

УДК 539.89; 533.9; 53.043

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ ПРИ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯХ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПИКОСЕКУНДНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

С. А. Абросимов\*, А. П. Бажулин\*, А. П. Большаков<sup>\*,\*\*</sup>,  
В. И. Конов<sup>\*,\*\*</sup>, И. К. Красюк\*, П. П. Пашинин\*,  
В. Г. Ральченко<sup>\*,\*\*</sup>, А. Ю. Семенов\*, Д. Н. Совык<sup>\*,\*\*</sup>,  
И. А. Стучебрюхов\*, В. Е. Фортов<sup>\*\*\*</sup>, К. В. Хищенко<sup>\*\*\*</sup>,  
А. А. Хомич<sup>\*,\*\*</sup>

\* Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

\*\* Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ",  
115409 Москва, Россия

\*\*\* Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия  
E-mails: abr@kapella.gpi.ru, lesha@kapella.gpi.ru, bolshak@ran.gpi.ru,  
vik@nsc.gpi.ru, krasjuk@kapella.gpi.ru, pashinin@gpi.ru, ralchenko@nsc.gpi.ru,  
semenov99@rambler.ru, sovyk@nsc.gpi.ru, st777@kapella.gpi.ru, fortov@ras.ru,  
konst@ihed.ras.ru, antares-610@yandex.ru

Представлены результаты экспериментально-теоретического исследования явления откола в синтетических алмазах. Впервые получены данные о динамической прочности на разрыв поли- и монокристаллических алмазных образцов при механических нагрузках до 0,34 ТПа и скоростях деформирования в диапазоне  $10 \div 100 \text{ мкс}^{-1}$ . Ударно-волновое воздействие на образцы осуществлялось на установке "Камертон-Т" лазерным импульсом длительностью 70 пс с использованием излучения Nd:glass-лазера (вторая гармоника ( $\lambda = 527 \text{ нм}$ ), энергия импульса  $\approx 3 \text{ Дж}$ ) с интенсивностью  $\approx 8 \text{ ТВт/см}^2$ . Достигнутое максимальное значение откольной прочности  $\approx 16,4 \text{ ТПа}$  составляет 24 % теоретического предела прочности алмаза. С помощью метода комбинационного рассеяния света установлено, что в области откола на тыльной поверхности образца небольшое количество алмаза графитизуется.

Ключевые слова: синтетические алмазы, воздействие лазерного импульса, отрицательное давление, откольная прочность, фазовые превращения.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 12-02-00625, 12-02-00746, 13-02-91057, 14-08-00967) и Совета по грантам Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ (гранты № НШ-451.2014.2, НШ-6614.2014.2), а также в рамках программ Президиума РАН № 13П "Экстремальные световые поля и их приложения" и 2П "Вещество при высоких плотностях энергии".

© Абросимов С. А., Бажулин А. П., Большаков А. П., Конов В. И., Красюк И. К., Пашинин П. П., Ральченко В. Г., Семенов А. Ю., Совык Д. Н., Стучебрюхов И. А., Фортов В. Е., Хищенко К. В., Хомич А. А., 2015

В данной работе представлены результаты экспериментально-теоретического исследования особенностей явления откола в мишенях из поли- и монокристаллических синтетических алмазов. Для создания откольного растягивающего напряжения (отрицательного давления) образцы подвергались ударно-волновому воздействию лазерного импульса длительностью 70 пс.

Интерес к изучению поведения алмаза в экстремальных условиях обусловлен тем, что этот материал обладает уникальными физическими и механическими свойствами [1]. В частности, статическая механическая прочность монокристаллов синтетического алмаза на излом  $\sigma_{br} \approx 2,86$  ГПа [2]. Представляет интерес экспериментально определить динамическую механическую прочность алмаза на разрыв (откольную прочность)  $\sigma^*$ , поскольку ранее такие исследования не проводились. Теоретический предел прочности вещества  $\sigma_{\max}^*$  можно оценить сверху по формуле

$$\sigma_{\max}^* = \rho_0 c_0^2 / (4b),$$

где  $\rho_0$  — нормальная плотность вещества;  $c_0$ ,  $b$  — коэффициенты в уравнении его ударной адиабаты  $D = c_0 + bU$  [3];  $D$  — скорость фронта ударной волны;  $U$  — массовая скорость. Согласно данным работы [4] для алмаза  $c_0 = 11,2$  км/с,  $b = 1,2$ . В результате получаем верхнюю оценку предельной прочности алмаза 91,8 ГПа.

