

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНО-ХИМИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Анашкина Н.Е.¹, Бунин И.Ж.¹, Хачатрян Г.К.²

¹ФГБУН Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН), Москва, Россия, bunin_i@mail.ru

²ФГБУ Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ЦНИГРИ), Москва, Россия

В настоящее время россыпные алмазоносные промышленно значимые месторождения Северо-Востока Якутии разрабатываются с применением методов гравитационной, магнитной, рентгенолюминесцентной и жировой сепарации. Проблемы обогащения этих месторождений связаны с низкой долей люминесцирующих алмазов, а также повышенным содержанием железистых кристаллов и индивидов с высокими содержаниями включений, что влияет на гидрофобность алмаза. В России и за рубежом проводится широкий комплекс исследований по использованию нетрадиционных (немеханических) высокоэнергетических методов воздействия на минералы и минеральные суспензии с целью повышения контрастности физико-химических и технологических свойств минералов, как следствие, эффективности разделения минеральных компонентов при обогащении руд сложного вещественного состава. В процессах переработки алмазосодержащего сырья актуальной задачей является разработка новых эффективных методов повышения качества концентратов и сохранности кристаллов алмазов за счет увеличения контрастности гидрофобных, липофобных, люминесцентных свойств алмазов и минералов породы [1].

В докладе представлены результаты комплексных исследований механизма нетеплового воздействия мощных (высоковольтных) наносекундных электромагнитных импульсов (МЭМИ [2]) на содержание структурных дефектов, структурно-химические и технологические свойства природных алмазов с целью оценки эффективности применения МЭМИ в процессах обогащения алмазосодержащих руд и россыпей.

Материалы и методики исследований. Исследования проводили на кристаллах природных технических алмазов класса крупности $-2+1$ мм из триасовых россыпей участка Булкур (Нижне-Ленский район, северо-восточная часть Сибирской платформы; коллекция алмазов Ю.М. Сибирцева, ФГУНПП "Аэрогеология").

Обработку алмазов высоковольтными наносекундными видеоимпульсами проводили на воздухе при стандартных условиях и следующих параметрах электроимпульсного воздействия: τ (фронта импульса) $\sim 1-5$ нс, t (длительность имп.) ~ 50 нс, U (амплитуда имп.) ~ 25 кВ, $E \sim 10^7$ В·м⁻¹, частота повторения импульсов 100 Гц, энергия в импульсе $\sim 0,1$ Дж, диапазон изменения времени электроимпульсной обработки $t_{\text{обр}}$ – 10 – 150 с.

Фазовые и структурные примеси кристаллов алмаза исследовали методом ИК-спектроскопии на спектрометре Nicolet-380 с микроосветительной приставкой фирмы Karl Zeiss в диапазоне 400–4000 см⁻¹. Морфологические и структурно-химические свойства поверхности кристаллов алмазов изучали методами аналитической электронной микроскопии (РЭМ-PCMA, микроскоп LEO1420VP–EDX Oxford INCA Energy 350).

Оценку смачиваемости поверхности алмазов проводили на контактном приборе конструкции В.А.Глембоцкого КП–ЦК5; на основании данных о смачиваемости минеральной поверхности кристаллы классифицировали как гидрофобные или гидрофильные. Флотируемость природных алмазов до и после электромагнитной импульсной обработки изучали методом беспенной флотации в дистиллированной воде без реагентов в рубке Халлимонда.

Результаты исследований и их обсуждение. ИК-спектры алмазов включали несколько систем спектральных линий: полосы поглощения в области $1900 - 2600 \text{ см}^{-1}$ обусловлены собственными колебаниями кристаллической решетки алмаза; широкая диффузная полоса с максимумом $\sim 3400 \text{ см}^{-1}$ и сопряжённая с ней линия $\sim 1650 \text{ см}^{-1}$ связаны с поглощением ОН-групп, входящих в состав адсорбированной воды. Молекулы воды могут входить как в состав минеральных фаз, выполняющих каверны и трещины на поверхности кристаллов алмаза, так и, подобно углеводородам, находится внутри кристалла. Группа линий в области $3700 - 3600 \text{ см}^{-1}$, вероятно, связана с примесями глинистых минералов, заполняющих совместно с оксидами железа каверны, трещины и другие углубления на поверхности кристаллов.

В результате электроимпульсной обработки кристаллов алмазов наблюдались существенные изменения ИК-спектров кристаллов, имеющих на поверхности минеральные плёнки оксидов железа, примазки глинистых минералов и другие примеси, обусловленные длительным нахождением алмаза в экзогенных обстановках. Практически все изученные образцы, в которых обнаружены фазовые примеси, содержащие углеводородные и ОН-группы, лишились этих примесей в результате воздействия МЭМИ. Так, при $t_{\text{обр}} \geq 30 \text{ с}$ в ИК-спектрах кристаллов алмаза резко уменьшились интенсивности спектральных линий 2918 и 2849 см^{-1} , а также полосы $\sim 3400 \text{ см}^{-1}$, обусловленные примесями углеводородов и H_2O соответственно.

