

ИЗУЧЕНИЕ ОТКОЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ В СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗАХ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ИНТЕНСИВНЫМ ПИКОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

С. А. Абросимов, А. П. Бажулин, А. П. Большаков, В. И. Конов, И. К. Красюк, П. П. Пашинин, В. Г. Ральченко, А. Ю. Семенов, Д. Н. Сovyк, И. А. Стучебрюхов, В. Е. Фортон¹, К. В. Хищенко¹, А. А. Хомич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук,

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

Представлены результаты экспериментального исследования откольного явления в поли- и кристаллическом синтетическом алмазе. Ударно-волновое воздействие на мишень создавалось на установке «Камертон-Т» лазерным импульсом длительностью 70 пс. Для достижения абляционного давления на лицевой поверхности мишени величиной 0,66 ТПа использовано лазерное излучение Nd:glas-лазера (вторая гармоника – $\lambda = 527$ нм, энергия импульса 2,5 Дж) при интенсивности вплоть до $2 \cdot 10^{13}$ Вт/см². Достигнутая максимальная величина откольной прочности алмаза $\sigma^* \approx 16,5$ ГПа составляет 24 % от теоретического предела прочности. Методом комбинационного рассеяния света получены указания на то, что в области откола на тыльной стороне мишени небольшое количество кристаллического алмаза графитизуется.

В этом сообщении представлены результаты экспериментального исследования особенностей явления откола в мишенях из поли- и монокристаллического синтетического алмаза. Для создания откольного растягивающего напряжения (отрицательного давления) образцы подвергались ударно-волновому нагружению под действием лазерного импульса длительностью 70 пс.

Интерес к изучению физических свойств алмаза в экстремальных условиях связан с тем, что этот материал обладает уникальными физическими и механическими свойствами [1]. В частности, статическая механическая прочность синтетического алмаза на излом равна 2,8 ГПа [2]. В связи с этим, представляет интерес экспериментально определить динамическую механическую прочность алмаза. Величина теоретического предела прочности вещества σ^* может быть оценена сверху по формуле $\sigma^* = \rho c_0^2 / 4b$, где ρ – плотность вещества, а c_0 и b – коэффициенты его ударной адиабаты $D = c_0 + bU$ [3], где D – скорость фронта ударной волны, U – массовая скорость. По данным работы [4] для алмаза $c_0 = 11,2$ км/с, $b = 1,2$. В результате получаем для величины предельной прочности алмаза оценку сверху – 91,8 ГПа.

Для получения сведений о динамической механической прочности исследуемого материала использовано явление откола [5]. Это явление возникает вблизи тыльной (свободной) поверхности мишени в результате отражения волны сжатия, генерируемой действием импульса лазерного излучения на её лицевую сторону. В результате отражения, свободная поверхность мишени приходит в движение, что вызывает распространение волны растяжения навстречу импульсу сжатия. На некотором расстоянии от тыльной поверхности давление в мишени становится отрицательным, причем растягивающее напряжение может превысить предел прочности материала на разрыв, что приведет к образованию откольного слоя, который отлетает от исходного образца.

Интерес к исследованию вещества в области отрицательных давлений связан с тем, что при этом могут быть получены новые данные об уравнениях состояния, фазовых переходах, полиморфных превращениях и механизмах разрушения материала при растягивающих нагрузках в ранее неизученных областях фазовых диаграмм [6]. В настоящее время наиболее интересным представляется использование лазерных импульсов пикосекундной и фемтосекундной длительности, приво-

дящих к весьма малым продолжительностям ударно-волнового воздействия.

Эксперименты выполнены на лазерной установке на неодимовом стекле «Камертон-Т» Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН. Основное излучение преобразовано во вторую гармонику с длиной волны излучения 0,527 мкм. Энергия в импульсе лазерного излучения достигала величины 2,5 Дж. Лазерное излучение фокусировалось на мишени в пятно диаметром от 0,3 до 0,8 мм. Максимальная величина плотности потока лазерного излучения в области фокусировки достигала величины $2 \cdot 10^{13}$ Вт/см², а абляционное давление – 0,66 ТПа. Образцы (пластины) поликристаллического алмаза синтезированы методом химического осаждения из пара (CVD) в СВЧ разряде в плазмохимическом реакторе УПСА-100 (ООО «Оптосистемы») [7]. Пластины из монокристаллического синтетического алмаза типа Ib с ориентацией (100) имели коммерческое происхождение. В экспериментах использованы алмазные мишени толщиной от 140 до 400 мкм.

