

## О КИНЕТИКЕ РОСТА ТРЕЩИН ПРИ РАЗРУШЕНИИ МЕДНОЙ ФОЛЬГИ

В. Ф. Лозовская, П. О. Пашков, А. В. Серебряков

(Новосибирск)

Целью работы являлось получение экспериментальных сведений о кинетике разрушения металлов с гранецентрированной кубической решеткой. В качестве величины, характеризующей кинетику разрушения, была принята скорость распространения трещины в плоских тонких образцах с односторонним надрезом при испытании их на растяжение.

Исследовалось изменение этой величины в зависимости от различных условий — скорости деформирования (относительной скорости раздвижения захватов машины), состояния материала и геометрических размеров образца.

**1. Описание экспериментов.** В качестве материала для исследования была выбрана медная фольга марки М2, толщиной 0.1 мм. Исследование проводилось на материале в двух крайних состояниях: исходном, сильно наклепанном, в котором остаточная деформация всего образца при нагружении и последующем разрушении практически равнялась нулю, и хорошо отожженном (700°), обладающем большой пластичностью.

Определение скорости распространения трещины производилось при испытании образцов растяжением на машине ФМ-100 (усилие до 100 кг), диапазон скоростей раздвижения захватов которой был значительно расширен за счет специально изготовленного редуктора и жесткого крепления маятника машины. Ширина образца была 30 мм, глубина надреза 3 мм, радиус закругления дна надреза 0.5 мм.

Для уменьшения влияния перекоса образцов на скорость разрушения было осуществлено шарнирное крепление захватов машины.

Скорость разрушения образцов, изготовленных из отожженного материала, определялась по участку диаграммы нагружения (сила — время), соответствующему разрушению. Диаграмма нагружения регистрировалась при помощи осциллографа и датчиков электрического сопротивления, наклеиваемых на специальный упругий удлинитель захвата машины. Эксперимент и обработка данных в этом случае в основном не отличались от описанных в работе [1].

Для определения скорости разрушения образцов наклепанного металла использовалась и другая методика. На образец наклеивались четыре изолированные медные проволочки диаметром 0.06 мм. Для полимеризации клея образцы подвергались специальной термической обработке — нагрев до 120° и выдержка при этой температуре 1 ч.

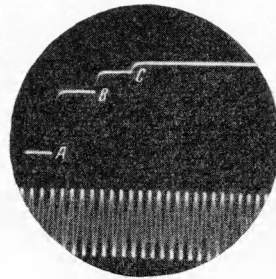
Разрывом ближайшей к надрезу проволочки достигался запуск осциллографа (типа ОК-17 м). Разрыв второй, третьей и четвертой проволочек, наклеенных соответственно на расстояниях 10, 15 и 20 мм от надреза, включенных в специальную схему, приводил к появлению ступенек А, В и С на осциллограмме (фиг. 1). По осциллограмме определялась средняя скорость  $V$  разрушения на участках АВ, ВС и АС. На графиках нанесена средняя скорость на участке АС.

Наблюдалось хорошее совпадение результатов, полученных этими способами. Во всех случаях брались средние значения из 5—8 измерений. При скоростях разрушения до 20—25 м/сек была осуществлена проверка результатов измерения скоростей разрушения при помощи скоростной кинокамеры «Zeitlupa 1».

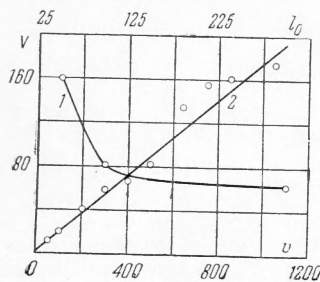
Максимальная скорость съемки была 6000 кадров в секунду. И в этом случае наблюдалось хорошее совпадение с результатами, полученными двумя другими способами. Съемка разрушения наклепанного материала производилась только на образцах, длиной 100 мм.

**2. Результаты испытаний.** Длина образца бралась равной 100 мм. Скорость разрушения наклепанных образцов  $V$  м/сек не зависит от скорости раздвижения захватов разрывной машины для исследованного диапазона скоростей машины  $v$  (от 2 до 1050 мм/мин), как это видно из приведенных здесь результатов.

