

О СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИН ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ МЕТАЛЛОВ

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

(Новосибирск)

Разрушение материалов при деформировании как хрупких, так и пластичных, характеризуется последовательным процессом возникновения первичных очагов разрушения, их слияния в микротрещины и ростом наиболее опасных из микротрещин в макротрещины вплоть до полного разрушения образца на отдельные части. В настоящее время считается установленным, что макроскопически хрупкое разрушение все же сопровождается пластической деформацией, в той или иной степени предваряющей появление макроскопических трещин [1,2,3]. Поэтому изучение связи разрушения с протеканием пластической деформации в зоне разрушения является серьезной и важной задачей исследований по прочности материалов. Многочисленные случаи опасных по своим последствиям аварий в машиностроении, как известно, вызваны вынужденными условиями, определяющими быстрый рост трещин [2].

Развитие макроскопической стадии разрушения лучше всего оценивать измерениями скоростей роста трещины. Изменения в скорости в связи с изменением свойств материала и внешних условий нагружения должны надежно характеризовать особенность разрушения того или иного материала.

На первый взгляд наиболее сложной экспериментальной задачей является измерение скоростей роста хрупких трещин, значения которых в пределе, очевидно, может достигать скорости распространения звука в данном материале. Одна из попыток такого рода описана в [4]. Оказалось, что скорость распространения хрупкой трещины на силикатном стекле и конифоли может составлять 0.25—0.3 от скорости звука. Скорость роста трещин зависит от величины приложенных напряжений [5,6].

Однако исследование процесса роста трещин, сопровождаемых заметной или даже значительной пластической деформацией, представляет самостоятельные трудности, связанные с усложнением процесса разрушения пластической деформацией испытуемого образца, протекающей одновременно с разрушением.

Ниже описываются некоторые приемы измерения скоростей «пластических» трещин, а также результаты первого этапа исследования скоростей роста «пластических» трещин для ряда металлов.

Оказалось, что скорость роста трещин полностью определяется видом и формой диаграммы разрыва $P(t)$ в спадающей ее ветви.

Из экспериментов вытекает, что скорость роста трещины является, наряду с сопротивлением деформации, определяющим параметром для оценки удельной работы разрушения материала.

1. Материалы и методика исследования. Изучение распространения трещин производилось при испытании на растяжении плоских образцов, ширина которых a_0 значительно больше толщины δ .

В работе применялись образцы с $h_0 = 140$ мм и $a_0 = 45$ мм. Толщина была различной для различных материалов, но не превышала 0.95 мм. Для фиксирования места появления трещины делался односторонний надрез глубиной 5 мм.

При испытании на растяжение в каждый момент времени выполняется условие равновесия:

$$P = \sigma \delta (a - x) \quad (1.1)$$

где P — растягивающее усилие, x — длина трещины, δ — средняя толщина образца, σ — среднее растягивающее напряжение на неразорванной площадке сечения образца (на ширине $a - x$)

Продифференцируем уравнение (1.1) по времени:

$$\frac{dP}{dt} = \delta(a-x) \frac{d\sigma}{dt} + \sigma(a-x) \frac{d\delta}{dt} + \sigma \delta \frac{da}{dt} - \sigma \delta \frac{dx}{dt}$$

Разделив это уравнение на уравнение (1.1), получим:

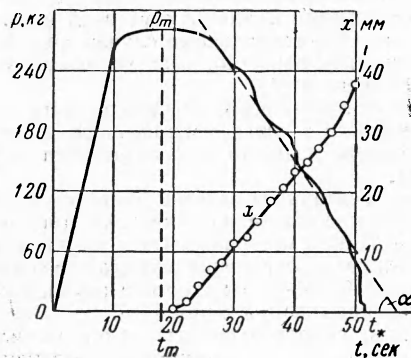
$$\frac{dx}{dt} = (a-x) \left(\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dt} + \frac{1}{a-x} \frac{da}{dt} \right) - \frac{a-x}{P} \frac{dP}{dt}$$

или

$$\frac{dx}{dt} = F(t) - \frac{1}{\sigma \delta} \frac{dP}{dt} \quad (1.2)$$

В работе исследовался на разных материалах характер изменения $F(t)$ и $\sigma \delta$ от времени.

