05

Критические размеры трещин при разрушении металлов

© В.А. Иванской

Центральный научно-исследовательский институт точного машиностроения,
142181 Климовск, Московская область, Россия

(Поступило в Редакцию 11 апреля 2006 г. В окончательной редакции 20 сентября 2006 г.)

Для оценки и прогнозирования критических длин трещин в металлах применен физический подход, разработанный И.И. Новиковым. Приведены экспериментальные данные, полученные на монокристаллических материалах. Показана необходимость учета критических длин трещин в величинах J-интегралов.

PACS: 62.20.Mk

Оценка прочности материалов и прогнозирование разрушения при наличии трещины остается актуальной задачей.

На основе различия между медленным (стабильным) и быстрым (нестабильным) периодами развития трещины Дж. Ирвин предложил методику испытаний и расчета для оценки несущей способности образца, содержащего трещину известной длины. Известен коэффициент интенсивности напряжений K, причем критическая величина, отражающая указанный выше переход, обозначается K_c. Считается, что K_c зависит от степени стеснения пластической деформации. Эксперименты, отмечается в [1], показали, что K_c зависит от ширины образца и длины исходной трещины. Критическая длина трещины не определяется в данном случае из физических констант материала и не может быть спрогнозирована. В методиках, описанных в [2,3], критическая длина трещины определяется как переходная от стабильного разрушения к нестабильному.

Иногда в расчетах в качестве величины длины начальной трещины применяют структурный элемент материала (например, размер зерна). Известно, что спрогнозировать развитие трещины в самом зерне или утверждать, что ее движение произойдет по границам зерен без проведения экспериментов, нельзя. Величина вязкости разрушения G аналогична в этом плане ($G = K_1^2/E$). Следовательно, и критическая величина G_c имеет тот же недостаток.

Критическая величина K_c определяется [1] для образца с центральной трещиной

$$K_c = \sigma_{\mathrm{cr.gross}}(b \operatorname{tg} \pi l_{\mathrm{cr}}/b), \tag{1}$$

где $\sigma_{\mathrm{cr.gross}}$ — среднее разрушающее напряжение образца с исходной трещиной в сечении брутто (т.е. без учета надреза), l_{cr} — критическая длина трещины в момент перехода от медленного контролируемого разрушения к быстрому, лавинному; b — ширина образца.

Для образцов сложной геометрии значения коэффициента интенсивности напряжений приведены, например, в работе [4].

Существует подход к определению коэффициента интенсивности напряжений, использующий величину области сцепления атомов за пределами трещины [5].

За пределами линейно-упругой механики разрушения применяют J-интеграл [6]:

$$J = \int_{\Gamma} \big(W dx_2 - \mathbf{T}(\partial u/\partial x_1)\big) ds, \tag{2}$$

где Γ — окружающая конец выреза кривая, $\mathbf{T} = \sigma \mathbf{n}$ — вектор усилий на Γ, s — длина дуги, W — энергия деформации. При описании упруго-пластического поведения материала считается, что напряжения в каком-либо элементе объема растут монотонно. Существуют модифицированные выражения J-интеграла.

Для того чтобы корректно судить о критической длине трещины, причем как для малоцикловой усталости, так и для ее предельного случая — нескольких циклов нагружения, например ударов, — необходим подход, основанный на строгих и ясных физических принципах.

Цель данной статьи — применить к оценке критической длины трещины физически обоснованный подход, разработанный в [7]. Применение указанного подхода позволит не только оценить критические параметры, но и прогнозировать их. В работе [7] теоретически исследуется процесс пластической деформации с позиций теплофизики. Во время нагружения процесс отвода тепла от трещины характеризуется временем релаксации

$$\tau_\lambda \sim l^2/\chi \tag{3}$$

для диффузии

$$\tau_\partial \sim l^2/D. \tag{4}$$

Из анализа времен релаксации τ_λ и τ_∂ с температурой отмечают, что при низких температурах (лежащих ниже максимума теплопроводности, т.е. меньших 20–30 K) температуропроводность χ примерно в сто и более раз больше, чем при обычных температурах, и следовательно, величина τ_λ оказывается много меньшей и по сравнению с τ_∂, а также по сравнению со временем релаксации движения или размножения дислокаций. Это означает, что процесс отвода тепла при очень низких температурах является определяющим для пластической деформации, и критическая ситуация, соответствующая образованию трещины критического размера, характеризуется условием $\tau_\lambda = \tau_\partial$. Следовательно, при низких

Материал	θ_m, W/m^2	E, GPa	ρ, g/cm^3	σ_{tens}, MPa	λ, m^2/s $\cdot 10^{-3}$	d, Å	C_p^0, J/mol.K	$l_{\text{cr},\chi,\text{calcul}}$	$l_{\text{cr,exp}}$
Yr	1.47	538	22.65	500	0.025	2.174	25.1	$46 \cdot 10^{-6}$	$30 \cdot 10^{-6}$
Ru	180	430	12.45	1600	0.578	2.7–4.28	24.0	$28 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$
Al	209	7.1	2.71	50	3.17	2.86	24.35	$440 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$

Примечание: Q_m — теплопроводность, E — модуль Юнга, ρ — плотность, σ_{tens} — растягивающее напряжение, λ — температуропроводность, d — межатомное расстояние, C_p^0 — удельная теплоемкость, $l_{\text{cr},\chi,\text{calcul}}$ — расчетная длина трещины, $l_{\text{cr,exp}}$ — экспериментальная длина трещины.

