

**А.Р. Ризун, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк, А.Н. Рачков, В.Ю. Кононов**

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## **РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД**



*Технологический процесс, разработанный с использованием высоковольтного электрического разряда как источника энергии для воздействия на мелкодисперсную структуру хвостов обогащения, обеспечивает высокий прирост извлечения ценных компонентов.*

*Ключевые слова: электроразрядная дезинтеграция, полиметаллическая руда, медно-цинковая руда, минерал, обогащение, фракция, дисперсия.*

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ**

В настоящее время накоплено миллиарды тонн хвостов обогащения полиметаллических руд, содержание ценных компонентов в которых в ряде случаев превышает их содержание в естественных месторождениях. Переработка хвостов обогащения руд из хвостохранилищ (для извлечения цветных металлов) в большинстве случаев требует сложных схем обогащения, включающих процессы спекания, измельчения, гравитации, флотации и гидрометаллургии, и по технико-экономическим показателям и качеству концентратов они неконкурентоспособны по сравнению с продуктами, получаемыми из естественного сырья.

В процессах обогащения минерального сырья около 70 % энергии тратится на дробление и измельчение руды. Затрата электроэнергии на процесс измельчения в зависимости от типа руд составляет от 20 до 60 кВт·ч/т, причем в ряде случаев увеличение тонкости помола не

приводит к повышению степени раскрытия минералов. Анализ основных потерь ценных компонентов в процессах первичной переработки показывает, что 35–40 % потерь связано со сrostками и 30–35 % – с тонкими частицами размером меньше 40 мкм [1]. Для того чтобы снизить эти потери, процессы дробления и измельчения должны иметь более управляемый селективный характер дезинтеграции. Разработка таких методов дезинтеграции и вскрытия минерального сырья, позволяющих сократить потери ценных компонентов, утилизировать отходы, является актуальной задачей.

Эффективным решением такой задачи может стать электроразрядная дезинтеграция, обеспечивающая разрушение материала по межфазным границам за счет образования микротрещин вследствие действия управляемых импульсных нагрузок.

В рамках научно-технического проекта в Институте импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины выполнен комплекс научно-исследовательских и технологических работ, направленных на решение проблемы утилизации хвостов обогащения и повышение

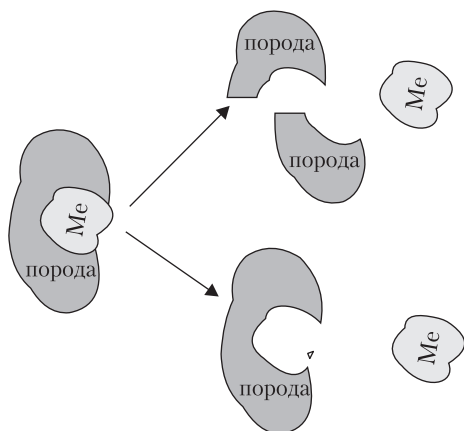


Рис. 1. Возможные схемы разрушения частиц

эффективности флотации полиметаллических руд за счет воздействия высоковольтных импульсных разрядов в жидкости. Результаты ранее проведенных в ИИПТ исследований по разрушению, дроблению и измельчению природного и искусственного минерального сырья показали, что импульсная электроразрядная технология по сравнению с традиционными

методами имеет ряд существенных преимуществ [2, 3]. Прежде всего — это возможности управления процессом дезинтеграции высокой селективности разделения минералов.

Целью настоящей работы является повышение эффективности обогащения полиметаллических руд путем разработки и внедрения электроразрядного технологического процесса дезинтеграции хвостов обогащения.

### РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Хвосты обогащения полиметаллических руд состоят из сложной смеси минералов. В табл. 1 представлен химический состав основных элементов хвостов обогащения трех видов медно-цинковых руд.

Содержание золота в этих рудных материалах трудно идентифицировать, оно ассоциируется преимущественно с халькопиритом и пиритом.

Комплексная переработка технологических отходов таких руд — лежалых хвостов — сдерживается из-за высокой прочности сырья и отсутствия недорогого и эффективного способа дезинтеграции.

Предлагаемый технологический процесс предусматривает осуществить дробление, измельчение и селективность разделения рудных материалов за счет действия импульсных высоковольтных разрядов как источника энергий высокой плотности. Селективность электроразрядной дезинтеграции мелкодисперсной массы достигается за счет разрушения по границам разделения сред.

