

## Подходы механики разрушения к анализу допустимых дефектов в виде надрезов

Ю. Г. Матвиенко

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*Оценка конструкционной прочности элементов, поврежденных дефектами типа надрезов, выполнена с использованием уравнения диаграммы трещиностойкости, основанного на критерии осреднения напряжений в зоне предразрушения и учете стеснения деформаций у вершины надреза. Допустимое (безопасное) состояние поврежденного дефектом элемента определено посредством введения в критериальное уравнение коэффициентов безопасности.*

**Ключевые слова:** критерий осреднения, диаграмма трещиностойкости, стеснение деформаций, коэффициенты безопасности, допустимый дефект.

**Введение.** Анализ и обоснование безопасного состояния конструкций различного назначения при наличии трещиноподобных дефектов, как правило, основаны на подходах механики разрушения, рассматривающих дефект в виде остроконечной трещины. Вместе с тем большинство технологических и эксплуатационных дефектов имеют конечный радиус скругления вершин. Например, в результате воздействия коррозионно-активной среды на поверхности элементов оборудования реакторной установки (РУ) ВВЭР могут образоваться питтинги, являющиеся концентраторами напряжений и способствующие зарождению трещин. В этом случае для расчетной оценки кинетики разрушения, предельного и безопасного состояния, ресурса элементов оборудования РУ ВВЭР при возникновении трещиноподобных дефектов в результате воздействия механических нагрузок и коррозионно-активных сред целесообразно использовать подходы нелинейной механики разрушения, в том числе подходы, учитывающие конечность радиуса скругления вершины трещиноподобного дефекта.

Перспективность развития подходов классической механики деформирования и разрушения тел с трещинами применительно к телам с вырезами и надрезами обусловлена целесообразностью неконсервативной оценки критического и безопасного состояний машин и конструкций при наличии в них дефектов с ненулевым радиусом скругления вершины дефекта. При этом соответствующие критериальные уравнения и уравнения состояния тел с вырезами и надрезами позволяют устранить существующий разрыв между подходами классической механики разрушения и подходами, основанными на коэффициентах концентрации напряжений, используемых для описания деформирования и разрушения тел с концентраторами напряжений.

В настоящей работе методика оценки допустимого размера дефекта с помощью критериального уравнения диаграммы трещиностойкости и коэффициентов безопасности проиллюстрирована на примере протяженного поверхностного U-образного дефекта, расположенного на внешней поверхности вдоль оси обечайки сосуда давления.

**Диаграммы трещиностойкости.** В практике оценки трещиностойкости конструкционных материалов и расчетов конструкций при наличии трещин и дефектов в виде надрезов широко применяются критериальные подходы, основанные на диаграммах трещиностойкости [1–5]. Диаграммы трещиностойкости, как правило, представляют в виде зависимостей нормализованного коэффициента интенсивности напряжений  $K/K_{mat}$  от нормализованной критической нагрузки (или критических нормализованных напряжений  $\sigma_c/\sigma_T$ ). Здесь  $K_{mat}$  – вязкость разрушения, определяемая в условиях максимального стеснения деформаций в вершине трещины ( $K_{Ic}$  или  $K_c$  – в зависимости от вида напряженного состояния);  $K$  – приложенный коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины (или выреза);  $\sigma_T$  – предел текучести.

Отметим, что диаграммы трещиностойкости не являются постоянными материала, а зависят от стеснения деформаций в вершине трещины (или выреза), определяемой геометрией тела, условиями нагружения (растяжение, изгиб и т.п.), а также радиусом скругления вершины выреза [3]. Как правило, эти факторы отдельно учитываются в различных критериальных подходах при построении диаграмм трещиностойкости.

Ниже рассматривается методологически единый подход к построению диаграмм трещиностойкости тел с трещинами и тонкими U-образными вырезами, комплексно учитывающий стеснение деформаций, вызванное вышеуказанными факторами. Критериальные уравнения диаграмм трещиностойкости основаны на критерии осреднения напряжений в зоне предразрушения у вершины трещины (или выреза) и критерии Мизеса для расчета локальной прочности в зоне предразрушения с учетом несингулярной составляющей ( $T$ -напряжения) в распределении упругих напряжений у вершины трещины. Современная трактовка критериев осреднения напряжений основана на сравнении локального напряжения у вершины надреза (трещины) с предельным напряжением (локальная прочность)  $\sigma_0$  материала, в качестве которого в зависимости от модели твердого тела могут быть приняты предел прочности, предел текучести или некоторое эффективное предельное напряжение. Ранее [1–5] локальная прочность  $\sigma_0$  в зоне предразрушения у вершины трещины (надреза) была определена в соответствии с критерием текучести Мизеса и получила название когезионной прочности.

