

РАЗВИТИЕ ТРЕЩИНОПОДОБНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

к. ф.-м. н. Щербаков С.С., асп. Шемет Л.А.

Белорусский государственный университет, Минск

Введение. При изучении процессов усталости обычно рассматривают две его характерных стадии: стадия до зарождения трещины и стадия развития трещины. Соотношение продолжительности этих стадий изменяется в широких пределах в зависимости от уровня действующих напряжений, схемы нагружения, размеров и формы объекта, состояния материала и т. п. В некоторых случаях стадия развития магистральной трещины может составлять 60...90 % общей долговечности.

Если трещина при деформации растяжения развивается в пластине неограниченных размеров, то коэффициент интенсивности напряжений, применяемый для ее описания, будет следующим [1-4]:

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

где σ – нормальные к линии трещины растягивающие напряжения, l – длина (глубина) трещины.

Для реальных (конкретных) объектов формула (1) записывают с учетом поправочной функции Y_I , которая учитывает схему нагружения и геометрию трещин:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi l} Y_I. \quad (2)$$

Если на трещиностойкость (в том числе циклическую) испытывают компактные образцы по схеме внецентренного растяжения (рис. 1), то поправочная функция будет

$$Y_I \left(\frac{l}{B}\right) = 29.6 - 185.5\left(\frac{l}{B}\right) + 655.7\left(\frac{l}{B}\right)^2 - 1017\left(\frac{l}{B}\right)^3 + 638.7\left(\frac{l}{B}\right)^4 \quad (3)$$

и тогда выражение для коэффициента интенсивности (1) примет вид

$$K_I = \frac{Q}{h_0\sqrt{B}} Y(l/B), \quad (4)$$

где h_0 , B – размеры образца (см. рисунок 1), l – длина трещины, отсчитываемая от линии действия нагрузки Q .

Опасные объемы. В связи с наличием широкого спектра компьютерных программ для прочностного расчета, целесообразно их применение для исследования развития трещиноподобного повреждения.

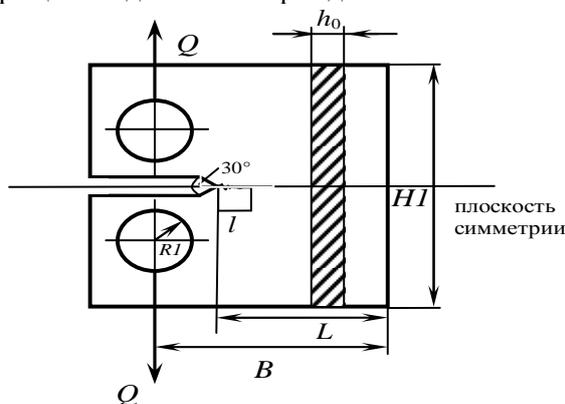


Рисунок 1 – Расчетная схема для образца с трещиной

Предельное значение определяется по некоторой компоненте тензора напряжений как экстремальное значение ее распределения при действии предельной нагрузки.

Поскольку опасные объемы являются мерой поврежденности деформируемых тел, то, анализируя их, можно указать конкретные области (зоны), в которых возможно зарождение и развитие как поверхностных, так и внутренних трещин. Очевидно, что действие необратимых повреждений реализуется там, где соответствующие опасные объемы пересекаются (т. е. накладываются друг на друга) или совмещаются друг с другом.

Рассмотрим тензор механического параметра φ_{ij} , конкретизациями которого являются тензоры напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} . Для однородного изотропного деформируемого твердого тела определим предельные нормальные и касательные значения $\varphi_n^{(*\text{lim})}$ и $\varphi_\tau^{(*\text{lim})}$ тензора $\varphi_{ij}^{(\pm*\text{lim})}$, а также предельное главное значение тензора $\varphi_1^{(*\text{lim})}$ и предельную интенсивность $\varphi_{\text{int}}^{(*\text{lim})}$ [2,9,10]:

В настоящей работе все расчеты произведены с помощью конечно-элементного пакета Ansys [5,6]. В качестве исходного объекта был рассмотрен стандартный образец для исследования на трещиностойкость, представленный на рисунке 1 [7,8].

