

УДК 622.23.05

РАЗРАБОТКА ТЕРМОАДГЕЗИОННОГО МЕТОДА ОТБОРА И ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗЕРЕН АЛМАЗА ИЗ КОНЦЕНТРАТА КИМБЕРЛИТОВОЙ РУДЫ



П. П. ШАРИН,
зав. кафедрой,
канд. физ.-мат. наук,
psharin1960@mail.ru



М. П. ЛЕБЕДЕВ,
зав. кафедрой,
д-р техн. наук,
чл.-корр. РАН

Северо-Восточный федеральный университет
им. М. К. Аммосова, Якутск, Россия



Г. М. НИКИТИН,
зам. директора по инновациям
– руководитель Центра
инноваций и технологий,
институт «Якутнипроалмаз»,
Мирный, Россия



Г. Г. ВИНУКUROV,
ведущий научный сотрудник,
канд. техн. наук,
Институт физико-технических
проблем Севера
им. В. П. Ларионова СО РАН,
Якутск, Россия

Введение

В настоящее время алмазодобывающая отрасль является одной из высокодоходных и перспективных составляющих горно-промышленного комплекса [1–6]. Добытое алмазоносное сырье (кимберлитовую руду или продуктивные отложения россыпи) подвергают обогащению различными методами; в результате остается концентрат, из которого извлекают алмазы. При извлечении используются физические, химические и магнитные свойства как самих алмазов, так и сопутствующих им минералов и горных пород [7–12].

Обогащение является самым трудоемким этапом технологического процесса добычи алмазов. На заключительной стадии обогащения после рентгенолюминесцентной сепарации алмазоносного концентрата происходит ручной отбор зерен алмазов, характеризующийся низкой производительностью. Для повышения эффективности данной операции требуется механизация ручного труда, основанная на автоматическом извлечении зерен алмазов.

Как известно, одним из уникальных свойств алмаза является наивысшая теплопроводность среди всех твердых тел, включая

Раскрыта физическая сущность предложенного метода. Разработана опытная экспериментальная установка для исследований технологических процессов термоадгезионного отбора и извлечения алмазов из концентрата кимберлитовой руды. Установлена высокая эффективность данного метода.

Ключевые слова: кимберлитовая руда, алмазы, теплопроводность, термоадгезионный метод, канифоль, извлечение алмазов.

DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.09.12

металлы, природные минералы и горные породы [13–16]. По сравнению с зернами алмаза теплопроводность породных отделистей на 2–3 порядка меньше.

Таким образом, технология отбора и извлечения алмазов из смеси сопутствующих минералов, основанная на их различной способности передавать тепловой поток, отличается высокой избирательностью (селективностью). При этом для извлечения алмазов следует использовать их термический контакт с веществами, которые имеют высокие термоадгезионные свойства. При контакте таких веществ с алмазом селективно высокие тепловые потоки обеспечивают быстрое плавление рабочего материала с последующим отверждением и закреплением зерен алмаза. Далее возможно и целесообразно использовать механическое отделение зерен алмаза от термоадгезионного вещества со сбором готового алмазного сырья.

Целью данной работы является разработка термоадгезионного метода отбора и извлечения зерен алмаза из смеси сопутствующих минералов.

Схема теплопередачи и оценочные расчеты для обоснования термоадгезионного метода

Теплопередача является ключевым моментом предлагаемого метода извлечения зерен алмазного сырья. В работе, исходя из теплофизических свойств алмаза и сопутствующих минералов, осуществлены оценочные расчеты тепловых потоков для сепарации минеральных частиц.

Для сравнения ниже приведена величина теплопроводности алмаза, металлов, кимберлита, осадочных пород и минералов, Вт/м·К [13–16].

Алмаз	1001–2300
Серебро	430
Медь	401
Золото	320
Железо	92

Сталь	47
Олово	54
Кимберлит	2,1
Осадочные породы кимберлитовой трубки	2,3–2,5
Кварц	8,0
Гранит	2,4
Базальт	1,3
Оливин	5,07
Полевой шпат	0,71

Как видно, теплопроводность алмаза значительно превышает такую у кимберлита, других минералов и осадочных пород кимберлитовой трубки, что обеспечивает высокую селективность термоадгезионного извлечения алмазных зерен.

