

Ю. Л. ОРЛОВ, Н. А. ТАТЬЯНИНА

УЗОРЫ ДВУПРЕЛОМЛЕНИЯ И ИХ ПРОИСХОЖДЕНИЕ
В КРИСТАЛЛАХ АЛМАЗА

Алмазы как кристаллы кубической сингонии теоретически должны быть оптически изотропными. Однако реальные кристаллы в поляризованном свете при скрещенных николях всегда обнаруживают двупреломление. Очевидно, среди природных алмазов совершенно изотропные кристаллы практически отсутствуют. Об этом свидетельствуют и литературные данные (Crookes, 1897; Sutton, 1928; Кухаренко, 1955).

Первые описания аномального двупреломления в алмазах появились в конце XIX в. (Brauns, 1891; Mallard, 1892; Crookes, 1897). Эти исследователи отметили, что двупреломление в алмазах вызывается внутренними напряжениями, и высказали различные точки зрения на природу этих напряжений. По мнению Браунса, наблюдавшийся им полосчатый узор двупреломления, ориентированный параллельно ребрам октаэдра, вызван неравномерными внутренними напряжениями, которые возникают в результате закалки кристаллов. Для подтверждения этого он ссылаясь на двупреломление в стеклах, подвергнутых закалке. А. Малляр предполагал, что напряжение в алмазах вызывается мимитезией, т. е. переходом одной структурной модификации в другую с сохранением первоначальной кристаллографической формы. Позднее эту точку зрения развил Г. Фридель (Friedel, 1924; Friedel, Ribaut, 1924). Фридель наблюдал внезапное изменение картины двупреломления при температуре 1885° С и на основании этого сделал вывод о возникновении постоянного аномального двупреломления в алмазе в результате внутренних напряжений, появляющихся вследствие изменения объема при переходе одной структурной модификации в другую. Он полагал, что все алмазы представляют собой параморфозы низкотемпературной α -модификации с симметрией структуры, относящейся к классу Td , по β -модификации с симметрией Oh , образующейся и сохраняющейся только при температуре выше 1885° С. Фридель считал, что характер двупреломления в алмазах не меняется от приложения внешних усилий и не зависит от включений посторонних минералов. В противоположность ему Дж. Сэттон (Sutton, 1928) и А. Ф. Вильямс (Williams, 1932) отмечали, что внутренние напряжения обусловлены главным образом включениями посторонних минералов, имеющих резко отличный от алмаза коэффициент объемного теплового расширения.

А. А. Кухаренко (1955), объясняя причину, вызывающую внутреннее напряжение, писал: «Внутреннее напряжение в алмазе является остаточным и унаследовано от тех колоссальных давлений, которые господствовали в породе в момент кристаллизации алмаза. В период своего образования алмаз находился в равновесии с термодинамическими условиями среды и, несомненно, был изотропным. Резкое уменьшение давления при пере-

щении кристаллов в верхние слои земной коры и обусловило возникновение в алмазе внутреннего напряжения, равнодействующая которого направлена от центра кристалла к его поверхности. Однако само по себе равномерное напряжение не вызывает анизотропии. Причиной, вызвавшей неравномерность напряжения, могли явиться включения, которые вследствие различия в сжимаемости вещества включения и алмаза явились своего рода «барьерами», около которых возникли более интенсивные напряжения, проявляющиеся в анизотропии. Однако этот момент отвечает только некоторым частным случаям (например, акцентации двупреломления близ включения) и не может объяснить все своеобразие анизотропии алмаза. Возникновение сильной анизотропии и характерной полочастости двупреломляющих полей обуславливается, по-видимому, полиморфным превращением алмаза как следствием той же общей причины — изменения физико-химических условий. В результате полиморфизма возникают микродвойниковые структуры, являющиеся типичными псевдоморфозами превращения» (стр. 211). Таким образом, А. А. Кухаренко присоединился к мнению Г. Фриделя и А. Малляра. В отличие от Г. Фриделя он сделал вывод, что высокотемпературная модификация алмаза, которую, по его мнению, следует обозначить как α -модификация, имеет кубическую, а низкотемпературная β -модификация, возможно, ромбическую структуру.

Наблюдаемые в алмазах узоры двупреломления иллюстрированы во многих работах (Lindley, 1937; Raman, Rendal, 1944; Ramachandran, 1946; Winchell, 1950; Кухаренко, 1955; Neuhaus, 1960; Орлов, Афанасьева, 1966; Tolansky, 1966; Seal, 1966). Наиболее полно различные узоры двупреломления в алмазах описаны З. В. Бартошинским и М. А. Гневушевым (1958). Однако указанные авторы при объяснении природы анизотропии, как ранее Д. Браунс (Brauns, 1891), пришли к выводу, что она обусловлена закалкой, как это имеет место в стеклах. Причины разнообразия узоров двупреломления З. В. Бартошинским и М. А. Гневушевым не объяснены.

