Записки Ленинградского горного института им.Г.В.Плеханова.
Т. 125. Л., 1991

УДК 622.235

ВОЗДЕЙСТВИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА КРИСТАЛЛЫ АЛМАЗОВ ВО ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ ПРИ ВЗРЫВНОЙ ИХ ОТБОЙКЕ

В.А.БОРОВИКОВ, И.Ф.ВАНЯГИН, М.Г.МЕНЖУЛИН

Проблема обеспечения сохранности естественных кристаллов алмаза при разработке месторождений кимберлитов взрывным способом является весьма актуальной. Для решения этой проблемы чрезвычайно важно изучить физические явления, протекающие в кристаллах в процессе разрушения кимберлитов и приводящие к разрушению алмазов, т.е. механизм разрушения монокристаллов под действием волн напряжений и квазистатического давления продуктов взрыва.

Естественные алмазы встречаются во вмещающих породах в виде отдельных монокристаллов и их обломков и кристаллических агрегатов различных форм и размеров: от примерно 0,5 мм (алмазная мелочь) до 4-7 мм (алмазы средних размеров) и более. Более крупные алмазы встречаются весьма редко. Форма кристаллов часто искажена: грани обычно округлые, удлиненные и приплюснутые, нередки кристаллы со ступенчатыми и полицентрическими гранями. Встречаются кристаллы в виде двойников или параллельных сростков различных конфигураций, а также незакономерные сростки в виде борта, балласа и карбонадо.

Для кристаллов алмаза характерны структурные дефекты и микродефекты. К структурным дефектам относят дефекты кристаллической решетки: точечные - вакансии, межузельные атомы, центры окраски; линейные (одномерные) - дислокации; поверхностные (двумерные) - границы зерен, двойников и межфазные границы. Среди микродефектов выделяют дефекты роста (дефекты на границах роста, дефекты включений графита и других веществ в кристалл алмаза) и дефекты растворения (следы растворения в виде каверн и глубоких каналов).

В кристаллах отмечают также и механические дефекты в виде сколов по вершинам, ребрам и граням и в виде трещин от микроскопических до сравнительно больших, заполненных обычно графитом и оксидами железа, с соответствующей черной или бурой (желтой) окраской.

Дефекты кристаллов существенно влияют на их физико-механические свойства, в том числе прочностные, особенности их нагружения и разрушения при нахождении во вмещающей породе.

Характер воздействия нагрузки на кристалл существенно зависит от соотношения между длительностью нарастания этой нагрузки и размером кристалла. Для нагрузок с относительно медленным нарастанием взаимодействие

с кристаллом можно рассматривать в квазистатическом приближении. Взаимодействие ударных нагрузок с крутым фронтом нарастания с кристаллами существенно отличается от квазистатического.

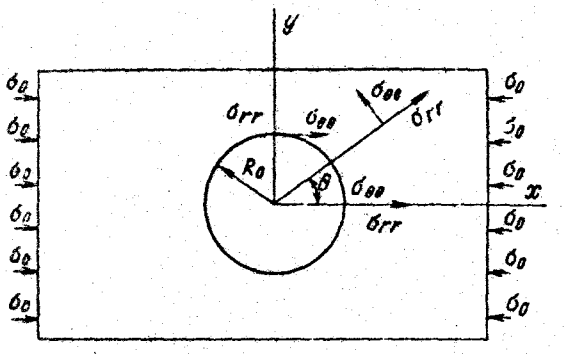


Рис.1. Схема нагруженного состояния круглого диска радиусом R_0, впаянного в пластину, сжимаемую по оси x постоянным напряжением σ_0