Для получения данных о динамической механической прочности исследуемого материала исследуется явление откола [5]. Это явление возникает вблизи тыльной (свободной) поверхности мишени после прихода на эту поверхность волны сжатия, генерируемой (в данном случае) импульсом лазерного излучения, действующим на лицевую поверхность мишени. Вследствие малости противодействия на свободной поверхности вещество, разогнанное в ударной волне, получает дополнительное ускорение, что вызывает распространение волны разгрузки навстречу импульсу сжатия и распространение за ним волны разгрузки с лицевой поверхности. На некотором расстоянии от тыльной поверхности давление в мишени становится отрицательным, причем растягивающее напряжение может превысить предел прочности материала на разрыв, что приведет к отколу некоторого слоя от исходного образца.

Интерес к исследованию вещества в области отрицательных давлений обусловлен тем, что в этом случае могут быть получены новые данные об уравнениях состояния, фазовых превращениях и механизмах разрушения материала при растягивающих нагрузках в ранее не изученной области фазовой диаграммы [6]. С этой точки зрения наиболее предпочтительным представляется использование лазерных импульсов пико- и фемтосекундной длительности, что обуславливает малую длительность ударно-волнового воздействия [7–11].

Эксперименты выполнены на лазерной установке “Камертон-Т” (рабочее тело — неодимовое стекло) Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН. Основное излучение с длительностью на половине максимума интенсивности 70 пс преобразовано во вторую гармонику с длиной волны излучения, равной 0,527 мкм. Энергия в импульсе лазерного излучения  $E_l$  достигала значения 3 Дж. Излучение фокусировалось на мишени в пятно диаметром  $D_{input} = 0,5 \div 1,0$  мм. Распределение интенсивности в пятне фокусировки и форма лазерного импульса, полученные с помощью электронно-оптической камеры с временным разрешением 1 пс и прибора HiPic 32 (high performance image control system), показаны на рис. 1. Максимальное значение плотности мощности потока лазерного излучения  $I_l$  в области фокусировки составляло 8 ТВт/см<sup>2</sup>, абляционное давление  $P_a$  — 0,34 ГПа.

Образцы (пластины) из черного и прозрачного поликристаллического алмаза были синтезированы методом химического осаждения из пара в СВЧ-разряде в плазмохимическом реакторе УПСА-100 (ООО “Оптосистемы”) [12]. Пластина из монокристаллического синтетического алмаза типа Ib с ориентацией (100) была приобретена в ООО “СВД.Спарк” (наноцентр “Технопарк”). В экспериментах использовались шесть образцов

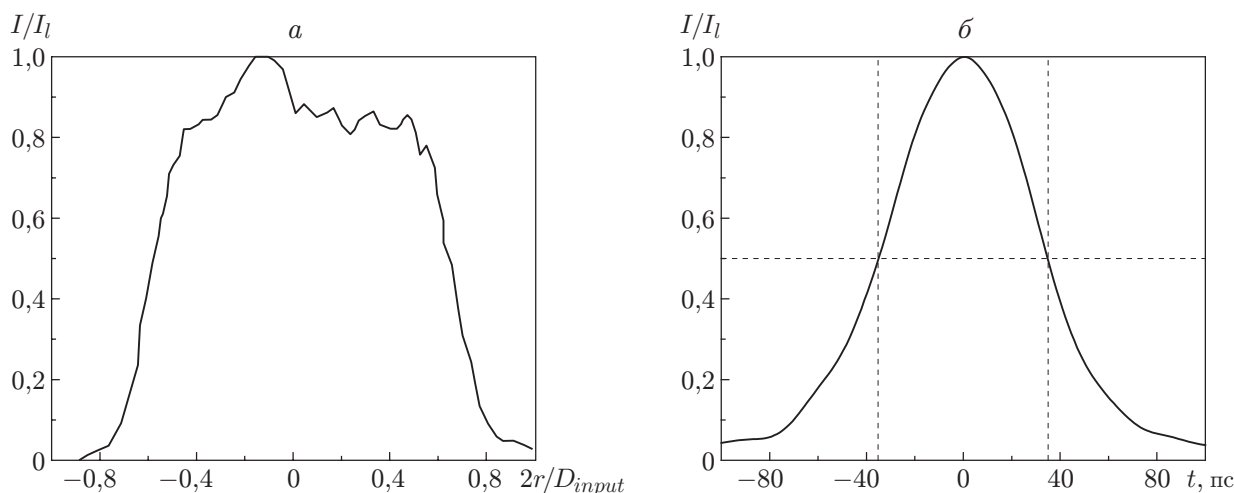


Рис. 1. Распределения интенсивности излучения лазера по диаметру пятна фокусировки (*а*) и времени (*б*)

