

УДК 539.2 : 539.16.04

© 1992

СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ РАЗРУШЕНИЯ ИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

О. М. Савенко, Г. И. Геринг

Обнаружено образование в ионных кристаллах двух типов структур разрушения — хрупких дисковых трещин и скопление микропор сферической формы диаметром до 10 мкм. Показано, что образование структур разрушения начинается при критических напряжениях. Определены пороги образования структур.

В последнее время интенсивно исследуется поведение твердых тел в полях сильных внешних воздействий. Для описания обширного экспериментального материала, полученного при различных видах статического и ударно-волнового нагружения, вводятся представления о сильно возбужденных состояниях системы, эволюция которой к равновесию может приводить к качественно новым структурам и свойствам [1, 2]. В работах [3, 4] по динамическому нагружению показано, что неоднородность пластической деформации на микроуровне определяет процессы разрушения на макроуровне. Данная работа посвящена изучению структурных уровней разрушения ионных кристаллов, нагружаемых наносекундными импульсами механических напряжений, максимальная амплитуда которых достигает сотни мегапаскалей.

Для генерации механических напряжений использовался высокоточный электронный пучок ускорителя ГИН-400. Максимальная энергия электронов достигала ~300 кэВ. Длительность импульса излучения ~20 нс.

Плотность мощности пучка составляла 10^8 Вт/см², что позволяет пренебречь процессами плавления и испарения облучаемой мишени. В этих условиях реализуется термоупругий механизм преобразования энергии электронного пучка в энергию акустических колебаний [5, 6], согласно которому из области взаимодействия излучения с веществом распространяется акустический импульс биполярной формы, состоящей из следующих друг за другом импульсов сжатия и растяжения (рис. 1). Регистрация импульсов осуществлялась пьезоэлектрическим датчиком давления на основе ЦТС-19 [7]. Облучаемые образцы-кристаллы NaCl, KCl, KBr представляли собой плоскопараллельные пластины размером $10 \times 10 \times 4$ мм, которые выкалывались из монокристалла вдоль одного кристаллографического направления. Образцы отжигались при температуре 650 °С в течение 8 ч, охлаждение осуществлялось со скоростью не более 25°/ч. Для исследования отбирались образцы, не содержащие микротрещин, разрешаемые методами оптической микроскопии.

Отличительная особенность применяемой к данной работе схемы нагружения состоит в том, что для исключения эффектов накопления каждый образец подвергался однократному воздействию акустическим импульсом. Это достигалось использованием акустической ловушки (рис. 2), изготовленной из

того же монокристалла, что и исследуемый образец, в форме конуса с цилиндрическим каналом вдоль его оси. Ловушка акустически плотно прижималась к исследуемому образцу. Однородный электронный пучок через коллимирующее отверстие 1 диаметром 5 мм попадал на исследуемый образец 2, в котором

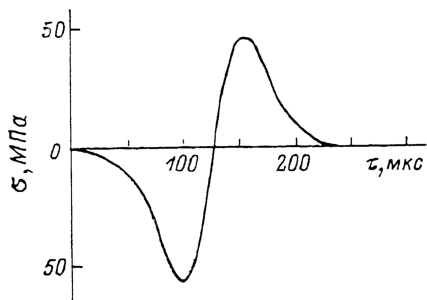


Рис. 1. Типичный биполярный акустический импульс, возбуждаемый электронным пучком в кристалле KCl.

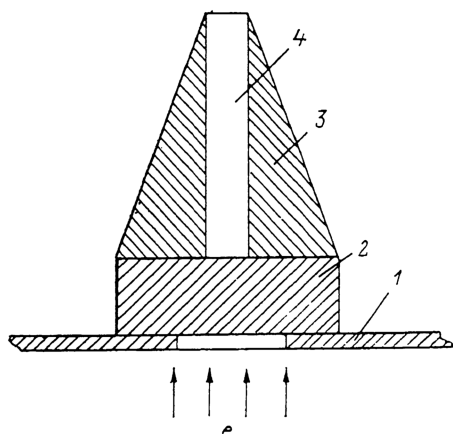


Рис. 2. Схема нагружения исследуемых образцов.

