

УДК 622.771:622.725:535.376

ИЗБИРАТЕЛЬНАЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИЯ КИМБЕРЛИТА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Ю. М. Григорьев¹, В. П. Миронов², П. П. Тарасов^{1,3}

¹*Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова,
E-mail: tarasov-p@mail.ru, ул. Кулаковского, 48, 677000, г. Якутск, Россия*

²*Иркутский филиал Института лазерной физики СО РАН,
ул. Лермонтова, 130а, 664033, г. Иркутск, Россия*

³*Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН,
ул. Октябрьская, 1, 677000, г. Якутск, Россия*

Для реализации избирательного разрушения кимберлита, раскрытия алмаза с обеспечением природной целостности кристаллов разработан инструмент с режущими, твердость которых меньше твердости алмаза, но больше твердости связующей массы кимберлитовых минералов. Приведены результаты испытаний макета дезинтегратора неоднородного материала на мягких кимберлитах трубки Манчары. В устройстве использованы дисковые щетки из высокопрочной стальной проволоки. Макет реализует метод избирательной дезинтеграции и является прототипом для разработки ряда лабораторных, полупромышленных и промышленных дезинтеграторов. Метод может быть использован для обработки геологических проб с целью выделения из них твердой фракции.

Кимберлит, алмаз, трубка Манчары, дробление, измельчение, дезинтеграция, истирание, granulометрический анализ, минерал, минералогический анализ, лабораторный макет устройства

Приоритетными направлениями исследований в области комплексной и глубокой переработки природного и техногенного минерального сырья в России являются высокоэффективные энергосберегающие технологии рудоподготовки и селективной дезинтеграции руд сложного вещественного состава, разработки в области сухих технологий обогащения [1]. Это в полной мере относится и к технологическим процессам алмазодобычи. Необходимостью повышения эффективности и экономичности процессов обогащения обусловлены работы как по усовершенствованию традиционных методов раскрытия алмазов [2, 3] и модификации существующего оборудования для измельчения [4], так и по разработке новых методов с применением высокочастотных дробильных машин [5], СВЧ-энергии [6], химической обработки кимберлитов [7]. Большое значение в новых технологиях обогащения придается обеспечению природной целостности кристаллов, в особенности крупных размеров [8]. Применение метода истирания при измельчении горных пород позволяет значительно повысить энергоэффективность процесса дезинтеграции при сохранении природной зерновой структуры породы [9].

Анализ литературных данных по механическим свойствам составляющих кимберлиты основных минералов и связующей массы показал, что существенную часть кимберлита (до 90 %) можно перевести в продукт отвалной крупности при избирательном разрушении относительно мягкого связующего с последующим выводом его из процесса обогащения [10]. При избирательном разрушении связующей массы и ее выводе из процесса совокупность неповрежден-

ных минералов обогащается твердой фракцией, которую легко отделить, например, просеиванием. Математическое моделирование продемонстрировало возможность реализации такого процесса избирательной дезинтеграции кимберлита — разрушения связующего вещества при сохранении природной целостности твердых минералов. В математической модели закладывалось наличие инструмента, избирательно разрушающего связующую массу кимберлита. Однако среди широкого набора устройств для разрушения, измельчения руды, ее грубого и тонкого помола инструмента со свойствами избирательного разрушения связующей массы руды не оказалось [11], наиболее перспективным методом разрушения неоднородной породы стало резание.

Для реализации избирательного разрушения (дезинтеграции) требовался инструмент с режущими кромками, твердость которых меньше твердости алмаза, но больше твердости связующей массы кимберлитовых минералов. Основное условие — режцы не должны выходить из строя при контакте с твердыми минералами кимберлитов, в том числе алмазом. Первый вариант такого инструмента представлял собой набор отрезков стального каната (троса), размещенных на вращающемся валу [12]. В дальнейшем в устройстве использовались выпускаемые промышленностью дисковые щетки, применяемые для строительных работ, очистки бетонных и стальных поверхностей [13]. Лабораторные испытания простейшей модели на образцах бетона различной крепости подтвердили работоспособность метода и послужили основанием для разработки действующего лабораторного макета дезинтегратора [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Макет дезинтегратора (рис. 1а) состоит из футерованной рабочей камеры 1, вращающегося ротора с размещенным на нем рабочим разрушающим инструментом 2, который приводится в движение двигателем 3, и приемного бункера 4. Все узлы закреплены на станине 5. В макете породоразрушающий инструмент (рис. 1б) закреплен на вращающемся вертикальном валу и помещен в рабочую камеру 1, которая жестко закреплена на станине 5. Рабочая камера представляет собой усеченный конус, меньшее основание которого обращено вниз (рис. 1а). От размера диаметра основания зависит величина выпускного зазора, его выбирают исходя из диаметра разрушающего инструмента и класса крупности твердой фракции материала, который ожидается получить в процессе дезинтеграции. В макете ширина выпускного зазора составляла 10 мм. Внутренние поверхности рабочей камеры футерованы относительно мягким, но износостойким материалом — полипропиленом.

