

Ю. И. Мещеряков, Г. Г. Савенков

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

В процессе проектирования и эксплуатации конструкций и изделий, работающих при динамическом нагружении, возникает проблема определения свойств материала в зависимости от скорости нагружения или деформации. Следует отметить, что функциональные зависимости характеристик сопротивления деформированию от скорости деформации изучены более подробно, чем такие же зависимости для сопротивления крупному разрушению.

Кроме того, в этом последнем случае до конца не выяснен вопрос, связанный с выбором критерия хрупкого разрушения. Как правило, чаще всего используются определенные в рамках линейной механики разрушения критические коэффициенты интенсивности напряжений K_{Ic} , K_{IIc} , а также различные варианты удельной энергии отрыва на единицу поверхности $2\gamma(G_{Ic})$.

В настоящее время наиболее полно из этих характеристик при динамическом нагружении изучены критический коэффициент интенсивности напряжений (трещиностойкость) в условиях нормального отрыва по страгиванию трещины K_{Ia} до скоростей нагружения $K_I \approx 4 \cdot 10^7$ МПа \cdot м^{1/2} \cdot с⁻¹ [1, 2] и удельная на единицу поверхности работа отрыва материала, причем для ее определения используют различные способы, которые дают близкие результаты только в области хладноломкости [3].

Практически отсутствуют данные о трещиностойкости материалов в условиях поперечного сдвига K_{III} (и даже для статического нагружения), хотя важность этой характеристики для большого ряда конкретных случаев, например для конструкций и изделий, работающих на сжатие или в условиях гидростатического давления, а также в процессах, связанных с пробивкой, прошивкой и вырубкой, не вызывает сомнений.

Кроме того, исследования тыльного откола, возникающего при высокоскоростном соударении пластин, показали, что при формировании откольной поверхности для ряда металлов вначале пороговым образом при некоторой критической скорости удара образуются продольные (относительно расположения ударной волны) микросдвиги, а затем независимо образуются при взаимодействии прямой и обратной волны разгрузки нормальные микроразрывы [4]. Эти микросдвиги и микроразрывы имеют характерные размеры, не превышающие десятков микрон, и, таким образом, относятся к мезоскопическому уровню деформации [5], являющемуся определяющим уровнем для макроскопических свойств прочности и пластичности. С учетом первичного образования микросдвигов становится очевидным, что важность определения K_{III} неизмеримо возрастает.

За счет чего же образуются продольные микросдвиги? Как неоднократно показывалось в ряде работ (см., например, [6]), при динамическом деформировании материалов элементы среды движутся в виде совокупности микропотоков, имеющих различную относительно друг друга скорость. Иными словами, материал может характеризоваться, кроме всех прочих параметров, при фиксированных условиях нагружения дисперсией (шириной распределения) скоростей частиц среды Δu .

Очевидно, что при превышении разницы в скоростях на границах микропотоков критического значения происходит микросдвиг. Найдем математическое условие возникновения этого микросдвига. С этой целью примем, что материал в мезообъеме находится в упруговязкопластическом состоянии с нулевым коэффициентом деформационного упрочнения.

Уравнение деформирования такого материала записывается в виде

$$(1) \quad \sigma = \sigma_0(1 + \mu_1 \dot{\epsilon}),$$

где σ — напряжение течения; σ_0 — статическая составляющая напряжения; $\mu_1 = \mu/\sigma_0$; μ — коэффициент динамической вязкости; $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации. Потенциальная упругая энергия деформации среды E_1 в случае

$$(2) \quad E_1 = \frac{\sigma^2}{2E} = \frac{\sigma_0^2(1 + \mu_1 \dot{\epsilon})^2}{2E}$$

(E — модуль Юнга), когда должен образоваться микросдвиг, будет равна разнице кинетических энергий элементов среды внутри двух соседних микропотоков

$$(3) \quad E_2 = \rho u \Delta u$$

(ρ — плотность материала среды, u — средняя скорость частиц среды). Приравняв выражения (2) и (3) и учитывая, что $\mu \simeq \lambda \rho \Delta u \Delta h$ (λ — постоянный множитель, Δh — расстояние между микропотоками, а скорость деформации $\dot{\epsilon} \simeq \Delta u / \Delta h$), получим

$$(4) \quad \sigma_0 = \frac{(2\rho E \Delta u u)^{0,5}}{\left(1 + \frac{\lambda \rho \Delta u^2}{\sigma_0}\right)}$$

