

Закономерности изменения формы фронта угловой усталостной трещины в условиях изотермического и термомеханического циклического нагружения

Б. А. Грязнов, Л. А. Заслоцкая, С. В. Кобельский, О. В. Кононученко

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Исследованы закономерности развития формы фронта угловых трещин в условиях изотермического и термомеханического циклического нагружения. На образцах из сплавов ЭИ698 и ЭИ617 показано влияние нагружающих факторов на устойчивость формы фронта трещины отрыва.

Введение. Методы оценки циклической трещиностойкости элементов конструкций чаще всего базируются на результатах испытаний образцов. Для исследования поведения угловых трещин нормального отрыва, как правило, используются пластины с концентратором (надрез, выточка, отверстие). Следует отметить, что геометрия традиционных образцов позволяет исследовать закономерности развития полу- или четвертьэллиптических усталостных трещин, а общепринятые методики – получить данные о поведении трещины только при постоянной температуре [1].

Величины расчетных параметров механики разрушения (например, K_I) непостоянны по фронту трещины и весьма чувствительны к изменениям его идеализированной формы. Попытка переноса зависимостей развития трещины на случай термомеханического нагружения может привести к значительным погрешностям из-за неправильной аппроксимации фронта трещины. Поэтому необходимо выяснить закономерности развития угловых трещин при термомеханическом нагружении и сопоставить их с полученными для изотермического нагружения.

Методика и образцы для испытаний. Механическое нагружение осуществлялось чистым круговым изгибом. Образцы и методика испытаний в изотермических условиях подробно описаны в [2]. Испытания при термомеханическом нагружении предполагают одновременное и независимое нагружение образца механической и переменной температурной нагрузкой. В этом случае механическое нагружение осуществляется по той же схеме, что и при изотермических испытаниях.

Рабочая часть образца нагревалась токами высокой частоты, что приводило к изменению температуры на грани рабочего сечения по схеме, показанной на рис. 1,а. Геометрия образца обеспечивает градиенты температур на его гранях в полциклах нагрева и охлаждения.

Взаимодействие двух компонент определяет нагруженность рабочего сечения и соответственно закономерность развития усталостной трещины нормального отрыва.

Расчеты теплового и напряженно-деформированного состояния образца выполнены с помощью трехмерного конечноэлементного пакета программ «SPACE» (Институт проблем прочности НАН Украины).

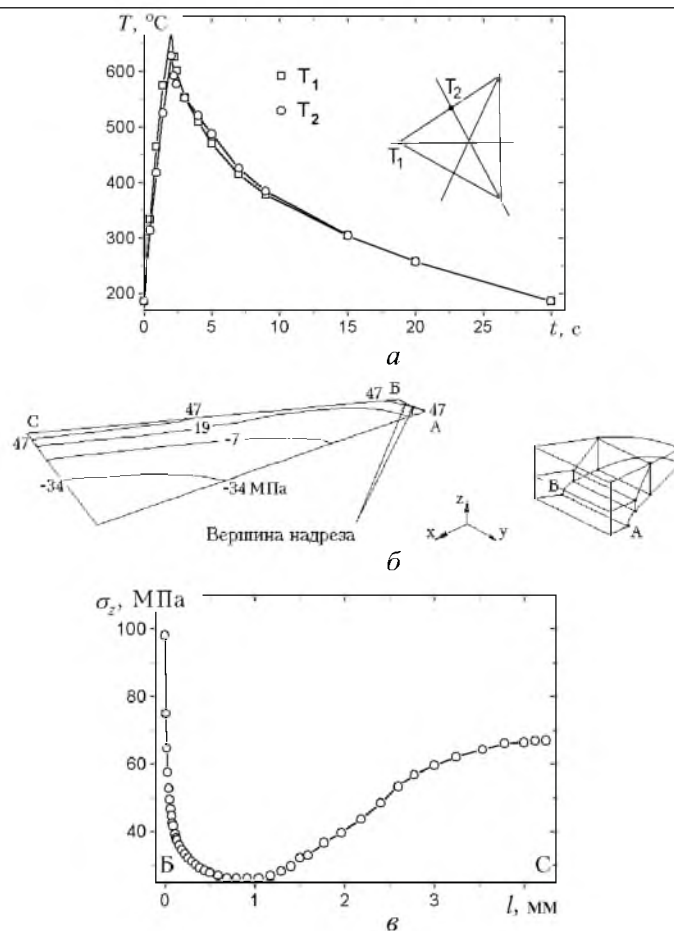


Рис. 1. Изменение температуры в рабочей части образца во времени (а), термических напряжений (σ_z , МПа) по сечению рабочей части (б) и по ее грани (в) при отсутствии трещины (для 5-й секунды термоцикла).