толщиной  $H_0 = 140 \div 400$  мкм (табл. 1–3). Осуществлялось лазерное облучение гладкой поверхности поликристаллических образцов 1–5, которая при выращивании была обращена к полированной поверхности подложки из кремния. Образец 4 (прозрачный) не полировался. У образцов 1–3 и 5 полировалась облучаемая поверхность, у образца 5 (прозрачного) полировалась также тыльная поверхность. У монокристаллического образца 6 была отполирована как лицевая, так и тыльная поверхность. Перед экспериментом облучаемая поверхность образца 4 была покрыта пленкой из сусального золота толщиной 1,25 мкм, образцов 2 и 5 — алюминиевой фольгой толщиной 8 мкм. На лицевую поверхность образца 6 было нанесено напыление из алюминия, толщина слоя которого составляла 1 мкм.

Для определения значений максимального давления в плоскости откола  $(P_{sp})_{\max}$ , откольной прочности  $\sigma^*$  и скорости деформирования  $\dot{V}/V_0$  среды ( $V_0$  — начальное значение удельного объема;  $\dot{V} = dV/dt$  — скорость изменения удельного объема во времени) измерялась глубина откольной выемки  $h_{sp}$  после воздействия на мишень и проводилось математическое моделирование ударно-волнового течения в плоскости откола [9, 13]. Для расчета величин  $(P_{sp})_{\max}$ ,  $\sigma^*$  и  $\dot{V}/V_0$  использован численный код, созданный в соответствии со схемой типа схемы Куранта — Изаксона — Риса на основе уравнений гидродинамики [14]. В коде использовано полуэмпирическое уравнение состояния алмаза, применимое в широком диапазоне термодинамических параметров [15]. Предполагалось, что форма импульса абляционного давления на лицевой поверхности мишени повторяет форму импульса лазерного излучения. Связь между амплитудой импульса абляционного давления  $P_a$  (в терапаскалях) и максимальной интенсивностью лазерного излучения  $I_l$  (в тераваттах на сантиметр квадратный) задавалась полуэмпирическими формулами [16]

$$P_a = \begin{cases} 1,2(10^{-2}I_l)^{2/3}\lambda^{-2/3}[A/(2Z)]^{3/16}, & I_l \geq 4,3 \text{ ТВт/см}^2, \\ 1,4(10^{-2}I_l)^{7/9}\lambda^{-3/4}, & I_l < 4,3 \text{ ТВт/см}^2, \end{cases}$$

где  $\lambda$  — длина волны лазерного излучения, мкм;  $A$  — атомная масса;  $Z$  — атомный номер элемента вещества мишени.

В экспериментах фиксировались лишь те значения интенсивности  $I_l$  лазерного импульса, при которых происходил откол. В качестве величины откольной прочности  $\sigma^*$  (прочности на растяжение) принимались минимальные (отрицательные) значения давления в плоскости откола. Параметры зафиксированных выстрелов приведены в табл. 1–3.

Таблица 1

Параметры излучения и толщина образцов из черного поликристаллического алмаза

| Номер выстрела | Номер образца | $D_{input}$ , мм | $E_l$ , Дж | $I_l$ , ТВТ/см <sup>2</sup> | $P_a$ , ТПа | $H_0$ , мкм |
|----------------|---------------|------------------|------------|-----------------------------|-------------|-------------|
| 1              | 1             | 0,46             | 0,48       | 3,7                         | 0,20        | 400         |
| 2              | 1             | 0,46             | 0,69       | 5,4                         | 0,26        | 400         |
| 3              | 1             | 0,46             | 1,00       | 7,8                         | 0,34        | 400         |
| 4              | 2             | 0,65             | 0,57       | 2,2                         | 0,13        | 150         |
| 5              | 3             | 0,61             | 1,66       | 7,4                         | 0,32        | 140         |
| 6              | 3             | 0,61             | 1,33       | 5,9                         | 0,28        | 140         |

