

05

Откол в сапфире при ударном сжатии в различных кристаллографических направлениях

© И.А. Черепанов,^{1,2} А.С. Савиных,^{1,¶} С.В. Разоренов^{1,2}

¹ Институт проблем химической физики РАН,
142432 Черноголовка, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия

¶ e-mail: savas@icp.ac.ru

Поступило в Редакцию 19 ноября 2019 г.

В окончательной редакции 19 ноября 2019 г.

Принято к публикации 26 декабря 2019 г.

Представлены результаты измерений прочности на разрыв монокристаллов сапфира 8 кристаллографических ориентаций c , a , d , r , n , s , g и m в диапазоне ударного сжатия 15–20 ГПа. Выявлена зависимость откольной прочности от направления удара и максимального напряжения сжатия. Наиболее высокие значения откольной прочности ~ 12 – 13 ГПа реализуются при максимальном напряжении ударного сжатия 16 ГПа в образцах монокристаллического сапфира ориентаций m и a .

Ключевые слова: сапфир, откольная прочность, ударные волны.

DOI: 10.21883/JTF.2020.06.49283.368-19

Введение

Сапфир обладает целым рядом уникальных физических и химических свойств [1], таких как высокая механическая прочность и твердость, является оптически прозрачным материалом в широком диапазоне спектра и рабочих температур и давлений, способен работать в агрессивных средах, в условиях воздействия радиации и высоких температур. Результаты исследований механических свойств сапфира при ударных нагрузках представлены в работах [2–7]. В частности, в исследовании [2] приведены результаты экспериментов с монокристаллами сапфира при сжатии в различных кристаллографических направлениях. Показана зависимость динамического предела упругости (Hugoniot Elastic Limit, σ_{HEL}) от кристаллографического направления и величины давления ударного сжатия.

Для практических приложений особое значение имеет сохранение оптической прозрачности и однородности монокристаллического сапфира в широком диапазоне интенсивностей ударных воздействий. Известно, что его прозрачность нарушается при напряжениях ударного сжатия близких к динамическому пределу упругости и меняется с длительностью приложенной нагрузки [8]. При этом регистрируется люминесценция ударно-сжатого сапфира, имеющая выраженный гетерогенный характер [9]. Эксперименты по измерению критических разрушающих напряжений (откольной прочности) сапфира при динамическом нагружении проводились на образцах с отдельными ориентациями и не носили систематический характер. Так, например, в работе по изучению откольной прочности сапфира ориентации c [10] было зафиксировано, что в области упругого деформирования сапфир демонстрирует чрезвычайно

высокие значения разрушающих напряжений при отколе, возрастающие с уменьшением длительности нагрузки, а с началом пластического деформирования прочность на разрыв падает практически до нуля.

В настоящей работе с целью оценки анизотропии откольной прочности сапфира проведены измерения и анализ профилей скорости контактной поверхности монокристалла сапфира 8 кристаллографических ориентаций.

Материал и постановка экспериментов

Исследуемые образцы монокристаллического сапфира плотностью 3.97 g/cm^3 представляли собой диски толщиной 5 mm и диаметром 22 или 50 mm. В таблице приведены соответствующие значения угла Θ между осью, вдоль которой проводилось нагружение образца и главной осью сапфира c , а также измеренные значения продольной скорости звука c_l .

Нагружение образцов монокристаллического сапфира осуществлялось ударом алюминиевой пластины толщиной 0.4 mm, разогнанной до скоростей 1.2 ± 0.05 , 1.3 ± 0.05 и $1.55 \pm 0.05 \text{ km/s}$ с использованием взрывных устройств [11], что соответствует максимальному расчетному напряжению ударного сжатия ~ 15 , ~ 16.5 и ~ 20 ГПа. Эксперименты были организованы так, что во всех случаях в образцах сапфира реализовывались условия откольного разрушения. Поперечные размеры всех образцов были достаточны для обеспечения условия одномерной деформации в течение всего времени регистрации. Для отсекающей воздушной волны, которая образуется перед летящим ударником, нагружение образца проводилось через алюминиевый экран толщиной