Для анализа характера разрушения кристаллов алмаза при квазистатическом нагружении рассмотрим следующую плоскую задачу. Представим кристалл в виде круглого диска, расположенного в плоскости x, y во вмещающей породе, в которой создано равномерное напряжение σ_{rr} по направлению r и $\sigma_{\theta\theta}$ в перпендикулярном направлении (рис.I). На бесконечности среда сжимается нагрузкой σ_0, направленной вдоль оси x и равномерно распределенной по оси y. Задача распределения напряжений при растяжении-сжатии бесконечной пластинки с впаенным в нее упругим круговым включением (шайбой) радиусом R_0 решена в работе [4]. Установлено, что напряжения в шайбе (упругом включении) не зависят от расстояния от центра R:

$$\sigma_{rr}^{(a)} = \frac{\sigma_0}{2}\left(\beta_2 + \delta_2 \cos 2\theta\right);$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{(a)} = \frac{\sigma_0}{2}\left(\beta_2 - \delta_2 \cos 2\theta\right); \qquad (I)$$

$$\sigma_{r\theta}^{(a)} = -\frac{\sigma_0}{2}\delta_2 \sin 2\theta,$$

где

$$\beta_2 = \frac{2(1-\nu_K)q}{q + (1+\nu_a)(1-2\nu_a)/(1+\nu_K)};$$

$$\delta_2 = \frac{4(1-\nu_K)q}{q(3-4\nu_a)+(1+\nu_a)/(1+\nu_K)}; \qquad (2)$$

ν_K и ν_a – соответственно коэффициенты Пуассона вмещающей среды (кимберлита) и упругого включения (алмаза); $q = E_a/E_K$; E_K и E_a – соответствующие этим средам модули упругости.

В этом случае напряжения во внешней упругой среде $\sigma_{rr}^{(k)}$, $\sigma_{\theta\theta}^{(k)}$ и $\sigma_{r\theta}^{(k)}$ зависят от отношения R_0/R, причем наибольших значений они достигают на границе с включением, а при $\theta = 0{,}5\pi$ и $\theta = 1{,}5\pi$ при сжатии упругой среды на границе с включением возникают растягивающие напряжения, что

может привести к отрыву внешней ср ды от включения и образованию в ней трещины.

По формулам (I) и (2) можно оценить концентрацию напряжений

$$K_r = \sigma_{rr}^{(a)} / \sigma_0 ; \quad K_\theta = \sigma_{\theta\theta}^{(a)} / \sigma_0 ; \quad K_{r\theta} = \sigma_{r\theta}^{(a)} / \sigma_0 ,$$

исходя из значений ν_K, E_K для кимберлитов и ν_a, E_a для монокристаллов алмаза. Модуль упругости и коэффициент Пуассона монокристаллов алмаза зависят от их нагружения по различным плоскостям спайности. Так, по данным [3], значения E_a колеблются от I060 до I200 ГПа ($E_{a\,ср}$ = = II40 ГПа), а ν_a от 0,072 до 0,I3 (среднее значение $\nu_{a\,ср}$ = 0,I). Коэффициенты Пуассона для кимберлитов различной твердости отличаются незначительно и в среднем ν_K = 0,3. Модули упругости твердых и мягких кимберлитов различаются примерно в 2 раза: для твердых кимберлитов E_K = 36,3 ГПа, для мягких E_K = I6,8 ГПа.

Оценочные расчеты по формулам (I) и (2) коэффициентов концентрации в направлении, совпадающем с внешним напряжением σ_0, дали следующие результаты: для твердых кимберлитов при $\theta = 0$ и $\theta = \pi$ K_r = I,22 и K_θ = = 0,I52, а в перпендикулярном направлении при $\theta = 0{,}5\pi$ и $\theta = I{,}5\pi$ K_r = 0,I52, K_θ = I,22. При этом коэффициент концентрации сдвиговых напряжений в этих направлениях $K_{r\theta} = 0$, его максимальное значение в направлении $\theta = 0{,}25\pi$ $K_{r\theta} = -0{,}533$.

Соответствующие оценки для мягких кимберлитов следующие: при $\theta = 0$ и $\theta = \pi$ K_r = I,23, K_θ = 0,I57; при $\theta = 0{,}5\pi$ и $\theta = I{,}5\pi$ K_r = 0,I57 и K_θ = I,23; при $\theta = 0{,}25\pi$ $K_{r\theta} = -0{,}536$.

Таким образом, при сжимающей нагрузке σ_0, что имеет место при квазистатическом действии продуктов взрыва, кристалл сжимается и в направлении действия внешней нагрузки, и в перпендикулярном направлении. В направлении сдвиговых деформаций ($\theta = 0{,}25\pi$) действуют растягивающие напряжения, которые могут привести к расколу кристалла в этом направлении при совпадении их направления с одной из трех плоскостей совершенной его спайности.