возбуждал акустический импульс с плоским волновым фронтом (диаметр облучаемой поверхности много больше глубины пробега электронов в веществе). Распространяясь далее по образцу, акустический импульс частично проникал в ловушку 3 и рассеивался в ней, а в области свободной поверхности, ограничен-

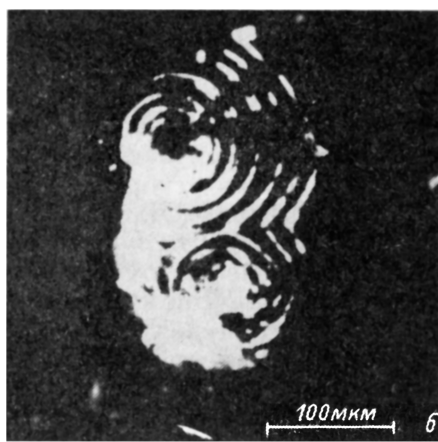
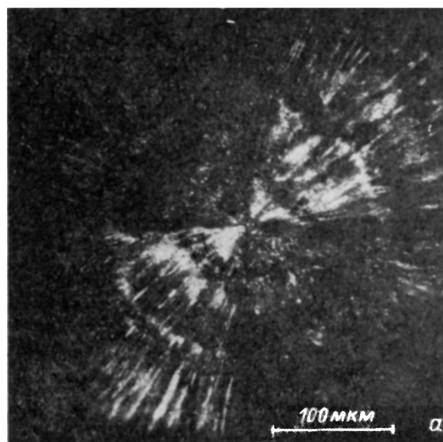


Рис. 3. Структурные уровни разрушения в материалах: NaCl (а), эпоксидная смола (б).

ной цилиндрическим каналом 4 диаметром 2 мм, отражался назад в образец. В результате интерференции падающего и отраженного акустических импульсов вблизи свободной поверхности возникал импульс растяжения приблизительно удвоенной амплитуды. При распространении акустического импульса на расстояние, превышающее диаметр цилиндрического канала, вследствие геометрической расходимости его энергия рассеивается в объеме образца, а амплитуда быстро убывает. Таким образом осуществляется однократное на-

гружение материала в приповерхностном слое, ограниченном цилиндрическим каналом акустической ловушки, в области интерференции падающего и отраженного импульсов напряжений. Однократность прохождения акустического импульса в этой области контролировалась пьезоэлектрическим датчиком давления с акустической задержкой в виде цилиндра, которая вводится в канал 4 ловушки 3.

Все образцы после импульсного нагружения исследовались методом оптической микроскопии, а часть образцов подвергалась химическому травлению для выявления дислокационной структуры.

В результате исследования облученных образцов обнаружено наличие двух типов структур разрушения. Первый структурный уровень разрушения свя-

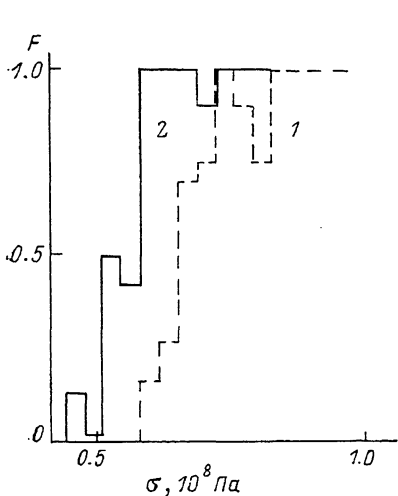


Рис. 4. Функции распределения вероятности разрушения: NaCl (1), KBr (2).

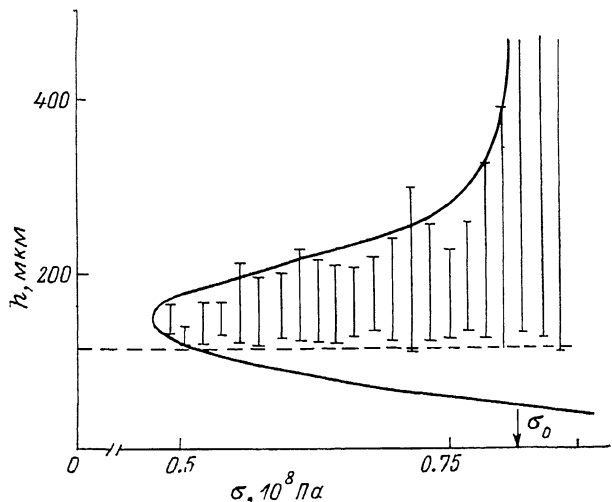


Рис. 5. Распределение ПСР по толщине кристаллов KCl.

