

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

## Развитие усталостных трещин в жаропрочных сплавах при термомеханическом нагружении. Сообщение 2. Метод учета влияния термомеханического нагружения на сопротивление материала развитию усталостной трещины

**В. Т. Трощенко, Б. А. Грязнов, О. В. Кононученко**

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

*Предложен способ комплексного учета влияния компонент термомеханического нагружения на изменение скорости развития усталостных трещины. Он учитывает переменность величин расчетных коэффициентов интенсивности напряжений по фронту трещины и по времени термоцикла. Описаны экспериментальные результаты, полученные для сплавов ХН70ВМТЮ (ЭИ617) и ХН73МБТЮ (ЭИ698). Построены кинетические диаграммы разрушения этих сплавов для двух режимов термоциклирования на приторговом и средне-амплитудном участках.*

**Ключевые слова:** циклическое термомеханическое нагружение, механическая и термическая компоненты нагружения, усталостная трещина, учет неизотермичности нагружения

**Введение.** Зависимость скорости развития трещины от условий нагружения традиционно представляется в виде кинетических диаграмм усталостного разрушения в координатах скорость развития трещины –  $F$ , где  $F$  – параметр, зависящий от ряда факторов (геометрия объекта и условия испытаний, способ учета неоднородности нагрузки, взаимодействие одновременно приложенных нагрузок разного типа, применяемая расчетная схема, способ учета неоднородности значений параметра по фронту трещины). Одним из таких параметров механики разрушения является коэффициент интенсивности напряжений (КИН).

Если условия проведения эксперимента не являются общепринятыми либо сочетание нагружающих факторов достаточно ново, возникает необходимость конструирования параметра  $F$ . С использованием экспериментальных и расчетных результатов, описанных ранее\*, показана возможность построения указанного параметра, который будет учитывать величину и изменение температурной компоненты нагружения во время термоцикла.

\* Трощенко В. Т., Грязнов Б. А., Кононученко О. В., Кобельский С. В. Развитие усталостных трещин в жаропрочных сплавах при термомеханическом нагружении. Сообщ. 1. Метод и результаты исследования скоростей развития трещин // Пробл. прочности. – 2000. – № 4. – С. 22 – 32.

**Способ учета воздействия термомеханического нагружения.** При проведении испытаний в условиях термомеханического нагружения фиксируемые скорости развития трещины – следствие взаимодействия двух компонент нагружения, которые влияют на скорость развития трещины через развиваемые величины  $K_I$ . Скорость развития трещины определяется сочетанием нагруженностей от обеих компонент, выраженных в терминах  $K_I$ .

Пусть  $K_I^{\text{мех}}$  и  $K_I^{dT}$  – величины КИН, вызванные механической и термической составляющими нагружения соответственно. В общем случае для конкретного исследуемого объекта  $K_I^{\text{мех}} = K_I^{\text{мех}}(D, \gamma)$ ;  $K_I^{dT} = K_I^{dT}(D, \tau, \gamma)$ , где  $D$  – глубина трещины;  $0 \leq (\gamma = \varphi / (\pi / 6)) \leq 1$  – относительный угол по фронту трещины;  $0 \leq \varphi \leq \pi / 6$  – текущее значение угла по фронту трещины (рис. 1);  $0 \leq (\tau = \tau_i / \tau_{\text{цикл}}) \leq 1$  – относительное время по термоциклу;  $\tau_i$  – момент времени из диапазона термоцикла (см. сообщение 1).