Элементарные расчеты по формуле (4) показывают, что при $\sigma_0 = 0,7\sigma_b$ (σ_b — предел прочности) продольные микросдвиги для сталей образуются в случае, если дисперсия скоростей частиц соизмерима с их средней скоростью (т. е. $\Delta u \simeq u$), что и было многократно подтверждено экспериментально [4]. При соотношении $\Delta u \simeq 0,1u$, как показывают такие же расчеты, микросдвиги распространяются под углом 45° , поскольку в этом случае можно принять $\sigma_0 = \sigma_b/2$.

И наконец, существуют два диапазона соотношений: $\Delta u < 0,1u$ и $0,1u < \Delta u < u$, при которых возможны другие формы процессов пластической аккомодации: например, для первого диапазона посредством ротационных мод [7], а для второго при помощи колебательных форм движения [8].

Следует отметить, что при реализации тыльного откола напряженное состояние в материале соответствует случаю идеальной одномерной деформации, практически не достижимой при применении стандартных образцов линейной механики разрушения в условиях как статического, так и динамического нагружения. Этот факт явился стимулирующим началом в [9] для определения K_{Ic} в условиях откола для пластичных материалов. А с учетом того, что на мезоскопическом масштабном уровне деформируемая среда более упругоизотропна, чем в макрообъеме, становятся очевидными преимущества определения характеристик сопротивления разрушению (в частности, трещиностойкости) именно на этом уровне.

Поскольку в случае откола имеем дело с фиксацией длины микротрещин и микросдвигов после завершения процесса, то из трех динамических коэффициентов интенсивности напряжений (страгивание K_a , распространение K_D и остановка трещины K_a) определению подлежит только последний.

Кроме того, как неоднократно отмечалось в [10], для определения K_a , K_D требуются образцы очень больших размеров, однако там же показано, что $K_a = K_m$ — минимальное значение K_D .

Из сопоставления данных прямых интерферометрических измерений движения свободной поверхности образцов с их последующими металлографическими исследованиями видно, что максимальная длина микро-

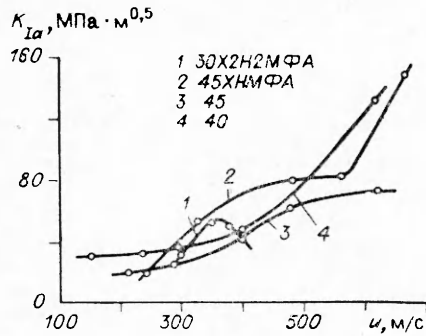


Рис. 1 (вместо 40 следует читать 40X).

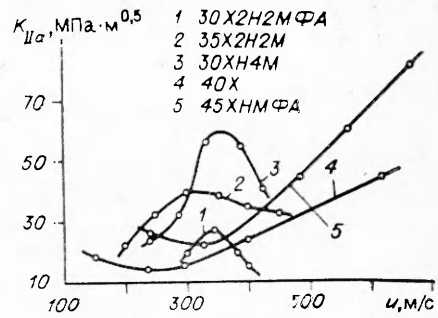


Рис. 2

сдвига l_2 пропорциональна длительности импульса нагружения Δt и ширине распределения частиц по скоростям Δu :

$$(5) \quad l_2 \approx \Delta u \Delta t.$$

Несмотря на то что в образце в зоне откола образуется система трещин различной длины, наибольшую опасность, как показывают экспериментальные и теоретические исследования [11], представляет та из них, которая первой начинает старт. Полагая, что в нашем случае первой стартует трещина, имеющая в конечном итоге максимальную длину l_2 , по известной формуле линейной механики разрушения оценим значение K_{IIa} :

$$(6) \quad K_{IIa} = \tau \sqrt{\pi l_2} = \frac{\rho c_p u}{4} \sqrt{\pi l_2}.$$

С учетом соотношения (5) выражение (6) перепишем в виде

$$(7) \quad K_{IIa} = \frac{\rho c_p u}{4} \sqrt{\pi \Delta u \Delta t},$$

где τ — максимальное касательное напряжение; c_p — скорость пластической волны.