Достоверность модели и предложенных критериальных уравнений диаграмм трещиностойкости подтверждается результатами экспериментов на тонких одноосно растягиваемых пластинах с центральными сквозными трещинами и данными сопоставления с диаграммами трещиностойкости, построенными по методике SINTAP [3].

**Базовое уравнение.** Для анализа допустимых размеров дефектов предложено использовать критериальное уравнение диаграммы трещиностойкости тела с тонким U-образным вырезом с введением в него коэффициента безопасности (запаса)  $m_K$  по трещиностойкости. В этом случае допустимое (или расчетное) напряжение оказывается связанным с допустимым (безопасным) размером дефекта уравнением вида [4]

$$\frac{1}{2} \sqrt{\pi[\rho]} \frac{\sigma_T}{n_T} [K_t] = \frac{K_{mat}}{m_K} \sqrt{1 - \left( \frac{\sigma_T}{n_T} \right)^2} \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_0}{\sigma_T/n_T} \right)^2 \frac{1}{[K_t]^2} \right]^{-1/2}, \quad (1)$$

которое позволяет установить область безопасных состояний конструкции на диаграмме трещиностойкости. В уравнении (1) допустимый коэффициент интенсивности напряжений  $[K_{1notch}]$  в вершине трещиноподобного дефекта представлен в известном виде

$$[K_{1notch}] = \frac{1}{2} \sqrt{\pi[\rho]} [\sigma][K_t],$$

где  $[\sigma] = \sigma_T / n_T$  – допустимое напряжение;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $n_T$  – коэффициент запаса по пределу текучести;  $[K_t]$  – допустимый теоретический коэффициент концентрации напряжений;  $\sigma_0$  – локальная прочность в зоне предразрушения у вершины выреза.

Уравнение (1) посредством теоретического коэффициента концентрации напряжений учитывает уменьшение степени стеснения деформаций у вершины выреза по сравнению с трещиной. В предельном случае, рассматривая трещину как острый вырез ( $K_t \rightarrow \infty$ ), из уравнения (1) получаем критериальное уравнение тела с трещиной и соответствующую допустимую диаграмму трещиностойкости [1–3].

**Локальная прочность в зоне предразрушения.** В общем случае локальная (когезионная) прочность не является постоянной материала, а зависит от степени стеснения деформаций (трехосности напряженного состояния) у вершины трещины (выреза), обусловленной ее размером, геометрией и схемой нагружения тела. Например, в качестве параметра стеснения деформаций у вершины трещины могут быть использованы  $T$ -напряжения, влияющие на локальную прочность  $\sigma_0$  в зоне предразрушения и выраженные через локальный параметр двухосности  $\beta$ .

В случае тел, имеющих конечные размеры и различные схемы нагружения, локальная прочность в зоне предразрушения может быть интерпретирована на основании критерия текучести Мизеса и представлена в следующем виде [3]:

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_T} = -\frac{\beta}{2} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_T} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{\beta \sigma_c}{\sigma_T} \right)^2 - \frac{(1 + \nu^2 - \nu)(\beta \sigma_c / \sigma_T)^2 - 1}{(1 - 2\nu)^2}} \quad (2)$$

для плоской деформации и

$$\frac{\sigma_0}{\sigma_T} = -\frac{\beta}{2} \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_T} \right) + \sqrt{1 - \frac{3}{4} \left( \frac{\beta \sigma_c}{\sigma_T} \right)^2} \quad (3)$$

для плоского напряженного состояния. Параметр  $\beta$  может рассматриваться как мера стеснения деформаций в зоне предразрушения у вершины трещины. Локальный параметр двухосности  $\beta$  табулирован и приведен в виде графиков для тел с различными геометрией и схемами нагружения [1].