На уровне современных знаний природа анизотропии в алмазах рассмотрена А. Р. Лангом (Lang, 1967) и А. В. Варшавским (1968). Они не только показали разнообразные проявления двупреломления в алмазах, но особое внимание обратили на разные дефекты, вызывающие внутренние напряжения и определяющие тот или иной узор анизотропии. На основании исследования двупреломления А. В. Варшавский сделал оригинальные кристалломорфогенетические, а также минерагенетические выводы, касающиеся процесса кристаллизации алмазов. Его объяснения природы некоторых видов двупреломления в алмазах, по нашему мнению, дискуссионны.

Нами получены данные, которые позволяют дополнить и уточнить некоторые выводы, сделанные А. А. Варшавским и предыдущими исследователями. При изучении двупреломления в алмазах использованы поляризационный микроскоп МИН-8 с бинокулярной насадкой, полярископ (модель для изучения драгоценных камней, разработанная американским институтом GYA) в сочетании с микроскопом МБС-1, а также специальный японский компаратор, к которому были приспособлены поляроиды. Исследовались пластинки, вырезанные в определенной ориентации, и целые кристаллы. Особенно удобными для наблюдения объемной картины двупреломления были крупные алмазы весом от 20 до 80 карат, которые изучались с помощью полярископа, смонтированного вместе со стереоскопическим микроскопом. Как известно, единственной причиной, обуславливающей аномальное двупреломление в кристаллах алмаза, являются внутренние напряжения, но факторы, вызывающие их, могут быть различными. Одну из главных ролей в определении узора двупреломления играют текстура кристаллов и разные дефекты (связанные с пластической деформацией, дислокациями роста, распределением примесей, включениями и др.).

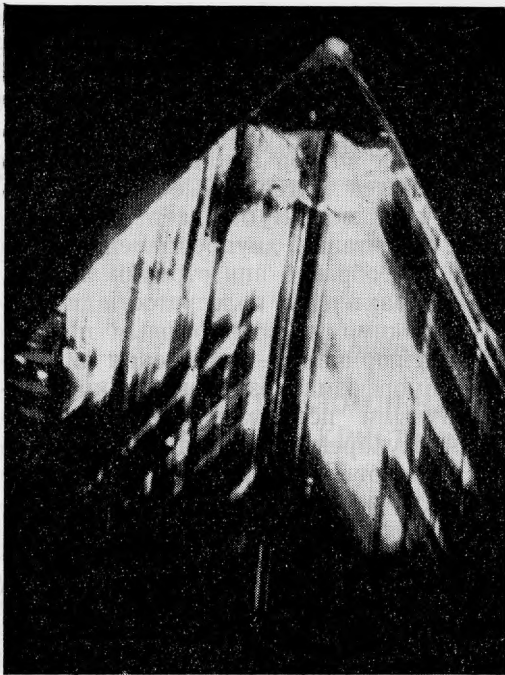


Рис. 1. Полосчатый узор двупреломления, обусловленный зональным строением кристаллов алмаза типа I. Увел. 13

на просветленных участках в связи с несколько отличающейся силой двупреломления в соседних зонах. Необходимо отметить, что видимый полосчатый узор двупреломления не представляет собой чередования светлых и темных зон, которые попеременно гаснут и снова просветляются, как это наблюдается, например, в полисинтетических микродвойниках плагиоклазов. Светлые и темные полосы в зональных кристаллах алмаза не образуют симметричного замкнутого четырехугольного узора. Полосчатый узор двупреломления с чередованием светлых и темных полос виден в отдельных местах пластины, а не по всей ее площади. Одна и та же зона у какой-либо грани обычно только частично бывает затемнена, т. е. в одно и то же время одна часть ее погашена, а другая остается светлой. При вращении столика картина изменяется, но не закономерно, как в анизотропных зональных кристаллах: в алмазных пластинах происходит волнистое погашение отдельных участков. При этом характер темных погашенных участков, пятнистое или волнистое погашение свидетельствуют о двупреломлении, связанном с объемными напряжениями, которые вызывают двупреломление в виде изогнутых изоклин или нескольких замкнутых темных контуров, расходящихся и сходящихся при вращении столика. На участках, имеющих зональное строение, темные линии изоклин как бы расщепляются по отдельным полосчатым зонам, но не по всей их длине, а только в той части, которая примыкает к погашенному участку кристалла.

