

## К оценке кинетики упругопластического роста сквозной усталостной макротрещины в металлах при экстремальных и естественных условиях эксплуатации

И. С. Пиняк

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Полученное ранее автором соотношение между эмпирическими параметрами  $C_1$  и  $C_2$  позволяет исключить проведение в экстремальных и естественных условиях сложного эксперимента по определению эффективных характеристик циклической трещиностойкости конструкционного материала и верхней границы  $\Delta K_{fc1,X}$  роста сквозной усталостной макротрещины при закрытии ее вершины. Результаты основных испытаний по определению номинальных, эффективных характеристик циклической трещиностойкости и полученное соотношение достоверно описывают кинетику роста макротрещины на всем интервале кинетической диаграммы усталостного разрушения с помощью уравнения, учитывающего закономерности ее изменения в широком диапазоне действия различных факторов при экстремальных и естественных условиях, а также в случае наличия закрытия вершины трещины. При указанных условиях определена долговечность материала элемента с трещиной и его опасное граничное состояние. Анализ кинетики роста сквозной усталостной макротрещины показал, что стабильность распространения трещины обеспечивается наличием остаточных сжимающих напряжений вдоль ее берегов.*

**Ключевые слова:** скорость роста усталостной макротрещины, закрытие трещины, остаточные сжимающие напряжения в вершине и вдоль берегов макротрещины.

### Обозначения

- |  |  |
|--|--|
| $X, X^* (R, R^*, T, T^*, \text{etc.})$                   | – факторы (асимметрия, температура и др.), воздействующие на металл при наличии и отсутствии закрытия трещины (ЗТ)   |
| $\Delta K, \Delta K_X$                                   | – номинальный размах коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в цикле при одном и разных факторах воздействия   |
| $\Delta K_{th,eff}, \Delta K_{th}, \Delta K_{th,X}$      | – пороговый эффективный и пороговый размахи КИН в цикле при одном и разных факторах воздействия  |
| $K_{Ic}, \Delta K_{fc}, \Delta K_{fc,X}$                 | – критические КИН и размахи КИН при одном и разных факторах воздействия  |
| $\Delta K_{eff}$   | – эффективный размах КИН в цикле   |
| $\Delta K_{eff,1-2}, \Delta K_{1-2,X}, \Delta K_{2-3,X}$ | – эффективный размах КИН и размахи КИН в цикле, соответствующие началу и концу второго участка кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) в эффективных и номинальных координатах при разных факторах воздействия |
| $\Delta K_{fc1,0}, \Delta K_{fc1}, \Delta K_{fc1,X}$     | – критический эффективный размах КИН в цикле соответственно при нулевой асимметрии цикла, одном и разных факторах воздействия  |
| $\Delta K_{fc1,th,X}$                                    | – критический пороговый эффективный размах КИН при разных факторах воздействия   |

$(da/dN)_X, (da/dN)_{X^*}$	– скорость роста усталостной трещины (РУТ) на КДУР при разных факторах воздействия в случае наличия и отсутствия закрытия трещины
$(da/dN)_{I,X(X^*)}$	– скорость РУТ соответственно на первом, втором и третьем
$(da/dN)_{II,X(X^*)}$	участках КДУР при разных факторах воздействия в случае
$(da/dN)_{III,X(X^*)}$	наличия и отсутствия закрытия трещины
$(da/dN)_X^*, (da/dN)_{X^*}^*$	– скорости РУТ, номинальные и эффективные размахи КИН
$(da/dN)_{eff}^*, \Delta K_X^*, \Delta K_{X^*}^*$	соответственно, они становятся началом смещенной системы
$\Delta K_{eff}^*$	координат при разных факторах воздействия в случае
$C_1, n_1, C_2, n_2$	– эмпирические параметры для материала соответственно при
$q_{I,1}, q_{2,1}, q_{2,III}$	эффективном и номинальном размахах КИН
$a_X, a_{X^*}$	– натуральные числа степенной функции в смещенной
$a_{th,X}, a_{1-2,X}, a_{2-3,X}, a_{fc,X}$	системе координат (показатели степени)
$Y$	– текущая длина сквозной усталостной макротрещины при
$\lambda$	разных факторах воздействия в случае наличия и
$\Delta P_X, \Delta P_{X^*}$	отсутствия закрытия трещины
$t$	– толщина образца
$b$	– размер образца вдоль оси трещины
$N_X, N_{X^*}$	– долговечность материала элемента со сквозной
$\Delta K_{eff,T_1}^{f,inv}$	макротрещиной при воздействии в широком диапазоне
$\Delta K_{fcl,th,T_2}$	разных факторов $X$ в случае наличия и отсутствия
	закрытия вершины трещины
	– критический эффективный размах КИН при первой
	температуре хрупкости (верхняя граница роста сквозной
	усталостной макротрещины при ее закрытии)
	– критический пороговый эффективный размах КИН при
	второй температуре хрупкости (нижняя граница роста
	сквозной усталостной макротрещины при ее закрытии)

**Постановка задачи.** Развитие современной техники, характеризующейся интенсивным ростом рабочих параметров и снижением материалоемкости, требует повышения прочности, надежности и долговечности материала элементов машин, конструкций и сооружений. В таких высоконапряженных условиях эксплуатации материал элементов должен быть высококачественным, т.е. сочетать в себе прочность (сопротивление деформации при отсутствии трещиноподобных дефектов и трещин), надежность (сопротивление разрушению) и долговечность (сопротивление разрушению во времени).

