

Л. И. МИРКИН

ОБ АНАЛОГИЯХ МЕЖДУ МЕХАНИЗМАМИ РАЗРУШЕНИЯ ПРОЗРАЧНЫХ И НЕПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ СВЕТОВЫМ ЛУЧОМ ЛАЗЕРА

(Представлено академиком Ю. Н. Работновым 28 V 1971)

Исследования структуры поверхности прозрачных и непрозрачных материалов после воздействия светового импульса лазера показали, что в непрозрачных (в основном металлических) материалах типичным эффектом является плавление и испарение поверхности, в прозрачных (щелочногалогенидных кристаллах, полимерах) — образование трещин хрупкого разрушения.

Несмотря на резкое различие внешних проявлений воздействия световых импульсов на прозрачные и непрозрачные материалы, во многих случаях можно найти общие черты в структурных эффектах, приводящих к разрушению. В частности, в работе ⁽¹⁾ было показано, что в кристаллах хлористого натрия расположение дислокаций в зоне, окружающей область трещин, типично для высокотемпературной деформации. Можно было предположить, что источником напряжений, вызывающих разрушение кристаллов, являются зоны интенсивного выделения тепла.

Исследовались монокристаллы хлористого натрия, расколотые по поверхности спайности (100). Облучение проводилось на оптическом квантовом генераторе ГОС-30М в режиме свободной генерации в условиях сильной дефокусировки, что облегчало поиски зон начала разрушения, т. е. использовалась неоднородность излучения по сечению светового луча. Путем дефокусировки и уменьшения энергии луча добивались уменьшения размеров трещин. При плотности энергии, несколько меньшей, чем необходимо для образования трещин, проводилось сплошное микроисследование поверхности и нахождение очагов разрушения.

Изучение очагов разрушения проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа, позволяющего вычерчивать профиль исследуемой поверхности, во вторичных и отраженных электронах.

Обнаружено, что перед разрушением (образованием трещин) на поверхности кристалла образуются области приблизительно круговой формы, состоящие из центральной зоны, окруженной кольцом. Поверхность кристалла внутри кольца очень неровная, что видно из анализа профиля поверхности в отраженных электронах. На микрофотографии (рис. 1) приведен очаг разрушения с наложенным профилем поверхности. Видно, что разрушение возникает вокруг включения на поверхности кристалла. Центральная часть пятна имеет неровную поверхность, кольцообразная зона вокруг центральной части также имеет неровную поверхность, после чего следует переход к исходной ровной поверхности. Отметим, что масштаб неровностей в очаге разрушения на несколько порядков больше, чем в исходной структуре (профиль поверхности скола даже при увеличении в 30 000 раз остается горизонтальным, без выбросов).

Представляло интерес исследование дислокационной структуры зоны вокруг очага разрушения. Дислокации выявлялись методом травления ⁽¹⁾. На рис. 2 приведено распределение дислокаций вокруг очага разрушения;

четко видна тенденция дислокаций к расположению по направлениям $[100]$ вместо направлений $[110]$, характерных для дислокаций, возникающих при локальной деформации путем вдавливания индентора. Отметим,

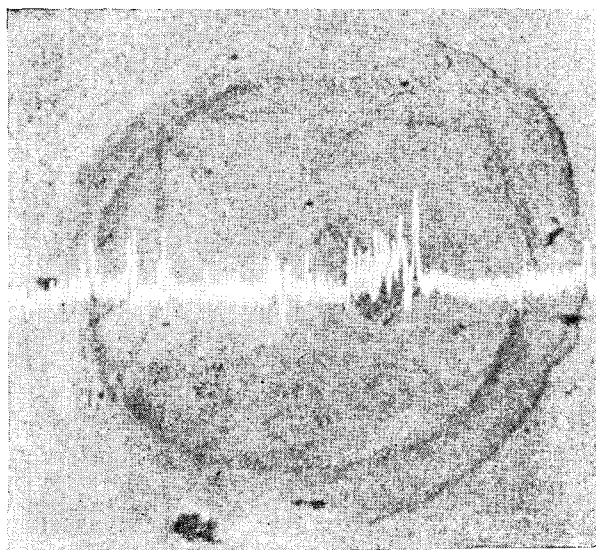


Рис. 1. Очаг разрушения и профиль поверхности хлористого натрия при облучении световым импульсом с энергией ниже порога разрушения, снимок в отраженных электронах, 100X

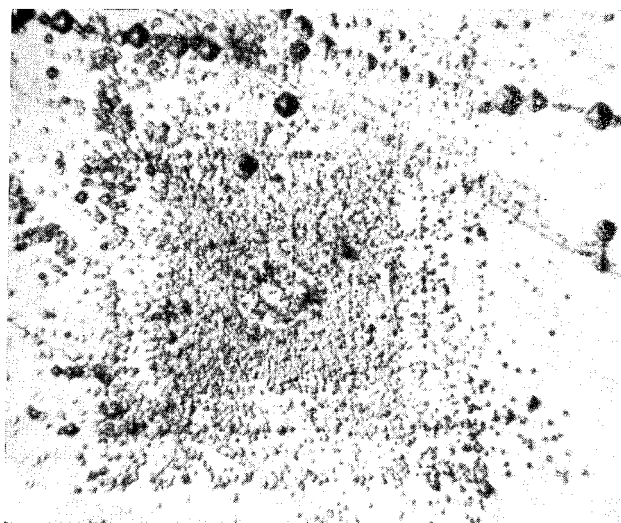


Рис. 2. Расположение дислокаций вокруг очага разрушения лучом лазера на поверхности хлористого натрия, 350X