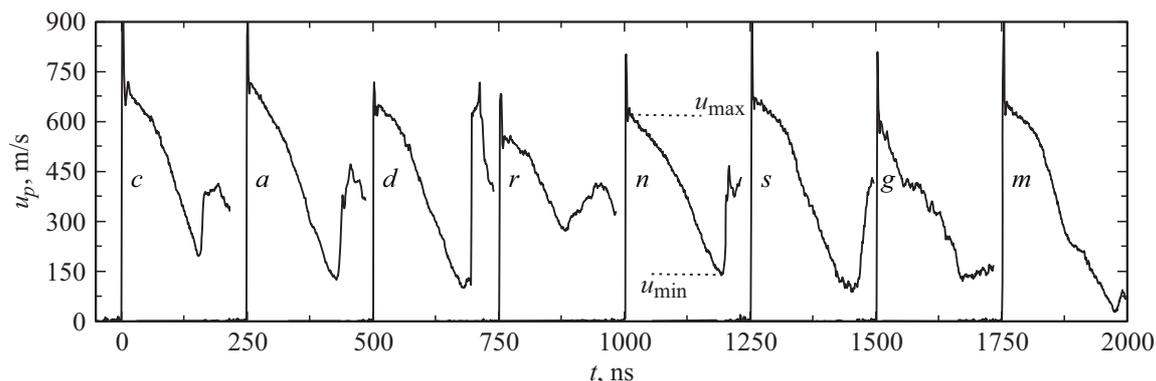


Рис. 1. Профили скорости контактной поверхности образцов монокристалла сапфира ориентаций *c*, *a*, *d*, *r*, *n*, *s*, *g* и *m* при максимальном напряжении сжатия ~ 16.5 GPa.

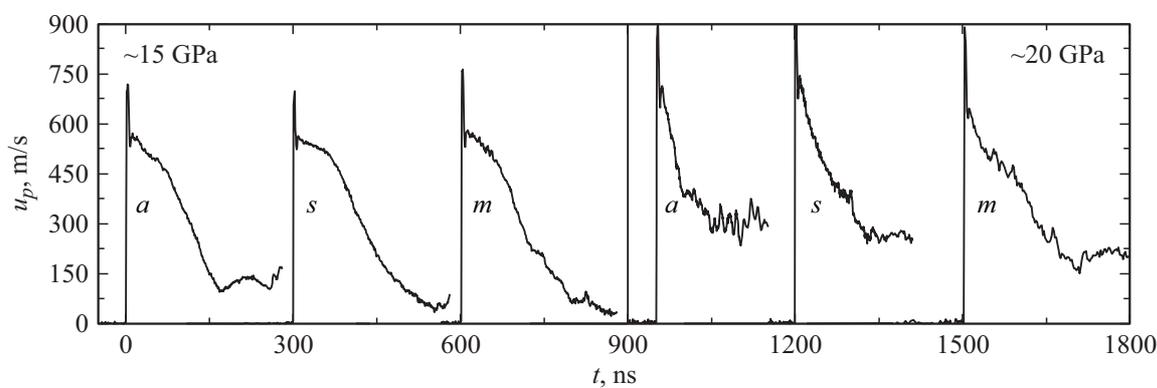


Рис. 2. Профили скорости контактной поверхности образцов монокристалла сапфира ориентаций *a*, *s* и *m* при максимальном напряжении сжатия ~ 15 и ~ 20 GPa.

2 mm. Во всех экспериментах с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR [12], имеющего в использованной конфигурации временное разрешение ~ 0.8 ns, регистрировались профили скорости контактной поверхности $u_p(t)$ между образцом и водяным окном. Для отражения лазерного излучения на поверхность образца наклеивалась алюминиевая фольга толщиной $10 \mu\text{m}$.

Результаты измерений

На рис. 1 представлены профили скорости контактной поверхности образцов сапфира 8 ориентаций при ударе со скоростью 1.3 km/s . Во всех экспериментах регистрируется выход на поверхность упругой волны сжатия, следующей за ней волны разрежения и откол. Кратковременный „выброс“ скорости на фронте ударного импульса сжатия связан с тем, что алюминиевая фольга обладает меньшим динамическим импедансом, поэтому после выхода ударной волны на контактную поверхность приобретает более высокую скорость, чем поверхность сапфира. В дальнейшем скорости выравниваются из-за противодействия со стороны воды.

В экспериментах с ориентациями образцов *g* и *r* (в отличие от остальных направлений) регистрируются меньшие значения максимальной скорости контактной поверхности. Возможно, в этих экспериментах был превышен динамический предел упругости, и по мере распространения упругопластической волны сжатия произошла релаксация напряжений до величины σ_{HEL} и, таким образом, откольное разрушение происходило в упругой области деформирования. Согласно работе [2], динамический предел упругости образцов ориентации *g* составляет $13\text{--}16$ GPa, ориентации *r* ~ 13 GPa. Эти значения близки к максимальным напряжениям сжатия в проведенных экспериментах с образцами ориентации *g* и *r*, что подтверждает сделанное предположение.