Прочность материала при отсутствии в нем механических “рисок”, шлифовочных и штамповочных “сеток”, растрескивания, примесей, включений, несплошностей, пор, трещин и других повреждений определяется с помощью классических критериев механики материалов [1, 2]. Однако, как показывает практика (современная дефектоскопия), в процессе изготовления элементов конструкций, сооружений, деталей машин невозможно полностью исключить наличие в материале трещиноподобных дефектов и трещин. Таким образом, в материале до начала его эксплуатации уже имеется очаг разрушения элемента, который связан с закономерностями развития трещины (сначала внутренней или поверхностной, а затем и сквозной). Следовательно, определяемые характеристики прочности конструкционного материала являются условными величинами. Достоверными остаются предложенные ранее [3, 4] характеристики надежности и долговечности, поскольку они учитывают во времени процесс разрушения при совместном (раздельном) влиянии силового  $\Delta K$  и эксплуатационных  $X$  факторов в широком диапазоне их воздействия, а также явления закрытия трещины.

Оценка [3, 4] надежности и долговечности конструкционного материала в области упругопластического разрушения осуществляется с использованием силового подхода, основанного на концепции критического коэффициента интенсивности напряжений  $K_{Ic}$  [5], и метода текущего раскрытия вершины трещины [6, 7]. Для аналогичной оценки надежности и долговечности материала элемента в области пластического разрушения необходимо разработать энергетический подход ( $J$ -интеграл).

В настоящее время процесс разрушения элемента с трещиной не рассматривается в течение времени его развития при раздельном или совместном влиянии силового  $\Delta K$  и эксплуатационных  $X$  факторов (возможны разные схемы их воздействия, а электрохимический и коррозионный факторы имеют свои особенности) в широком диапазоне, а изучается, к примеру, с помощью ограниченной зависимости  $K_{Ic}(T)$  – “Master Curve” [8] и др.

Известно, что силовой фактор  $\Delta K$  в зависимости от формы воздействия на элемент создает постоянное (статическое, динамическое) или повторно-переменное (много- и малоцикловое) нагружение. При этом статическое и динамическое нагружения отличаются продолжительностью времени влияния силового фактора (скорость его нарастания), тогда как много- и малоцикловое – величиной и временем его действия. Постоянное нагружение составляет половину цикла повторно-переменного нагружения, что видно при исследовании с коэффициентом асимметрии цикла  $R = 0$ .

Влияние любого фактора  $X$  на конструкционный материал определяется по характеристике материала. При силовом подходе – это размах (номинальный  $\Delta K$ , эффективный  $\Delta K_{eff}$ ) коэффициента интенсивности напряжений, при энергетическом –  $J$ -интеграл.

Разрушение материала протекает на суб- (зарождение трещины), микро- (рост микротрещины меньше размера зерна поликристаллического материала) и макроуровнях (рост макротрещины: короткой – внутренней, поверхностной и длинной – сквозной, приводящей к полному разрушению образца или детали).

Таким образом, процесс разрушения можно условно разделить на три этапа. Это позволит достоверно изучать и описывать во времени закономерности зарождения суб- (нано-) и микротрещин (накопление повреждений, называемых в [9] нелокализуемыми усталостными), распространение микротрещины и макротрещины (короткая, длинная), находящихся под влиянием в широком диапазоне разных (одного) факторов, а также локального сопротивления материала.

Для первого этапа разрушения вследствие протекания в материале элемента необратимых процессов, вызванных пластической деформацией, характерно накопление эксплуатационных локализуемых и нелокализуемых повреждений. Указанные повреждения – это наличие большого количества локальных зон пластического деформирования, зависящих от свойств материала и широкого воздействия во времени различных факторов. Кроме того, в материале до начала его эксплуатации могут наблюдаться производственно-технологические повреждения (механические “риски”, шлифовочные и штамповочные “сетки”, растрескивание, примеси, включения, несплошности, поры, трещины). В процессе его эксплуатации возможно влияние конструктивных недостатков (неправильный выбор материала по отношению к эксплуатационным  $X$  факторам, выбор заниженных размеров конструктивных элементов).

В начале эксплуатации элемента в его наиболее опасно напряженной зоне могут “находиться” ранее нелокализуемые производственно-технологические повреждения. В зоне они локализируются и являются уже очагом разрушения элемента. Одновременно с производственно-технологическими повреждениями эксплуатационные накапливаются вне (нелокализуемые) и в наиболее опасно напряженной зоне (локализуемые). Накопление локализуемых повреждений и их развитие определяют начало и процесс разрушения элемента. Нелокализуемые повреждения оказывают влияние на развитие локализуемых повреждений и служат очагом зарождения новых микротрещин. Микротрещина характеризует второй этап процесса разрушения материала элемента.

