

УДК 549.211:548

ФОРМА НЕПЛОСКОГРАННЫХ АЛМАЗОВ

© 2004 г. В. И. Ракин

Представлено академиком Н.П. Юшкиным 23.07.2003 г.

Поступило 11.02.2003 г.

Форма природных алмазов обычно не бывает плоскогранной в отличие от искусственно выращенных кристаллов. Один из факторов, приводящий к потере остроты ребер и вершин, а также появлению явной кривизны граней кристалла алмаза чаще исходно октаэдрического габитуса, хорошо известен – это механическое истирание. Вторым и наиболее важным фактором – растворение. Непосредственными экспериментами по растворению кристаллов алмаза октаэдрического габитуса [1–3] показано, что их форма в предельном случае трансформируется в фигуру, близкую к додекаэдрюиду, характерному для алмазов уральского типа. Многими исследователями большое генетическое значение придается микрорельефу неплюскогранной поверхности кристаллов: штриховке, бороздам, ямкам травления [3, 4]. Однако, не касаясь деталей рельефа поверхности, до сих пор не решен вопрос об общей форме неплюскогранных кристаллов, ее описании и генезисе.

Нами проведены исследования 27 кристаллов алмаза Среднего Тимана, Среднего Урала (Россия) и провинции Минас Жераис (Бразилия). Морфологические исследования выполняли на параболическом гониометре, преобразующего систему световых рефлексов от кристалла в гномоническую проекцию его полярного комплекса (рис. 1) [5].

Традиционно для описания облика неплюскогранных алмазов используются кристаллографические термины. Описанная Ю.Л. Орловым [6] классификация кристаллов алмазов с выпуклыми поверхностями включает четыре типа: додекаэдрюид, октаэдрюид, кубюид и тетраэдрюид. Учитывая треугольную форму рефлексов от элементарных криволинейных поверхностей (рис. 1), значения угловых расстояний между вершинами световых фигур, по мнению Ю.Л. Орлова [6] могут служить характеристиками формы округлых кристаллов. Однако угловые размеры световых фигур (рис. 1) нельзя однозначно связывать с кривизной и, соответственно, формой поверхности.

Главным параметром, определяющим облик кристалла, является положение максимума интенсивности на поле рефлекса. Для качественной оценки облика кристалла, по нашему мнению, достаточно следующих признаков:

Додекаэдрюид: максимум интенсивности светового рефлекса локализуется у точки D (рис. 1), при этом угол $D'D''$ уменьшается (в минимуме до 0°).

Октаэдрюид: максимум интенсивности светового рефлекса локализуется вблизи точек A и B . Угол AB растет (максимуме – 70.5°).

Кубюид (тетрагексаэдрюид): максимум интенсивности приходится на точку C рефлекса, угол $C'C''$ растет (максимуме – 90°).

Как правило, внешнее впечатление об облике кристалла совпадает с оценкой формы на гониометре с учетом приведенных признаков. Справед-

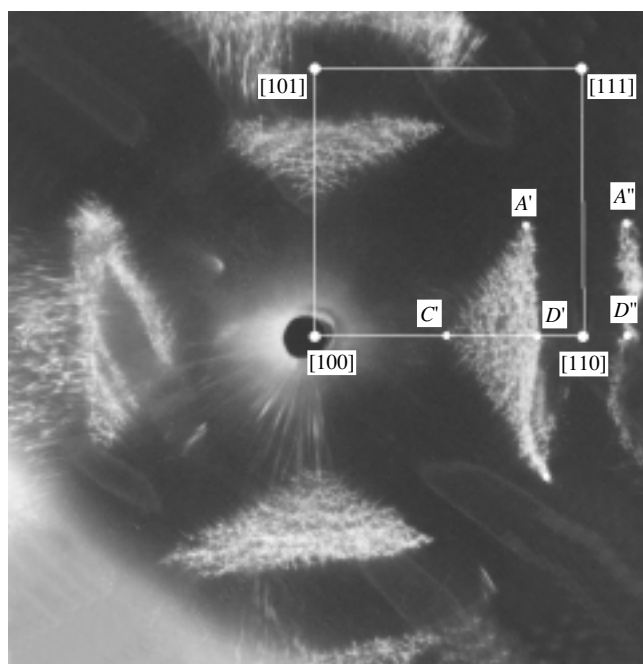


Рис. 1 Фотогномограмма алмаза предельного додекаэдрического типа, ориентированного по оси L^4 , демонстрирующая понижение симметрии формы кристалла до $4/m$. Выделены характерные точки рефлекса согласно [6].

