

УДК 538.1

А. И. Давиденко, д-р техн. наук, проф., **А. А. Давиденко**, канд. техн. наук, доцент,
М. А. Давиденко, канд. техн. наук, доцент.

Луганский государственный аграрный университет, ЛНР

Тел./Факс: +38 (072) 1794798; E-mail: alikdave@outlook.com

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ 15Х2МФА НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРА НЕУСТОЙЧИВОГО РОСТА ТРЕЩИНЫ

Приведено определение параметра неустойчивого роста трещины на основе подобия распределения напряжений в вершине трещины и на спадающем участке полной диаграммы деформирования стали в условиях предельно жесткого нагружения и использования положений А. Гриффитса о минимуме потенциальной энергии. Проверка предложенного критерия выполнена для диаграмм испытаний конструкционной стали 15Х2МФА.

Ключевые слова: неустойчивый рост трещины, конструкционная сталь, вязкость разрушения, энергия деформации.

A. I. Davydenko, A. A. Davydenko, M. A. Davydenko

EVALUATION OF THE CRACK RESISTANCE OF 15X2MF STRUCTURAL STEEL BASED ON THE PARAMETER OF UNSTABLE CRACK GROWTH

Determination of the parameter of unstable growth of cracks is given on the basis of similarity of the stress distribution at the tip of the crack and in the falling section of the complete steel deformation diagram under conditions of extremely hard loading and using the A. Griffith positions to minimize the potential energy. The verification of the proposed criterion is carried out for the A-3 structural steel test diagram (manufactured in China) and steel 15X2MFA.

Keywords: unstable crack growth, structural steel, fracture toughness, deformation energy.

1. Введение. Оценка размера зон пластичности, а также распределение в них напряжений является одним из основных вопросов механики разрушения. Наряду с известными работами в этой области [1–4], существуют исследования о подобии характера распределения напряжений в вершине трещины и на спадающем участке полной диаграммы деформирования стали в условиях предельно жесткого нагружения [5], рис. 1. Данные исследования относятся к оценке вязкости разрушения с использованием полных диаграмм деформаций малогабаритных образцов.

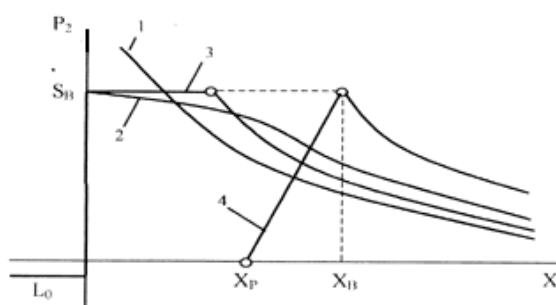


Рисунок 1. Эпюры напряжений на продолжении трещины: 1 – решение линейной задачи; 2 – гипотеза о силах сцепления [2]; 3 – решение Дагдейла [4]; 4 – равновесная диаграмма напряжений [5].

Расчет реальной конструкции с плоской сквозной трещиной длиной l включает определение коэффициента интенсивности напряжений: $K_1 = \sigma \sqrt{\frac{\pi l}{2}}$, где l – длина трещины; σ – действующие напряжения в элементе конструкции.

Критерий хрупкого разрушения $K_1 = K_{1c}$ определяет критический размер трещины: $l_c = \frac{2K_{1c}^2}{\pi\sigma^2}$. Для определения критических характеристик вязкости разрушения: коэффициента интенсивности напряжений (K_{1c}), критической ширины раскрытия трещины (δ_{1c}), критического значения J -интеграла (J_{1c}) используются плоские образцы с искусственным надрезом при условии равенства толщины образца и исследуемого элемента конструкции.