Для определения величин откольной прочности σ^* и скорости деформирования \dot{V}/V_0 среды (V_0 – начальный удельный объем, а \dot{V} – скорость его изменения во времени) использован подход, основанный на измерении глубины откольной выемки h после импульсного лазерного воздействия на мишень с последующим математическим моделированием ударно-волнового процесса в исследуемом образце [8, 9]. Для расчета величин σ^* и

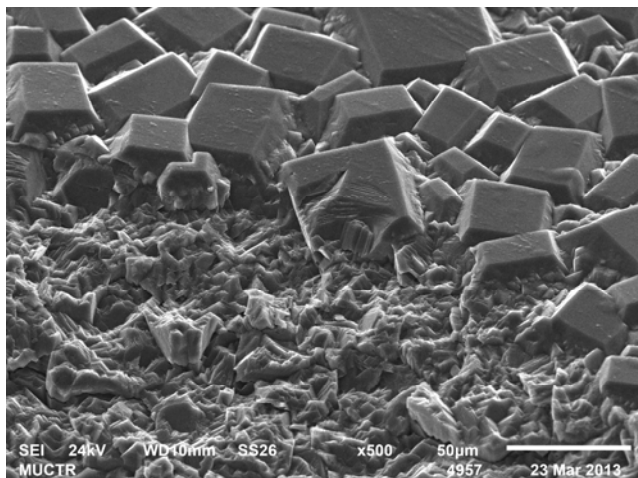
\dot{V}/V_0 использован численный код, созданный по схеме типа Куранта – Изакосона – Риса на основе уравнений гидродинамики [10]. В коде было использовано широкодиапазонное полуэмпирическое уравнение состояния алмаза [11]. Предполагалось, что форма импульса абляционного давления на лицевой поверхности мишени повторяет форму импульса лазерного излучения. Связь между амплитудой импульса абляционного давления P_a (ГПа) и интенсивностью лазерного излучения I_l (Вт/см²) задавалась полуэмпирической формулой [12]:

$$P_a = 1,2 \left(10^{-14} I_l \right)^{2/3} \lambda^{-2/3} \left[A / (2Z) \right]^{3/16}$$

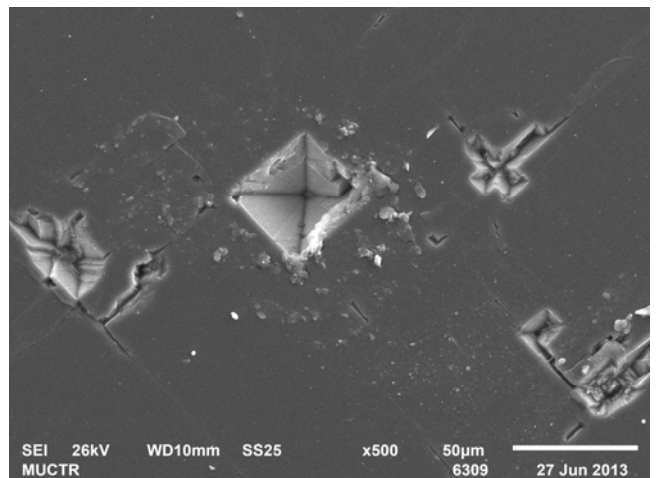
при $I_l \geq 10^{12}$ Вт/см², где λ – длина волны лазерного излучения (мкм), A – атомный вес, Z – атомный номер вещества мишени.

В экспериментах фиксировалась величина интенсивности лазерного импульса, при которой происходил откол. В этом случае за величину откольной прочности σ^* (прочности на растяжение) принималась минимальная (отрицательная) величина давления, рассчитанная в измеренном положении плоскости откола.