$v$ , мм / мин =	2	10	20	50	100	200	300	400	500	1050
$V$ , м / сек =	8	10.9	11.2	10.7	10.5	10.9	11.2	12.2	11.6	11.2



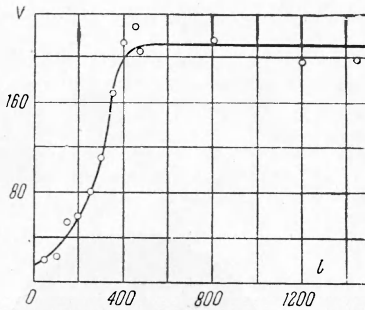
Фиг. 1



Фиг. 2

Скорость разрушения отожженных образцов возрастает с увеличением скорости раздвижения захватов машины (фиг. 2). В последнем случае по абсолютному значению скорости распространения трещин значительно меньше (на 2—4 порядка), чем это наблюдалось для наклепанных образцов.

Исследование зависимости скорости разрушения от длины образцов из наклепанного материала производилось на медной фольге М2 и М1 одинаковой толщины (0.1 мм). На фиг. 3 нанесены результаты, полученные на медной фольге М1. На меди марки М2 были получены аналогичные результаты.



Фиг. 3

Как видно из фиг. 3, скорость разрушения образцов наклепанной меди увеличивается с увеличением длины образца до 450 мм. При дальнейшем увеличении длины образца скорость разрушения остается постоянной. На образцах из отожженной меди (фиг. 2) скорость распространения трещины, наоборот, уменьшается с увеличением длины образца.

Разрушение образцов из наклепанного материала носит самопроизвольный характер, т. е. не может быть остановлено при остановке машины.

Проведенные опыты позволили также получить представление об изменении величины скорости трещины по ширине разрушаемого образца. В результате киносъемки было установлено, что скорость распространения трещины на всех отожженных образцах и на наклепанных образ-

цах длиной 100 мм постоянна на большей части ширины образца (фиг. 4). В начале разрушения имеется небольшой участок разгона трещины, после чего трещина распространяется с постоянной скоростью до противоположной кромки образца. При подходе к кромке образца скорость трещины несколько увеличивается.

На наклепанных образцах длиной более 100 мм измерялась средняя скорость разрушения на участках АВ и ВС (фиг. 1). Результаты измерения изображены на фиг. 5, где по осям отложены скорости разрушения  $V_{AB}$  и  $V_{BC}$  м/сек и через начало координат проведена прямая под углом 45°. Из фигуры видно, что и в этом случае, в пределах погрешности эксперимента, скорость распространения трещины можно считать постоянной, по крайней мере на участке длиной 10 мм, расположенном в средней части образца по его ширине.

3. Анализ результатов. Полученные результаты можно качественно объяснить, исходя из энергетических соображений. При разрушении по приведенной схеме и при постоянной по ширине образца скорости разрушения в каждую единицу времени соблюдается соотношение

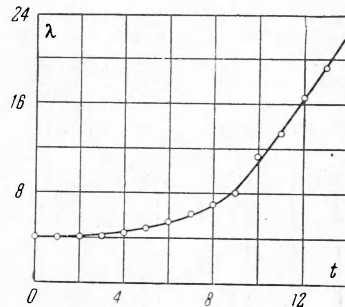
$$A + U - P - K = 2\gamma'V \quad (3.1)$$

Здесь  $A$  — работа, совершаемая машиной,  $U$  — уменьшение упругой энергии, накопленной в образце,  $P$  — энергия, расходуемая на пластическую деформацию образца,  $\gamma'$  — эффективная поверхностная энергия, отнесенная к единице длины трещины (включает в себя работу пластической деформации слоя материала, расположенного на поверхностях, образованных в результате разъединения образца),  $K$  — кинетическая энергия образца,  $V$  — скорость распространения трещины.

Энергетические величины в левой части этого соотношения отнесены к единице времени.

В наклепанном материале скорость распространения трещины во много раз больше скорости раздвижения захватов. Поэтому работой машины в исследованном интервале скоростей деформирования можно пренебречь по сравнению с освобождаемой в результате разгрузки образца упругой энергией. Энергия, расходуемая на пластическую деформацию образца, в этом случае тоже мала. Получается качественный вывод, что скорость трещины в наклепанном материале не зависит от скорости деформирования, что и наблюдалось.

Незначительностью величины работы машины за время разрушения образцов из наклепанного материала по сравнению с освобождаемой при этом упругой энергией объясняется и самопроизвольный характер разрушения. Подобное разрушение может происходить со скоростями, сравнимыми со скоростью звука в данном материале, поэтому возникает возможность катастрофических разрушений, которые действительно наблюдались. Примером могут служить разрушения американских кораблей типа Либерти [2, 3].



