

05.1

Скорость трещин при сверхбыстром нагружении

© В.А. Морозов¹, Г.Г. Савенков², Б.К. Барахтин³,
А.А. Лукин¹, Ю.Ф. Гунько¹, К.А. Рудомёткин⁴

¹ Санкт-Петербургский государственный университет

² Специальное конструкторско-технологическое бюро „Технолог“, Санкт-Петербург

³ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

⁴ Открытое акционерное общество „Водтрансприбор“, Санкт-Петербург
E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Поступило в Редакцию 13 марта 2014 г.

Представлены результаты исследований скоростей трещин при наносекундных импульсах нагружения в образцах из алюминиевой фольги. Обнаружено, что скорости трещин близки и даже превосходят значения продольной скорости звука в алюминии. Предполагается, что такие результаты связаны с сильной неравновесностью процесса возмущения среды, при которой физические константы материала теряют свой смысл.

Специфика сверхбыстрого нагружения, например очень короткими лазерными или электронными импульсами [1,2], которое происходит в течение нескольких десятков наносекунд ($t_l \leq 100$ ns), состоит в том, что процессы, происходящие внутри очень узкой зоны нагружения, являются существенно неравновесными и нелокальными, не говоря уже о нестационарности процесса.

В этом случае физические константы материала, такие как параметры Ламе и модуль Юнга (или скорость звука), являются не постоянными характеристиками, а существенно зависят от масштаба системы [1–3]. (Под системой понимается совокупность образца, который определяется своими геометрическими параметрами, и нагружающего импульса, характеризующегося (для нашего случая) своей длительностью). Скорость звука (определяемая по формулам линейной теории упругости) при этом теряет свой первоначальный смысл и становится, по сути, скоростью обмена информацией между носителями дефор-

мации (или скоростью распространения возмущений) внутри зоны нагружения, размеры которой не превышают $150 \mu\text{m}$ [1,2]. Имеющиеся экспериментальные данные показывают, что в алюминии эта скорость может превышать классическую скорость звука [1] почти в два раза (в зависимости от величины приложенной нагрузки). Полагают, что такие результаты экспериментов связаны в первую очередь с тем, что характерные длины волн ударных импульсов становятся соизмеримыми с масштабами микроструктуры материалов и даже с масштабами самих образцов [3]. В этой же работе предлагается объяснение сверхзвуковых скоростей распространения возмущений, обусловленных, по мнению авторов, нелинейной реакцией „перевозбужденных“ мод колебательного спектра.

Рассмотрим (качественно), как могут влиять вышеописанные условия нагружения на скорость роста трещины в очень тонких образцах, например, из фольги. Как известно [4], движение трещины связано с эстафетным (последовательным) разрывом межатомных связей в вершине трещины. При не слишком высоких скоростях деформирования (длительность импульса нагружения лежит, по крайней мере, в микросекундном диапазоне) скорость движения трещины ограничена скоростью обмена информацией между атомами, которая в этом случае не превышает скорости звука (на практике скорость трещины еще ниже и не превышает скорости волны Рэлея [5]). При наносекундных импульсах нагружения скорость трещины будет так же определяться скоростью обмена информацией, которая, как было сказано выше, в узкой зоне превышает скорость звука почти в два раза (для алюминия). В этом случае возможны два сценария развития трещины. Первый связан с эстафетным разрывом связей, когда осуществляется обмен информацией между атомами, но в этом случае скорость трещины должна быть существенно выше, чем при традиционных условиях нагружения.

Второй вариант развития трещины связан с отсутствием обмена информацией между атомами. Тогда разрыв связей между ними происходит независимо друг от друга и без взаимного влияния. В этом случае возможно два подвида движения трещины. Первый подвид может определяться не последовательным разрывом межатомных связей, а каскадным, и в этом случае трещина будет развиваться со сверхзвуковой скоростью в обычном понимании этого термина. Вторым подвидом движения трещины при безындформационном обмене традиционен: по-

следовательный разрыв межатомных связей. И в этом случае скорость движения трещины может быть существенно ниже, чем даже при микросекундной длительности импульса нагружения.