Можно также оценить величину работы, затраченной на продвижение трещины от $x=0$ до $x=a$. Начало распространения трещины связывалось с достижением максимальной нагрузки P_m на диаграмме $P(t)$ (см. фиг. 1, где указаны также некоторые обозначения). Общая работа W , включающая в себя, кроме работы, затрачиваемой на продвижение трещины, и работу общего пластического удлинения всей длины образца, равна



Фиг. 1. Вид зависимости длины трещины x и нагрузки P от времени t . Материал — мягкое железо

Удельная работа W_0 , отнесенная к единице поверхности трещины, будет

$$W_0 = \frac{u P_m^2}{2 \delta_0 a_0 \operatorname{tg} \alpha} \quad (1.4)$$

Здесь δ_0 и a_0 — размеры первоначального надрезанного сечения образца. Очевидно, что с увеличением скорости распространения трещины dx/dt , роль работы пластической деформации всего образца будет уменьшаться, и W_0 будет стремиться к величине, равной значению работы продвижения непосредственно самой трещины. Разумеется, приведенный расчет следует рассматривать, как первое приближение к оценке значения этой работы. В нашей работе была определена зависимость W_0 от dx/dt для материалов с прямолинейным спадающим участком диаграммы нагружения.

Исследуемые образцы растягивались на 5-тонной машине ЦДМ. Предварительные опыты показали, что при обычном растяжении примененного образца на машине со свободным маятником и регистрации машинной диаграммы разрыва на спадающем участке диаграммы наблюдаются большие срывы нагрузки, обусловленные недостаточной «жесткостью» машины и инерционными движениями маятника. Развитие

$$W = \int_{l_m}^{l_*} P dl = u \int_{t_m}^{t_*} P dt \quad (1.3)$$

Так как длина образца $l = l_0 + ut$ и, следовательно $dl = u dt$ (u — скорость раздвижения захватов машины).

В случае прямолинейного спадающего участка диаграммы нагружения:

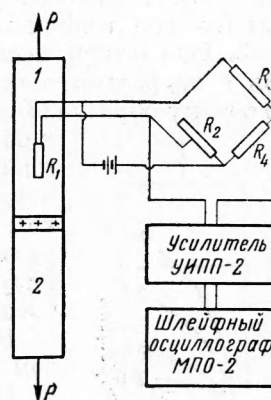
$$W = \frac{u P_m^2}{2 \operatorname{tg} \alpha}$$

Здесь α — угол наклона спадающего участка диаграммы нагружения (фиг. 1).

трещины происходит именно при спадающей нагрузке. Поэтому все дальнейшие опыты велись на «жесткой» машине, т. е. с закрепленным верхним захватом. Регистрация изменения нагрузки во времени велась с помощью осциллографической записи показаний деформируемого одновременно с образцом тензодатчика. В результате падение нагрузки по мере роста трещины в образце происходило плавно, с меньшими искажениями спадающего участка диаграммы $P(t)$, за счет высвобождающейся упругой энергии машины. Схема испытания приведена на фиг. 2.

В верхнем захвате закреплялась металлическая пластинка 1, которая при нагрузках, вызывающих разрушение образца 2, деформировалась в пределах упругой области. На пластинку наклеивался тензодатчик R_1 , являющийся одним из плечей мостика Уитстона, собранного на сопротивлениях R_1, R_2, R_3, R_4 и питаемого постоянным током. С диагонали моста сигнал подавался на усилитель УИПП-2. Усиленный сигнал записывался на пленку с помощью шлейфного осциллографа МПО-2. На пленку также записывалась синусоида с определенной частотой для отсчета времени. При нулевой нагрузке мостик компенсировался изменением сопротивления R_2 . Для каждой пластинки (с разными верхними пределами нагружения — от 350 до 1500 кг) строился градуировочный график зависимости показаний осциллографа от нагрузки. Образец 2 одним концом с помощью специально сконструированного зажима прикреплен к пластинке 1, другой конец зажимался в нижнем захвате машины. Во время испытания образец непрерывно фотографировался кино съемочной камерой Киев-16С-2 (максимальная скорость 64 кадра в секунду), запуск которой синхронизировался по времени с запуском осциллографа.

