

04,14

Генерация микротрещин и дрейф дислокаций при ударном повреждении корунда

© И.П. Щербаков, А.Е. Чмель[†]

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия

E-mail: chmel@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 8 октября 2025 г.

В окончательной редакции 8 октября 2025 г.

Принята к публикации 4 марта 2026 г.

Цикл трансформации структуры поверхности при ударном повреждении монокристаллов корунда ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) исследован методами акустической эмиссии (АЭ) и электромагнитной эмиссии (ЭМЭ). Ударная нагрузка прилагалась к свободным образцам, а также к образцам, находящихся под различным статическим давлением сжатия, приложенного ортогонально ударному воздействию. Сигнал АЭ отнесен к повреждению поверхности корунда с образованием микротрещин. Активность ЭМЭ при ударной нагрузке показала два всплеска, один из которых появлялся прежде начала генерации импульсов АЭ, а второй следовал после достижения максимума последней. Первый пик ЭМЭ отнесен к дрейфу дислокаций при ударной деформации, а второй объяснен аннигиляцией зарядов противоположных знаков на берегах возникших трещин, „схлопнувшихся“ после прохождения ударного импульса. Эксперименты проводились на образцах с поверхностями, подготовленными как абразивной полировкой, оставляющей на поверхности механически разрушенный слой, так и ионным полированием, после которой на поверхности образуется нанометрическая регулярная структура без трещин. Особенности эмиссионной активности в образцах с различной структурой поверхностного слоя объяснены различным характером движения дислокаций в слоях.

Ключевые слова: абразивная полировка, ионная полировка, статическое нагружение, ударное нагружение.

DOI: 10.61011/FTT.2026.03.62933.271-25

1. Введение

Благодаря сочетанию высокой твердости (9 ед. по Моссу) и прозрачности в большей части видимой области спектра (3.8–5.5 μm), а также возможности синтезировать крупные монокристаллы размером до 160 mm и массой до 15 kg [1,2], корунд имеет множество приложений как в оптических приборах, так и экранах для защиты инструментов и сенсоров от ударного воздействия твердых частиц в воздушно-космическом пространстве.

Использование оптических деталей из корунда требует формирования максимально гладких поверхностей, что, в большинстве приложений, достигается механическим полированием алмазным абразивом, причем при необходимости применяется т.н. глубокая шлифовка-полировка (ГПШ) с циклами последовательного уменьшения зерна абразива. Однако механическая полировка всегда оставляет на поверхности изделия модифицированный слой: на границе раздела возникают сжимающие напряжения, а ниже сжатого слоя образуется слой растяжений [3].

Наличие механически разрушенного слоя поверхности нежелательно в ряде приложений. В таком случае используется метод ионного полирования, в котором поверхность изделия бомбардируют пучком ионов Ar^+ , не оставляющем беспорядочно модифицированного слоя [4]. Рельеф поверхности в этом случае имеет регулярный паттерн нанометрического масштаба [5],

который формируется вследствие возникновения напряжений [6] при столкновении ионов с материалом.

В настоящей работе поверхности образцов корунда, подготовленные как абразивным, так и бесконтактным (ионным) полированием, подвергались точечному удару до и после приложения статической, приложенной ортогонально удару, сжимающей нагрузки на образец. При ударе регистрировались временные развертки сигналов акустической эмиссии (АЭ), чувствительной к появлению растущих микротрещин, и электромагнитной эмиссии (ЭМЭ). Генерация последней имела два различных источника происхождения и проявлялась в двух разнесенных временных окнах. Характер эмиссионной активности был сопоставлен с различными фазами развития разрушения материала при действия статической и ударной механических нагрузках.

2. Образцы и оборудование

Кристаллы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ были выращены модифицированным методом Киропулоса (метод ГОИ [1,2]). В этом методе формирующиеся грани роста располагаются нормально к главной оси кристалла. Поверхности естественных граней подвергались ГПШ алмазными порошками с последовательным снижением размером зерен абразива в финишной последовательной 5/3; 3/2; 1/0 μm и конечным размером 0.5/0 μm , а также ионной полировке умеренно-энергичными (20 keV) ионами Ar^+ .

Статическая нагрузка P прилагалась в вертикальном направлении к поверхности образца. Величина P принимала следующие значения относительно предельной прочности корунда на сжатие (P_{ul}): $P = 0$; $P = 0.3P_{ul}$ и $P = 0.6P_{ul}$. Ударная волна в одноосно-сжатом образце возбуждалась заостренным, закаленным бойком, закрепленным на маятниковом копре, то есть ортогонально статической нагрузке. Позади образца помещалась опорная пластина для исключения его горизонтально смещения при ударе.