Для оптимизации процесса электроразрядной дезинтеграции отходов обогащения поли-

Таблица 1  
Химический состав основных элементов хвостов обогащения медно-цинковых руд

Химические элементы	Типы руд		
	1р	2р	3р
Содержание элементов, %			
Медь	0,21	0,031	20,1
Цинк	0,025	0,023	0,67
Серебро	0,0013	0,0012	0,006

Таблица 2  
Расчетные величины давления  $P_{вск}$  на фронте волн сжатия в зависимости от емкости  $C$  и радиуса дезинтегратора  $r$

$C$ , мкФ	$r = 0,01$ м	$r = 0,05$ м	$r = 0,09$ м	$r = 0,1$ м	$r = 0,12$ м	$r = 0,15$ м	$r = 0,2$ м	$r = 0,22$ м
	$P_{вск} \times 10^6$ , МПа							
0,5	117,434	52,518	39,145	37,136	33,90	30,321	15,260	12,03
1,0	139,653	62,455	46,01	44,162	40,314	36,058	19,518	13,011
1,5	154,551	69,117	51,517	48,872	44,615	39,905	20,113	15,021

металлических руд в процессе экспериментальных исследований установлены режимы и параметры электроразряда, обеспечивающие максимальное раскрытие минералов [4].

Экспериментально установлены необходимые условия для эффективной работы дезинтеграции хвостов обогащения, а именно — в объеме дезинтегратора величина давления, создаваемого электроразрядом, не должна быть меньше предела прочности обрабатываемого материала на растяжение и не должна превышать прочность материала дезинтегратора [5]:

$$\sigma_{\text{раст}} < P_{\text{всж}} > \sigma_{\text{д}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{раст}}$  — предел прочности рудного материала на растяжение, МПа;  $P_{\text{всж}}$  — давление волны сжатия, МПа;  $\sigma_{\text{д}}$  — предел прочности дезинтегратора, МПа.

Давление волн сжатия, генерируемых электроразрядом, выражается соотношением [6]:

$$P_{\text{всж}} = \frac{4\sqrt{U_0^5 C}}{\sqrt{r} \sqrt[8]{L^3 l_{\text{рп}}^5}} > \sigma_{\text{раст}}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{всж}}$  — давление на фронте волны сжатия, МПа;  $U_0$  — напряжение разрядного контура, кВ;  $C$  — емкость конденсаторных батарей, мкФ;  $r$  — радиус разрушения, м;  $L$  — индуктивность разрядного контура, мкГн;  $l_{\text{рп}}$  — длина разрядного промежутка, м;  $\sigma_{\text{раст}}$  — предел прочности материала на растяжение, МПа.

При введении коэффициента пропорциональности  $k = 1,3$ , определенного экспериментально и учитывающего превышение давления на фронте волны сжатия  $P_{\text{всж}}$  над пределом прочности рудных материалов на растяжение  $\sigma_{\text{раст}}$ , зависимость (2) преобразуется в следующее выражение:

$$P_{\text{всж}} = \frac{4\sqrt{U_0^5 C}}{\sqrt{r} \sqrt[8]{L^3 l_{\text{рп}}^5}} = k\sigma_{\text{раст}}. \quad (3)$$

Изменяя величину емкости  $C$  от 0,5 до 1,5 мкФ, при известных других параметрах разряда:  $U_0 = 50$  кВ,  $L = 8 \cdot 10^{-6}$  Гн,  $l_{\text{рп}} = 0,05$  м определим по формуле (3) диапазон давлений на фронте волн

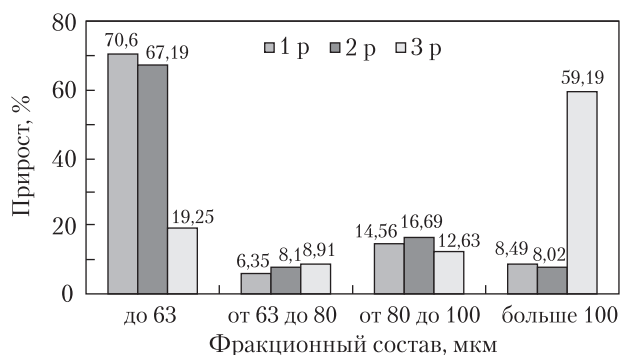


Рис. 2. Общий прирост фракционного состава после электроразрядной дезинтеграции отходов обогащения трех видов руд при удельных затратах энергии  $W = 10,4$  кВт · ч/т