В пластинках, выпиленных через центр кристалла алмазов типа I параллельно или под некоторым углом к плоскости (110), полосчатые узоры наблюдаются отчетливо. В пластинах, параллельных (100), полосчатость в узорах двупреломления проявляется менее четко. Фотографии таких разрезов и описание их приведены Деннингом (Denning, 1961), Г. Нейгаузом (Neuhaus, 1960), Винчеллом (Winchell, 1951). Картины, аналогичные описанным ими, наблюдались и нами в октаэдрах с сильно пришлифо-

Полосчатый узор двупреломления, обусловленный зональным строением кристаллов. Кристаллы алмазов типа I, относительно обогащенные примесью азота, обычно имеют зональное строение по октаэдру. С этой особенностью строения кристаллов связан полосчатый узор двупреломления. Он отчетливо вскрывается в скрещенных николях (рис. 1) в пластинках (шлифах), выпиленных через центр кристалла таким образом, чтобы плоскости распила были близки плоскостям {110}. Часто зонально-пластинчатое строение алмазов типа I проявляется только во внешних частях кристалла, в связи с чем полосчатый узор виден только у края пластин. Зональное строение кристаллов бывает выражено очень четко: отдельные зоны, образующие полосы разной толщины, параллельные ребрам октаэдра, отчетливо видны

ванными по $\{100\}$ двумя противоположными вершинами. Следует иметь в виду, что при наблюдении в поляризованном свете целых кристаллов с зеркально блестящими гранями $\{111\}$ получается оптическая иллюзия, подобная видимой в калейдоскопах: если на одной из граней видны светлая и темная полосы или включения, то они отражаются на всех четырех гранях октаэдра и при взгляде в направлении оси L_4 получается ложная симметричная картина.

А. В. Варшавский (1968) полагает, что зональное строение кристаллов алмаза по $\{111\}$ обусловлено неравномерным распределением примеси кремния. Этот вывод он подтверждает спектральным анализом, при котором в алмазе были обнаружены только два элемента: Si и В. Уже давно известно, что зональное строение имеют только кристаллы алмаза типа I, т. е. относительно обогащенные примесью азота. Отдельные зоны отличаются по содержанию азота характером образуемых им дефектов, влияющих на физические свойства. Зональное строение этих кристаллов обнаруживается при всех оптических исследованиях (спектры поглощения в ИК- и УФ-областях, люминесценция), которые позволяют установить ее «азотную» природу.

Полосчатый узор двупреломления, связанный с пластической деформацией. Пластическая деформация в кристаллах алмаза происходит путем скольжения по плоскостям $\{111\}$ в направлении $\langle 110 \rangle$ с поворотом блоков решетки вокруг $\langle 112 \rangle$ (Урусовская, Орлов, 1964). Линии скольжения, идущие в направлении $\langle 110 \rangle$, отчетливо проявляются на кривогранных поверхностях растворения и видны на октаэдрических гранях, если в результате травления вдоль них развиты цепочки треугольных фигурок травления. Они позволяют определить ориентацию плоскостей скольжения. В поляризационном микроскопе в скрещенных николях хорошо видно, что на плоскости скольжения двупреломление проявляется с максимальной силой. Особенно отчетливо это видно в кристаллах алмазов, окрашенных в розовато-фиолетовый и коричневый цвет, на которых всегда проявляются линии скольжения. На плоскостях скольжения наблюдаются яркие интерференционные окраски. Если проявлено несколько взаимопересекающихся систем скольжения, то по всему объему кристалла обнаруживается яркая интерференционная окраска. Обычно на кристаллах алмаза линии скольжения проявляются не по всей их поверхности, а локально. На округлых додекаэдрических кристаллах на каком-либо участке граней часто можно видеть систему линий скольжения, под прямым углом пересекающих ребро и переходящих с одной грани на другую. В скрещенных николях у этих линий скольжения виден полосчатый узор двупреломления. Это подробно было описано и проиллюстрировано в работе А. А. Кухаренко (1955).

