

05.1

## Прочность сапфира при откольном разрушении

© А.С. Савиных, Г.И. Канель, С.В. Разоренов

Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка

E-mail: savas@icp.ac.ru

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Поступило в Редакцию 28 сентября 2010 г.

Представлены результаты измерений динамической прочности сапфира при его ударном сжатии в области динамического предела упругости (HEL). При отсутствии неупругих деформаций сапфир демонстрирует сильную зависимость величины откольной прочности от времени и тенденцию к уменьшению откольной прочности с возрастанием напряжений сжатия в падающем импульсе. Развитие неупругих деформаций приводит к полной потере сопротивления растяжению материала.

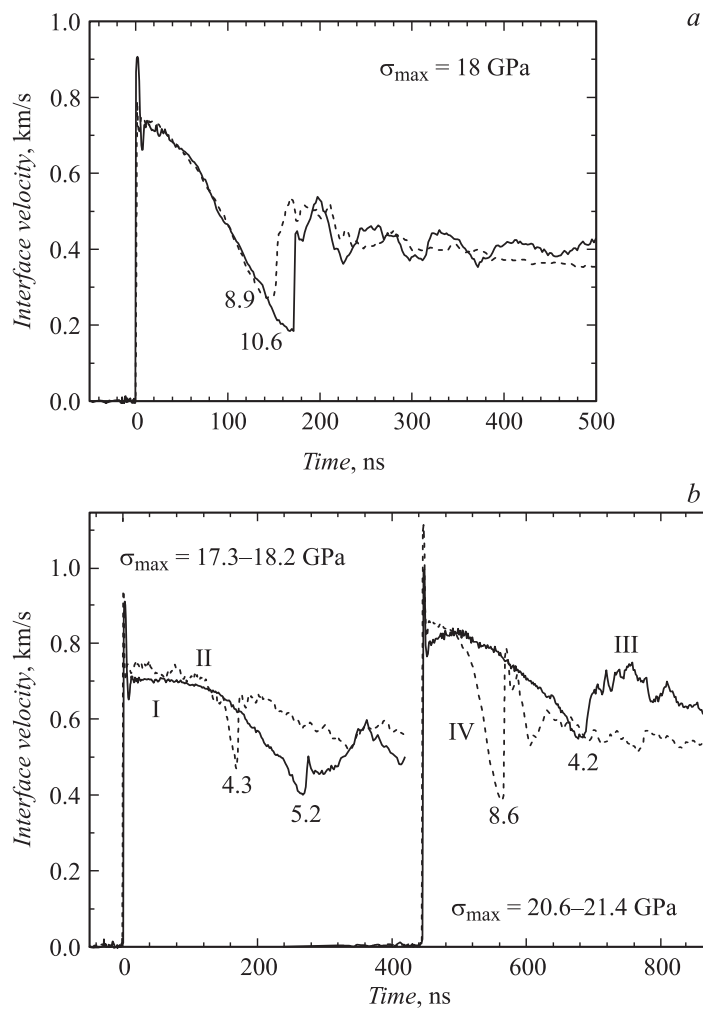
Монокристаллы сапфира используются в качестве оконного материала в космической и оборонной технике, а также в ударно-волновых экспериментах с оптической регистрацией. Для этих приложений важно обеспечить сохранение оптической однородности и целостности материала. В связи с этим в работах [1–4] проведены систематические исследования неупругого деформирования и разрушения сапфира в условиях ударного сжатия. Найдено, в частности, что динамическая прочность материала на разрыв чрезвычайно высока в области упругого деформирования, но практически исчезает с началом пластических деформаций. В данном сообщении представлены результаты дополнительных экспериментов по исследованию откольных явлений в сапфире, которые, по нашему мнению, могут прояснить природу этого эффекта.

Исследовались монокристаллы окиси алюминия (искусственного корунда) ориентации „с“ толщиной 5 mm и диаметром 50 mm. Плоские волны сжатия в исследуемых образцах генерировались ударом алюминиевой пластины-ударника толщиной 0.4 mm или 0.85 mm со скоростью 1.55 km/s через алюминиевый экран толщиной 2 или 6 mm. При этой скорости удара в сапфире генерировались ударные волны с