Использование традиционных методов испытания стали для определения критических характеристик вязкости разрушения (K_{1c} , δ_{1c} , J_{1c}) связано с определенными трудностями. Для определения K_{1c} сталей с высокой вязкостью разрушения требуются образцы больших габаритов и специальное оборудование. Параметр K_{1c} можно получить с помощью образцов меньших размеров с использованием J -интеграла. Однако, возможности пересчета J_{1c} в K_{1c} для сталей низкой прочности ограничены [8] и сложно фиксировать скачок трещины. Определение критического раскрытия трещины связано со сложными прецизионными испытаниями.

При оценке вязкости разрушения конструкций по данным испытаний малогабаритных образцов используется физический параметр плотности энергии разрушения $\lambda = \frac{P \cdot \Delta l_p}{2 \cdot F_k}$ (удельная работа развития трещины), рис. 2. Работа разрушения

деформированного образца состоит из двух частей. Одна часть работы расходуется на образование новой поверхности разделения, другая часть, запасается при деформировании в виде упругой потенциальной энергии и в момент разрыва рассеивается в виде тепла.

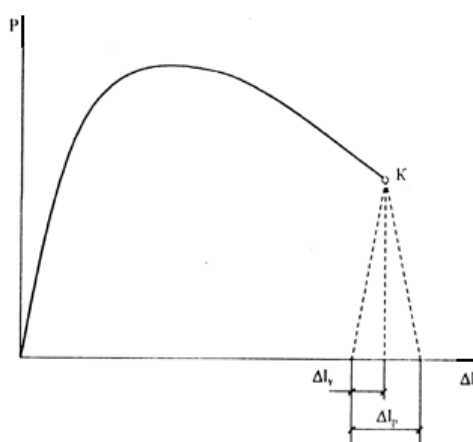


Рисунок 2. Диаграмма " $P - \Delta l$ " пластичного материала.

Результаты испытаний малогабаритных образцов конструкционных сталей показали, что момент образования макротрещины характеризуется началом линейного участка спадающей ветви полной диаграммы деформаций " $P - \Delta l$ ". Дальнейшее раз-

витие трещины до критического размера происходит при постоянном снижении напряжений. Для материалов с вязким характером деформирования и разрушения начало неустойчивого развития трещины не совпадает с моментом ее образования (в отличие от хрупких материалов).

Цель исследований: разработка метода определения параметра неустойчивого роста трещины с использованием положений А. Гриффитса о минимум потенциальной энергии [6] и выполнения условия равновесия после начала разрушения на спадающих участках равновесных диаграмм деформирования пластического материала.

Задачи исследований: вычисление значений критической ширины раскрытия и длины трещины и на их основе определение критических коэффициентов интенсивности напряжений в момент неустойчивого роста макротрещины для конструкционных сталей.

Основное содержание и результаты работы Ниже приведено определение параметра неустойчивого роста трещины с использованием положений А. Гриффитса о минимуме потенциальной энергии. Использование теоремы минимума энергии становится невозможным, если не установлен закон, связывающий поверхностную энергию с расстоянием между поверхностями. Поэтому возникает задача установления зависимости поверхностной энергии от ширины раскрытия трещины, которую можно определить по диаграмме " $P - \Delta l$ " при условии, что после образования трещины перемещение образца происходит только за счет ширины раскрытия трещины (имеется в виду ширина раскрытия средней части трещины, а не ее вершины).

Изменение полной энергии образца и ее составляющих после момента образования трещины при увеличении ширины раскрытия (рис. 3) представим в виде:

$$u - u_0 = -\frac{\Delta l_y}{\Delta l_n} \cdot S_1 \left(\delta - \frac{\delta^2}{2\Delta l_n} \right) + \frac{S_1 \cdot \delta^2 \cdot \Delta l_p}{2 \cdot \Delta l_y \cdot \Delta l_n}, \quad (1)$$

где первое слагаемое представляет уменьшение упругой энергии, второе слагаемое учитывает образование двух поверхностей трещины, рис. 3.

