

05.1

©1993 г.

## МНОЖЕСТВЕННЫЙ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЙ ОТКОЛ NaCl ПРИ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ И ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ СУБМИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

*Ю.Б.Никитин, Ю.В.Судьенков*

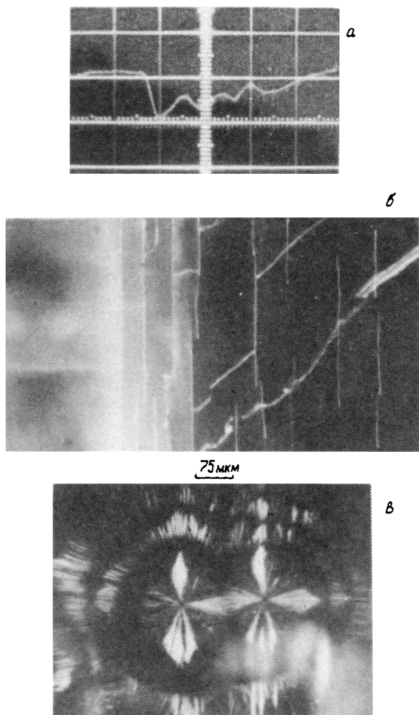
Простейший анализ процесса отражения пульсирующих или знакопеременных нагрузок от свободной поверхности образца показывает, что за счет интерференции падающей и отраженной волн в некоторых сечениях возникают знакопеременные во времени напряжения. При критических напряжениях растяжения в плоскостях интерференции могут возникнуть очаги разрушения. Естественно, что такая ситуация может реализоваться лишь при условии, что за время действия напряжений плоскости разрушения остаются в значительной степени акустически прозрачными. Такой процесс разрушения характерен для субмикросекундных длительностей ударного нагружения при давлениях, не сильно превышающих критические [1,2].

Исследования возможности возникновения множественного квазипериодического откола были проведены на образцах монокристаллов NaCl при пульсирующей и знакопеременной нагрузках субмикросекундной длительности.

Для генерации плоских ударных нагрузок сложной формы использовалось лазерное воздействие на многослойную среду с различным соотношением механических импедансов. Применялся импульсный лазер с  $\lambda = 1.06$  мкм и  $\tau = 25$  нс. Образцы NaCl  $15 \times 15$  мм и толщинами 3 – 5 мм находились в акустическом контакте с многослойным генератором ударной нагрузки.

Регистрация скорости свободной поверхности осуществлялась дифференциальным интерферометром со стабилизированной чувствительностью и фотоэлектронным счетом полос. Интерферограммы регистрировались параллельно двумя осциллографами с разной длительностью разверток. Это позволяло регистрировать детали формы импульсов скорости свободной поверхности, а также одновременно первый и переотраженный от нагружаемой поверхности импульсы, что давало возможность контролировать затухание импульсных напряжений. Возможность плавного изменения величины нагрузки от опыта к опыту позволяла с достаточно высокой точностью определять критические напряжения откола как по появлению микроочагов разрушения, так и по изменению величины затухания импульсов напряжения.

Результаты исследований представлены на рис.1 и 2. На рис.1, а приведен типичный профиль пульсирующей ударной нагрузки. Для такого профиля нагрузки в плоскостях откола напряжения будут иметь три уменьшающихся по амплитуде цикла сжатие-растяжение. На рис.1, б приведена фрактограмма откольной зоны в плоскости, перпендикулярной фронту ударной нагрузки.



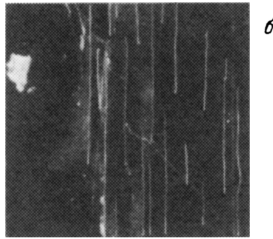
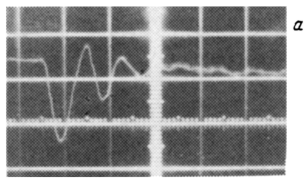
**Рис. 1.** *а* — интерферограмма импульса скорости свободной поверхности,  $t_p = 100$  нс/дел,  $V_{\text{св.пов}} = 42$  м/с; *б* — фрактограмма зоны разрушений, 75 мкм/см; *в* — фрактограмма микроразрушений в плоскости откола, 75 мкм/см.

Обращает на себя внимание тот факт, что на фрактограммах, помимо плоскостей откола, имеющих пространственный период, пропорциональный периоду пульсаций, наблюдаются отколы и в плоскостях с меньшим периодом  $\sim 50$  мкм. По-видимому, это обусловлено интерференцией волн и в плоскостях с периодом, соответствующим более высоким гармоникам спектра импульсов нагружения.

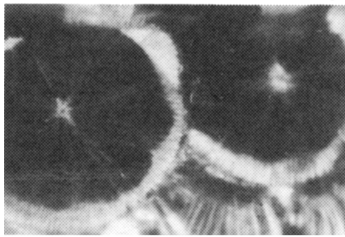
Микроочаги разрушения возникают в первых плоскостях уже при напряжениях растяжения 115 — 125 МПа. При этом затухание амплитуды импульсов возрастает лишь на  $0.05 \text{ см}^{-1}$  от значений  $0.65 \text{ см}^{-1}$  до  $0.7 \text{ см}^{-1}$ . Увеличение ударной нагрузки приводит к развитию разрушений в первой откольной плоскости и возникновению отколов в характерных плоскостях по всей глубине зоны интерференции ( $\sim 0.8$  мм).