В работе для оценочных расчетов рассматривается теплопередача в схеме «нагревательный элемент — алмаз (минерал) — термоадгезионное вещество» (рис. 1, а). Температуры нагревательного элемента и термоадгезионного вещества T_2 и T_1 предполагаются постоянными, это возможно регулированием в технологических устройствах. Тогда, как видно из схемы, основной характеристикой теплопередачи является теплопроводность зерна алмаза или сопутствующего минерала.

В оценочных расчетах можно использовать формулу количества тепла, проходящего через алмаз, полученную из закона Фурье [16, 17]:

$$Q = \frac{\lambda S dT}{l} f\left(\frac{r}{R}\right), \quad (1)$$

где Q — передаваемое количество теплоты, Дж; S — поперечное сечение контакта частицы, m^2 ; t — продолжительность теплопередачи, с; dT — разность температур, $dT = T_2 - T_1$; l — продольный размер зерна, м; λ — коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

Функция $0 \leq f(r/R) \leq 1$ вводится как характеристика формы частицы и учитывает растекание теплового потока, проходящего через контакт (r , R — характерные размеры контакта и попереч-

ного сечения частицы). Для упрощения оценочные расчеты проведены при допущении $f(r/R) \rightarrow 1$ и предположения изометричности зерен $R \approx l$.

Предлагаемая схема извлечения алмазных зерен предполагает движение слоя термоадгезионного вещества на транспортной ленте. Тогда основные технологические характеристики можно оценить по нижеследующим выражениям (2)–(3).

Скорость движения ленты с термоадгезионным веществом:

$$V = \frac{l}{t}, \quad (2)$$

масса расплавленного термоадгезионного вещества:

$$m = \frac{Q}{k}, \quad (3)$$

где k — удельная теплота плавления термоадгезионного вещества.

На рис. 1, б представлены результаты расчета количества теплоты для алмазного зерна. Как следует из формулы (1), тепловой поток линейно возрастает с ростом разницы температур, а также с повышением теплопроводности алмазной частицы. Количество тепла, проходящее через алмаз, уменьшается по обратной зависимости от размера зерна (см. рис. 1, б).

Как видно из формулы (1), количество тепла через алмазную частицу на 2–3 порядка выше, чем через сопутствующий минерал кимберлитовой породы; это обосновывает предлагаемую схему отбора алмазного сырья. Высокой теплопроводностью алмаза обусловлено быстрое селективное расплавление слоя термоадгезионного вещества при движении ленты (см. рис. 1, а).

Разработка опытной установки термоадгезионного отбора и извлечения алмазного сырья

Для проверки работоспособности, определения параметров и оценки функциональных характеристик предложенного способа разделения и поштучного извлечения зерен алмазов из смеси сопутствующих минералов был разработан экспериментальный

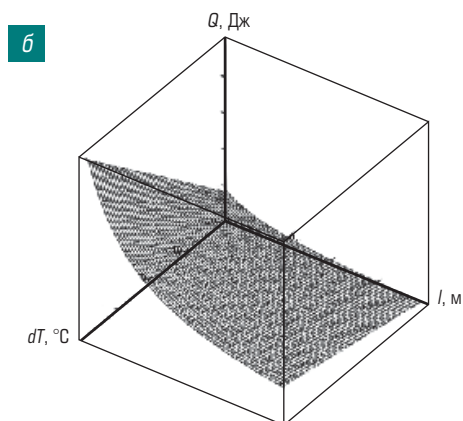
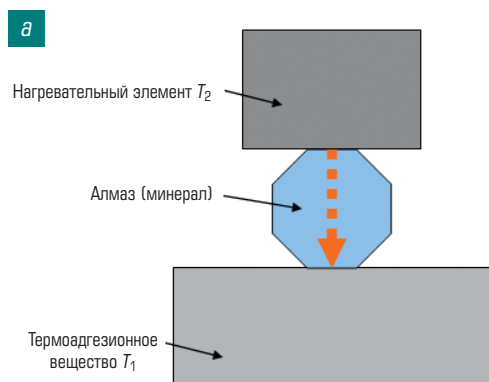


Рис. 1. Схема теплопередачи термоадгезионного метода (а) и расчет теплового потока в алмазе (б); $\lambda = 1000$ Вт/(м·К), $t = 0,05$ с, $S = 1$ мм²

стенд, представляющий собой одноканальный лабораторный макет сепаратора.

