

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ СМЕШАННЫХ I+II МОДАХ НАГРУЖЕНИЯ

Представлено експериментальну методику дослідження тріщиностійкості сталей за умов поперечного зсуву та різноманітних співвідношеннях поперечного зсуву та нормального відриву. Наведено залежність для розрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень та розподілення напружень біля вершини тріщини за умов поперечного зсуву.

An experimental procedure of fracture toughness investigation under shear loading and under different ratio of shear loading and opening (fracture) mode are presented. An equation for stress intensity factor calculation and stress distribution around crack tip are shown.

Введение и постановка задачи. В реальных конструкциях ориентация плоскости трещин может быть произвольной относительно внешней нагрузки. В этих случаях смещение берегов трещины возможно не только по моде I (нормальный отрыв), а и по смешанным модам I+II+III. Нагружение по этим модам при определённых условиях может быть более опасным, чем по моде I. Это обстоятельство важно учитывать, при прогнозировании характеристик циклической и статической трещиностойкости.

Несмотря на достаточно большой объём теоретических и экспериментальных исследований в настоящее время нет обоснованных и чётких рекомендаций по выбору типа образцов для получения характеристик вязкости разрушения при нагружении по моде II и смешанных модах I+II. Кроме того, в обзорных публикациях по проблеме исследования характеристик вязкости разрушения при чистом поперечном сдвиге и при различных соотношениях мод I и II показан значительный разброс по значениям характеристик вязкости разрушения [1, 2].

Вместе с этим известно, что предварительное термомеханическое нагружение (ПТН) корпусных сталей с трещинами по первой моде является эффективным методом продления безопасной эксплуатации корпусов энергетических и транспортных реакторов. Поэтому изучение влияния ПТН по модам, отличным от моды I на характеристики трещиностойкости корпусных реакторных сталей является актуальной задачей с научной и практической точки зрения. В настоящее время имеются лишь единичные исследования, посвящённые изучению данного вопроса, на основании которых затруднительно установить общие закономерности такого влияния [3]. Это свидетельствует о необходимости усовершенствования экспериментальной методики и дальнейшей работы над теоретическим обобщением.

Методика исследований. Для исследования влияния ПТН при смешанных I+II модах нагружения образец должен удовлетворять следующим критериям: реализация полного диапазона I+II мод нагружения, компактность и возможность испытаний при высоких и низких температурах, простота в изготовлении, возможность инициировать трещину по моде нагружения I. Этим требованиям удовлетворяет призматический образец на несимметричный четырёхточечный или трёхточечный изгиб рис.1.

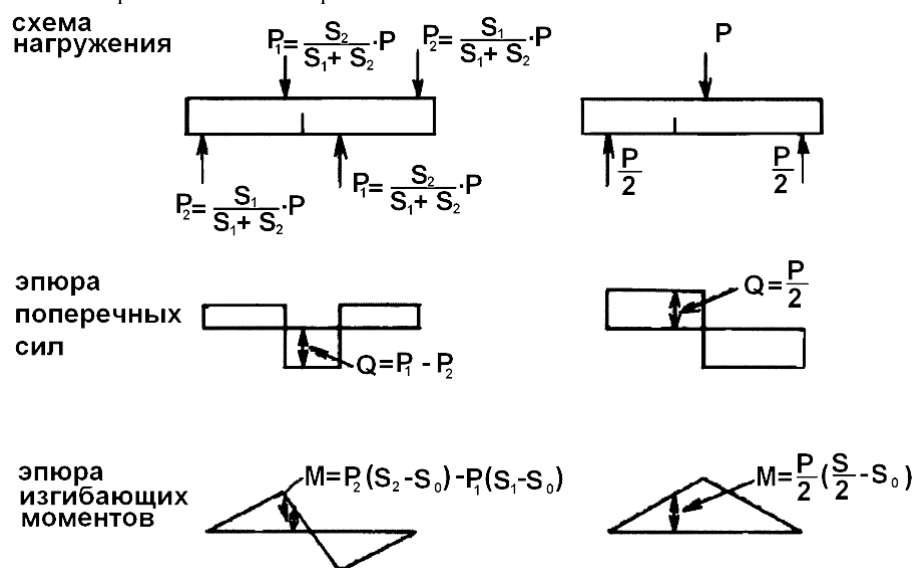


Рис. 1. Схемы нагружения образцов на несимметричный трёхточечный и четырёхточечный изгиб

Как видно из эпюр на рис. 1 для образца на трёхточечный изгиб при увеличении расстояния S_0 отношение K_{II}/K_I увеличивается. Поскольку при проведении эксперимента часто бывает методически невозможно расположить трещину близко к опорам, то соотношение мод K_{II}/K_I как правило меньше 0,5. В то же время при использовании образца на четырёхточечный изгиб K_{II}/K_I возрастает незначительно при уменьшении S_0 . Таким образом, в данном случае целесообразно применять как одну, так и другую схемы нагружения.