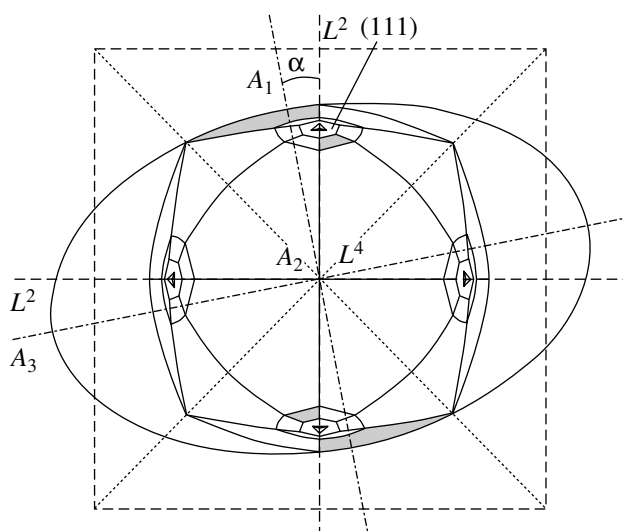


Рис. 2. Эллипсоидная форма округлого кристалла алмаза. Пунктирная линия – исходный октаэдр. Темным цветом отмечены поверхности, принадлежащие выделенному эллипсоиду.

ливо следующее правило: чем больше площадь рефлекса на гномонической проекции от элементарной криволинейной поверхности, тем более округлым является кристалл. По нашему мнению, условное разделение кристаллов по облику не может служить основанием для генетических выводов, а служит только утилитарной цели классификации алмазов.

В лабораторных условиях при растворении алмазов [1, 2] были получены формы неплюскогранных кристаллов: тригонтриоктаэдр, тригонгексоктаэдр, близкие к додекаэдрю природного алмаза уральского типа. Однако в эксперименте формы, идентичные природным кристаллам (додекаэдроидам), до сих пор не получены. Главными признаками, отличающими экспериментальные формы от природных, являются: отсутствие “гранного шва”, встречающегося на природных поверхностях додекаэдроидов (ребра близкого к направлению $\langle 100 \rangle$ в структуре алмаза) и явное присутствие ребер $\langle 110 \rangle$ между смежными гранями тригонтриоктаэдроидов на искусственно растворенных кристаллах, что совершенно не характерно для природных алмазов.

По нашему мнению, этот факт объясняется статическими условиями растворения алмазов в экспериментах, в отличие от динамических природных условий, характеризующих поступательно-вращательным движением кристалла в ходе его растворения в поле градиента скоростей.

Согласно принципу Кюри в форме кристалла сохраняются только те элементы симметрии, которые являются общими как для кристалла, так и для кристаллообразующей среды. Изученные нами неплюскогранные алмазы обычно демонстрируют в

соответствии с принципом Кюри понижение исходной симметрии кристалла ($m\bar{3}m$) до $4/m$, $2/m$ или $\bar{6}$. Если предположить, что растворение кристалла сопровождается его вращением вокруг некоторой оси, то при совпадении оси вращения с осью симметрии четвертого порядка симметрия формы кристалла понизится до $4/m$ (рис. 1). В этом случае из трех осей симметрии L^4 остается только одна (рис. 1), а другие вырождаются в плоскость симметрии. При совпадении оси вращения кристалла с осью второго порядка его структура симметрии формы понизится до $2/m$, а вращение вокруг оси третьего порядка приведет к понижению внешней симметрии до $\bar{6}$.

Процесс растворения алмаза в природных условиях, вероятно, происходит достаточно быстро и он непосредственно связан с резким изменением термодинамической обстановки возможно еще в мантии – в результате сброса давления при тектонических процессах. Прорыв магмы должен также вызывать сброс давления как в самом веществе трубки, так и на достаточно большом расстоянии от нее. Резкое падение давления, во-первых, вызывает отклонение от равновесия в системе алмаз–среда, что приводит к началу процесса растворения, и, во-вторых, является причиной механического движения вещества. Наиболее интенсивный процесс растворения кристалла алмаза должен происходить в самой магме в момент извержения. Кристалл алмаза, вращаясь в гидродинамическом турбулентном потоке быстро движущейся и многофазной по составу магмы, подвергается и небольшому механическому истиранию. Чем быстрее кристалл выносится на поверхность, тем более вероятно сохранение его исходной формы (облика) и массы. Возможно, в основном благодаря движению кристалла, исчезает ребро $[110]$, отличающее тригонтриоктаэдр, наблюдаемый в экспериментах, от ромбододекаэдроидов (без гранного шва) или тригонгексоктаэдроидов от ромбододекаэдроидов с гранным швом.