Установка состоит из следующих устройств: бункера с вибропитателем, транспортной ленты, блока разделения и извлечения зерен алмазов с роликом-нагревателем, блока нанесения и обновления слоя термоадгезионного вещества, отсекателя для съема зерен алмаза и двух приемных бункеров, соответственно, для сбора зерен алмазов и пустой породы (рис. 2).

Бункер с вибропитателем обеспечивает одноканальную поштучную подачу зерен концентрата размерности $-3+1$ мм (см. рис. 2, а, б). Далее для подачи упорядоченного потока монослоя зерен концентрата рабочая поверхность резиноканевой транспортной ленты имеет продольные желоба (см. рис. 2, в). Желоба позволяют осуществлять подачу зерен смеси минералов параллельными упорядоченными потоками — каналами. Зерна независимо от их форм и размеров располагаются вдоль ленты в центре желобов (см. рис. 2, г).

В продольном желобе наносится тонкий слой термоадгезионного вещества (см. рис. 2, в). В качестве легкоплавкого термоадгезионного вещества использовали канифоль, композиции на ее основе и парафин. Анализом литературных данных и эмпирически выявлено, что при температуре 68 ± 5 °С тонкий слой канифоли проявляет высокие адгезионные свойства к алмазу, прочно прилипает к его поверхности (см. ниже).

Основным элементом блока разделения и извлечения зерен алмазов является ролик-нагреватель, вращающийся навстречу потоку зерен концентрата (см. рис. 2, г). Конструктивно ролик-нагреватель изготовлен в виде подшипника скольжения с наружным диаметром 16,2 мм, внутри которого помещена нагревательная спираль из нихромовой проволоки. Функция ролика-нагревателя заключается в генерации и контактной передаче тепла потоку зерен, которое далее переносится к тонкому слою термоадгезионного вещества транспортной ленты.

Ролик-нагреватель располагают так, чтобы его рабочая контактная поверхность находилась вдоль горизонтальной оси жело-