В ходе развития микротрещины ее размер увеличивается, достигая размера зерна конструкционного материала (поликристаллического), и трещина становится короткой (внутренняя, поверхностная), а затем длинной (сквозная). Начальная скорость распространения длинной трещины условно принята равной значению скорости  $10^{-10}$  м/цикл, определяющей (совместно с короткой трещиной) начало третьего этапа разрушения материала элемента. Исследованию этого этапа и посвящена настоящая работа.

При изучении закономерностей распространения усталостной макротрещины используется метод текущего раскрытия вершины трещины [6, 7] с учетом отмеченных выше особенностей. Установленная функциональная зависимость скорости роста  $da/dN$  такой трещины от эффективного  $\Delta K_{eff}$  и номинального  $\Delta K$  размахов КИН представлена в логарифмических координатах  $\lg da/dN - \lg \Delta K_{eff}, \lg \Delta K$ .

В работе [10] эмпирически описано закономерности роста длинной усталостной трещины в диапазоне влияния коэффициентов асимметрии

цикла нагружения  $R$ ,  $R^*$ , в [11] проанализировано и аналогично представлено кинетику ее роста при различных внешних факторах  $X$ ,  $X^*$  в широком диапазоне их воздействия с учетом наличия и отсутствия закрытия вершины трещины.

Однако, как показала практика, с помощью указанного метода трудно проводить исследования конструкционных материалов в условиях крайне высоких и низких температур, высоких частот нагружения, а также радиационного облучения. Поэтому невозможно достоверно определить эффективные характеристики трещиностойкости материала и описать скорость роста сквозной усталостной макротрещины при экстремальных условиях его эксплуатации.

Ниже показано, что, зная соотношение между эмпирическими параметрами материала  $C_1$  и  $C_2$ , полученное при основных испытаниях, нет необходимости в проведении сложного эксперимента по определению эффективных характеристик циклической трещиностойкости в экстремальных и естественных условиях эксплуатации конструкционного материала. Такое решение позволяет достоверно определить верхнюю границу роста сквозной усталостной макротрещины в случае ее закрытия –  $\Delta K_{fcl, X}$ , а также описать скорость ее роста на всем интервале кинетической диаграммы усталостного разрушения с помощью параметров уравнения, учитывающих закономерности изменения кинетической диаграммы усталостного разрушения при различных экстремальных и естественных условиях эксплуатации материала в широком диапазоне влияния внешних факторов, а также явления закрытия трещины.

**Анализ закономерностей роста сквозной усталостной макротрещины.** Ранее [12] установлено, что при описании кинетики роста длинной усталостной трещины с помощью эффективного размаха КИН  $\Delta K_{eff}$  в логарифмических координатах  $\lg da/dN - \lg \Delta K_{eff}$  используются эмпирические параметры материала  $C_1$ ,  $n_1$ , а номинального размаха КИН  $\Delta K$  в координатах  $\lg da/dN - \lg \Delta K$  – параметры  $C_2$ ,  $n_2$ . Соотношение между параметрами  $C_1$  и  $C_2$  имеет вид

$$C_2 = \frac{C_1}{\Delta K_{fcl}^{n_2 - n_1}}. \quad (1)$$

Эмпирические параметры  $C_1$ ,  $n_1$  и  $n_2$  остаются постоянными в широком диапазоне воздействия одного фактора [10, 12]. Изменяется только параметр  $C_2$ , который и необходимо определить экспериментально. Отмеченная закономерность наблюдается при воздействии любого из внешних факторов [11].

**Описание кинетики роста сквозной усталостной макротрещины.** В работах [10, 11] скорость роста сквозной усталостной макротрещины  $(da/dN)_X$  для полной кинетической диаграммы усталостного разрушения (на трех участках КДУР в смешанной системе координат) при воздействии в широком диапазоне разных (одного) факторов  $X$  и наличии закрытия вершины трещины определяется следующим образом:

$$(da/dN)_X = \begin{cases} \frac{C_1 (\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X})^{n_2/2}}{\Delta K_{fcl,X}^{n_2-n_1}} + \\ + \begin{cases} -(\sqrt{\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X}} - \Delta K_X)^{q_{2,I}} & \text{при } \Delta K_{th,X} \leq \Delta K_X \leq \Delta K_{1-2,X}; \\ +(\Delta K_X - \sqrt{\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X}})^{q_{2,III}} & \text{при } \Delta K_{2-3,X} \leq \Delta K_X \leq \Delta K_{fc,X}; \end{cases} \\ \frac{C_1 \Delta K_X^{n_2}}{\Delta K_{fcl,X}^{n_2-n_1}} & \text{при } \Delta K_{1-2,X} \leq \Delta K_X \leq \Delta K_{2-3,X}. \end{cases} \quad (2)$$

