

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»

ТРУДЫ
XXIX МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 08 июля - 13 июля 2019 г.)
под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,
д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.

Москва - 2019



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ»

ТРУДЫ

XXIX МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА ТВЁРДОГО ТЕЛА»

(Севастополь, 08-13 июля 2019 г.)

под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,
д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г.

УДК 669.
ББК 22.38
Р15
ISBN 978-5-89671-024-0

Труды XXIX Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 08 – 13 июля 2019 г.), под редакцией заслуженного деятеля науки РФ, д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г., М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2019 г., 500с.

В рамках конференции проводилась XXIII Международная школа молодых учёных «Радиационная физика твёрдого тела».

Редакционная коллегия:

д.ф.-м.н., проф. Бондаренко Г.Г. (ответственный редактор,
Председатель Оргкомитета),
к.ф.-м.н. Дьячкова И.Г. (ученый секретарь),
Смирнова Е.В. (секретарь-координатор),
к.т.н. доцент Мамонтов А.В. (Врио директора ФГБНУ «НИИ
ПМТ»),
д.ф.-м.н., проф. Кристя В.И.,
к.ф.-м.н. Гайдар А.И.

УДК 669.
ББК 22.38
© Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2019

ISBN 978-5-89671-024-0

© Труды XXIX Международной
конференции «Радиационная физика
твёрдого тела»

ЭФФЕКТЫ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Брызгин А.А.^{1,3}, Коробейников М.В.^{1,3}, Кондратьев С.А.²,
Ростовцев В.И.²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН (630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11, M.V.Korobeynikov@inp.nsk.su)

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН (630091, Новосибирск, Красный проспект, д. 54, benevikt@mysd.ru)

³Новосибирский государственный университет (630090, Новосибирск, улица Пирогова, 2)

Введение

Минерально-сырьевой сектор России обеспечивает более 30% внутреннего валового продукта и более 70% валютных поступлений в бюджет страны. В связи с истощением существующих месторождений происходит вовлечение в разработку месторождений более труднообогатимых руд. Поэтому актуальны задачи [1] повышения полноты и комплексности использования месторождений твердых полезных ископаемых, обеспечения высокой рентабельности современного минерально-сырьевого комплекса страны и улучшения экологической ситуации в горнопромышленных регионах.

До 40% потерь ценных компонентов в процессах первичной переработки связано со сrostками и до 35% – с тонкими частицами крупностью менее 10 мкм [2]. Для обогащения применяют оборудование для тонкого (менее 20 мкм) и сверхтонкого (менее 7 мкм) измельчения [3]. Энергозатраты в процессах рудоподготовки достигают 50 кВт·ч/т и выше.

Для снижения потерь полезных компонентов в случае переработки тонковкрапленных традиционные процессы дробления и измельчения в щековых, конусных дробилках и шаровых мельницах должны быть заменены процессом селективной дезинтеграции [4-5].

Для раскрытия тонковкрапленного минерального сырья перспективными являются нетрадиционные немеханические способы разрушения, обеспечивающие селективную дезинтеграцию по межфазным границам за счет образования микротрещин и каналов пробоя в результате энергетических воздействий. Для этого применяются электрохимическая,

СВЧ-, электроимпульсная, электрогидродинамическая, электроплазменная, магнитно-импульсная и электронно-лучевая обработка, а также воздействие сверхмощными гиперударными волнами, мощными наносекундными электромагнитными импульсами и другие методы предварительной обработки минерального сырья [6-8]. Выдающийся российский ученый, член-корреспондент АН СССР И.Н. Плаксин считал [9], что одним из важнейших направлений в процессах обогащения является поиск таких энергетических воздействий, которые существенно повысят полноту и комплексность использования минерального сырья.

Результаты исследований, выполненных в ряде Институтов нашей страны, в том числе в ИЯФ СО РАН и в ИГД СО РАН [10-13], указывают на возможность повышения раскрываемости сростков труднообогатимого минерального сырья и улучшения технологических показателей его обогащения за счет предварительной электронно-лучевой обработки, которая позволяет разупрочнить минералы и горные породы.

Воздействие электронного пучка на техногенное сырьё описано в [10]. При малых плотностях тока и малой поглощенной дозе до 1 кГр (соответствует поглощённой в веществе энергии до 1 кДж/кг) основным эффектом обработки ускоренными электронами является радиационное дефектообразование без заметного изменения физических свойств вещества. При увеличении поглощенной дозы до 10 кГр возможно накопление заряда, которое может привести к электрическим пробоям.

При импульсном воздействии электронного пучка возможны повторные пробои и разряды по уже образовавшимся каналам пробоев, при этом система микротрещин может постепенно разрастаться, вызывая разупрочнение материала. Трещины проходят в том числе и по границам срастания зерен проводящих минералов и диэлектриков, что приводит к последующей селективной дезинтеграции и повышению производительности мельниц.

В работе приведены результаты комплексного исследования деформационно-прочностных свойств керновых образцов гранита, обработанных пучком электронов. Граниты являются наиболее важными породами земной коры. Исследования гранитов представляют интерес, так как эта горная порода может содержать включения соединений многих полезных элементов, таких, как Sn, W, Mo, Li, Be, B, Rb, Bi, Ta, Au.