Таблица 2

Параметры излучения и толщина образцов из прозрачного поликристаллического алмаза

| Номер выстрела | Номер образца | $D_{input}$ , мм | $E_l$ , Дж | $I_l$ , ТВТ/см <sup>2</sup> | $P_a$ , ТПа | $H_0$ , мкм |
|----------------|---------------|------------------|------------|-----------------------------|-------------|-------------|
| 7              | 4             | 0,81             | 0,75       | 1,8                         | 0,11        | 300         |
| 8              | 4             | 1,04             | 2,84       | 4,3                         | 0,24        | 300         |
| 9              | 5             | 0,73             | 1,50       | 4,6                         | 0,24        | 260         |
| 10             | 5             | 0,83             | 2,88       | 6,9                         | 0,31        | 260         |
| 11             | 5             | 0,83             | 2,61       | 6,3                         | 0,29        | 260         |

Таблица 3

Параметры излучения и толщина образца из монокристаллического алмаза

| Номер выстрела | Номер образца | $D_{input}$ , мм | $E_l$ , Дж | $I_l$ , ТВТ/см <sup>2</sup> | $P_a$ , ТПа | $H_0$ , мкм |
|----------------|---------------|------------------|------------|-----------------------------|-------------|-------------|
| 12             | 6             | 0,82             | 1,50       | 3,6                         | 0,20        | 266         |
| 13             | 6             | 0,82             | 2,37       | 5,8                         | 0,28        | 315         |

Полученные результаты обобщены в табл. 4–6. Условия экспериментов и предварительные результаты приведены также в работах [17, 18].

С помощью растрового электронного микроскопа изучены лицевая и тыльная поверхности образцов после экспериментов. На оптическом профилометре NewVew 5000 “Zygo” определен рельеф лицевой и тыльной поверхностей образцов после лазерного воздействия. На спектрометре LabRam HR (Horiba) методом комбинационного рассеяния света с длиной волны 0,488 мкм проанализирован фазовый состав вещества на облученных и откольных поверхностях мишеней, а также на сколотых фрагментах.

На рис. 2 приведены полученные с помощью растрового электронного микроскопа изображения тыльных (откольных) поверхностей поли- и монокристаллического образцов после ударно-волнового воздействия с амплитудой 0,31 и 0,20 ТПа соответственно. Видно, что при растяжении поведение поли- и монокристаллического алмазов существенно различается. В случае поликристаллического материала откол происходит практически равномерно по всей поверхности откольного кратера, максимальная глубина которого со-

Таблица 4

Экспериментальные данные для черного поликристаллического алмаза

| Номер выстрела | $h_{sp} \pm \Delta h_{sp}$ , мкм | $(P_{sp})_{max} \pm \Delta(P_{sp})_{max}$ , ГПа | $\sigma^* \pm \Delta\sigma^*$ , ГПа | $\dot{V}/V \pm \Delta\dot{V}/V$ , мкс <sup>-1</sup> |
|----------------|----------------------------------|---|-------------------------------------|---|
| 1              | 7,5 ± 4,5                        | 4,44 ± 0,40                                     | 3,24 ± 1,23                         | 19,7 ± 1,7  |
| 2              | 17,5 ± 7,5                       | 7,06 ± 0,28                                     | 5,91 ± 0,49                         | 25,0 ± 6,4  |
| 3              | 17,0 ± 3,0                       | 9,15 ± 0,24                                     | 8,15 ± 0,32                         | 33,0 ± 5,0  |
| 4              | 15,0 ± 5,0                       | 8,57 ± 0,22                                     | 7,25 ± 0,16                         | 28,2 ± 4,0  |
| 5              | 15,0 ± 5,0                       | 20,65 ± 0,55                                    | 16,40 ± 0,10                        | 67,5 ± 16,0   |
| 6              | 15,0 ± 5,0                       | 18,10 ± 0,30                                    | 14,70 ± 0,10                        | 60,0 ± 14,0   |