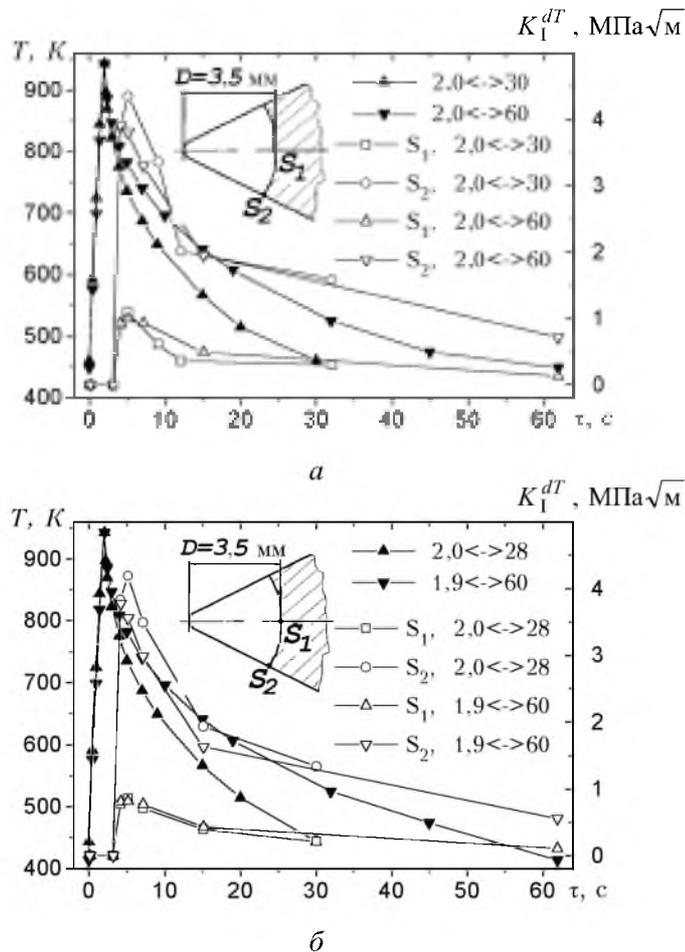


Рис. 1. Сопоставление температуры  $T$  по фронту трещины глубиной  $D = 3,5$  мм (темные точки) и  $K_I^{dT}$  в точках  $S_1$  и  $S_2$  фронта трещины (светлые точки) во времени для сплавов ЭИ698 (а) и ЭИ617 (б).

Для исследованных режимов нагружения характерно соотношение  $(K_I^{\text{mex}}/K_{I\text{max}}^{dT}) \geq 3 \dots 4$ , где величина  $K_I^{\text{mex}}$  соответствует припороговому участку кинетической диаграммы разрушения при максимальной температуре термоцикла,  $K_{I\text{max}}^{dT}$  – минимальной глубине трещины из исследованного диапазона. Таким образом, скорость развития трещины определяется главным образом величиной механической компоненты нагружения. Поэтому представим параметр  $F$ , комплексно учитывающий нагруженность фронта трещины, в виде

$$F = K_I^{\text{mex}} + \zeta(D, \tau, \gamma). \quad (1)$$

Форма записи  $\zeta(D, \tau, \gamma)$  определяет способ учета влияния термической компоненты нагружения на изменение скорости развития трещины.

Исследованы такие варианты построения компоненты  $\zeta(D, \tau, \gamma)$ :

$$\zeta = 0; \quad (2)$$

$$\zeta = K_{I\text{max}}^{dT}; \quad (3)$$

$$\zeta = \bar{K}_{I\text{max}}^{dT} = \max \left( \int_0^1 K_I^{dT}(D_k, \tau, \gamma) d\gamma \right); \quad (4)$$

$$\zeta = \bar{\bar{K}}_I^{dT} = \int_0^1 \bar{K}_I^{dT}(D, \tau) d\tau. \quad (5)$$

Вариант (2) соответствует формальному неучету термической составляющей нагружения. При этом экспериментально зафиксированная скорость развития трещины – следствие взаимодействия нагружающих факторов.

Варианты (3) и (4) соответствуют описанию поведения трещины термомеханического нагружения с позиции максимальных развиваемых в термоцикле величин КИН: в случае (3) – с помощью максимальных локальных значений  $K_I^{dT}$ , в случае (4) – посредством значений КИН, осредненных по фронту трещины.

В сообщении 1 нами показано, что величина  $K_I^{dT}$  значительно изменяется как по фронту трещины (для максимальных глубин  $(K_I^{dT}|_{\gamma=0}/K_I^{dT}|_{\gamma=1}) \approx 5 \dots 7$ ), так и по времени (для конкретной глубины  $(K_{I\text{max}}^{dT}/K_{I\text{min}}^{dT}) \geq 5 \dots 7$ ). Продолжительность временного периода, когда  $K_I^{dT}$  достигает максимума, составляет 5...10% продолжительности термоцикла (рис. 1). Очевидно, что вариант (3) в принципе не учитывает наблюдаемое изменение локальных значений КИН, а (4) – изменение КИН во времени.