В результате исследования формы округлых алмазов на параболическом гониометре установлено, что криволинейная поверхность природных кристаллов алмаза – додекаэдров может быть описана с помощью трехосного эллипсоида, располагающегося закономерным образом относительно структуры кристалла и размноженного с помощью группы симметрии до двенадцати. Эллипсоид, имеющий полуоси A_1 , A_2 , A_3 (пронумерованные в порядке возрастания), располагается относительно структуры кристалла так, что ось A_2 всегда направлена по оси L^4 , а две другие наклонены к осям L^2 , перпендикулярным выделенной оси четвертого порядка, под небольшим углом α (рис. 2). В результате пересечения поверхностей соседних эллипсоидов формируется такая поверхность, которая на гномонической проекции отображается

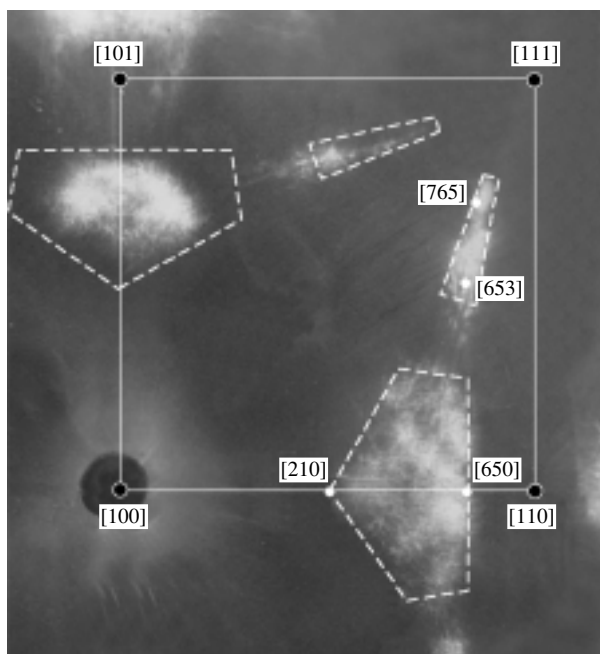


Рис. 3. Фрагмент фотогномограммы кристалла алмаза с участками выпуклых поверхностей додекаэдроиды и тригонгексоктаэдроиды (выделены пунктирной линией), принадлежащих симметричным эллипсоидам с одним набором параметров.

характерным треугольным рефлексом *ABC* (рис. 1). Небольшая асимметрия поверхности реального кристалла, как уже было отмечено, обусловлена направлением вращения кристалла. Общее количество криволинейных поверхностей, образующих предельную фигуру растворения – додекаэдроид с “гранным швом” (без реликтовых граней октаэдра), равно 24.

По нашему мнению, близкая к эллипсоиду форма поверхности алмаза отражает динамическую индикатрису устойчивости структуры гомеоплярного кристалла алмаза процессам растворения и частично истирания. Поэтому весьма примечательно, что эллипсоид жестко связан со структурой кристалла. Две из четырех осей симметрии L^3 , ближайшие к полуоси A_1 часто совпадают с нормальными к поверхности эллипсоида в определенных точках. Важно, что в этих точках, располагающихся в центрах граней идеального октаэдра, поверхности шести смежных эллипсоидов совмещаются. Именно поэтому грань октаэдра проявляет наибольшую устойчивость к растворению и дольше сохраняется в реликтовом виде. В такой обстановке, на гранях октаэдра, формируются ямки травления, демонстрирующие медленное, диффузионное растворение, характерное для поверхностей с нулевой или отрицательной кривизной.

При наличии реликтовых граней октаэдра на одном кристалле можно обнаружить до шести фрагментов поверхностей, принадлежащих одно-



Рис. 4. Поверхность растворенного кристалла алмаза с фрагментами поверхностей реликтовой грани октаэдра, декорированной ямками травления, додекаэдроиды с гранным швом и тригонгексоктаэдроиды, разделенных ребрами.

му эллипсоиду (рис. 2). Два характерных рефлекса на гномограмме (рис. 3), расположенные в сферическом треугольнике с вершинами [100], [110] и [111], ранее интерпретировались как две разные формы: додекаэдроид с гранным швом и тригонгексоктаэдроид. Однако они представляют собой фрагменты поверхности симметричных эллипсоидов одного типа. Поверхности тригонгексоктаэдроиды сохраняются на кристалле только при наличии смежной реликтовой грани октаэдра (рис. 4) и исчезают вместе с ней. С учетом реликтовых граней октаэдра при некотором отношении полуосей A_2/A_1 эллипсоида на изометричном кристалле можно обнаружить до 80 поверхностей, разделенных явно заметными ребрами.