При нагружении естественных кристаллов возможно увеличение концентрации напряжений при наличии в них микротрещин. В этом случае развитие трещин и разрушение кристалла происходит за счет растягивающих напряжений на носике трещины, превосходящих предел прочности алмаза на разрыв. В свою очередь, предел прочности алмаза на разрыв существенно зависит от микродефектов кристаллов и колеблется в весьма широких пределах. Если совершенные кристаллы (без видимых дефектов) могут выдерживать без раскалывания статические нагрузки на разрыв, доходящие до 200 ГПа, то для естественных кристаллов алмаза, имеющих различные рода дефекты, предел прочности на разрыв может уменьшиться на 2–3 порядка. Большинство естественных кристаллов имеют предел прочности на сжатие около 2–4 ГПа, а предел прочности на кручение и поперечный излом примерно 0,3 ГПа.

Вопрос о пределе прочности алмаза на разрыв (при образовании сколов и трещин) является в настоящее время далеко не выясненным, особенно при динамических (ударных) нагрузках. В ряде работ утверждается, что, несмотря на большую твердость, алмазы весьма хрупки и легко раскалываются при ударных нагрузках, особенно при наличии в них микротрещин, внутренних напряжений и различных дефектов. Для приближенной оценки предела прочности на отрыв естественных алмазов, обладающих микротрещиноватостью, можно воспользоваться величиной теоретической прочности алмаза ($\sigma_{р.т} = 2 \cdot 10^2$ ГПа) и известными зависимостями Гриффитса и Орована по концентрации напряжений на трещинах. Простое сравнение формул Орована и Гриффитса дает зависимость для определения предела прочности алмаза с микротрещиноватостью

$$\sigma_{сж} = \sqrt{\frac{a_0}{\ell}}\,\sigma_{р.т}, \qquad (3)$$

где $a_0 \simeq 10^{-8}$ см – межатомное расстояние в кристаллической решетке алмаза; ℓ – длина микротрещины, см.

Так, при длине микротрещины $\ell = 10^{-2}$ см

$$\sigma_{сж} = 2 \cdot 10^2 \sqrt{\frac{10^{-8}}{10^{-2}}} = 2 \cdot 10^{-1} = 0{,}2 \text{ ГПа} = 200 \text{ МПа},$$

т.е. прочность алмаза на отрыв $\sigma_{отр}$ уменьшается при этом примерно на 3 порядка.

Для исследования механизма разрушения кристаллов алмаза квазистатическим давлением продуктов взрыва были на обычном прессе проведены статические испытания на разрушение при сжатии и разрыве образцов цилиндрической формы $h_{об} = d_{об} = 60$ мм, изготовленных из тиосульфата натрия и двух марок песчано-цементной смеси с расположенными в них кристаллами – имитаторами алмаза, изготовленными из оптического стекла и искусственного граната. Выбор имитаторов кимберлита и алмаза производился, исходя из условий соблюдения равенства отношений акустических жесткостей и прочностных характеристик кристаллов и вмещающих пород:

$$\frac{\rho_а c_{р,а}}{\rho_к c_{р,к}} \simeq \frac{\rho_{ид} c_{р,ид}}{\rho_{ик} c_{р,ик}}; \quad \frac{\sigma_{сж,а}}{\sigma_{сж,к}} \simeq \frac{\sigma_{сж,ид}}{\sigma_{сж,ик}}; \quad \frac{\sigma_{отр,а}}{\sigma_{отр,к}} \simeq \frac{\sigma_{отр,ид}}{\sigma_{отр,ик}}, \qquad (4)$$

где ρ – плотность; $c_р$ – скорость продольной волны; индексы $а$, $к$, $ид$ и $ик$ обозначают соответственно алмаз, кимберлит, имитаторы алмаза и кимберлита.