Сигналы АЭ регистрировали высокочувствительным датчиком из пьезокерамики $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ в полосе частот 80–900 kHz, исключавшей низкочастотное влияние колебаний экспериментальной установки. ЭМЭ регистрировалась диполем Герца в таком же частотном диапазоне. Сигналы ЭМЭ и АЭ подавались на вход аналого-цифрового преобразователя АСК-3106 и в цифровой форме сохранялись в компьютере. Временное разрешение импульсов было 40 ns; продолжительность развития очага разрушения — 4 ms.

3. Результаты

На рис. 1–3 показаны временные развертки индуцированных ударом акустических и электромагнитных сигналов. Поскольку сигналы включают отрицательные и положительные импульсы, приведены величины квадратов амплитуды A^2 , пропорциональные выделенной энергии. Отсчет времени ведется от момента удара копром.

Рисунки демонстрируют следующие особенности генерации эмиссионных процессов:

а) во всех сериях импульсов ЭМЭ выделяются два пика; *первый пик* генерации ЭМЭ появляется раньше начала активности АЭ, а *второй пик* запаздывает относительно максимума единственного пика АЭ, причем его положение зависит от рельефа сформированной обработкой поверхности;

б) положение *первых пиков* ЭМЭ в образцах с механической полировкой не изменяется при приложении статического сжатия, но зависят от размера зерна абразива;

в) в ионно-полированном образце первый по времени появления пик ЭМЭ смещается в сторону увеличения этого времени по мере увеличения сжимающей нагрузки на образец; положение *второго пика* приблизительно одинаковое при нулевой и сжимающих нагрузках.

4. Обсуждение

Наличие двух пиков во временной развертке ЭМЭ, возникающей после удара копра, указывает на их происхождение, вызванное двумя различными, но взаимосвязанными механизмами. *Первый пик* проявляется деформацией кристаллической решетки при приложении ударной нагрузки, которая реализуется через движение дислокаций. в отличие от метода электронной микроскопии,

