		22.00		23.33
- 0.080	8.00		39.90		52.53		65.15
Руда	100.00		100.00		100.00		100.00
- 2.50 + 1.250		13 min	0	17 min	0	22 min	0
- 1.250 + 0.500			0		0		0
- 0.500 + 0.25			0.30		0		0
- 0.250 + 0.125			5.00		2.40		0.60
- 0.125 + 0.080			19.81		13.15		5.30
- 0.080			74.89		84.45		94.10
Руда			100.00		100.00		100.00



Фиг. 1. Зърнометричен състав на сулфидно-оксидна руда, при различна продължителност на смилане



Фиг. 2. Разпределение на класа – 0.080 mm, в зависимост от продължителността на смилане



Фиг. 3. Определяне времето на смилане за 65% класа – 0.080 mm

Изследвания за определяне степента на разкриване (либерализация) на медните минерали, пирит и нерудни фази, в зависимост от степента на смилане на рудата.

Проведени са експерименти за определяне разпределението на компонентите Cu и S по класи на рудата, смляна до 65% класа – 0.080 mm и получените резултати са представени в табл. 2.

Извършени са микроскопски изследвания за определяне степента на разкриване (либерализация) на медните минерали, пирита и нерудните фази – съдържание на свободни частици и срастъци, в смляната руда до 65% класа „0.080 mm“. Резултатите от минералогичния анализ са показани в табл. 3.

Таблица 2. Зърнометричен анализ с разпределение на компонентите Cu и S по класи на рудата, смляна до 65% клас - 0.080 mm”

Класи (mm)	Добив (%)		Съдържание (%)		Разпределение (%)	
	Частен	Сумарен	Cu	S	Cu	S
+0.250	0.30	0.30	0.388	1.42	0.21	0.34
-0.250 + 0.125	11.20	11.50	0.532	1.665	10.73	14.80
-0.125 + 0.08	23.30	34.80	0.687	1.685	28.86	31.16
-0.080 + 0.040	19.35	54.15	0.713	1.657	24.87	25.45
-0.040 + 0.025	11.20	65.35	0.669	1.260	13.50	11.20
-0.025 + 0.010	16.36	81.71	0.461	1.047	13.59	11.65
-0.010	18.29	100.00	0.250	0.372	8.24	5.40
	100.0		0.555	1.26	100.00	100.00

Таблица 3. Минералогички анализ на смляна сулфидно-оксидна руда до 65% клас – 0.080 mm

Класи (mm)	Добив (%)	Свободни зърна (%)	Медни минерали
			Характеристика на срастъците
-0.250 + 0.125	11.2	~45 - 50	Едри ~10%; ½ ~30%; Фини ~60% с кварц, с пирит.
-0.125 + 0.080	23.30	65 - 70	Едри ~10-20%; ½ единични; Фини ~75 - 80%.
-0.08 + 0.063	7.68	~75	Главно фини включения от медни минерали в кварц.
-0.063 + 0.040	11.71	80 - 85	Главно фини включения от медни минерали в кварц.
Пирит			
Класи (mm)	Добив (%)	Свободни зърна (%)	Характеристика на срастъците
-0.250 + 0.125	11.2	~75	Най-често се наблюдават включения от пирит в кварц около ½ от зърната. По-редки фини с медни минерали.
-0.125 + 0.080	23.30	~75	Най-чести са включения от пирит в кварц.
-0.08 + 0.063	7.68	~85	Най-чести са включения от пирит в кварц.
-0.063 + 0.040	11.71	~85	Най-чести са включения от пирит в кварц
Нерудни фази			
Класи (mm)	Добив (%)	Свободни зърна (%)	Характеристика на срастъците
-0.250 + 0.125	11.2	~75 - 80	Главно включения от пирит и медни минерали в кварц.
-0.125 + 0.080	23.30	~80	Главно включения от пирит и медни минерали в кварц.
-0.08 + 0.063	7.68	~85	Главно включения от пирит и медни минерали в кварц.
-0.063 + 0.040	11.71	~90	Главно включения от пирит и медни минерали в кварц.

Получените данни дават основание за следните изводи:

- Относително висока степен на разкриване (либерализация) на медните минерали показва класата „-0.063 mm” на рудата. В класата „-0.125+0.080 mm” се срещат значително количество фини срастъци на медните минерали с кварц.

- Рудната проба от смесени сулфидно-оксидни руди се характеризира с относително лесна смилаемост.

Определяне на енергийния индекс на Бонд.

Индексът на работата на Бонд се счита за най-универсалният показател, използван много широко в

практиката, за определяне смилаемостта на руди, индустриални минерални суровини, скали и други материали, в топкови и прътови мелници (Grigорова and Ranchev, 2019; Мочев, 2019). С този показател се определя необходимата енергия за смилането по разчетната класа (фиксирана големина на зърната) на даден материал. Съгласно общоприетата методика (Мочев и Григорова, 2013; 2014; 2015; Мочев, 2019), индексът на работата на Бонд е определен експериментално с тест за смилаемост в лабораторна топкова мелница на Бонд, работеща в затворен цикъл с циркуляционен товар 250%. При проведените лабораторни изследвания са извършени 9 цикъла на смилане на изходната сулфидно-оксидна руда, с оглед получаването на достоверни, надеждни резултати.