Компьютерное моделирование развития трещиноподобного повреждения осуществлялось на основе модели деформированного твердого тела с опасным объемом.

В рамках данной модели опасные объемы представляют собой трехмерные области, где напряжения достигают повреждающего уровня, например, нижней границы рассеивания предела выносливости.

$$\begin{aligned}
\varphi_n^{(*\text{lim})} &= \max_{dV,i} \left(\left| \varphi_{ii} (F_{\text{lim}}, dV) \right| \right), \quad i = x, y, z, \\
\varphi_\tau^{(*\text{lim})} &= \max_{dV,i,j} \left(\left| \varphi_{ij} (F_{\text{lim}}, dV) \right| \right), \quad i, j = x, y, z, \quad i \neq j, \\
\varphi_1^{(*\text{lim})} &= \max_{dV} \left(\left| \varphi_1 (F_{\text{lim}}, dV) \right| \right), \\
\varphi_{\text{int}}^{(*\text{lim})} &= \max_{dV} \left[\varphi_{\text{int}} (F_{\text{lim}}, dV) \right],
\end{aligned} \tag{5}$$

где dV – элементарный объем нагруженного тела.

Следовательно, если рассмотреть тензор φ_{ij} в каждом элементарном объеме dV тела, то в общем случае для описания изменения величины действующих напряжений по сравнению с величиной предельных напряжений можно ввести три типа относительных повреждающих напряжений [2,9,10]: компонентные, главные и октаэдрические:

$$\Psi_{ij} = \left| \varphi_{ij} / \varphi_m^{(*\text{lim})} \right|, \quad \Psi_i = \left| \varphi_i / \varphi_1^{(*\text{lim})} \right|, \quad \Psi_{\text{int}} = \varphi_{\text{int}} / \varphi_{\text{int}}^{(*\text{lim})}, \tag{6}$$

где Ψ_{ij} , Ψ_i , Ψ_{int} , вообще говоря, имеют вероятностную природу, поскольку в условиях прочности как действующие напряжения φ_{ij} , φ_i , φ_{int} , так и предельные значения $\varphi_k^{(*\text{lim})}$, $\varphi_i^{(*\text{lim})}$, $\varphi_{\text{int}}^{(*\text{lim})}$ являются случайными величинами с соответствующими плотностями распределения.

Условия для ограничения опасных объемов с учетом формул (5) будут иметь вид

$$\begin{aligned}
V_{ij} &= \left\{ dV / \varphi_{ij} \geq \varphi_m^{(*\text{lim})}, dV \subset V_k \right\}, \quad i, j = x, y, z, \\
m &= \begin{cases} n & \text{при } i = j, \\ \tau & \text{при } i \neq j, \end{cases} \\
V_i &= \left\{ dV / \varphi_i \geq \varphi_1^{(*\text{lim})}, dV \subset V_k \right\}, \quad i = 1, 2, 3, \\
V_{\text{int}} &= \left\{ dV / \varphi_{\text{int}} \geq \varphi_{\text{int}}^{(*\text{lim})}, dV \subset V_k \right\},
\end{aligned} \tag{7}$$

где V_k – рабочий объем нагруженного тела.

Поскольку опасные объемы могут иметь произвольную и сложную форму, то их аналитическое определение, согласно формулам (5)–(7), может быть затруднено; в таких случаях их вычисляют методом Монте-Карло [2,9].

Моделирование распространения повреждения. В рамках проведенных расчетов эквивалентные напряжения рассчитывались в соответствии с первой теорией прочности

$$\sigma_{\text{экв}} = \sigma_1.$$

Предельное значение напряжений для материала исследуемой модели было выбрано равным $\sigma_1^{\text{lim}} = 600 \text{ МПа}$. Для расчета были приняты следующие размеры плоского образца, представленного на рисунке 1: $B=0.05 \text{ м}$, $H1=0.06 \text{ м}$, $L=0.04 \text{ м}$, $R1=0.00625 \text{ м}$. Растягивающая нагрузка Q варьировалась от 600 Н до 800 Н с шагом в 50 Н.