Радиально-лучистые, лучистые и полигональные узоры двупреломления, обусловленные дислокациями роста. С помощью рентгенодифракционной топографии А. Р. Ланг (Lang, 1964) показал, что в некоторых алмазах находятся дислокации в виде тонких линий, идущих из центра кристалла к поверхности граней. Эти дислокации можно наблюдать и в поляризованном свете при скрещенных николях. Они имеют вид лучей, расходящихся из одной точки в разные стороны. Количество дислокационных линий может быть различным. Обычно исходной точкой дислокаций являются микроскопические включения. Если включение расположено в центре кристалла, то от включения, как правило, ко всем граням, т. е. во все стороны, отходят лучи дислокаций. В этом случае проявляется узор двупреломления в виде радиально-лучистого пучка (рис. 2). Лучистый узор (рис. 3) получается тогда, когда от включения дислокационные линии идут в пределах пирамиды роста какой-либо одной грани (111). При рассмотрении со стороны грани, на которой имеются выходы дислокацион-

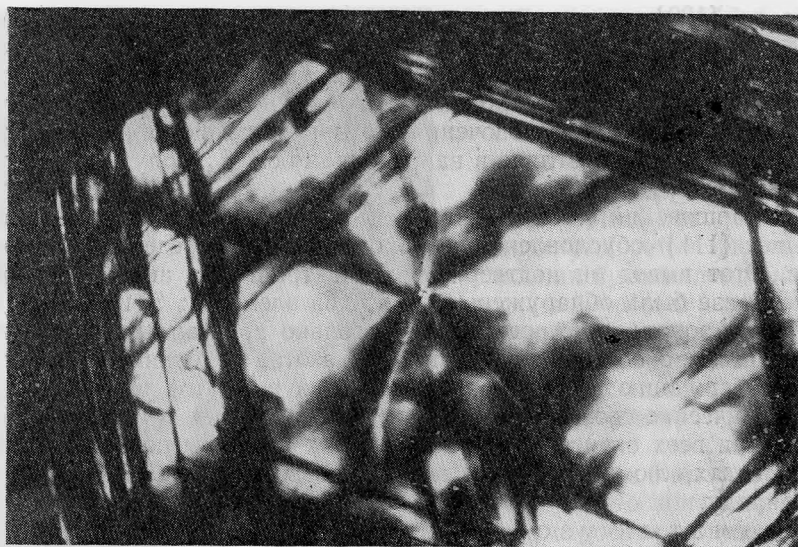


Рис. 2. Радиально-лучистый узор двупреломления, обусловленный дислокациями роста, идущими от включения из центра кристалла. Увел. 28

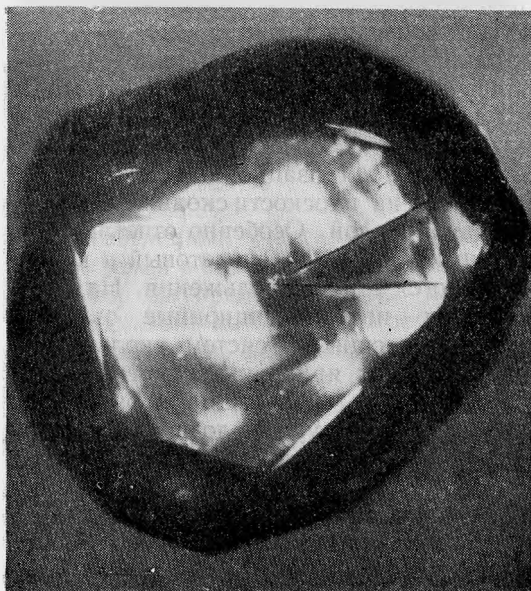


Рис. 3. Лучистый узор двупреломления (затемненный участок между двумя дислокационными линиями). Увел. 10

ных линий, в этом случае видны сложные полигональные узоры. Такого вида узоры двупреломления, согласно А. В. Варшавскому (1968), связаны с диагональными прослоями. Г. Г. Леммлейн (1948) называл диагональными прослоями следы роста ребер кристалла, которые имеют форму тончайших прослоев между пирамидами нарастания граней. Отождествление описываемых узоров двупреломления с диагональными плоскостями в определении, данном Г. Г. Леммлейном, по нашему мнению, является неточным. Эти узоры двупреломления обусловлены дислокациями роста, связанными с микровключениями и идущими от них в виде радиально-лучистых линий к поверхности граней кристалла, что хорошо показано в работе А. Р. Ланга (Lang, 1967).

