

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ НЕСОВЕРШЕННЫХ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА НА ОСНОВЕ СИНХРОТРОННОГО МЕТОДА ЛАУЭ-СИ****Г.М. Рылов, Е.Н. Федорова, Н.В. Соболев***Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия*

На примере одного из алмазных месторождений мира (Гуаньямо, Венесуэла) показано, что комплексное изучение внутреннего строения кристаллов алмаза на основе синхротронного метода Лауэ-СИ дает новую информацию о процессах образования алмаза в глубинных зонах континентальной литосферы. Алмазы, первоначально выросшие в виде достаточно крупных кристаллов, в дальнейшей постростовой истории претерпели несколько этапов, связанных с изменениями как *P-T*-условий, так и механических воздействий. Конечное состояние кристаллов — плоские, слегка растворенные (или протравленные) пластинки-сколы или выколки другой конфигурации с явными следами и фигурами пластической деформации. Ослабление коричневой окраски, наблюдаемой обычно у деформированных, но не отожженных кристаллов алмаза, и характерные следы полигонизации, выявляемые методом Лауэ-СИ, свидетельствуют о продолжительном отжиге, который происходил уже после того, как от кристаллов отделились пластины, приблизительно параллельные плоскости скольжения {111}. Примененная методика позволяет эффективно исследовать большое количество кристаллов алмаза в их естественном виде и получать дополнительную генетическую информацию.

*Алмаз, синхротронное излучение, пластическая деформация, отжиг, полигонизация, генезис.***STUDY OF THE INTERNAL STRUCTURE OF IMPERFECT DIAMOND CRYSTALS BY THE LAUE-SR METHOD****G.M.Rylov, E.N.Fedorova, and N.V.Sobolev**

Exemplified by one of the world's diamond deposit (Guaniamo, Venezuela), it has been shown that the complex study of the internal structure of diamond crystals by the Laue-SR method yields new information on diamond formation in deep-seated zones of continental lithosphere. The diamonds initially grown as sufficiently large crystals underwent several stages in their postgrowth history, owing to changes in both *PT*-conditions and mechanical actions. In their ultimate state, the crystals are flat, slightly dissolved (or etched) cleavage plates or chips of other configurations with obvious traces and figures of plastic deformation. The weakening of brown color usually observed in deformed but nonannealed diamond crystals and typical traces of polygonization revealed by the Laue-SR method suggest long-lasting annealing, which occurred after the chips subparallel to sliding plane {111} had been separated from the crystals. The applied technique is fruitful in study of a great number of diamond crystals *in situ* and in obtaining additional genetic information.

*Diamond, synchrotron radiation, plastic deformation, annealing, polygonization, genesis***ВВЕДЕНИЕ**

Многолетние систематические исследования минеральных включений в алмазах различных месторождений земного шара подтвердили правомерность выделения двух главных геохимических типов алмазообразующей среды верхней мантии: ультраосновного или перидотитового (У-тип) и эклогитового (Э-тип) [1, 2]. В подавляющем большинстве случаев У-тип резко преобладает. Примерно равное соотношение У- и Э-типов встречается достаточно редко, а преобладание Э-типа зафиксировано в исключительно редких случаях. Таким особенно редким, аномальным объектом с содержанием до 98 % алмазов Э-типа является месторождение Гуаньямо (Венесуэла), представленное серией пологозалегающих силлов переменной мощности (0,5—3,0 м) и россыпей ближнего сноса [3, 4].

При тщательном изучении полиминеральных включений в алмазах Гуаньямо и при измерении остаточного давления, выявленного по сдвигу пика КР-спектра коэсита в алмазе, было показано, что рост алмазов проходил в субстрате эклогитового состава в области устойчивости при температуре около 1200 °С и давлении 55—60 кбар [5, 6]. Как было отмечено в работах [3, 4], коллекции исследованных алмазов из россыпей Гуаньямо содержали пластически деформированные кристаллы коричневого цвета. Внутренняя структура таких алмазов не исследовалась.

Из литературных данных следует, что при пластической деформации (ПД) алмаза трансляционное скольжение в чистом виде в природе практически не осуществляется, так как для этого требуется создать условия чистого сдвига [7—9]. В реальных условиях образования алмазов давление на кристаллы не является строго гидростатическим, а обладает определенной анизотропией [10, 11]. В результате пластической деформации мы имеем дело со сложными искажениями кристаллической решетки типа поворотов вокруг нескольких осей [12, 13]. Тем не менее можно методом Лауэ-СИ [14, 15] в различных

конкретных случаях найти характерную особенность внутренней субструктуры и выявить уровни деформации [16], которые возникали в тех или иных  $P$ - $T$ - $t$ -условиях не только при росте кристаллов, но и последующих постростовых преобразованиях [12, 13].