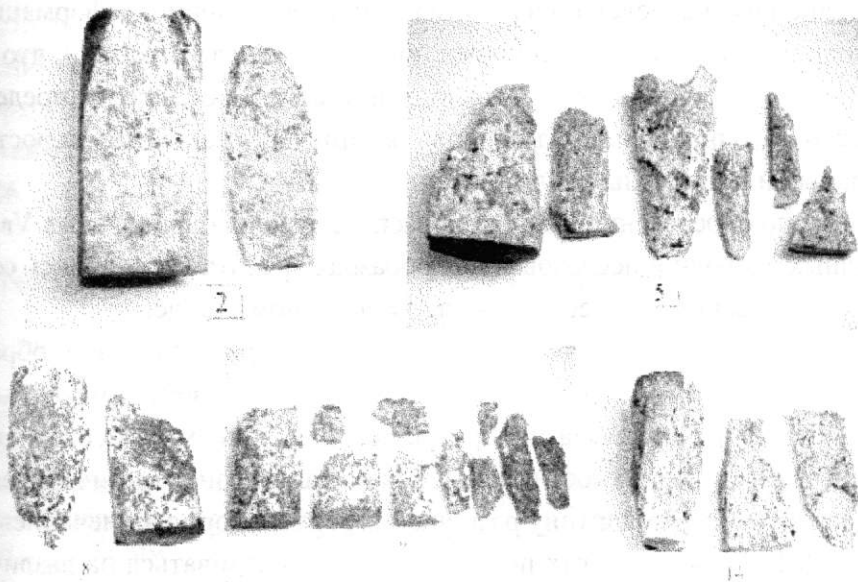


Рис.1. Фотографии образцов керна гранита после разрушения: 2 – исходного образца; 5, 8, 9 и 14 – образцов керна, обработанных потоком ускоренных электронов при дозах 5, 10, 15 и 20 кГр

Экспериментальная часть

Керновые образцы гранита испытывались в ходе испытаний на разрушение при одноосном нагружении с определением акустических характеристик в ИГД СО РАН по методике, приведенной в [14-15]. Электронно-лучевая обработка кернов осуществлялась на ускорителе ИЛУ-6 в Институте ядерной физики СО РАН [14-15] периодическим импульсным электронным пучком с энергией 2,4 МэВ, ток в импульсе 320 мА и длительность импульса 0,5 мс.

Ускорители ИЛУ [16, 17] генерируют импульсный электронный пучок, что повышает эффективность его воздействия на горные породы.

Диаметр гранитных кернов составлял 29,5 мм, длина – 61 мм. Плотность гранита – 2,6 г/см³, соответственно глубина проникновения электронного пучка с энергией 2,4 МэВ составляет всего 3 мм.

Результаты электронно-лучевой обработки гранитных кернов наглядно видны на рис. 1 – в результате разрушения давлением исходные керны разрушались на 2 части, а подвергшиеся электронно-лучевой обработке керны после разрушения давали существенно больше обломков – до 10 при дозе 15 кГр.

По характеру обломков на рис.1 видно, что поверхностная (глубина проникновения 3 мм) электронно-лучевая обработка привела к изменению структуры образца во всём его объёме.

Выполненные исследования по комплексному изучению деформационно-прочностных свойств керновых образцов гранита показали, что в результате электронно-лучевой обработки заметно изменяются предел прочности на одноосное сжатие, модуль упругости, а также скорости продольных и поперечных волн.

Расчеты по определению скоростей распространения продольных V_p и поперечных V_s волн в исследованных образцах гранита проводились согласно [18] по данным измерений на испытательном стенде.

Изменения характеристик гранита после его радиационной обработки могут быть связаны с таким фундаментальным свойством горных пород, как память, и с ее разнообразными проявлениями, обусловленными явлениями дефектности [19]. Сложность и разнообразие дефектов, характеризующих картину разрушения горных пород, отмечались в [19, 20]. Дефектность горных пород может рассматриваться на различных масштабных уровнях. Дефекты наиболее низкого уровня – это точечные дефекты кристаллической решетки – вакансии и атомы внедрения. Более высокий уровень дефектов в зернах – линейные дефекты – дислокации. Зернистая структура породы, в том числе и гранита, определяет наличие дефектов типа границ раздела зерен, отличающихся как взаимной ориентацией осей, так и физическими свойствами. В исследованиях на образцах кернов и небольших участках массива различают более высокий уровень дефектов, связанный с микро- и макротрещинами. В формирование памяти вносят вклад дефекты всех указанных уровней.

В работах Бондаренко Г.Г. и Овчинникова В.В. [21-25] было показано наличие эффекта дальнего действия при обработке металлов и сплавов пучком ионов. Было зафиксировано существование ударных волн, образующихся при торможении ионов, и проведены расчёты динамики распространения этих волн.

Мы полагаем, что и в нашем случае электронно-лучевой обработки гранитных кернов эффект дальнего действия обусловлен ударными волнами, образующимися при торможении электронного пучка в граните. Кристаллическая структура гранита позволяет ударным волнам распространяться из поверхностной зоны облучения глубоко вглубь образцов.

Ударные волны играют важную роль в механохимии – именно они обеспечивают протекание механохимических процессов.

