

УДК 622.765

**ФЛОТИРУЕМОСТЬ ХАЛЬКОПИРИТА В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

**П. Лазич, Д. Никшич, Р. Томанец,  
Д. Вучинич, Л. Цветичанин**

*Белградский университет,  
E-mail: predrag.lazic@rgf.bg.ac.rs, г. Белград, Сербия*

Представлены результаты объемных промышленных испытаний по влиянию степени измельчения руды на флотацию халькопирита из руды рудника “Рудник”. Установлено, что при одностадийной схеме измельчения и двухстадийной классификации полиметаллической свинцово-цинково-медной руды возникает проблема дифференциальной измельчаемости. Мягкий галенит значительно быстрее измельчается, чем остальные минералы в руде. Это приводит к переизмельчению минерала и переходу его в мелкие классы, которые медленно обогащаются, при этом минералы меди и цинка остаются нераскрытыми в крупных классах. Изучены продукты обогащения минерала меди в хвостах свинцовой флотации, медном концентрате и медных хвостах по классам крупности. Проведен гранулометрический анализ, определено распределение металлов и минералов по классам крупности. Полученные результаты подтвердили предположения о дифференциальной измельчаемости руды и различиях во флотирiuемости материала отдельных классов крупности руды.

*Флотирiuемость халькопирита, дифференциальная измельчаемость, флотация, рудник*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200114

---

Полиминеральные металлические руды содержат минералы, различающиеся по твердости. Измельчение руды для уменьшения размера частиц и раскрытия полезного компонента является подготовительным процессом для флотации [1–5]. При измельчении минералы разной твердости измельчаются по-разному. Твердые минералы измельчаются медленнее, чем мягкие. Это сложная технологическая проблема рудоподготовки, и типичным примером такой руды является Pb–Zn–Cu руда рудника “Рудник” [6–10].

Полученные результаты имеют практическую значимость для определения эффективности измельчения и классификации руды, а также обоснования введения схемы с одноразовой перемешкой грубого медного концентрата [11–13]. В результате исследований предложено изменение схемы обогащения с целью улучшения технологических результатов во флотационной установке [14].

Определение гранулометрического состава хвостов свинцовой флотации (исходной руды в процессе обогащения меди), концентрата меди и хвостов меди выявило содержание разных классов крупности: +0.508, +0.210, +0.074, +0.038, +0.018, +0.009 и –0.009 мм, а также распределение металлов и минералов по классам крупности [15, 16].

Промышленные испытания проводились тремя сериями: при тонкости помола около 60 % класса  $-0.074$  мм в регулярном режиме; в процессе грубого помола (около 50 % класса  $-0.074$  мм) и более тонкого помола (около 66 % класса  $-0.074$  мм). Представлены только данные исследования продуктов обогащения при тонкости помола около 60 % класса  $-0.074$  мм, которые осуществлялись в регулярном режиме работы флотационной установки рудника “Рудник” [11–13].

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пробы для проведения исследований при разных режимах помола (регулярный, грубый и тонкий) отобраны во флотомашинах рудника “Рудник” (рис. 1).

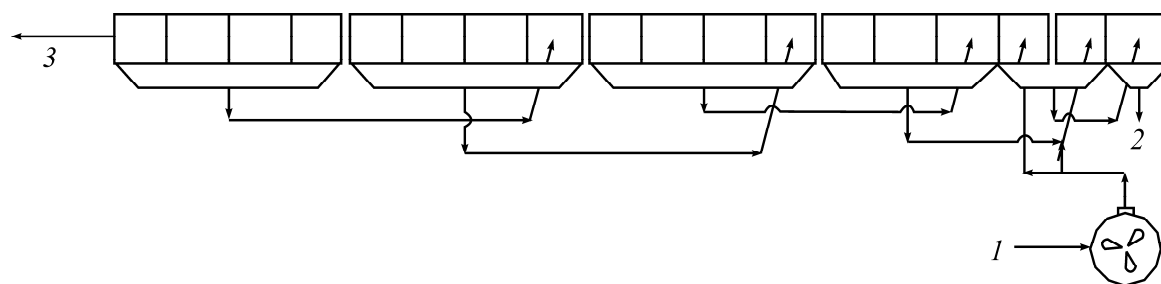


Рис. 1. Места отбора проб продуктов обогащения

Пробы хвостов свинцовой флотации 1 отобраны на входе в устройство кондиционирования меди путем захвата струи пульпы, пробы медного концентрата 2 — на трубе у прободоотборника медного концентрата, пробы хвостов меди 3 — на последней флотомашине медного цикла флотации. Отбор проводился с периодичностью 30 мин в течение 4 ч.

