

наиболее совершенными, что доказывает конкурентоспособность «Экологического Содерберга». С 2010 г. новая технология внедряется в 4 корпусах завода ОАО «РУСАЛ Красноярск» (замена ведется по плану капитального ремонта). В настоящее время там работают 174 таких электролизера и планируется перевод всех аппаратов, работающих с анодом Содерберга на предприятиях компании, на технологию «Экологический Содерберг».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен сравнительный анализ основных показателей работы электролизеров с анодом Содерберга за длительный период времени. Показано, что последовательная модернизация технологического

процесса электролиза и оборудования, проводимая на предприятии ОАО «РУСАЛ Красноярск», позволяет сохранить в ближайшие десятилетия конкурентоспособность технологии на электролизерах С-8БМЭ с «коллоидным» анодом Содерберга.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mann V.H. // Light Metals. 2006. P. 181—183.
2. Пат. 228938 (РФ). Способ получения пека связующего для электродных материалов / В.К. Фризоргер, В.Х. Манн, А.Н. Анушенков, С.А. Храменко. 2006.
3. Frizorger V.K., Gil'debrandt E.M., Vershinina E.P. // Rus. J. of Non-Ferrous Metals. 2010. Vol. 51, № 2. P. 119—123.
4. Primary Aluminium Smelters and Producers of the World / Comp. R.P. Pawlek. GmbH: BeuthVerlag, 2011. № 9.

УДК 622.7

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСКРЫТИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ РУД ПО КОМБИНИРОВАННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

© 2013 г. Л.С. Стрижко, Т.А. Стрекалова, В.В. Коростовенко, В.А. Стрекалова

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва
Институт цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета (ИЦМиМ «СФУ»), г. Красноярск

На примере редкоземельных руд Татарского и Томторского месторождений (Красноярский кр.) рассмотрена возможность повышения степени раскрытия исследуемых проб за счет разрядно-импульсной интенсификации процесса измельчения. Применение комбинированной схемы рудоподготовки «измельчение 20 мин – разрядно-импульсная обработка с удельной энергией 9,2 кДж/дм³» позволит повысить степень извлечения лантана и иттрия в кислый раствор на 3,8 и 2,8 % соответственно при спекании подготовленных проб с содой.

Ключевые слова: разрядно-импульсная интенсификация, измельчение, степень извлечения, лантан, иттрий, кислый раствор, спекание, пробы с содой.

In terms of rare-earth ores of the Tatarsky and Tomtorsky deposits (Krasnoyarsky Territory), the possibility of increasing the extent of investigated sample breaking down by means of discharge-impulse intensification of the grinding process is considered. The use of the combined scheme of ore dressing called «grinding for 20 minutes – discharge-impulse processing with specific energy of 9,2 kJ/dm³» allows increasing the extent of lanthanum and yttrium recovery into the acid solution by 3,8 and 2,8 % respectively during sintering of processed samples with soda.

Key words: discharge-impulse intensification, grinding, recovery extent, lanthanum, yttrium, acid solution, sintering, samples with soda.

Стрижко Л.С. – докт. техн. наук, проф., зам. зав. кафедрой цветных металлов и золота НИТУ «МИСиС» (119049, г. Москва, В-49, Ленинский пр-т, 4). Тел.: (499) 237-36-33. E-mail: sls_2007.47@mail.ru.

Стрекалова Т.А. – канд. техн. наук, доцент кафедры техносферной безопасности горного и металлургического производства ИЦМиМ «СФУ» (660025, г. Красноярск, пр-т Красноярский рабочий, 95). E-mail: sta2277@mail.ru.

Коростовенко В.В. – докт. техн. наук, проф., зав. той же кафедрой. Тел.: (391) 206-36-18. E-mail: korostovenko@mail.ru.

Стрекалова В.А. – ст. преподаватель той же кафедры.

