

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА С ОПАСНЫМ ОБЪЕМОМ

Щербаков С.С., Шемет Л.А.

This paper presents computer simulation of crack development in time. It was carried out using finite element package basing on the model of the deformed solid with a dangerous volume. The effectiveness of this method of modeling the damage is shown by the fact that crack spreads in the longitudinal direction, and maximum values of stress intensity are at the top of the crack.

Постановка задачи. Процесс усталости в общем случае имеет две 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.

В связи с большим наличием компьютерных программ для прочностного расчета, актуально исследовать развитие трещин, используя одну из них. В работе все расчеты произведены с помощью конечно-элементного пакета Ansys. В качестве исходного объекта был рассмотрен стандартный образец для исследования на трещиностойкость [1-4] (рисунок 1).

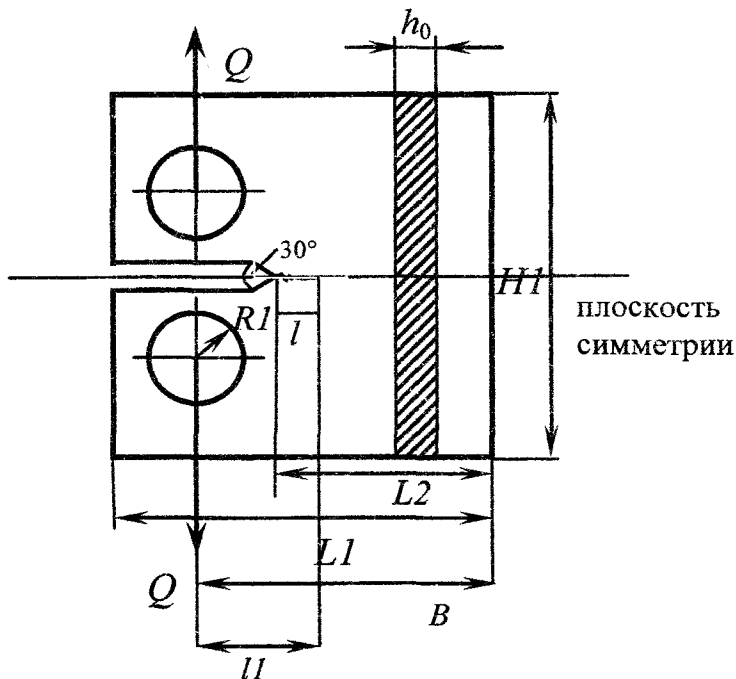


Рисунок 1 – Расчетная схема для образца с трещиной

Для расчета были приняты следующие размеры образца, представленного на рисунке 1 $L1 = 0.0625$ м, $H1 = 0.06$ м, $L2 = 0.04$ м, $R1 = 0.00625$ м, $h_0 = 0.01$ м. К образцу была приложена нагрузка $Q = 13000$ Н.

Развитие трещины в образце будем моделировать с помощью модели деформируемого твердого тела с опасным объемом [1]. Для данной практически значимой задачи большое значение имеет определение поврежденности на основании конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния.

Модель деформируемого твердого тела с опасным объемом. В рамках модели деформируемого твердого тела с опасным объемом опасные объемы представляют собой трехмерные области, где напряжения достигают повреждающего уровня – нижней границы рассеивания предела выносливости, например.

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 совпадают 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 $\varphi_{\text{int}}^{(*\text{lim})}$:

$$\begin{aligned}\varphi_n^{(*\text{lim})} &= \max_{dV, i} \left(\left| \varphi_{ii} (F_{* \text{lim}}, dV) \right| \right), \quad i = x, y, z, \\ \varphi_\tau^{(*\text{lim})} &= \max_{dV, i, j} \left(\left| \varphi_{ij} (F_{* \text{lim}}, dV) \right| \right), \quad i, j = x, y, z, \quad i \neq j, \\ \varphi_1^{(*\text{lim})} &= \max_{dV} \left(\left| \varphi_1 (F_{* \text{lim}}, dV) \right| \right), \quad \varphi_{\text{int}}^{(*\text{lim})} = \max_{dV} \left[\varphi_{\text{int}} (F_{* \text{lim}}, dV) \right]\end{aligned}\quad (1)$$

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 [2,4]: компонентные, главные и октаэдрические:

$$\psi_{ij} = \left| \varphi_{ij} / \varphi_m^{(*\text{lim})} \right|, \quad \psi_i = \left| \varphi_i / \varphi_1^{(*\text{lim})} \right|, \quad \psi_{\text{int}} = \varphi_{\text{int}} / \varphi_{\text{int}}^{(*\text{lim})}, \quad (2)$$

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 (1) будут иметь вид

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

где V_k – рабочий объем нагруженного тела.