Деформированные алмазы содержат в себе такие механические дефекты, как сбросы, иррациональные и регулярные двойники, полосы переориентации, ротационные смещения [8, 9, 13]. Подобные дефекты в настоящее время объясняются дислокационными механизмами [9, 13]. Многие из таких дефектов можно наблюдать и изучать микроскопическими методами. Однако образец должен быть прозрачным и иметь вид полированной пластинки [8]. В том случае, когда образец представляет собой целый нешлифованный кристалл, тогда оптические явления, сопровождающие деформацию, вуалируются или сильно искажаются так, что подобные кристаллы часто выпадают из процесса исследования. Количество несовершенных алмазов составляет около 70 % из всех добываемых кристаллов [17].

Пластическая деформация природных алмазов исследовалась традиционными рентгеновскими методами в ряде работ [18—20]. Известно, что с ПД связан коричневый цвет алмазов, который при высокотемпературном отжиге вследствие трансформации дислокаций и связанных с ними дефектов ослабевает или изменяется в зависимости от содержания азота, вплоть до полного обесцвечивания [21—23]. Экспериментально ПД алмаза создавалась путем изгиба пластинок при высоких температурах (800—1850 °С) и с помощью техники инденторного нагружения [18—20, 24, 25].

Внутреннее строение пластически деформированных природных алмазов рассмотрено авторами работ [8, 10, 12], в которых обсуждаются оптические и рентгенографические эффекты, вызываемые деформацией.

При ПД в естественных условиях на октаэдрических гранях и кривогранных поверхностях кристаллов алмаза наблюдаются характерные линии, часто образующие штриховку и другие формы. Расколы и поверхности излома изучались А.А. Кухаренко [26] на примере представительной коллекции россыпных алмазов Урала. Им установлено, что почти 99 % расколов алмаза происходят по плоскости октаэдра, т.е. плоскости спайности. Наиболее надежно и информативно явление переориентации решетки устанавливается с помощью рентгенографических методов [12, 14, 15]. В работе [12] применен метод обратных лауэграмм и построение стереографической проекции. При использовании обратных лауэграмм информация о ПД исходит в основном от поверхности кристалла. Тем не менее установлено, что при ПД скольжением в системе типа (111)[110] существует поворот решетки вокруг оси, лежащей в плоскости скольжения {111} и перпендикулярной направлению скольжения [12]. Этой осью является направление типа  $\langle 112 \rangle$ . На кристаллах алмаза возможен еще один вид изгиба решетки, ось которого перпендикулярна направлению  $\langle 112 \rangle$  и параллельна направлению скольжения  $\langle 110 \rangle$  [12, 27].

Образование механических двойников и их характеристика подробно описаны, например в работах [7, 9, 28]. Переходные зоны от исходного кристалла к двойниковой прослойке характеризуются их толщиной и соответствующими напряжениями. Суммарная упругая энергия такой границы двойников пропорциональна количеству двойникоующих дислокаций [9, 28]. Релаксация упругих напряжений на границе эффективнее проходит при разрушении и отжиге. Она аналогична релаксации напряжений у вершины трещины, образовавшейся по плоскости скола (спайности) [9, 28]. Концентрация напряжений за счет двойникоующих дислокаций достаточна для того, чтобы кристалл разделился по плоскости спайности с образованием трещины [9].

Анализ содержания азота и степени его агрегации по ИК-спектроскопии является одним из методов определения  $P$ - $T$ - $t$ -условий роста и постростовой истории алмаза [29—32]. ИК-исследования алмазов Гуаньямо, проведенные Ф.В. Каминским и др. [4], показали, что несмотря на схожесть степени агрегации азота в алмазах из кимберлитового тела и россыпей распределение по содержанию азота в В1-центрах для различных коллекций отличается. Характеризуя по ИК-данным разные месторождения алмазов, включая Гуаньямо, Ф.В. Каминский и Г.К. Хачатрян [33] рассматривают усредненные данные коэффициента ИК-поглощения дефекта В2, что не отражает условия роста и дальнейшего пребывания алмаза в верхней мантии. В стабильных условиях при длительном высокотемпературном отжиге дефект В2 хорошо развит [32, 34] и, как показано в работе Е.В. Соболева и др. [35], его размеры могут достигать 1000 нм. Структура и свойства планарного дефекта В2 исследованы в ряде работ [36, 37]. Стрессовые ситуации приводят к деградации В2 [36, 38, 39], а критическим условием для этого является понижение давления при достаточно высокой температуре [38, 39]. Пластическая деформация алмазов, проходящая при высокой температуре, рассматривается как один из факторов, приводящих к деградации дефекта В2 [30, 31, 36]. Учитывая это, нами были проведены ИК-измерения исследуемых в данной работе алмазов Гуаньямо.

## ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Детально исследованы 20 образцов кристаллов алмаза, отобранные из представительной коллекции россыпных месторождений Гуаньямо, подавляющее большинство которых (~70 %) имели вид пластинок — естественных выколов из достаточно крупных (~2—4 мм) монокристаллов (см. таблицу). Поверх-

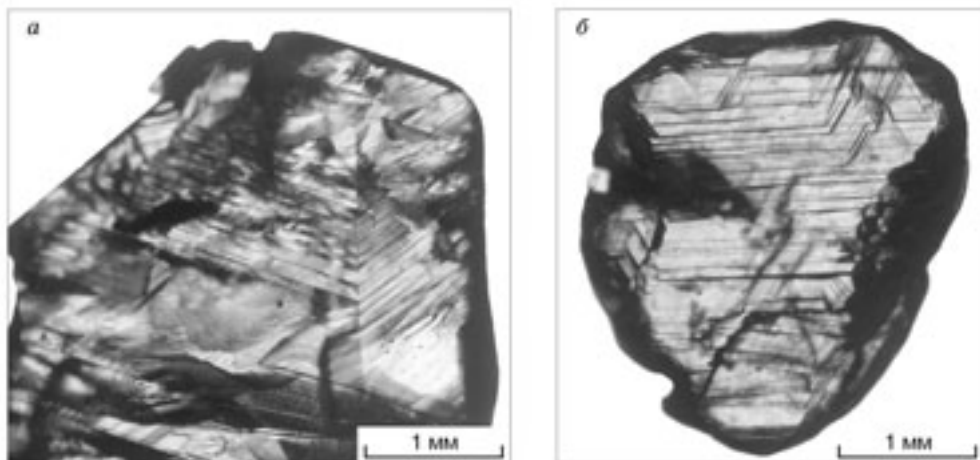
ности скола, иногда имеющие ступенчатый вид, были приблизительно параллельны грани  $\{111\}$ , хотя три образца имели поверхности скола значительно отклоняющиеся от  $\{111\}$ . Четыре образца представляли собой половинки октаэдров, расколотых по плоскостям, близким к  $\{111\}$ . Два октаэдроиды — целые кристаллы слабо-коричневой окраски. Фрагменты огранки, реликты октаэдрических плоскостей и другие признаки позволяют предполагать, что пластинчатые обломки являются частью октаэдров или октаэдровидов, претерпевших стрессовые ситуации. На поверхностях образцов часто наблюдается занозистая штриховка, переходящая в шагренёв. В поверхностных зонах встречаются глубокие шрамы травления, часто заполненные желтым порошком, придающим кристаллам желтоватый оттенок (фазовый состав порошков не исследовался).

Особо нужно подчеркнуть наличие четких следов деформационного происхождения у большинства образцов алмазов, претерпевших сколы. На поверхностях одних кристаллов видны рельефные скульптуры в виде гофрированной поверхности, у других — более слабые прямолинейные штрихи. Такие скульптуры и штриховка являются свидетельством наличия полос пластической деформации (ППД) [8, 12]. Некоторые ППД трассированы цепочками треугольных впадин, образовавшихся, очевидно, при естественном избирательном травлении. Следует также обратить внимание, что большинство образцов преимущественно бесцветные, слабый коричневый оттенок имеют всего 3 (обр. Г7, Г8, Г13). Микроскопическое изучение сколов и естественных поверхностей показывает, что острые углы на образцах заглажены растворением или травлением. Результатом растворения являются упомянутые выше шрамы в виде каналов. Они не совпадают с каким-либо кристаллографическим направлением и, очевидно, избирательное растворение проходило по наиболее дефектным границам.

Таким образом, уже микроскопическое изучение дает много очевидных фактов о том, что происходило в постростовой период на поверхности образцов. Однако если шрамы могли образоваться сразу после процесса роста, то травление обеих поверхностей пластинок могло проходить только после раскалывания кристаллов. Рентгенографическими измерениями установлено, что не все сколы происходят точно по плоскостям скольжения. Некоторые поверхности сколов отклоняются от  $\{111\}$  на несколько градусов, а сами поверхности сколов имеют ступенчатую форму, которая в результате приводит к указанному выше отклонению. В нашей работе для изучения внутренней структуры пластически деформированных алмазов месторождения Гуаньямо (Венесуэла) применен метод Лауэ-СИ, фактически состоящий одновременно из двух рентгеновских методов и позволяющий быстро и эффективно исследовать любые несовершенные кристаллы, выявлять степень их деформации и полигонизацию [14, 15]. Для определения содержания азота как основной примеси алмаза и состояния его агрегации были исследованы ИК-спектры образцов на спектрометре Perkin—Elmer-325 по методике, описанной в работе [40].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристики образцов алмаза сведены в таблицу, в целом отображающую основные этапы ростовой и постростовой истории изученных кристаллов. Микроскопическое изучение показывает, что кристаллы после окончания их роста были достаточно крупными, часто хорошо ограненными, с плоскими и гладкими естественными гранями, например  $\{111\}$ , а рост кристаллов проходил в стабильных условиях. Наличие искажений кристаллической решетки и явления полигонизации, по данным рентгеновской Лауэ-СИ-дифракции, а также отчетливых ППД на поверхностях образцов, по микроскопическим наблюдениям (см. рис. 1, *a, б*), — это результат процесса пластической деформации. Поскольку обе поверхности



**Рис. 1. Оптическое изображение полос деформации на поверхностях скола кристаллов алмаза:**

*a* — две пересекающиеся системы скольжения, *б* — густая штриховка из полос деформации.