Опасный объем в соответствии с формулой (7) формировался из тех элементов, в которых значения главного напряжения превышают предельные.

Для реализации расчета опасных объемов была создана программа с помощью встроенного в ANSYS языка APDL [9, 10]. Принцип работы программы заключается в том, что после проведения расчета для i -го конечного элемента имеются значения средних напряжений и деформаций. Эти значения переносятся в массив, который используется в дальнейших вычислениях значений повреждаемости, как отношений действующих и предельных напряжений в соответствии с (6):

$$\Psi_1^i = \sigma_1^i / \sigma_1^{\text{lim}}. \tag{8}$$

Величины объемов элементов, для которых выполняется условие $\Psi_1^i \geq 1$, суммируются для получения значения опасного объема V_1 для всей расчетной модели.

Результатом работы программы является массив конечных элементов, составляющих опасный объем и его значение.

Развитие трещиноподобного повреждения моделируется удалением данного массива из конечно-элементной модели на текущем шаге по времени. На следующем шаге последовательный расчет напряженно-деформированного состояния, состояния поврежденности и опасных объемов производится для модифицированной конечно-элементной модели (с увеличенной длиной повреждения).

В двумерной постановке, опасный объем V_1 принимает вид опасной площади S_1 .

Из рисунка 2, а видно, что с ростом длины трещиноподобного повреждения увеличиваются как величина опасной площади, так и ее приращение на каждом шаге нагружения (см. рисунок 2, б). При увеличении приращения длины повреждения (скорости его удлинения) приращение опасной площади (скорости ее увеличения) также растет (см. рисунка 2, в). Из рисунка 2 видно,

что чем больше растягивающая сила Q , тем быстрее растет площадь повреждения, вследствие чего уменьшается число рабочих циклов нагружения. Одной и той же длине повреждения соответствуют различные объемы повреждения, т.е. с увеличением нагрузки возрастает число элементов, в которых значения напряжений превышают предельные.

Из рисунков 3, а и б видно, что при всех пяти рассматриваемых величинах силы Q количество элементов и его приращение увеличиваются с ростом длины повреждения, т.е. на каждом последующем шаге нагружения из модели удаляется больше конечных элементов, чем на предыдущем. Наибольшие приращения опасная площадь получает на последних циклах нагружения. Из рисунка 3, в видно, что с ростом приращения длины повреждения увеличивается приращение числа элементов в опасном объеме. Таким образом, чем меньше нагрузка, тем уже будет повреждение, т.е. одной и той же длине поврежденности при различных нагрузках соответствует разное количество элементов, составляющих опасную площадь.

Из рисунков 4, а и б, видно, что при всех рассматриваемых величинах силы Q значение коэффициента интенсивности напряжений K_1 увеличивается с ростом как длины повреждения, так и ее приращения. Такой же эффект наблюдается с увеличением опасной площади и ее приращения (см. рисунки 4, в и г).