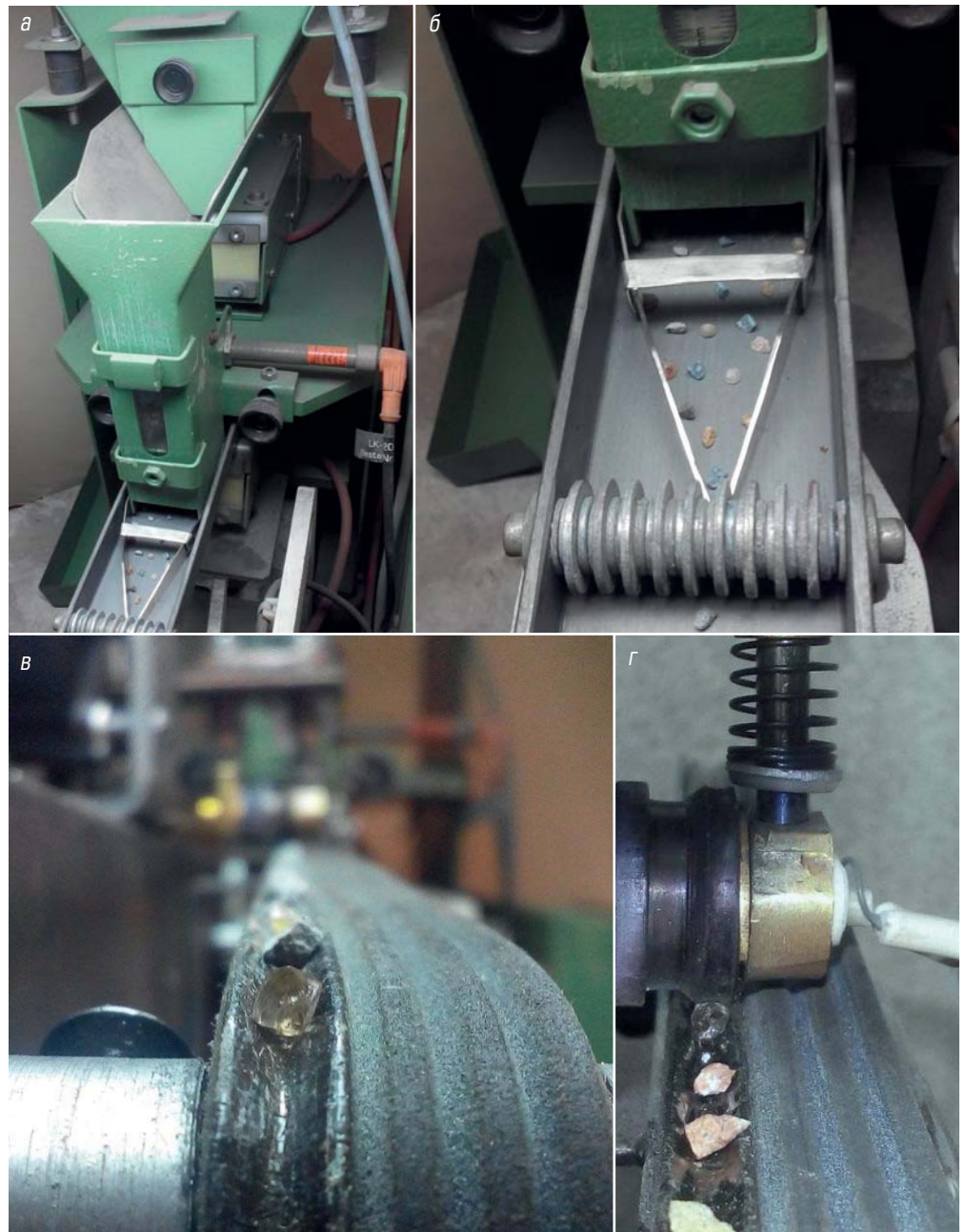


Рис. 2. Установка для термоадгезионного извлечения алмазов: а — бункер с питателем; б — вибропитатель; в — транспортная лента с желобами; г — ролик-нагреватель

бов. Это обеспечивает надежный тепловой контакт между ним и поверхностью зерен минералов, движущихся на ленте транспортера. При этом округленная форма контактного края ролика способствует созданию одинаковой контактной площади для потока тепла от нагревателя к поверхности зерен минералов, независимо от их формы и рельефа поверхности.

При эксплуатации установки под алмазом, теплопроводность которого на 2–3 порядка превышает теплопроводность других минералов, происходит расплавление термоадгезионного вещества с закреплением зерен алмаза в желобах транспортной ленты.



Рис. 3. Извлеченные зерна алмаза (а) и смесь кимберлитовых минералов (б)

Зерна других минералов вследствие их низкой теплопроводности при заданной температуре ролика-нагревателя и скорости движения транспортной ленты не расплавляют под собой термоадгезионный слой; они далее транспортируются лентой и сбрасываются в приемник пустой породы.

При проведении экспериментов нанесение и обновление слоя термоадгезионного вещества на желобах транспортной ленты осуществлялось вручную. Для нанесения тонкого слоя расплавленной в термической ванне канифоли использовалась кисточка с короткими жесткими щетинами.

Для механизации нанесения слоя канифоли на поверхность желобов транспортной ленты разработано дополнительное механическое устройство из термованны расплавления канифоли и вращающейся вокруг своей оси кисточки-ролика. Кисточка-ролик частично утоплена в расплавленную канифоль и для равномерного нанесения тонкого слоя рабочий край кисточки имеет форму, повторяющую поперечное сечение желоба транспортной ленты.

Экспериментальное исследование термоадгезионного отбора и извлечения алмазных зерен

В экспериментальных исследованиях процессов отбора и извлечения алмазов из обогащенных концентратов использованы образцы алмазов размерно-весовой группы $-3+1$, относящихся к категории технических. Образцы в количестве 13 ед. (рис. 3, а) были предоставлены производственным предприятием ООО «Сахадаймондтуулс» (г. Якутск), которое занимается изготовлением алмазных инструментов. В качестве сопутствующих минералов, содержащихся в алмазном концентрате, была использована смесь минералов с зернами кимберлита, предоставленная АК «АЛРОСА» (см. рис. 3, б).