Ресурсный (производственный) цикл с точки зрения рационального освоения природных ресурсов безусловно предусматривает совершенствование технологии добычи и переработки минерального сырья как основы повышения полноты и комплексности использования добытых из недр полезных ископаемых. В то же время решение данного технологического вопроса неизбежно положительно отразится на сопутствующей экологической проблеме — снижении отрицательного воздействия добычи и переработки минерального сырья на природную среду [1].

В настоящее время переработка руд редких металлов сопровождается большими их потерями из-за недостаточно высокой эффективности разделения чернового концентрата методами гравитации, магнитной и электрической сепарации, что связано с близкими свойствами ценных минералов, наличием тонких сростков с породообразующими минералами и т.д. Ниобиевое сырье, поступающее на химическую переработку, представляет собой труднообогатимые промпродукты и низкосортные концентраты, содержащие 2—15 % Nb₂O₅. Поэтому решение вопросов увеличения полноты и комплексности использования редкометалльного сырья может быть обеспечено путем внедрения новых технологических решений, одним из которых является создание высокоэффективных комбинированных процессов и технологических схем обогащения полезных ископаемых.

Как известно, собственно крупные месторождения большинства редких элементов встречаются нечасто, однако интерес промышленности к ним все возрастает. Широкое освоение месторождений редкометалльных руд Сибири сдерживается прежде всего весьма энергоемкими традиционными технологиями рудоподготовки. К нетрадиционным следует отнести методы, основанные на направленном изменении свойств вскрываемых минералов электрофизическими воздействиями, в частности разрядно-импульсной обработкой (РИО) исходных руд [1—3].

Наши исследования по разрядно-импульсной интенсификации процесса измельчения проводили на образцах минерального сырья двух месторождений — Татарского и Томторского (Красноярский кр.). Трудность раскрытия сростков по традиционным схемам определяется тем, что включения рудных очень тонкие, часто с неправильными извилистыми границами срастания с нерудными минералами и между собой. Основная задача, решаемая при избирательном раскрытии минералов, — отделение

кристаллов и зерен полезных компонентов от породы без нарушения их целостности и с соблюдением заданной крупности.

Особенности исходного рудного материала, влияющие на практическое использование возможностей импульсных технологий, заключаются в следующем:

— для всех типов руд Татарского месторождения характерно увеличение доли «богатых» сростков пирохлора с апатитом в классах < 0,2 мм, что приводит к повышенному содержанию фосфора в пирохлоровых концентратах; при ограничениях по фосфору (пентаоксид) в соотношении P₂O₅ : Nb₂O₅ < 1:15 требуется высокоэффективное раскрытие сростков мелких классов еще на стадии рудоподготовки;

— исходное сырье Томторского месторождения отличается тесным взаимным прорастанием минеральных компонентов, что предопределяет измельчение руды по специальной технологической схеме до крупности –0,074 мм (не менее 95 %);

— традиционная рудоподготовка для обеих проб исходных руд сопровождается высоким выходом шламовых частиц.

Рудоподготовку проводили по схемам, представленным на рис. 1. Гранулометрический состав оценивали ситовым анализом. Схема *a* предусматривала измельчение ($t_{\text{изм}} = 40$ мин) с выходом класса –0,074 мм не менее 60 % в лабораторной шаровой мельнице. По комбинированной схеме *б* навеску руды массой 250 г крупностью –3+0 мм подвергали РИО в реакторе объемом 2 дм³ (электроды из стали) при соотношении Т : Ж = 1 : 1, после чего доизмельчали в шаровой мельнице ($t_{\text{изм}} = 10$ и 20 мин) с последующим анализом выхода класса –0,074 мм.