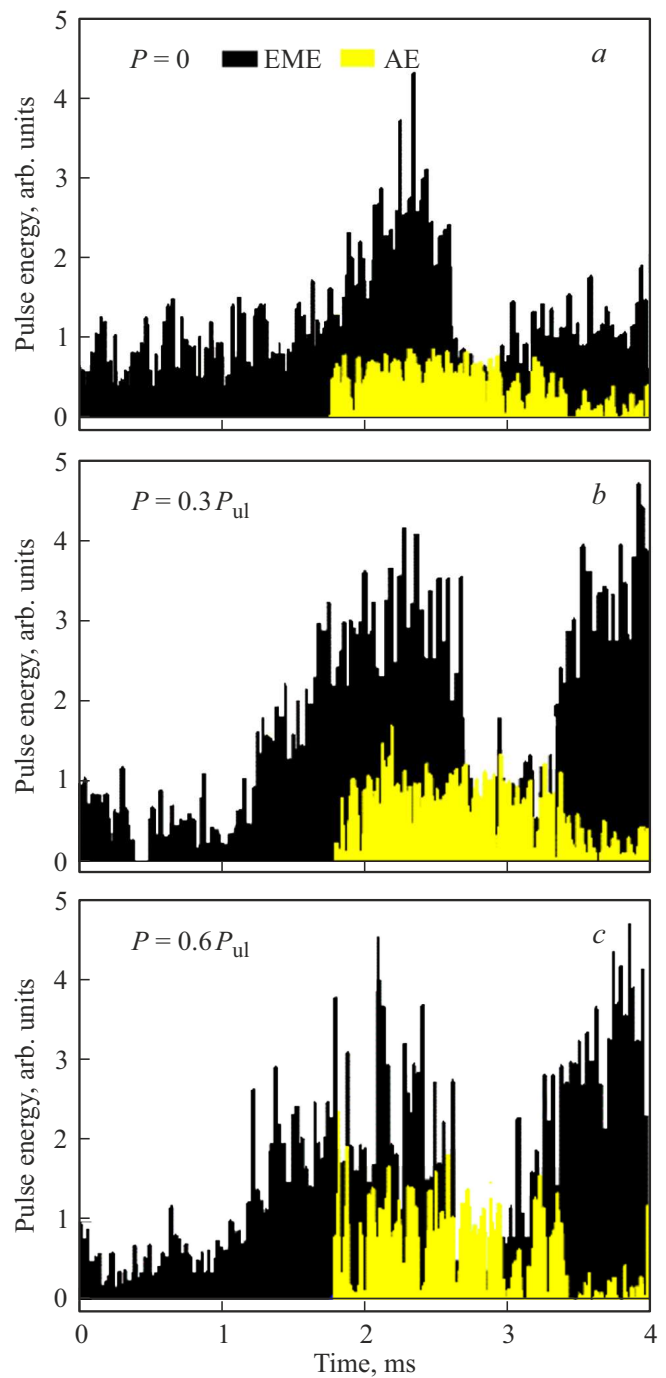


Рис. 1. Развертки эмиссионной активности при ударном воздействии на образец, полированный абразивом с размером зерен $5/3\ \mu\text{m}$, находящегося под приложенной ортогонально удару сжимающей нагрузке: а) $P = 0$; б) $P = 0.3P_{ul}$ и в) $P = 0.6P_{ul}$.

который широко применяется для отслеживания динамики дрейфа дислокаций [7–9] посредством построения дискретных „цепочек“ изображений [10], импульсы ЭМЭ в данном эксперименте имели временное разрешение 40 μs , т.е. процесс развития повреждения наблюдался, фактически, на непрерывном уровне.

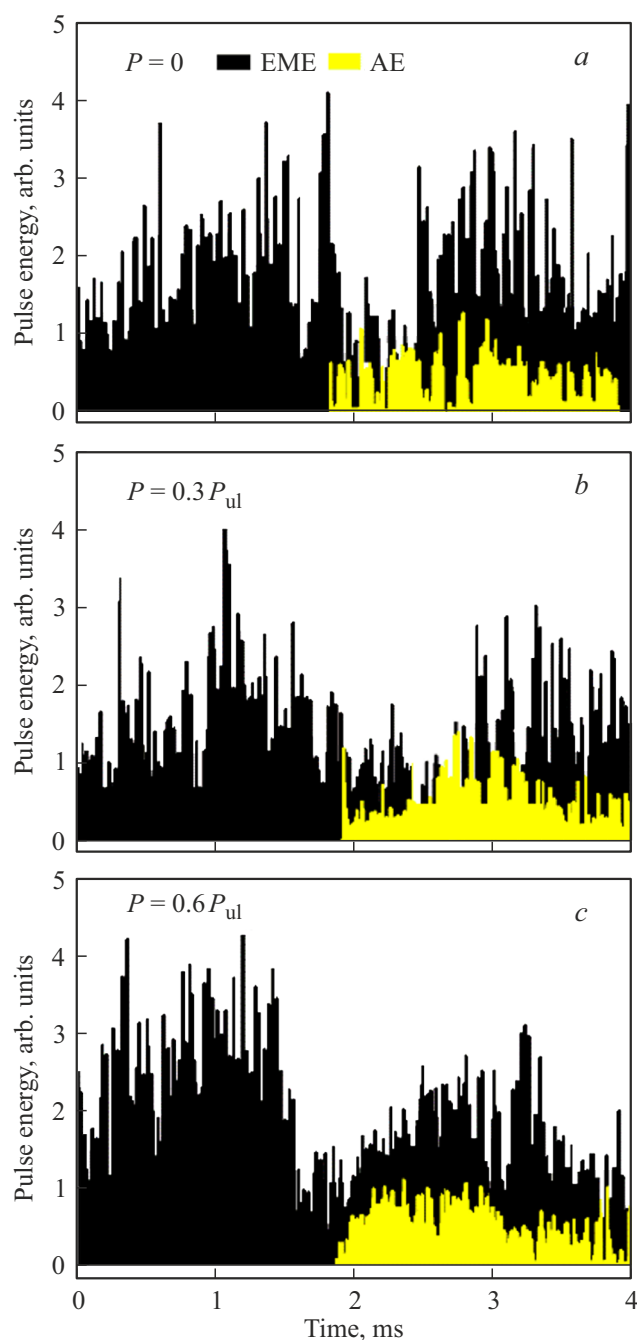


Рис. 2. То же, с размером зерен $0.5/0 \mu\text{m}$.