Вариант (5) позволяет учитывать изменение величин компонент нагружения как по фронту, так и во времени. Благодаря такой процедуре осреднения получаем параметр, который, учитывая локальные изменения напряженно-деформируемого состояния в вершине трещины, является функцией только от глубины трещины. Схемы определения  $\bar{K}_I^{dT}$  и  $\bar{\bar{K}}_I^{dT}$  показаны на рис. 2. Для конкретной глубины трещины  $D_k$  в результате интегрирования расчетных зависимостей  $K_I^{dT}(D, \tau, \gamma)$  по углу  $\gamma$  получаем зависимость  $\bar{K}_I^{dT} = \bar{K}_I^{dT}(D_k, \tau)$ . Каждой глубине трещины  $D_k$  соответствует своя зависимость  $\bar{K}_I^{dT}(\tau)$ . Исключая с помощью (5) из  $\bar{K}_I^{dT}$  относительное время по термоциклу, получаем параметр  $\bar{\bar{K}}_I^{dT}$ , зависящий только от глубины трещины (рис. 3).

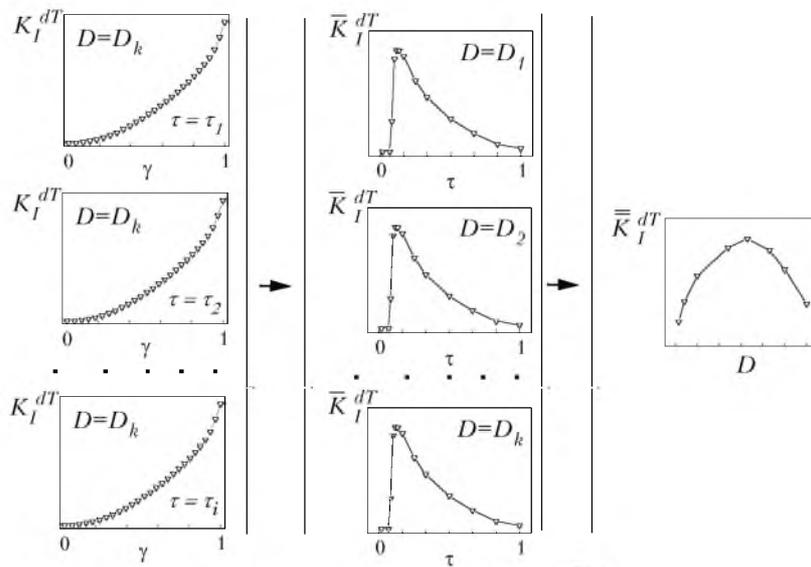


Рис. 2. Схема определения  $\bar{K}_I^{dT}$  и  $\bar{\bar{K}}_I^{dT}$ .

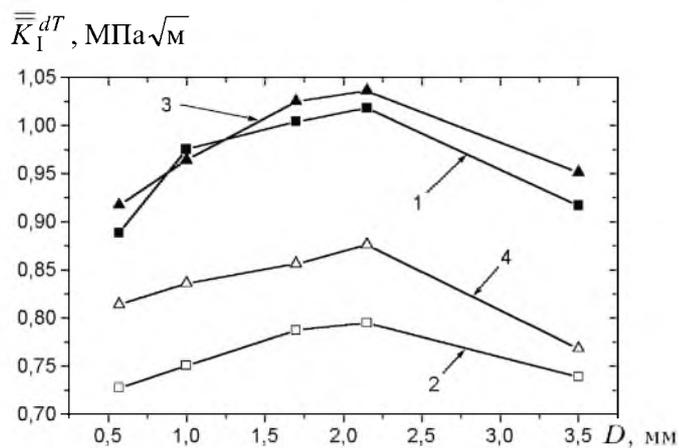


Рис. 3. Зависимости  $\bar{\bar{K}}_I^{dT}$  от глубины трещины  $D$  для сплавов ЭИ617 (1 – 2,0  $\leftrightarrow$  28; 2 – 1,9  $\leftrightarrow$  60) и ЭИ698 (3 – 2,0  $\leftrightarrow$  30; 4 – 2,0  $\leftrightarrow$  60).