Целью настоящей работы является попытка выявления вида движения трещины и определение ее скорости в наносекундном диапазоне длительности импульса нагружки.

В качестве материала исследования была выбрана конденсаторная алюминиевая фольга толщиной $b = 15 \mu\text{m}$ (ГОСТ 25905-82) с пределом упругости $\sigma_e = 60 \text{ МПа}$ и пределом прочности $\sigma_b = 100 \text{ МПа}$.

В данной работе скорости трещин были определены на кольцевых образцах с надрезом глубиной 0.8 mm из тонких алюминиевых фольг толщиной $15 \mu\text{m}$, диаметром 76 mm и шириной 1.7 mm . Эксперименты по разрушению образцов осуществлялись с использованием магнитно-импульсного метода [6], модифицированного с целью получения коротких (наносекундных) импульсов нагружения. Скорость деформации в кольцах находилась в диапазоне $10^6 - 10^7 \text{ s}^{-1}$. Схема нагружения кольцевых образцов приведена в [6].

Усовершенствование применявшихся ранее схем нагружения [5,6] заключается в том, что формирующая коаксиальная линия на конце замыкается на резистивное сопротивление $R = 12.5 \Omega$, последовательно с которым включается один виток катушки диаметром 75 mm , выполненный из медного провода диаметром 1 mm . Тем самым достигается короткий импульсный ток через виток катушки. Коаксиально с витком катушки расположен кольцевой образец. Ток, проходящий по витку катушки, наводит в кольцевом образце индукционный ток. Взаимодействие этих токов порождает силу отталкивания между витком и образцом, в результате чего формируется распределенная нагрузка q , действующая на внутреннюю поверхность кольца. Эта нагрузка порождает растягивающее окружное напряжение σ .

Ток в витке измеряется поясом Роговского и отображается на экране цифрового осциллографа, информация с которого записывается на электронном носителе. При разрыве кольца в силу закона Ленца появляется электрическая искра, которая позволяет с помощью фотодиода фиксировать момент разрушения образца. На рис. 1 изображены осциллограмма тока (I) через виток катушки и сигнал с фотодиода (2), фиксирующего момент разрыва алюминиевых образцов.

Сигнал на фотодиоде появляется через $\sim 10 \text{ ns}$ после начала процесса, выходит на плато и через $\sim 100 \text{ ns}$ начинает уходить (уменьшаться).

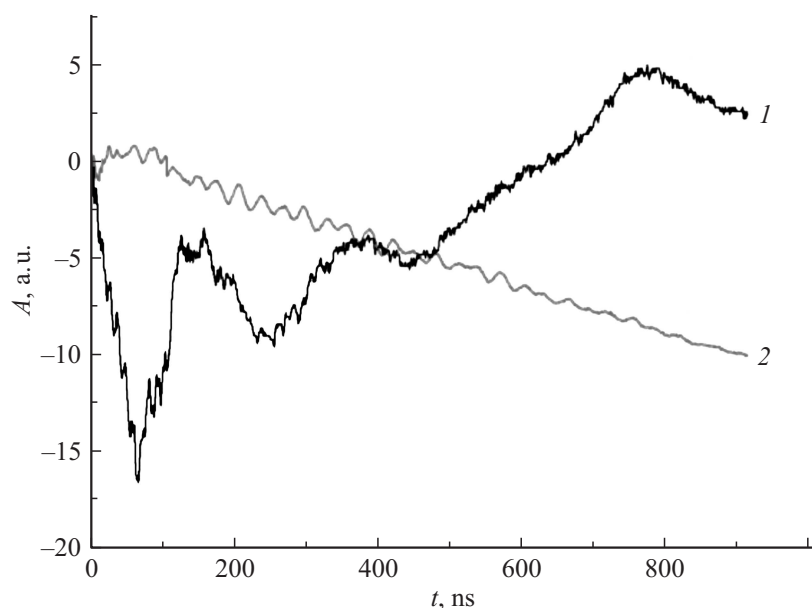


Рис. 1. Оциллограмма тока через виток катушки (1) и сигнал с фотодиода (2).