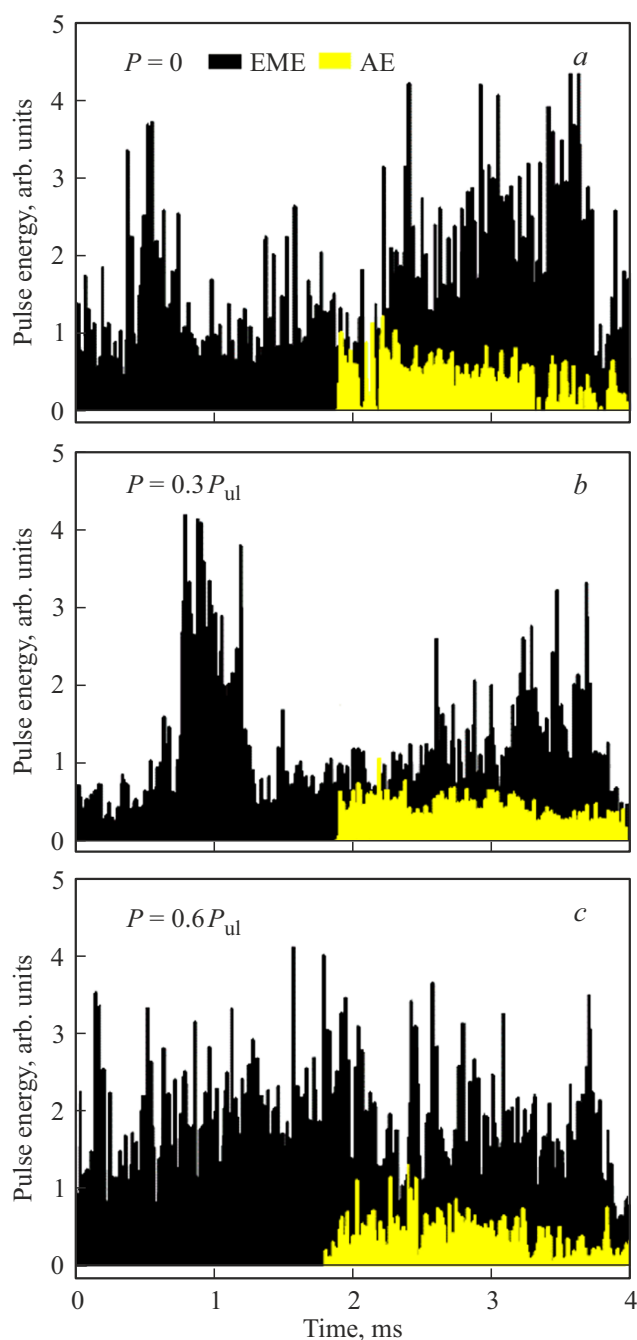


Рис. 3. То же, для образца, подвергнутого ионной полировке.

Монокристаллический корунд имеет высокую энергию активации движения дислокаций в объеме [11], что ограничивает их подвижность. Однако в поврежденном абразивной полировкой поверхностном слое целостность решетки кристалла снижается, и мобильность дислокаций, стимулированная ударным воздействием на образец, возрастает.

В образцах, подвергнутых ионной полировке, трещиноватый поверхностный слой отсутствует. Однако поверхность не является идеально гладкой, поскольку, как цитировалось выше [5], под воздействием пучка

ионов она приобретает регулярный волнистый рельеф. В долинах между волнами возникают дислокации, которые под нагрузкой дрейфуют вглубь образца [12]. При $P = 0$ и $P = 0.3P_{ul}$ движение дислокаций при этой геометрии поверхности происходит за существенно более короткое время, чем в разупорядоченном слое, образованном абразивной полировкой (ср. панели $a-b$ рис. 3 и рис. 1 и 2). Однако при наложении статической нагрузки продолжительность вызванного ударом дрейфа первого пика растет (рис. 3, b и c).

При движении дислокаций происходят их столкновения с препятствиями, которые на поверхности полированного монокристалла обусловлены, преимущественно, нарушениями кристаллического строения. Оседание дислокаций на дислокационных барьерах в напряженном материале ведет к деформации и появлению зародышевых трещин [13,14]. При достижении критических условий зародышевая трещина увеличивается в размерах и переходит в микро/макротрещину [14,15] — возникает сигнал АЭ.

Эволюция трещин под действием ударной нагрузки является вторым источником электромагнитного излучения. При раскрытии трещин на их берегах образуются электрические заряды противоположных знаков [16]. По мере прохождения ударной волны трещины последовательно закрываются и происходит аннигиляция зарядов с излучением электромагнитных волн. Таким образом, *второй пик* сигналов ЭМЭ всегда „запаздывает“ после начала акустического сигнала на время равное времени жизни открытой трещины. Наибольшее время „запаздывания“ проявилось при наиболее грубой обработке поверхности (рис. 1), что указывает на наибольший размер трещин.

5. Заключение

Посредством параллельной регистрации акустической и электромагнитной эмиссий исследована микро-механика точечного ударного повреждения поверхности корунда, сформированной как глубокой шлифовкой-полировкой, так и обработанной ионным полированием. Ударная нагрузка применялась к свободным образцам и находящимся под статическим сжатием до давления, величиной до 0.6 от разрушающей нагрузки.