Поскольку опасные объемы могут иметь произвольную и сложную форму, то их аналитическое определение, согласно формулам (1)–(3), может быть затруднено; в таких случаях их вычисляют методом Монте-Карло [1-3].

Конечноэлементное моделирование развития трещины. Моделирование распространения трещины производилось на основе модели деформированного твердого тела с опасным объемом, состоящего из элементов, в которых значения интенсивности напряжений превышают предельные. Предельное значение для материала исследуемой модели равно $\sigma_{int}^{lim} = 500 \text{ МПа}$.

Для реализации расчета опасных объемов была создана программа с помощью встроенного в ANSYS языка APDL [5]. Принцип работы программы заключается в следующем. 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 поврежденности, как отношений действующих и предельных напряжений в соответствии с (2):

$$\psi_{int}^i = \sigma_{int}^i / \sigma_{int}^{lim}.$$

Величины объемов элементов, для которых выполняется условие

$$\psi_{int}^i \geq 1,$$

суммируются для получения значения опасного объема V_{int} для всей расчетной модели.

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

Развитие трещины моделируется удалением данного массива из конечноэлементной модели на текущем шаге по времени. На следующем шагу последовательный расчет напряженно-деформированного состояния, состояния поврежденности и опасных объемов производится для модифицированной конечноэлементной модели (с увеличенной трещиной).

На рисунках 2-4 представлены распределения интенсивности напряжений на различных шагах нагружения. Из рисунков видно, что трещина распространяется в продольном направлении, а максимальные значения интенсивности напряжений находятся в вершине трещины.