Результаты исследований механических параметров гранита и его акустических свойств приведены в табл. 1 и 2. Увеличение поглощенной дозы до 10 кГр приводит к снижению предела прочности на сжатие с

68,33 до 35,08 МПа, а дальнейшее увеличение дозы до 20 кГр – к повышению предела прочности на сжатие. При этом изменяются модули деформации и упругости, а также коэффициент Пуассона. Если без обработки его значение составляет 0,20, то при поглощенной дозе 10 кГр – 0,26.

Таблица 1

Результаты механического и динамического тестирования кернов гранита, обработанных потоком ускоренных электронов

Величина поглощенной дозы, кГр	Размер образца, dxh, мм	Механические свойства			Динамические свойства	
		Предел прочности, МПа	Упругие статические характеристики		Атмосферные условия	
			Одноосное сжатие	Модуль деформации, ГПа	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, ГПа
0	29,5x61,0	68,33	13,19	0,19	32,01	0,20
5	29,6x56,9	67,98	9,34	0,19	30,29	0,27
10	29,6x60,0	35,08	7,04	0,16	37,98	0,26
15	29,6x60,0	57,53	10,34	0,20	37,49	0,26
20	29,6x60,0	86,29	6,12	0,17	32,75	0,25

Таблица 2

Акустические свойства керновых образцов гранита, обработанных электронным пучком

Величина поглощенной дозы, кГр	Размер образца, dxh, мм	Атмосферные условия			
		Скорость продольных волн, м/с	Скорость поперечных волн, м/с	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
0	29,5x61,0	3747	2287	32,01	0,20
5	29,6x56,9	3543	2142	30,29	0,27
10	29,6x60,0	4054	2376	37,98	0,26
15	29,6x60,0	3905	2339	37,49	0,26
20	29,6x60,0	3886	2222	32,75	0,25

Анализ данных табл. 2 показывает, что в результате воздействия электронного пучка изменяются и акустические свойства гранита. С увеличением величины поглощенной дозы до 20 кГр скорости продольных и поперечных волн сначала уменьшаются, а затем увеличиваются. Для исходного образца зерна гранита скорости продольных и попереч-

ных волн равны 3747 и 2287 м/с, для обработанного при дозе 5 кГр образца они соответственно равны 3543 и 2142 м/с. При дозе 20 кГр они равны 3886 и 2222 м/с. Необходимо отметить, что для обработанных потоком ускоренных электронов это соотношение составляет $1,654 \div 1,749$, против 1,638 для необработанного kernового образца гранита.

Изменения деформационно-прочностных характеристик, исследованных образцов гранита (табл. 1 и 2) свидетельствуют об объёмном модификации его структуры под действием электронно-лучевой обработки, подтверждая показанные на рис. 1 результаты разрушения образцов при одноосном нагружении.

Были проведены оценки энергозатрат на разрушение и дробление гранита с использованием имеющегося в ИГД СО РАН оборудования для испытаний образцов на разрушение при одноосном нагружении. Энергии разрушения и дробления (A) определялись по экспериментально полученным диаграммам «усилие – продольная деформация» (рис. 2).

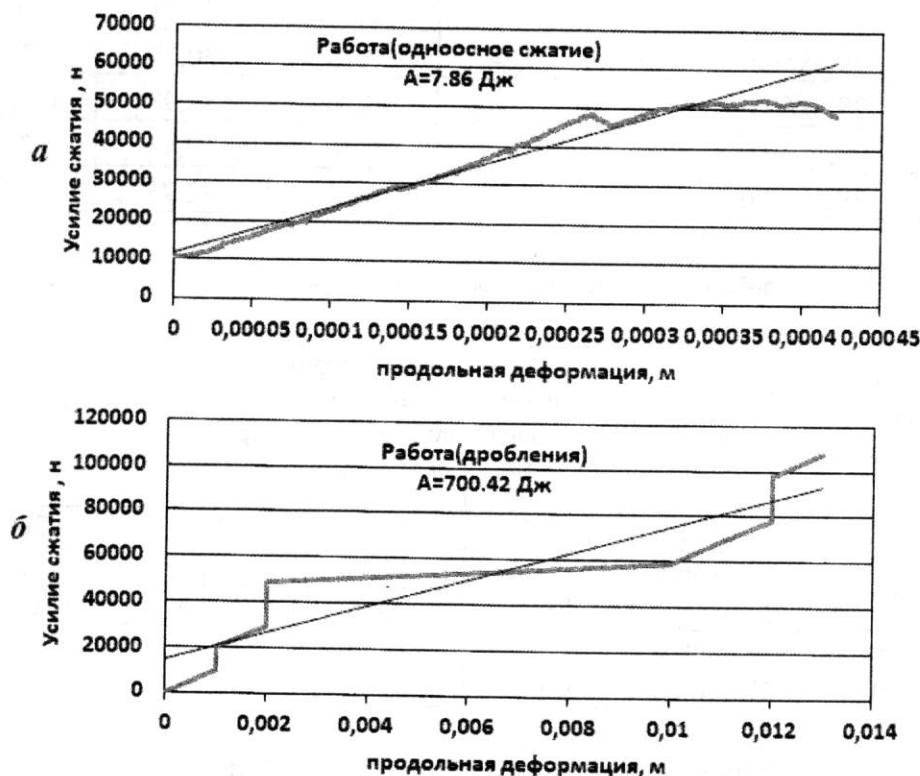


Рис.2. Диаграммы усилие – продольная деформация для исходного образца:
а – при разрушении одноосным сжатием, б – при дроблении

Таблица 3

Результаты исследований энергий разрушения и дробления образцов гранита, обработанных электронным пучком

Размер образца, dxh , мм	Поглощенная доза, кГр	Энергия, Дж	
		Разрушения сжатием	Дробления сжатием
29,5x61,0	0	7,86	700,42
29,6x56,9	5	6,36	529,74
29,6x60,0	10	3,06	470,88
29,6x60,0	15	7,40	529,74
29,6x60,0	20	22,62	784,80

В табл. 3 приведены оценки энергозатрат на разрушение и дробление на примере гранита с использованием отечественного оборудования ИГД СО РАН для испытаний образцов на разрушение при одноосном нагружении.