Предложенный способ учета результирующей нагруженности, соответствующей конкретной скорости развития трещины, был применен для описания представленных в сообщении 1 экспериментальных результатов. На рис. 4 приведены экспериментальные результаты, описанные с помощью параметра  $F$  в виде  $K_I^{\text{мех}} + \overline{K_I}^{dT}$ . Их аппроксимация выполнена с использованием зависимости  $dD / dN = C(K^n - K_{th}^n)$ . Там же представлены значения параметров  $C, n, K_{th}$ .

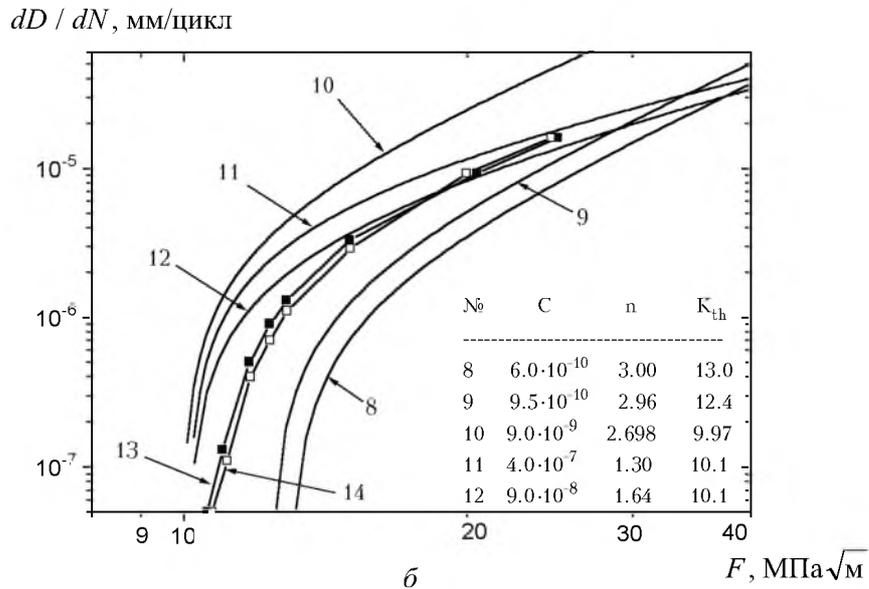
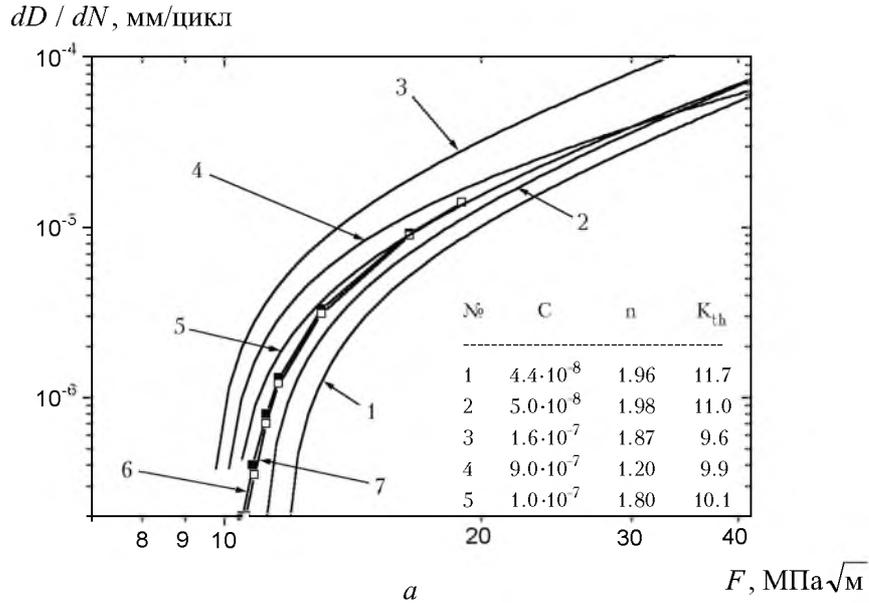


Рис. 4. Экспериментальные (1–5, 8–12) и расчетные (6, 7, 13, 14) кинетические диаграммы усталостного разрушения сплавов ЭИ698 (а) и ЭИ617 (б): 1 –  $T = 293$  К; 2, 9 –  $T = 473$  К; 3, 10 –  $T = 873$  К; 4 – 2,0  $\Leftrightarrow$  30; 5 – 2,0  $\Leftrightarrow$  60; 11 – 2,0  $\Leftrightarrow$  28; 12 – 1,9  $\Leftrightarrow$  60.