Среди факторов, влияющих на эффективность разработанного способа отбора и извлечения алмазов, помимо температуры плавления, является прочность контакта термоадгезионного вещества с алмазом при прилипанию. Это обеспечивает надежность закрепления зерен алмаза в желобах транспортной ленты

(см. рис. 2, в, г); преждевременное выпадение драгоценных зерен должно быть исключено. Поэтому в работе проведены исследования прочности адгезии контактов «алмаз-чистая канифоль» и «алмаз-композиции на основе канифоли». При измерениях использовался образец природного алмаза, одна поверхность которого была отполирована на гранильном станке. Испытания на прочность проведены методом нормального отрыва после отвердевания слоя термоадгезионного вещества на поверхности алмаза при комнатной температуре.

Результаты исследований прочности контактов приведены в **таблице**. Из нее видно, что, хотя парафин прилипает к алмазу при температуре на $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже чем у канифоли, прочность его прилипания к гладкой поверхности алмаза примерно в 2 раза ниже, чем у канифоли. Композиции канифоли с пчелиным воском и парафином также имеют меньшую температуру прилипания к алмазу, но прочность их прилипания к алмазу на несколько десятков процентов ниже, чем у чистой канифоли. Таким образом, для предлагаемого способа отбора и извлечения алмазных зерен в качестве термоадгезионного вещества предпочтительным является использование чистой канифоли.

Как показали результаты экспериментов, при скорости движения транспортной ленты 50 мм/с оптимальная температура ролика-нагревателя составляет $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом обеспечивается надежное закрепление на транспортной ленте всех зерен алмаза независимо от их геометрической формы и размеров, характера расположения на желобе. В то же время ни один образец зерен сопутствующих минералов не закрепился на желобе ленты. Вследствие низкой теплопроводности сопутствующих минералов расплавление термоадгезионного слоя практически не происходит.

При скорости транспортной ленты 50 мм/с производительность опытной установки термоадгезионного отбора и извлечения алмазов составила 300 зерен/мин (18000 зерен/ч), или 18 г/мин ($1,08\text{ кг/ч}$). Установлено, что увеличение скорости транспортной ленты в два раза (до 100 мм/с) повышает вдвое и производитель-

Прочность контактов «алмаз–термоадгезионное вещество»

Термоадгезионное вещество	Температура плавления и прилипания к алмазу, °С	Прочность контакта	
		кгс/мм ²	МПа
Канифоль (сосновая), 100 %	68±5	1,29	12,65
Канифоль + пчелиный воск (50 % + 50 %)	64±5	0,732	7,18
Канифоль + парафин (50 % + 50 %)	60±4	0,701	6,87
Парафин, 100 %	55±5	0,830	6,26

ность установки. При этом оптимальная температура ролика-нагревателя, необходимая для надежного закрепления зерен алмаза в желобах транспортной ленты, тоже больше, составляя 350 °С.

Таким образом, экспериментально установлена высокая эффективность разработанной опытной установки термоадгезионного отбора и извлечения алмазов; наблюдается надежное прилипание зерен алмаза к слою канифоли, нанесенному на поверхность транспортной ленты.

Основные характеристики опытной установки при оптимальных режимах работы с концентратом размерности –3 + 1 мм приведены ниже.

<i>Подача материала</i>	<i>Поштучная, среднее расстояние между зернами 10–11 мм</i>
<i>Длина развернутой транспортной ленты, мм</i>	1000
<i>Скорость транспортной ленты, мм/с</i>	50
<i>Толщина слоя канифоли на поверхности желоба, мм</i>	0,5–0,9
<i>Наружный диаметр ролика-нагревателя, мм</i>	16,2
<i>Температура контактной поверхности ролика-нагревателя, °С</i>	250
<i>Частота вращения ролика-нагревателя, оборот/мин</i>	59
<i>Производительность, ед. зерна/ч</i>	≥18000
<i>Производительность при средней массе одного зерна 0,06 грамм, кг/ч</i>	1,08
<i>Извлечение (надежное прилипание зерен алмаза к слою канифоли, нанесенному на поверхность желоба), %</i>	100