В этих испытаниях использовались в основном кристаллы кубической формы, которые размещались строго посередине образцов выбранных сред и на их оси. Кристаллы располагались по отношению к направлению разрушающей нагрузки $\overline{P}_{с,р}$ в трех положениях (рис.2): гранью и ребром перпендикулярно к $\overline{P}_{с,р}$ (соответственно I и 2) и вершиной в направлении действия силы $\overline{P}_{с,р}$ (3). Проводилось две серии испытаний: разрушение образцов без кристаллов

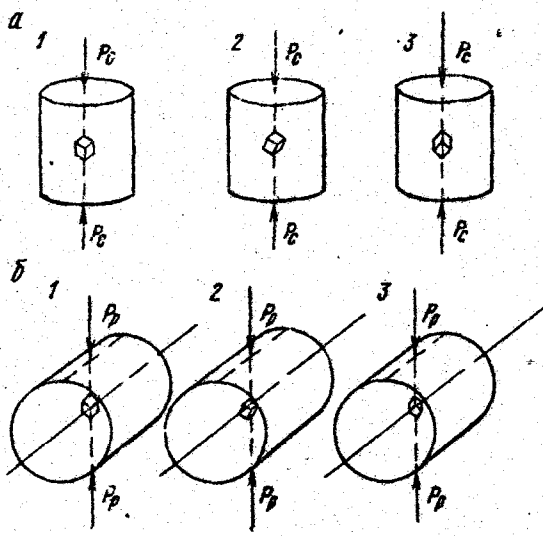


Рис.2. Схема опытов на образцах вмещающих пород с кристаллами: а – при сжимающей деформации образца P_c; б – при разрывающей деформации образца P_p
1, 2 и 3 – положения кристалла относительно действующей нагрузки

и с кристаллами. В первом случае определялись пределы прочности выбранных вмещающих пород на сжатие и отрыв, во втором – влияние кристаллов на прочность вмещающих пород и разрушение самих кристаллов. Было установлено, что наличие кристаллов в образцах вмещающих пород существенно снижает их сопротивляемость разрушению, особенно при испытаниях на разрыв. Так, прочность образцов с кристаллами при сжимающих нагрузках уменьшается в ряде случаев не менее чем в 2 раза, особенно при расположении кристаллов гранью и ребром перпендикулярно к направлению нагружаемой силы. Разрушение начинается с образования трещины по плоскостям граней кристаллов, затем, при небольшом увеличении нагрузки, наблюдается полное разрушение образца. Кристаллы видимых повреждений не получают. При испытаниях на разрыв образцов с кристаллами разрушающие усилия в 1,5–2 раза ниже, чем для образцов без кристаллов. В этом случае образец раскалывается на две примерно равные половинки, причем трещина разрыва проходит через кристаллы, расположенные гранью и вершиной перпендикулярно разрушающему усилию. Нарушений в кристаллах при этом не обнаружено.

При расположении кристалла гранью перпендикулярно прилагаемой нагрузке образовавшийся раскол имеет ступенчатый характер: до кристалла раскол идет посередине образца, затем вдоль взаимно перпендикулярных граней и заканчивается в направлении одной из граней, параллельной прилагаемой нагрузке. При этом возникают дополнительные изгибающие усилия на кристалл, приводящие к возникновению в кристалле скалывающих деформаций в направлении плоскости совершенной спайности, т.е. перпендикулярной плоскости, соединяющей противоположные вершины куба.

Таким образом, статические сжимающие нагрузки, приводящие к разрушению вмещающих пород, не являются опасными для кристаллов. Нагрузки, приводящие к разрывным деформациям этих пород и образованию в них трещин, могут привести к нарушениям целостности кристаллов (сколов и трещин), если при этом создаются условия для возникновения изгибающих усилий в плоскостях совершенной спайности кристаллов. Это возможно в зоне трещинообразования в процессе роста трещин, особенно при наличии естественной трещи-

новатости различных направлений, и в процессе вспучивания в направлении линии наименьшего сопротивления разрушаемой вмещающей породы, а также при перемещении горной массы и образовании навала. Не исключено возникновение такой ситуации и при процессах обогащения горной массы, сопровождающееся не только ударными скалывающими нагрузками, но и повышением температуры, также снижающей прочность алмазов.