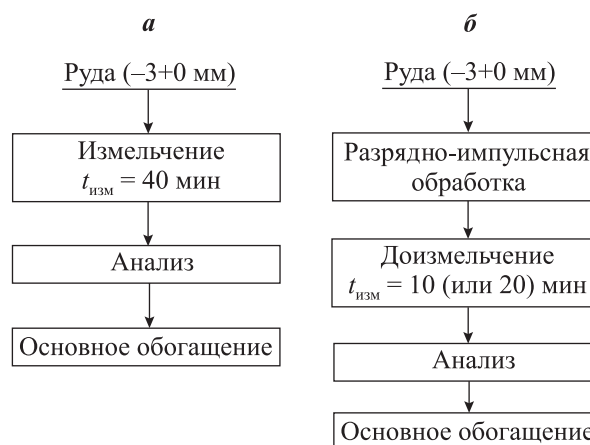


Рис. 1. Принципиальные схемы рудоподготовки
a – базовая, *б* – комбинированная

Таблица 1
Результаты ситового анализа пробы руды Томторского месторождения

Класс крупности, мм	Содержание класса, %						
	Исходное	После РИО без измельчения	Схема а (базовая)	Схема б (комбинир.) при W , кДж/дм ³			
				4,0	9,2	13,4	9,2
			$t_{изм} = 40$ мин	$t_{изм} = 10$ мин			20 мин
+1,0	74,13	31,04	15,62	14,0	10,10	9,62	2,60
-1,0+0,40	13,40	34,12	13,28	12,1	2,02	2,50	3,22
-0,40+0,20	8,08	11,03	6,12	5,91	4,88	5,01	3,68
-0,20+0,10	4,35	8,02	3,14	3,0	4,03	4,77	4,18
-0,10+0,05	0,04	13,81	45,12	42,97	52,2	36,46	61,18
-0,05	–	1,98	16,72	22,02	26,77	41,64	25,14
Итого	100	100	100	100	100	100	100

Во всех опытах обработку проводили однократным импульсом с энергией $W = 4+13,4$ кДж/дм³.

Оценку возможностей избирательного раскрытия минералов для всех случаев проводили ситовым анализом (табл. 1). Полученные результаты показывают, что РИО исходных проб без измельчения увеличивает раскрытие минеральных агрегатов во всем диапазоне исходных классов с появлением новых более мелких фракций.

Анализ влияния энергии обработки свидетельствует, что раскрытие происходит за счет высвобождения напряжений, накопленных частицами в процессе дробления, а также концентрации новых напряжений прямыми ударными волнами (в области контактов минералов в сростке) с ростом дефектов структуры и образованием новых поверхностей под действием отраженных ударных волн.

В ходе исследований установлено, что измельчение по экспериментальной схеме приводит к выходу более технологичных классов (-1+0,05 мм), причем лучшие результаты получены при энергии однократного импульса $W = 9,2$ кДж/дм³. Более высокая ее величина влечет рост класса -0,05 мм, что должно способствовать увеличению выхода шламовых частиц.

Оценка степени раскрытия исследуемых проб Татарского и Томторского месторождений показала, что увеличение W приводит к повышению степени раскрытия всех основных минералов рассматриваемых проб (рис. 2). При этом раскрываемость минералов не зависит от их электропроводности, а определяется разностью механических характеристик различных минералов в сростках. Анализ данных табл. 1 свидетельствует о том, что основному

измельчению подвергается фракция -1+0,4 мм, так как ее количество резко уменьшается при обработке энергией 9,2 кДж/дм³ и одновременно увеличивается содержание фракции -0,1+0,05 мм. Геохимический анализ показал, что значительная часть фракции -1+0,4 мм представлена составляющими глины, которая в процессе РИО разрушается и вымывается в виде частиц размером -0,1+0,05 мм.