По моменту резкого изменения сигнала с фотодиода определялось время до разрушения образца Δt . Отметим, что в рамках масштаба времени, при котором был зафиксирован процесс, уход сигнала выглядит как плавный, но это не более чем геометрический эффект данного изображения.

Внешний вид выходного устройства экспериментальной установки приведен на рис. 4 работы [6]. Микроструктурные исследования разрушенных образцов проводились на растровом электронном микроскопе SEM 535.

Поскольку процесс распространения трещины в металлах, а тем более трещины, распространяющейся в условиях сверхбыстрых нагрузок, характеризуется сложными явлениями, то непосредственное измерение ее скорости в непрозрачных материалах затруднено. В частности, не ясно, как фиксировать время задержки старта трещины (время подготовки к разрушению, инкубационный период, структурное время

и т. д.) t_{inc} . Поскольку в нашем случае измеренное время до разрушения образца Δt составляет ~ 100 ns, время t_{inc} должно иметь, по крайней мере, тот же порядок или быть на один–два порядка ниже его [7]. Это время не более 10 ns, поскольку приблизительно через этот промежуток появляется сигнал на фотодиоде. Поэтому было принято допущение, что инкубационное время много меньше времени разрушения образца $t_{inc} \ll \Delta t$. Тогда скорость трещины (оценка по минимуму) равна

$$V = \frac{\Delta h}{\Delta t}, \quad (1)$$

где $\Delta h = H - h$, H — ширина кольца, h — глубина надреза.

Были получены следующие значения скоростей трещин $V = (6800 \pm 1000)$ m/s. При этом нижнее значение близко к скорости распространения упругих волн в полупространстве для алюминия (6260 m/s), а верхнее превышает ее на 25%. Столь высокие значения скоростей свидетельствуют о том, что механизм распространения трещины связан либо со сверхвысокой скоростью обмена информацией, либо с каскадным разрывом межатомных связей. Отметим также, что нижнее значение скорости трещины близко к скорости волны Рэлея (~ 5700 m/s) при двукратном превышении продольной скорости звука, измеренной в [1].

Чтобы исключить подозрение на электрический взрыв фольг (как возможного механизма разрушения колец), были проведены микроструктурные исследования разрушенных образцов. Рельеф излома разрушенных колец представлен на рис. 2.

На рис. 2 четко видны: полоса локализованного сдвига шириной $6 \mu\text{m}$, переходящая в предельно упрочненные фрагменты размерами $2 \times 4 \mu\text{m}$ (рис. 2, *a*), завершение деформации локализованным сдвигом вследствие потери механической устойчивости (рис. 2, *b*) и „оконечность“ акта разрушения в различной форме (рис. 2, *c, d*). В единичных случаях эти оконечности представлены в виде сферических участков диаметром от 3 до $6 \mu\text{m}$ (показаны стрелками), которые могут являться косвенными признаками оплавления при проскакивании искры.