Фиг. 4

С увеличением длины образца будет возрастать накапливаемая в нем энергия упругой деформации, что в наклепанном материале приводит к увеличению скорости распространения трещины (фиг. 3). Следует отметить, что этот вывод хорошо согласуется с результатами ряда работ [4, 5, 6], в которых показано, что запас упругой энергии в системе образец—машина оказывает существенное влияние на процесс разрушения в особенности на кинетику его развития.

На образцах из отожженной меди скорости разрушения примерно на три порядка ниже, чем на наклепанном материале. В выражении (3.1) в этом случае можно пренебречь освобождаемой упругой энергией по сравнению с работой, совершаемой машиной, и энергией  $P$ , расходуемой на пластическую деформацию образца. С увеличением скорости раздвижения захватов увеличивается работа  $A$ , совершаемая машиной за единицу времени, а следовательно, и скорость разрушения (фиг. 2).

С увеличением длины образца из отожженного металла увеличивается, при прочих равных условиях, энергия, расходуемая на пластическую деформацию всего образца в единицу времени, что и приводит к наблюдаемому уменьшению скорости трещины (фиг. 2).

Полученное на наклепанном материале максимальное значение скорости разрушения (210 м/сек, фиг. 3), вероятно, не является критическим для данного материала, а связано с тем, что при большой длине образца и значительных скоростях разрушения, сравнимых со скоростью распространения упругих волн в данном материале (наблюдаемые наивысшие скорости разрушения близки к 0.1 от скорости звука в меди), удаленные части образца не успевают разгрузиться за время разрушения. Это означает, что, начиная с некоторой длины, зависящей от ширины образца и физического состояния материала, дальнейшее увеличение длины образца не приводит к увеличению освобождаемой в процессе разрушения упругой энергии и, следовательно, к увеличению скорости разрушения. Максимальное значение скорости разрушения определяется, таким образом, не только физическим состоянием материала, но и чисто геометрическими условиями эксперимента, причем эти два фактора тесно связаны один с другим.

Из приведенных ранее соображений следует, что, вероятно, не исключена возможность дальнейшего повышения максимальной скорости разрушения. Это может быть достигнуто либо увеличением запаса энергии упругой деформации в единице объема образца, либо значительным увеличением скорости деформирования, либо изменением физического состояния материала.

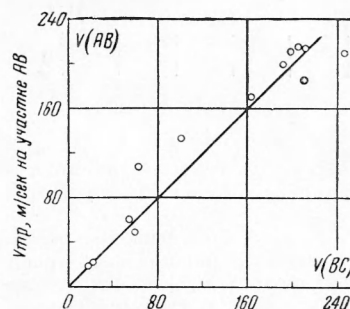
Остается неясным, таким образом, вопрос о величине предельной скорости разрушения, характеристической для данного материала. Тут вероятны две возможности.

1) Величина этой скорости определяется только упругими константами материала. Отношение этой величины к скорости распространения упругих волн одинаково для всех материалов.

2) Величина этой скорости зависит не только от упругих свойств материала, но и от его физического состояния.

Этот интересный и важный вопрос подлежит дальнейшему изучению.

Следует сделать еще один вывод из полученных результатов. Тот факт, что самопроизвольное разрушение со значительными скоростями распространения трещин наблюдалось на меди — материале, который по своей природе едва ли может быть отнесен к хрупким, — свидетельствует о том, что самопроизвольное, катастрофическое разрушение свойственно не только хрупким материалам.



Фиг. 5

Поступила 25.VII.1961

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лозовская В. Ф., Пашков П. О., Серебряков А. В. О скорости роста трещин при пластическом разрушении металлов. ПМТФ, 1960, № 1.
2. Петч Н. Дж. Разрушение металлов. Сб. Успехи физики металлов. М., Металлургиздат, 1958, т. II, стр. 7—69.
3. Канфор С. С. Корпусная сталь. Л., Судпромгиз, 1960.
4. E. O'rowan. Condition of high — velocity ductile fracture. J. Appl. Phys., 1955, vol. 26, № 7, 900—902.
5. Зилова Т. К., Петрухина Н. И., Фридман Я. Б. О закономерности кинетики деформации в зависимости от податливости нагружения. ДАН СССР, 1959, т. 124, № 6.
6. Пашков П. О., Братухина В. А. О механической прочности тонких листов и фольг. Сб. Металловедение, Л., Судпромгиз, 1959, № 3.