При отсутствии закрытия вершины трещины (факторы  $X^*$ ) зависимость (2) имеет вид

$$(da/dN)_{X^*} = \begin{cases} C_2 (\Delta K_{th,X^*} \Delta K_{fc,X^*})^{n_2/2} + \\ + \begin{cases} -(\sqrt{\Delta K_{th,X^*} \Delta K_{fc,X^*}} - \Delta K_{X^*})^{q_{2,I}} & \text{при } \Delta K_{th,X^*} \leq \Delta K_{X^*} \leq \Delta K_{1-2,X^*}; \\ +(\Delta K_{X^*} - \sqrt{\Delta K_{th,X^*} \Delta K_{fc,X^*}})^{q_{2,III}} & \text{при } \Delta K_{2-3,X^*} \leq \Delta K_{X^*} \leq \Delta K_{fc,X^*}; \end{cases} \\ C_2 (\Delta K_{X^*})^{n_2} & \text{при } \Delta K_{1-2,X^*} \leq \Delta K_{X^*} \leq \Delta K_{2-3,X^*}. \end{cases} \quad (3)$$

Смещенное начало системы координат  $(\Delta K_X^*, (da/dN)_X^*)$ , связь между эффективным  $\Delta K_{eff}$  и номинальным  $\Delta K_X$  размахами КИН на втором участке КДУР определены ранее [10, 13]. Пороговые  $\Delta K_{th,X}$  и критические  $\Delta K_{fc,X}$ , а также номинальные размахи КИН, соответствующие началу  $\Delta K_{1-2,X}$  и концу  $\Delta K_{2-3,X}$  второго участка КДУР, установлены согласно [14] с использованием кинетических диаграмм усталостного разрушения в номинальных логарифмических координатах  $\lg da/dN - \lg \Delta K$ .

Показатели степени  $q_{1,I}$ ,  $q_{2,I}$  и эффективный  $\Delta K_{eff,I}$  размах КИН на первом, а  $q_{2,III}$  на третьем участках кинетической диаграммы усталостного разрушения при коэффициенте пропорциональности  $A=1$  в точках  $\Delta K_{eff,1-2}$ ,  $\Delta K_{1-2,X}$ ,  $\Delta K_{2-3,X}$ ,  $\Delta K_{eff}$  сравнения скоростей роста усталостной макротрещины [10] при вычитании из скорости  $(da/dN)_X^*$  или  $(da/dN)_{eff}^*$  (в начале смещенных систем координат) прироста скорости роста трещины на первом и сложении его со скоростью на третьем участках описываются следующим образом:

$$q_{1,I} = \frac{\lg C_1 + \frac{n_1}{2} \lg \Delta K_{eff,1-2} + \lg(\Delta K_{fcl,0}^{n_1/2} - \Delta K_{eff,1-2}^{n_1/2})}{\lg[(\Delta K_{eff,1-2} \Delta K_{fcl,0})^{1/2} - \Delta K_{eff,1-2}]}; \quad (4)$$



$$q_{2,I} = \frac{\lg C_1 - (n_2 - n_1) \lg \Delta K_{fcl,X} + \lg[(\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X})^{n_2/2} - \Delta K_{1-2,X}^{n_2}]}{\lg[(\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X})^{1/2} - \Delta K_{1-2,X}]}; \quad (5)$$

$$q_{2,III} = \frac{\lg C_1 - (n_2 - n_1) \lg \Delta K_{fcl,X} + \lg[\Delta K_{2-3,X}^{n_2} - (\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X})^{n_2/2}]}{\lg[\Delta K_{2-3,X} - (\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X})^{1/2}]}; \quad (6)$$

$$\Delta K_{eff,I} = (\Delta K_{eff,1-2} \Delta K_{fcl,0})^{1/2} - \left\{ [(\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X})^{1/2} - \Delta K_X]^{q_2} + \right. \\ \left. + C_1 \left[ (\Delta K_{eff,1-2} \Delta K_{fcl,0})^{n_1/2} - \frac{(\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X})^{n_2/2}}{\Delta K_{fcl,X}^{n_2-n_1}} \right] \right\}^{1/q_1}$$

$$\text{при } \Delta K_{th,X} \leq \Delta K_X \leq \Delta K_{1-2,X}. \quad (7)$$

В формулах (8), (10) [10] скорость в начале смещенной системы координат умножалась на прирост скорости роста усталостной трещины на первом участке кинетической диаграммы усталостного разрушения, при этом была допущена ошибка в определении  $q_{1,I}$ ,  $q_{2,I}$ . Полученные показатели степени определяются следующим образом:

$$q_{1,I} = \frac{n_1(\lg \Delta K_{eff,1-2} - \lg \Delta K_{fcl,0})}{2 \lg(\sqrt{\Delta K_{eff,1-2} \Delta K_{fcl,0}} - \Delta K_{eff,1-2})}; \\ q_{2,I} = \frac{n_2(2 \lg \Delta K_{1-2,X} - \lg \Delta K_{th,X} - \lg \Delta K_{fc,X})}{2 \lg(\sqrt{\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X}} - \Delta K_{1-2,X})}.$$

Достоверными остаются показатели степени  $q_{1,I}$ ,  $q_{2,I}$ ,  $q_{2,III}$  и эффективный  $\Delta K_{eff,I}$  размах КИН, определенные путем вычитания из скорости  $(da/dN)_X^*$  или  $(da/dN)_{eff}^*$  прироста скорости роста трещины на первом и сложения его со скоростью на третьем участках кинетической диаграммы усталостного разрушения (4)–(7).