Поскольку образование микросдвигов и микротрещин, перпендикулярных направлению распространения ударной волны, происходит независимо друг от друга, то на основе аналогичных рассуждений можно получить зависимость для определения критического коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве по остановке трещины K_{Ia} :

$$(8) \quad K_{Ia} = \sigma \sqrt{\pi l_1} = \frac{\rho c_p u}{2} \sqrt{\pi l_1}.$$

Здесь σ — максимальное нормальное напряжение; l_1 — максимальная длина микротрещины (определяется на основе металлографического анализа разрушенных образцов).

При распространении микросдвигов под углом 45° получаем [12]

$$K_{Ia} = K_{IIa} = \sigma \sin^2 \beta \sqrt{\pi l} = \sigma \cos \beta \sin \beta \sqrt{\pi l} = \frac{1}{2} \sigma \sqrt{\pi l}$$

($\beta = 45^\circ$, l — максимальная длина наклонного микросдвига).

Рассчитанные по зависимостям (7) и (8) значения K_{Ia} , K_{IIa} для ряда сталей приведены на рис. 1 и 2. Сходимость полученных результатов с результатами других авторов обсуждалась в [13].

Как видно из функциональных кривых изменения K_{Ia} на рис. 1, для трех марок сталей с низкими пластическими свойствами имеется тенденция к росту значений K_I с увеличением скорости удара и соответственно скорости деформации, которая изменялась в экспериментах от $4 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ с⁻¹, а для более пластичной стали 30X2H2MFA кривая изменения K_{Ia} имеет экстремум; эти качественные результаты в целом неплохо коррелируют с данными об изменении K_{Ia} из [1].

Приведенные на рис. 2 кривые изменения K_{IIa} свидетельствуют о наличии для всех марок сталей экстремума зависимости $K_{IIa} = f(u)$, лежащего в диапазоне скоростей удара 200 ... 350 м/с.

Рассмотрим природу появления этого экстремума. Ранее было принято, что материал в мезообъеме находится в упруговязкопластическом состоянии с нулевым коэффициентом деформационного упрочнения и коэффициентом динамической вязкости, пропорциональным ширине распределения скоростей микропотоков Δu . Перепишем соотношение (7):

$$(9) \quad K_{IIa} = \frac{\rho c_p u \Delta u \Delta t \pi^{0,5}}{(\Delta u \Delta t)^{0,5}}.$$

Так как $c_p \Delta t \varphi = \Delta h$ ($\varphi < 1$ — постоянный множитель), то выражение (9) можно представить в виде

$$(10) \quad K_{IIa} = \frac{\alpha u u}{(\Delta u \Delta t)^{0,5}}; \quad \alpha = \text{const.}$$

Отметим, что в [1] динамический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве по страгиванию трещин пропорционален корню квадратному из коэффициента динамической вязкости.

Известно, что коэффициент динамической вязкости уменьшается с увеличением скорости деформации, а значит, в нашем случае с увеличением скорости удара ($\varepsilon = u/2c_p \Delta t$), причем это уменьшение достаточно интенсивно практически для всех типов материалов, в том числе и для сталей [14, 15], т. е. при увеличении скорости удара u и соответствующем уменьшении коэффициента динамической вязкости μ , как следует из соотношения (10), должен появляться экстремум функции $K_{IIa}(u)$.

При этом, если существует экстремум (максимум) функции $\Delta u = f(u)$, совпадающий (или близко находящийся) с экстремумом функции $K_{IIa} = f(u)$, то экстремальная точка K_{IIa} будет минимальной, если же такого экстремума Δu от u нет, то экстремальная точка K_{IIa} будет максимальной.

В заключение остановимся на соотношении между средними скоростями трещин нормального отрыва и поперечного сдвига. Как известно, для максимальной скорости трещины существует ряд соотношений, полученных Моттом, Иоффе и др. [16]:

$$v_{тр} = 0,38 c_l \quad \text{или} \quad v_{тр} = 0,57 c_t \quad \text{и т. п.}$$

(c_l — скорость продольных звуковых волн, c_t — скорость поперечных звуковых волн).

Зарегистрированные же максимальные скорости трещин для сталей находятся в диапазоне (0,17 ... 0,9) c_l , а в абсолютном значении от 1000 до 5000 м/с [16].

В нашем случае максимальные скорости трещин нормального отрыва, рассчитанные по формуле $v_{тр} \approx l_i/\Delta t$, имеют диапазон 500 ... 1000 м/с, что в целом совпадает с результатами, полученными другими исследователями.