Обсуждение результатов эксперимента. В работе [2] были оговорены границы применимости методики испытаний по глубине трещины при изотермическом нагружении. Одна из причин ограничений – схематизация фронта трещины в виде семейства концентрических окружностей радиуса R . Следует отметить, что такая схематизация в указанном диапазоне справедлива только для изотермического нагружения. В этом случае форма фронта трещины зависит только от механической нагрузки, которая при принятой схеме нагружения постоянна на равном расстоянии от ядра сечения. При термомеханическом нагружении трещина развивается в условиях напряженного состояния, вызванного как механической, так и температурной нагруженностью. Закон распределения температурной компоненты нагрузки по сечению отличается от такового для механической нагрузки и зависит не только от времени t в цикле нагрев–охлаждение, но и от относительного расположения нагруженной зоны (рис. 1,б). Распределение напряжений при отсутствии трещины на гранях сечения имеет сложный и немонотонный характер (рис. 1,в). Наложение двух составляющих нагружения приводит к отклонению формы фронта трещины от круговой.

Анализ промеров положений фронта трещины по меткам в изломах показал, что его изменение во времени хорошо описывается с помощью семейства эллипсов с центром, лежащим на срединной линии сечения (схема на рис. 2,а). Такое представление позволяет учесть значительные отклонения фронта от круговой формы в окрестности выхода трещины на свободную поверхность образца. При изотермическом нагружении отклонения обусловлены исключительно свойствами поверхностного слоя образца. В случае термомеханического нагружения в полцикле охлаждения возникают дополнительные напряжения растяжения, нормальные к берегам трещины. Особенностью этих добавочных напряжений является их непостоянство по глубине сечения, причем максимальные напряжения растяжения наблюдаются не только в области вершины образца, но и в центре стороны сечения.

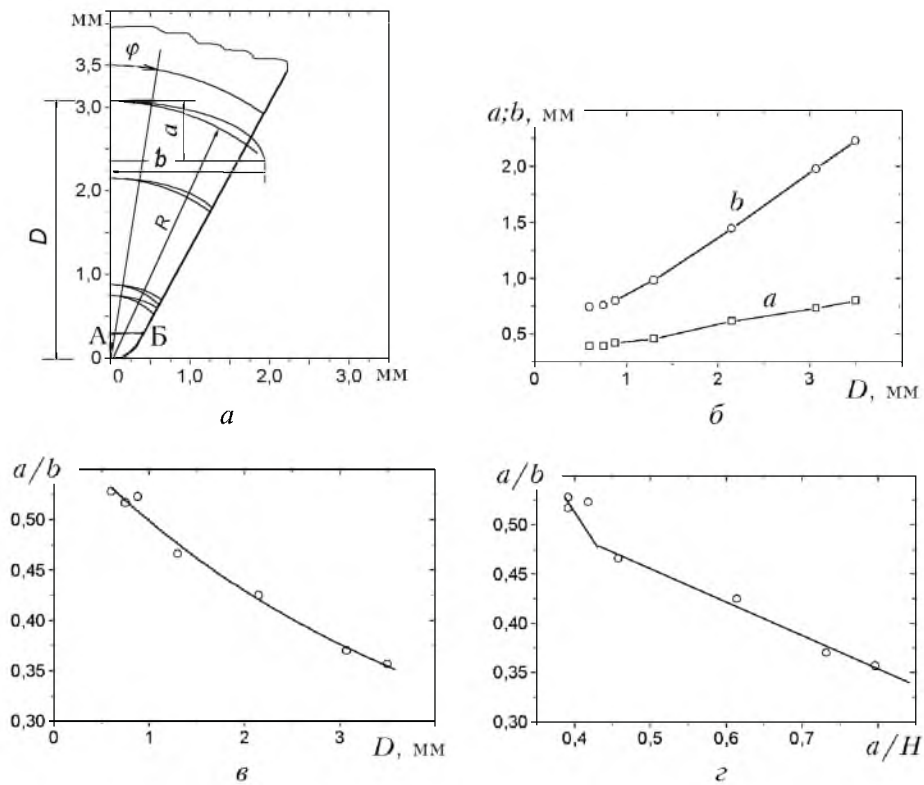


Рис. 2. Изменение формы фронта угловой усталостной трещины нормального отрыва: а – схематизация фронта трещины; б – зависимость величин полуосей a и b от глубины трещины; в – зависимость соотношения величин полуосей a/b от глубины трещины; з – зависимость соотношения a/b от относительной глубины трещины a/H .

Пусть глубина трещины D включает в себя глубину инициирующего надреза (схема на рис. 2,а). Трещина зарождается в одном из углов рабочего сечения и становится симметричной относительно срединной линии. Достигнув глубины $D = 0,5$ мм от вершины образца, она приобретает эллиптическую форму.

