

ротрещин. Наблюдаемая в стали Ст. 3 (см. фиг. 6) зона интенсивного двойникования феррита обусловлена обратимым фазовым переходом α -железа в ϵ -фазу при давлениях свыше 13 ГПа. Зарождение откольного разрушения в стали Ст. 3 в виде микротрещин имеет хрупкий характер, а развитие макротрещины происходит уже более вязким образом, что наблюдалось также в [7].

Результаты измерения твердости указывают в общем-то на довольно незначительный эффект ударно-волнового упрочнения исследуемых металлов. Например, для меди при давлении ~ 15 ГПа, близком к давлению у поверхности нагружения, согласно анализу большого числа экспериментальных работ, выполненному в [8], твердость увеличивается до 0,9—1,0 ГПа, тогда как в данной работе только до 0,7 ГПа. Подобные различия наблюдаются и для других металлов. Объяснением, по-видимому, может служить тот факт, что в данной работе массивные образцы нагружались взрывом тонкого листового заряда ВВ, являющегося относительно низкоинтенсивным и локализованным источником нагружения. Поэтому деформации, обусловленные осадкой и изгибом образцов, были сведены к минимуму, а их вклад во взрывное упрочнение является, по-видимому, весьма существенным.

Поступила 5 III 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Ментешов Е. В., Ратников В. П. и др. Действие взрыва листового заряда ВВ на алюминиевую пластину.— ФГВ, 1967, № 2.
2. Рыбаков А. П., Ментешов Е. В., Шавков В. П. Действие взрыва листового заряда ВВ на металлические пластины.— ФГВ, 1968, № 1.
3. Голубев В. К., Новиков С. А., Сеницына Л. М. О разрушении материалов при нагружении взрывом листового заряда ВВ.— ПМТФ, 1981, № 2.
4. Голубев В. К., Новиков С. А., Сеницына Л. М. Способ испытания материалов на разрыв.— Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, 1981, № 34.
5. Голубев В. К., Новиков С. А. и др. Влияние температуры на критические условия откольного разрушения металлов.— ПМТФ, 1980, № 4.
6. Barbee T. W., Seaman L. et al. Dynamic fracture criteria for ductile and brittle metals.— J. Materials, 1972, vol. 7, N 3.
7. Голубев В. К., Новиков С. А. и др. О механизмах откольного разрушения сталей Ст. 3 и 12Х18Н10Т в температурном диапазоне — 196... 800°C.— Проблемы прочности, 1981, № 5.
8. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.

УДК 620.178.7 + 620.171.3 + 539.4.019

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ РАЗРУШАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОТКОЛЕ В МЕДИ, НИКЕЛЕ И ТИТАНЕ

С. А. Новиков, А. П. Погорелов, В. А. Сеницын
(Москва)

В большинстве экспериментальных исследований разрушающих напряжений при отколе (откольной прочности) $\sigma_{отк}$ характерное время нагружения τ составляло $\sim 10^{-6}$ с. В ряде работ [1, 2] отмечается, что при действии импульсов такой длительности величина откольной прочности практически не зависит от τ . Делается заключение [3, 4], что долговечность $\tau \approx 10^{-6}$ с является предельным значением времени действия нагрузки, ниже которого не происходит откольного разрушения.

Известно, что в диапазоне долговечности 10^{-4} — 10^{-6} с прочность материалов σ значительно превышает соответствующие величины, вычисляемые по уравнению

$$(1) \quad \tau = \tau_0 \exp[(u_0 - \gamma\sigma)/kT],$$

содержащего постоянную Больцмана k и постоянные параметры материала: τ_0 , u_0 , γ . Наклон динамической ветви временной зависимости прочности в полулогарифмических координатах $\lg \tau$ — σ значительно меньше наклона квазистатической. Значение

долговечности $\tau \cong 10^{-4}$ с, начиная с которого не выполняется зависимость (1), получено условно при пересечении прямых, экстраполирующих в указанных координатах квазистатическую и динамическую ветви. Экспериментальные точки на динамической прямой в интервале 10^{-4} — 10^{-5} с нам не известны. Отклонение от (1) при $\tau < 10^{-4}$ с связывают, например, с тем, что в области малых времен становится существенным время атермического роста трещин, скорость которых ограничена скоростью звука [2].