Как вытекает из соотношения (5), скорость трещин поперечного сдвига равна ширине распределения частиц по скоростям Δu , максимальное значение ее ≈ 310 м/с было зарегистрировано для стали 30ХН4М с $\sigma_b = 1400$ МПа при скорости удара 330 м/с, для всех других марок сталей эта скорость находится в диапазоне 100 ... 300 м/с, что значительно ниже скорости трещин при нормальном отрыве ($v_{тр.сд} \approx (0,2 \dots 0,3) v_{тр.отр}$).

На основании сказанного отметим, что предложенный метод определения динамических критических коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве и поперечном сдвиге по остановке трещины и скоростей трещин позволяет значительно расширить номенклатуру испытываемых материалов и снизить габариты образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Г. В., Маковой В. А. Динамическая трещиностойкость сталей при квазистатическом нагружении.— Киев, 1988.— (Препр./Ин-т проблем прочности).
2. Маковой В. А. Особенности разрушения сталей при импульсном нагружении // ПП.— 1990.— № 5.
3. Иванов А. Г. О возможных причинах хрупких разрушений // ПМТФ.— 1988.— № 3.
4. О локализации деформации и разрушения при отколе/С. А. Атрошенко, О. Я. Бейлина, С. А. Гладышев и др. // ФГВ.— 1990.— № 3.
5. Владимиров В. И. Коллективные эффекты в ансамблях дефектов // Вопросы теории дефектов в кристаллах.— Л.: Наука, 1987.
6. Мещеряков Ю. И., Диваков А. К., Кудряшов В. Г. О динамической прочности при отколе и пробое // ФГВ.— 1988.— № 2.
7. Механизмы локализованного разрушения материала в волнах нагрузки/ С. А. Атрошенко, Т. В. Баличева, А. К. Диваков и др. // ПП.— 1990.— № 5.
8. Высокочастотные колебания зерен, пицилируемые импульсным нагружением/ С. А. Атрошенко, В. Б. Васильков, Ю. И. Мещеряков и др. // ЖТФ.— 1990.— № 3.
9. Степанов Г. В. Корреляция между энергетическими характеристиками разрушения — распространением трещины и отколом // ПП.— 1983.— № 3.
10. Механика разрушения. Быстрое разрушение, остановка трещин.— М.: Мир, 1981.
11. Партон В. З., Морозов Е. М. Механика упругопластического разрушения.— М.: Наука, 1985.
12. Брок Д. Основы механики разрушения.— М.: Высш. шк., 1980.
13. Мещеряков Ю. И., Савенков Г. Г., Атрошенко С. А. Трещиностойкость материалов при высокоскоростном ударе // ПП.— 1990.— № 12.
14. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом.— Новосибирск: Наука, 1980.
15. Сериков С. В. Оценка предельной деформации при разрушении металлических труб под действием интенсивных нагрузок // ПМТФ.— 1987.— № 1.
16. Финкель В. М. Физика разрушения.— М.: Металлургия, 1970.

г. Санкт-Петербург

Поступила 3/III 1992 г.

УДК 539.376

В. А. Заев, А. Ф. Никитенко

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ПЛАСТИН С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ПОЛЗУЧЕСТИ

Использование системы уравнений, описывающей ползучесть материала с одновременным учетом накопления в нем повреждений, с привлечением уравнений равновесия, совместности деформаций и соответствующих граничных условий позволило две самостоятельные задачи (задачу по определению напряженно-деформированного состояния (НДС), нагруженного известными внешними нагрузкой и температурой произвольного тела (элемента конструкции), и задачу определения времени начала его разрушения) объединить в одну [1]. Решение полученной при этом системы уравнений связано с определенными математическими трудностями [1] и требует (даже в случае простейших элементов конструкций) значительного времени на ЭВМ [2]. В связи с этим в [3—5] на основе смешанного вариационного принципа Мак-Комба, Шлехте, Сандерса предложен приближенный метод расчета НДС элементов конструкций и времени начала их разрушения. Метод позволяет рассматриваемую задачу свести к аналогичной в предположении установившейся ползучести материала. Для получения же искомого результата следует известное решение задачи установившейся ползучести умножить на функции координат и времени, для которых получены приближенные соотношения, а также верхние и нижние оценки.

© В. А. Заев, А. Ф. Никитенко, 1993