

Краткие сообщения

05

О критериях разрушения материалов

© Л.С. Кремнёв

Московский государственный технологический университет „СТАНКИН“,
127055 Москва, Россия
e-mail: KremnevLS@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 9 июля 2015 г. В окончательной редакции 27 мая 2016 г.)

На основе нелинейной механики разрушения материала построена модель разрушения материалов реального (дискретного) строения. В основе модели находятся доказательства того, что силовым и энергетическим критериями нелинейной механики разрушения являются трещиностойкость K_{1c} и вязкость разрушения G_{1c} , полученные на основе закона сохранения энергии и без допущений, принятых в линейной механике разрушения материала. Показано, что энергетический критерий G_{1c} нелинейной механики значительно больше, чем G_{1c} линейной механики разрушения.

DOI: 10.21883/JTF.2017.01.44032.1515

Считается, что основу современных расчетов на прочность несущих изделий и конструкций составляет линейная механика разрушения (ЛМР). Базовыми в ЛМР являются уравнения силового (K_{1c}) и энергетического (G_{1c}) критериев разрушения материала, которые считаются эквивалентными:

$$K_{1c} = c\sigma\sqrt{\pi l}, \quad (1)$$

$$G_{1c} = K_{1c}^2/E, \quad (2)$$

где K_{1c} — критический коэффициент интенсивности напряжения (ККИН) или трещиностойкость (ТС), σ — разрушающее напряжение образца с трещиной длины l , c — коэффициент, зависящий от формы образца и условий испытания, G_{1c} — вязкость разрушения, E — нормальный модуль упругости.

Приведенные критерии разрушения были получены с привлечением следующих допущений ЛМР.

1. Разрушаемый материал является упругим, т.е. его относительная деформация прямо пропорциональна приложенному напряжению. Поэтому механика разрушения, в основе которой находится такое условие, названа линейной — ЛМР.

2. Материал имеет сплошное, а не дискретное, т.е. не атомное строение.

3. Радиус закругления вершины трещины $\rho \rightarrow 0$, а напряжение в ее вершине $\sigma_y \rightarrow \infty$.

Перечисленные допущения делают физическую модель разрушения, на которой строится получение ее критериев ЛМР, весьма далекой от условий эксплуатации и исследования реальных материалов и характера их разрушения.

Кроме того, размерность критерия K_{1c} [$\text{Па} \cdot \text{м}^{1/2}$] в отличие от размерностей значений других свойств конструкционных и инструментальных материалов не отражает достаточно четко его смыслового содержания.

В связи с этим уместно процитировать известного специалиста в области механики разрушения Дж.Ф. Нотта: „Физический смысл параметра K трудно воспринимается, особенно из-за его размерности ($\text{stress} \times \sqrt{\text{long}}$), которую сложно физически себе представить“ [1].

Рассмотрим пластину толщиной δ из необязательно упругого материала, которая нагружена растягивающим напряжением σ (рис. 1). Положим, что в пластине образовалась боковая трещина длиной l и раскрытием a (рис. 2). Непосредственной причиной образования трещины является разрушающее напряжение в ее вершине ($\sigma_y - \sigma$), тогда как опосредованно она образуется под воздействием напряжения σ , $\sigma_y > \sigma$ благодаря концентрирующему влиянию вершины трещины. В соответствии с законом сохранения энергии для равновесного состояния системы значения энергий разрушения W_y и W сил P_y и P (рис. 1, 2), равны. Определим значения W_y , W и приравняем их.

Энергия разрушения W_y определяется выражением

$$W_y = P_y \cdot S_y, \quad (3)$$

где S_y — перемещение (раскрытие) трещины (a) под воздействием силы P_y по направлению оси „Y“.