Верхняя граница роста длинной усталостной трещины в случае ее закрытия  $\Delta K_{fcl,X}$  определяется экспериментально [13]. Однако в экстремальных условиях эксплуатации конструкционного материала предложенная ранее [13] методика трудно реализуема из-за сложности применения метода текущего раскрытия вершины трещины [6, 7]. Исходя из этого воспользуемся соотношением (1), и верхнюю границу роста сквозной усталостной макротрещины найдем по формуле

$$\Delta K_{fcl} = \left( \frac{C_1}{C_2} \right)^{1/(n_2-n_1)} \quad (8)$$

Долговечность  $N_X$  материала элемента с трещиной при воздействии в широком диапазоне разных (одного) факторов  $X$  в случае закрытия ее вершины определяется путем интегрирования формулы скорости роста сквозной усталостной макротрещины (2):

$$\begin{aligned} N_X = & \int_{a_{th,X}}^{a_{1-2,X}} \frac{da_X}{\frac{C_1(\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X})^{n_2/2}}{\Delta K_{fcl,X}^{n_2-n_1}} - \left( \sqrt{\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X}} - \frac{\Delta P_X \sqrt{\lambda}}{t\sqrt{b}} Y \right)^{q_{2,I}}} + \\ & + \frac{\Delta K_{fcl,X}^{n_2-n_1}}{C_1} \int_{a_{1-2,X}}^{a_{2-3,X}} \frac{da_X}{\left( \frac{\Delta P_X \sqrt{\lambda}}{t\sqrt{b}} Y \right)^{n_2}} + \\ & + \int_{a_{2-3,X}}^{a_{fc,X}} \frac{da_X}{\frac{C_1(\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X})^{n_2/2}}{\Delta K_{fcl,X}^{n_2-n_1}} + \left( \frac{\Delta P_X \sqrt{\lambda}}{t\sqrt{b}} Y - \sqrt{\Delta K_{th,X} \Delta K_{fc,X}} \right)^{q_{2,III}}}, \quad (9) \end{aligned}$$

в случае отсутствия закрытия вершины трещины (факторы  $X^*$ ) – интегрированием формулы (3):

$$\begin{aligned} N_{X^*} = & \int_{a_{th,X^*}}^{a_{1-2,X^*}} \frac{da_{X^*}}{C_2(\Delta K_{th,X^*} \Delta K_{fc,X^*})^{n_2/2} - \left( \sqrt{\Delta K_{th,X^*} \Delta K_{fc,X^*}} - \frac{\Delta P_{X^*} \sqrt{\lambda}}{t\sqrt{b}} Y \right)^{q_{2,I}}} + \\ & + \frac{1}{C_2} \int_{a_{1-2,X^*}}^{a_{2-3,X^*}} \frac{da_{X^*}}{\left( \frac{\Delta P_{X^*} \sqrt{\lambda}}{t\sqrt{b}} Y \right)^{n_2}} + \\ & + \int_{a_{2-3,X^*}}^{a_{fc,X^*}} \frac{da_{X^*}}{C_2(\Delta K_{th,X^*} \Delta K_{fc,X^*})^{n_2/2} + \left( \frac{\Delta P_{X^*} \sqrt{\lambda}}{t\sqrt{b}} Y - \sqrt{\Delta K_{th,X^*} \Delta K_{fc,X^*}} \right)^{q_{2,III}}}. \quad (10) \end{aligned}$$



На каждом участке КДУР величина  $Y$  зависит от текущей длины сквозной усталостной макротрещины  $a_X$  и определяется для разных типов образцов.

**Особенности распространения сквозной усталостной макротрещины в металлах при упругопластическом разрушении.** Известно, что закономерности роста усталостной макротрещины в металлических материалах можно проиллюстрировать графически с помощью кинетических диаграмм усталостного разрушения в номинальных [11, 14], номинально эффективных [10, 12, 13] логарифмических координатах и описать эмпирически в течение времени воздействия в широком диапазоне разных факторов [10, 11].