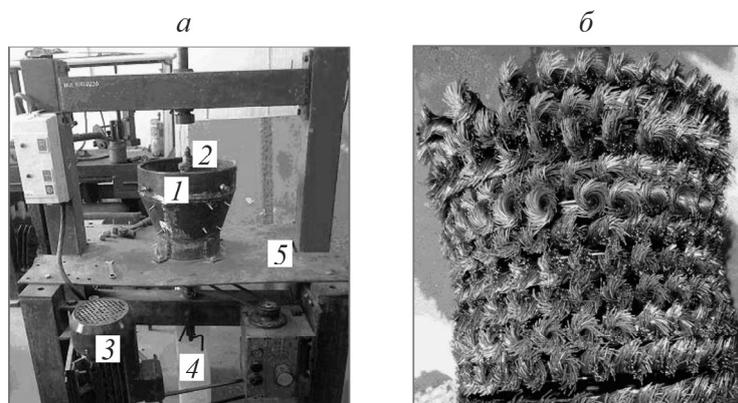


Рис. 1. Общий вид макета (а) и породоразрушающий инструмент (б): 1 — футерованная рабочая камера; 2 — ротор с размещенным на нем рабочим разрушающим инструментом; 3 — электродвигатель; 4 — приемный бункер; 5 — станина

Эксперименты по дезинтеграции проведены с использованием относительно мягких, неалмазных кимберлитов трубки Манчары, открытой в 2007 г. в Центральной Якутии. Согласно [15], породы трубки Манчары Якутской кимберлитовой провинции представляют собой порфиновый кимберлит серпентин-флогопит-апатитового состава. Порфиновые выделения — вкрапления серпентина и ксенолитов осадочных пород — имеют размеры от 0.1 до 0.5–0.7 см, трещиноваты, со следами замещения. Располагаются по породе неравномерно, структура их изменяется от мелко- до крупнопорфировой, с преобладанием последней (рис. 2).

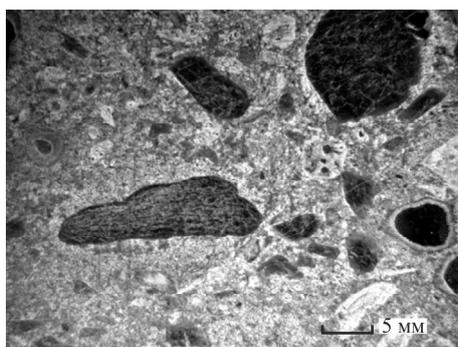


Рис. 2. Структура кимберлита

Отличительная черта пород, слагающих трубки Манчары, — повсеместно развитая карбонизация: карбоновыми прожилками пронизана вся порода. Прожилки имеют раздувы, строение их микрокристаллическое и скрытокристаллическое. Они образуют корки, каемки и различные по форме и размерам агрегаты.

Анализ литературных данных о минеральном составе кимберлитов показал, что такие породы обладают относительно низким коэффициентом крепости f по шкале Протодьяконова [10]. Экспериментальная проверка подтвердила это предположение. Коэффициент крепости рассчитывался по стандартной методике на основе испытаний материала на прочность при одноосном сжатии (ГОСТ 21153.2-84) с помощью испытательного пресса ИП-500 с измерительной системой СИ-2. Усредненный по результатам испытаний 15 образцов коэффициент крепости кимберлита составил 1.4 ед. по шкале Протодьяконова при объемной плотности породы от 2.37 до 2.43 г/см³. Таким образом, установлено что кимберлит трубки Манчары является неоднородной породой с относительно мягким связующим. Такой материал хорошо подходит для проведения экспериментов по отработке методики измельчения материалов методом истирания.

В экспериментах по дезинтеграции использованы керновые пробы кимберлита. Диаметр керна составлял 95 мм, длина кусков от 150 до 300 мм. Общая масса материала 31 кг. Испытания проводились при трех значениях времени дезинтеграции: 5, 10 и 25 мин.