Характеристики изученных алмазов из месторождения Гуаньямо (Венесуэла)

№ обр.	Образец		ПД, Лауэ-СИ	ППД	Цвет	Полигонизация
	Морфология	Форма				
Г1	?	Скол-плоскогранная пластинка с фигурами роста	+	+	б/ц	+
Г2	?	Скол-пластинка с треугольными фигурами	+	+	»	+
Г3	?	Скол-плоскогранная пластинка с фигурами роста	+	+	зпп	+
Г4	Сложная форма	Скол- ~1/2 кристалла	+	+	б/ц	+
Г6	Октаэдр	Скол-пластинка	+	+	сл.кор.	+
Г7	?	Целый кристалл	+	+	»	+
Г8	?	Скол-1/2 кристалла	+	+	сл.окр.	+
Г9	Октаэдр	»	+	+	»	+
Г10	?	Скол-пластинка	+	+	б/ц	Рекрист.
Г11	?	Скол-1/2 кристалла	+	+	»	+
Г12	Октаэдр	Скол-пластинка	+	+	б/ц, зпп	+
Г13	Октаэдр	Целый кристалл	+	+	сл.кор.	+
Г14	»	Скол-пластинка	+	?	б/ц, зпп	?
Г15	»	»	+	+	»	?
Г16	?	»	+	?	»	?
Г17	Переходная форма	Скол-пластинка	+	+	сл.окр.	+
Г18	»	»	+	+	»	+
Г19	?	»	+	+	б/ц	+
Г20	?	»	+	+	»	+

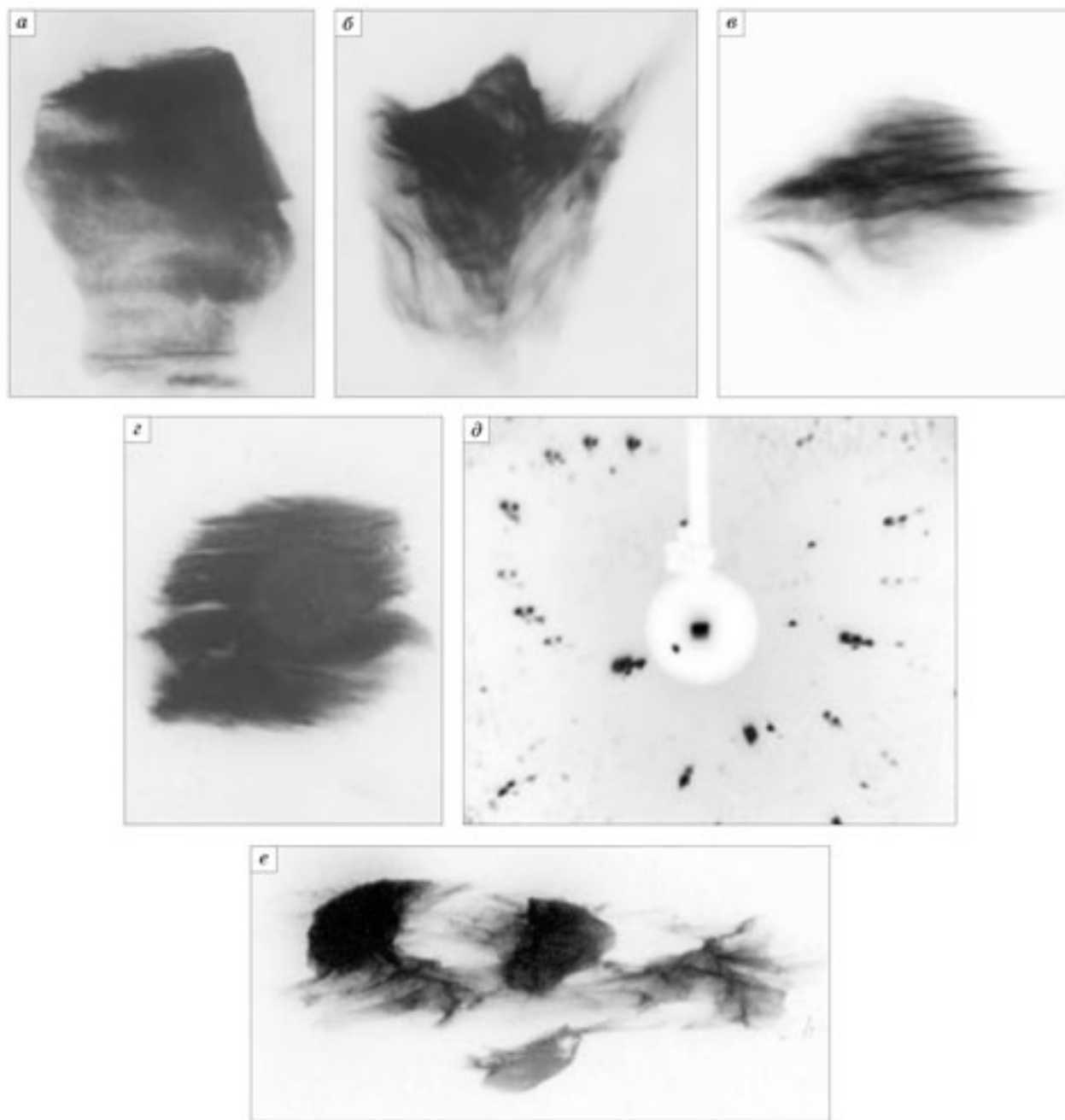
Примечание. ПД — пластическая деформация; ППД — полосы пластической деформации; б/ц — бесцветный, сл.окр. — слабо окрашенный, сл.кор. — слабо-коричневый, зпп — зеленые пятна пигментации, (+) — явление присутствует четко, (?) — нечеткая картина.