Звездообразные узоры двупреломления, обусловленные секториальным характером распределения примесей. В некоторых алмазах наблюдаются узоры

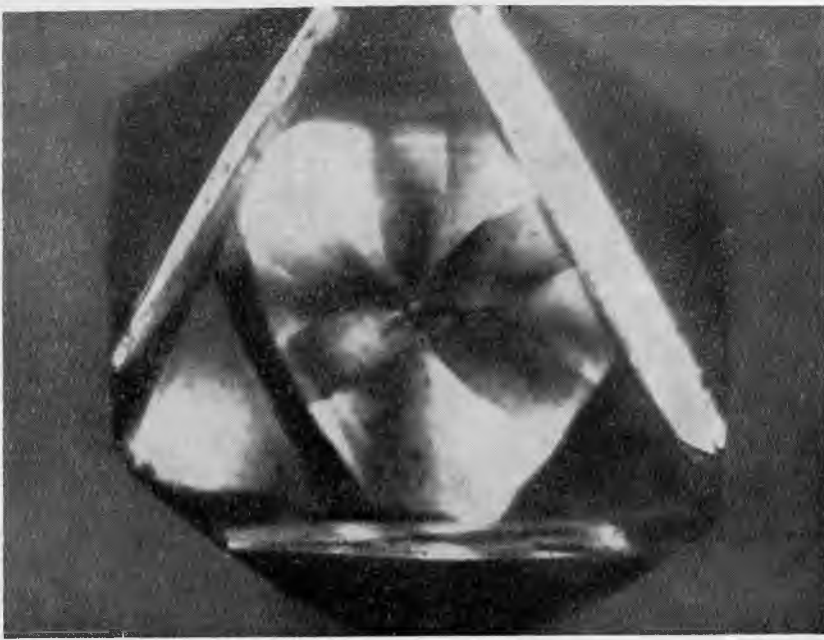


Рис. 4. Звездообразный узор дупреломления. Увел. 14

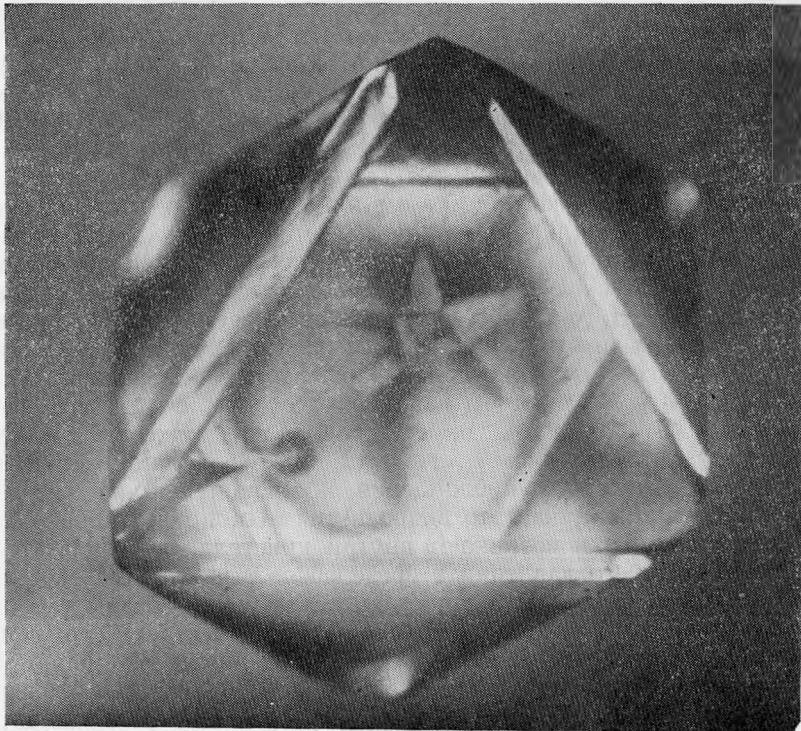


Рис. 5. Звездообразный узор дупреломления. Увел. 20

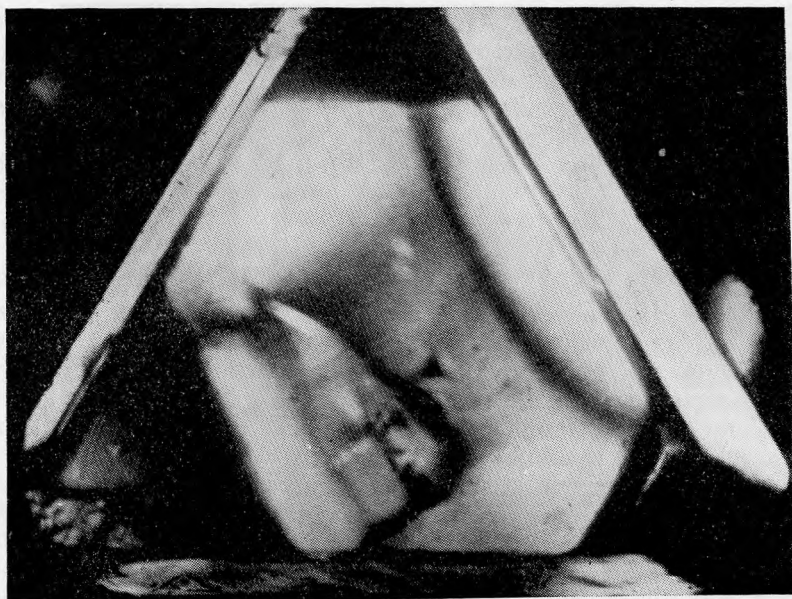


Рис. 6. Узор двупреломления в виде изоклин. Увел. 16

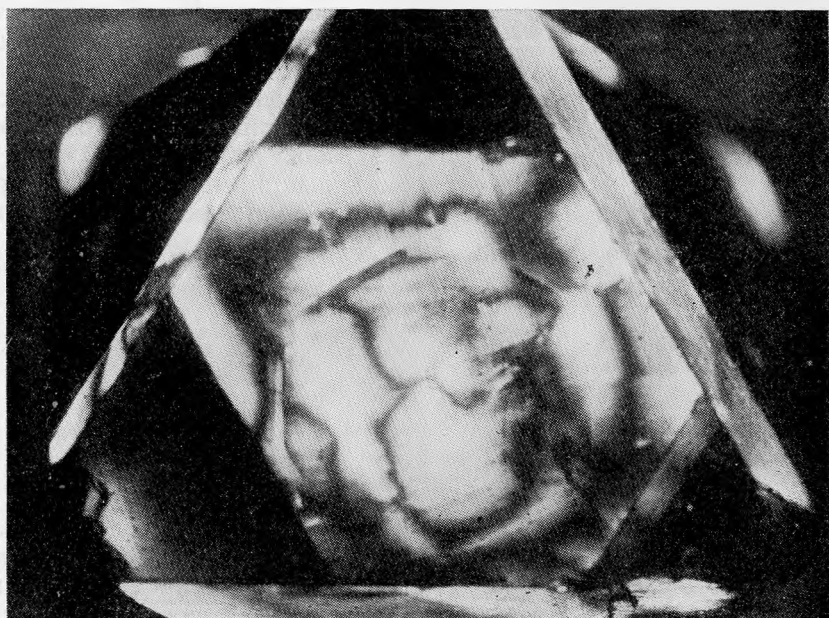


Рис. 7. Пятнистый узор двупреломления. Увел. 18