Выделение крупных фракций (концентрата) и их гранулометрический анализ выполнялись с применением ситового грохота Fritsch Analysette 3 (Германия). Размеры ячеек набора сит составляли 1, 2, 6 и 10 мм. Масса дезинтегрированного материала и масса неизмельченного остатка определялись взвешиванием, время дезинтеграции фиксировалось секундомером.

Удельный расход энергии рассчитывался по формулам:

$$W = \frac{N_1 - N_2}{Q}, \quad Q = \frac{m}{t},$$

где W — удельный расход энергии, кВт·ч/т; N_1 — мощность установки при рабочей нагрузке, кВт; N_2 — мощность холостого хода установки, кВт; Q — производительность установки, т/ч; m — масса дезинтегрированного материала, т; t — время дезинтеграции, ч.

Мощность, потребляемая установкой, определялась ваттметром, на холостом ходу составила 2.376 кВт. Данные для расчета энергопотребления при различных режимах дезинтеграции и значения удельного расхода энергии приведены в таблице. Зависимости выхода продуктов дезинтеграции по классам крупности от времени обработки показаны на рис. 3.

Результаты расчета энергопотребления при различных режимах дезинтеграции

Время дезинтеграции, мин	Масса дезинтегрированного материала, кг	Мощность при рабочей нагрузке, кВт	Удельный расход энергии, кВт·ч/т
5	1.760	2.640	12.5
10	1.685	2.706	32.6
20	3.572	2.838	53.9

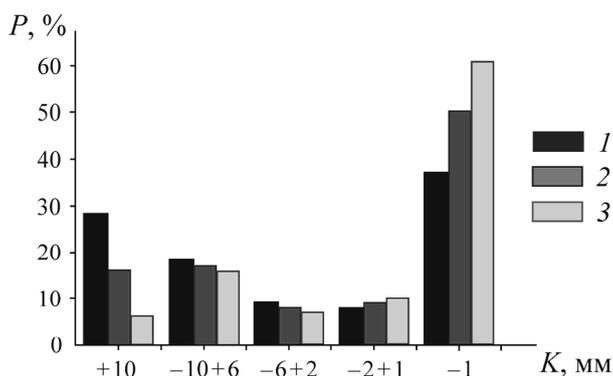


Рис. 3. Выход продуктов дезинтеграции P по классам крупности K . Время обработки: 1 — 5 мин; 2 — 10 мин; 3 — 25 мин

Как следует из таблицы и рис. 3, дезинтеграция осуществляется до тех пор, пока минимальные размеры каждой из частиц измельчаемого материала, хотя бы в одной из трех проекций, не окажутся равны или меньше выпускного зазора дезинтегратора (10 мм). Продуктом дезинтеграции в основном является класс крупности больше 1 мм, выход которого прирастает по мере уменьшения выхода класса крупности + 10 мм. В существенно меньшей мере прирастает выход класса крупности $-2 + 1$ мм. Дезинтеграция классов крупности $-10 + 6$ мм и $-6 + 2$ мм данным устройством неэффективна. Это определяется размером использованного в устройстве выпускного зазора. При достижении размера менее 10 мм кусочки кимберлита проваливаются в продуктоприемник без дальнейшего разрушения. Твердых минералов (гранат, ильменит) крупного класса ($-10 + 6$ мм) в образцах присутствовало немного, и они обнаруживались во время дезинтеграции в виде выступающих из образца особенностей (рис. 4). Распиловка отдельных округлых образцов крупной фракции (+ 10 мм) показала, что эти куски не являются мономинеральной фракцией, а представляют собой окатанные куски кимберлита с твердыми включениями, и их дезинтеграция может быть продолжена.



Рис. 4. Образец керна после 5 мин дезинтеграции

Ввиду ограниченного количества кимберлита испытания на производительность установки с непрерывной подачей материала не проводились, но исходя из результатов дезинтеграции следует, что при данных параметрах макета и крепости кимберлита производительность составляла около 21 кг/ч. На рис. 5 показаны фотографии продуктов дезинтеграции, рассортированные по классам крупности.