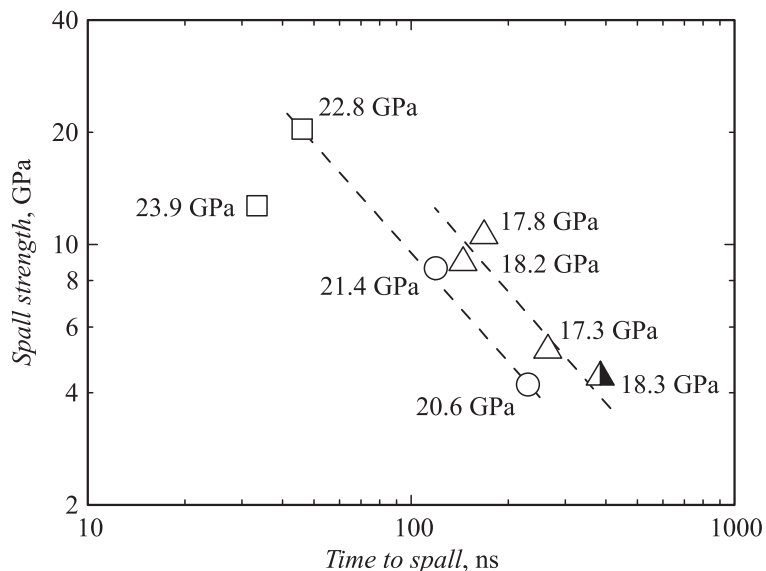
максимальным напряжением сжатия 20.6 GPa (упругое сжатие). Для метания ударников использовались взрывные устройства [5]. В экспериментах с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR [6] регистрировались профили скорости поверхности контакта между сапфиром и водяным „окном“. Для отражения лазерного излучения на поверхность „окна“ наклеивалась алюминиевая фольга толщиной 7  $\mu\text{m}$ . Водяное окно использовалось для обеспечения контакта между отражателем и образцом в течение всего времени измерений.

Результаты опытов представлены на рис. 1. В целом волновые профили подобны тем, что регистрируются при отколе [5,7]. После выхода ударной волны в сапфире на границу с водяным окном формируется отраженная волна разрежения, взаимодействие которой с разгрузочной частью падающего импульса сжатия приводит к генерации в сапфире растягивающих напряжений. В результате на некотором расстоянии от поверхности происходит разрушение (откол), при этом растягивающие напряжения падают до нуля и формируется волна сжатия, которая выходит на поверхность в виде так называемого откольного импульса (второй подъем скорости на волновых профилях). Кратковременный „выброс“ скорости на ударном фронте импульса сжатия объясняется тем, что алюминиевая фольга, используемая в качестве отражателя для VISAR, имеет меньший динамический импеданс и после прохода ударной волны приобретает более высокую скорость, чем поверхность сапфира. В последующем скорости выравниваются под действием противодействия со стороны водяного окна. Противодействие со стороны воды объясняет также медленный спад средней скорости поверхности сапфира после откола.

Значения напряжений непосредственно перед разрушением (откольной прочности) сапфира рассчитывались методом характеристик по измеренным значениям массовой скорости в максимуме и перед фронтом откольного импульса [5]. В расчете использовались ударная адиабата упругого сжатия сапфира в виде  $U_s = 11.19 + u_p$  [8], где  $U_s$  — скорость упругой ударной волны,  $u_p$  — массовая скорость вещества за ударным фронтом. При расчете напряжений и массовых скоростей в области растяжения использовалась экстраполяция ударной адиабаты. Полученные значения откольной прочности указаны на рис. 1 и суммированы на рис. 2, который включает также результаты опытов [2] при длительностях импульсов ударного сжатия 40–60 ns. Непосредственно из экспериментальных данных следует, что при ударном сжатии ниже



**Рис. 1.** Профили скорости контактной поверхности между сапфировым образцом ориентации „с“ и водяным окном. Числа у фронтов откольных импульсов показывают значения максимальных растягивающих напряжений перед отколом в GPa. *a* — нагружение ударником толщиной 0.4 mm через экран толщиной 2 mm; *b* — нагружение ударником толщиной 0.85 mm через экран толщиной 6 mm (I, II), нагружение ударником толщиной 0.85 mm через экран толщиной 2 mm (III, IV).



**Рис. 2.** Результаты измерений откольной прочности сапфира в зависимости от напряжения ударного сжатия (указано у экспериментальных точек) и времени от фронта ударной волны до откольного импульса. Точки при максимальных значениях прочности взяты из [2]; точка при максимальной длительности соответствует эксперименту с окном LiF (рис. 3).