На практике встречаются следующие типы кинетических диаграмм усталостного разрушения [14–16]: полные или неполные (без третьего участка) S-образные кривые, симметричные относительно средней точки КДУР; кривые с отклонениями от S-образного типа в виде локальных различных аномалий – горб, впадина, без загиба вверх (на третьем участке), вниз (на первом), а также скачки. Кроме того, каждому участку КДУР присущи свои закономерности роста трещины, механизмы разрушения и закрытия–раскрытия вершины трещины. Иногда первый участок принимает близкое к вертикальному положение, что вызывает сомнения в научных кругах о его физической и механической природе (предпринимаются попытки объяснить это рассеянием свойств материала). В [9, 15–17] отмечалось, что трещина растет стабильно или нестабильно (скачками).

Для решения существующих проблем воспользуемся данными работ [18, 19]. При этом заметим, что закономерности закрытия–раскрытия вершины трещины изучались экспериментально по предложенному в [6, 7] методу на базе измерения раскрытия вершины трещины  $\Omega \leq y \leq 3,6$  мм ( $\Omega$  – параметр, характеризующий контур пластической зоны в вершине трещины), что соответствует  $K$ -доминантной зоне упругого деформирования материала у вершины трещины [17].

Ранее в [18, 19] экспериментально установлено, что механизм Элбера (остаточные сжимающие напряжения) состоит из пластической зоны в вершине трещины и пластического потока вдоль ее берегов. Реальная пластическая зона препятствует развитию трещины в неразрушенной части сечения образца, детали, а пластический поток (наличие на берегах реальной усталостной трещины пластически деформированного материала, увеличенного в размерах по сравнению с исходным недеформированным материалом, порождающим остаточные сжимающие напряжения вдоль берегов трещины), смыкая берега трещины, сдерживает ее рост в цикле.

Необходимо отметить, что пластическая зона имеет место до разрушения образца, детали, а наличие пластического потока описывается критерием роста трещины в широком диапазоне воздействия одного фактора  $\Delta K_{fcl,th,X} \leq \Delta K_{eff} \leq \Delta K_{fcl,X}$ .

Полученные ранее данные [18, 19] свидетельствуют, что на первом участке КДУР усталостная макротрещина закрывается в цикле до самого высокого уровня (характеристика закрытия трещины  $\Delta K_{cl}^{op}$  близка к номи-

нальному размаху КИН  $\Delta K$ ). При этом механизмами закрытия трещины, которые влияют на величину  $\Delta K_{cl}^{op}$ , т.е. на закономерности роста трещины, являются: шероховатость, окислы и фреттинг-коррозия на поверхностях излома – расклинивающие; остаточные сжимающие напряжения в вершине и вдоль берегов трещины – препятствующий и сдерживающий рост трещины. Номинальный размах КИН  $\Delta K$  на первом участке низкий, значит, роль препятствующего и сдерживающего рост трещины механизмов будет незначительной, в то время как роль расклинивающих механизмов – существенной (продолжительные испытания). В результате действия последних трещина расклинивается и простаивает в течение многих циклов, а затем проскакивает на величину, соизмеримо большую для первого участка. Таким образом, поскольку малым приращениям номинального размаха КИН  $\Delta K$  соответствуют большие приращения скорости роста трещины  $da/dN$ , иногда первый участок принимает близкое к вертикальному расположение, а разрушение протекает по механизмам скола или сдвига. При высоких температурах (выше 623 К) в стали 08X18H10T на первом участке ниже скорости роста трещины  $da/dN = 10^{-9}$  м/цикл развиваются не локализуемые повреждения, которые тормозят развитие магистральной трещины (положительный эффект).

На втором участке в пределах наличия закрытия трещины усталостная макротрещина развивается стабильно по бороздчатому механизму разрушения. После того как остаточные сжимающие напряжения вдоль берегов макротрещины перейдут в пластическую зону напостоянно (трещина раскрыта в цикле), начинается (или может начаться) ее нестабильный рост или (для состаренного материала, например трубная сталь 17ГС) вдоль магистральной трещины развивается множество коротких трещин, которые создают пластический поток, ложно закрывающий ее, что не позволяет корректно определить критический размах КИН  $\Delta K_{fc}$ .

Наличие горба, впадины и отсутствие загиба на третьем участке номинальной КДУР показывают, что материал создан для конкретных условий эксплуатации (решены структурные, производственно-технологические, физико-химические вопросы) или что он работает в не предназначенных для него условиях эксплуатации, возможно критических.

**Граничное упругопластическое состояние материала элемента с трещиной и типы его разрушения.** Полученные ранее [3, 12, 13, 18, 19] экспериментальные данные позволяют построить зависимость эффективного  $\Delta K_{eff}$  и номинального  $\Delta K_X$  размахов КИН от размаха нагрузки  $\Delta P_X$  при воздействии в широком диапазоне разных факторов  $X, X^*$  (рисунок). Характеристики материала, описывающие эту зависимость, определяют тип разрушения и опасное граничное состояние (граничная кривая) элемента с трещиной в области упругопластического разрушения. Характеристика материала  $\Delta K_{eff, T_1}^{f.inv}$  (на рисунке кривая 1) свидетельствует, что сталь Д9Н (применяется при изготовлении тракторов “Катерпиллер”) создана для работы при низких климатических температурах.