В результате работы впервые получены экспериментальные данные об откольной прочности синтетических алмазов от скорости деформирования вплоть до $0,7 \cdot 10^8$ с⁻¹. С помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) изучена морфология лицевой и тыльной поверхностей образцов



а



б

Рис. 1. Морфология откольных поверхностей алмазных мишеней при наблюдении в растровом электронном микроскопе: а – край кратера в поликристаллическом алмазе, амплитуда давления на лицевой поверхности мишени 660 ГПа; б – монокристаллический алмаз (грань 100), амплитуда давления на лицевой поверхности мишени 280 ГПа. Толщина образцов 320 мкм

после лазерного воздействия. На оптическом профилометре (NewView 5000 «Zygo») определён рельеф лицевой и тыльной поверхности образцов после лазерного воздействия. На спектрометре (LabRam HR, Horiba) методом комбинационного рассеяния света (КР) с длиной волны 0,488 нм проанализирован фазовый состав вещества на облучённых и откольных поверхностях мишеней и на сколотых фрагментах.

На рис. 1 приведены изображения РЭМ тыльных (откольных) сторон поли- и монокристаллического образцов после ударно-волнового воздействия амплитудой 0,66 и 0,28 ТПа, соответственно. Можно видеть существенную разницу в поведении поли- и монокристаллического алмаза при растяжении. В случае поликристаллического материала откол происходит практически равномерно по всей поверхности откольного кратера, максимальная глубина которого 45 мкм (рис. 1а). Дно кратера имеет весьма шероховатую поверхность по сравнению с гладкими прямоугольными гранями (100) исходных (расположенных за пределами кратера) кристаллитов размером 20–30 мкм. Это является следствием разрыва алмаза по объёму зерен, а не по их границам [7].

В случае монокристаллического образца откол носит очаговый характер, из области откола отделяются отдельные фрагменты пирамидальной формы с поперечником от 20 до 40 мкм (см. рис. 1б). Наклонные грани инвертированных пирамид образованы плоскостями (111), которые являются плоскостями спайности в алмазе, наиболее легко подверженными сколу. Сплошной кратер не сформирован, по-видимому, из-за того, что условия облучения были близки к порогу разрушения.

На рис. 2 показана экспериментально полученная зависимость откольной прочности σ^* поли- и монокристаллических синтетических алмазов от скорости деформирования \dot{V}/V_0 . Данные, для обоих типов образцов укладываются на единую кривую, описываемую выражением $\sigma^* = 1,17 \cdot 10^{-5} (\dot{V}/V_0)^{0,915}$. Достигнута величина откольной прочности $\sigma^* \approx 16,5$ ГПа, что составляет 24 % предельной теоретической величины 69,5 ГПа, которая следует из использованного уравнения состояния алмаза [11], но существенно больше статической прочности алмаза. Для сравнения, измеренная прочность на излом σ для аналогичных пластин поликристаллического алмаза толщиной 140–400 мкм составляет 0,4–0,5 ГПа [7].

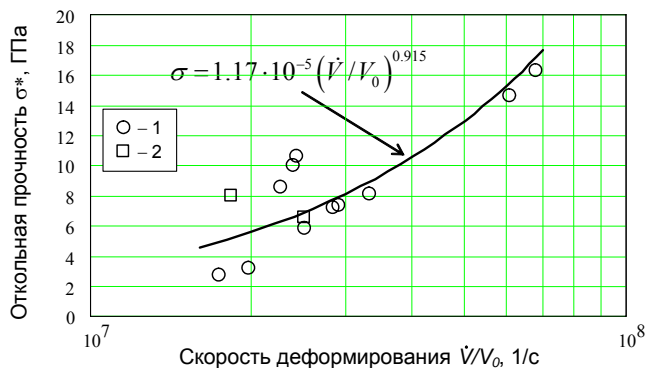


Рис. 2. Зависимость откольной прочности поликристаллического (1) и монокристаллического (2) алмаза от скорости деформирования

Интересным представляется вопрос, происходит ли графитизация (или аморфизация) при разрыве алмаза. Фазовый состав на обнаженной после откола поверхности был проанализирован методом КР.