Все пробы подвергнуты влажному рассеву с помощью набора сит Тайлера до класса размером  $-0.038$  мм. Дальнейшая классификация осуществлена методом “bicker decantation”. Получены классы  $-0.038+0.018$ ,  $-0.018+0.009$  мм и класс  $-0.009+0$  мм. Проведен химический анализ каждого класса но содержание свинца, цинка и меди.

Минералогические исследования продуктов концентрации выполнены на образцах, оформленных соединением классов  $+0.074$ ,  $-0.074+0.018$  и  $-0.018+0$  мм, из которых сделаны полированные рудные препараты. Полученные в таком порядке композиты классов проанализированы при помощи рудного микроскопа (Leitz Orthoplan) в целях определения порядка присутствия минералов в хвостах свинцовой флотации, концентрате меди и в хвостах медной флотации. Количественный минералогический состав определен путем рационального анализа на базе содержания металлов и утвержденного качественного минералогического состава руды.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При рассмотрении закономерностей распределения материала различной крупности в хвостах свинцовой флотации, медном концентрате и в хвостах меди выявляется ситуация, аналогичная переработке свинцового концентрата (рис. 2). В частности, в медном концентрате самая большая доля принадлежит классу  $-0.038+0.018$  мм, доля данного класса в хвостах свинцовой флотации, т. е. у входа в цикл меди, меньше (табл. 1).

Доля класса  $-0.009+0$  мм в хвостах свинца (вход в цикл меди) составляет около 26 % (табл. 2), что, учитывая слабую флотируемость данного класса крупности в промышленных условиях, имеет весьма высокое значение. Изменение распределения металлов по классам крупности в хвостах свинца (табл. 2) показало, что мелкие классы ниже 0.018 мм содержат ~38.6 % свинца, 36.6 % цинка и 42.8 % меди.

ТАБЛИЦА 1. Гранулометрический состав хвостов свинцовой флотации, концентрата меди и хвостов медной флотации (М), %

Класс крупности, мм	Хвосты Pb	Концентрат Cu	Хвосты Cu
+0.589	0.34	0.00	2.74
-0.589+0.210	20.24	3.60	19.57
-0.210+0.149	9.78	3.60	11.25
-0.149+0.074	16.33	12.05	18.10
-0.074+0.038	13.56	18.88	11.74
-0.038+0.018	2.36	32.37	2.94
-0.018+0.009	11.47	26.08	12.13
-0.009+0	25.91	3.42	21.53
Проба	100.00	100.00	100.00

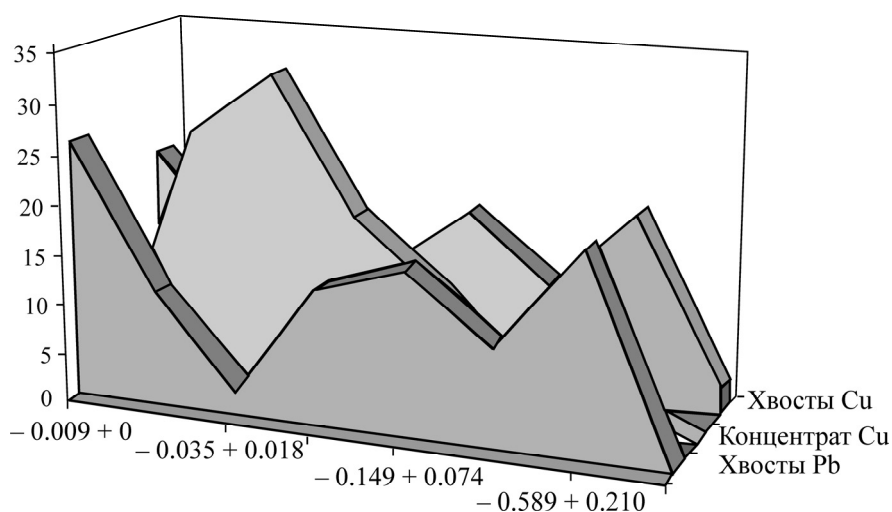


Рис. 2. Закономерности распределения материала по крупности в хвостах свинцовой флотации, медном концентрате и в хвостах меди

Согласно данным табл. 3, в медном концентрате ~ 35 % вредного свинца представлено мелкими классами (ниже 0.018 мм), ~ 20 % цинка также из мелких классов. В хвостах меди ~ 25 % потерь меди содержится в мелких классах, но самые большие потери, более 57 %, выявлены в крупных классах (+0.074 мм).