температурах

$$l_{\text{cr}} = \text{const}\,\chi\sqrt{\frac{2\rho E}{\sigma^2}}.$$

При $\gamma \approx (1/10)Ed$ в [7] дается выражение для l_{cr} (E — модуль упругости, d — межатомное расстояние). С учетом поверхностной энергии

$$l_{\text{cr}} = E\gamma/\sigma^2 + \text{const}\,\chi\sqrt{\frac{\rho E}{\sigma^2}} \tag{5}$$

или

$$l_{\text{cr}} = E\gamma_{\text{eff}}/\sigma^2, \tag{6}$$

$$\gamma_{\text{eff}} = \gamma + \text{const}\,\chi\sqrt{\frac{\rho\sigma^2}{E}}. \tag{7}$$

При высоких температурах, близких к температуре плавления, возрастает коэффициент самодиффузии и значение γ_{eff} будет [7]:

$$\gamma_{\text{eff}} = \gamma + \text{const}\,D\sqrt{\frac{\rho\sigma^2}{E}}, \tag{8}$$

где D — коэффициент самодиффузии.

Вычислим критическую длину трещин, следуя работе [7], — выражение (5) для некоторых монокристаллов. Заметим, что для монокристаллов понятие структурного элемента проблематично. Данные констант материалов взяты из работы [8]. Результаты приведены в таблице.

Постоянная $\approx 0.5-1$ (const выражения (8)) не вносит больших изменений в результат.

В случае заведомо высоких температур, близких к температуре плавления, величины l_{cr} должны определяться с учетом коэффициента самодиффузии. Вместе с тем коэффициенты самодиффузии D [9] имеют величины порядка: $10^{-16}-10^{-20}\,\text{cm}^2/\text{s}$, поэтому в выражениях правые члены не дают вклада в общую сумму.

Полученные значения критических длин трещин необходимо учитывать в величинах J-интегралов.

Конкретные значения длин трещин для иридия содержатся в работе [11] — исследования проводились в тонких фольгах (на просвет) в электронном микроскопе. Критическая длина трещины для иридия в фольге была примерно равной $\sim 30\,\mu$m, для рутения — $30-50\,\mu$m, для алюминия, покрытого галлием, — $\approx 50\,\mu$m (также из [10]). Расчет по выражению (6) дает для алюминия более высокую оценку длины трещины $\approx 440\,\mu$m. Вместе с тем некоторое несовпадение с теорией связано, по-видимому, с добавкой галлия, сведения о теплопроводности которого отсутствуют.

Представленные результаты [10] служат подтверждением теоретического подхода, разработанного в [7]. Косвенным подтверждением служат и результаты исследований развития трещин в оксиде магния [11] и никеле [12]. К сожалению, в первом случае (MgO) отсутствуют точные данные по теплопроводности и отмечается значительный ее разброс, во втором (Ni) длину трещины оценивают, считая ее равной расстоянию между группами краевых дислокаций.

Более точные данные по константам материалов, в особенности температуропроводности чистых монокристаллов, теплоемкости, в сочетании с электронно-микроскопическими исследованиями фольг из них, только бы уточнили описанный подход.

Теоретический подход, разработанный в работе [8] для оценки критических длин трещин при разрушении твердого тела, имеет физически ясное и строгое представление и подтверждается в независимых экспериментах.

Автор благодарен академику РАН И.И. Новикову за обсуждение и поддержку.

Список литературы

[1] *Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов. М.: Машиностроение, 1974. Т. 2. 368 с.

[2] Вязкость разрушения высокопрочных материалов / Пер. с англ. М.Л. Бернштейна. М.: Металлургия, 1973. 304 с.

[3] Standart methods of test for plane-strain fracture thoughness of metallic material. ASTM E 399-72 // Book of ASTM standats. 1972. Pt. 31. P. 955.

[4] *Rooke D.P., Cartwright D.J.* Compendium of stress-intensity factors. London, 1976.

[5] *Баренблатт Г.И.* // ПММ. 1964. Т. 28. Вып. 4. С. 630–643.

[6] *Райс Дж.* Разрушение / Под ред. Г. Либовиц. М.: Мир, 1975. Т. 2.

[7] *Новиков И.И.* // Физико-механические и теплофизические свойства металлов. К 60-летию И.И. Новикова. М., 1976. 216 с.

[8] Химическая энциклопедия / Под ред. И.Л. Кнунянц. М.: Советская энциклопедия, 1990.

[9] *Ван Флек Л.Х.* Теоретическое и прикладное материаловедение. М.: Атомиздат, 1975.

[10] *Панфилов П.Е.* Хрупкое разрушение монокристаллов чистых металлов с гранецентрированной кубической решеткой. Автореф. к.ф.-м.н. Екатеринбург, 1993.

[11] *Stokes R.J., Johnston T.L., Li C.H.* // Phil. Mag. 1958. Vol. 3. N 31.

[12] *Мадер С.Ф.* Электронная микроскопия и прочность кристаллов. М.: Металлургия, 1968. 520 с.