На этих участках сохраняются остаточные напряжения, возникающие после ударов в процессе механического дробления породы.

Узоры двупреломления в виде фантомов. Внутри некоторых алмазов при скрещенных николях наблюдаются темные «фантомы» октаэдрической (рис. 8), округлой, эллипсоидной и неправильной форм. Темные, т. е. изотропные, зоны в кристаллах могут появиться

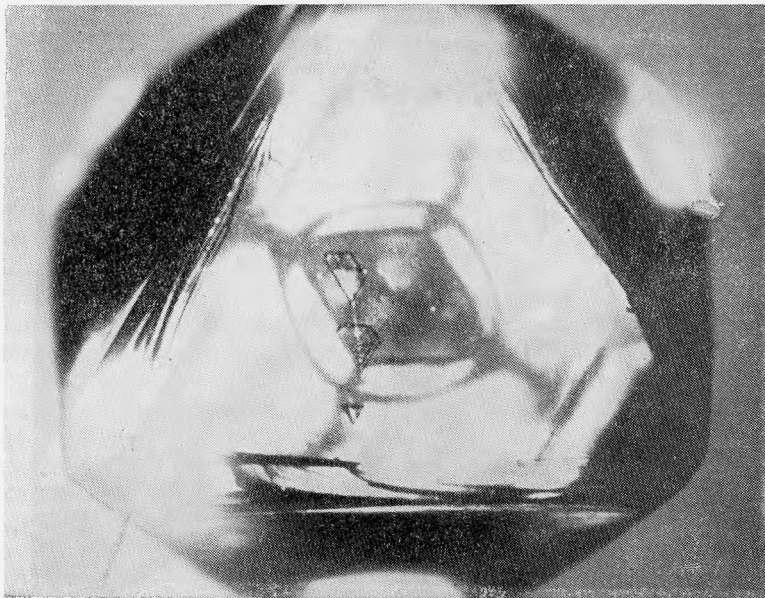


Рис. 8. Теневой фантом октаэдрической формы, окруженный слившимися друг с другом изогнутыми ветвями черных крестов, проявляющихся у каждой вершины L_4 фантома. Увел. 14, николи крещены