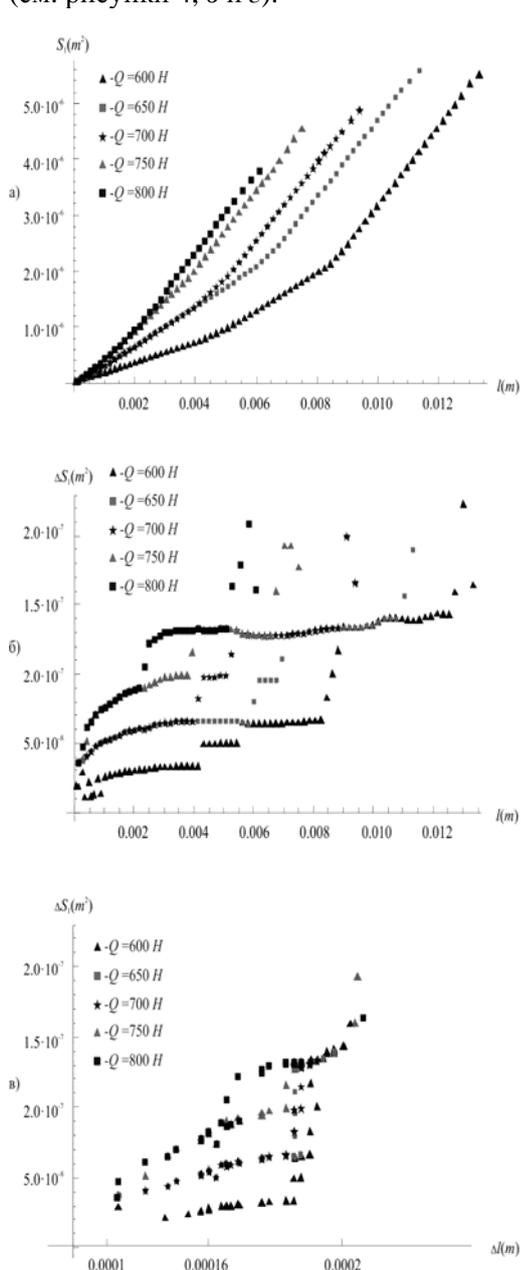


Рисунок 2 – Зависимости: а) опасной площади от длины трещиноподобного повреждения, б) приращения опасной площади от длины трещиноподобного повреждения, в) приращения опасной площади от приращения длины трещиноподобного повреждения