Обратим внимание (рис. 2) на то, что напряжение ($\sigma_y - \sigma$) лежит, как и сила P_y , в плоскости площадки размерами $\delta \times \Delta$. Δ — наименьшее расстояние, на которое необратимо расходятся при разрушении края трещины в ее вершине (рис. 2). Естественно, что в материале реального дискретного строения Δ равно межатомному расстоянию (b). Таким образом, отмеченное напряжение является напряжением сдвига материала площадки. Поэтому сила сдвига P_y равна (рис. 2)

$$P_y = 1/2(\sigma_y - \sigma)\delta\Delta, \quad (4)$$

где ($\sigma_y - \sigma$) — разрушающее напряжение. Действительно, при $\sigma \rightarrow \sigma_y$ оно стремится к нулю, и пластина

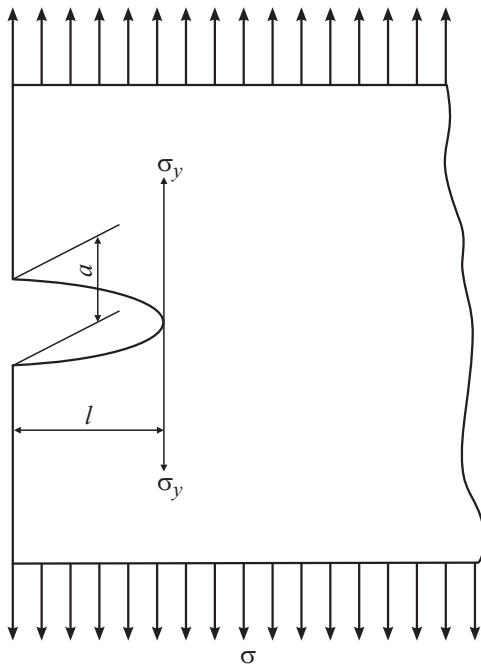


Рис. 1. Пластина толщиной δ с боковой трещиной длиной l и шириной (раскрытием) a , нагруженная напряжением σ ; $(\sigma_y - \sigma)$ напряжение в вершине трещины, $\sigma_y > \sigma$.

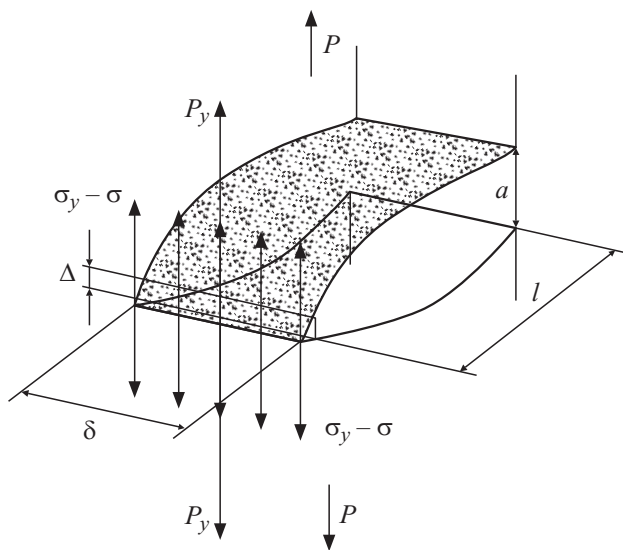


Рис. 2. Схема трещины на рис. 1; Δ — наименьшее необратимое расхождение трещины в ее вершине под воздействием разрушающего напряжения $(\sigma_y - \sigma)$.

остается неразрушенной, но под воздействием напряжения σ . Благодаря увеличению напряжения σ и росту трещины разрушающее напряжение увеличивается от 0 до $(\sigma_y - \sigma)$. Следовательно, средняя величина напряжения, разрушающего пластину, равна $0.5(\sigma_y - \sigma)$. Отмеченное обстоятельство учтено в (4) коэффициентом 1/2.

Таким образом:

$$W_y = 1/2(\sigma_y - \sigma)\delta\Delta a, \quad (5)$$

где $a = \Sigma\Delta = S_y$ (критическое раскрытие трещины КРТ в момент разрушения пластины).

Энергия W определяется как

$$W = P \cdot \Delta = \sigma l \delta. \quad (6)$$

Приравняв (5) и (6), получим

$$(\sigma_y - \sigma)a = 2\sigma l. \quad (7)$$

Левая часть уравнения (7) является джей-интегралом J_{1c} Райса [2,3]. По Райсу для боковой трещины $J_{1c} = \sigma_0 \times \delta_k$, где σ_0 — разрушающее напряжение в вершине трещины, $\sigma_0 = (\sigma_y - \sigma)$, δ_k — раскрытие боковой трещины ($\delta_k = a$). Правая часть (7) является вторым выражением J_{1c} -интеграла:

$$J_{1c} = 2\sigma l, \quad (8)$$

J_{1c} — интеграл, J/m^2 , как известно, равен энергии, необходимой для образования единичной площади поверхности, возникающей в результате распространения трещины при разрушении упругопластического материала, т.е. материала реального строения. Таким образом, J_{1c} — интеграл является вязкостью разрушения G_{1c} , J/m^2 , т.е. удельной энергии разрушения или энергетическим критерием нелинейной механики разрушения материала (НЛМР). Это заключение также следует из того факта, что выражения J_{1c} -интеграла (7) и (8) были получены авторами на основе закона сохранения энергии и без привлечения положений (ЛМР).