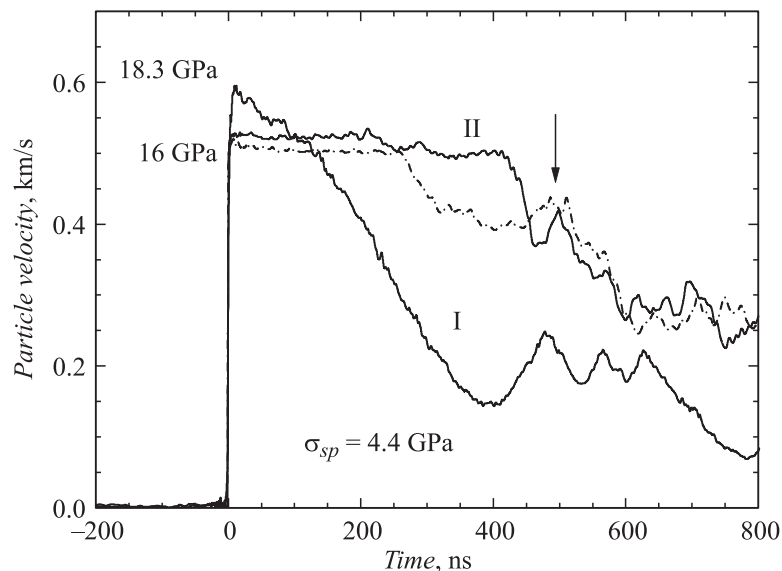
предела упругости сапфир демонстрирует рекордно высокие значения откольной прочности, тем большие, чем меньше время действия нагрузки. Просматривается также явная тенденция к уменьшению откольной прочности с возрастанием напряжений сжатия в падающем импульсе в диапазоне величин HEL.

Рассмотрим полученные результаты более детально. Волновые профили при малой длительности ударной нагрузки и напряжении сжатия 18 GPa, представленные на рис. 1, а, хорошо воспроизводимы в их начальной части. Полученные значения откольной прочности 8.9 и 10.6 GPa согласуются с измеренными ранее [9] величинами откольной прочности (8.6–10.1 GPa) рубина наклонной ориентации при напряжении сжатия 13.5–15 GPa. Малое время нарастания фронта откольного импульса свидетельствует о чрезвычайно быстром развитии

процесса разрушения. Период колебаний скорости поверхности после откола обычно определяется толщиной последнего, а разница в длительностях первого и последующего колебаний характеризует время задержки разрушения. На обсуждаемых волновых профилях четкий период колебаний не просматривается. Осцилляции скорости после откола имеют, скорее, хаотический характер. Вариация реализуемой прочности от опыта к опыту не является исключительным свойством сапфира и наблюдается не только для высокотвердых материалов, но и для пластичных металлов, в том числе — металлических монокристаллов [7,10,11]. Вероятно, вариации наблюдаемого сопротивления разрушению свидетельствуют о том, что расстояние между потенциальными очагами разрушения не является пренебрежимо малым по сравнению с толщиной откола.

С двукратным увеличением длительности импульса ударной нагрузки (рис. 1, *b*) измеренные значения откольной прочности уменьшились вдвое — до 4.3–5.2 ГПа. Столь сильная зависимость от времени не наблюдалась при откольном разрушении пластичных материалов — металлов, сплавов и полимеров [5,7]. В то время как начальная часть профиля I не искажена возмущениями и соответствует ожидаемому из расчетов, на профиле II регистрируется глубокий кратковременный „провал“ скорости. Подобный кратковременный спад напряжения и соответственно скорости мог образоваться только в фазе сжатия. Из представленных в [4] данных следует, что неупругая деформация сапфира этой ориентации при его ударном сжатии носит существенно гетерогенный характер, пластические сдвиги зарождаются в кристалле случайным образом, тем чаще, чем выше приложенное напряжение, и вызывают быструю релаксацию напряжений. Судя по тому, что после провала скорость не возвращается в дальнейшем к исходному волновому профилю, откольное разрушение совпадает по времени и, вероятно, по месту с формированием пластического сдвига, а малая величина реализуемой откольной прочности приводит к заключению, что именно формирование пластического сдвига вызвало потерю сопротивления разрушению. Этот вывод подтверждается также равенством длительностей первого и последующего колебаний скорости на профиле II.

Волновой профиль III на рис. 1, *b* подобен профилю I. Увеличение напряжения упругого ударного сжатия от 17.3 до 20.6 ГПа привело к падению величины откольной прочности от 5.2 до 4.2 ГПа. Профиль IV подобен профилю II в том смысле, что в обоих случаях их начальные



**Рис. 3.** Профили скорости контактной поверхности между сапфировым образцом ориентации „с“ толщиной 5 mm и окном из LiF: I — нагружение ударником толщиной 0.85 mm через экран толщиной 6 mm, II — результаты двух опытов из работы [4] при толщине ударника 2 mm. Стрелкой отмечен расчетный момент начала разгрузки в опыте из [4]. Указаны значения напряжения сжатия и откольной прочности.