Основните параметри на проведения тест на Бонд са следните:

Контролно (разчетно) сито - $P_c = 0.100 \text{ mm}$; Количество на пробата за смилане - $M = 1210 \text{ g}$; Количество на клас $-P_c + 0$ в пробата за смилане - $f = 14.5\% = 0.145$; Приблизителна маса (изчислена) на подситовия продукт на разчетното сито при „устойчив цикъл на смилане“ - $C = 345.7 \text{ g}$ с циркуляционен товар от 250%. $C = M/3.5 \text{ g}$

В таблици 4 и 5 е показан зърнометричният състав на изходната сулфидно-оксидна руда, натрошена до -3.15 mm и на подситовия продукт от последния, девети цикъл на смилане на рудата.

Таблица 4. Зърнометрична характеристика на изходния продукт от смесен тип сулфидно-оксидна руда, след натрошаване до -3.15 mm

Клас (mm)	Добив (%)	Сумарен добив, (%)	
		+	-
-3.15 + 2.50	8.11	8.11	100.00
-2.50 + 1.60	20.68	28.79	91.89
-1.60 + 0.500	30.16	58.95	71.21
-0.500 + 0.315	8.00	66.95	41.05
-0.315 + 0.250	3.38	70.33	33.05
-0.250 + 0.080	14.31	84.64	29.67
-0.080 + 0.071	5.88	90.52	15.36
-0.071	9.48	100.00	9.48

Таблица 5. Зърнометрична характеристика на подситовия продукт от последния цикъл на смилане на смесен тип сулфидно-оксидна руда

Клас (mm)	Добив (%)	Сумарен добив, (%)	
		+	-
-0.100 + 0.080	21.28	21.28	100.00
-0.080 + 0.071	8.63	29.91	78.72
-0.071 + 0.063	6.38	36.29	70.09
-0.063 + 0.056	4.13	40.42	63.71
-0.056	59.58	100.00	59.58

Данните от проведения лабораторен тест, използвани за изчисляване на индекса на работа на Бонд (W_i) са следните:

$$P_c = 100 \mu\text{m}; G = 1.74 \text{ g}; F_{80} = 1.90 \text{ mm}; P_{80} = 80 \mu\text{m}$$

Индексът на работа на Бонд е изчислен по формулата:

$$W_i = 1.1 \cdot \frac{44.5}{P_c^{0.23} \cdot G^{0.82} \cdot \left[\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right]}, \text{ kWh/t}$$

Резултатът за индекса на работата на Бонд (W_i) за изследваната сулфидно-оксидна руда има стойност **13.6 kWh/t**.

Изчисленият разход на енергия за 1 g новообразувана контролна класа (W_G) е **$6.15 \cdot 10^{-3} \text{ kWh/g}$**

Изводи

Получените резултати от проведените изследвания на смилаемостта на смесения тип сулфидно-оксидна руда, показват относително висока степен на разкриване (либерализация) на медните минерали в класата „ -0.063 mm “. Тези данни, както и изчислените стойности на енергийния индекс на работата на Бонд (W_i) и на разхода на енергия за 1 грам новообразувана контролна класа (W_G) показват, че изучаваният смесен тип сулфидно-оксидни руди се характеризират с относително лесна смилаемост.

Литература

- Богданов, Б. 1987. *Медните находища в България*. Техника, 388 с.
- Мочев, Д., И. Григорова. 2013. *Зърнометрична подготовка на суровините*. ИК “Св. Иван Рилски”, 421 с.
- Мочев, Д., И. Григорова. 2014. *Практикум по зърнометрична подготовка на суровините*. ИК “Св. Иван Рилски”, 220 с.
- Мочев, Д., И. Григорова. 2015. *Въведение в теорията и практиката на рудоподготовка и преработка на минерални суровини*. ИК “Св. Иван Рилски”, 362 с.
- Мочев, Д. 2019. *Методи за определяне на технологичните характеристики на минерални суровини*. Печатница Разград-полиграф ООД, 448 с
- Янкова, Т., Т. Ангелов, И. Нишков. 2021. Изследвания върху веществения състав и физико-механичните свойства на меднопорфирна руда. - *Год. МГУ „Св. Иван Рилски“*, 64, 103-108.
- Янкова, Т. 2023. Веществен състав на смесен тип сулфидно-оксидни руди от меднопорфирно находище. - *Год. МГУ „Св. Иван Рилски“*, 66/2023 (под печат).
- Dilles, J. H., D. A. John, 2021. Porphyry and Epithermal Mineral Deposits. In: *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*, 847 - 866.
- Grigорова, I., M. Ranchev. 2019. Mineral composition, lead-zinc ores grindability and Bond work index correlation – In: *Proceedings of the XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference, 19, issue 1.3, 30 June – 06 July 2019, Bulgaria*, pp.869-876
- Grigорова, M., Koprev, I., Mining and technical conditions in open pit “Khan Krum” gold mine in Southeastern Bulgaria, XI International Scientific Conference GEOBALCANICA, 12-14 May 2020, Ohrid, North Macedonia, pp. 119-126.
- John, D. A., R. D. Taylor. 2016. By-products of porphyry-copper and molybdenum deposits: Chapter 7. In: *Rare earth and critical elements in ore deposits, v. 18 (Eds. Verplanck, P. L., M. W. Hitzman)*, 137-164
- Sillitoe, R. H. 2010. Porphyry-copper systems. - *Economic Geology*, 105, 3-41