По экспериментальным кинетическим диаграммам усталостного разрушения при изотермическом механическом нагружении с использованием полученных путем расчета зависимостей  $K_I^{\text{мех}}(D, \gamma)$  и  $K_I^{dT}(D, \tau, \gamma)$  определены скорости развития трещины в условиях термомеханического нагружения в зависимости от формы записи параметра  $F$ .

Для определения расчетной скорости развития трещины исследуемый термоцикл разбивался на интервалы. Продолжительность каждого интервала соответствовала одному циклу механического нагружения. Начальная глубина трещины  $D_k$  выбиралась из диапазона 0,6...3,5 мм. Для каждого интервала выяснялись значения температуры  $T_i = \text{const}$ ,  $K_I^{\text{мех}}$ ,  $K_I^{dT}$ , зависящие от глубины трещины, и параметр  $F$ . По кинетической диаграмме, соответствующей  $T_i = \text{const}$ , определялся прирост трещины при данной величине  $F$ . Суммированием единичных приростов вычислялась усредненная скорость  $\bar{V}$  за один термоцикл. Расчет проводился до тех пор, пока не был охвачен весь диапазон экспериментально зафиксированных глубин трещины. Величины  $\bar{V}$  и  $F$  использовались при построении расчетных кинетических диаграмм усталостного разрушения (рис. 4, линии 6, 7, 13, 14).

**Обсуждение результатов.** Изменение скорости развития трещины при термомеханическом нагружении по сравнению с изотермическим обусловлено сочетанием двух факторов: влиянием температурной компоненты на локальные поля напряжений в вершине трещины и зависимостью механических свойств материала от температуры на протяжении термоцикла.

Один из критериев применимости формы построения параметра  $F$  – совпадение кинетических диаграмм материала, построенных с использованием этого параметра для разных режимов термоциклирования, описанных с его помощью. Это свидетельствует о том, что параметр правильно отражает общую нагруженность фронта трещины. Иными словами, одна и та же скорость развития трещины будет достигнута при разных количественных вкладах компонент термомеханического нагружения. Более хорошее совпадение во всем диапазоне скоростей обеспечивает вариант

$$F = K_I^{\text{мех}} + \bar{K}_I^{dT}.$$

В пределах термоцикла суммарная величина термических и механических напряжений изменяется, и в припороговой области не всегда достаточна для продвижения трещины. Поскольку трещина увеличивается, существуют сочетания температура + нагруженность, обеспечивающие ее подрастание. Анализ изменения компонент нагружения показывает что подрастание трещины на припороговом участке будет происходить в строго определенный период термоцикла, когда, с одной стороны, результирующий КИН максимальный, а с другой – циклическая трещиностойкость материала, определяемая его температурой, достаточно мала. Для исследованных термоциклов такое сочетание наблюдается на 3,5...6-й секунде, что соответствует 1,5...4-й секунде полуцикла охлаждения. При этом  $K_I^{dT}$  принимает максимальные значения (рис. 1), температура по фронту тре-

щины соответствует 740...820 К, скорость развития трещины, зависящая от механических свойств материала, остается достаточно высокой. Поэтому если параметр  $F$ , описывающий результирующую нагруженность, сконструирован верно, то расчетная кривая в припороговой зоне должна совпадать с кривой при постоянной температуре из интервала 740...820 К.

Вариант записи  $F = K_I^{\text{mex}} + \bar{K}_I^{dT}$  обеспечивает хорошее совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей на припороговом участке (до 5% по значениям КИН) и совпадение пороговых КИН, экспериментально полученных в изотермических условиях для температуры 740...820 К и рассчитанных с учетом влияния неізотермичности нагружения.