Таблица 5

Экспериментальные данные для прозрачного поликристаллического алмаза

| Номер выстрела | $h_{sp} \pm \Delta h_{sp}$ , мкм | $(P_{sp})_{max} \pm \Delta(P_{sp})_{max}$ , ГПа | $\sigma^* \pm \Delta\sigma^*$ , ГПа | $\dot{V}/V \pm \Delta\dot{V}/V$ , мкс <sup>-1</sup> |
|----------------|----------------------------------|---|-------------------------------------|---|
| 7              | 7,0 ± 1,0                        | 3,08 ± 0,02                                     | 2,77 ± 0,25                         | 17,3 ± 0,6  |
| 8              | 30,0 ± 20,0                      | 9,44 ± 0,96                                     | 7,40 ± 0,08                         | 29,0 ± 11,0   |
| 9              | 43,5 ± 16,5                      | 10,95 ± 0,05                                    | 8,66 ± 0,30                         | 22,6 ± 2,9  |
| 10             | 57,5 ± 12,5                      | 15,15 ± 0,55                                    | 10,70 ± 0,30                        | 24,2 ± 2,3  |
| 11             | 53,5 ± 11,5                      | 14,55 ± 0,95                                    | 10,13 ± 0,28                        | 23,8 ± 0,4  |

Таблица 6

Экспериментальные данные для монокристаллического алмаза

| Номер выстрела | $h_{sp} \pm \Delta h_{sp}$ , мкм | $(P_{sp})_{max} \pm \Delta(P_{sp})_{max}$ , ГПа | $\sigma^* \pm \Delta\sigma^*$ , ГПа | $\dot{V}/V \pm \Delta\dot{V}/V$ , мкс <sup>-1</sup> |
|----------------|----------------------------------|---|-------------------------------------|---|
| 12             | 82,5 ± 52,5                      | 10,78 ± 2,32                                    | 6,61 ± 0,90                         | 25,0 ± 2,7  |
| 13             | 75,0 ± 45,0                      | 12,15 ± 1,75                                    | 8,05 ± 0,65                         | 18,3 ± 3,7  |

ставляет 70 мкм (см. рис. 2,а). Дно кратера имеет более шероховатую поверхность по сравнению с исходной полированной гранью образца 5. Диаметр кратера ( $\approx 0,8$  мм) значительно превышает размеры кристаллитов (20 ÷ 30 мкм), что обусловлено разрывом алмаза по объему зерен, а не по их границам [12].

В случае монокристаллического образца откол имеет очаговый характер, в области откола отрываются отдельные фрагменты пирамидальной формы с поперечником от 20 до 40 мкм (см. рис. 2,б). Наклонные грани инвертированных пирамид образованы плоскостями (111), которые являются плоскостями спайности в алмазе, наиболее подверженными сколу. Сплошной кратер не сформирован, по-видимому, вследствие того, что условия облучения были близки к порогу разрушения.

На рис. 3 показана экспериментально полученная зависимость откольной прочности  $\sigma^*$  поли- и монокристаллических синтетических алмазов от скорости деформирования  $\dot{V}/V_0$ . Данные, полученные для разных образцов, укладываются на кривую, описываемую выра-

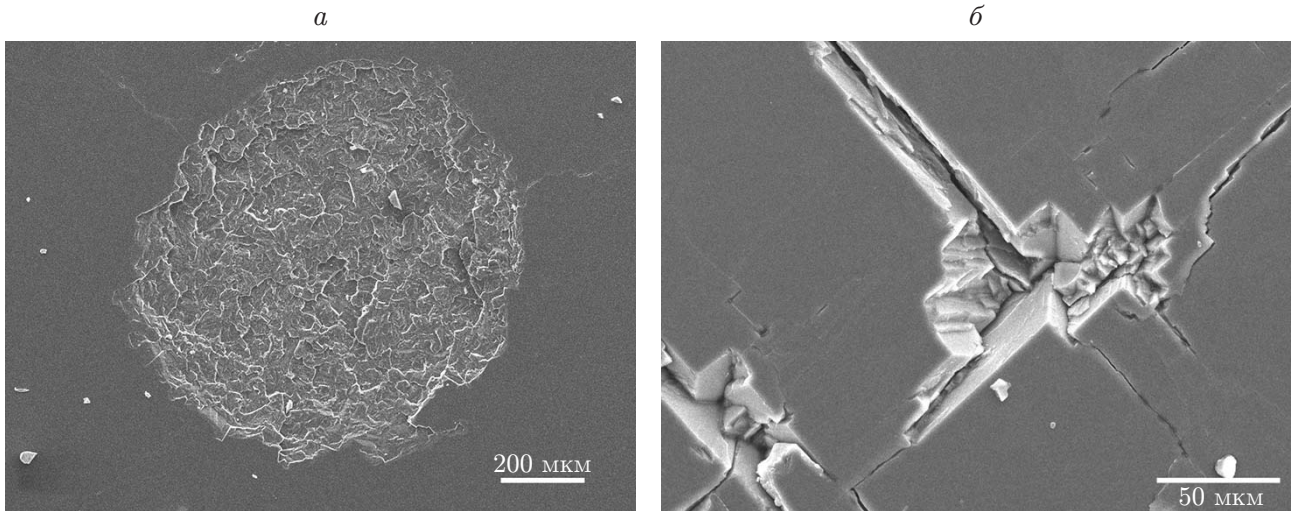


Рис. 2. Изображения тыльных поверхностей образцов, полученные с помощью растрового электронного микроскопа:

*a* — полированный прозрачный поликристаллический образец 5 после выстрела 10; *б* — полированный монокристаллический (плоскость (100)) образец 6 после выстрела 12

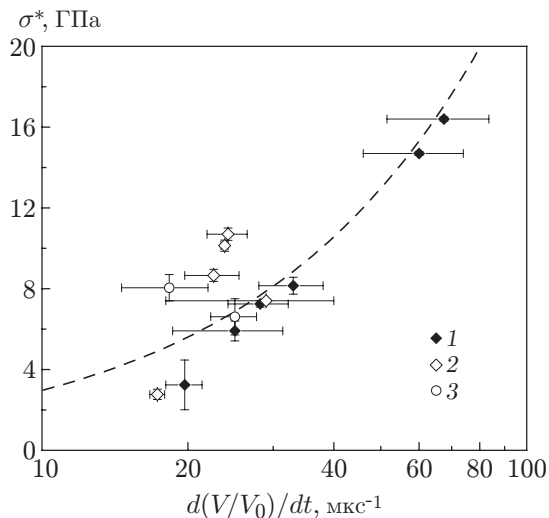


Рис. 3. Зависимость откольной прочности черного (1) и прозрачного (2) поликристаллического, а также монокристаллического (3) алмазов от скорости деформирования:

штриховая линия — функция  $\sigma^*(\dot{V}/V_0) = 1,17(\dot{V}/V_0)^{0,915}$

жением  $\sigma^* = 1,17(\dot{V}/V_0)^{0,915}$ . Погрешности определения величин откольной прочности  $\Delta\sigma^*$  и скорости деформирования  $\Delta\dot{V}/V_0$  обусловлены в основном тем, что толщина слоя шероховатостей в плоскости откола  $2\Delta h_{sp}$  конечна. Анализ полученных экспериментальных данных и результатов расчетов показывает, что максимальная относительная погрешность определения величин откольной прочности и скорости деформирования равна 38 %. Достигнуто значение откольной прочности  $\sigma^* \approx 16,4$  ГПа, составляющее 24 % предельной теоретической величины  $\sigma_{\max}^* \approx 69,5$  ГПа, полученной с использованием уравнения состояния алмаза [15]. Это значение  $\sigma^*$  существенно больше статической прочности алмаза. Следует отметить, что для аналогичных пластин из поликристаллического алмаза толщиной  $140 \div 400$  мкм измеренная прочность на излом  $\sigma_{br}$  приблизительно равна  $0,4 \div 0,5$  ГПа [12].

Зависимость откольной прочности  $\sigma^*$  исследованных алмазов от максимального давления в плоскости откола  $(P_{sp})_{\max}$  показана на рис. 4. Погрешность среднего значения  $\Delta(P_{sp})_{\max}$  вычислялась с учетом погрешности определения глубины откольной вы-

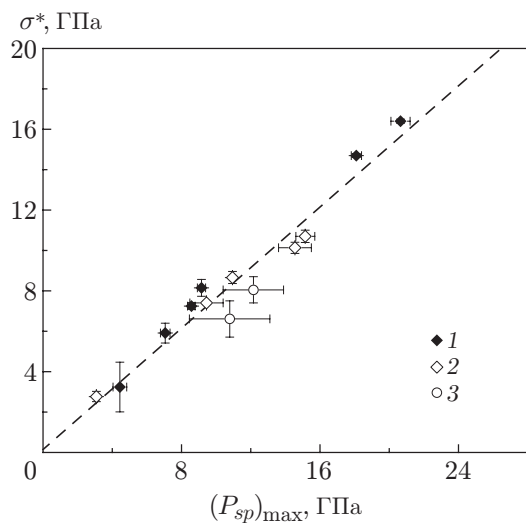


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость откольной прочности черного (1) и прозрачного (2) поликристаллического, а также монокристаллического (3) алмазов от максимального давления в плоскости откола:

штриховая линия — аппроксимирующая функция  $\sigma^*((P_{sp})_{\max}) = 0,75(P_{sp})_{\max} + 0,15$

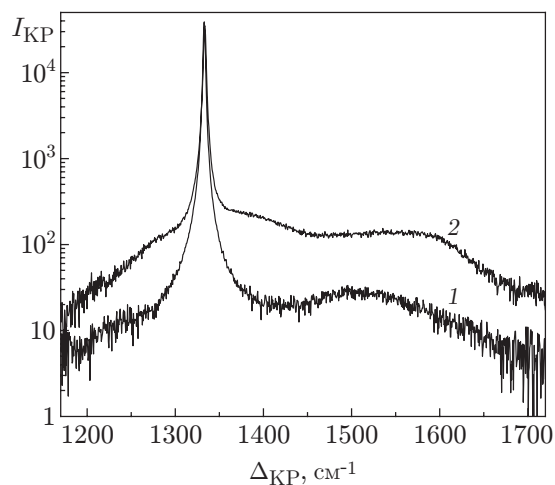


Рис. 5

Рис. 5. Спектры комбинационного рассеяния света в прозрачном поликристаллическом алмазе вне зоны откола (1) и в осколке, выброшенном из откольного кратера (2) в результате выстрела 10

емки  $\Delta h_{sp}$  и не превышала 22 % значения  $(P_{sp})_{\max}$ . Из рис. 4 следует, что откольная прочность растет линейно с увеличением давления  $(P_{sp})_{\max}$ , воздействию которого подвергся материал в месте откола. Линейная аппроксимация экспериментальных точек  $\sigma^*((P_{sp})_{\max}) = 0,75(P_{sp})_{\max} + 0,15$  получена методом наименьших квадратов. С использованием этой аппроксимации можно показать, что для достижения теоретического предела прочности алмаза 69,5 ГПа давление в плоскости откола должно составлять  $(P_{sp})_{\max} \approx 92,5$  ГПа. Такое значение  $(P_{sp})_{\max}$  можно получить, увеличивая абляционное давление на образцы той же толщины или уменьшая толщину образцов при тех же интенсивности и длительности воздействия.

Следует выяснить, происходит ли графитизация (или аморфизация) при разрыве алмаза. Фазовый состав на обнажившейся после откола поверхности был проанализирован методом комбинационного рассеяния света. На рис. 5 показаны типичные спектры комбинационного рассеяния света в исходной поликристаллической пластине и уловленных осколках пластины. По оси абсцисс отложена величина сдвига по частоте при комбинационном рассеянии света  $\Delta_{KP}$ , по оси ординат — интенсивность рассеянного излучения  $I_{KP}$ . В спектре осколков помимо узкой сильной линии алмаза на частоте  $1332 \text{ см}^{-1}$  наблюдаются четко выраженные широкие линии D и G разупорядоченного графита при  $\Delta_{KP} \approx 1350 \text{ см}^{-1}$  и  $\Delta_{KP} \approx 1590 \text{ см}^{-1}$  соответственно. Спектры нормированы величиной интегральной интенсивности алмазной линии. Интенсивность линий графитоподобного углерода на поверхности осколков на порядок больше, чем для исходного материала, а их форма близка к форме, наблюдаемой на лицевой поверхности в абляционном кратере [19], где графитизация алмаза происходит вследствие сильного нагрева [20]. Это свидетельствует о частичном превращении алмаза в неупорядоченную графитовую фазу при деформации и отрыве алмазного слоя.

Таким образом, в результате выполненных исследований впервые получены данные о динамической прочности на разрыв синтетических образцов алмаза при больших ( $\approx 70$  мкс<sup>-1</sup>) скоростях деформирования. В результате экспериментов достигнуто максимальное значение откольной прочности алмаза  $\sigma^* \approx 16,4$  ГПа, составляющее 24 % теоретического предела прочности. Установлено, что в области откола на тыльной поверхности мишени некоторая часть алмаза графитизуется. Для более детального изучения этого факта необходимо провести дополнительные теоретические и экспериментальные исследования.