Промер осциллограммы и кино пленки при увеличениях порядка $\times 10$ давал данные о нагрузке и длине трещины в каждый момент времени.



Фиг. 2. Схема испытания образцов

Таблица 1

№	Материал	Толщина, м.м	Термическая обработка	σ_B , кг/мм ²	W_0
1	Мягкое железо	0.3	В состоянии поставки	37.7	4.82
2	Медь М2	0.18	В состоянии поставки	49.1	—
3	» »	0.18	Отжиг 20 мин. при 300° С	—	0.80
4	» »	0.18	Отжиг 20 мин. при 400° С	22.0	—
5	» »	0.18	Отжиг 20 мин. при 500° С	20.5	4.24
6	Дуралюмин Д16АТВ	0.56	В состоянии поставки	33.1	—
7	Сплав АМгЗМ	0.95	В состоянии поставки	19.8	3.48
8	» »	0.95	Дополнительный отжиг 1.5 часа при 200° С, охлаждение на воздухе	20.7	3.52
9	» »	0.95	Дополнительный отжиг 1.5 часа при 300° С, охлаждение на воздухе	21.5	2.0
10	» »	0.95	Дополнительный отжиг 1.5 часа при 400° С, охлаждение на воздухе	18.0	3.04
11	» »	0.95	Дополнительный отжиг 1.5 часа при 500° С, охлаждение с печью	—	1.32

Сведения о материалах, использованных в работе, приведены в табл. 1.

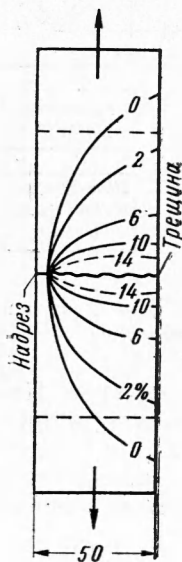
При проведении опытов по указанной выше схеме возможны погрешности по следующим двум основным причинам.

1. Искажения спадающей ветви на диаграмме нагрузка — абсолютное удлинение при разрушении образцов вследствие уменьшения упругой энергии машины. Это устранено уже упомянутым увеличением жесткости разрывной машины.

2. Возможности незначительного перекоса образцов в захватах машины, избежать которого полностью не удалось из-за малых толщин, а значит и малой продольной жесткости исследуемых материалов.

Проверкой влияния перекоса образцов в захватах машины на результаты растяжения установлено, что при перекосе на $1-2^\circ$ (угол между осью захвата и продольной осью образца) нагрузка P_{\max} и удлинение образца e меняются незначительно. С увеличением перекоса выше 5° сильно снижаются обе величины.

2. Результаты исследования. Как известно, при растяжении образцов с надрезами остаточные деформации распределяются неравномерно по объему образца (3). То же наблюдается и при растяжении примененных в опытах образцов. На фиг. 3 показано распределение пластических удлинений по поверхности разорванного образца из мягкого железа. На графике нанесены линии равных деформаций. На линиях указаны величины удлинений. Видно, что наибольшие деформации локализуются в области, непосредственно прилегающей к трещине.



В области, прилегающей к кромке образца с надрезом, деформации отсутствуют.

Неравномерность деформации по ширине образца объясняется более ранним отключением из деформации одних волокон и накоплением деформации в крайних волокнах в процессе роста трещины.

Следовательно, пробегание трещины сопровождается одновременным пластическим удлинением образца в еще неразорванной его части.