Обратим внимание на то, что из (7) следует уравнение

$$\sigma_y = \sigma(1 + 2l/a), \quad (9)$$

а из него уравнение

$$\sigma_y = \sigma(1 + 2\sqrt{l/\rho}). \quad (10)$$

Это уравнение, как известно [3], справедливо для трещины, на контуре которой существует точка с небольшим радиусом кривизны ρ . Уравнения (9) и (10) давно и хорошо известны в механике разрушения реальных материалов и полностью себя оправдывают на практике.

Отметим также, что величина джей-интеграла $J_{1c} = G_{1c} = 2\sigma l$ вычисляется по результатам одного и того же стандартного эксперимента с целью определения силового критерия $K_{1c} = 2\sigma\sqrt{l}$, тогда как величину $J_{1c} = G_{1c} = (\sigma_y - \sigma)a$ получить экспериментально весьма сложно [4], если вообще возможно.

Запишем уравнение (8) в виде

$$G_{1c} = J_{1c} = 2\sigma l = 2\sigma\sqrt{l}\sqrt{l} = K_{1c}\sqrt{l}. \quad (11)$$

Из уравнения (11) получим

$$K_{1c} = G_{1c}/\sqrt{l}. \quad (12)$$

Так как сомножитель G_{1c} правой части (12) является энергетическим критерием нелинейной механики разрушения, то силовой критерий $K_{1c} = 2\sigma\sqrt{l}$ левой части так же является критерием нелинейной механики разрушения материала.

Напомним, что силовой критерий $K_{1c} = 2\sigma\sqrt{l}$ (1) был получен для хрупкого разрушения, т.е. в условиях линейной механики разрушения. Однако он с успехом применяется и в случае упругопластического разрушения, т.е. в условиях нелинейной механики разрушения. Этот неожиданный результат объясняется образованием у вершины трещины тонкого слоя толщиной ∇ пластически деформированного материала, в присутствии которого последний переходит в квазихрупкое состояние, и поэтому асимптотические формулы ЛМР еще действительны [3]. Обычно ограничивают размер тонкого слоя ∇ , который не должен превышать 20% длины трещины [5]. Однако значение K_{1c} (уравнение 1) широко и успешно используется и для определения критической длины трещины l_{cr} многочисленных конструкционных материалов реального строения, в которых началу быстрого распространения трещины предшествует формирование пространной зоны пластически деформированного материала. К таким материалам относятся, например, высокоотпущенные конструкционные стали. Линейный размер ∇ зоны пластического деформирования у вершины краевой трещины непосредственно перед ее распространением в условиях плоскодеформированного состояния равен [4]

$$\nabla = (1/3\pi)(K_{1c}/G_{0,2})^2. \quad (13)$$

Из зависимости $K_{1c} = 2\sigma\sqrt{l}$ получим

$$l_{cr} = 0.25(K_{1c}/G_B)^2. \quad (14)$$

Используя (13) и (14), найдем относительный размер ∇ зоны пластического деформирования у вершины краевой трещины непосредственно перед разрушением материала

$$\nabla/l_{cr} = 0.42(G_B/G_{0,2})^2. \quad (15)$$

С помощью уравнения (15) оценим отношение ∇/l_{cr} у распространенной конструкционной стали 40X. После стандартной термической обработки твердость стали 30–32HRC, σ_B и $\sigma_{0,2}$ равны 1030 и 800 МПа [6] соответственно. В соответствии с уравнением (15) протяженность пластической зоны у вершины трещины в стали 40X составляет 70% ее длины. У стали 3 размер этой зоны, выявленной экспериментально [6], заметно превышает длину трещины. Указанные значения ∇/l_{cr} значительно превосходят допустимую величину тонкого слоя δ_k , которая, как было отмечено, не должна превышать 20% l_{cr} .