зан с образованием хрупких откольных розеток (рис. 3, а) или, согласно [8, 9], периодических структур разрушения (ПСР), образующихся в слое конечной толщины под свободной поверхностью, ограниченной каналом акустической ловушки. Кристаллическая структура образцов проявляется в наблюдаемых на поверхности ПСР крестообразных рефлексов, ориентированных по направлениям $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$. В изотропных же средах (эпоксидная смола, герметик — Анатерм IV) образуются розетки откола, состоящие из однородных кольцевых трещин, расположенных на разной глубине от свободной поверхности образца (рис. 3, б).

Пороги появления структур разрушения определялись методом функций распределения вероятности разрушения. Гистограммы (рис. 4) построены по результатам испытаний 120 образцов для каждого типа кристаллов. Функции распределения вероятности разрушения кристаллов NaCl, KCl, KBr имеют одинаковый вид — характеризуются резким порогом по уровню воздействия и малой дисперсией. На рис. 5 представлено распределение ПСР по толщине образца. Вертикальными отрезками обозначены области, в которых образуются ПСР, а границам отрезков соответствуют максимальное и минимальное расстояния от ПСР до ближайшей свободной поверхности образца. Для каждого типа кристаллов можно указать предельное напряжение σ_0 , при достижении которого происходит переход от приповерхностного разрушения к разрушению в объеме по всей толщине образца.

Для анализа напряженного состояния в зоне разрушения применялось машинное моделирование. Используя экспериментально определенные значения функции $\sigma(\tau)$ (рис. 1), в приближении плоской волны мы получали эпюры напряжений в различные моменты времени в области интерференции в виде суммы импульсов напряжений, падающих и отраженных от свободной поверхности кристалла. В результате моделирования, кроме детальных пространственно-временных профилей напряжений, рассчитывались максимальные растя-

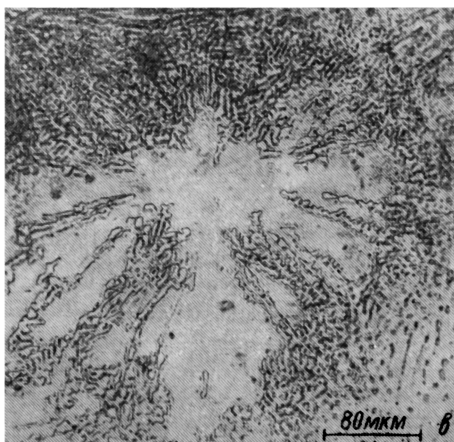
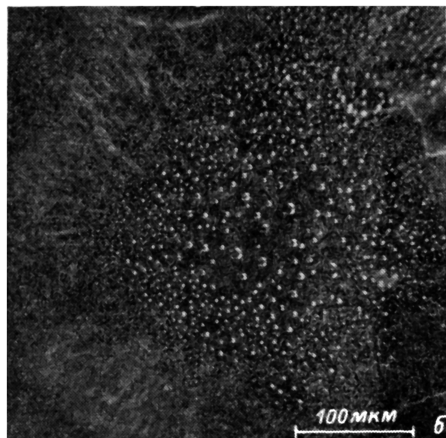
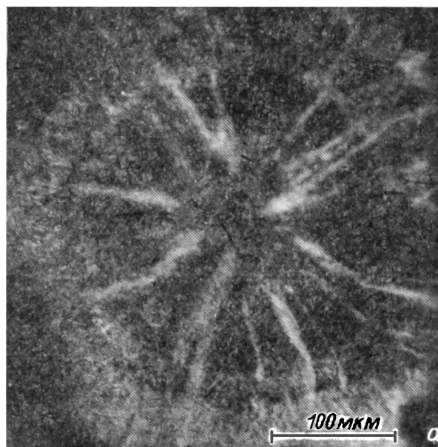


Рис. 6. Структурные уровни повреждения кристаллов NaCl при различных амплитудах импульсов напряжений σ (МПа): 47 (а), 51 (б), 75 (в).