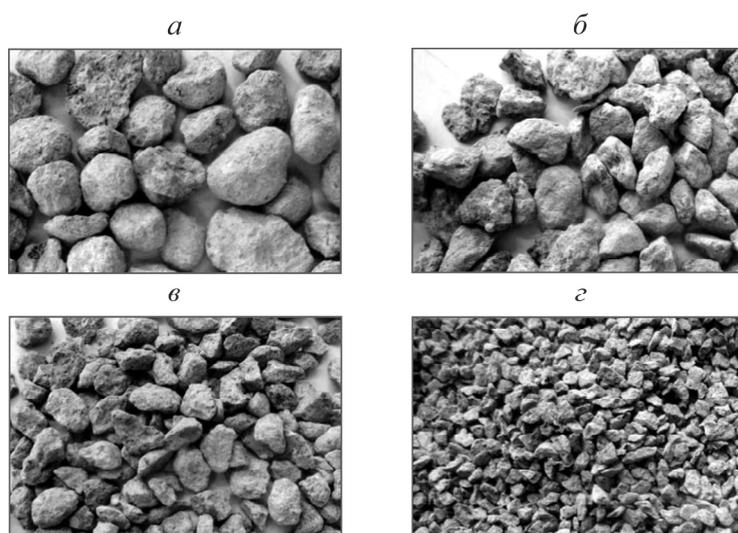


Рис. 5. Продукты дезинтеграции, рассортированные по классам крупности, мм: *а* — (+10); *б* — (-10+6); *в* — (-6+2); *г* — (-2+1)

Как следует из взаимосвязи гранулометрического состава продуктов дезинтеграции с временем обработки, существуют некоторые закономерности дезинтеграции материала указанным методом. Например, данные таблицы и рис. 3 достаточно хорошо аппроксимируются зависимостью

$$m = m_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right),$$

где m_0 — масса материала, поступившего на дезинтеграцию; m — суммарная масса дезинтегрированного материала; t — время дезинтеграции; τ — постоянная, имеющая размерность времени, которая, вероятно, зависит как от прочности и твердости материала, так и от конструкции макета: размеров выпускного зазора и общего устройства дезинтегратора.

Минералогический анализ продуктов дезинтеграции, проведенный с использованием стереоскопического микроскопа Nikon SMZ745T, показал, что среди частиц класса крупности $-2+1$ мм наблюдаются агрегаты породы (основная мелкокристаллическая масса), зерна некоторых минералов (пикроильменит, гранат), отдельные части порфировых включений (серпентин) и корки карбонатных образований (рис. 6). Как и ожидалось, серпентин сильно разрушен, зерна гранатов не имеют разрушений, пикроильменит представлен в виде как целых зерен, так и осколков с раковистым изломом. Это связано с хрупкостью данного минерала и его вторичными изменениями. Отметим, что на раскрытых минералах не обнаружено следов повреждений, характерных для минералов после их раскрытия в мельницах самоизмельчения. Сохранность природной целостности минералов увеличивается по мере роста их твердости.

Начиная с класса крупности $-6+2$ мм зерен или обломков отдельных минералов (мономинеральных фракций) не наблюдается, что может быть основанием для уменьшения выпускного зазора по крайней мере до 5 мм.

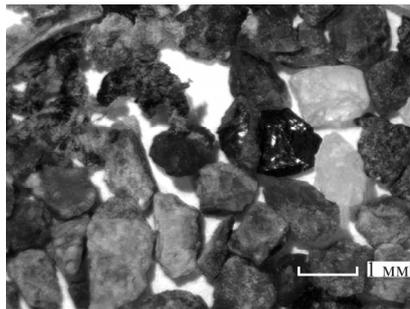


Рис. 6. Зерна минералов из продукта класса крупности $-2 + 1$ мм

Обратим внимание на форму частиц крупного ($+ 10$ мм) и мелкого классов крупности ($-2 + 1$ мм) продуктов дезинтеграции (рис. 5). Крупные частицы продукта дезинтеграции имеют форму, близкую к сферической. По мере уменьшения класса крупности форма частиц изменяется и все более приближается к угловатой (рис. 5). Изменение формы может быть критерием для определения степени раскрытия минералов твердой фракции. Чем ближе форма крупных частиц к сферической, тем менее раскрыты минералы твердой фракции. Следовательно, частицы сферической формы подлежат дальнейшей дезинтеграции.

ВЫВОДЫ

Разработано устройство для реализации избирательного разрушения кимберлита, в котором в качестве истирающего инструмента служат дисковые щетки из высокопрочной стальной проволоки. В экспериментах использованы образцы кимберлитов трубки Манчары, коэффициент крепости по шкале Протодяконова которых равен 1,4, объемная плотность меняется от 2,37 до 2,43 г/см³, структура отличается развитой карбонатизацией. Проведены опыты с вариацией времени дезинтеграции от 5 до 25 мин, гранулометрический анализ полученного продукта позволил выявить вид зависимости массы измельченного материала от времени обработки.