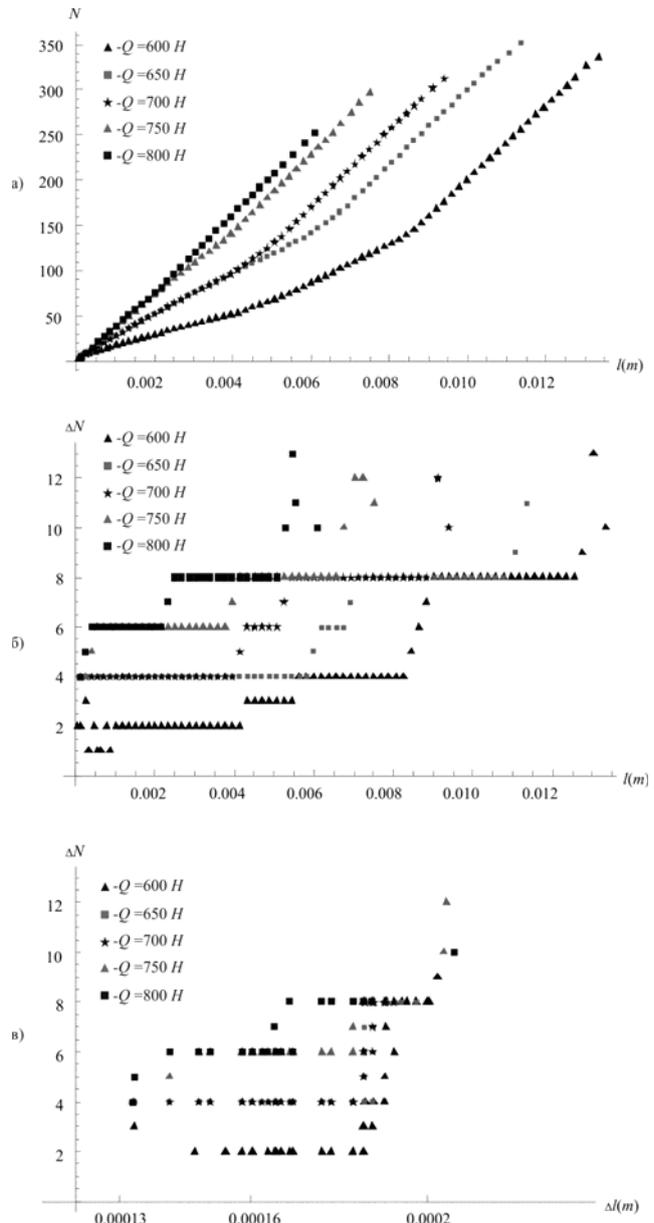


Рисунок 3 – Зависимости: а) количества элементов, составляющих опасную площадь от длины трещиноподобного повреждения, б) приращения количества элементов, составляющих опасную площадь, в зависимости от длины трещиноподобного повреждения, в) приращения количества элементов, составляющих опасную площадь, в зависимости от приращения длины трещиноподобного повреждения

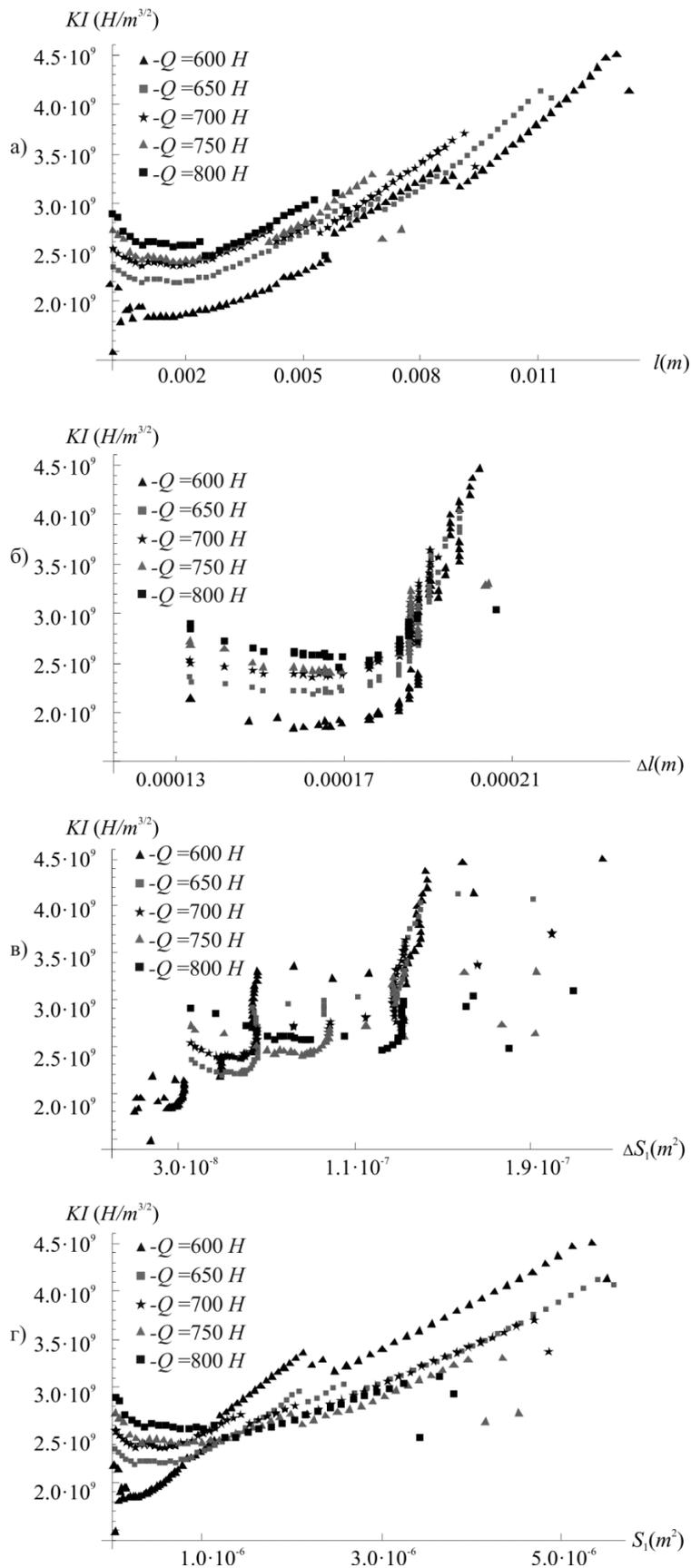


Рисунок 4 - Зависимости коэффициента интенсивности напряжений от:
 а) длины трещиноподобного повреждения, б) приращения длины трещиноподобного повреждения, в) приращения опасной площади, г) величины опасной площади