Фиг. 3. Распределение пластических удлинений по поверхности разорванного образца из мягкого железа. Нанесены линии равных деформаций. Пунктир — граница зажима

Рассмотрение графиков зависимости роста трещины и нагрузки от времени разрушения показало, что на мягком железе, меди и дуралюмине скорость трещины практически постоянна на всем пути ее роста (фиг. 1) с небольшим отклонением от прямой в начале и в конце трещины. Нагрузка у этих материалов падает круто, практически также по прямой линии (фиг. 1).

Для алюминиево-магниевого сплава АМгЗМ типичные кривые $x(t)$ и $P(t)$ показаны на фиг. 4. Скорость трещины в этом случае не является постоянной. Она монотонно возрастает с резким ускорением в конце разрушения, нагрузка падает по криволинейной зависимости. Увеличение скоростей трещин для сплава АМгЗМ по мере разрушения образца объясняется, очевидно, либо упрочнением, вызванным дополнительными процессами при деформации типа старения или фазовых превращений, либо изменением в способности материала к равномерному удлинению по всей длине образца, вызванным возможно теми же внутренними изменениями в материале в процессе деформации.

Установление точных причин этого явления в настоящей работе не производилось.

Методом графического дифференцирования для испытанных образцов сплава АМгЗМ были построены кривые зависимости dx/dt и dP/dt от вре-

мени t . Построенный на основании этих данных график зависимости dx/dt от dP/dt получился прямолинейным и совпадающим для всех испытанных образцов сплава. Уравнение полученной прямой можно записать в виде

$$\frac{dx}{dt} = C_0 - \frac{1}{C} \frac{dP}{dt} \quad (2.1)$$

где C_0 и C — константы, не зависящие от времени. Сравнивая полученное уравнение с уравнением (1.2) можно сделать заключение о том, что произведение $\sigma\delta$ и функция $F(t)$ не изменяются в процессе продвижения трещины в образцах этого сплава. Значение константы C , определенная из опыта, хорошо совпадает с произведением $\sigma_B\delta_0$ для данного материала ($\sigma_B\delta_0 = 19 \text{ кг/мм}$, $C = 19.30 \text{ кг/мм}$).

Построенная для сплава АМгЗМ зависимость

$$\xi = \frac{dx}{dt} \text{ от } \eta = \frac{1}{\sigma_B\delta_0} \frac{dP}{dt}$$

изображается прямой линией, проходящей под углом 45° к осям координат (фиг. 5).

Так как $\sigma\delta = \text{const}$ и, следовательно,

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{dt} = - \frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dt}$$

то уравнение (1.2) примет вид:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{da}{dt} - \frac{1}{\sigma\delta} \frac{dP}{dt} \quad (2.2)$$

Сравнивая (2.1) и (2.2), получаем

$$C_0 = \frac{da}{dt}$$

Следует отметить, что величина константы для сплава АМгЗМ сравнительно мала и равна 0.3 мм/сек .

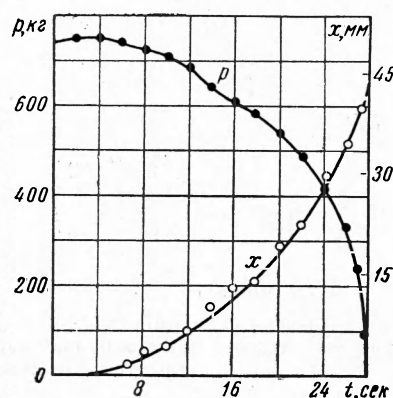
Для остальных материалов, имеющих прямолинейную зависимость x от t и P от t на спадающем участке диаграммы нагружения, значения η и ξ были нанесены на график, через начало координат которого проведена прямая под углом 45° к осям координат (фиг. 6). Экспериментальные точки удовлетворительно укладываются на эту прямую для всех испытанных материалов.

Возможность проведения прямой через начало координат показывает, что и в этом случае константа C_0 невелика и по своему значению сравнима с погрешностями эксперимента.