Таким образом, локальная прочность  $\sigma_0$  для тел с конечными размерами может быть представлена в функции разрушающих  $\sigma = \sigma_c$  (или допустимых)

напряжений и параметра двухосности  $\beta$ , характеризующего изменение степени стеснения деформаций в зоне предразрушения в результате изменения размеров трещины, геометрии тела и схемы нагружения.

Уравнение (1) и соответствующие диаграммы трещиностойкости тела с вырезом учитывают изменение степени стеснения деформаций (трехосности) у вершины выреза в связи с конечностью радиуса скругления его вершины и локальным параметром двухосности  $\beta$ .

**Коэффициенты безопасности.** Для установления допустимых (безопасных) размеров плоскостных трещиноподобных дефектов в критериальное уравнение диаграммы трещиностойкости (1) введен коэффициент безопасности  $m_K$  по вязкости разрушения  $K_{mat}$  [4, 5]:

$$m_K = n_T \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_T/n_T}{\sigma_0}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^2} \frac{1}{K_t^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_0}\right)^2} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_T/n_T}\right)^2} \frac{1}{K_t^2}}. \quad (4)$$

Отметим, что коэффициент безопасности зависит не только от механической характеристики материала (предела текучести), но и от геометрических параметров дефекта (теоретического коэффициента концентрации напряжений  $K_t$ ) и принятого в расчетной схеме коэффициента запаса по пределу текучести.

Увеличение теоретического коэффициента концентрации напряжений приводит к уменьшению  $m_K$ , в то время как увеличение коэффициента безопасности по пределу текучести – к его росту [4]. Расчет коэффициента безопасности  $m_K$  по формуле (4) для одноосно растягиваемой пластины с центральной сквозной трещиной ( $\beta = -1$ ) с учетом выражений (2) и (3) и принятого в расчетной схеме коэффициента безопасности по пределу текучести  $\sigma_c \leq [\sigma] = \sigma_T/n_T$  показывает, что при  $K_t \geq 7,3$  для трещиноподобного дефекта он незначительно (в пределах 10%) отличается от такового для трещины [4]. Для таких трещиноподобных дефектов в расчетной схеме можно использовать коэффициент безопасности, рассчитанный по формуле (4) для трещины, т.е. при  $K \rightarrow \infty$  [4]. Этот вариант оценки коэффициента  $m_K$  будем использовать в дальнейших расчетах.

В результате аппроксимации зависимости  $m_K$  от коэффициента запаса по пределу текучести  $n_T$  получим  $m_K = 1,44 n_T^{1,34}$  для плоского напряженного состояния и  $m_K = -0,064 + 1,1 n_T$  для плоской деформации. Таким образом, в первом приближении для случая плоской деформации можно принять  $m_K \approx n_T$ , что соответствует рекомендациям [6].

**Критерий безопасности дефекта.** Из соотношений (1) и (4) нетрудно получить допустимый теоретический коэффициент концентрации напряжений [4]:

$$[K_t] = \sqrt{\frac{4}{\pi[\rho]} \frac{K_{mat}^2}{\sigma_T^2} \left[ 1 - \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_0}\right)^2 \right] + \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_T}\right)^2}. \quad (5)$$

Таким образом, с помощью формулы (5) можно установить допустимый теоретический коэффициент концентрации напряжений. При сопоставлении его с коэффициентом  $K_t$  для реального дефекта, постулируемого или обнаруженного в конструкции, получим область безопасных дефектов:

$$K_t \leq [K_t]. \quad (6)$$

Поскольку допустимый коэффициент  $[K_t]$  является функцией как допустимой длины (глубины) дефекта  $[l]$ , так и допустимого радиуса скругления  $[\rho]$  его вершины, в общем случае задача определения безопасных плоскостных трещиноподобных дефектов может сводиться к установлению безопасного размера дефекта при заданном (безопасном) радиусе скругления его вершины либо безопасного радиуса скругления вершины дефекта при заданном (безопасном) линейном размере.

Коэффициент концентрации напряжений  $K_t$  можно рассчитать численными или аналитическими методами. Если известна аналитическая формула для расчета коэффициента  $K_t$ , то из уравнений (5) и (6) можно получить аналитическое выражение для оценки допустимого размера дефекта, как это было проиллюстрировано на примере пластины неограниченных размеров в условиях одноосного растяжения [4]. Уменьшение теоретического коэффициента концентрации напряжений (или радиуса скругления вершины дефекта) приводит к существенному увеличению размера безопасного трещиноподобного дефекта  $[l]$  (рис. 1).