ТАБЛИЦА 2. Распределение металлов по классам крупности в хвостах свинцовой флотации, %

Класс крупности, мм	Выход М	Содержание			Распределение		
		Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
+0.210	20.58	0.19	1.15	0.11	24.85	13.74	9.34
-0.210+0.149	9.78	0.17	1.57	0.24	10.57	8.92	9.68
-0.149+0.074	16.33	0.14	2.23	0.25	14.53	21.14	16.83
-0.074+0.038	13.56	0.10	2.10	0.30	8.62	16.54	16.78
-0.038+0.018	2.36	0.19	2.26	0.47	2.85	3.10	4.58
-0.018+0.009	11.47	0.10	2.10	0.34	7.29	13.99	16.08
-0.009+0.0	25.91	0.19	1.50	0.25	31.29	22.57	26.71
Хвосты флотации Pb	100.00	0.16	1.72	0.24	100.00	100.00	100.00

ТАБЛИЦА 3. Распределение металлов по классам крупности в медном концентрате и хвостах меди, %

Класс крупности, мм	Выход М	Содержание			Распределение		
		Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
В медном концентрате							
+0.210	3.60	18.63	7.44	4.55	9.49	3.54	0.67
–0.210+0.149	3.60	11.51	8.15	12.79	5.87	3.87	1.90
–0.149+0.074	12.05	5.36	8.57	22.74	9.15	13.64	11.29
–0.074+0.038	18.88	4.58	12.08	24.98	12.25	30.14	19.43
–0.038+0.018	32.37	6.11	6.46	26.26	28.02	27.63	35.02
–0.018+0.009	26.08	8.08	5.34	26.37	29.85	18.40	28.33
–0.009+0.0	3.42	11.09	6.18	23.81	5.37	2.79	3.35
Концентрат Cu	100.00	7.06	7.57	24.27	100.00	100.00	100.00
В хвостах меди							
+0.210	22.31	0.23	0.96	0.12	33.77	14.29	20.10
–0.210+0.149	11.25	0.15	1.32	0.22	11.11	9.91	18.58
–0.149+0.074	18.10	0.13	1.76	0.14	15.49	21.25	19.02
–0.074+0.038	11.74	0.10	1.85	0.17	7.73	14.49	14.98
–0.038+0.018	2.94	0.17	2.26	0.07	3.28	4.43	1.54
–0.018+0.009	12.13	0.11	1.76	0.07	8.78	14.24	6.38
–0.009+0.0	21.53	0.14	1.49	0.12	19.84	21.40	19.39
Хвосты Cu	100.00	0.15	1.50	0.13	100.00	100.00	100.00

Результаты минералогических исследований материала хвостов свинцовой флотации, медного концентрата и хвостов меди приведены в табл. 4. Минералогический анализ хвостов обогащения галенита (вход в цикл меди) показал присутствие ~47.43 %  $\text{CuFeS}_2$  в крупных классах (+0.074 мм). Отмечены сростки халькопирита с другими минералами. Обнаружено, что распределение меди аналогично распределению свинца. Минералы меди и свинца в хвостах свинца распределяются по классам крупности в схожем порядке, что может отрицательно повлиять на селективное распределение на линии “медь – свинец”. Около 32 % халькопирита присутствует в мелких классах, где высока доля оставшегося свинца (32.03 %), который может переходить в медный концентрат. Распределение цинка в мелких классах (39.81 %) говорит о возможности обогащения цинка в цикле обогащения меди, что часто происходит в цехе, особенно когда доля окисленной меди в руде повышена. Происходит активация цинка в цикле обогащения медного минерала, что приводит к нарушению селективного распределения на линии “медь – цинк”. По результатам распределения около 20 % халькопирита находится в классах, пригодных для флотирования (в диапазоне от 0.018 до 0.074 мм).

Образец руды 31 (крупнозернистые классы). Преобладающий минерал — халькопирит, затем следует пирротин, марматит, галенит; в небольшом количестве встречаются кубанит, валлерит и ковеллин по краям халькопирита. По результатам рационального анализа содержание ZnS (подлежащего взысканию штрафа) в настоящем классе крупности составляет 11.09–12.77 %, а по результатам распределения — 21.04 %. Содержание галенита (тоже облагается штрафом) колеблется от 6.19 до 21.51 %, причем, согласно распределению, данная доля составляет 24.51 %.