Анализ данных табл. 3 показывает, что энергии разрушения и дробления для гранита зависят от поглощенной образцами дозы. Предварительная обработка кернов гранита электронным пучком дозой 10 кГр позволяет снизить энергию разрушения одноосным сжатием с 7,86 до 3,06 Дж, а энергию дробления с 700,42 до 470,88 Дж. Следует отметить, что при увеличении поглощенной дозы от 10 до 20 кГр энергии разрушения и дробления увеличиваются. Это подтверждает ранее сделанный вывод о возможном упрочнении гранита при дозе более 10 кГр.

Заключение

Показано существование эффекта дальнего действия при электронно-лучевой обработке гранитных кернов диаметром 29,5 мм и длиной 61 мм – в результате воздействия импульсного электронного пучка с глубиной проникновения 3 мм происходило изменение прочностных и акустических параметров в объеме образцов. Мы полагаем, что это результат действия ударных волн, возникающих при торможении электронного пучка в веществе.

Установленная на примере гранита возможность его разупрочнения в результате воздействия электронным пучком может быть использована с целью снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке минерального сырья, содержащего породную основу в виде гранита.

Литература

1. Чантурия В.А., Вайсберг Л.А., Козлов А.П. Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. – 2014. – № 2.
2. Чантурия В.А., Козлов А.П. Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья / Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения-2017): материалы Междунар. науч. конф., Красноярск, 12-15 сентября 2017 г. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. - С. 3 - 6.
3. Чантурия В.А., Маляров П.В. Обзор мировых достижений и перспективы развития техники и технологии дезинтеграции минерального сырья при обогащении полезных ископаемых / Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья. Материалы Международного совещания Плаксинские чтения-2012, г. Петрозаводск, 10-14 сентября 2012 г. - Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. - С. 3-10.
4. Селективное разрушение минералов / В.И. Ревнивцев, Г.В. Гапонов, Л.П. Зарогатский и др.; Под ред. В.И. Ревнивцева. - М.: Недра, 1988. - 286 с.
5. Вайсберг Л.А., Загоратский Л.П. Основы оптимальной дезинтеграции минералов / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2003. - №1, С. 99-106.
6. Чантурия В.А., Бунин И.Ж. Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов // ФТПРПИ. — 2007. — № 3.
7. Чантурия В.А., Вигдергауз В.Е. Научные основы и перспективы промышленного использования энергии ускоренных электронов в обогатительных процессах // Горн. журн. — 1995. — № 7.
8. Vochkarev G.R. et. al. Prospects of electron accelerators used for realizing effective low-cost technologies of mineral processing, Proceedinds of the XX International Mineral Processing Congress: 21-26 September 1997, Aachen, Germany, Clausthal-Zellerfeld, GDMB, 1997, Vol. 1.
9. Плаксин И.Н., Шафеев Р.Ш., Чантурия В.А., Якушкин В.П. О влиянии ионизирующих излучений на флотационные свойства некоторых минералов // И. Н. Плаксин. Обогащение полезных ископаемых. Избранные труды. - М.: Наука, 1970. - С. 292 - 300.
10. Кондратьев С.А. и др. Научное обоснование и разработка инновационных технологий комплексной переработки труднообогатимых

- руд и техногенного сырья / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2014. - № 5, С. 187202.
11. Ростовцев В.И., Кондратьев С.А., Бакшеева И.И. Совершенствование обогащения медно-никелевых руд на основе энергетических воздействий / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2017. - № 5, С. 123-130.
 12. Ростовцев В.И. О роли радиационной модификации минерального сырья в процессах рудоподготовки / Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. - 2018. - Т.5. - № 1, С. 207-213.
 13. Кондратьев С.А., Ростовцев В.И., Бакшеева И.И. Исследования прочностных свойств керновых образцов горных пород с применением их обработки пучком высокоэнергетических электронов / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2016. - № 4 - С. 168-176.
 14. Кондратьев С.А., Ростовцев В.И., Бакшеева И.И. Исследования прочностных свойств керновых образцов горных пород с применением их обработки пучком высокоэнергетических электронов / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2016. - № 4 - С. 168-176.
 15. Бакшеева И.И., Бурдакова Е.А., Кулагин О.Р., Ростовцев В.И., Сиволап Б.Б., Брызгин А.А., Коробейников М.В. Модификация прочностных свойств керновых образцов горных пород при их радиационной обработке / Материалы XII Международной научно-практической конференции «Оборудование для обогащения рудных и нерудных материалов. Технологии обогащения» – Новосибирск: Сибпринт, 2016. – С. 81-97.
 16. Куксанов Н.К., Салимов Р.А. Брызгин, А. А. Ускорители электронов для промышленного применения, разработанные в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН // Успехи физических наук. - 2018. - Т. 188, № 6. - С. 672-685. - Библиогр.: 51 назв. - DOI 10.3367/UFN.2018.03.038344
 17. Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Коробейников М.В., Максимов С.А., Нехаев В.Е., Радченко В.М., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Факторович Б.Л. Радиационные технологии и оборудование // Вопросы атомной науки и техники. Серия: техническая физика и автоматизация. Выпуск 83. АО «НИИТФА» Москва 2018, с. 4-21.
 18. ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн.

19. Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. – М.: МГГУ, 2004. – 436 с.
20. Шемякин Е.И. Хрупкое разрушение горных пород // Горн. вестн. – 1998. – № 2. – С. 10-16.
21. Бондаренко Г.Г. Радиационная физика, структура и прочность твердых тел. М.: Лаборатория знаний. 2016. – 462 с.
22. Ovchinnikov, V.V., Gushchina, N.V., Mozharovsky, S.M., Kaigorodova, L.I. Low-temperature volume radiation annealing of cold-worked bands of Al-Li-Cu-Mg alloy by 20-40 keV Ar⁺ ion. 2017 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 168(1), 012067.
23. Ovchinnikov, V.V. Temperature decrease and multiple acceleration of structural and phase transformations in metastable metals and alloys under cascade-forming irradiation. Part 1 - General questions and theory. 2018 Journal of Physics: Conference Series 1115 (3), 032046.
24. Ovchinnikov, V.V. Temperature decrease and multiple acceleration of structural and phase transformations in metastable metals and alloys under cascade-forming irradiation. Part 2 - Experimental Results and Discussion. 2018 Journal of Physics: Conference Series 1115 (3), 032047.
25. Ovchinnikov, V.V. Nanoscale dynamic and long-range effects under cascade-forming irradiation. 2018 Surface and Coatings Technology 355, p. 65-83.

РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПИРИТА И ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ РУД

Брызгин А.А.^{1,4}, Коробейников М.В.^{1,4}, Кондратьев С.А.²,
Михайленко М.А.^{1,3}, Ростовцев В.И.²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН (630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 11, M.V.Korobeynikov@inp.nsk.su)

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН (630091, Новосибирск, Красный проспект, д. 54, benevikt@misd.ru)

³Институт химии твёрдого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук (Новосибирск 630128, Россия)

⁴Новосибирский государственный университет (630090, Новосибирск, улица Пирогова, 2)

Введение

Минерально-сырьевой сектор России обеспечивает более 30% внутреннего валового продукта и более 70% валютных поступлений в бюджет страны. В связи с истощением существующих месторождений происходит вовлечение в разработку месторождений более труднообогатимых руд, что ведёт к ухудшению качества добываемого сырья.

Возможный способ улучшения качества некоторых видов минерального сырья – применение радиационно-термической обработки вместо традиционного отжига.

В статье рассмотрены радиационно-термические процессы и их результаты при обработке техногенного сырья и сульфидных руд.

Рудоподготовка и отжиг минерального сырья

Цель рудоподготовки – максимально отделить пустую породу от ценных компонентов, содержащих полезные ископаемые. Наибольшие потери ценных компонентов от добычи руды до получения металла связаны с процессами обогащения полезных ископаемых и составляют от 10 до 30% [1]. Выдающийся российский ученый, член-корреспондент АН СССР И.Н. Плаксин считал и обосновал, что одна из важнейших задач – поиск энергетических воздействий, которые существенно повысят полноту и комплексность использования минерального сырья при его обогащении [2].

В [3-4] приведены результаты экспериментальных исследований по интенсификации процессов рудоподготовки и обогащения минерального сырья путем использования энергетических воздействий, показаны роль и особенности электрохимических и радиационных воздействий. Установлено, что электронно-лучевая обработка приводит к разупрочнению минерального сырья, изменению его флотационных свойств, а при наличии железосодержащих сульфидов – к усилению магнитных свойств.

Магнитное обогащение – широко используемый способ для извлечения магнитных или слабомагнитных минералов из железосодержащих и других руд, основанный на различиях в магнитных свойствах составляющих компонентов. Это самый экологически безопасный процесс обогащения, и наряду с этим также отличается высокой эффективностью.

Однако различия в магнитных свойствах большинства природных минералов недостаточно велики для их эффективного разделения, что в отдельных случаях снижает технологические показатели обогащения, особенно слабомагнитных железных руд. С целью повышения эффективности обогащения необходимо увеличение этих различий физическими, физико-химическими, и даже химическими способами.

Одним из таких процессов является обжиг, который основан на превращении слабомагнитных железосодержащих соединений в магнитные формы (магнетит или γ -гематит) в определенных условиях (окислительная, нейтральная или восстановительная среда) при повышенной температуре. Этот процесс в промышленности является основным для изменения объемных магнитных свойств железосодержащих руд. Его главные проблемы – большое энергопотребление, длительность процесса, высокая стоимость и загрязнение воздуха.

Установлено, что радиационно-термическая обработка усиливает магнитные свойства слабомагнитных минеральных соединений, это имеет большое значение для интенсификации обогащения слабомагнитных руд и разделения минералов со сходными свойствами [5-7].