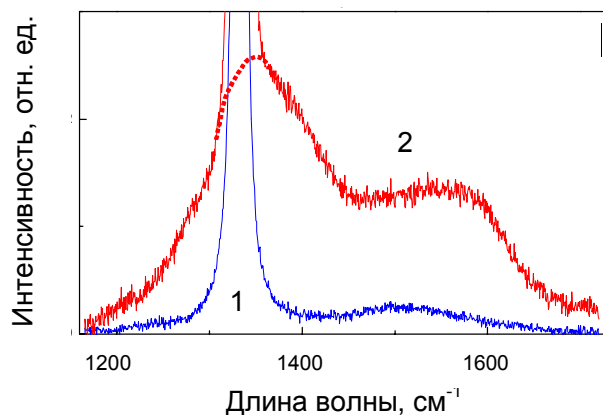


Рис. 3. Спектры КР поликристаллического алмаза вне зоны откола (1) и осколков, выброшенных из откольного кратера (2)

На рис. 3. показаны типичные спектры КР исходной поликристаллической пластины и уловленных осколков откольной пластинки. В спектре осколков кроме узкой сильной линии алмаза на частоте 1332 см^{-1} наблюдаются хорошо выраженные широкие линии D и G разупорядоченного графита вблизи 1350 и 1590 см^{-1} , соответственно. Спектры нормированы на интегральную интенсивность алмазной линии, что соответствует равному по объёму количеству исследованного материала. Интенсивность линий от графитоподобного углерода на поверхности осколков на порядок выше, чем для исходного материала, а их форма

ближе к той, которая наблюдается на лицевой поверхности в абляционном кратере [13], где превращение алмаза в графит неизбежно имеет место вследствие сильного нагрева [14]. Это указывает на частичное трансформирование алмаза в неупорядоченную графитовую фазу при деформации и отрыве алмазного слоя.

Таким образом, основной результат выполненных исследований состоит в том, что впервые получены данные о динамической прочности мишеней из поли- и монокристаллических алмазов при больших, до 10^8 с^{-1} , скоростях деформирования. Достигнутая максимальная величина откольной прочности алмаза $\sigma^* \approx 16,5 \text{ ГПа}$ составляет 24 % от теоретического предела прочности. Получены указания на то, что в области откола на тыльной стороне мишени некоторая часть кристаллического алмаза графитизуется. Более детальное изучение этого факта потребует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-02-00625, 12-02-00746, 13-02-91057 и 14-08-00967), Президиума РАН (программы № 13П «Экстремальные световые поля и их приложения» и 2П «Вещество при высоких плотностях энергии») и Президента РФ (гранты НШ-451.2014.2 и НШ-6614.2014.2). Авторы благодарны Ашкинази Е. Е., Рыжкову С. Г. и Заведееву Е. В., за приготовление и профилометрию образцов.

Список литературы

1. Synthetic Diamond: Emerging CVD Science and Technology / Eds. Spear K. E., Dismukes J. P. New York: Wiley, 1994. P. 663.

2. Balmer R. S., Brandon J. R., Clewes C. L., et al. // J. Phys.: Cond. Matt. 2009. V. 21. 364221.

3. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортвов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 407 с.

4. Nagao H, K.G. Nakamura K.G., Kondo K., et al. // Physics of Plasmas. 2006. V. 13. P. 052705.

5. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. С. 530.

6. Канель Г. И., Фортвов В. Е., Разоренов С. В. // УФН. 2007. Т. 177. № 8. С. 809–830.

7. Ralchenko V. G., Pleuler E., Lu F. X., Sovyk D. N., et al. // Diamond & Related Materials. 2012. V. 23. P. 172–177.

8. McQueen R. G., March D. // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. № 2. P. 654–665.

9. Абросимов С. А., Бажулин А. П., Воронцов В. В. и др. // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 3. С. 246–251.

10. Куликовский А. Г., Погорелов Н. В., Семенов А. Ю. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. С. 607.

11. Ломоносов И. В., Фортвов В. Е., Хищенко К. В. // Хим. физика. 1995. Т. 14. № 1. С. 47–52.

12. Вовченко В. И., Красюк И. К., Пашинин П. П., Семёнов А. Ю. // ДАН. 1994. Т. 338. № 3. С. 322–324.

13. Kononenko T. V., Ralchenko V. G., Vlasov I. I., et al. // Diamond & Related Materials. 1998. V. 7. P. 1623–1627.

14. Андреев В. Д. // ФТТ. 1999. Т. 41. № 4. С. 695–701.