На основе результатов проведенных экспериментов уточнены технологические параметры предлагаемого термоадгезионного способа отбора и извлечения алмазов из смеси зерен сопутствующих минералов. Используя экспериментальные данные и соотношения подобия из теории теплообмена [17], можно преобразовать формулу (2) для скорости движения транспортной ленты V как функцию от температуры ролика-нагревателя T :

$$V(T) = \frac{l_3(T - T_{пл})}{t_3(T_2 - T_{пл})} \quad (4)$$

где l_3 — размер зерна алмаза, $l_3 = 3$ мм; t_3 — время, необходимое для расплавления термоадгезионного слоя, $t_3 = 0,033$ с; $T_{пл}$ — температура плавления термоадгезионного вещества,

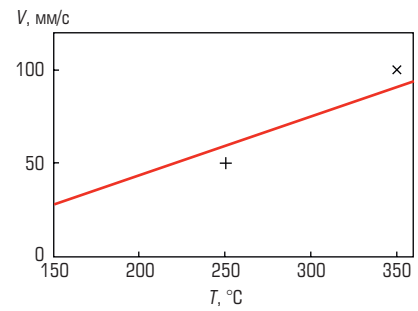


Рис. 4. Зависимость скорости движения ленты с термоадгезионным слоем от температуры ролика-нагревателя T (линия – расчет, маркеры – эксперимент)

$T_{пл} = 68$ °С; T_2 — максимальная температура ролика-нагревателя, $T_2 = 250$ °С.

На рис. 4 приведена линейная зависимость (4) скорости движения транспортной ленты от температуры нагревателя T . На графике маркерами обозначены экспериментальные данные, полученные на опытной установке термоадгезионного извлечения. Как видно из графика, при повышении температуры ролика-нагревателя до 350 °С скорость ленты, необходимую для плавления термоадгезионного вещества, можно увеличить до ~100 мм/с. Сравнением с маркерами установлено, что результаты оценочных расчетов удовлетворительно согласуются с контрольными экспериментальными данными.

На разработанный метод авторами получен патент РФ на изобретение [18].

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований обоснован и предложен термоадгезионный метод отбора и извлечения зерен алмаза из смеси сопутствующих минералов, предназначенный для повышения эффективности сортировки алмазов при окончательной доводке обогащенного концентрата кимберлитовой руды, прошедшего рентгенолюминесцентную сепарацию.

Разработана опытная экспериментальная установка для лабораторных исследований технологических процессов термоадгезионного отбора и извлечения зерен алмаза из концентрата кимберлитовой руды; изучением прочности контактов термоадгезионных веществ с алмазом установлено, что в качестве термоадгезионного вещества предпочтительным является использование чистой канифоли.

Экспериментально подтверждена высокая избирательность и эффективность термоадгезионного метода отбора и извлечения зерен алмаза с производительностью одного канала опытной установки 18000–36000 зерен/ч; определены технологические режимы установки: температура ролика-нагревателя 150–350 °С; толщина слоя канифоли 0,5–0,9 мм; скорость движения транспортной ленты 30–100 мм/с.

Библиографический список

1. Милашев В. А. Алмазы российского Заполярья // Горный журнал. 2013. № 11. С. 47–51.
2. Shirey S. B., Harris J. W., Richardson S. H., Fouch M. J., James D. E., Cartigny P., Deines P., Viljoen F. Diamond Genesis, Seismic Structure, and Evolution of the Kaapvaal-Zimbabwe Craton // *Science*. 2002. Vol. 297. P. 1683–1686.
3. Banas A., Stachel Th., Muehlenbachs K., McCandless T. E. Diamonds from the Buffalo Head Hills, Alberta: Formation in a non-conventional setting. *Lithos*. Elsevier, 2007. P. 199–213. doi: 10.1016/j.lithos.2006.07.001
4. Tappert R., Tappert M. C. *Diamonds in Nature: a guide to rough diamonds*. — Springer, 2011, — 142 p.
5. Howell D. Strain-induced birefringence in natural diamond: a review // *European Journal of Mineralogy*. 2012. Vol. 24. P. 575–585.
6. Мухин П. А., Рю Г., Франческини Д. Поиски, разведка и добыча алмазов в прибрежной зоне шельфа центральной части Намибии // Горный журнал. 2015. № 1. С. 85–97.
7. Pastewka L., Moser S., Gumbsch P., Moseler M. Anisotropic mechanical amorphization drives wear in diamond. // *Nature Materials*. 2011. Vol. 10(1). P. 34–38. doi: 10.1038/nmat2902
8. Maréchal A., Rouger N., Crebier J.-C., Pernot J., Koizumi S., Teraji T., Gheeraert E. Model implementation towards the prediction of J(V) characteristics in diamond bipolar device simulations // *Diamond and Related Materials*. 2014. Vol. 43. P. 34–42.
9. Gatto Monticone D., Quercioli F., Mercatelli R., Soria S., Borini S., Poli T., Vannoni M., Vittone E., Olivero P. Systematic study of defect-related quenching of NV luminescence in diamond with time-correlated single-photon counting spectroscopy // *Phys. Rev*. 2013. Vol. 88. P. 155–201.