Параметры радиационно-термической обработки

Радиационно-термическая обработка – это электронно-лучевая обработка при температуре, существенно (обычно на сотни градусов) превышающей комнатную. Обычно нагрев обрабатываемой продукции или образцов производится самим электронным пучком, который должен обладать достаточной для этого мощностью.

Радиационно-термическая обработка минеральных порошков различного состава и крупности производилась на мощном импульсном линейном ускорителе электронов ИЛУ-6 [8, 9] в Институте ядерной физики СО РАН. Образцы помещались непосредственно под выпускным окном ускорителя и подвергались воздействию выведенного в атмосферу интенсивного импульсного электронного пучка. Энергия электронов в пучке была 2,45 МэВ, импульсный ток 320 мА, длительность импульсов тока пучка 0,5 мс, максимальная частота повторения импульсов – 25 Гц. Длина выпускного окна ускорителя – 98 см, и пучок во время импульса сканируется вдоль окна закрытого титановой фольгой. Радиационно-термическая обработка проводилась без внешнего подогрева, нагрев образцов осуществляется электронным пучком.

Ускоритель ИЛУ-6 на котором проводились эксперименты оборудован специальной системой измерения температуры собранной на модулях FieldPoint. Термопарный модуль FieldPoint имеет входы для подключения 4-х термопар, у него в память зашиты программы работы с термопарами хромель-алюмель и платина-платинородий.

Программа управления ускорителем снабжена встроенным модулем автоматического измерения и регулировки температуры, датчиками температуры являются подключаемые термопары. Одна термопара используется как опорная, её данные используются для управления температурой образцов, и до 3-х дополнительных термопар могут быть использованы для контроля температуры в различных точках по выбору. Программа управления позволяет стабилизировать температуру образцов или вести обработку по задаваемому температурному графику.

Нагрев образцов регулируется изменением среднего тока пучка за счёт изменения частоты повторения импульсов – от максимальной частоты 25 Гц и до минимальной 0,1 Гц – при фиксированном импульсном токе пучка. Импульсный ток пучка тоже регулируется программой, но при проведении работ его лучше не менять, обычно задаётся его значение 320 мА. Рабочий диапазон импульсного тока пучка – от 80 до 420 мА при энергии 2,45 МэВ, но импульсный ток пучка отличающийся от 320 мА используются редко поскольку выпускной тракт ускорителя настроен оптимально по потерям пучка и его фокусировке для импульсного тока 320 мА и диапазона энергии 2,4-2,5 МэВ.

Для радиационно-термической обработки минерального сырья использовали простейший температурный график – нагрев до заданной температуры при близкой к максимальной мощности пучка (импульсный ток 320 мА, частота повторения импульсов 25 Гц) и выключение ускорителя при достижении заданной температуры. Далее образец

остывал до комнатной температуры. Нагрев образцов до температур 300-600°C происходил за 2-3 минуты.

Поскольку электронный пучок выводится в атмосферу, в зоне воздействия пучка генерируется озон, который может влиять на процессы, происходящие внутри обрабатываемых изделий. Зал облучения снабжён системой вытяжной вентиляции, которая обеспечивает постоянное удаление образующегося озона.

Традиционный отжиг образцов производился в Институте горного дела в печах при температурах 300-600°C на протяжении 20 минут после достижения заданной температуры, затем образец постепенно остывал.

Результаты радиационно-термической обработки содержащих арсенид оловянных продуктов

Одним из ярких примеров использования радиационно-термической обработки является возможность разделения оловянных продуктов, содержащих арсенид. Установлено, что радиационно-термическая обработка сульфидно-мышьяковистых оловянных концентратов позволяет интенсифицировать процесс их последующей магнитной сепарации. При этом в магнитную фракцию извлекается более 70% железа и около 90% мышьяка.

Были проведены исследования техногенного сырья Новосибирского оловянного комбината. Его гранулометрический состав и распределение основных элементов по классам приведены в табл. 1.

Был показан существенный рост объемной магнитной восприимчивости подвергнутого радиационно-термической обработке техногенного сырья, содержащего сульфиды железа, результаты обработки приведены в табл. 2. и табл.3 на следующей странице.

Элементный состав образцов определялся методом рентгенофлуоресцентного анализа.

Таблица 1
Гранулометрический состав техногенного сырья
Новосибирского оловянного комбината

Класс, мм	Выход, %	Содержание, %				Извлечение, %			
		Sn	Fe	S	As	Sn	Fe	S	As
+3	39,90	0,800	36,80	24,09	14,27	49,40	43,32	44,33	45,89
-3	60,10	0,544	31,60	20,08	11,17	50,60	56,68	55,67	54,11
Итого	100,00	0,646	33,51	21,68	12,41	100,00	100,00	100,00	100,00

Таблица 2

Изменение магнитной восприимчивости материала класса +3 мм

Условия радиационно-термической обработки	Магнитная восприимчивость материала класса +3 мм, плотность 3,47 г/см ³	
	Объемная, ед. СИ	Удельная, см ³ /г
Без обработки	$968,28 \cdot 10^{-5}$	$279,04 \cdot 10^{-5}$
Температура обработки		
300 °С	$1184,67 \cdot 10^{-5}$	$341,40 \cdot 10^{-5}$
450 °С	$1878,44 \cdot 10^{-5}$	$541,34 \cdot 10^{-5}$
600 °С	$3103,78 \cdot 10^{-5}$	$894,46 \cdot 10^{-5}$