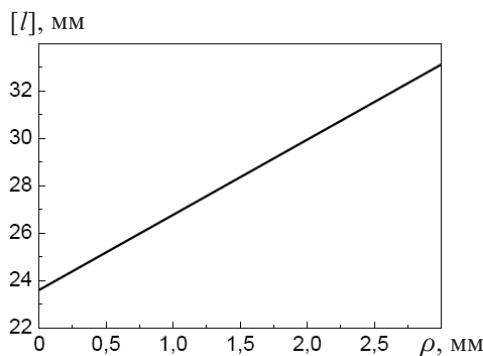


Рис. 1. Зависимость допустимых размеров  $[l]$  сквозного трещиноподобного дефекта в плоскости неограниченных размеров для стали 22К в условиях плоской деформации от радиуса скругления вершины  $\rho$ .

**Анализ допустимой глубины протяженного осевого поверхностного дефекта в обечайке сосуда давления.** На основании МКЭ-анализа напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины протяженного поверхностного U-образного дефекта в обечайке сосуда давления исследовали теоретические коэффициенты концентрации напряжений  $K_t$  для дефектов различной глубины и радиуса скругления вершины  $\rho$  [5].

Коэффициенты концентрации напряжений  $K_t$  рассчитывали для протяженного поверхностного U-образного дефекта глубиной  $l$  и радиусом скругления вершины  $\rho$ , расположенного на внешней поверхности вдоль оси обе-

чайки сосуда, который нагружали внутренним давлением 6 МПа. Внутренний диаметр сосуда составляет 1200 мм, толщина стенки – 30 мм, прибавка для компенсации коррозии – 3 мм. Модуль упругости материала обечайки при температуре 20°C равен  $1,95 \cdot 10^5$  МПа. Для расчета напряженно-деформированного состояния использовали конечноэлементную программу ANSYS (The ANSYS Program, Revision 5.6). В поперечном сечении обечайки с дефектом рассматривается плоскодеформированное состояние. Расчетная глубина дефекта составляет 3,5; 7,5 и 10,5 мм. Радиус скругления вершины дефекта варьировали в диапазоне 0,025...3 мм.

Из результатов, полученных МКЭ-расчетом [5], следует, что теоретический коэффициент концентрации напряжений  $K_t$  для протяженного поверхностного U-образного дефекта глубиной  $l$  в обечайке сосуда давления является функцией не только отношения  $l/\rho$ , как это имеет место в случае растяжения пластины неограниченных размеров с центральным сквозным вырезом ( $K_t \approx 2\sqrt{l/\rho}$ ), но и абсолютного значения глубины  $l$  дефекта.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений для обечайки с протяженным осевым поверхностным U-образным дефектом может быть представлен в виде произведения теоретического коэффициента концентрации напряжений бесконечной плоскости со сквозным тонким эллиптическим вырезом и поправочной функции  $Y(l/t)$  на глубину  $l$  дефекта (трещины) в растягиваемой пластине толщиной  $t$ :

$$K_t = 2\sqrt{\frac{l}{\rho}} Y\left(\frac{l}{t}\right). \quad (7)$$

На рис. 2 приведено сопоставление результатов расчета теоретического коэффициента концентрации напряжений для протяженного осевого поверхностного U-образного дефекта в обечайке по приближенной формуле (7) с данными МКЭ-расчетов [5].