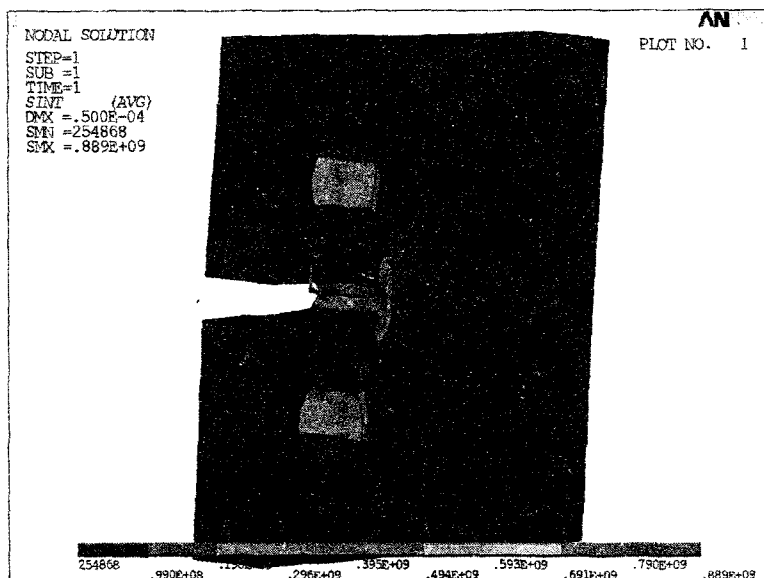


Рисунок 2 – Образец на первом шаге нагружения

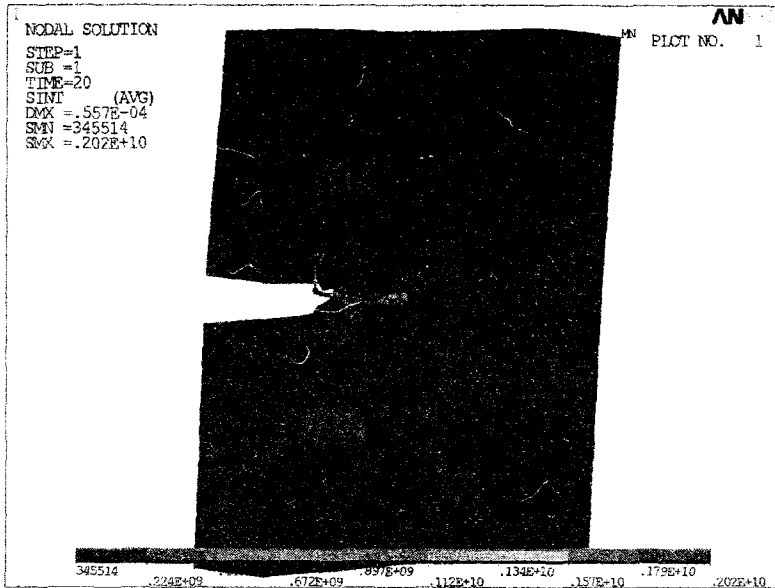


Рисунок 3 – Распространение трещины на двадцатом шаге нагружения

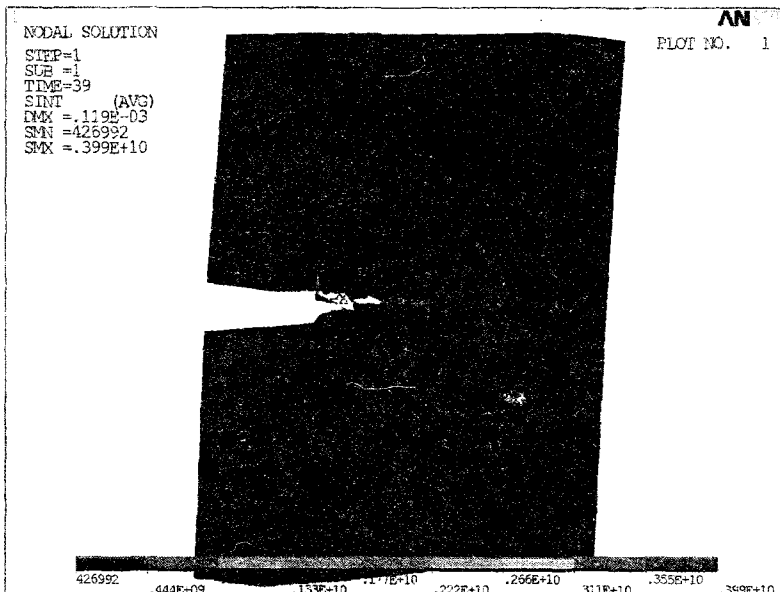


Рисунок 4 – Распространение трещины на тридцать девятом шаге нагружения

Из рисунка 5 видно, что опасный объем со временем увеличивается, т.е. после каждого шага нагружения трещина удлиняется.

Заключение. В работе были представлены результаты компьютерного моделирования распространения трещины во времени. Необходимые для этого расчеты поврежденности осуществлялись с использованием модели деформируемого твердого тела с опасным объемом. В соответствии с данной моделью опасным объемом состоит из элементов, в которых интенсивность напряжений превышает предельное значение.

Для трещин некоторой длины были рассчитаны значения интенсивности напряжений, нормальных напряжений и величин опасных объемов в вершине трещины. Проведенные исследования показали, что все эти значения увеличиваются вместе с длиной трещины.

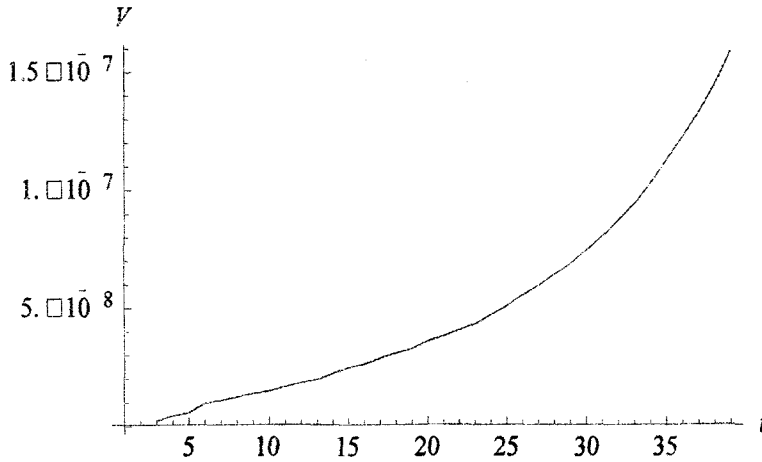


Рисунок 5 – Изменение опасного объема во времени

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. Статистическая механика усталостного разрушения / Л.А. Сосновский. – Минск: Наука и техника, 1987. – 288 с.
3. Веселуха, В.М. 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.
4. Сосновский, Л.А. 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.
5. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.

Поступила 25.11.11