пластинок подвергались в равной мере растворению, можно заключить, что раскалывание кристаллов проходило во временном промежутке после окончания роста и перед отжигом. О длительном высокотемпературном отжиге, который испытали исследуемые образцы, говорят отчетливо наблюдаемые следы полигонизации [9, 12], а иногда и рекристаллизации (см. таблицу, обр. 10). Анализируя данные таблицы, видим, что все исследованные образцы пластически деформированы.

На рис. 2 показаны Лауэ-СИ-топограммы, отображающие искажения кристаллической решетки в результате ПД. Как известно, при воздействии на кристалл большого внешнего давления происходит интенсивная генерация дислокационных ансамблей, которые перемещаются по кристаллу, группируются, различным образом перестраиваются [7, 13, 16]. При этом возникают полосы скольжения, изгибы, линейные и ротационные смещения решетки, приводящие к неоднородному распределению интенсивности на рентгеновских топографических снимках в виде деформационных контуров, а при значительной деформации наблюдается астеризм лауэ-пятен (рефлексов). Эти изменения основных изображений дифракционных лауэ-пятен могут принимать различные формы: иглообразные, разветвленные, в виде вуали и другие — в зависимости от конкретных искажений решетки при деформации. Деформационные контуры внутри основных лауэ-пятен всегда имеют сложные конфигурации и, следовательно, соответствуют сильным искажениям кристаллической решетки.

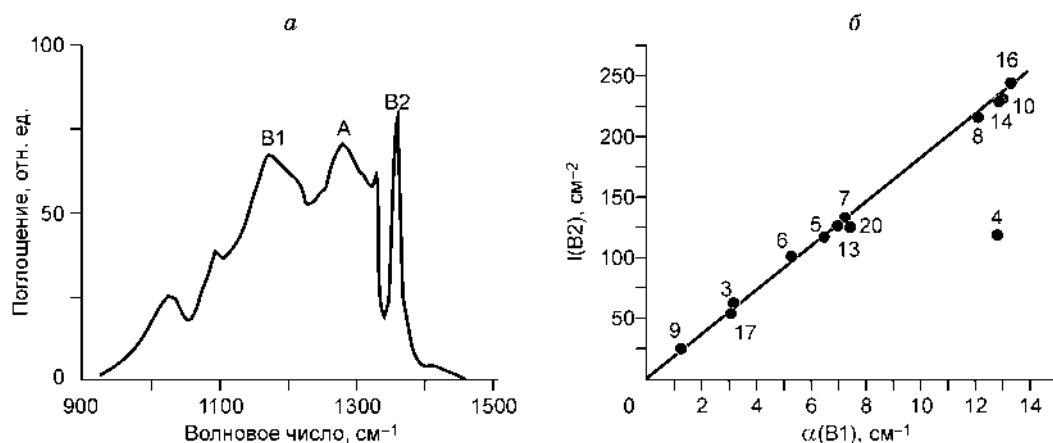
На рис. 2,а контраст изображения не выходит за пределы основного дифракционного пятна, но само пятно содержит изображения контуров деформации. Микроскопические наблюдения этого кристалла показывают наличие серии полос пластической деформации.