Оптimum раскрытия для рассматриваемых проб Татарского и Томторского месторождений соответствует РИО с энергией 9–10 кДж/дм³. Минералогические исследования в прямом и отраженном свете показали, что при более высоких значениях W минералы испытывают пластическую деформацию, причем раскрытые минеральные зерна в исследуемом диапазоне энергий не диспергируют. Однако при РИО суммарной энергией выше оптимального значения наблюдается постоянный рост степени раскрытия с образованием шламов. Очевидна избирательность

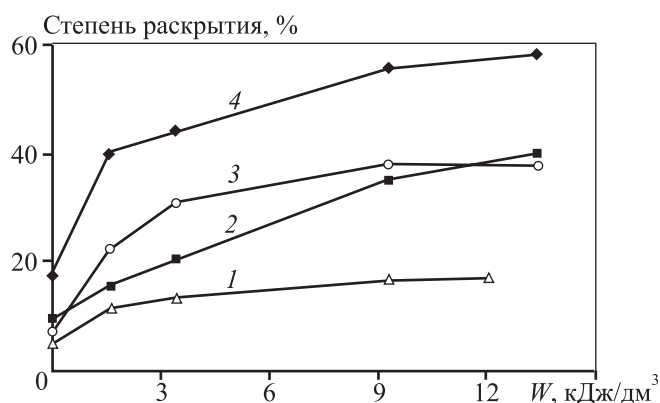


Рис. 2. Зависимость степени раскрытия минералов Томторской руды от энергии РИО без измельчения
 1 – Nb₂O₅, 2 – P₂O₅, 3 – Al₂O₃, 4 – Fe₂O₃ + FeO

раскрытия минеральных агрегатов путем управления энергией РИО. Таким образом, оптимальными условиями вскрытия рудного сырья является комбинация «измельчение 20 мин — РИО с $W = 9,2 \text{ кДж/дм}^3$ ». Подготовленные таким образом пробы руды Томторского месторождения спекали с содой для дальнейшего извлечения ценных составляющих.

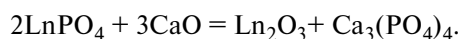
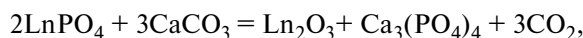
В основе спекания руды, содержащей редкоземельные элементы, лежит реакция



Поскольку взаимодействие фосфатов с содой протекает при $T \geq 700 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше, изучалось влияние температуры спекания ($T_{\text{сп}}$) на выход спека по базовой схеме рудоподготовки (измельчение) и комбинированной (РИО руды и последующее доизмельчение). В последнем случае во всех опытах энергия разрядно-импульсного воздействия на пробу составляла $9,2 \text{ кДж/дм}^3$, а время доизмельчения — 20 мин. Во всех экспериментах соотношение соды к руде (по массе) принимали 2 : 1. Величину $T_{\text{сп}}$ изменяли от 700 до 900 $^\circ\text{C}$ при продолжительности спекания $\tau_{\text{сп}} = 2 \text{ ч}$. Результаты изучения влияния $T_{\text{сп}}$ на выход спека и извлечение фосфора в водный раствор представлены в табл. 2.

В общем случае с ростом $T_{\text{сп}}$ выход спека снижается, однако применение комбинированной схемы рудоподготовки позволило не менее чем на 6 % увеличить этот показатель при уменьшении оптимальной температуры спекания с 850 до 750 $^\circ\text{C}$, что значительно снижает риск оплавления шихты при нагревании минеральной системы. Степень извлечения фосфора в водный раствор в зависимости от температуры проходит через максимум в интервале $T_{\text{сп}} = 800\div 850 \text{ }^\circ\text{C}$ (по базовой схеме рудоподготовки), в то время как комбинированная схема смещает максимум влево.

Следует отметить общую тенденцию уменьшения извлечения фосфора при $T_{\text{сп}} > 800 \text{ }^\circ\text{C}$, что, вероятно, вызвано образованием фосфатов кальция, так как присутствующий в руде кальций взаимодействует с фосфатами редкоземельных металлов по реакциям



Установлено также, что выход кека после азотно-кислого выщелачивания спека также зависит от температуры спекания, увеличиваясь при росте последней, что, по-видимому, связано с образованием труднорастворимых соединений между составляющими руды в тем большей степени, чем выше значение $T_{\text{сп}}$.