части искажены релаксацией напряжения в фазе сжатия. Минимум скорости на профиле IV соответствует величине растягивающего напряжения в отраженной волне в сапфире 8.6 GPa, что близко к значениям откольной прочности, измеренным при малой длительности нагрузки и напряжении сжатия 18 GPa (рис. 1, *a*). В этом случае нет оснований предполагать, что откол непосредственно связан с пластическими сдвигами в ударно-сжатом материале. Релаксация напряжений произошла в этом опыте, по-видимому, вблизи поверхности соударения.

Для оценки вклада пластических сдвигов проведен дополнительный опыт в условиях ударно-волнового нагружения, соответствующих рис. 1, *b*, *c* заменой водяного окна на окно из монокристалла фтористого лития. Измеренный в этом опыте профиль скорости представлен

на рис. 3 в сопоставлении с ранее опубликованными [4] данными, полученными при большей длительности импульса ударной нагрузки. Вследствие более высокого динамического импеданса LiF по сравнению с водой разрушающие значения растягивающего напряжения в этом опыте достигались на большем удалении от поверхности сапфирового образца. По этой причине откольный импульс вышел на поверхность в более поздний момент времени, примерно через 385 ns, в то время как в опытах с водяным окном — через 265 ns или ранее. При этом реализовавшееся значение откольной прочности составило 4.4 GPa, что весьма близко к результатам опытов с водяным окном и соответствует эмпирической зависимости на рис. 2. Результат опыта с LiF можно рассматривать как подтверждение предположения, что откольное разрушение в этих условиях нагружения не обусловлено пластическими сдвигами в ударно-сжатом материале. С увеличением длительности импульса ударной нагрузки в материале развиваются неупругие деформации, вследствие чего его прочность на разрыв падает до нуля.

Результаты проведенных экспериментов с ударным сжатием сапфира в области его динамического предела упругости можно суммировать следующим образом. При отсутствии неупругих деформаций сапфир демонстрирует чрезвычайно высокие значения динамической прочности на разрыв, тем выше, чем меньше длительность импульса нагрузки. При этом зависимость величины откольной прочности от времени значительно сильнее, чем для пластичных материалов — металлов и полимеров. Наблюдается также тенденция к уменьшению откольной прочности с возрастанием напряжений сжатия в падающем импульсе в диапазоне величин HEL. Развитие неупругих деформаций приводит к полной потере сопротивления растяжению материала в области образца, где эти процессы имели место. Возмущения поля напряжений, вызванные неупругими деформациями, сами по себе не вызывают падение величины откольной прочности (опыт IV на рис. 1, *b*). Совокупность полученных результатов наводит на мысль о существовании некоторого времени ожидания, или „периода индукции“ [12], появления зародышей пластических сдвигов, являющихся и центрами зарождения разрушений. Поскольку время ожидания сокращается с увеличением максимального напряжения сжатия в падающем импульсе, можно предположить, что формирование зародышей происходит как в фазе сжатия, так и в фазе последующего растяжения.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований президиума РАН „Фундаментальные проблемы механики взаимодействий в технических и природных системах, материалах и средах“ и Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“.

## Список литературы

- [1] *Mashimo T., Hanaoka Y., Nagayama K.* // J. Appl. Phys. 1988. V. 63. P. 327–336.
- [2] *Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Baumung K., Karov H.U., Licht V.* // High-Pressure Science and Technology — 1993 / Ed. by S. C. Schmidt et al. 1993. AIP CP 309. P. 1043.
- [3] *Reinhart W.D., Chhabildas L.C., Vogler T.J.* // International J. Impact Engineering. 2006. V. 33. P. 655–669.
- [4] *Kanel G.I., Nellins W.J., Savinykh A.S., Razorenov S.V., Rajendran A.M.* // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. Art. 043524.
- [5] *Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е.* Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Изд-во „Янус-К“, 1996. 407 с.
- [6] *Asay J.R., Barker L.M.* // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. P. 2540–2546.
- [7] *Kanel G.I.* // Int. J. Fract. 2010. V. 163. P. 173–191.
- [8] *Barker L.M., Hollenbach R.E.* // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. P. 4208–4226.
- [9] *Канель Г.И., Разоренов С.В., Яловец Т.Н.* // Химическая физика. 1993. Т. 12. № 2. С. 175–177.
- [10] *Богач А.А., Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Протасова С.Г., Сурсаева В.Г.* // Физика твердого тела. 1998. Т. 40. № 10. С. 1849–1854.
- [11] *Канель Г.И., Разоренов С.В.* // Физика твердого тела. Т. 43. № 5. С. 839–845.
- [12] *Morozov N., Petrov Y.* Dynamics of Fracture. Berlin–Heidelberg–New York: Springer, 2000. 220 p.