что аналогичное распределение дислокаций вокруг области разрушения наблюдалось ранее ⁽¹⁾, аналогичное расположение дислокаций наблюдалось также при высокотемпературной деформации ⁽²⁾.

Для проверки предположения о тепловой природе возникновения дислокаций проводились эксперименты по различным видам сосредоточенного

воздействия на поверхность кристалла с выявлением возникающей дислокационной структуры. Получено, что при вдавливании пирамиды, шарика и конуса при комнатной температуре дислокации располагаются в основном вдоль направлений $[110]$. При вдавливании стального конуса, нагретого до $400-500^\circ\text{C}$, дислокации располагаются как вдоль $[110]$, так и вдоль $[100]$, при прикосновении острием нагретого конуса без существенной деформации поверхности дислокации расположены в основном вдоль $[100]$. Анализ полученных данных и сравнение с существующими теоретическими и экспериментальными исследованиями непрозрачных частей при облучении кристаллов ⁽³⁾, полимеров ⁽⁴⁾ и стекол ⁽⁵⁾, позволяют высказать следующие соображения о механизме разрушения лучом лазера прозрачных материалов.

В реальных прозрачных материалах всегда существуют менее прозрачные области, поглощение света в которых приводит к нагреву этих областей и окружающей среды. Если плотность энергии не очень велика, то результатом действия луча лазера являются изменения структуры вокруг непрозрачных включений, связанные с нагревом и охлаждением, например образование дислокаций в хлористом натрии, плавление поверхности кристаллов. На этой стадии процесс действия луча лазера на структуру прозрачных кристаллов во многом аналогичен действию луча на металлические материалы, в особенности сплавы с однородной структурой ⁽⁶⁾.

Повышение энергии приводит к более интенсивному выделению тепла и образованию некристаллографических трещин в очаге разрушения и трещин по плоскостям спайности вокруг очага в кристаллах ⁽⁷⁾, термическому разложению в полимерах с образованием газовых пузырей и расклиниванию за счет термических напряжений и давления газа ⁽⁸⁾, хрупкому разрушению стекол за счет термических напряжений ⁽⁹⁾. Конкретное расположение очагов разрушения зависит от расположения нитей повышенной интенсивности в исходном луче, размеров и расположения поглощающих областей в прозрачных материалах.

Анализ большого количества работ, посвященных разрушению прозрачных материалов лучом лазера показывает, что во многих случаях выводы об атомном механизме разрушения делались без учета неоднородности структуры материала.

Таким образом, на основе экспериментальных исследований процессов, происходящих перед разрушением лучом лазера прозрачных материалов, можно утверждать, что в основе разрушения лучом лазера длительностью 10^{-3} сек. как прозрачных, так и непрозрачных материалов лежит один и тот же механизм поглощения света веществом с выделением тепла. Наблюдаемые различия в поведении прозрачных и непрозрачных материалов при действии луча лазера связаны лишь с особенностями поведения этих материалов при импульсном нагреве.

В заключение автор выражает благодарность Г. И. Баренблатту, И. М. Грязнову и П. И. Улякову за обсуждение результатов, а также Т. М. Аверьяновой и Р. А. Бочко за помощь при проведении экспериментов на световом и электронном микроскопах.

Институт механики
Московского государственного университета
им. М. В. Ломоносова

Поступило
23 V 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Т. М. Аверьянова, Л. И. Миркин, Н. Ф. Пилипецкий, Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 1, 72 (1966). ² А. А. Предводителев, В. М. Степанова, Н. А. Туманова, Кристаллография, 10, № 3 (1965). ³ H. Kuzmanu, G. J. Ritter, Zs. Naturforsch., 25a, № 2, 229 (1970). ⁴ Н. В. Волкова, ФТТ, 12, № 7, 2182 (1970). ⁵ R. W. Norrer, I. R. Uhlmann, J. Appl. Phys., 41, № 10, 4023 (1970). ⁶ Т. М. Аверьянова, Л. И. Миркин и др., Журн. прикл. мех. и техн. физ., № 6, 84 (1965). ⁷ Т. М. Аверьянова, Л. И. Миркин, Н. Ф. Пилипецкий, Кристаллография, 12, № 6, 1022 (1967). ⁸ Г. И. Баренблатт, Н. Н. Всеволодов и др., Письма ЖЭТФ, № 3, 85 (1967). ⁹ Л. И. Миркин, Н. Ф. Пилипецкий, Э. М. Рабинович, ФТТ, 9, № 8, 2400 (1967).