Параметры фронта трещины

D , мм	a , мм	b , мм	a/b	a/H ($H = 8,45$ мм)
0,60	0,392	0,744	0,528	0,046
0,75	0,392	0,758	0,517	0,046
0,88	0,418	0,800	0,523	0,050
1,30	0,458	0,983	0,466	0,054
2,15	0,614	1,446	0,425	0,073
3,07	0,732	1,980	0,370	0,087
3,50	0,797	2,232	0,357	0,094

Параметры эллипса, описывающего фронт трещины в ее развитии, и координаты его центра приведены в таблице и на рис. 2, полуось a направлена по срединной линии образца. Величины полуосей a, b и величина a/b связаны с глубиной D соотношениями:

$$a = 0,33607 + 0,054212D + 0,046614D^2 - 0,0069817D^3;$$

$$b = -1,14816 + 7,4022D - 9,10997D^2 + 6,50593D^3;$$

$$a/b = 0,58983 - 0,10326D + 0,01324D^2 - 0,00083D^3.$$

Представив изменение фронта трещины в координатах $a/b - a/H$ согласно [3] (рис. 2,з), где H – высота сечения рабочей части образца, видим, что при принятом способе инициирования трещины фронт приобретает устойчивую форму уже при глубине $D = 0,7...0,8$ мм. Такое поведение характерно для фронта трещины независимо от уровня нагруженности, места зарождения в пределах концентратора, материала образца.

Проведем сравнительные расчеты K_I от температурной составляющей нагружения для различных глубин трещин и двух способов схематизации ее фронта, а именно: для схемы, представленной на рис. 2,а, и для семейства окружностей той же глубины D . Результаты приведены на рис. 3 в виде зависимости $\beta = [(K_I^{(1)} - K_I^{(2)}) / K_I^{(2)}] \cdot 100\%$ от относительного угла $\gamma = \frac{\varphi}{\pi/6}$, $\gamma \in [0, 1]$, по фронту трещины. Здесь $K_I^{(1)}$ – коэффициент интенсивности напряжений для трещины глубиной D при схематизации системой окружностей; $K_I^{(2)}$ – то же при схематизации согласно рис. 2,а. Видно, что зависимость имеет неоднозначный характер как при различных глубинах, так и в пределах одной глубины. Максимальное отклонение составляет до 10,8%.

Следует отметить увеличение рассогласования с ростом глубины трещины для этих схематизаций в точке выхода трещины на свободную поверхность ($\gamma = 1$). Для точек пересечения фронта трещины со свободной поверхностью оно достигает 7% при глубине $D = 3$ мм.

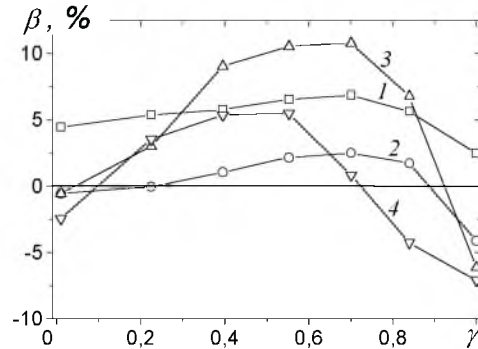


Рис. 3. Зависимость относительной величины β по фронту трещины: 1 – $D = 0,57$ мм; 2 – $D = 0,80$ мм; 3 – $D = 2,15$ мм; 4 – $D = 3,0$ мм.

Заключение. Экспериментально исследована устойчивость формы фронта трещины при термомеханическом нагружении. Обнаружено и описано изменение формы фронта трещины при термомеханическом нагружении по сравнению с изотермическим. Показана зависимость вычисленных значений K_I по фронту трещины от способа схематизации ее фронта. Предложенная схематизация позволяет уточнить расчетные величины K_I по фронту трещины.

Резюме

Досліджено закономірності розвитку форми фронту кутових тріщин в умовах ізотермічного та термомеханічного циклічного навантаження. На зразках зі сплавів EI698 та EI617 показано вплив навантажуючих чинників на сталість форми фронту тріщини відриву.

1. Варфоломеев И. В., Вайниток В. А., Красовский А. Я. Критерии и устойчивость роста несквозных трещин при циклическом нагружении. Сообщ. 1 // Пробл. прочности. – 1990. – № 8. – С. 3 – 10.
2. Троценко В. Т., Грязнов Б. А., Заслоцкая Л. А. и др. Методика исследования трещиностойкости материалов образцов с угловой трещиной при циклическом нагружении // Там же. – 1998. – № 4. – С. 116 – 125.
3. Варфоломеев И. В., Вайниток В. А., Красовский А. Я. Критерии и устойчивость роста несквозных трещин при циклическом нагружении. Сообщ. 2 // Там же. – 1990. – № 9. – С. 11 – 16.

Поступила 14. 07. 99