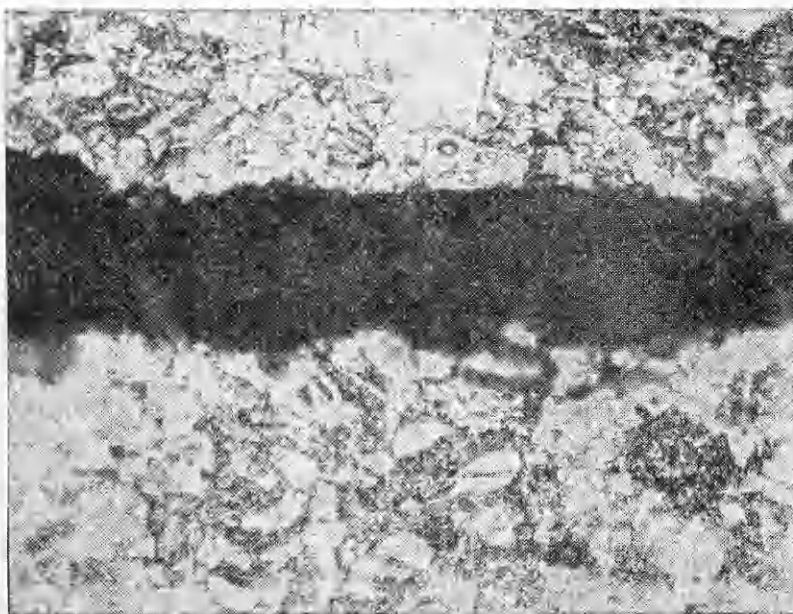
Для описания временной прочности при кратковременных импульсах растяжения и, в частности, для более объективного построения динамической ветви долговечности материалов большой интерес представляют исследования откольных разрушений в субмикросекундной области нагружения ($\tau < 10^{-6}$ с).

В [5] представлены результаты экспериментов с образцами из меди, разрушаемыми ударом тонких медных фольг. Время нагружения в экспериментах изменялось в интервале $5 \cdot 10^{-8}$ — 10^{-6} с. Показано, что в этом интервале $\sigma_{отк}$ для меди гораздо слабее, чем по (1), но все же заметно линейно увеличивается с уменьшением $\lg \tau$.

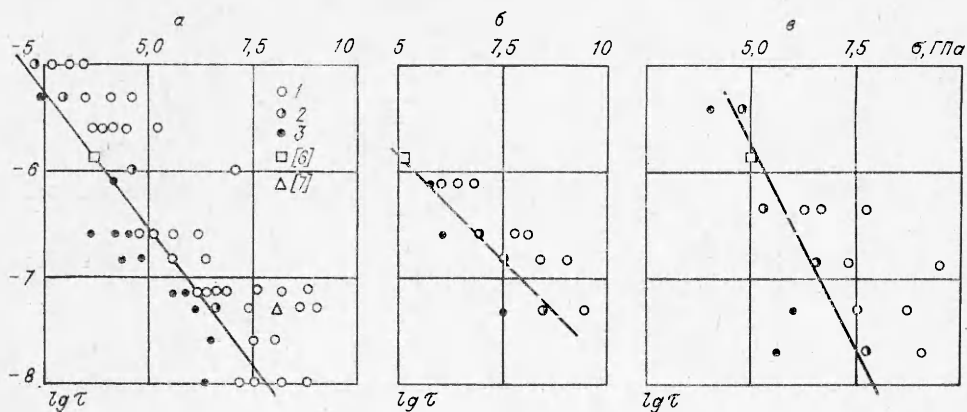
В данной работе аналогичные исследования выполнены для образцов из титана и никеля в диапазоне 10^{-6} — 10^{-8} с. Зависимость для меди дополнена экспериментальными точками для $\tau = 10^{-5}$, т. е. в неисследованной ранее области.