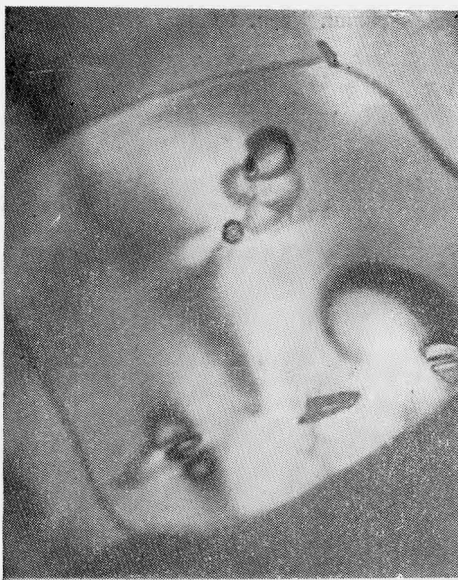


Рис. 9. Узор двупреломления у включения кристалликов оливина. Увел. 25

в случае, если в них существуют значительные напряжения, направленные в разные стороны. Например, в одном из октаэдрических кристаллов с пришлифованными вершинами $\{100\}$ нами было установлено, что центральная часть кристалла испытывает сжатие, а внешняя — растяжение. Переходная зона между этими двумя участками, в которой напряжения практически равны нулю, изотропна и имеет характер фантома. Естественно, что «внешние формы» таких фантомов могут быть разнообразными.

А. В. Варшавским (1968) детально описаны фантомы, отражающие зональное строение кристаллов. Как уже указывалось, в алмазах типа I наблюдается зональное, неравномерное распределение примеси азота. Вхождение азота, образующего дефекты в решетке алмаза, изменяет ее параметры, поэтому в зонах с разным содержанием примеси азота возникают неодинаковые напряжения. В связи с этим в поляризованном свете обна-

руживается зональное строение большинства алмазов типа I. При существенной разнице в двупреломлении отдельных зон в пластинках наблюдается полосчатый узор двупреломления, а в целых кристаллах могут появляться единичные или концентрически вписанные один в другой фантомы.

Узоры двупреломления, обусловленные включениями посторонних минералов. Узоры двупреломления, связанные с включениями посторонних минералов в алмазе, описаны многими исследователями. Они проявляются локально вокруг включений в виде темных и светлых пятен, часто образующих характерную крестообразную фигуру (рис. 9).

Узоры двупреломления, связанные с фигурами удара. Двупреломление, связанное со следами ударов на поверхности граней, было описано А. Р. Лангом (Lang, 1967), а затем А. В. Варшавским (1968). При большом увеличении часто на октаэдрических гранях кристаллов алмазов при скрещенных николях видны микроскопические крестообразные фигурки двупреломления, подобные наблюдаемым у включений. В этих местах всегда находятся небольшие повреждения в виде микроскопических трещинок, щербинок и т. п. Морфология этих трещинок и характер связанных с ними фигурок двупреломления детально проиллюстрированы А. В. Варшавским. Отметим, однако, что его мнение о возникновении их непосредственно в очаге кристаллизации при соударении алмазов с другими минералами нам кажется маловероятным. Эти удары могли иметь место во время механического дробления породы, при гравитационном обогащении в отсадочных машинах, при переносе кристаллов в аллювиальном потоке и т. п.

Узоры двупреломления в алмазах типа II. В алмазах типа II не обнаруживается зонального строения по октаэдру. При травлении поверхности пластин, вырезанных из этих алмазов, наблюдается ровно протравленное гомогенное поле, поэтому в них не проявляется полосчатого узора двупреломления, связанного с зональным строением по $\{111\}$. Другого вида узоры, обусловленные плоскостями скольжения, включениями, объемными напряжениями, а также связанные с дислокациями и другими дефектами, в алмазах типа II образуются, как и в алма-