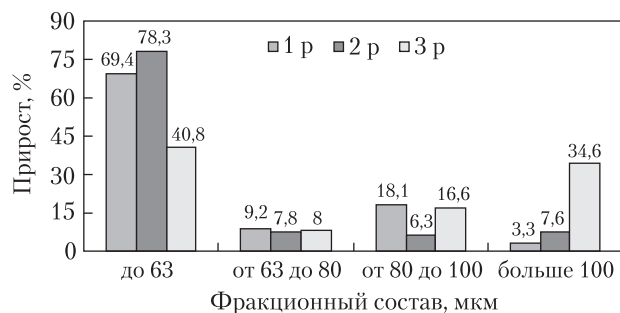


Рис. 3. Прирост степени электроразрядной дезинтеграции отходов обогащения трех видов руд при удельных затратах энергии  $W = 15$  кВт · ч/т

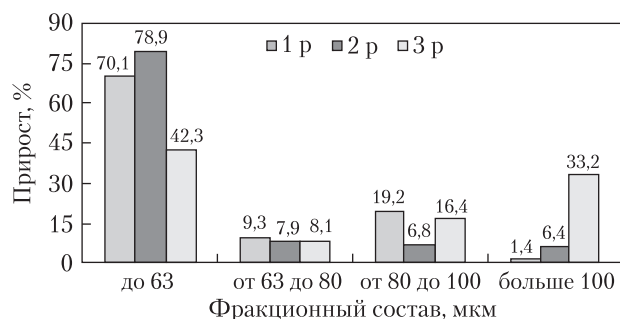


Рис. 4. Прирост степени электроразрядной дезинтеграции отходов обогащения трех видов руд при удельных затратах энергии  $W = 20$  кВт · ч/т

сжатия и расчетные данные радиуса разрушения для проектирования дезинтегратора.

Расчетные данные представлены в табл. 2.

В процессе импульсного электроразрядного воздействия давление волн сжатия и разреже-

Таблиця 3

**Прирост основных металлов в отходах обогащения руды 1р**

Содержание элементов	Исходный продукт	Флотированный после электроразрядной обработки		Прирост, %
		камерный продукт	пенный продукт	
	Вес пробы, г			
Ag	10,7	16,8	19,2	79,4
Au	0,9	1,6	1,8	100,0
Cu	0,2	0,49	0,5	150,0
Zn	1,81	1,94	1,95	7,7
S	26,9	23,8	24,18	-10,1

Таблиця 4

**Прирост основных металлов в отходах обогащения руды 2р**

Содержание элементов	Исходный продукт	Флотированный после электроразрядной обработки		Прирост, %
		камерный продукт	пенный продукт	
	Вес пробы, г			
Ag	14,2	19,0	21,3	50,0
Au	0,6	1,16	1,56	160,0
Cu	0,27	0,46	0,61	125,9
Zn	0,23	0,35	0,38	65,2
S	25,49	22,64	23,84	-6,5

Таблиця 5

**Прирост основных металлов в отходах обогащения руды 3р**

Содержание элементов	Исходный продукт	Флотированный, после электроразрядной обработки		Прирост, %
		камерный продукт	пенный продукт	
	Вес пробы, г			
Ag	0,003	0	0,005	66
Cu	17,2	14,4	18,4	6,9
Zn	0,7	0,66	0,89	27

ния приводит к разрыву слабых (механических) связей металлов с породой за счет разности модулей упругости и высокой анизотропности. На рис. 1 представлены возможные схемы дезинтеграции (разделения частиц) и выщелачивания металлов (Me).

В процессе экспериментальных исследований при обработке отходов обогащения руд 1р, 2р, 3р по каждому типу отходов проводилась серия экспериментов. На рис. 2–4 представлены результаты прироста измельчения после электроразрядной дезинтеграции отходов рудных материалов удельными затратами энергии 10,4, 15,0 и 20,0 кВт·ч/т.

Анализ полученных результатов показывает, что предпочтительными являются результаты второго блока опытов, поскольку снижение затрат удельной энергии ниже 15 кВт·ч/т ведет к ухудшению фракционного состава обработанного материала. Особенно это сказывается на отходах руды 3р, исходная прочность которой выше исходной прочности руд 1р и 2р, а увеличение удельных затрат энергии до 20 кВт·ч/т нецелесообразно из-за незначительного изменения фракционного состава.