Более сильные искажения, характеризуемые полной потерей внешней формы проекции кристалла и следами полигонизации в виде почти параллельных полос, наблюдаются в образце, Лауэ-СИ-топограмма которого представлена на рис. 2,б. В условиях высокой температуры полигонизации и гидростатического давления в области устойчивости алмаза происходит перераспределение дислокаций с образованием более или менее правильных дислокационных субграниц, т. е. образуется полосчатая субструктура (см. рис. 2,в, г) [7, 9, 12, 16].



**Рис. 2. Рентгеновские Лауэ-СИ-топограммы пластически деформированных кристаллов алмаза. Увел. 17.**

*a* — умеренная деформация кристалла приводит к искажению профиля изображения, образованию деформационных контуров внутри пятна (астеризм изображения отсутствует); *b* — сильная деформация кристалла приводит к появлению астеризма в виде хвостов, игл и вувалей, выступающих за пределы основного дифракционного пятна; внутри основного пятна наблюдаются полосы, характерные для полигонизации, проходящей во время отжига после сильной ПД; *в, г* — отчетливое проявление полигонизации в виде квазипараллельных полосок, охватывающих кристалл; полосы образовались в результате перемещения и концентрации дислокаций, которые из горизонтальных рядов перераспределяются в вертикальные стенки-границы блоков полигонизации [7]; *д* — Лауэ-СИ-дифракция, отражающая проявление сильной деформации с образованием фрагментации лауэ-пятен, соответствующих образованию разориентированных блоков деформации; *е* — увеличенное изображение одного из пятен Лауэ-СИ-дифракции. Пятно состоит из нескольких рефлексов, разориентированных между собой на небольшие углы ( $\sim 1^\circ$ ). Изгибы линий и диффузность рефлексов свидетельствуют о степени деформации. *a-г* — увел. 17, *д* — в натуральную величину, *е* — увел. 15.



**Рис. 3. Результаты ИК исследования:**

*a* — ИК-спектр поглощения в однофононной области, характерный для исследованных алмазов Гуаньямо (Венесуэла), относящихся к типу IaAB с хорошо развитым пиком дефекта B2 на  $1360\text{ см}^{-1}$ ; *б* — интегральная интенсивность  $I(B2)$  полосы поглощения дефекта B2 как функция коэффициента поглощения  $\alpha$  (B1) дефекта B1 на  $1175\text{ см}^{-1}$ . Цифры на графике соответствуют номеру образца в таблице.

В отдельных кристаллах наличие фрагментации лауэ-пятен есть свидетельство разделения кристаллов на слегка разориентированные (до  $1\text{--}2^\circ$ ) блоки без нарушения сплошности, фрагменты их обычно соединяются вуалями, являющимися признаками значительной ПД (см. рис. 2, *д, е*).

Согласно нашим данным по ИК-спектроскопии, исследованные образцы относятся к типу IaAB, т. е. содержат как A-, так и B1-центры. Суммарное содержание азота для большинства исследованных образцов колеблется в пределах  $300\text{--}900\text{ ppm}$ . Степень агрегации B1-дефектов образцов (процентное содержание азота в B1-форме по отношению к общему содержанию азота) составляет  $50\text{--}80\%$ , что коррелирует с данными Ф.В. Каминского [4]. Для образцов, в которых общее содержание азота превышает  $300\text{ ppm}$ , проявляется дефект B2 (пластинки), фиксируемый полосой поглощения на  $1360\text{ см}^{-1}$  (рис. 3, *а*). Температурная область существования дефектов B2 ограничена и, как показано экспериментально, они могут распадаться с образованием пустот и дислокационных петель [39, 41], при этом интенсивность полосы поглощения на  $1360\text{ см}^{-1}$  значительно уменьшается, что характерно для „нерегулярных“ алмазов [35, 36].

Для исследованных в данной работе алмазов Гуаньямо интегральная интенсивность полосы поглощения дефекта B2 ( $1360\text{ см}^{-1}$ ) пропорциональна максимуму интенсивности полосы поглощения дефекта B1 на  $1175\text{ см}^{-1}$  (см. рис. 3, *б*), что характерно для „регулярных“ алмазов [36]. Исключением является обр. 4, для которого соотношение между интенсивностями дефектов B1 и B2 попадает в область „нерегулярных“ алмазов, но и внутреннее строение его имеет особенности, отличные от образцов исследуемой коллекции.

Так как исследованные в данной работе образцы алмазов после формирования дефекта B2 не испытывали стрессовых ситуаций, приводящих к деградации дефекта B2 (см. рис. 3), можно предположить, что ПД могла проходить при *P-T*-условиях, не отвечающих критическим условиям деградации пластинок [38, 39], или агрегация азота с образованием дефектов B1 и B2 могла, вероятно, продолжаться и после пластической деформации в течение длительного периода умеренного отжига, на что указывает и отсутствие насыщенного коричневого цвета исследованных образцов (см. таблицу), и наличие следов полигонизации (см. рис. 2, *в, з*).