Детальный анализ полученных волновых профилей, представленных на рис. 1, выявляет анизотропию в эволюции формы волны разрежения и формы откольного импульса. За исключением ориентации *g* во всех остальных случаях наблюдается резкий второй подъем скорости, связанный с образованием откольного импульса в момент разрушения образца. Измеренное время формирования откольного импульса для образцов ориентаций *d*, *c*, *a*, *n* составило $1.6\text{--}8$ ns, что свидетельствует о чрезвычайно быстром развитии процесса разрушения.

Результаты измерений продольной скорости звука c_l при нулевом давлении и откольной прочности σ_{sp} в зависимости от максимального напряжения сжатия σ_{max}

| Ориентация | c (0001) | a (11 $\bar{2}$ 0) | d (10 $\bar{1}$ 4) | r (1 $\bar{1}$ 02) | n (11 $\bar{2}$ 3) | s (10 $\bar{1}$ 1) | g (11 $\bar{2}$ 1) | m (10 $\bar{1}$ 0) |
|----------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\Theta, ^\circ$ | 0 | 90 | 38 | 57 | 61 | 72 | 79 | 90 |
| $c_l, \text{km/s}$ | 11.21 | 11.23 | 10.95 | 10.60 | 10.85 | 11.20 | 11.11 | 11.21 |
| ~ 15 GPa | | | | | | | | |
| σ_{sp}, GPa | — | 9.8 | — | — | — | 9.6 | — | 11.6 |
| σ_{max}, GPa | — | 13.4 | — | — | — | 13.2 | — | 13.7 |
| ~ 16 GPa | | | | | | | | |
| σ_{sp}, GPa | 10.6 | 12.1 | 11.3 | 5.1 | 9.9 | 11.9 | 9.7 | 13.1 |
| σ_{max}, GPa | 17.3 | 17.2 | 15.4 | 12.8 | 14.9 | 16.2 | 14.4 | 15.7 |
| ~ 20 GPa | | | | | | | | |
| σ_{sp}, GPa | 8.9–10.6 [11] | 8.3 | — | — | — | 10.8 | — | 10.1 |
| σ_{max}, GPa | 18 | 17.3 | — | — | — | 17.9 | — | 15.7 |

Для образцов других ориентаций время нарастания параметров во фронте откольного импульса находится в диапазоне от 14 до 130 ns. Появление нерегулярных осцилляций на всех профилях контактной поверхности после откольного разрушения свидетельствует о появлении и распространении микротрещин и разрушении откольной пластины.

Значения растягивающих напряжений непосредственно перед разрушением (откольной прочности) сапфира рассчитывались методом характеристик по измеренным значениям массовой скорости в максимуме u_{max} и перед фронтом откольного импульса u_{min} с учетом водяного окна [11]. Ударная сжимаемость сапфира в области упругого деформирования измерялась только для ориентации c [9], для которой получено выражение для ударной адиабаты в виде $U_S = c_l + u_p$, где U_S , u_p — скорость фронта упругой ударной волны и массовая скорость за фронтом, равная u_{max} , соответственно, c_l — продольная скорость звука при нулевом давлении (см. таблицу). Для остальных ориентаций в расчетах волновых отражений использовались аналогичные выражения для ударной адиабаты с соответствующими значениями c_l . При расчете напряжений и массовых скоростей в области растяжения использовалась экстраполяция ударной адиабаты в область отрицательных напряжений. Полученные значения откольной прочности σ_{sp} , а также рассчитанные из измеренных профилей контактной поверхности значения максимального напряжения сжатия σ_{max} суммированы в таблице.