Исследование характеристик статической трещиностойкости при поперечном сдвиге (мода II) и при комбинации нормального отрыва с поперечным сдвигом (мода I+II) выполнялись на сервогидравлической испытательной установке фирмы Schenck.

Приспособление для нагружения образца на несимметричный четырёхточечный изгиб показано на рис.2.

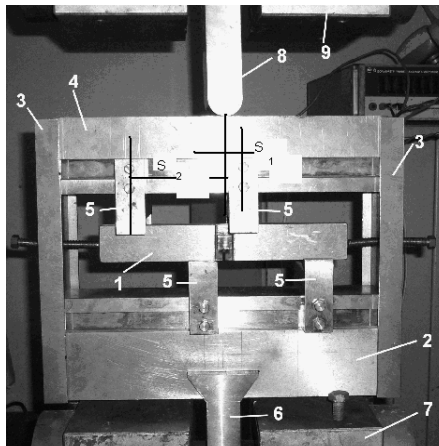


Рис. 2. Приспособление для нагружения образца на несимметричный четырёхточечный изгиб

Рама, в которой расположен образец 1, состоит из нижней балочки 2 к которой крепятся боковые направляющие пластины 3, верхней балочки 4, которая свободно может перемещаться по боковым направляющим 3 и валикодержателей 5. Нижняя балочка 2 при помощи соединения типа «ласточкин хвост» закреплена на пластине 6, которая зажимается в подвижном гидравлическом захвате 7 установки.

Практическая реализация схемы нагружения, показанной на рис.1 происходит следующим образом. При перемещении вверх нижнего захвата 7 пластина 8, зажатая в верхнем (неподвижном) гидрозавхвате 9 установки, передаёт усилие на верхнюю балочку 4 которая, смещаясь вниз по боковым направляющим 3, передаёт усилия на образец 1 через валики расположенные в валикодержателях 5.

Перемещение образца 1 в горизонтальном направлении изменяет величину изгибающего момента и поперечной силы в плоскости трещины, что и вызывает изменение соотношения K_I/K_{II} .

В связи с тем, что испытания на трещиностойкость по моде нагружения II не стандартизированы, весовую функцию $F(a/W)$, зависящую от формы, размеров образца и вида нагружения, для образца и схемы нагружения (рис.1) определяли при помощи МКЭ (Ansys) и затем сравнивали с известными решениями.

На рис.3 представлена модель образца и обозначены граничные условия, используемые в решении задачи. Задача решалась в линейно-упругой постановке. Область у вершины трещины была разбита на шести узловые сингулярные элементы, а расчёт коэффициентов интенсивности напряжений осуществлялся путём аппроксимации перемещений берегов трещины:

$$K_{II} = \sqrt{2\pi} \frac{2G}{1+\chi} \frac{|\Delta u|}{\sqrt{r}}, \quad (1)$$

где $\chi = 3-4\nu$ для плоской деформации, $\chi = (3-\nu)/(1+\nu)$ для пл. напр. состояния; Δu - смещение одной поверхности трещины относительно другой.

Неизвестный множитель в правой части равенства (1) находили в виде следующей зависимости [5]:

$$\frac{|\Delta u|}{\sqrt{r}} = A + Br. \quad (2)$$

Для определения параметров A и B в выражении (2) использовались полученные из численного решения значения перемещений в узлах у вершины трещины. Тарировочная функция $F_{II}(a/W)$ находилась из уравнения:

$$F_{II}(a/W) = \frac{K_{II}}{\tau_0 \sqrt{\pi a}}, \quad (3)$$

где τ_0 - номинальное напряжение при поперечном сдвиге в сечении образца без трещины.

Из результатов расчетов представленных на рис. 3 видно, что полученная зависимость тарировочной функции от длины трещины удовлетворительно согласуется с решениями, найденными в литературе [4, 6, 7]. Расхождение составляет не более 2,5%.