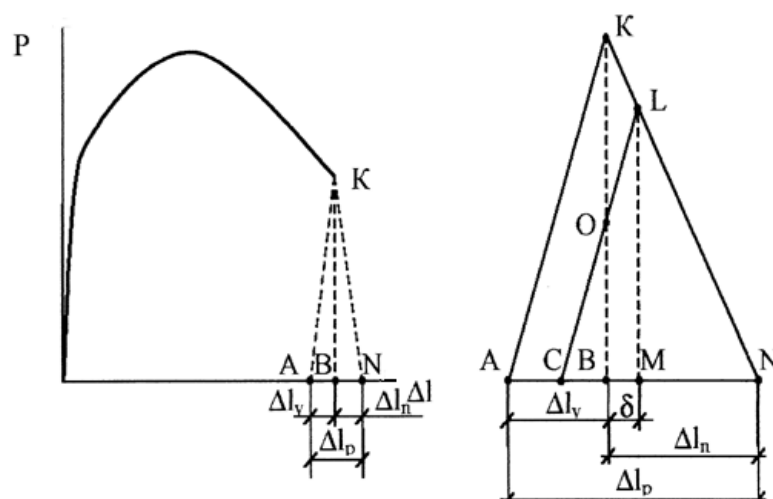


Рисунок 3. К определению параметра неустойчивого развития трещины пластического материала.

В момент образования трещины (точка K на рис. 3) деформирование осуществляется за счет увеличения ширины раскрытия трещины. Трещина в вязком материале

вначале раскрывается и затем при достижении определенного значения ширины трещины (δ) оба ее конца расходятся на некоторое расстояние (устойчивый рост). Если в этот момент снять нагрузку, то можно получить образец с выращенной трещиной, рис. 4.

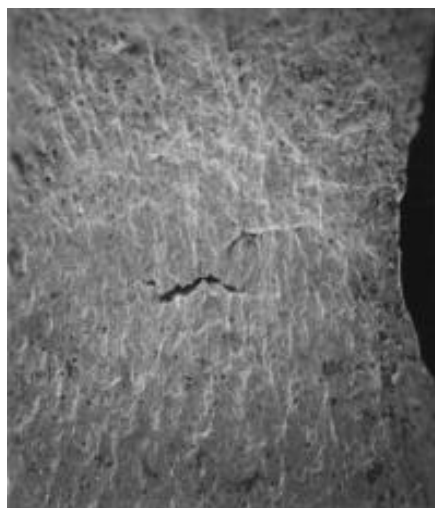


Рисунок 4. Образец конструкционной стали с выращенной трещиной на спадающем участке кривой деформаций.

Продолжение деформирования приводит к достижению критического значения ширины раскрытия, соответствующего неустойчивому росту трещины. Переход от устойчивого к неустойчивому росту трещины происходит при постоянном уменьшении энергии деформации, которая переходит в энергию возникновения новых поверхностей, но более медленно для вязкого материала. Поэтому зависимость энергии возникновения новых поверхностей имеет нелинейный характер, рис. 5.