10. Дементьев В. Е., Войлошников Г. И., Кононко П. В. Совершенствование способов извлечения драгоценных металлов и алмазов из минерального сырья // Горный журнал. 2015. № 9. С. 28–32. doi: 10.17580/gzh.2015.09.05
11. Fedorov I. I., Chepurov A. A., Dereppe J. M. Redox conditions of metal-carbon melts and natural diamond genesis // *Geochemical Journal*. 2002. Vol. 36. P. 247–253.
12. Чантурия В. А., Чаадаев А. С., Двойченкова Г. П., Островская Г. Х., Трофимова Э. А. Эмульсионный метод очистки алмазосодержащих концентратов липкостной и пенной сепарации от органических примесей // Горный журнал. 2012. № 12. С. 79–83.
13. Wei L., Kuo P. K., Thomas R. L., Anthony T. R., Banholzer W. F. Thermal conductivity of isotopically modified single crystal diamond // *Phys. Rev. Lett*. 1993. 70. P. 3764.
14. Шварцман Ю. Г. Тепловое состояние литосферы Зимнебережного алмазосносного района // Геодинамика, магнетизм, седиментогенез и минерация севера-запада России: матер. всеросс. конф. — Петрозаводск, 2007. С. 436–439.
15. Дортман Н. Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. — М.: Недра, 1984. — 455 с.
16. Бухмиров В. В., Ракутина Д. В., Солнышкова Ю. С. Справочные материалы для решения задач по курсу «Тепломассообмен». — Иваново: Ивановский государственный энергетический университет, 2009. — 102 с.
17. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. — М.: Наука, 1987. — 423 с.
18. Патент № 2546702 РФ. Способ сепарации алмазосодержащих смесей минералов / А. М. Тимофеев, П. П. Шарин, М. П. Лебедев, Р. Г. Ноговицын; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10. **ГЖ**

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 9, pp. 59–64
 DOI: <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.09.12>

Thermal-adhesion method to pick and extract diamond grains from kimberlite concentrate

Information about authors

P. P. Sharin¹, Head of a Chair, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, psharin1960@mail.ru
M. P. Lebedev¹, Head of a Chair, Doctor of Engineering Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences
G. M. Nikitin², Deputy Director of Innovation — Head of the Center for Innovation and Technology
G. G. Vinokurov³, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹ Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia
² Yakutniproalmaz Institute, Mirny, Russia
³ Lomonosov Institute of Physico-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

Abstract

This research aims to develop a thermal-adhesion method of automated extraction of diamond grains from kimberlite concentrate after X-ray fluorescent separation. The method is based on the very large difference between thermal conductivities of diamonds and associate minerals in concentrates. A pilot plant has been designed to examine production processes of thermal-adhesion picking and extraction of diamond grains from kimberlite ore concentrate. Based on the analysis of strength of contact between thermal-adhesive substances and diamonds, it is recommended to use pure colophony as the thermal-adhesive substance. High selectivity and efficiency of the developed method for thermal-adhesion picking and extraction of diamond grains has experimentally been proved. It is found that diamond grains securely stick to colophony layer applied to special launders on the surface of conveyor belt. Extraction capacity per one launder of the pilot plant makes 18 000–36 000 grains/hour. Based on the experimental research, the pilot plant process variables are developed as: heater-roller temperature 150–350 °C; colophony layer thickness 0.5–0.9 mm; conveyor belt velocity 30–100 mm/s. The developed method of thermal-adhesion extraction of diamonds from concentrates is secured by the patent of the Russian Federation.