По данным РЭМ – РСМА в результате электроимпульсной обработки кристаллов ($t_{\text{обр}} \geq 30 \text{ с}$) происходило разрушение поверхностных минеральных фаз и отделение их фрагментов размером от 40 до 100 мкм (сульфата кальция, оксидов и гидроксидов железа), что свидетельствует об эффективности применения наносекундных МЭМИ для деструкции и удаления минеральных гидрофильных пленок с поверхности алмазов.

При нетепловом воздействии высоковольтных наносекундных импульсов [2] возможным механизмом деструкции тонких гидрофильных минеральных пленок на поверхности алмазов является процесс (механизм) **электрического разрушения** минерального вещества с образованием проводящих микроканалов электрического пробоя диэлектрической пленки из-за протекания тока высокой плотности $\sim 10^7 \text{ А/см}^2$. Данный процесс обусловлен интенсивной инжекцией носителей заряда (электронов) из металлических электродов генератора импульсов (и электронов, образующихся в искровых микроразрядах) в тонкую диэлектрическую пленку и массивную подложку кристалла алмаза в условиях воздействия сильных электрических полей ($E \sim 10^7 - 10^9 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$) и образованием объемного заряда [3] в системе "алмаз – минеральное образование". С увеличением числа наносекундных импульсов (разрядов), повторяющихся с частотой следования $f \cong 100 \text{ Гц}$, происходило прорастание канала пробоя, образование новых каналов, что вызывало деструкцию и удаление вторичных минеральных фаз (пленок) с поверхности алмазных кристаллов.

В результате воздействия МЭМИ число гидрофильных алмазов снижалось на 22% (с 45% до 23%), достигая минимума при $t_{\text{обр}} \sim 150 \text{ с}$. Максимальное содержание гидрофобных алмазов отмечалось при электроимпульсной обработке в течение $t_{\text{обр}} \sim 50 \text{ с}$, а при увеличении $t_{\text{обр}}$ число гидрофобных индивидов снижалось. Установлен эффект повышения флотуруемости алмазов при увеличении продолжительности предварительной электромагнитной импульсной обработки кристаллов $\Phi(t_{\text{обр}})$; максимум наблюдался при $t_{\text{обр}} \sim 150 \text{ с}$. В целом содержание флотуруемых кристаллов повышалось на 14% (с 47% до 61%). Максимальное содержание гидрофобных флотуруемых алмазов достигалось в результате предварительной импульсной обработки кристаллов в течение первых $t_{\text{обр}} \sim 30 \text{ с}$. Содержание гидрофильных нефлотуруемых алмазов существенно уменьшалось после обработки МЭМИ в течение

$t_{\text{обр}} \sim 10\text{-}30$ с, что свидетельствует о целесообразности применения режимов кратковременных импульсных энергетических воздействий для направленного изменения структурно-химического состояния поверхности, физико-химических и флотационных свойств кристаллов алмазов.

По данным ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье в результате электромагнитной импульсной обработки алмазов происходило увеличение концентрации дефектов микродвиговой природы, представленных межузельными углеродными атомами – плейтлетс или В2, характерными для алмазов с повышенными прочностными свойствами. Данные структурные изменения зафиксированы по *систематическому* увеличению коэффициента поглощения линии ИК-спектра около 1365 см^{-1} , обусловленной В2-дефектами, с ростом продолжительности $t_{\text{обр}}$. Вместе с тем глубокой структурной перестройки кристаллов алмаза не происходило, а именно, концентрация и распределение азотных центров практически не изменялись. Новые В2-дефекты образовывались, преимущественно, в образцах с повышенным относительным содержанием азотных В-дефектов, составляющим 35-65% от общего содержания примеси азота в кристаллах.

Анализ микротвердости кристаллов алмаза, подвергшихся деформации в природных условиях, показал [4], что центры группы В увеличивают дисперсионную прочность природных алмазов по сравнению с исходным состоянием в 1,75 раза. Нетепловое воздействие МЭМИ не вызывало образования микроповреждений кристаллов алмазов (диагностируемых методами микроскопии), так как напряженность электрического поля пробоя алмаза порядка $10^9\text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$, т.е. на два порядка превышает напряженность электрического поля E в межэлектродном промежутке генератора импульсов.

Проведенные исследования свидетельствуют об эффективности выбора режимов кратковременных импульсных энергетических воздействий для направленного изменения структурно-химических, физико-химических (гидрофобности) и технологических (флотационных) свойств алмазов, содержания структурных дефектов кристаллов, обуславливающих их оптико-спектроскопические и механические свойства. В целом следует сделать вывод о возможности и целесообразности применения МЭМИ для предварительной обработки черновых алмазных концентратов с целью их доводки и очистки поверхности кристаллов алмазов перед операциями липкостной сепарации и флотации.

Список литературы

- [1] Чантурия В.А. и др. // Горный журнал. – 2015. – № 3. – С. 67-75.
- [2] Чантурия В.А., Гуляев Ю.В. и др. // Доклады РАН. – 1999. – Т. 366. – № 11. – С. 680-683.
- [3] Закревский В.А., Сударь Н.Т. // ФТТ. – 2005. – Т. 47. – № 5. – С. 931-936.
- [4] Налетов А.М. и др. // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 246. – № 7. – С. 83-86.