Зависимость  $\Delta K_{eff}$  (сплошные линии) и  $\Delta K_X$  (штриховая линия) от  $\Delta P_X$  для стали D9H при  $T = 293...125$  К (1) и  $R = 0,1...0,75$ ,  $T = 623, 293...125$  К, статическое нагружение (2, 3): I – вязкое разрушение при воздействии различных факторов; II – квазихрупкое при снижении низких температур и росте нагрузки; III – хрупкое при крайне низких температурах и увеличении нагрузки (исчерпывается пластичность материала к условно нулевому значению); IV – вязкое при повышении высоких температур или нагрузки с развитием пластичности, переходящей в пластический коллапс; V – вязкое при росте силового фактора в случае совместного влияния постоянного и повторно-переменного нагружений.

Ниже предлагается следующая схема достоверного описания кинетики распространения сквозной усталостной макротрещины в экстремальных или естественных условиях эксплуатации конструкционного материала при воздействии в широком диапазоне одного (разных) фактора.

1. Проведение основных испытаний (атмосферное давление, воздух с относительной влажностью 40...60%, коэффициент асимметрии цикла нагружения  $0 \leq R \leq 0,1$ ,  $T = 290...296$  К,  $f = 10...20$  Гц, синусоидальная форма цикла, тип нагружения I) компактного образца по описанным ранее методам [6, 7, 14] и построение кинетической диаграммы усталостного разрушения в координатах  $\lg da/dN - \lg \Delta K_{eff}$ ,  $\lg \Delta K$ .

2. Нахождение эффективных и номинальных характеристик циклической трещиностойкости  $\Delta K_{eff,1-2}$ ,  $\Delta K_{fcl,0}$ ,  $\Delta K_{1-2,X}$ ,  $\Delta K_{2-3,X}$ ,  $\Delta K_{th,X}$ ,  $\Delta K_{fc,X}$ , а также эмпирических параметров  $C_1$ ,  $n_1$ ,  $C_2$ ,  $n_2$ .

3. Определение согласно [10, 11, 13] смещенного начала системы координат  $(\Delta K_X^*, (da/dN)_X^*)$ , связи между эффективным  $\Delta K_{eff}$  и номинальным  $\Delta K_X$  размахами КИН на первом и втором участках КДУР:  $\Delta K_{eff, I}$ ,  $\Delta K_{eff, II}$ , показателей степени на первом и третьем:  $q_{1,I}$ ,  $q_{2,I}$ ,  $q_{2,III}$ .

4. Проведение испытания компактного образца по методу [14] и построение кинетической диаграммы усталостного разрушения в координатах  $\lg da/dN - \lg \Delta K$ .

5. Нахождение номинальных характеристик циклической трещиностойкости  $\Delta K_{1-2,X}$ ,  $\Delta K_{2-3,X}$ ,  $\Delta K_{th,X}$ ,  $\Delta K_{fc,X}$  и эмпирического параметра  $C_2$ .

6. Определение с использованием соотношения (8) верхней границы роста сквозной усталостной макротрещины при ее закрытии  $\Delta K_{fcl,X}$ .

7. Описание по формулам (2), (3) скорости роста длинной усталостной трещины в широком диапазоне воздействия одного фактора.

8. Описание скорости роста усталостной макротрещины при воздействии различных факторов аналогично влиянию одного фактора.

9. Определение по формулам (9), (10) долговечности  $N_X$  материала элемента с трещиной при воздействии в широком диапазоне разных факторов в случае наличия ( $X$ ) и отсутствия закрытия ( $X^*$ ) вершины трещины.

10. Определение по зависимости  $\Delta K_{eff}$ ,  $\Delta K_X - \Delta P_X$  (рисунок) опасного граничного упругопластического состояния материала элемента с трещиной и типов его разрушения при воздействии различных факторов.

**Заключение.** Полученное ранее соотношение между параметрами материала  $C_1$  и  $C_2$  позволяет эмпирически устанавливать верхнюю границу  $\Delta K_{fc1,X}$  роста длинной усталостной трещины в случае ее закрытия.

Скорость роста сквозной усталостной макротрещины на всем интервале кинетической диаграммы усталостного разрушения достоверно описана с помощью параметров уравнения, учитывающих закономерности ее изменения при различных экстремальных или естественных условиях эксплуатации конструкционного материала в случае воздействия разных факторов и явления закрытия трещины.

Долговечность материала элемента с трещиной при воздействии разных (одного) факторов в случае наличия и отсутствия закрытия вершины трещины определена путем интегрирования формул для скорости роста макротрещины.

Анализ кинетики роста усталостной макротрещины показал, что стабильность распространения трещины обеспечивается наличием остаточных сжимающих напряжений вдоль ее берегов.

Определены опасное граничное упругопластическое состояние материала элемента с трещиной и типы его разрушения при воздействии различных факторов.

Предложена методика достоверного описания кинетики распространения длинной усталостной трещины в экстремальных или естественных условиях эксплуатации конструкционного материала при воздействии в широком диапазоне одного (разных) фактора.