Образец руды 32 (классы, годные для флотации). В образце самая большая доля принадлежит халькопириту, в основном свободному, с многочисленными включениями марматита, облагаемого штрафом. Часто присутствуют сростания халькопирита с пирротинном, а также сростания халькопирита с марматитом. Наблюдаются зерна свободного марматита со средней

крупностью 0.056 мм (самые крупные зерна — 0.168 мм). Кроме того, имеются свободные зерна галенита со средней крупностью 0.0184 мм, свободные зерна пирротина, весьма крупные (около 0.160 мм). Содержание ZnS в данном классе крупности составляет 9.63–18.00 %, по распределению — 57.77 %; при этом содержание PbS колеблется в диапазоне 5.29–7.05 %, что согласно распределению равно 40.27 %. В медном концентрате присутствуют свободные зерна минералов цинка и меди крупностью, годной для обогащения. Исходя из этого, предположено, что дополнительной перерешеткой медного концентрата можно снизить долю элементов, облагаемых штрафом, а именно свинца и цинка.

ТАБЛИЦА 4. Распределение минералов в продуктах обогащения по классам крупности, %

Номер образца	Класс крупности, мм	Содержание	Распределение	Содержание	Распределение	Содержание	Распределение
		ZnS		PbS		CuFeS <sub>2</sub>	
В хвостах флотации галенита							
7	+0.210	0.86	—	0.29	—	0.38	—
	–0.210+0.074	2.09	34.22	0.32	46.82	1.36	47.45
	–0.074+0.038	2.38	—	0.24	—	0.61	—
8	–0.038+0.018	2.71	25.98	0.30	20.83	1.85	20.29
	–0.018+0.009	2.43	—	0.20	—	1.16	—
9	–0.009+0	2.12	39.80	0.24	32.05	0.66	32.26
	Пустая порода	2.09	100.00	0.27	100.00	0.92	100.00
В медном концентрате							
31	+0.210	11.09	—	21.51	—	13.15	—
	–0.210+0.149	12.15	—	13.29	—	36.97	—
	–0.149+0.074	12.77	21.04	6.19	24.51	65.72	13.87
32	–0.074+0.038	18.00	—	5.29	—	72.20	—
	–0.038+0.018	9.63	57.77	7.05	40.27	75.89	54.45
33	–0.018+0.009	7.96	—	9.33	—	76.21	—
	–0.009+0	9.21	21.19	12.81	35.22	68.82	31.68
	Концентрат Cu	11.28	100.00	8.52	100.00	70.14	100.00
В хвостах после обогащения меди							
37	+0.210	1.43	—	0.27	—	0.35	—
	–0.210+0.149	1.97	—	0.17	—	0.64	—
	–0.149+0.074	2.62	45.44	0.15	60.37	0.40	57.71
38	–0.074+0.038	2.76	—	0.12	—	0.49	—
	–0.038+0.018	3.37	18.92	0.20	11.01	0.20	16.52
39	–0.018+0.009	2.62	—	0.13	—	0.20	—
	–0.009+0	2.22	35.64	0.16	28.62	0.35	25.77
	Хвосты	2.24	100.00	0.17	100.00	0.36	100.00

Образец руды 33 (мелкие классы). В образце преобладает халькопирит. Представлены также зерна свободного галенита средней крупности 0.0072 мм, свободные зерна марматита средней крупности 0.012 мм (самые крупные зерна марматита составляют около 0.028 мм). Содержание марматита в самом мелком классе крупности меняется от 7.96 до 9.21 %, согласно распределению составляет 21.19 %; содержание галенита в данном классе — 9.33–12.81 %, согласно распределению его доля равна 35.22 %.

В результате минералогического анализа установлено, что в хвостах флотации меди (вход в цикл цинка) около 57.71 %  $\text{CuFeS}_2$ , 60.37 %  $\text{PbS}$  и 45.44 %  $\text{ZnS}$  находятся в крупных классах (+0.074 мм). Это сростки халькопирита и других минералов.

### ВЫВОДЫ

Гранулометрический анализ хвостов свинцовой флотации, медного концентрата и хвостов меди показывает, что доля отдельных классов крупности в продуктах не оптимальная. Доля классов 0.038 + 0.018 мм в медном концентрате самая высокая (32.37 %), поэтому данный класс обогащается лучше других, причем доля его в исходной руде весьма низкая — 2.36 %. Доля самого мелкого (слабофлотируемого) класса 0.009 мм в медном концентрате составляет около 3.42 %, хотя доля его в исходной руде самая высокая — 25.91 %.

Распределение металлов по классам крупности в медном концентрате соответствует распределению меди по классам крупности. Большая часть цинка в медном концентрате представлена крупными классами +0.038 мм, при этом основную часть свинца в медном концентрате составляют мелкие классы –0.038 мм. Данный факт отражает дифференциальную измельчаемость минералов свинца, меди и цинка в руде рудника “Рудник”.