После электроразрядной дезинтеграции отходов проводился обогатительный процесс способом пенной флотации.

В табл. 3–5 представлены результаты прироста основных металлов в отходах обогащения руды, обработанной электроразрядом.

Из табл. 3–5 видно, что флотационное разделение продукта электроразрядной дезинтеграцией сопровождается увеличением количества металлов в пенной составляющей.

**ВЫВОДЫ**

1. В ходе выполнения научно-исследовательской работы установлено, что электроразрядный способ дезинтеграции является одним из наиболее перспективных механизмов воздействия на мелкодисперсную структуру отходов обогащения, позволяющим получить достаточно высокий прирост извлечения ценных компонентов. При электроразрядном воз-

действию на материал получено селективное разделение породы и металла за счет разрушения частиц по границе раздела сред.

2. Экспериментально установлена зависимость прироста измельчения и обогащения отходов от удельных затрат энергии электроразрядной обработки. Максимальная раскрываемость частиц хвостов обогащения получена при удельных затратах энергии в пределах 15 кВтч/т.

3. Разработанная технология электроразрядной селективной дезинтеграции проверена в процессе обработки более 30 видов хвостов обогащения полиметаллических руд. Получен прирост ценных компонентов:

- ✦ серебра — до 80 %;
- ✦ золота — до 160 %;
- ✦ меди — до 125 %;
- ✦ цинка — до 75 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Партон В.З., Морозов Е.М.* Механика упруго-пластического разрушения. — М.: Наука, 1974. — 168 с.
2. *Ризун А.Р., Цуркин В.Н.* Электроразрядное разрушение неметаллических материалов // *Электронная обработка материалов.* — 2002. — № 1. — С. 83–85.
3. *Ризун А.Р., Косенков В.М.* К вопросу об определении производительности электроразрядного разрушения хрупких неметаллических материалов // *Электронная обработка материалов.* — 2001. — № 1. — С. 45–50.
4. *Пат. № 66243* Украина, МПК (2011.01) B03B 7/00, E21C 19/18. Способ переработки хвостов флотаций полиметаллических руд / *Ризун А.Р., Яковлев В.А., Голень Ю.В.*; заявитель и патентообладатель Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины. — № u2011107682; заявл. 20.06.11; опубл. 26.12.11. — Бюл. № 24/2011.
5. *Ризун А.Р., Косенков В.М., Голень Ю.В., Денисюк Т.Д.* Разработка и внедрение электроразрядного процесса дезинтеграции металлургического кремния // *Наука та інновації.* — 2010. — № 6. — С. 25–30.
6. *Шамко В.В., Кривицкий Е.В.* Исследование некоторых характеристик канала подводной искры в основной стадии развития разряда // *Журнал технической физики.* — 1997. — № 47 (1). — С. 93–101.

*А.Р. Ризун, Ю.В. Голень,  
Т.Д. Денисюк, О.М. Рачков, В.Ю. Кононов*

#### РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ПРОЦЕСУ СЕЛЕКТИВНОЇ ДЕЗІНТЕГРАЦІЇ ХВОСТІВ ЗБАГАЧЕННЯ ПОЛІМЕТАЛІЧНИХ РУД

Технологічний процес, розроблений з використанням високовольтного електричного розряду як джерела енергії для впливу на дрібнодисперсну структуру хвостів збагачення, забезпечує високий приріст добування цінних компонентів.

*Ключові слова:* електророзрядна дезинтеграція, поліметалева руда, мідно-цинкова руда, мінерал, збагачення, фракція, дисперсія.

*A.R. Rizun, Y.V. Holen,  
T.D. Denisyuk, A.N. Rachkov, V.Y. Kononov*

#### DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF ELECTRODISCHARGE PROCESS FOR SELECTIVE DISINTEGRATION OF MILL TAILINGS OF POLYMETALLIC ORES

The process, developed with the use of high voltage electrical discharge as a source of energy to affect the structure of finely dispersed tailings, provides a high increase in the extraction of valuable components.

*Key words:* electrical discharge disintegration, polymetallic ore, copper and zinc ore, mineral, concentration, fraction of the variance.

Надійшла до редакції 23.04.12