Характерный вид микроочагов разрушения представлен на рис.1, в. Наблюдается “розетка” откола, образовавшаяся в первой фазе растяжения и две кольцевые зоны, соответствующие продвижению микротрещины под действием двух последующих фаз растяжения.

Средний размер “розеток” и расстояния между кольцевыми зонами, а также рассчитанные длительности фаз растяжения дают следующие оценки скорости трещины:  $V_1 = 1600$  м/с — скорость образования центральной зоны;  $V_2 = 660$  м/с — скорость продви-



75 мкм



**Рис. 2.** *а* — интерферограмма импульса скорости свободной поверхности,  $t_p = 100$  нс/дел,  $V_{св.пов.} = 36$  м/с; *б* — фрактограмма зоны разрушений, 75 мкм/см; *в* — фрактограмма микроразрушений в плоскости откола, 75 мкм/см.

жения трещины за вторую фазу растяжения;  $V_3 = 400$  м/с — скорость продвижения трещины за третью фазу растяжения. При этом средняя скорость равна  $\approx 750$  м/с, что совпадает с значениями, приведенными [1].

В плоскостях, расположенных на больших расстояниях от свободной поверхности, снижается количество микроочагов разрушения и меняется их характерный вид — уменьшается количество кольцевых зон, вплоть до одиночных “розеток”. Эти изменения связаны со снижением напряжений за счет затухания, возрастающего при нагрузках  $\sim 200$  МПа до значений  $\sim 0.9$  см $^{-1}$ .

На рис.2, *а*, *б*, *в* представлены аналогичные данные для случая знакопеременной нагрузки. Наблюдается уменьшение пространственного периода плоскостей откола и общей глубины зоны разрушения (рис.2, *б*) с уменьшением длительности осцилляций нагрузки и ее общей длительности (рис.2, *а*) по сравнению со случаем пульсирующей нагрузки.

Обнаружено существенное различие характера микроразрушений в первых плоскостях откола для двух представленных случаев нагружения. На рис.2, *в* приведен характерный вид микроочагов разрушения для случая знакопеременной нагрузки. Диаметр микротрещины оказался равен максимальному диаметру, на который продвинулась микротрещина при пульсирующей нагрузке. Оценка скорости в этом случае, в предположении, что трещина обра-

зовалась за время лишь первой фазы растяжения, дает значение  $\approx 4400$  м/с. Однако такое значение скорости противоречит как существующим моделям разрушения, так и экспериментальным результатам [3]. Остается предположить, что при этих временных параметрах нагружения образовавшаяся в первом цикле трещина двигалась и во время фаз сжатия в последующих двух циклах сжатие-растяжение. В этом случае оценка скорости развития трещины дает значение  $\approx 750$  м/с, совпадающее с значением средней скорости для случая пульсирующей нагрузки.

По-видимому, уменьшение длительности циклов и увеличение скоростей нагрузки и разгрузки, реализованное в случае знакопеременного нагружения, приводит к изменению соотношений времен нагружения и релаксации локальных внутренних напряжений и, как следствие этого, к квазирезонансному механизму развития микротрещин.

Следует отметить, что полученное в наших исследованиях значение критического напряжения откола, равное 120 МПа, значительно ниже приведенных в работе [1] значений 160–180 МПа, полученных для монокристаллов NaCl при нагружении одиночным импульсом длительностью  $10^{-7}$  с. Наблюдаемое нами снижение динамической прочности, по-видимому, обусловлено возникновением циклических напряжений в плоскостях откола. Снижение прочности при циклических нагружениях хорошо изучено при квазистатических испытаниях материалов и построена достаточно убедительная модель этого явления [4]. К сожалению, при длительностях нагружения, меньших  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  с, когда определяющим становится волновой характер нагружения, экспериментальные исследования этого явления отсутствуют. В этой связи приведенные результаты в настоящее время вряд ли могут быть однозначно интерпретированы в рамках известных моделей.

Таким образом, проведенные исследования динамической прочности при субмикросекундных ударных нагрузках обнаруживают целый ряд новых эффектов. Это, на наш взгляд, обусловлено тем, что в этом диапазоне длительностей характерные времена изменения ударных нагрузок становятся соизмеримы с временами релаксации локальных полей внутренних напряжений в материалах. Такие исследования в совокупности с электронной микроскопией структуры могут дать возможность получения количественных данных о временах релаксации локальных полей внутренних напряжений различных масштабных уровней.

#### Список литературы

- [1] Блинов В.И., Геринг Г.И., Ковиччак В.С. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 19. С. 1194–1197.
- [2] Белендир Э.Н. Дисс. на соиск. уч. ст. к.ф.м.н. Л.: ФТИ, 1990. 171 с.
- [3] Финкель В.М. Физика разрушения. М.: Металлургия, 1970. 376 с.
- [4] Степанов В.А., Песчанская Н.Н., Шнейцман В.В. Прочность и релаксационные явления в твердых телах. Л.: Наука, 1984. 245 с.

Поступило в Редакцию  
16 апреля 1993 г.