Установлено, что среди частиц класса крупности $-2 + 1$ мм наблюдаются раскрытые зерна отдельных минералов (пикроильменит, гранат) без видимых следов повреждений, характерных для минералов после их раскрытия в мельницах самоизмельчения. Сохранность природной целостности минералов увеличивается по мере увеличения их твердости.

Метод может быть рекомендован для обработки геологических проб с целью выделения из них твердой фракции, а также для обработки проб из россыпей с высоким содержанием глинистых компонентов, мерзлых пород, основным связующим в которых является льдистая составляющая.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В. А., Вайсберг Л. А., Козлов А. П. Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. — 2014. — № 2. — С. 3–9.
2. Прокопенко А. В., Савицкий Л. В., Григорьев Ю. М., Матвеев А. И. Изучение повреждаемости алмазов при дроблении руды трубки “Зарница” в роторной дробилке ДКД-300 // Вестн. ИрГТУ. — 2012. — № 7(66). — С. 108–112.
3. Yamov A. V., Kuznetsov I. A., Babuk A. V. New technology of coarse crushing of kimberlite ores at the concentration plant of Lomonosov ore dressing and processing enterprise, Gornyi Zhurnal (Mining Journal), 2014, No. 1. — P. 75–79.

4. **Van der Westhuyzen P., Bouwer W., Jakins A.** Current trends in the development of new or optimization of existing diamondprocessing plants, with focus on beneficiation, J. of the Southern African Institute of mining and metallurgy, 2014, Vol. 114, No. 7. — P. 537–546.
5. **Голованов А. В.** Высокочастотные машины для дезинтеграции горных пород — одно из направлений энергосбережения в процессах рудоподготовки // Горное оборудование и электромеханика. — 2015. — № 1(110). — С. 16–19.
6. **Диденко А. Н., Зверев Б. В., Прокопенко А. В.** СВЧ-разрушение и измельчение твердых пород на примере кимберлита // ДАН. — 2005. — Т. 403. — № 2. — С. 187–188.
7. **Boshoff E. T., Morkel J., Vermaak M. K. G., Pistorius P. C.** Kimberlite degradation: The role of cation type, Minerals Engineering, 2007, No. 20. — P. 1351–1359.
8. **Shor R., Weldon R., Janse (Bram) A. J. A., Breeding Ch. M., Shirey S. B.** Letsengs unique diamond proposition, Gems & gemology, 2015, Vol. 51, No. 3. — P. 280–299.
9. **Бобина А. В., Грабский А. А.** Экспериментальное исследование закономерностей рабочего процесса истирания горных пород в гироскопических измельчителях // Совр. проблемы науки и образования. — 2012. — № 6. — С. 158.
10. **Григорьев Ю. М., Миронов В. П., Яковлев Б. В.** Механическая дезинтеграция кимберлита // Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России: тр. Всерос. науч.-практ. конф. — Якутск: ИМЗ СО РАН, 2011. — С. 239–241.
11. **Борщев В. Я.** Оборудование для измельчения материалов. — Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. — 75 с.
12. **Миронов В. П., Григорьев Ю. М.** Устройство для дезинтеграции кимберлита / Пат. на полезную модель RU 114877. — Оpubл. 20.04.2012. — Бюл. № 11. Электронный ресурс: URL:http://www1.fips.ru/Archive/PAT/2012FULL/2012.04.20/INDEX_RU.HTM.
13. **Миронов В. П., Григорьев Ю. М.** Дезинтегратор неоднородного материала / Пат. на полезную модель RU 124189. — Оpubл. 20.01.2013. — Бюл. № 2. Электронный ресурс: URL:http://www1.fips.ru/Archive/PAT/2013FULL/2013.01.20/INDEX_RU.HTM.
14. **Миронов В. П., Григорьев Ю. М., Тарасов П. П.** Перспективы применения метода механической дезинтеграции кимберлита в алмазодобывающей промышленности // Горн. журн. — 2012. — № 12. — С. 63–66.
15. **Смелов А. П., Андреев А. П., Алтухова З. А. и др.** Кимберлиты трубки Манчары: новое кимберлитовое поле Центральной Якутии // Геология и геофизика. — 2010. — Т. 51. — № 1. — С. 153–159.

Поступила в редакцию 15/1 2017