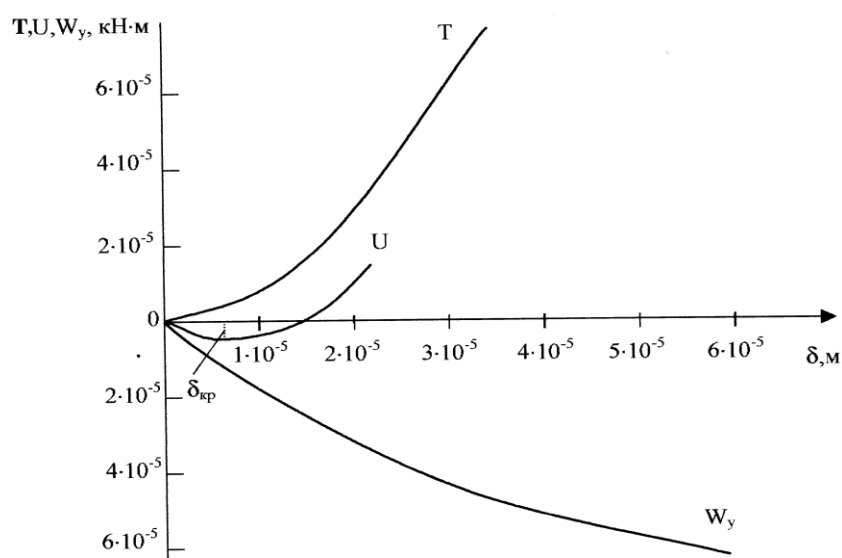


Рисунок 5. Изменение энергии образца в зависимости от ширины раскрытия трещины.

На рис. 5 зависимость " $T - \delta$ " представляет энергию образования новой поверхности растущей трещины. Кривая " $W_y - \delta$ " представляет энергию, которая освобождается при достижении трещиной определенного размера. Общий баланс энергии является алгебраической суммой двух перечисленных энергий и представлен кривой " $U - \delta$ ".

Точка δ_{kp} на рис. 5 характеризует момент неустойчивому росту трещины. До точки δ_{kp} , система поглощает энергию; после точки δ_{kp} энергия начинает выделяться из системы. Следовательно, рост трещины до размера δ_{kp} не представляется опасным, а величина ширины раскрытия трещины равная δ_{kp} соответствует началу неустойчивого роста трещины.

Величина ширины раскрытия, соответствующая неустойчивому росту трещины, определяется из условия:

$$\frac{du}{d\delta} = 0 \quad -\frac{\Delta l_y}{\Delta l_n} S_1 + S_1 \frac{\Delta l_y}{\Delta l_n^2} \delta + \frac{S_1 \cdot \Delta l_p \cdot \delta}{\Delta l_y \cdot \Delta l_n} = 0; \quad (2)$$

откуда

$$\delta_{cr} = \frac{\Delta l_y^2 \cdot \Delta l_n}{\Delta l_y^2 + (\Delta l_n \cdot \Delta l_p)}; \quad (3)$$

или с учетом $C = \frac{S_1}{\Delta l_y}$, критическая ширина раскрытия трещины будет равна:

$$\delta_{cr} = \frac{S_1^2}{S_1^2 + C^2 \cdot \Delta l_n \cdot \Delta l_p}. \quad (4)$$

В примере, представленном на рис. 5, значение критической ширины раскрытия трещины для образцов с радиусом концентратора $R = 3 \text{ мм}$ составило: $\delta_{cr} = 0.00873 \text{ мм}$.

Таким образом, существуют, по крайней мере, два параметра на спадающей кривой деформирования " $P - \Delta l$ ", первый из которых характеризует момент образования и начала устойчивого роста трещины (точка K), и второй – соответствующий моменту неустойчивого развития трещины (точка L), после которого происходит смена механизма развития трещины. Следовательно, для пластичных материалов период медленного роста трещины, начиная с момента начала и до момента ее лавинообразного распространения ограничен между параметрами K и L .

Проведенные опыты, а также другие исследования свидетельствуют, что увеличение ширины раскрытия трещины (δ) связано и с ростом длины трещины на спадающем участке (KL) диаграммы " $P - \Delta l$ ". Тогда, учитывая, что к моменту образования трещины материал является полностью хрупким и впереди растущей трещины зона пластической деформации не обнаружена, решение задачи по определению критической длины трещины может быть выполнено с использованием зависимости Инглиса, рис. 6:

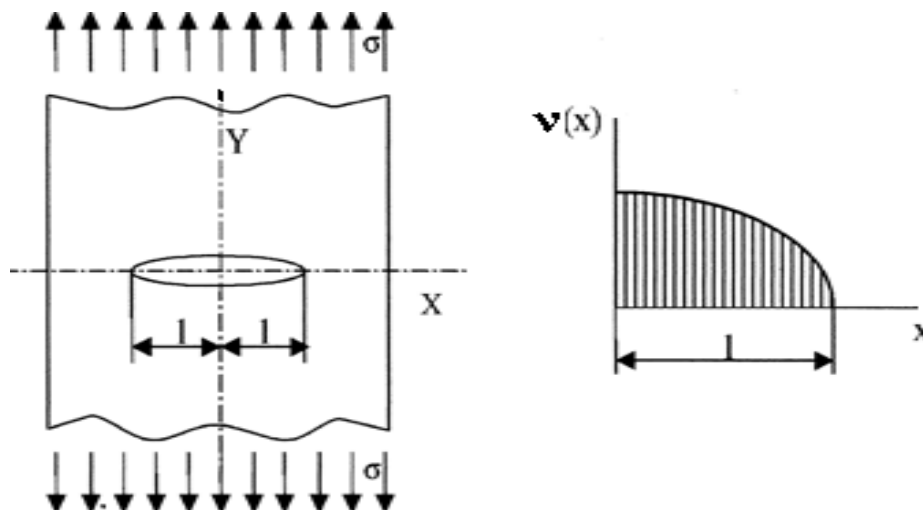


Рисунок 6. К определению критического размера длины трещины.

$$v(x) = \frac{2 \cdot \sigma}{E} \sqrt{l^2 - x^2}, \tag{5}$$

где $v(x) = \frac{\delta(x)}{2}$.

В уравнении (5) напряжение, характеризующее сопротивление сечения, представим в виде:

$$\sigma = \frac{P_{кр}}{(a - 2l) \cdot b}, \tag{6}$$

где $P_{кр}$ – усилие, определяемое по диаграмме "P – Δl" для соответствующего значения $\delta_{кр}$;

a, b – геометрические размеры шейки образца в момент появления трещины (в т. К на диаграмме "P – Δl").

Из уравнения (5) при ширине раскрытия в середине трещины (x=0) получим значение критического размера трещины:

$$l_{кр} = \frac{\delta_{кр} \cdot E}{4 \cdot \sigma_k}; \tag{7}$$

или с учетом (6):

$$L_{кр} = 2 \cdot l_{кр} = \frac{\delta_{кр} \cdot E \cdot a \cdot b}{2P_{кр} + \delta_{кр} \cdot b \cdot E}. \tag{8}$$

В примере, представленном на рис. 5, критическая длина трещины составила 0,88 мм при ширине раскрытия $\delta_{кр} = 0.00873$ мм.

Экспериментальные исследования были проведены на образцах из конструкционной стали. Для проверки предложенного критерия использовались также экспери-

ментальные диаграммы, полученные для корпусных сталей 15X2МФА в разных состояниях [7].

Характеристики ширины раскрытия и длины трещины мартенситно-старееющей стали 15X2МФА в момент ее неустойчивого развития приведены в табл.1. Длина трещины оказалась сопоставима с результатами металлографических исследований на участке роста трещины, что свидетельствует о достоверности представленного критерия.

Таблица 1. – Механические характеристики и критические размеры трещин цилиндрических образцов стали 15X2МФА, вычисленные по диаграммам деформаций « $P - \Delta l$ » в момент образования макротрещины (т. К, рис. 3)

Тип образца	$\Delta l_p, мм$	$S_k, кН / мм^2$	$P_k, кН$	$F_k, мм^2$	$\delta_{кр}, мм$	$l_{кр}, мм$
Гладкий	0.480	1.4685	25.07	17.07	0.00186	0.128
R20	0.600	1.4666	30.00	20.45	0.00265	0.181
R10	0.760	1.5118	41.17	27.23	0.00327	0.216
R4	0.850	1.5480	55.00	35.52	0.00802	0.489