В экспериментах использовались образцы из меди М1, никеля НП2 и титана ВТ14 в состоянии поставки, имеющие форму дисков диаметром от 40 до 150 мм и толщиной от 0,05 до 60 мм. Пластины-ударники изготавливались из того же материала, что и образцы, и имели толщину в ~ 3 раза меньше толщины образца (от 0,017 до 20 мм) для того, чтобы догоняющая волна разгрузки не влияла на процесс разрушения. Опыты с ударниками толщиной более 5 мм проводились при атмосферном давлении; менее 5 мм — в вакуумной камере при остаточном давлении не более 5×10^2 Па. Разгон ударников до требуемой скорости осуществлялся скользящей детонацией тонкого слоя ВВ соответствующей толщины. Наличие или отсутствие откольного разрушения фиксировалось визуально по отслоению отколовшегося материала или по наличию макротрещин после разрезки образца.

На фиг. 1 представлена микрофотография медного образца в зоне магистральной трещины, показывающая весьма гладкую поверхность разрушения при взаимодействии волн разрежения в зоне откола при ударе по образцу толщиной 0,28 мм, фольги толщиной 0,4 мм (увелич. в 500 раз). За величину откольной прочности принималось давление на фронте ударной волны, приводящей к появлению откола. Давление находилось по измеренной в опыте скорости ударника и по известной ударной адиабате ис-



Ф и г. 1



Ф и г. 2

следуемых материалов. Характерное время действия импульса $\tau = 2\delta/c$, где δ — толщина ударника; c — скорость звука.

Таким образом, время действия нагрузки изменялось в проведенных опытах на три порядка.

Полученные экспериментальные результаты представлены на фиг. 2, *a—c* в полулогарифмических координатах $\sigma - \lg \tau$ (для меди, никеля и титана соответственно), где 1 — откольное разрушение образца, 2 — зарождение откола, 3 — отсутствие макротрещин. На всех графиках приведены экспериментальные точки из работы [6], соответствующие $\tau = 1,3 \cdot 10^{-6}$ с, а также точка для меди из [7].

Экспериментальные зависимости, проведенные по точкам, характеризующим зарождение откола, хорошо описываются прямыми линиями. Они разделяют плоскость $\sigma - \lg \tau$ на область, в которой происходит образование откола (правее прямой), и область, в которой разрушение отсутствует. Экстраполяция всех трех прямых к $\tau \approx 5 \cdot 10^{-13}$ с дает значения σ , близкие к теоретической прочности $\sigma_T = (1/6 - 1/10)E$, где E — модуль Юнга.

В связи с этим отметим, что при экстраполяции уравнения (1) к $\tau \approx 5 \cdot 10^{-13}$ с получаемое значение σ значительно меньше величины теоретической прочности. Как отмечалось в [8], для того чтобы при пересечении изотермы $\sigma = \sigma(\lg \tau)$ с прямой $\tau \approx 5 \cdot 10^{-13}$ с получить значение σ_T , необходимо, чтобы параметр γ в (1), пропорциональный локальной концентрации напряжений в источнике зарождения разрушения [9], являлся убывающей функцией τ . Его оценка по результатам настоящей работы для меди, например, дает значение $\gamma \approx 0,1$ ккал·мм²/моль·кг при $\tau = 10^{-8}$ с; для квазистатической ветви долговечности $\gamma = 2,3$ ккал·мм²/моль·кг. Таким образом, полученные в работе результаты согласуются со схемой, представленной в [8].

Столь значительное уменьшение γ свидетельствует о сокращении объема источников зарождения разрушения в процессе откольного разрушения в субмикросекундном диапазоне с уменьшением времени действия нагрузки.

Это объясняется тем, что вследствие ограниченности скорости трещины ($v < c$) для смыкания трещин при уменьшении времени действия нагрузки должно уменьшаться расстояние между источниками. В пределе при $\tau \approx 5 \cdot 10^{-13}$ с расстояние между источниками становится равным межатомному, а величина разрушающего напряжения становится равной теоретической прочности. Приведенные результаты описываются зависимостью

$$\tau = Ke^{-(A\sigma+B)},$$

где $K = 1$ с; коэффициенты A и B для исследованных металлов приведены в таблице.