Авторы выражают благодарность Е. Е. Ашкинази, С. Г. Рыжкову и Е. В. Заведееву за изготовление образцов и проведение их профилометрии, а также А. В. Добромыслову и Н. И. Талуц за полезное обсуждение результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Spitsyn V. V., Bouilov L. L., Derjaguin B. V.** Vapor growth of diamond on diamond and other surfaces // *J. Cryst. Growth*. 1981. V. 52. P. 219–226.
2. **Balmer R. S., Brandon J. R., Clewes S. L., et al.** Chemical vapour deposition synthetic diamond: materials, technology and applications // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2009. V. 21. P. 364221.
3. **Канель Г. И.** Ударно-волновые явления в конденсированных средах / Г. И. Канель, С. В. Разоренов, А. В. Уткин, В. Е. Фортов. М.: Янус-К, 1996.
4. **Nagao H., Nakamura K. G., Kondo K., et al.** Hugoniot measurement of diamond under laser shock compression up to 2 TPa // *Phys. Plasmas*. 2006. V. 13. P. 052705.
5. **Зельдович Я. Б.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. М.: Наука, 1966.
6. **Канель Г. И., Фортов В. Е., Разоренов С. В.** Ударные волны в физике конденсированного состояния // *Успехи физ. наук*. 2007. Т. 177, № 8. С. 809–830.
7. **Geras'kin A. A., Khishchenko K. V., Krasnyuk I. K., et al.** Specific features of spallation processes in polymethyl methacrylate under high strain rate // *Contrib. Plasma Phys.* 2009. V. 49. P. 451–454.
8. **Абросимов С. А., Бажулин А. П., Воронов В. В. и др.** Исследование механических свойств алюминия, сплава АМг6М и полиметилметакрилата при высоких скоростях деформирования под действием лазерного излучения пикосекундной длительности // *Докл. АН*. 2012. Т. 442, № 6. С. 752–754.
9. **Абросимов С. А., Бажулин А. П., Воронов В. В. и др.** Особенности поведения вещества в области отрицательных давлений, создаваемых действием лазерного импульса пикосекундной длительности // *Квантовая электрон.* 2013. Т. 43, № 3. С. 246–251.
10. **Ашитков С. И., Агранат М. Б., Канель Г. И. и др.** Поведение алюминия вблизи предельной теоретической прочности в экспериментах с фемтосекундным лазерным воздействием // *Письма в ЖЭТФ*. 2010. Т. 92, № 8. С. 568–573.
11. **Ашитков С. И., Комаров П. С., Агранат М. Б. и др.** Реализация предельных значений объемной и сдвиговой прочности железа при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов // *Письма в ЖЭТФ*. 2013. Т. 98, № 7. С. 439–444.
12. **Ralchenko V. G., Pleuler E., Lu F. X., et al.** Fracture strength of optical quality and black polycrystalline CVD diamonds // *Diamond Related Materials*. 2012. V. 23. P. 172–177.
13. **McQueen R. G., March D.** Ultimate yield strength of copper // *J. Appl. Phys.* 1962. V. 33. P. 654–665.



14. **Куликовский А. Г.** Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений / А. Г. Куликовский, Н. В. Погорелов, А. Ю. Семенов. М.: Физматлит, 2012.
15. **Ломоносов И. В., Фортвов В. Е., Хищенко К. В.** Модель широкодиапазонных уравнений состояния полимеров при высоких плотностях энергии // Хим. физика. 1995. Т. 14, № 1. С. 47–52.
16. **Вовченко В. И., Красюк И. К., Пашинин П. П., Семенов А. Ю.** Широкодиапазонная зависимость абляционного давления от интенсивности лазерного излучения // Докл. АН. 1994. Т. 338, № 3. С. 322–324.
17. **Абросимов С. А., Бажулин А. П., Большаков А. П. и др.** Экспериментальное исследование поли- и монокристаллических алмазов при отрицательных давлениях, создаваемых действием пикосекундного лазерного импульса // Докл. АН. 2014. Т. 457, № 1. С. 41–44.
18. **Абросимов С. А., Бажулин А. П., Большаков А. П. и др.** Генерация отрицательных давлений и откольные явления в алмазе под действием пикосекундного лазерного импульса // Квантовая электрон. 2014. Т. 44, № 6. С. 530–534.
19. **Kononenko T. V., Ralchenko V. G., Vlasov I. I., et al.** Ablation of CVD diamond with nanosecond laser pulses of UV-IR range // Diamond Related Materials. 1998. V. 7. P. 1623–1627.
20. **Андреев В. Д.** Спонтанная графитизация и термодеструкция алмаза при  $T > 2000$  К // Физика твердого тела. 1999. Т. 41, № 4. С. 695–701.

*Поступила в редакцию 16/Х 2014 г.*

---