Совершенно иной характер воздействия на кристаллы алмаза имеет место в динамическом поле напряжений, вызванном ударной волной и волной напряжений с достаточно крутым фронтом в ближней зоне взрыва радиусом $r = 12 \div 15 R_з$, где $R_з$ – радиус заряда. В этой зоне напряжения в волне близки к 0,1 ГПа, а длительность нарастания ее до максимума $\tau_н$ достаточно мала. Поскольку кимберлит является относительно малоплотной пористой породой, то можно предположить, что при распространении ударной волны в ближней зоне взрыва, начиная с момента развала ее фронта ($r = 2 \div 3 R_з$) и до окончательной трансформации ее в волну напряжений ($r = 12 \div 15 R_з$), скорость распространения максимума волны будет мало отличаться от скорости продольной волны ($c_{р,к} = 3 \div 4$ км/с). Следовательно, в этой зоне действие волны напряжений можно считать близким к ударному, так как $\tau_н = 2 \div 4$ мкс (протяженность нарастания волны напряжения до максимума $\lambda_н$ 6÷12 мм, что соизмеримо с размерами средней величины монокристаллов). При падении ударной волны напряжений на границу раздела сред происходит распад произвольного разрыва, после чего устанавливается равенство массовых скоростей и нормальных напряжений по обе стороны от границы раздела. В приближении идеальной упругости напряжение в кристалле $\sigma_а$ связано с напряжением $\sigma_к$ в падающей по нормали к поверхности раздела сред волне соотношением

$$\sigma_а = \frac{2 \rho_а c_{р,а}}{\rho_к c_{р,к} + \rho_а c_{р,а}} \sigma_к , \qquad (5)$$

где $c_{р.а}$ и $c_{р.к}$ – скорость продольной волны в алмазе и кимберлите; $\rho_а$ и $\rho_к$ – плотность алмаза и породы соответственно.

После взаимодействия падающей волны с кристаллом в последнем распространяется преломленная волна, напряжение в которой может достигать удвоенной величины напряжения в падающей волне (точнее, превышать его примерно в 1,85 раз). Скорость продольной волны в алмазе составляет 18 км/с, в кимберлите 3–4 км/с. Преломленная волна распространяется в кристалле значительно быстрее, чем падающая в кимберлите. Поэтому будут возникать условия для преломления напряжения из кристалла в невозмущенную часть кимберлита перед фронтом скользящей вдоль кристалла волны. Тогда на породу будут действовать тангенциальная составляющая волны напряжений, амплитуду которой можно оценить с помощью коэффициента бокового давления $\gamma = \nu/(1-\nu)$, где ν – коэффициент Пуассона. Таким образом, поперечное возмущение в кристалле передается в виде продольного возмущения в кимберлит. Для разгрузки напряжений в кристалле справедлива оценка скорости частиц

$$\Delta v = \int_{\sigma_1}^{\sigma_2} \frac{d\sigma}{\rho_a c_{p,a}} \simeq \frac{\Delta\sigma}{\rho_a c_{p,a}} .$$

В точке взаимодействия фронта волны в кристалле с поверхностью раздела возникает течение типа Прандтля – Майера с непрерывным изменением всех параметров волны в кристалле до параметров в преломленной волне. При изменении напряжения от напряжения преломленной волны в кристалле $\sigma_{пр,а}$ до значений $\sigma_к = \sigma_а$ после разрыва скорость частиц в алмазе на границе с кимберлитом в направлении разгрузки

$$\Delta v = \frac{\sigma_{пр,а} - \sigma_к}{\rho_а c_{р,а}} .$$

Ударная адиабата в кимберлите

$$\sigma_к = \rho_к c_{р,к} \Delta v = \rho_к c_{р,к} \frac{\sigma_{пр,а} - \sigma_к}{\rho_а c_{р,а}} ,$$

или

$$\sigma_к = \frac{\rho_к c_{р,к}}{\rho_а c_{р,а} + \rho_к c_{р,к}} \sigma_{пр,а} .$$