Предложенный деформационный критерий может быть полезен для определения критического коэффициента интенсивности напряжений K_{1c} , полагая, что K_{1c} является константой материала и его значение не зависит от того, с какой длиной трещины испытывается пластина. При обеспечении в опытах хрупкого разрушения после роста трещины до критического размера:

$$K_{1c} = \sigma_k \cdot f_{1k} \cdot \sqrt{\pi \cdot l_{кр}}, \tag{9}$$

где σ_k – номинальное разрушающее напряжение, вычисляемое по брутто-сечению в т. К диаграммы "P – Δl", т.е. без учета в сечении трещины: $\sigma_k = P / (ab)$;

$l_{кр}$ – полудлина трещины, определяемая по (7) в отличии от принятой условной длины $l_1 = l [1 + 0.5(\sigma_k / \sigma_T)^2]$;

f_{1k} – поправочная функция, учитывающая отношение длины трещины к ширине пластины:

$$f_{1k} = \sqrt{\frac{2B}{\pi l_{кр}} \cdot \text{tg} \left(\frac{\pi l_{кр}}{2B} \right)}.$$

Вычисление критических коэффициентов интенсивности напряжений в момент неустойчивого роста макротрещины для стали 15X2МФА по данным [7] приведено в табл. 2.

Таблица 2. – Критические параметры трещин плоских образцов, вычисленные по диаграммам деформаций « $P - \Delta l$ » и механические свойства стали 15X2МФА в момент неустойчивого роста трещины (т. L, рис. 3)

Тип образца	Условия испытаний	$\delta_{кр}$, мм	$l_{кр}$, мм	$\sigma_{кр}$, кН / мм ²	f_{lk}	K_{Ic} , МН / М ^{3/2}
Гладкий R20 R5	Статические	0.00738	0.315	2.7626	1.0012	60.4
		0.0058	0.213	2.4685	1.008	44.37
		0.00703	0.181	3.5949	1.001	53.57

Заключение. Полученные значения характеристик вязкости разрушения, приведенные в табл. 1, 2, соответствуют области разброса для коэффициентов интенсивности напряжений, получаемых известными методами. Полученные результаты требуют дальнейшего развития, например, для учета эффектов концентрации напряжений, влияния количества циклов нагружения, агрессивной среды при установлении предела вязкости разрушения.

Таким образом, испытания на основе полных диаграмм деформаций малогабаритных образцов позволяют определять значения критической ширины раскрытия, длины трещины и на их основе вычислять критические коэффициенты интенсивности напряжений в момент неустойчивого роста макротрещины. Появляется возможность выращивать усталостную трещину на образцах конструкционных сталей без надреза, что значительно сокращает трудоемкость проведения и стоимость подобных исследований.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Irvin, G. R. Trans. ASME / Irvin G. R // Journal of Applied Mechanics. – 1957. Vol. 24. – № 6. – P. 361—369.
2. Панасюк, В. В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами / Панасюк В. В. – Київ. Наукова думка. 1968. – 246 с.
3. Dugdale, D. S. Yielding of steel sheets containing stils / Dugdale D. S. // Journal Mechanics and Physics Solids. – 1960. – Vol 8. – №2. – P. 100—108.
4. Баренблатт, Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении / Баренблатт Г. И // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1961. – № 4. – С. 3-56.
5. Волков, С. Д. О краевой задаче механики разрушения / Волков С. Д., Дубровина Г. И., Соковнин Ю. П. // Проблемы прочности. – 1978. – № 1. – С. 3-7.
6. Ярема, С. Я. Физико-химическая механика материалов / С. Я. Ярема, А. А. Гриффитс (1883–1963). – 1993. – № 3. – С. 7-13.
7. Лебедев, А. А. Влияние вида напряженного состояния на кинетику разрушения и трещиностойкость мартенситностареющей стали. Сообщение. 2. Оценка трещиностойкости стали / Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Зайцева Л. В. // Проблемы прочности. – 1991. – № 8. – С. 14-18.
8. Махутов, Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н. А. Махутов. – Москва. Машиностроение. – 1981. – 272 с.

Поступила в редколлегию 10.03.2022г.