Таблица 3

Изменение магнитной восприимчивости материала класса -3 мм

Условия радиационно-термической обработки	Магнитная восприимчивость материала класса -3 мм, плотность 2,95 г/см ³	
	Объемная, ед. СИ	Удельная, см ³ /г
Без обработки	$398,40 \cdot 10^{-5}$	$135,05 \cdot 10^{-5}$
Температура обработки		
300 °С	$541,33 \cdot 10^{-5}$	$183,50 \cdot 10^{-5}$
450 °С	$1490,73 \cdot 10^{-5}$	$505,33 \cdot 10^{-5}$
600 °С	$2535,69 \cdot 10^{-5}$	$859,56 \cdot 10^{-5}$

Магнитная восприимчивость исходного материала класса +3 мм составляет $968,28 \cdot 10^{-5}$ единиц СИ, после обработки при температуре 600°С она возрастает в 3,2 раза – до $3103,78 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ (см. табл. 2). Аналогично, магнитная восприимчивость исходного материала класса -3 мм составляет $541,33 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, после обработки при температуре 600°С она возрастает в 4,7 раза – до $2535,69 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ (см. табл.3).

Оказалось, что у материала крупности +3 мм селективного разделения минералов при сухой магнитной сепарации не произошло, поэтому материал был подвергнут доизмельчению до крупности -0,25 мм с целью раскрытия сростков и последующего магнитного обогащения. После доизмельчения магнитная сепарация прошла успешно и из обработанного на ускорителе ИЛУ-6 при температуре 600°С и доведенного до крупности -0,25 мм оловянного техногенного сырья был получен продукт с содержанием олова (Sn) около 5% и мышьяка (As) 0,48%. Такой концентрат соответствует показателям марки КОС-3 и может быть использован для получения свинцовисто-оловянных сплавов.

Результаты радиационно-термической обработки пирита

Оловянное техногенное сырьё имеет сложный компонентный состав, и поэтому не подходит для изучения деталей протекания процесса радиационно-термической обработки. Поэтому для исследований в качестве модельного материала был выбран пирит FeS_2 .

Оценка магнитных свойств образцов по изменению удельного магнитного момента осуществлялась в Институте горного дела СО РАН с помощью вибрационного магнитометра типа LDJ9600 (LDJ Electronic Inc., США) и измерителя магнитной восприимчивости ИМВ. Для необработанного пирита с размерами частиц 75–180 мкм удельный магнитный момент составлял $0,1846 \cdot 10^{-8} \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{г}$, а для подвергнутого радиационно-термической обработке при 400°C – $10,52 \cdot 10^{-8} \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{г}$, т.е. магнитный момент увеличился в $10,52 \cdot 10^{-8} / 0,1846 \cdot 10^{-8} \approx 57$ раз. У пирита с размерами частиц 53–75 мкм удельный магнитный момент изменился с $0,418 \cdot 10^{-8}$ до $18,134 \cdot 10^{-8} \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{г}$, т.е. в 43 раза.

Результаты рентгеноструктурного анализа пирита до и после обработки (рис. 1) показали появление в обработанных электронным пучком образцах пирита магнитных фаз Fe_2O_3 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и Fe_3O_4 в разных сочетаниях, тогда как при обычном нагревании фиксируется образование только одной фазы Fe_3O_4 [10].

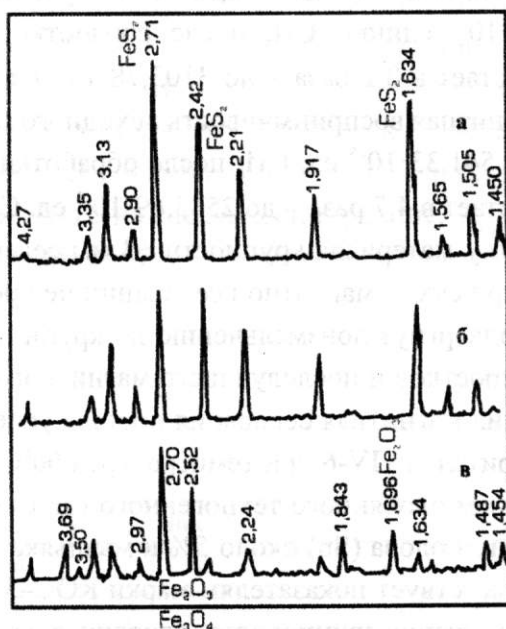


Рис. 1. Рентгенограммы пирита: исходного (а), обработанного в печи при температуре 300°C на протяжении 20 минут, (б) и подвергнутого радиационно-термической обработке – нагретого до 300°C в течение 2-3 минут и остывшего естественным образом на воздухе (в)

В радиационно-термическом отжиге наблюдается заметное снижение рабочей температуры и сокращение времени обработки.

Полученные данные согласуются с результатами исследований процессов радиационно-термического спекания ферритов [11, 12], проводившихся в ИЯФ СО РАН. Радиационно-термический синтез ферритов может проходить при значительно температурах ниже порога начала термического процесса и проходить через другие фазы, чем при термическом синтезе. Температура процесса радиационно-термического синтеза может быть на 150-300°C ниже, чем термического процесса.