Таким образом, напряжение при разгрузке в результате распада разрыва уменьшается в K раз, причем

$$K = \frac{\rho_к c_{р,к}}{\rho_к c_{р,к} + \rho_а c_{р,а}} .$$

Принимая в качестве $c_{р,а}$ и $c_{р,к}$ значения продольных волн в двух средах, получим

$$K = \frac{1}{7{,}3} + \frac{1}{13{,}3} .$$

Если принять для алмаза скорость волн, равной скорости поперечных волн, а для кимберлита скорости продольных волн, то

$$K = \frac{1}{5{,}2} + \frac{1}{9{,}4} .$$

Таким образом, напряжения в алмазе падают в 5–13 раз при разгрузке в кимберлит. Такая сложная картина приводит к концентрации напряжений в точках взаимодействия фронта с поверхностью кристалла (рис.3).

Известно, что в алмазах напряжения Пайерлса – Набарро (релеечатое трение, препятствующее пластическим деформациям) велико и большие величины тангенциальных напряжений приводят к сколу или образованию трещин.

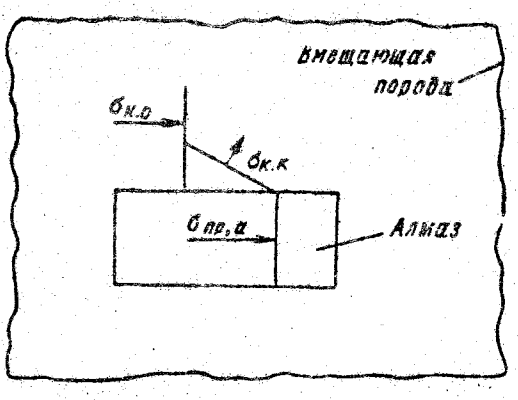


Рис.3. Взаимодействие падающей $\sigma_{к.о}$ и преломленной $\sigma_{пр.а}$ волн с кристаллом
$\sigma_{к.к}$ – преломленная из кристалла в породу коническая волна

В результате скола образуются новые области концентрации напряжений, и кристалл может разрушиться на мелкие частицы.

Важной особенностью влияния трещин является концентрация напряжений у вершины трещины. Концентрация напряжений описывается зависимостью

$$\sigma_{max} = \sigma\left[1 + 2\left(\frac{\ell}{2R}\right)^{1/2}\right],$$

где ℓ – длина трещины; R – радиус кривизны в ее вершине.

В качестве длины трещины ℓ может быть принята либо глубина микротрещины в кристаллах, либо размер кристалла алмаза [1,2]. В случае, когда первоначальную трещину создает сам кристалл, наибольшая концентрация напряжений создается в породе в окрестности дальнего от центра взрыва угла кристалла. В окрестности этой точки напряжения увеличиваются, по сравнению с напряжением в окружающей породе, примерно в 10^2 раз. При этом в кристалл будет передаваться соответствующее напряжение, но с обратным знаком, т.е. напряжение растяжения. Этот эффект может привести к образованию микротрещины в кристалле, распространяющейся в глубь кристалла в направлении, обратном направлению распространения волны напряжения.

Если какая-либо из трещин в кимберлите встречается с кристаллом алмаза, она распространяется затем по одной или нескольким граням кристалла. По кристаллу распространяется область концентрации напряжений, что также может привести к развитию в нем трещины.

Таким образом, концентрация напряжений на кристаллах от действия волны напряжений возможна в ближней зоне взрыва. Разрушение кристалла может происходить в результате эффекта боковой разгрузки или в результате концентрации напряжений в кимберлите на дальних от центра взрыва углах кристалла, когда источником первичной трещины в кимберлите является сам кристалл алмаза. В обоих случаях возможно образование микротрещин либо на боковых стенках (гранях) кристалла, либо в его задней торцевой части. В последнем случае трещина будет распространяться в глубь кристалла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В а т т Дж. Механика разрушения // Атомистика разрушения. М.: Мир, 1987.

2. Механический эффект подземного взрыва // В.Н.Родионов, В.В.Адушкин, В.Н.Костюченко и др. М.: Недра, 1971.

3. Справочник по алмазам. Киев: Наукова думка, 1987.

4. Dannel L. H. Stress consentration. California.: Inst., tech., Pasadens, 1941.