Таким образом, объяснение того, что законы ЛМР распространяются и на упругопластические материалы вследствие того, что последние переходят в квазихрупкое состояние благодаря образованию тонкого деформированного δ_k -слоя в вершине трещины, выглядит

недостаточно убедительно. Вместе с тем полученное доказательство того, что силовой критерий разрушения $K_{1c}(TC)$ (I) является критерием не только упругого, но и упругопластического разрушения материала, т.е. НЛМР, естественным образом объясняет сложившуюся ситуацию.

Имея в виду, что $K_{1c} = 2\sigma\sqrt{l}$, получим из (11):

$$G_{1c} = J_{1c} = 2\sigma l = (K_{1c})^2/2\sigma. \quad (16)$$

Полученный энергетический критерий нелинейной механики разрушения материала на несколько порядков величины больше энергетического критерия линейной механики разрушения $G_{1c} = (K_{1c})^2/E$ (2). Действительно, например, у стали 40X после улучшения $\sigma_B \sim 1000$ МПа, а нормальный модуль упругости $E \sim 220\,000$ МПа. Следовательно, $G_{1c}(J_{1c})$ больше, чем $G_{1c} = (K_{1c})^2/E$ (2) примерно в 100 раз. Вместе с тем рассмотрение процесса разрушения на представленной модели трещины (рис. 1, 2) позволяет исключить допущения того, что радиус закругления вершины трещины в пластине из материала реального строения $\rho \rightarrow 0$, а напряжение в ее вершине $\sigma_y \rightarrow \infty$. Действительно, в таком материале ρ не может быть меньше межатомного расстояния b , а σ_y быть больше теоретического предела прочности $\sigma_{theor} \sim 0.1E$. Как следствие этого обстоятельства, оказалось, что трещиностойкость материала с тупой трещиной заметно больше (на 13%), чем с острой: $1.13\sigma\sqrt{l}$ (уравнение (13)) и $\sigma\sqrt{\pi l}$ [7] соответственно. Это следует учитывать, если значения K_{1c} , приведенные в справочной литературе относятся к трещинам с $\rho \rightarrow 0$. Из уравнения (12) найдем размерность силового критерия НЛМР: K_{1c} , $J/m^2/m^{1/2}$. Таким образом, физическое содержание силового критерия НЛМР трещиностойкости K_{1c} не очевидно. Поэтому, по мнению автора, целесообразно повсеместно перейти от силового к более простому для восприятия энергетическому критерию НЛМР вязкости разрушения $G_{1c} = J_{1c} = 2\sigma l$, J/m^2 . Напомним, что результаты одного стандартного эксперимента позволяют определить как силовой, так и энергетический критерии НЛМР.

Заключение

1. Построена модель распространения трещины, т.е. упругопластического разрушения материала реального дискретного строения с трещиной.

2. Основу модели составляет уравнение НЛМР, которое устанавливает эквивалентные силовой и энергетический критерии разрушения материалов реального строения.

3. Показано, что трещиностойкость $K_{1c} = 2\sigma\sqrt{l}$, как таковая, и вязкость разрушения $G_{1c} = J_{1c} = 2\sigma l = (K_{1c})^2/2\sigma$ являются соответственно силовым и энергетическим критериями НЛМР.

4. Критерий $G_{1c} = (K_{1c})^2/E$ является энергетическим критерием ЛМР и существенно меньше $G_{1c} = J_{1c}$.

Список литературы

- [1] *Нотт Дж.Ф.* Основы механики разрушения. М.: Металлургия, 1978. 255 с.
- [2] *Rice J.R.* Fracture — An Advanced Treatise. NY: Academic Press, 1968.
- [3] *Партон В.З.* Механика разрушения от теории к практике. М.: Наука, 1990. 238 с.
- [4] *Херцберг Р.В.* Деформация и механика разрушения конструкционных материалов. М.: Металлургия. 1989. 575 с.
- [5] *Пестриков В.М., Морозов Е.М.* Механика разрушения твердых тел. СПб.: Профессия, 2002. 300 с.
- [6] Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие. Т. 3. Киев: Наукова думка, 2001. 434 с.
- [7] *Orovan E.* Rept. Prog. Phys. 1949. Vol. 12. P. 185–232.