Изучение влияния продолжительности спекания на выход спека и извлечение фосфора в водный раствор осуществляли при $\tau_{\text{сп}} = 0,5\div 4,0 \text{ ч}$, $T_{\text{сп}} = 850 \text{ }^\circ\text{C}$ и расходе соды 2 : 1 (по массе). Результаты опытов свидетельствуют о том, что увеличение времени спекания более 1 ч снижает выход спека как при базовой, так и при комбинированной технологиях рудоподготовки. Если обе схемы мало влияют на выход спека во всем диапазоне продолжительности спекания, то извлечение фосфора в водный раствор в оптимальном диапазоне $\tau_{\text{сп}} = 0,5\div 1,5 \text{ ч}$ при комбинированной рудоподготовке увеличивается на 6—7 % (рис. 3).

Оценка извлечения редкоземельных металлов (лантана и иттрия) в кислый раствор в зависимости от продолжительности спекания показала, что оно растет в диапазоне $\tau_{\text{сп}} = 0,5\div 2,0 \text{ ч}$, а затем стабилизируется. Следует отметить, что при оптимальном времени спекания (до 2 ч) применение комбинированной схемы рудоподготовки позволило повысить

Таблица 2
Зависимость степени извлечения фосфора в водный раствор и выхода спека от температуры спекания

$T_{\text{сп}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Выход спека, %		Выход кека после водной обработки, %		Концентрация фосфора, мг/дм ³		Извлечение фосфора, %	
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>a</i>	<i>б</i>
700	—	92,1	—	52,2	—	3123	—	76,1
750	88,8	95,0	46,2	48,1	2962	2978	72,6	77,0
800	74,8	77,4	40,1	42,2	3993	4002	88,0	91,1
850	72,9	73,0	44,0	41,0	3515	3616	90,1	78,0
900	72,5	74,2	42,7	41,2	2456	2511	72,8	77,9

Примечание. *a* — базовая схема рудоподготовки, *б* — комбинированная (см. рис. 1).

степень извлечения лантана (α_{La}) в кислый раствор в среднем на 3,8 % (рис. 4).

Установлено также, что при рудоподготовке по базовой схеме степень извлечения иттрия не зависит от времени спекания и составляет 14,2–19,5 % (в среднем 16,6 %). Применение разрядно-импульсной

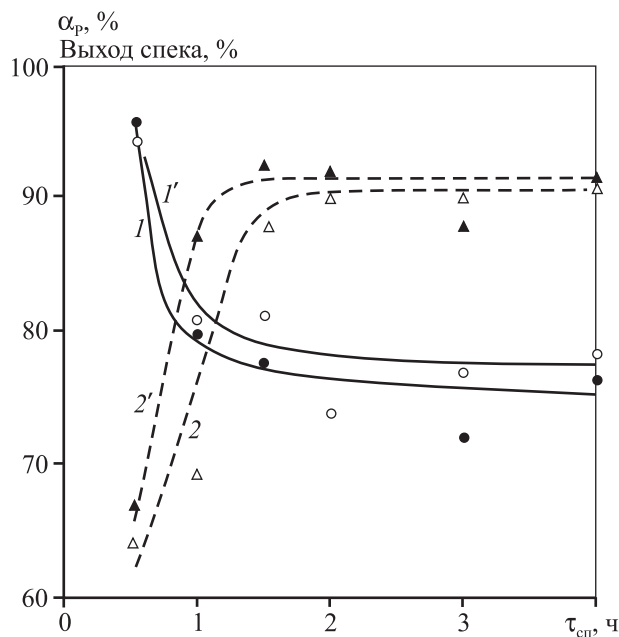


Рис. 3. Влияние продолжительности процесса спекания на выход спека (сплошные кривые) и степень извлечения фосфора в водный раствор (штриховые)