Радиационно-термический синтез ферритов завершился за 20-50 минут (в отличие от термического процесса, который может длиться до 20 часов). В ряде случаев сокращение продолжительности процесса и уменьшение температуры позволяет избежать потери легких элементов при спекании [13]. При обработке смесей сложного состава, например, при использовании карбонатов вместо оксидов, продукты радиационно-термического и термического синтеза могут отличаться.

Заключение

Установлено, что радиационно-термическая обработка позволяет усилить магнитные свойства слабомагнитных минералов. Это может иметь большое значение для интенсификации обогащения слабомагнитных руд и разделения минералов со сходными свойствами.

Используя разницу в поведении различных сульфидных минералов в сложных по вещественному составу упорных рудах после их радиационно-термической обработки можно управлять технологическим процессом их обогащения, добиваясь при этом высоких показателей разделения.

Радиационно-термические процессы протекают при более низкой температуре, чем в обычном термическом процессе.

Использование радиационно-термической магнетизации и последующей сухой магнитной сепарации открывает возможности для создания эффективных, экологически чистых технологий обогащения железосодержащих сульфидных руд и техногенных продуктов.

Литература

1. Чантурия В.А. Прогрессивные технологии комплексной и глубокой переработки природного и техногенного минерального сырья / Материалы Международного совещания «Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного

- минерального сырья (Плаксинские чтения – 2014)) – Алматы, 16-19 сентября. 2014 г. – С. 5 – 6.
2. Плаксин И. Н., Шафеев Р. Ш., Чантурия В. А., Якушкин В. П. О влиянии ионизирующих излучений на флотационные свойства некоторых минералов / И. Н. Плаксин Обогащение полезных ископаемых. Избранные труды. – М.: Наука, 1970. – С. 292 – 300.
 3. Ростовцев В.И. Об эффекте интенсифицирующих энергетических воздействий на процессы переработки труднообогатимого минерального сырья // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр., 8–18 апреля 2014 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 4 т. Т.4. – Новосибирск: СГГА, 2014. – С. 163–168.
 4. Бочкарев Г.Р., Ростовцев В.И. О роли энергетических воздействий при переработке минерального сырья / Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук, № 1, Т. 2, 2014. – С. 199–206.
 5. Bockkarev G.R., et. al. Prospects of electron accelerators used for realizing effective low-cost technologies of mineral processing // Proceedinds of the XX International Mineral Processing Congress: 21-26 September 1997, Aachen, Germany / Clausthal-Zellerfeld, GDMB, 1997, Vol.1, pp.231-243.
 6. Ванг Х., Бочкарев Г.Р., Ростовцев В.И., Вейгельт Ю.П., Лу С.С. Повышение магнитных свойств железосодержащих минералов при радиационно-термической обработке // ФТПРПИ. – 2004. – № 4.
 7. Ростовцев В.И. Научное обоснование и разработка интенсифицирующих методов энергетических воздействий на твердую и жидкую фазы труднообогатимого минерального сырья: авторефер. дис. д-ра техн. наук. – Чита. – 2012. – 40 с.
 8. Куксанов Н.К., Салимов Р.А. Брызгин, А. А. Ускорители электронов для промышленного применения, разработанные в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН // Успехи физических наук. - 2018. - Т. 188, № 6. - С. 672-685. - Библиогр.: 51 назв. - DOI 10.3367/UFNr.2018.03.038344
 9. Безуглов В.В., Брызгин А.А., Власов А.Ю., Воронин Л.А., Коробейников М.В., Максимов С.А., Нехаев В.Е., Радченко В.М., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Факторович Б.Л. Радиационные технологии и оборудование // Вопросы атомной науки и техники. Серия: техническая физика и автоматизация. Выпуск 83. АО «НИИТФА» Москва 2018, с. 4-21.

10. Ростовцев В.И. Радиационно-термический метод изменения магнитных свойств минералов в обогащении минерального сырья // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр., 13–25 апреля 2015 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 3 т. Т. 3. – Новосибирск: СГУГиТ, 2015. – С. 206–210.
11. Ancharova, U.V., Mikhailenko, M.A., Tolochko, B.P., Lyakhov, N.Z., Korobeinikov, M.V., Bryazgin, A.A., Bezuglov, V.V., Shtarklev, E.A., Vlasov, A.Yu., Vinokurov, Z.S. Synthesis and Staging of the Phase Formation for Strontium Ferrites in Thermal and Radiation-Thermal Reactions. 2015 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 81(1), 012122, DOI: 10.1088/1757-899X/81/1/012122.
12. Ancharova, U.V., Mikhailenko, M.A., Tolochko, B.P., Lyakhov, N.Z., Korobeinikov, M.V., Bryazgin, A.A., Vinokurov, Z.S., Selyutin, A.G. Crystal phase structure investigation in the process of radiation-thermal transformations in systems $\text{SrO-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{SrCO}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (perovskite) and garnet $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$. 2016 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 110(1), 012110, DOI: 10.1088/1757-899X/110/1/012110.
13. Lysenko, E.N., Surzhikov, A.P., Vlasov, V.A., Nikolaev, E.V., Malyshev, A.V., Bryazgin, A.A., Korobeynikov, M.V., Mikhailenko, M.A. Synthesis of substituted lithium ferrites under the pulsed and continuous electron beam heating. 2017 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 392, c. 1-7. DOI: 10.1016/j.nimb.2016.11.042.