## ВЫВОДЫ

Результаты работы показали:

— рост алмазов был равновесным в области его устойчивости [1], о чем свидетельствуют: прозрачность кристаллов, их достаточно большие размеры, пластинчатые сколы, сохранившие крупные прозрачные естественные грани  $\{111\}$  с характерными скульптурами их роста;

— в постростовой период при повышении температуры алмазоносного субстрата исследованные образцы алмазов претерпели пластическую деформацию (см. рис. 2), а при понижении температуры произошло скалывание пластинок, при этом плоскости скольжения алмаза оставались активированными, так как хрупкого разрушения не наблюдалось;

— тот факт, что после раскалывания кристаллов алмаза на пластинки острые следы скола всегда были заглажены слабым растворением, говорит о том, что мог иметь место длительный отжиг [12, 31], о чем свидетельствует наличие следов полигонизации в виде серии почти параллельных полос (см. рис. 2, в, г), а также, вероятно, ослабление приобретенной после ПД коричневой окраски (см. таблицу).

Использование комплекса методов на основе Лауэ-СИ позволяет составить некоторые представления о событиях, сопровождающих алмазы в процессе роста и последующего изменения их внутренней структуры.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 03-05-64948).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Соболев Н.В.** Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск, Наука, 1974, 264 с.
2. **Meyer H.O.H.** Inclusions in diamonds // *Mantle xenoliths* / P.H. Nixon. Wiley, Chichester (England), p. 501—522.
3. **Sobolev N.V., Yefimova E.S., Channer D.M. et al.** Unusual upper mantle beneath Guaniamo, Guyana shield, Venezuela: Evidence from diamond inclusions // *Geology*, 1998, v. 26, № 11, p. 971—974.
4. **Kaminsky F.V., Zakharchenko O.D., Griffin W.L. et al.** Diamond from the Guaniamo area, Venezuela // *Canad. Miner.*, 2000, v. 38, p. 1347—1370.
5. **Sobolev N.V., Fursenko B.A., Goryainov S.V. et al.** Fossilized high pressure from the Earth's deep interior: The coesite-in-diamond barometer // *Proc. Nation. Acad. Sci. USA*, 2000, v. 97, p. 11875—11879.
6. **Sobolev N.V., Logvinova A.M., Yefimova E.S. et al.** Polymineralic eclogitic inclusions in Guaniamo diamonds, Venezuela: evidence for variable diamond growth conditions // 8th International Kimberlite Conference. Long Abstract. Victoria (Canada), 2003, p. 1—4.
7. **Юшкин Н.П.** Механические свойства минералов. Л., Наука, 1971, 283 с.
8. **Мокиевский В.А., Титова В.М., Бартошинский З.В.** Проявление пластической деформации в алмазе и некоторые вопросы, связанные с пластичностью кристаллов // *Зап. ВМО*, 1962, сер. 2, ч. 91, вып. 4, с. 381—393.
9. **Фридель Ж.** Дислокации. М., Мир, 1967, 626 с.
10. **Бартошинский З.В., Гневушев М.А.** Внешняя симметрия якутских алмазов и условия их кристаллизации // *Зап. ВМО*, 1969, сер. 2, ч. 98, вып. 5, с. 560—567.
11. **Орлов Ю.Л.** Минералогия алмаза. М., Наука, 1984, 264 с.
12. **Урусовская А.А., Орлов Ю.А.** О характере пластической деформации кристаллов алмаза // *Докл. АН СССР*, 1964, т. 154, № 5, с. 1099—1102.
13. **Владимиров В.И., Романов А.Е.** Дисклинации в кристаллах. Л., Наука, 1986, 224 с.
14. **Рылов Г.М., Ефимова Э.С., Соболев Н.В. и др.** Применение синхротронного излучения для исследования несовершенных кристаллов алмаза. Новосибирск, 2000, 23 с. (Препр. № 47 / ИЯФ СО РАН).
15. **Rylov G.M., Yefimova E.S., Sobolev N.V. et al.** Study of imperfect natural diamonds with the application of the X-ray synchrotron radiation (the Laue- SR method) // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, 2001, v. A470, p. 182—188.
16. **Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др.** Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск, Наука, 1990, 232 с.
17. **Марфунин А.С., Кононов О.В., Шелементьев Ю.Б.** Минералогия, физика, геммология и мировой рынок алмаза: современное состояние // *Вестн. МГУ*, 1998, сер. 4, Геология, № 5, с. 49—60.
18. **Wild R.K., Evans T., Lang A.R.** Birefringence, X-ray topography and electron microscopy examination of the plastic deformation of diamond // *Phil. Mag.*, 1967, v. 15, № 134, p. 267—279.
19. **Humble P., Hannink R.H.I.** Plastic deformation of diamond at room temperature // *Nature*, 1978, v. 273, № 5657, p. 37—39.
20. **Evans T., Sikes I.** Indentation hardness of two types of diamond in the temperature range 1500 to 1850 °C // *Phil. Mag.*, 1974, v. 29, № 1, p. 135—147.
21. **Соболев Е.В.** Тверже алмаза. Новосибирск, Наука, 1984, 126 с.
22. **Collins A.T., Kanda H., Kitawaki H.** Colour changes produced in natural brown diamonds by high-pressure, high-temperature treatment // *Diamond Rel. Mat.*, 2000, v. 9, p. 113—122.
23. **Smith C.P., Bosshart G., Ponahlo J. et al.** Ge Pol diamonds: before and after // *Gems Gemology*, 2000, p. 192—214.
24. **Григорьев О.Н.** Дефекты структуры и закономерности пластической деформации и разрушения природного алмаза: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, Ин-т сверхтвердых материалов, 1975, 24 с.