Keywords: kimberlite ore, diamonds, thermal conductivity, thermal-adhesion method, colophony, diamond extraction.

References

1. Milashev V. A. Diamonds of Russian Polar Region. *Gornyi Zhurnal*. 2013. No. 11. pp. 47–51.
2. Shirey S. B., Harris J. W., Richardson S. H., Fouch M. J., James D. E., Cartigny P., Deines P., Viljoen F. Diamond Genesis, Seismic Structure, and Evolution of the Kaapvaal-Zimbabwe Craton. *Science*. 2002. Vol. 297. pp. 1683–1686.
3. Banas A., Stachel Th., Muehlenbachs K., McCandless T. E. Diamonds from the Buffalo Head Hills,

Alberta: Formation in a non-conventional setting. *Lithos*. Elsevier, 2007. pp. 199–213. doi: 10.1016/j.lithos.2006.07.001

4. Tappert R., Tappert M. C. *Diamonds in Nature: a guide to rough diamonds*. Springer, 2011. 142 p.
5. Howell D. Strain-induced birefringence in natural diamond: a review. *European Journal of Mineralogy*. 2012. Vol. 24. pp. 575–585.
6. Mukhin P. A., Ryu G., Francheschini D. Offshore diamond exploration and mining in Central Namibia. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 1. pp. 85–97.
7. Pastewka L., Moser S., Gumbsch P., Moseler M. Anisotropic mechanical amorphization drives wear in diamond. *Nature Materials*. 2011. Vol. 10(1). pp. 34–38. doi: 10.1038/nmat2902
8. Maréchal A., Rouger N., Crebier J.-C., Pernot J., Koizumi S., Teraji T., Gheeraert E. Model implementation towards the prediction of J(V) characteristics in diamond bipolar device simulations. *Diamond and Related Materials*. 2014. Vol. 43. pp. 34–42.
9. Gatto Monticone D., Quercioli F., Mercatelli R., Soria S., Borini S., Poli T., Vannoni M., Vittone E., Olivero P. Systematic study of defect-related quenching of NV luminescence in diamond with time-correlated single-photon counting spectroscopy. *Physical Reviews*. 2013. Vol. 88. pp. 155–201.
10. Dementev V. E., Voyloshnikov G. I., Kononko R. V. Improvement of methods for recovery of precious metals and diamonds from minerals. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 9. pp. 28–32. doi: 10.17580/gzh.2015.09.05
11. Fedorov I. I., Chepurov A. A., Dereppe J. M. Redox conditions of metal-carbon melts and natural diamond genesis. *Geochemical Journal*. 2002. Vol. 36. pp. 247–253.
12. Chanturiya V. A., Chaadaev A. S., Dvoychenkova G. P., Ostrovskaya G. Kh., Trofimova E. A. Emulsion method of purification of diamond containing adhesiveness and foam separation concentrates from the organic impurities. *Gornyi Zhurnal*. 2012. No. 12. pp. 79–83.
13. Wei L., Kuo P. K., Thomas R. L., Anthony T. R., Banholzer W. F. Thermal conductivity of isotopically modified single crystal diamond. *Physical Reviews Letters*. 1993. Vol. 70. pp. 3764.
14. Shvartsman Yu. G. Thermal state of Zimneberezhnyy diamond-bearing region lithosphere. *Geodynamics, magnetism, sedimentogenesis and minerageny of Russian North-West: materials of All-Russian conference*. Petrozavodsk, 200. pp. 436–439.
15. Dortman N. B. Physical properties of rocks and minerals. Moscow: Nedra, 1984. 455 p.
16. Bukhmirov V. V., Rakutina D. V., Solnyshkova Yu. S. References for the solving of «Heat and mass transfer» course problems. Ivanovo: Ivanovo State Energetic University, 2009. 102 p.
17. Sedov L. I. Methods of similarity and dimensionality in mechanics. Moscow: Nauka, 1987. 423 p.
18. A. M. Timofeev, P. P. Sharin, M. P. Lebedev, R. G. Nogovitsyn. *Method of separation of diamond-bearing mixtures of minerals*. Patent RF, No. 2546702. Published: 10.04.2015. Bulletin No. 10.