1, 2 – базовая схема рудоподготовки; 1', 2' – комбинированная

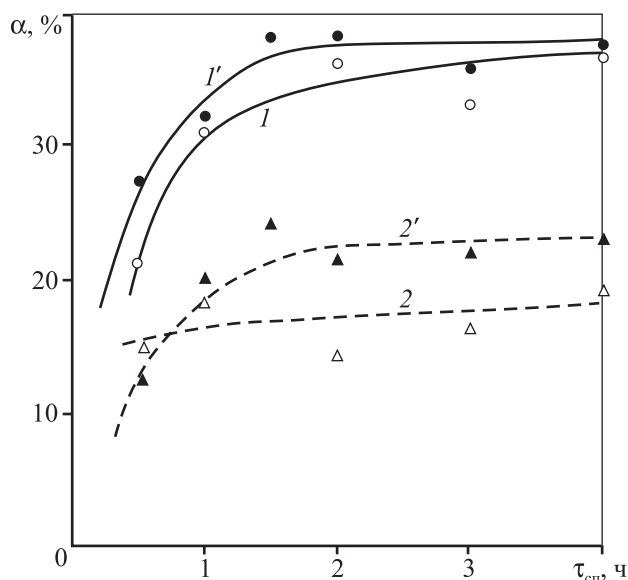


Рис. 4. Влияние продолжительности процесса спекания на извлечение лантана (сплошные кривые) и иттрия (штриховые) в кислый раствор

1, 2 – базовая схема рудоподготовки; 1', 2' – комбинированная

обработки исходной руды при комбинированной схеме рудоподготовки позволяет повысить извлечение иттрия при $\tau_{сп} = 0,5 \div 2,0$ ч на 2,8 %.

Таким образом комбинированная схема рудоподготовки дает возможность снизить продолжительность спекания не менее чем на 0,5 ч; при этом выход спека возрастает примерно на 3 % с ростом извлечения фосфора в водный раствор не менее чем на 4,2 % по сравнению с базовой технологией.

ВЫВОДЫ

1. Разрядно-импульсная обработка интенсифицирует раскрытие минеральных сростков независимо от структуры и текстуры материала, способствует выходу более мелких классов с сокращением вдвое времени механического измельчения; раскрытие является управляемым и избирательным.

2. При разрядно-импульсной обработке происходят структурно-химические и магнитно-реологические изменения, а также рост интенсивности рефлексов минералов, т.е. она является эффективным средством активации минералов редкоземельных руд.

3. В процессах обогащения редкоземельных руд использование РИО при вскрытии фосфатных концентратов и спекание с содой обеспечивают рост извлечения фосфора в водный раствор на 6–7 % с повышением степени извлечения в кислый раствор лантана и иттрия на 3,8 и 2,8 % соответственно.

4. При обогащении труднообогатимых руд РИО минеральной фазы не может выступать в качестве самостоятельного процесса, а должна включаться элементом в комбинированные технологии рудоподготовки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стрижко Л.С., Потоцкий Е.П., Бабайцев И.В. и др. Безопасность жизнедеятельности в металлургии: Учеб. пос. для вузов / Под ред. Л.С. Стрижко. М.: Металлургия, 1996.
2. Коростовенко В.В., Стрекалова Т.А. // Передовые технологии и технико-экономическая политика освоения месторождений в XXI веке: Сб. науч. тр. Красноярск: КГАЦМиЗ, 2000. С. 158–162.
3. Коростовенко В.В., Стрекалова Т.А. // Перспективные материалы, технологии, конструкции: Сб. науч. тр. Красноярск: КГАЦМиЗ, 2001. Вып. 7. С. 218–221.
4. Стрекалова Т.А. // Проблемы геологии и освоение недр: Сб. науч. тр. Томск, 2003. С. 96–97.