25. **Brookes E.J., Comins J.D., Daniel R.D., Erasmus R.M.** A study of plastic deformation profiles of impressions in diamond // *Diamond Rel. Mat.*, 2000, v. 9, p. 1115—1119.
26. **Кухаренко А.А.** Алмазы Урала. М., Госгеолтехиздат, 1955, 515 с.
27. **Ельников А.И.** Изучение явлений пластической деформации при растяжении монокристаллов алюминия // *ЖЭТФ*, 1934, т. 4, № 1, с. 101—115.
28. **Классен-Неклюдова М.В.** Механическое двойникование кристаллов. М., Изд-во АН СССР, 1960, 261 с.
29. **Evans T.** Aggregation of nitrogen in diamond // *The properties of natural and synthetic diamond* / J.E. Field (ed). London, Acad. Press, 1992, p. 259—290.
30. **Viljoen K.S.** An infrared investigation of inclusion-bearing diamonds from the Venetia kimberlite, Northern Province, South Africa: implications for diamonds from craton-margin settings // *Contr. Miner. Petrol.*, 2002, v. 144, p. 98—108.
31. **Mendelssohn M.J., Milledge H.J.** Morphological characteristics of diamond populations in relation to temperature-dependent growth and dissolution rates // *Intern. Geol. Rev.*, 1995, v. 37, p. 285—312.
32. **Мейер Х.О.А., Милледж Х.Дж., Сазерлэнд Ф.Л., Кенневел П.** Необычные алмазы и уникальные включения из Нового Южного Уэльса, Австралия // *Геология и геофизика*, 1997, т. 38, № 2, с. 289—314.
33. **Kaminsky F.V., Khachatryan G.K.** Characteristics of nitrogen and other impurities in diamond, as revealed by infrared absorption data // *Can. Miner.*, 2001, v. 39, p. 1733—1745.
34. **Mendelssohn M.J. and Milledge H.J.** Geologically significant information from routine analysis of mid-infrared spectra of diamonds // *Internat. Geol. Rev.*, 1995, v. 37, p. 95—110.
35. **Соболев Е.В., Лисойван В.И., Ленская С.В.** О пластинчатых образованиях в структуре природных алмазов // *ЖСХ*, 1968, т. 9, № 6, с. 1029—1033.
36. **Woods G.S.** Platelets and the infrared absorption of type Ia diamonds // *Proc. Roy Soc. Lond.*, 1986, ser. A, v. 407, p. 219—238.
37. **Goss J.P., Coomer B.J., Jones R. and Fall C.J.** Extended defects in diamond: The interstitial platelet // *Phys. Rev.*, 2003, ser. B, v. 67, p. 165208: 1—15.
38. **Hirsch P.B., Pirouz P. and Barry J.C.** Platelets, dislocation loops and voidites in diamond // *Proc. Roy Soc. Lond.*, 1986, ser. A, v. 407, p. 239—258.
39. **Evans T., Kiflawi I., Luyten W. et al.** Conversion of platelets into dislocation loops and voidite formation in type IaB diamonds // *Proc. Roy Soc. Lond.*, 1995, ser. A, v. 449, p. 295—313.
40. **Зедгенизов Д.А., Федорова Е.Н., Шацкий В.С.** Микроалмазы из кимберлитовой трубки Удачная // *Геология и геофизика*, 1998, т. 39, № 6, с. 745—753.
41. **Kiflawi I., Bruley J.** The nitrogen aggregation sequence and the formation of voidites in diamond // *Diamond Rel. Mat.*, 2000, v. 9, p. 87—93.

*Рекомендована к печати 30 августа 2005 г.  
В.В. Ревердатто*

*Поступила в редакцию 8 июня 2004 г.,  
после доработки — 10 августа 2005 г.*