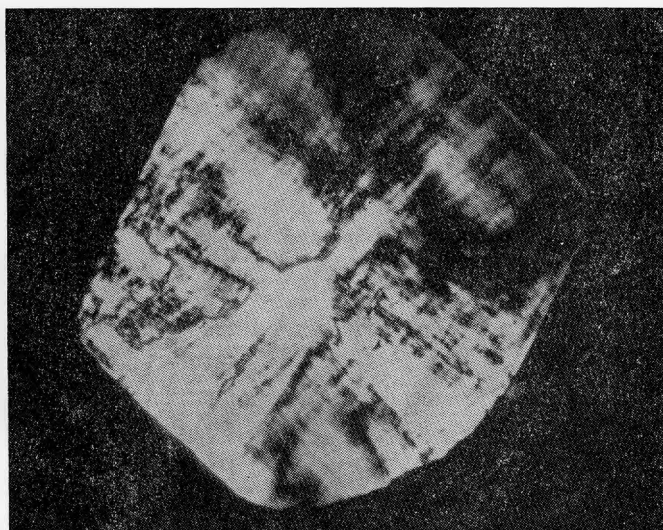


Рис. 10. Решетчатый узор двупреломления в кристалле алмаза типа II. Увел. 10

зах типа I. В некоторых пластинах, выпиленных из алмазов типа II, наблюдается характерный для них узор двупреломления (рис. 10), напоминающий микроклиновую решетку. Этот узор иногда называют «татами», так как он напоминает рисунок плетения японских соломенных ковриков, носящих это название. А. Р. Ланг (Lang, 1967) полагает, что такого вида узор двупреломления обусловлен пластической деформацией; им установлено, что полосы узора «татами» секут зоны роста кристалла и направление их совпадает с направлением линий скольжения.

Как видно из приведенного выше материала, узоры двупреломления в кристаллах алмаза очень разнообразны. Обычно наблюдается сложная картина узоров двупреломления, так как в каждом кристалле в той или иной степени происходит двупреломление, вызываемое объемными напряжениями, а также локальными напряжениями, связанными с отдельными зонами, обогащенными примесями, включениями посторонних минералов, дислокациями, дефектами на плоскостях скольжения, трещинами и фигурами удара.

Литература

- Бартошинский З. В., Гневушев М. А.* О причинах оптической анизотропии алмаза. — Мин. сб. Львовск. геол. об-ва, 1958, № 12.
- Варшавский А. В.* Аномальное двупреломление и внутренняя морфология алмаза. Изд-во «Наука», 1968.
- Кухаренко А. А.* Алмазы Урала. Госгеолиздат, 1955.
- Леммлейн Г. Г.* Секториальное строение кристаллов. Изд-во АН СССР, 1948.
- Орлов Ю. Л., Афанасьева Е. А.* О происхождении алмазов I и II типов и причинах отличия их физических свойств. — Новые данные о минералах СССР, 1966, вып. 17.
- Орлов Ю. Л.* Химический состав алмазов. — Новые данные о минералах СССР. Изд-во «Наука», 1972, вып. 21.
- Урусовская А. А., Орлов Ю. Л.* О характере пластической деформации кристаллов алмаза. — Докл. АН СССР, 1964, 154, № 5.
- Brauns D.* Die optischen Anomalien der Kristalle. Leipzig, 1891.
- Crookes W.* Diamonds. — Nature (London), 1897.
- Denning R. M.* Lamellar structure in a type I diamond. — Amer. Min., 1961, 46, № 5—6.
- Friedel G.* Sur la birefringence du diamant. — Bull. Soc. Franç. Min., 1924, 47, № 3—4.
- Friedel G., Ribaut G.* Sur un diamant à haute temperature. — Bull. Soc. Franç. Min., 1924, 47.
- Lang A. R.* Dislocation in diamond and the origin of trigons. — Proc. Roy. Soc., 1964, 278, № 1373.
- Lang A. R.* Causes of birefringence in diamond. — Nature, 1967, 213, № 5073.
- Lindley W.* Wachstumserscheinungen am Diamant. — Fortschr. Min. Krist. Petr. Berlin, 1937, 21.
- Mallard M.* Sur la fer natif de Canon Diablo. — C. R. Acad. Sci. Paris, 1892, 114.
- Neuhaus A.* Zur Symmetrie und Zwillingsbildung des Diamant. — Cursos V conferencias del instituto «Lucas Mallada», Madris, 1960.
- Remachandran G. N.* On the nature and origin of the lamination, observed in diamonds. — Proc. Indian Acad. Sci., 1946, A, 24, № 7.
- Raman C. V., Rendal G. R.* Birefringence patterns in diamond. — Proc. Indian Acad. Sci., 1944, A, 19, № 5.
- Rendal G. R.* Geometric patterns of fluorescence in diamond. — Proc. Indian Acad. Sci., 1946, A, 24, № 1.
- Seal M.* Structure in diamond as revealed by etching. — Amer. Min., 1965, 50, № 1, 2.
- Seal M.* Inclusions, birefringence and structure in diamond. — Nature, 1966, 212, № 5070.
- Shah C. J., Lang A. R.* An unusual distribution of precipitates in a diamond. — Min. Mag., 1963, 33.
- Sutton J. R.* Diamond. A descriptive treatise. London, 1928.
- Tolansky S.* Birefringence of diamond. — Nature, 1966, 211, № 5045.
- Williams A. F.* The Genesis of the diamond. London, 1932.
- Winchell A. N.* Elements of optical mineralogy. N. Y., 1951, Fourth edition, pt. II.