гивающие напряжения в различных сечениях по толщине кристалла. Для кристаллов KCl максимум растягивающих напряжений возникает на расстоянии ~ 150 мкм от свободной поверхности (рис. 5). Сравнительный анализ результатов расчета с экспериментом показал, что структуры разрушения начинают возникать в тех областях кристалла, где максимум растягивающих напряжений достигает предельных значений σ_0 . Представление о предельном напряжении как о критерии разрушения позволило объяснить пространственное распределение ПСР в зависимости от величины растягивающих напряжений. Действительно, если существует предельное напряжение σ_0 , то при больших напряжениях в кристалле существует область, в любой точке которой с равной вероятностью может наблюдаться разрушение. Границы этой области, полученные по результатам машинного моделирования с учетом экспериментальных значений $\sigma(\tau)$ и амплитудно-временных параметров акустических импульсов для

кристаллов KCl, представлены на рис. 5 (сплошная линия). Согласно принятой модели расчета, с увеличением уровня внешнего воздействия граница области начала разрушения приближается к свободной поверхности кристалла. В эксперименте положение этой границы практически не зависит от уровня воздействия — амплитуды акустического импульса (штриховая линия на рис. 5). Предполагается, что наблюдаемое отличие обусловлено напряженным состоянием, возникающим в приповерхностном слое в результате его выгибания под действием падающего на свободную поверхность биполярного акустического импульса и блокирующим образование ПСР в рассматриваемой области. Представление о напряженном состоянии подтверждается в экспериментально наблюдаемом множественном растрескивании центральной части свободной поверхности кристалла при максимальных значениях амплитуды акустического импульса.

Одновременно с розетками откольного разрушения в исследованных кристаллах обнаружены структуры, состоящие из микропор-полостей почти сферической формы. Образуются эти структуры при тех же уровнях нагружения, что и розетки откольного разрушения. Так, в кристаллах NaCl при амплитуде импульса растягивающих напряжений ~ 40 МПа образуются первые одиночные аксиально-симметричные структуры диаметром ~ 100 мкм, состоящие из скопления пор размером не более 1 мкм (рис. 6, а). С ростом напряжений до ~ 50 МПа наблюдается как увеличение числа структур микропор, так и появление полостей диаметром до ~ 10 мкм, образующих скопления со слабо выраженной симметрией (рис. 6, б). Микроскопические исследования показали, что поры имеют форму оплавленных дисков толщиной 4 мкм, что значительно превосходит ширину хрупких трещин. Увеличение напряжений до ~ 70 МПа приводит к слиянию полостей и образованию большого числа разрывов сплошности в центральной зоне структуры (рис. 6, в). Растворением кристаллов было установлено, что остаточная атмосфера в порах отсутствует. Термический отжиг кристаллов в течение суток при температуре 650°C не повлиял на размеры и расположение пор. Избирательным травлением поверхности скола обнаружено пластическое течение вблизи цепочки пор и микротрещин.

Результаты проведенных исследований позволяют предположить, что кристаллы в условиях динамического нагружения можно рассматривать как сильно возбужденную систему, релаксация напряжений в которой происходит не только за счет образования хрупких трещин, но и за счет интенсивного пластического течения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 271 с.
- [2] Синергетика и усталостное разрушение металлов: Сб. ст. / Под ред. В. С. Ивановой. М.: Наука, 1989. 245 с.
- [3] Мецераков Ю. И., Диваков А. К. // ЖТФ. 1985. Т. 55. № 3. С. 591—595.
- [4] Мецераков Ю. И. // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 3. С. 628—632.
- [5] Залюбовский И. И., Калининченко А. И., Лазурик В. Т. Введение в радиационную акустику. Харьков: Вища школа, 1986. 168 с.
- [6] Радиационная акустика / Под ред. Л. М. Лямшева. М.: Наука, 1987. 136 с.
- [7] Савенко О. М. // ПТЭ. 1989. № 6. С. 170—172.
- [8] Лисицын В. М., Олешко В. И., Штанько В. Ф. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. № 24. С. 1478—1481.
- [9] Блиннов В. И., Геринг Г. И., Ковивчак В. С. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. № 18. С. 1194—1197.

Омский
государственный университет

Поступило в Редакцию
25 сентября 1990 г.
В окончательной редакции
19 февраля 1991 г.