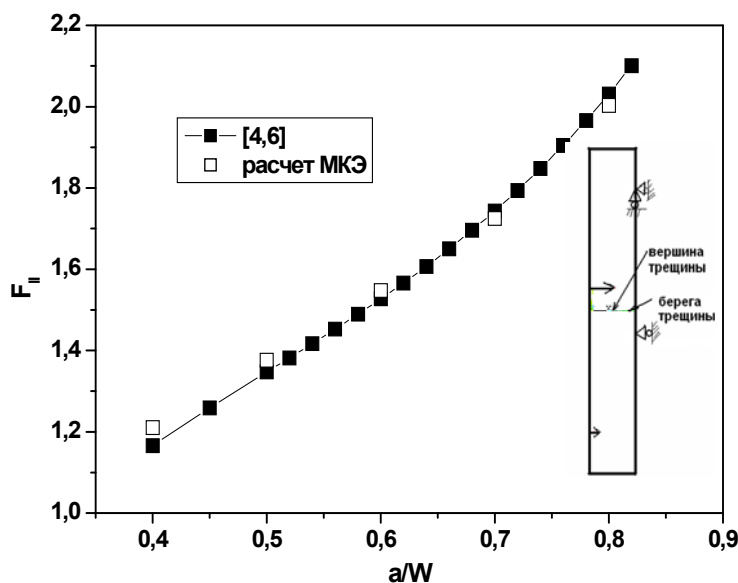


Рис. 3. Зависимость весовой функции F от относительной длины трещины

Напряженное состояние в окрестности трещины при поперечном сдвиге. Для разработки и использования критериев распространения трещины при поперечном сдвиге, необходимо иметь информацию о напряженно-деформированном состоянии у её вершины.

Когда твёрдое тело находится в состоянии многоосного напряженного состояния, поле напряжений у вершины трещины в полярных координатах и терминах КИН будет иметь вид [8]:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{1}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \left(1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta - 2 K_{III} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right], \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right], \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{2(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1)].\end{aligned}\quad (4)$$

Критерий максимальных окружных напряжений (MTS) [9].

Предполагается, что при отсутствии значительных пластических деформаций у вершины (хрупкое разрушение), трещина развивается в направлении перпендикулярном максимальным окружным напряжениям (т.е. σ_θ (4)) и продвижение её происходит в момент, когда величина этих напряжений достигает своего критического значения.

Критериальные уравнения в этом случае были получены, исходя из предположения, что разрушение произойдёт когда компонента напряжений σ_θ (4) станет равна напряжению при котором материал разрушается по моде I, то есть $\sigma_y = K_{IC} / \sqrt{2\pi r}$. В этом случае условие разрушения имеет вид:

$$\frac{K_I}{K_{IC}} \cos^3(\theta_0/2) - \frac{3}{2} \frac{K_{II}}{K_{IC}} \cos(\theta_0/2) \sin \theta_0 = 1, \quad (5)$$

где θ_0 - угол начального направления развития трещины, который определяется из условия равенства нулю $\tau_{r\theta}$ [9]

$$K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1) = 0. \quad (6)$$

Угол отклонения от начальной трещины в условиях чистого поперечного сдвига (мода II) определяется, продифференцировав уравнение σ_θ по углу θ и приравняв его нулю или из уравнения (6), приравняв K_I нулю. Таким образом, значение угла $\theta = 70.53^\circ$ соответствует максимальной величине окружных напряжений σ_θ . Подставив это значение в уравнение (6), можно определить соотношение между вязкостью разрушения по первой и второй модам нагружения в соответствии с вышеописанным критерием: $K_{IIc} \approx 0.866 K_{IC}$.

Испытания на растяжение пластин из органического стекла с наклонными трещинами показали хорошее совпадение между прогнозом по σ_θ - критерию и экспериментом [9].

Для материалов, которые в условиях поперечного сдвига разрушаются вязко, применяется критерий максимальных сдвиговых деформаций или касательных напряжений. При этом предполагается, что трещина страгивается в направлении сдвига, в момент, когда касательные напряжения достигают максимального значения на характеристическом расстоянии у вершины трещины. По аналогии с MTS критерием, дифференцируя касательные напряжения $\tau_{r\theta}$ (4) по углу θ и приравнявая к нулю, найдём [10]

$$\begin{aligned}\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} &= \frac{K_{II}}{2\sqrt{2\pi r}} \left[-3 \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} (3 \cos \theta - 1) \sin \frac{\theta}{2} \right] = 0, \\ \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \left(2 \operatorname{tg}^2 \frac{\theta}{2} - 7 \right) &= 0,\end{aligned}\quad (7)$$

что угол развития трещины действительно будет $\theta = 0^\circ$, а $(\tau_{r\theta})_{\max} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}}$.

Для модели образца, приведенной на рис. 3, показано распределение упругих напряжений рис.4 (а) и деформаций рис. 4 (б) при величине коэффициента интенсивности напряжений $57 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ в первом «слое» элементов вокруг вершины трещины в зависимости от угла α , который отсчитывался от верхнего берега трещины против часовой стрелки. Приведенные расчётные данные несколько отличаются от распределения напряжений в теле бесконечных размеров вследствие ограниченных размеров образца. Несмотря на это значения нормальных и касательных напряжений и деформаций соответствуют приведенным в литературе закономерностям в характерных точках: при $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 180^\circ$, $\alpha = 360^\circ$. Кроме того, из рис.4 (а, б) видно, что максимальное значение нормальных напряжений σ_y при $\alpha \approx 70^\circ$, что соответствует критерию максимальных нормальных напряжений, а максимальные касательные деформации соответствуют $\alpha \approx 180^\circ$, т.е. находятся в плоскости расположения трещины.