Автор выражает благодарность канд. техн. наук В. А. Ромащенко за ценные рекомендации.

## Резюме

Завдяки отриманому раніше автором співвідношенню між емпіричними параметрами  $C_1$  і  $C_2$  відпадає необхідність у постановці в екстремальних і природних умовах складного експерименту по визначенню ефективних характеристик циклічної тріщиностійкості конструкційного матеріалу і верхньої межі  $\Delta K_{fc1,X}$  поширення в ньому тріщини від утомленості за наявності закриття вістря тріщини. Результати основних випробувань по визначенню номінальних, ефективних характеристик циклічної тріщиностійкості і отримане співвідношення достовірно описують кінетику поширення макротріщини на всьому інтервалі кінетичної діаграми втомного руйнування за

допомогою рівняння, що ураховує закономірності її зміни в широкому діапазоні дії різних чинників в екстремальних і природних умовах та при закритті тріщини. За вказаних умов визначена довговічність матеріалу елемента з тріщиною та його небезпечний граничний стан. Аналіз кінетики росту наскрізної утомної макротріщини свідчить, що стабільність поширення тріщини забезпечується наявністю залишкових стискуючих напружень вздовж її берегів.

1. *Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях*: В 2 т. / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1980.
2. *Критерии прочности // Сопротивление материалов / Под ред. Г. С. Писаренко*. – Киев: Вища шк., 1986. – С. 200 – 214.
3. Пиняк И. С. Двохпараметричний підхід до розрахунку на міцність конструктивного елемента з тріщиною // Междунар. конф. “Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС” (Киев, май 2003 г.): Тез. докл. – Киев: ИПП им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2003. – С. 94.
4. Пиняк И. С., Кобельский С. В. Циклическая долговечность конструкционного материала с трещиной с учетом условий эксплуатации // Междунар. конф. “Конструкционная прочность материалов и ресурс оборудования АЭС” (Киев, май 2003 г.): Тез. докл. – Киев: ИПП им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2003. – С. 95.
5. Irving G. R. and Washington D. Analysis of stresses and strain near the end of a crack traversing a plate // J. Appl. Mech. – 1957. – 24, No. 3. – P. 361 – 364.
6. Пиняк И. С. Методологія вивчення закономірностей поширення втомної тріщини за критерієм росту – поточним і обмеженим ефективним розмахом КІН // Вибрации в технике и технологиях. – 2001. – № 5. – С. 50 – 53.
7. Красовський А. Я., Пиняк И. С. Метод поточного розкриття вістря тріщини в умовах циклічного навантаження // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 12 – 27.
8. Wallin K. The scatter in  $K_{Ic}$  results // Eng. Fract. Mech. – 1984. – 19. – P. 1085 – 1093.
9. Трощенко В. Т. Некоторые особенности роста усталостных трещин на различных стадиях их развития // Пробл. прочности. – 2003. – № 6. – С. 5 – 29.
10. Пиняк И. С. Аналитическое описание скорости роста усталостной трещины в металлах при различных асимметриях цикла нагружения // Там же. – 2001. – № 5. – С. 111 – 119.
11. Красовский А. Я., Пиняк И. С. Аналитическое описание скорости роста усталостной макротрещины в металлах при различных условиях их эксплуатации // Праці IV Міжнар. симп. з трибофатики (ISTF4). – Тернопіль, 2002. – Т. 1. – С. 284 – 289.

12. Пиняк И. С. О достоверном уравнении второго участка кинетической диаграммы усталостного разрушения // Пробл. прочности. – 1999. – № 3. – С. 83 – 87.
13. Пиняк И. С. Рівняння другої ділянки кінетичної діаграми втомного руйнування за різних додатніх асиметрій циклу навантаження // Там же. – 2000. – № 2. – С. 75 – 80.
14. Методы механических испытаний материалов. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении. Методические указания. Сер.: Проблемы прочности, долговечности и надежности продукции машиностроения. – М.: МНТК “Надежность машин”, 1993. – 56 с.
15. Механика разрушения и прочность материалов: В 4 т. / Под ред. В. В. Панасюка. – Т. 4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 679 с.
16. Троценко В. Т., Покровский В. В. Влияние цикличности нагружения на характеристики трещиностойкости сталей. Сообщ. 2 // Пробл. прочности. – 1980. – № 12. – С. 14 – 17.
17. Schijve J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art // Proc. of the 14 Biennial Conf. on Fracture (ECF14). – Warsaw, 2002. – Vol. III. – P. 211 – 262.
18. Пиняк И. С. Микро- и макроскорость роста усталостной трещины в сталях и сплавах под влиянием закрытия трещины // Пробл. прочности. – 2002. – № 1. – С. 88 – 101.
19. Пиняк И. С. Вязкохрупкий переход в хладноломких металлах при многоцикловом нагружении // Там же. – № 5. – С. 53 – 69.

Поступила 11. 04. 2002