Заключение. В работе представлены результаты компьютерного моделирования распространения трещиноподобного повреждения во времени. Необходимые для этого расчеты повреждаемости осуществлялись с использованием модели деформируемого твердого тела с

опасным объемом [1-3, 9, 10]. В соответствии с данной моделью принималось, что опасный объем состоит из элементов, в которых главные напряжения превышают предельные.

Для реализации расчета опасных объемов и приращений длины трещиноподобного повреждения была создана программа с помощью встроенного в ANSYS языка APDL.

На каждом шаге нагружения была вычислена длина повреждения и соответствующие коэффициенты интенсивности напряжений.

Представленная на рисунке 4, б зависимость коэффициента интенсивности напряжений от приращения длины трещины для рассматриваемых нагрузок в качественном отношении хорошо согласуется с кинетической диаграммой усталостного разрушения [1,7], что подтверждает эффективность представленного здесь способа моделирования распространения трещиноподобного повреждения в компактном образце на основе модели деформированного твердого тела с опасным объемом.

РЕЗЮМЕ

В работе представлено двумерное компьютерное моделирование распространения трещиноподобного повреждения с использованием конечно-элементного пакета. Расчеты проводились на основе модели деформированного твердого тела с опасным объемом путем удаления опасных площадей на каждом шаге нагружения. Представлены зависимости коэффициента интенсивности напряжений от длины трещиноподобного повреждения, величины опасной площади и их приращений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сосновский, Л.А. Основы трибофатики/ Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2003. Т. 1. – 246 с.; Т. 2. – 234 с.
2. Сосновский, Л. А. Механика износоусталостного повреждения / Л. А. Сосновский. - Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.
3. Сосновский, Л.А. Статистическая механика усталостного разрушения/ Л.А. Сосновский. – Минск: Наука и техника, 1987. – 288 с.
4. Сосновский, Л.А. Трещиностойкость/ Л.А. Сосновский, А.В. Богданович. – Гомель: БелГУТ, 2011. – 366 с.
5. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров/ А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
6. Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения/ Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. – Москва: ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
7. Циклическая трещиностойкость материала труб линейной части нефтепровода в связи с длительной эксплуатацией/ В.М. Веселуха, А.В. Богданович // Тр. VI-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 октября – 1 ноября 2010 г., Минск (Беларусь) / Редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск: БГУ, 2010. Т. 1. – С. 289–293.
8. Циклическая вязкость разрушения пластичных сталей / Л.А. Сосновский, А.В. Богданович //Тр. VI-го Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 октября – 1 ноября 2010 г., Минск (Беларусь) / Редкол.: М.А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск: БГУ, 2010. Т. 1. – С. 767–776.
9. Щербаков, С.С. Механика трибофатических систем / С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский. – Минск: БГУ, 2011. – 407 с.
10. Щербаков, С.С. Моделирование повреждаемости методом конечных элементов при одновременном действии контактных и неконтактных нагрузок // С.С. Щербаков / Инженерно-физический журнал. –2012. Т. 85, –№ 4. –С 437–441.

SUMMARY

Two-dimensional computer simulation of crack-like damage propagation by the means of finite element package is considered in the paper. Calculations were made basing on the model of deformable solid with a dangerous volume by deleting the dangerous surfaces at each step of loading. The dependencies of stress intensity factor on the length of crack-like damage, the value of dangerous surface and their increments are presented.

Поступила в редакцию 21.10.2013