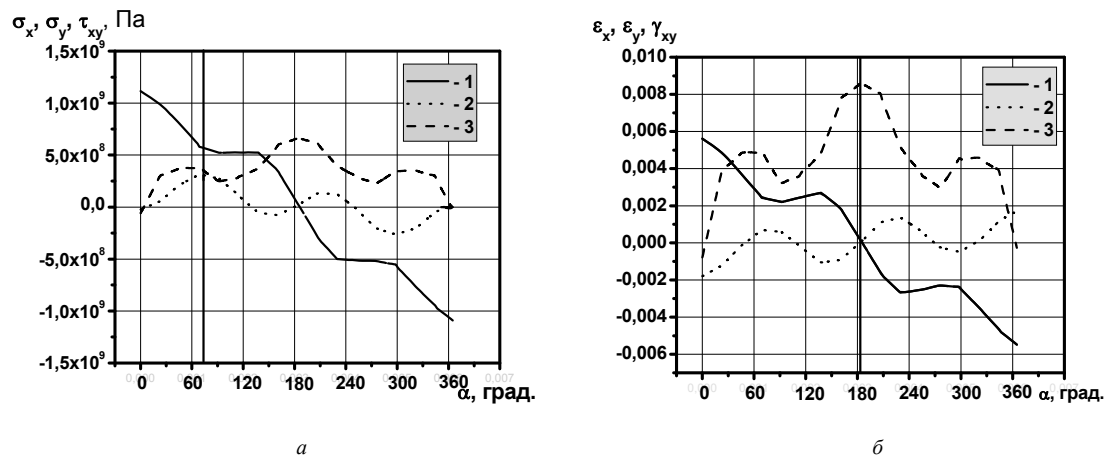


Рис. 4. Распределение упругих напряжений (а) и деформаций (б) у вершины трещины в зависимости от угла α : 1 - ε_x , 2 - ε_y , 3 - γ_{xy}

Выводы и перспективы дальнейших исследований.

Представлена экспериментальная методика исследования трещиностойкости сталей при поперечном сдвиге и при различных соотношениях поперечного сдвига и нормального отрыва. Приведены зависимости для расчёта коэффициента интенсивности напряжений и распределение напряжений у вершины трещины при поперечном сдвиге.

Аналитически и численно показано, что в соответствии с критерием максимальных нормальных напряжений направление развития трещины будет под углом 70.53° к исходной плоскости трещины, что характерно для хрупких материалов, а по критерию максимальных касательных напряжений трещина будет страгиваться в направлении исходной плоскости.

Вследствие отсутствия нормативной базы (стандартов) и единой экспериментальной методики (образцов) по исследованию трещиностойкости при смешанных схемах нагружения существует необходимость разработки экспериментальных методик исследования характеристик трещиностойкости материалов при модах нагружения III (продольный сдвиг) и при различных комбинациях мод I+III, II+III, I+II+III.

Список литературы.

1. Laukkanen A. Analysis of experimental factors in elastic-plastic small specimen mixed-mode I-II fracture mechanical testing // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. – 2001. – 24. – P.193-206.
2. Іваницький Я.Л. Методи оцінки тріщиностійкості конструкційних матеріалів за умов складного навантаження. Автореферат дис. на здобуття наук. ступеня док-ра техн. наук. Львів 2005. 43 с.
3. Swankie T.D., Smith D.J. Low temperature mixed mode fracture of a pressure vessel steel subject to prior loading // Eng. Fract. Mech. - 1998. - 61. - P. 387-405.
4. Gao Hua, Brown M.W. and Miller K.J. Mixed-mode fatigue thresholds // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. – 1982. – 5. – P.1-17.
5. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. – М.: ЛЕНАНД, 2008. – 456 с.
6. Otsuka, A., Mori, K. and Miyata, T. The condition of fatigue crack growth in mixed mode condition// Eng. Fract. Mech – 1975. - 7. - P. 429-439.
7. Цыбанев Г.В., Кравец П.Я., Хоцяновский А.О. Методика испытаний на трещиностойкость при циклическом нагружении сдвигом // Пробл. прочности. – 1992. - №1. – С. 75-79.
8. Броек Д. Основы механики разрушения. – М.: Высш. школа, 1980. – 368 с.
9. Erdogan F., Sih G.C. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear // Trans. ASME. Ser D. J. Basic Eng. – 1963. – 85, No.4. – P.519-527.
10. Chao Y.J. and Zhu Xian-Kui A simple theory for describing the transition between tensile and shear mechanisms in mode I, II, III and mixed – mode fracture// Mixed Mode crack Behavior, ASTM STP 1359, 1999. – P.86-110.