Оконечные участки декорируют разделение мезопотоков сдвигов на отдельные каналы пластического течения, вероятно,двигающиеся с разной скоростью, с последующим преобразованием в некоторых случаях в вихри винтовой морфологии (рис. 2, *d*). Можно полагать, что

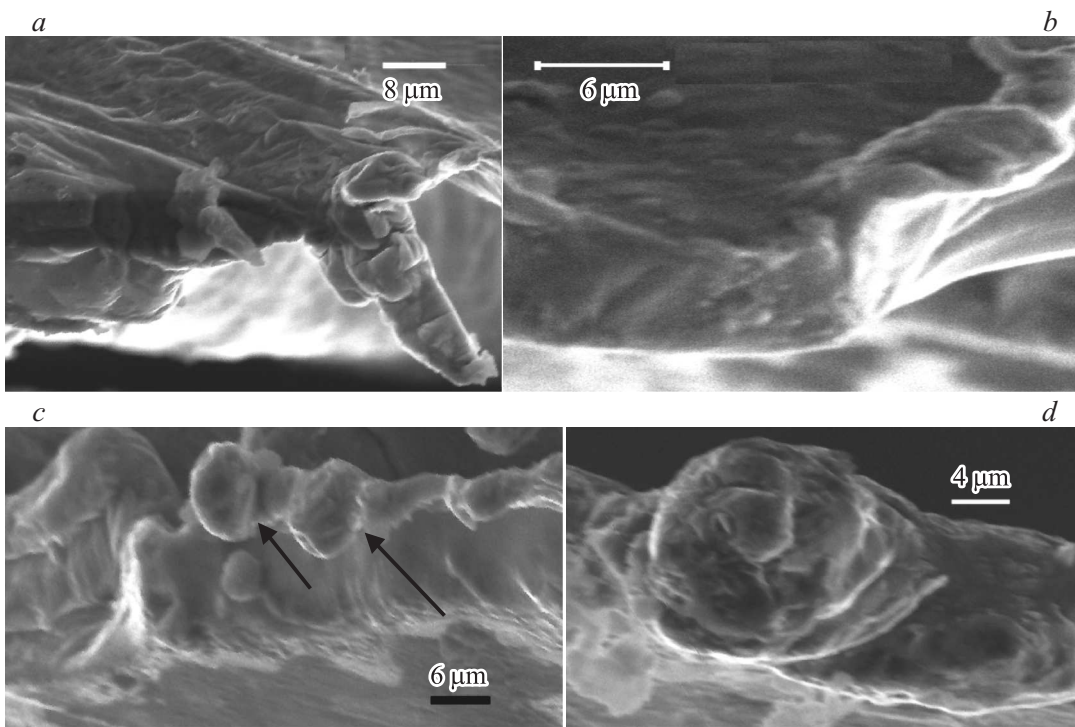


Рис. 2. Структура разрушенной зоны кольца (*a–c*), *d* — увеличенное изображение фрагмента *c*.

винтовая морфология вершины сферического участка косвенно указывает на акты кооперативного массопереноса винтовыми дислокациями.

Таким образом, можно констатировать, что участков, связанных с массовым плавлением материала, что было бы характерно для электрического взрыва фольг, не обнаружено.

На основании полученных результатов микроструктурных исследований можно сделать заключение, что произошел механический разрыв образцов со сверхвысокой скоростью (близкой к продольной скорости звука и даже превышающей ее). Механизм такого быстрого распространения трещины остается открытым.

Список литературы

- [1] Судьенков Ю.В. Проблемы динамических процессов в гетерогенных средах. Калинин: Изд-во КГУ, 1987. С. 120–126.
- [2] Морозов В.А. // Труды XIII Международной школы по моделям механики сплошной среды. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996. С. 191–200.
- [3] Судьенков Ю.В., Павлишин А.И. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 12. С. 14–20.
- [4] Красовский А.Я., Пловинарж Г. // Проблемы прочности. 1994. № 1. С. 18–30.
- [5] Морозов В.А., Савенков Г.Г. // ПМТФ. 2013. Т. 54. № 1. С. 163–169.
- [6] Морозов В.А., Петров Ю.В., Лукин А.А., Кац В.М. и др. // ЖТФ. 2011. Т. 81. В. 6. С. 51–56.
- [7] Петров Ю.В. // Прочность и разрушение материалов и конструкций (Исследования по упругости и пластичности. В. 18). СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. С. 196–210.