Проявление ЭМЭ обусловлено последовательным действием следующих трех механизмов: *а)* движение дислокаций, вызванное начальной деформацией поверхности кристалла при ударе; *б)* при достижении дислокациями потенциальных барьеров сигнал ЭМЭ почти исчезает и возникают зародышевые трещины, которые при дальнейшем увеличении динамической нагрузки вырастают до макроскопических (в пределах масштаба эксперимента) размеров, вызывая генерацию АЭ; *с)* после прохождения ударной волны источником ЭМЭ является аннигиляция электрических зарядов противоположного знака, возникших на берегах трещин при их зарождении.

Компрессия образцов ортогонально ударной нагрузке не повлияла на положение первых пиков ЭМЭ в образцах, приготовленных с применением абразивной полировки. При этом генерация поверхности, сформированной ионной полировкой, не имеющей трещиноватого слоя, продолжалась более длительное время. Различие объяснено характером движения дислокаций: в первом случае преимущественно в слое, параллельном поверхности, во втором — в глубь образца.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. <https://doi.org/>

Список литературы

- [1] Ю.А. Ломов, М.И. Мусатов, В.С. Папков, М.В. Суровиков. Патент SU 768052 (1991).
- [2] М.И. Мусатов. Патент РФ № 2056463 (1996).
- [3] W.H. Tuan, J.C. Kuo. J. Eur. Ceram. Soc. **19**, 8, 1593 (1999).
- [4] С.А. Гынгазов, В. Костенко, В.В. Овчинников, Н.В. Гущина, Ф.Ф. Махинько. Перспективные материалы **8**, 61 (2018).
- [5] В.М. Золотарев. Опт. и спектр. **130**, 12, 1875 (2022). <https://doi.org/10.21883/OS.2022.12.54095.42-22> [V.M. Zolotarev. Opt. Spectrosc. **130**, 12, 1588 (2022).]
- [6] N.V. Medhekar, W.L. Chan, V.B. Shenoy, E. Chason. J. Phys.: Condens. Matter **21**, 22, 224021 (2009). <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/22/224021>
- [7] М.В. Меженный, М.Г. Мильвидский, В.Ф. Павлов, В.Я. Резник. ФТТ **44**, 7, 1230 (2002). [M.V. Mezhenyi, M.G. Mil'vidskii, V.F. Pavlov, V.Ya. Reznik. Phys. Solid State **44**, 7, 1284 (2002).]
- [8] Л.Е. Карькина, О.А. Елкина, Л.И. Яковенкова. ФТТ **49**, 9, 1603 (2007). [L.E. Karkina, O.A. Elkina, L.I. Yakovenkova. Phys. Solid State **49**, 9, 1680 (2007).]
- [9] J.H. Warner, E.R. Margine, M. Mukai, A.W. Robertson, F. Giustino, A.I. Kirkland. Sci. **337**, 6091, 209 (2012).
- [10] K. Ruzaeva, K. Govind, M. Legros, S. Sandfeld. Instance Segmentation of Dislocations in TEM Images. IEEE 23rd International Conference on Nanotechnology (NANO) (2023). Pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/NANO58406.2023.10231169>
- [11] Ю.Г. Носов, Л.И. Деркаченко. ЖТФ **73**, 10, 139 (2003). [Yu.G. Nosov, L.I. Derkachenko. Tech. Phys. **73**, 10, 1354 (2003).]
- [12] M. Albrecht, S. Christiansen, H.P. Strunk. Physica Status Solidi A **150**, 1, 453 (1995).
- [13] В.И. Веттергень, А.Г. Кадомцев, И.П. Щербаков, Р.И. Мамалимов, Г.А. Оганесян. ФТТ **63**, 12, 1594 (2021). <https://doi.org/10.21883/FTT.2022.05.52337.268> [V.I. Vettegren', A.G. Kadomtsev, I.P. Shcherbakov, R.I. Mamalimov, G.A. Oganesyanyan. Phys. Solid State **63**, 12, 1847 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1063783421100395>]
- [14] Л.Е. Карькина, Л.И. Яковенкова. ФТТ **50**, 6, 1018 (2008). [L.E. Kar'kina, L.I. Yakovenkova. Phys. Solid State **50**, 6, 1061 (2008).]
- [15] Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов. Механика контактного разрушения, 3-е изд. Изд-во ЛКИ, М. (2013). 224 с.
- [16] М.И. Мирошниченко, В.С. Куксенко. ФТТ **22**, 5, 1531 (1980). [M.I. Miroshnichenko, V.S. Kuksenko. Sov. Solid State Physics **22**, 5, 895 (1980).]

Редактор Е.В. Толстякова