Принимая $\sigma = \sigma_B$, $\delta = \delta_0$ в уравнении (1.1) и определив P в разные моменты времени из диаграммы нагружения, для каждого из исследованных материалов была построена зависимость x от t . Хорошее совпадение расчетных данных с экспериментальными еще раз подтверждает справедливость полученного вывода о постоянстве произведения $\sigma\delta$ в процессе разрушения и о возможности пренебрежения первым членом в уравнении (2.2). В пользу такого вывода говорят также данные об очень слабом изменении среднего номинального напряжения

$$\sigma_0 = \frac{P}{(a_0 - x)\delta_0}$$

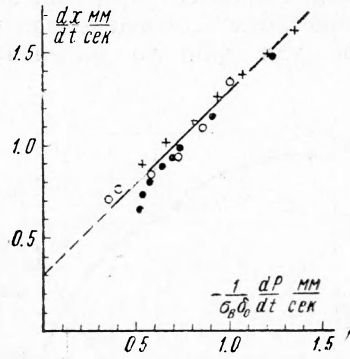
по мере продвижения трещины. Для двух исследованных материалов полученная зависимость σ_0 от x изображена графически на фиг. 7. Аналогичная зависимость получается и для остальных материалов.



Фиг. 4. Вид зависимости длины трещины x и нагрузки P от времени t .
Материал — АМгЗМ

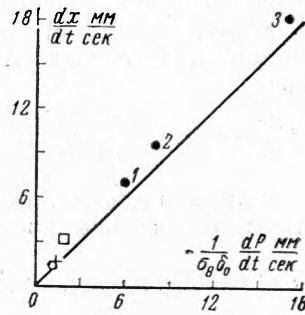
Следует заметить, что полученное соотношение хорошо соблюдается при $(a - x) \gg 1/5 a_0$. При x близком к a средние напряжения по сечению будут сильно отличаться от истинных, так как зона концентрации напряжений в устье трещины становится соизмеримой с неразорванной частью образца. Кроме того, сказываются краевые эффекты (искривление образцов и др.), приводящие к изменению характера напряженного состояния.

Следует ожидать, что скорость трещины должна сильно зависеть от состояния металла. Это было проверено на меди, которая в состоянии поставки сохранила следы сильного наклепа, полученного в процессе заключительной



Фиг. 5

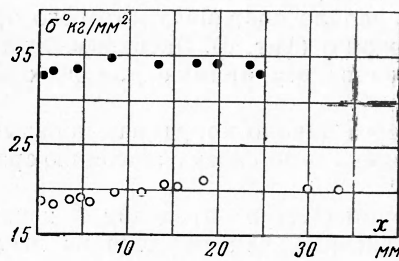
Фиг. 5. График зависимости dx/dt от dp/dt для сплава АМгЗМ (черный кружок — материал в состоянии поставки, светлый кружок — отожженный при температуре 200°, крестик — отожженный при температуре 300°)



Фиг. 6

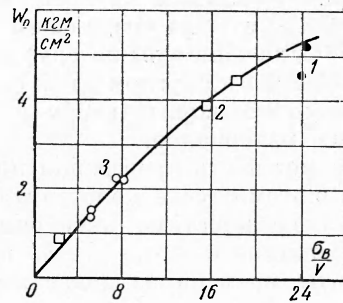
Фиг. 6. График зависимости dx/dt от dp/dt (черный кружок 1 — Д16АТВ, скорость раздвижения захватов, $u = 7$ мм/мин; треугольник 2 — то же, $u = 14$ мм/мин; треугольник 3 — то же, $u = 21$ мм/мин; квадрат — медь М2, отожженная при температуре 500°; кружок — мягкое железо; крестик — одна из точек для сплава АМгЗМ)

холодной прокатки при изготовлении тонких листов. Медные образцы были подвергнуты отжигу при различных температурах (выдержка 20 минут).