Металл	A	B
Cu	0,141	7,88
Ti	0,168	5,05
Ni	0,091	9,1

Тот факт, что для всех трех исследованных металлов зависимости откольной прочности от времени действия нагрузки в исследованном диапазоне хорошо описываются в полулוגарифмических координатах прямыми, проведенными через значения теоретической прочности при $\tau = 10^{-12}$ — 10^{-13} с, позволяет предположить, что такая закономерность сохраняется и для других металлов. Это дает возможность прогнозировать их поведение в субмикросекундном диапазоне времен нагружения.

Поступила 26 IV 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Златин Н. А., Мочалов С. М. и др. Временные закономерности процесса разрушения металлов при интенсивных нагрузках.— ФТТ, 1974, т. 16, с. 1752.
2. Златин Н. А., Мочалов С. М. и др. Временная зависимость прочности металлов при долговечностях микросекундного диапазона.— ФТТ, 1975, т. 17, с. 2599.
3. Евсеенко Е. П., Зильбербранд Е. Л. и др. Динамическая ветвь временной зависимости прочности полиметилметакрилата.— Письма в ЖТФ, 1977, т. 3, вып. 14.
4. Воловец П. Д., Златин Н. А. и др. Влияние температуры на кинетику разрушения полиметилметакрилата при долговечности микросекундного диапазона.— Письма в ЖТФ, 1980, т. 6, вып. 11.
5. Глушак Б. Л., Новиков С. А. и др. Временная зависимость откольной прочности меди в субмикросекундном диапазоне.— ДАН СССР, 1981, т. 259, № 4.
6. Голубев В. К., Новиков С. А. и др. Влияние температуры на критические условия откольного разрушения металлов.— ПМТФ, 1980, № 4.
7. Тарасов Ю. И. Исследование зависимости времени разрушения от растягивающей нагрузки для стали и меди.— ДАН СССР, 1965, т. 165, № 2.
8. Фадеенко Ю. И. Временные критерии разрушения взрывом.— ПМТФ, 1977, № 6.
9. Журков С. Н. К вопросу о физической основе прочности.— ФТТ, 1980, т. 22, вып. 11.

УДК 539.3

О РАСКРЫТИИ РАЗРЕЗА В УПРУГОЙ ПЛОСКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ

И. В. Симонов

(Москва)

Рассмотрена задача об установившемся движении щели конечной длины вдоль разреза в упругой плоскости (диапазон скоростей — дозвуковой). Она сводится к обобщенной задаче Гильберта, решение которой имеет разный набор особенностей в до- и сверхрэлееском режимах движения. Размер области отрыва и положение щели относительно нагрузки неизвестны заранее и определяются в ходе решения из дополнительных физических условий. Это, во-первых, обуславливает нелинейный характер задачи, во-вторых, существенно отличает данное рассмотрение от похожей по постановке задачи Иоффе [1] из теории трещин. С целью сопоставления приведено решение для трещины конечной длины.

1. В упругой плоскости с разрезом вдоль оси x_1 действуют однородное сжимающее напряжение $-\sigma_\infty$ ($\sigma_\infty > 0$) и динамическая нагрузка $-\sigma(x_1, t)$, симметрично приложенная по нормали к берегам разреза, стационарная в движущейся системе координат $x = x_1 - ct$, $y = x_2$ (t — время), вызывающая раскрытие разреза на участке $L = \{|x| < d\}$ (фиг. 1). Оправданию выбранной схемы стационарного движения односвязной и тонкой щели в разрезанном материале (в рамках линейной теории упругости) и связанными с этим вопросом ограничениями на класс допускаемых нагрузок уделено внимание ниже. Пока же постулируем, что $\sigma(x)$ — геллеровского класса [2] неотрицательная финитная функция с носителем $L_0 = \{\delta_1 < x < \delta_2\} \subset L$.

В силу принципа симметрии задачу рассмотрим только в верхней полуплоскости. Будем искать установившееся поле возмущенных скоростей $u_i(x, y)$ и поле возмущенных напряжений $c_{ij}(x, y)$ ($i, j = 1, 2$) в области $D = \{|x| < \infty, y > 0\}$, а также неизвестные заранее числовые параметры d и δ_1 , фиксирующие длину раскрытия и расположение нагрузки относи-