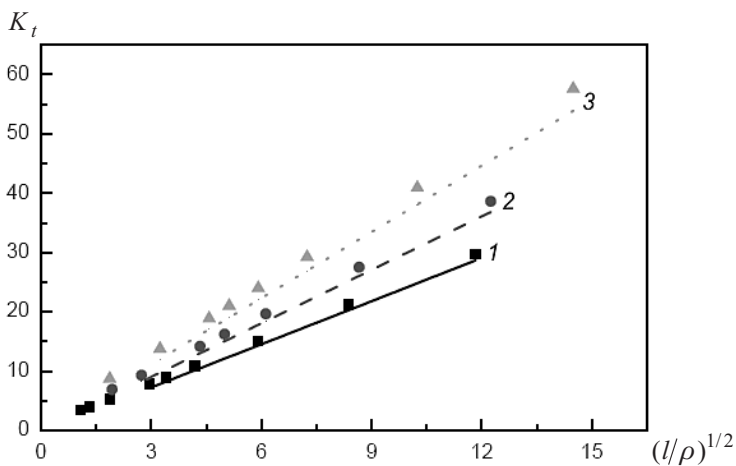


Рис. 2. Сопоставление результатов расчета коэффициента  $K_t$  по приближенной формуле (7) (линии) с данными МКЭ-расчетов (точки): 1 –  $l = 3,5$  мм; 2 –  $l = 7,5$  мм; 3 –  $l = 10,5$  мм; ■ –  $0,025 < \rho < 0,4$  мм; ● –  $0,05 < \rho < 1,0$  мм; ▲ –  $0,05 < \rho < 1,0$  мм.



Погрешность оценок коэффициента  $K_t$  с помощью приближенной формулы (7) варьируется в пределах 4...12% и, как следовало ожидать, понижается с уменьшением радиуса скругления вершины дефекта, т.е. при трансформировании дефекта в трещину.

Допустимую глубину U-образного дефекта оценивали для анализируемой обечайки сосуда давления, изготовленной из стали 09Г2С [5]. В расчете использовали следующие механические характеристики стали: предел текучести  $\sigma_T = 285$  МПа, вязкость разрушения  $K_{mat} = 100$  МПа $\sqrt{м}$ . Запас по пределу текучести принимали равным 1,5. Для расчета локальной прочности  $\sigma_0$  можно воспользоваться консервативной оценкой, полагая  $\beta(l/t) = -0,5$  во всем диапазоне изменения  $l/t$  [3].

Задаваясь допустимым размером радиуса  $[\rho]$  скругления вершины поверхностного дефекта, в качестве которого может быть принят размер радиуса, определяемого диагностическими методами, по критерию (6) с учетом формул (2), (5) и приближенного соотношения (7) для коэффициента  $K_t$  устанавливаем максимально допустимую глубину  $[l]$  дефекта. Например, для  $[\rho] = 0,4$  мм получаем  $[l] = 10,23$  мм. Использование полученных в результате МКЭ-расчета значений  $K_t$  при заданном допустимом радиусе  $[\rho]$  и глубинах дефекта  $l = 3,5; 7,5$  и  $10,5$  мм дает максимально допустимую глубину дефекта  $[l] = 10,13$  мм, что свидетельствует о приемлемости принятой приближенной формулы (7) для расчетных оценок.

**Заключение.** На основании критериального уравнения диаграммы трещиностойкости тела с тонким U-образным вырезом с учетом зависимости степени стеснения деформаций у вершины выреза в функции теоретического коэффициента концентрации напряжений и локального параметра двухосности  $\beta$  представляется возможным обоснование безопасных (допустимых) размеров дефектов в виде надразов в поврежденных конструкциях. Учет конечности радиуса скругления вершины дефекта позволяет допускать большие размеры безопасного дефекта в поврежденной конструкции.

## Резюме

Оцінку конструкційної міцності елементів, які пошкоджені дефектами типу надрізів виконано з використанням рівняння діаграми тріщиностійкості, що базується на критерії осереднення напружень у зоні передруйнування і врахуванні обмеження деформацій у вістрі надрізу. Допустимий (безпечний) стан пошкодженого дефектом елемента визначено за допомогою введення в критериальне рівняння коефіцієнтів безпеки.

1. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
2. Матвиенко Ю. Г., Приймак О. А. Диаграммы трещиностойкости тела с надразом // Пробл. прочности. – 2006. – № 5. – С. 142 – 148.
3. Матвиенко Ю. Г. Диаграммы трещиностойкости в связи со стеснением деформаций у вершины трещины и выреза // Завод. лаб. Диагностика материалов. – 2008. – № 10. – С. 55 – 60.

4. *Матвиенко Ю. Г.* Анализ допустимых размеров трещиноподобных дефектов на основе диаграмм трещиностойкости // Пробл. машиностроения и надежности машин. – 2007. – № 2. – С. 110 – 115.
5. *Матвиенко Ю. Г., Приймак О. А., Элксин В. В.* Методика оценки допустимой глубины протяженного поверхностного дефекта в сосудах давления // Там же. – № 6. – С. 49 – 54.
6. *Махутов Н. А.* Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.

Поступила 21. 06. 2009