Фиг. 7

Фиг. 7. Изменение среднего номинального напряжения σ_0 с ростом трещины (черный кружок — мягкое железо; светлый кружок — сплав АМгЗМ)



Фиг. 8

Фиг. 8. Зависимость удельной работы W_0 от отношения предела прочности к скорости трещины σ_B/v ; точка 1 — железо, 2 — медь, 3 — дуралюминий

Результаты определения скоростей трещин оказались следующими:

Температура отжига $T^\circ =$	25	300	400	500
Скорость трещины V м/сек =	160	9.7	2.0	10.4

Из этих данных следует, что по мере снятия наклепа, а следовательно, и упрочнения, создаваемого наклепом, скорость распространения трещины быстро уменьшается.

Одним из наиболее важных вопросов при изучении податливости тех или иных материалов к росту трещин является вопрос об оценке величины удельной работы, затрачиваемой на образование трещин. Полученные значения работы W_0 , подсчитанные из диаграммы разрыва по формуле (1.4), приведены в таблице 1. Однако пропорциональность между скоростью трещины и наклоном спадающего участка зависимости $P(t)$ позволяет несколько углубить представления о сущности подсчитанных величин.

Согласно уравнению (2.2), подтвержденному опытом, и графику (фиг. 2), можно получить

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dP}{dt} = \delta_0 \sigma_B \frac{dx}{dt} = \delta_0 \sigma_B V \quad (2.3)$$

Подставляя этот результат в формулу (1.4) для W_0 и учтя, что $P_m = \sigma_B a_0 \delta_0$, будем иметь

$$W_0 = \frac{1}{2} \frac{u}{V} a_0 \sigma_B \quad (2.4)$$

Здесь величина удельной работы W_0 определяется величинами скорости трещины V и предела прочности σ_B , определяемыми независимыми способами, а не по диаграмме растяжения, как при подсчетах по формуле (1.4). На фиг. 8 сопоставлены величины W_0 , подсчитанные по уравнению (1.4), с отношением σ_B/V . График показывает тесную зависимость удельной работы, затрачиваемой на развитие пластической трещины, со скоростью распространения трещин. Некоторое отклонение от прямолинейной зависимости на фиг. 8 объясняется неучетом пластической деформации при подсчете предела прочности.

Зависимость (2.4) позволяет сделать заключение о том, что величина отношения скорости движения захватов u и скорости трещины V должна непосредственно отражать величину пластической деформации, сосредоточенной возле трещины. Это заключение вытекает из соображения, что величина удельной работы разрушения является некоторой функцией от произведения σe , где σ — величина разрывающего напряжения, а e — предельная относительная деформация в районе пробегания трещины.

Полученные материалы приводят к заключению о целесообразности дальнейшего экспериментального изучения скоростей разрушения, особенно в области быстрых трещин.

В заключение авторы работы приносят свою благодарность Л. Г. Колосовой за помощь при постановке опытов.

Поступила
26 XI 1959

ЛИТЕРАТУРА

1. О г о w a n E. Reports Progress in Physics, 1948—1949, 12, 185.
2. Ш и м е л е в и ч И. Л. Распространение трещин в стальных листах под влиянием внутренних напряжений, Сб. Металловедение, Л., Судпромгиз, 1957, 81.
3. П а ш к о в П. О. Пластичность и разрушение металлов, Л., Судпромгиз, 1950.
4. К у з ь м и н Е. А., П у х В. П. Скорость роста хрупкой трещины в стекле и канифоли, Сб. Некоторые проблемы прочности твердого тела, М.—Л., Изд. АН СССР, 1959, стр. 367.
5. Р е г е л ь В. Р. К вопросу о кинетике роста трещин в процессе разрушения твердых тел, Ж. Технической физики, 1956, т. 26, 2, 359.
6. Ж у р к о в С. Н., Т о м а ш е в с к и й Э. Е. Микроскопическое изучение роста трещин при разрыве, Ж. технической физики, 1957, т. 27, 6, 1248.