По световым рефлексам кристалла можно установить параметры определяющего его форму эллипсоида (A_1, A_2, A_3) и угол его наклона α , пользуясь следующими формулами:

$$A_1 = \frac{d}{2},$$

$$A_2 = A_1 \sqrt{\frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \beta}},$$

$$A_3 = A_1 \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\varepsilon - \alpha)}{\operatorname{tg} \gamma}},$$

где d – диаметр кристалла в направлении полуоси A_1 (рис. 2), $ad = 35.26^\circ$ – угол между направлениями [111] и [110] в структуре алмаза, $\varepsilon = 45^\circ$ – угол между направлениями [100] и [110], α – половинный угол между точками D' и D'' рефлекса, β – угол между точками A и D , γ – угол между точками C и D (рис. 1). Приведенные формулы являются приближенными и получены для идеального до-

декаэдроид с гранным швом (без реликтовых граней октаэдра) и с учетом малого угла α . Удобнее пользоваться значениями длин полуосей, отнесенными к наименьшей – A_1 (радиусу кристалла).

Эволюция формы кристалла в процессе растворения изначального октаэдрического кристалла происходит в определенной последовательности, которую в общих чертах можно описать, пользуясь эллипсоидной моделью. Начало растворения вершин и ребер октаэдра алмаза приводит к формированию эллиптического цилиндра (эллипсоида с параметрами $A_1/A_1, A_2/A_1, A_3/A_1, \alpha - 1, 1.4, \infty, 0^\circ$). На гранях октаэдра появляются ямки травления, субграницы которых сложены поверхностями, параллельными эллиптическому цилиндру. С этой позиции легко объяснима так называемая “обратная” ориентация ямок травления. Далее, в ходе растворения формируется гранный шов, указывающий на появление угла разориентации эллипсоида – α . Согласно нашим измерениям и данным, приведенным в работе [6], в пределе угол α достигает 7° . Одновременно вблизи вершин кристалла еще октаэдрического облика появляются фрагменты поверхностей тригонгексоктаэдра, окружающие грань октаэдра. Поверхности додекаэдроиды связаны с поверхностями тригонгексоктаэдроиды и образуют единую поверхность эллипсоида (рис. 2). С течением времени растворения фрагменты поверхностей становятся все более выпуклыми и в пределе, с исчезновением граней октаэдра (и поверхностей тригонгексоктаэдроиды), остаются только поверхности додекаэдроиды, дающие на гномонической проекции характерный треугольный рефлекс (рис. 4).

В ходе процесса растворения параметры полуосей эллипсоида, описывающего поверхность кристалла, сближаются, вместе с тем субграницы сохраняющихся ямок травления на реликтовых гранях октаэдра отражают поверхность эллиптического цилиндра, характерного для более ранней стадии процесса. Это объясняется более медлен-

ным диффузионным растворением вещества с поверхностей с нулевой или отрицательной кривизной. Наиболее симметричный додекаэдроид и, вероятно, максимально подвергшийся растворению из исследованной нами выборки бразильских алмазов, характеризовался следующим набором параметров эллипсоида: 1, 1.23, 1.41, 6.3° .

Можно допустить, что окислительно-восстановительные и термодинамические условия растворения оказывают влияние на форму кристалла (параметры обобщенного эллипсоида), однако не меняют общую тенденцию ее развития, заключающуюся в стремлении к более округлому облику алмаза.

Таким образом, форму растворения кристалла алмаза можно описать фрагментами поверхностей обобщенного трехосного эллипсоида (описываемого четырьмя параметрами), размноженных элементами симметрии $m3m$ структуры алмаза. Данная форма, по нашему мнению, является динамической неравновесной формой, отражающей трехмерную индикатрису растворения и частичного истирания гомеоплярного кристалла алмаза в условиях гидродинамического переноса вещества в многофазной минералообразующей среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хохряков А.Ф., Пальянов Ю.Н. // Минерал. журн. 1990. Т. 12. № 1. С. 14–23.
2. Хохряков А.Ф., Пальянов Ю.Н., Соболев Н.В. // ДАН. 2002. Т. 384. № 5. С. 670–673.
3. Хохряков А.Ф., Пальянов Ю.Н. В сб.: Новые идеи и концепции в минералогии. Материалы III Международ. минерал. семинара. Сыктывкар, 2002. С. 170–1717.
4. Евдокимов М.Д., Ладыгина М.Ю., Нестеров А.Р. // Урал. геол. журн. 2000. Т. 16. № 4. С. 9–43.
5. Глазов А.И. Методы морфометрии кристаллов. Л.: Недра, 1981. 147 с.
6. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1973. 224 с.