Чтобы оценить зависимость величины σ_{sp} от максимального напряжения сжатия, были проведены эксперименты с образцами ориентаций a , s и m , демонстрирующие при скорости удара 1.3 km/s наибольшие значения прочности на разрыв, при скоростях соударения 1.2 и 1.55 km/s. На рис. 2 представлены профили скорости

контактной поверхности образцов a , s и m ориентаций при $\sigma_{max} \sim 15$ и ~ 20 GPa. При $\sigma_{max} \sim 15$ GPa профили скорости контактной поверхности подобны полученным ранее при 16.5 GPa, за исключением того, что откольный импульс в экспериментах с образцами ориентации m не регистрируется, в образцах s -ориентации время нарастания скорости в откольном импульсе увеличилось до ~ 100 ns, а в образцах ориентации a наблюдается слабо выраженный откольный импульс. При максимальном напряжении ~ 20 GPa профили контактной поверхности демонстрируют меньшую скорость, чем ожидалось. Этот эффект связан с тем, что в этих экспериментах максимальное напряжение сжатия превышает динамический предел упругости сапфира, и в процессе нагружения происходит релаксация напряжений на фронте ударной волны до значения σ_{HEL} , т.е. откольное разрушение происходит в упругой области. Во всех случаях при этом давлении ударного сжатия на волновых профилях наблюдается отсутствие откольных импульсов. Изменилась форма волны разрежения, ее длительность уменьшилась в 2–2.5 раза и в разгрузочной части импульса появились нерегулярные осцилляции.

Заключение

Проведены измерения откольной прочности монокристаллов сапфира 8 кристаллографических ориентаций c , a , d , r , n , s , g и m в диапазоне ударного сжатия 15–20 GPa. Максимальные значения критических разрушающих напряжений при отколе $\sigma_{sp} \sim 12$ –13 GPa достигаются при давлении ударного сжатия 16 GPa и реализуются при ударе в направлении m перпендикулярно призматической плоскости и в направлении a , когда ось перпендикулярна основной плоскости поверх-

ности. Наименьшее значение критических разрушающих напряжений ~ 5 ГПа зарегистрировано у сапфира r -ориентации. Величина откольной прочности образцов остальных исследованных ориентаций находится в диапазоне 9–11 ГПа. Анизотропия эволюции ударной волны проявляется также в изменении формы откольного импульса. В образцах d -, c -, a -, n -ориентаций наблюдается чрезвычайно быстрый откол — время образования откольной трещины составило 1.6–8 ns. Для образцов других ориентаций этот параметр лежит в диапазоне от 14 до 130 ns.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме № 0089-2019-0001, № государственной регистрации ААА-А19-119071190040-5 с использованием оборудования Московского регионального взрывного Центра коллективного пользования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Dobrovinskaya E., Lytvynov L., Pischik V.* Sapphire in science and engineering. Kharkiv: „STC Institute for Single Crystals“, 2007. 480 p.
- [2] *Kanel G.I., Nellis W.J., Savinykh A.S., Razorenov S.V., Rajendran A.M.* // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 106. P. 043524. DOI: 10.1063/1.3204940
- [3] *Nowak R., Manninen T., Heiskanen K., Sekino T.* // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 83. N 25. P. 5214–5216. DOI: 10.1063/1.1635983
- [4] *Voloshyn O.V., Lytvynov L.A., Slyunin E.V.* // Funct. Mater. 2007. Vol. 14. N 4. P. 569–572.
- [5] *Синани А.Б., Кожушко А.А., Зильбербранд Е.Л.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 3. С. 27–31. [*Sinani A.B., Kozhushko A.A., Zilberbrand E.L.* // Tech. Phys. Lett. 2008. Vol. 34. N 2. P. 103–105. DOI: 10.1134/S1063785008020053]
- [6] *Wang Y., Mikkola D.E.* // Mater. Sci. Eng. A. 1991. Vol. 148. N 1 P. 25–32. DOI: 10.1016/0921-5093(91)90862-H
- [7] *Reinhart W.D., Chhabildas L.C., Vogler T.J.* // Int. J. Imp. Eng. 2006. Vol. 33. P. 655–669. DOI: 10.1016/j.jimpeng.2006.09.083
- [8] *Barker L.M., Hollenbach R.E.* // J. Appl. Phys. 1970. Vol. 41. P. 4208–4226. DOI: 10.1063/1.1658439
- [9] *Hare D.E., Holmes N.C., Webb D.J.* // Phys. Rev. B. 2002. Vol. 66. P. 014108. DOI: 10.1103/PhysRevB.66.014108
- [10] *Савиных А.С., Канель Г.И., Разоренов С.В.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 7. С. 8–15. [*Savinykh A.S., Kanel G.I., Razorenov S.V.* // Tech. Phys. Lett. 2011. Vol. 37. N 4. P. 294–297. DOI: 10.1134/S1063785011040146]
- [11] *Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е.* Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М: Янус-К, 1996. 407 с.
- [12] *Barker L.M., Hollenbach R.E.* // J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43. P. 4669–4675. DOI: 10.1063/1.1660986