Минералогическим анализом медного концентрата выявлено, что самая большая доля меди в концентрате 54.45 % получается из классов, годных к флотации (0.018–0.074 мм). Вредные минералы (галенит и сфалерит) в медном концентрате присутствуют чаще всего в форме сложных сростков с халькопиритом, минералами хвостов и сростков галенита и сфалерита, но имеются и свободные зерна, в частности галенита, что свидетельствует о возможности улучшения качества концентрата путем удаления свободных зерен вредных минералов.

Результаты, полученные лабораторными исследованиями, показали, что введение еще одной перемешки продолжительностью 2 мин улучшает качество медного концентрата при снижении содержания свинца до 4.5–2.5 % и цинка до 7–6 % или меньше.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wills B.** Comminution in the minerals industry — an overview, *J. Min. Eng.*, 1990, Vol. 3. — P. 3–5.
2. **King R.** Comminution and liberation of minerals, *Min. Eng.*, 1994, Vol. 7. — P. 129–140.
3. **Fandrich G., Bearman A., Boland J., and Lim W.** Mineral liberation by particle bed breakage, *J. Min. Eng.*, 1997, Vol. 10, No. 2. — P. 175–187.
4. **Vizcarra G., Wightman M., Johnson W., and Manlapig V.** The effect of breakage mechanism on the mineral liberation properties of sulphide ores, *J. Min. Eng.*, 2010, Vol. 23, No. 5. — P. 374–382.
5. **Little L., Mainza N., Becker M., and Wiese G.** Using mineralogical and particle shape analysis to investigate enhanced mineral liberation through phase boundary fracture, *Powder Technology*, 2016, No. 301. — P. 794–804.
6. **Venkataraman S. and Fuerstenau F.** Kinetic and energy considerations in mixture grinding, *Proc. Int. Symp. on Powder Technology*, 1981. — P. 380–387.
7. **McIvor E. and Finch A.** A guide to interfacing of plant grinding and flotation operations, *J. Min. Eng.*, 1991, Vol. 4, No. 1. — P. 9–23.
8. **Yusupov T., Kirillova E. and Shumskaya L.** Mineral hardness effect on the combined mineral grinding, *J. of Min. Sci.*, 2007, Vol. 43, No. 4. — P. 450–454.
9. **Fuerstenau W., Phatak B., Kapur C., and Abouzeid M.** Simulation of the grinding of coarse/fine (heterogeneous) systems in a ball mill, *J. Min. Proc.*, 2011, Vol. 99, No. 1–4. — P. 32–38.

- 10. Wentao Z., Yuexin H., Yanjun L., Jinlin Y., Shaojian M., and Yongsheng S.** Research on prediction model of ore grinding particle size distribution, *J. of Dispersion Sci. and Techn.*, 2019. — P. 1–10. DOI: 10.1080/01932691.2019.1592688.
- 11. Lazic P., Tomanec R.** Possibilities of improving the quality of lead, copper and zinc concentrates with special reference to the possibility of reducing penalizing elements in copper concentrate, Belgrade, Faculty of Min. and Geology (Study-Serbian language), 2004. — P. 1–24.
- 12. Lazic P., Calic N.** Optimization of the flotation process of Pb-Cu-Zn ore from “Rudnik“ mine, Belgrade, 2004 (Project ETR.6.01.0034B-Serbian language). — P. 1–44.
- 13. Lazic P., Kostovic M.** Energy efficiency rising of flotation plant of “Rudnik” mine, Belgrade, Faculty of Min. and Geology, 2007 (Project EE232026-Serbian language). — P. 40–45.
- 14. Lazic P.** Processing of lead and zinc ore, Monograph: Serbian mining and geology in the second half of the XX century, Vujic S. (editor), Academy of Engineering Sciences of Serbia, Matica Srpska, Min. Institute Belgrade, 2014. — P. 479–495.
- 15. Tomanec R.** Ore microscopic examination of raw material samples from exploration wells at the “Rudnik” mine, Rudnik, FSD of “Rudnik” Mine, 2011. — P. 1–15.
- 16. Tomanec R., Lazic P., Gacina R., and Bajic S.** Ore microscopy analysis methods in mineral concentration processis, Proc. of 5<sup>th</sup> Jubilee Balkanmine Congress and Comercial Exhibition, Ohrid, Macedonia, 2013. — P. 779–785.

*Поступила в редакцию 09/І 2020  
После доработки 03/ІІ 2020  
Принята к публикации 04/ІІ 2020*