Расчетные зависимости (рис. 4), полученные при  $F = K_I^{\text{mex}} + \bar{K}_I^{dT}$ , определяют нижнюю величину скорости развития трещины. Верхнюю границу скорости развития трещины в диапазоне  $10^{-7} \dots 10^{-5}$  мм/цикл для обоих материалов можно определить по изотермическим кинетическим диаграммам при  $T \approx 0,85T_{\text{max}}$  температуры термоцикла.

По результатам данного исследования для ЭИ698 получено  $K_{th}^{\text{calc}} / K_{th}^{\text{exp}} = 1,10 \dots 1,14$ , для ЭИ617 –  $K_{th}^{\text{calc}} / K_{th}^{\text{exp}} \geq 1,22$  (без учета вклада от термической компоненты нагружения), где  $K_{th}^{\text{calc}}$  – размер порогового КИН, рассчитанного в предположении об основном влиянии переменной температуры на скорость распространения трещины термомеханической усталости;  $K_{th}^{\text{exp}}$  – экспериментально определенный пороговый КИН. В то время как при использовании критерия  $F = K_I^{\text{mex}} + \bar{K}_I^{dT}$  для описания скоростей развития трещины в сплаве ЭИ698 получено  $K_{th}^{\text{calc}} / K_{th}^{\text{exp}} = 1,02 \dots 1,04$ , в сплаве ЭИ617 –  $K_{th}^{\text{calc}} / K_{th}^{\text{exp}} = 1,07 \dots 1,09$ , т.е. критерий (1) с использованием (5) позволяет определить размер  $K_{th}$  при термомеханическом нагружении с ошибкой не более 9% по результатам испытаний в условиях постоянных температур без проведения экспериментальных исследований циклической трещиностойкости при термомеханическом нагружении.

Следует оговорить границы применимости описания экспериментальных и расчетных результатов с помощью предложенной формы записи  $F$  в качестве силового параметра. Испытания проводили для узкого класса материалов (жаропрочные циклически стабильные хромоникелевые сплавы в исходном состоянии). Исследовали варианты нагружения с соотношением  $(K_I^{\text{mex}} / K_{I_{\text{max}}}^{dT}) \geq 3 \dots 4$ . Изменение величины  $K_I^{dT}$  во времени носило монотонный характер в пределах одного порядка величин. Поэтому использование способа записи  $F$  в виде  $K_I^{\text{mex}} + \bar{K}_I^{dT}$  можно рекомендовать для описания результатов, полученных в аналогичных условиях.

**Заключение.** Предложен способ учета влияния комплексности термомеханического нагружения на закономерности развития усталостных трещин. Приведено сопоставление результатов эксперимента и расчета, полученного с учетом непостоянства значений коэффициентов интенсивности напряжений по фронту трещины и по времени термоцикла. Показано, что

при равных величинах  $F$  при термомеханическом нагружении с соотношением компонент  $(K_I^{\text{мех}} / K_I^{dT}) \geq 3 \dots 4$  скорость развития трещины ниже, чем при изотермическом механическом нагружении при максимальной температуре термоцикла. Параметр разрушения  $F$  в виде  $K_I^{\text{мех}} + \overline{K}_I^{dT}$  интегрально описывает напряженно-деформированное состояние в вершине трещины и позволяет учесть изменения локальных значений как во времени, так и по фронту трещины. Другие варианты записи  $F$  не чувствительны к изменению значений КИН и отражают реальную нагруженность трещины только в какой-то определенный момент термоцикла. Реальная скорость развития трещины, описанная в терминах  $F = K_I^{\text{мех}} + \overline{K}_I^{dT}$ , не выше скорости, определенной по изотермической диаграмме при  $T = 0,85T_{\text{max}}$  термоцикла, и не ниже, рассчитанной по предложенному методу.

### Резюме

Запропоновано спосіб комплексного урахування впливу компонент термомеханічного навантаження на зміну швидкості розвитку внутрішніх тріщин при змінних значеннях розрахункових коефіцієнтів інтенсивності напружень по фронту тріщини та впродовж термоциклу. За його допомогою описано експериментальні результати для сплавів ХН70ВМТЮ (ЕІ617) та ХН73МБТЮ (ЕІ698). Побудовано кінетичні діаграми руйнування сплавів для двох режимів термоциклоування на припороговій і середньоамплітудній ділянці.

Поступила 15. 12. 99