

Микро- и макроскорость роста усталостной трещины в сталях и сплавах под влиянием закрытия трещины

И. С. Пиняк

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

На основе экспериментальных данных показано, что различие между макро- и микро- скоростью роста усталостной трещины на втором участке кинетической диаграммы усталостного разрушения обусловлено закрытием трещины в пределах его наличия. Установлены зависимости между макро- и микро- скоростью роста усталостной трещины, а также структурой материала на втором участке при разных асимметриях цикла нагружения с учетом влияния закрытия трещины. Создана методика экспертизы разрушения конструкционных материалов по микро- и макроскорости роста усталостной трещины.

Ключевые слова: макро- и микро- скорость роста усталостной трещины, плато, шаг бороздки, закрытие трещины, асимметрия цикла.

Обозначения

da / dN	– скорость роста усталостной трещины (РУТ)
$(da / dN)_{II, R}$	– скорость РУТ на втором участке кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) при разных асимметриях цикла
R, R^*	– коэффициенты асимметрии цикла нагружения при наличии и отсутствии закрытия трещины (ЗТ)
$S, S_{II, eff-R}$	– соответственно шаг усталостной бороздки (расстояние между серединами соседних выступов или впадин), ее шаг на втором участке КДУР при разных асимметриях R, R^* цикла
K_{min}, K_{max}	– минимальный и максимальный коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) в цикле
K_{op}, K_{cl}	– соответственно КИН раскрытия и закрытия трещины в цикле
$\Delta K = K_{max} - K_{min}; \Delta K_R$	– номинальный размах КИН в цикле при одной и разных асимметриях R
$\Delta K_{cl}^{op} = K_{op} - K_{min}$	– характеристика закрытия трещины в цикле
$\Delta K_{eff} = \Delta K - \Delta K_{cl}^{op}$	– эффективный размах КИН в цикле
$\Delta K_{th}, \Delta K_{th, eff}, \Delta K_{fcl, th}$	– соответственно пороговый и пороговые эффективный, критический эффективный размахи КИН в цикле

$\Delta K_{fcl,0}, \Delta K_{fcl}, \Delta K_{fcl,R}$	– критический эффективный размах КИН в цикле соответственно при нулевой, единичной и разных асимметриях цикла нагружения
$\Delta K_{fcl,th,R}$	– критический эффективный пороговый размах КИН в цикле при разных асимметриях
$\Delta K_{eff1-2}, \Delta K_{1-2,R}, \Delta K_{2-3,R}$	– эффективный размах КИН и размахи КИН в цикле, соответствующие началу и концу второго участка КДУР при разных асимметриях цикла
C_1, C_2, n_1, n_2	– характеристики материала
f	– частота нагружения образца
l_z	– размер зерна
m_z	– количество бороздок усталости в зерне
ΔK_{cl}^{pl}	– характеристика ЗТ в цикле, определяемая механизмом Элбера
$\Delta K_{cl}^{ox+\gamma rg}$	– характеристика ЗТ в цикле, определяемая окислами и шероховатостью на поверхности излома

Введение. Развитие количественной фрактографии позволило установить зависимость особенностей рельефа поверхности излома от параметров нагружения и характеристик циклической трещиностойкости. Вместе с тем появилась возможность прогнозирования характеристик трещиностойкости по микростроению рельефа поверхности излома для случаев разрушения элементов конструкций при эксплуатации.

Экспертиза разрушения включает в себя микрофрактографический анализ рельефа поверхности излома, т.е. определение шага усталостных бороздок [1–7], являющихся наиболее информативной характеристикой микро-рельефа усталостных изломов. Представляет также интерес установление аналитической связи (путем сопоставления) между макроскоростью, кинетикой роста усталостной трещины (параметрами циклической трещиностойкости, определенными экспериментально) [8, 9] и так называемой микроскоростью, определяемой путем измерения расстояния между соседними бороздками (шага бороздок) в изломе.

Результаты таких исследований, приведенные в работах [6, 7, 10–17], иллюстрируют линейные (в логарифмических координатах на втором участке КДУР) экспериментальные зависимости макроскопической скорости da/dN и шага бороздок S от номинального размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK , которые часто пересекаются в области значения скорости $da/dN = 10^{-7}$ м/цикл. Указанные зависимости свидетельствуют об усилении несоответствия между макро- и микроскоростью распространения трещины в низко- и высокоамплитудной области кинетической диаграммы усталостного разрушения соответственно по мере снижения и повышения ΔK . На начальной стадии роста трещины микроскорость, как правило, превышает макроскорость, тогда как в высокоамплитудной области имеет место обратная связь. В области пересечения этих зависимостей фиксируется

удовлетворительное соответствие наблюдаемых в изломе бороздок с числом циклов нагружения [15]. Удовлетворительная корреляция между шагом бороздок и макроскоростью в достаточно широком интервале скоростей отмечена в следующих работах: в [12] для алюминиевых сплавов 7075-T6 и 2024-T3 он составляет $4 \cdot 10^{-8} \dots 10^{-6}$ м/цикл; в [6, 13] для низкоуглеродистых сталей (0,03...0,05%С) – $10^{-7} \dots 2 \cdot 10^{-6}$ м/цикл. Обзор исследований интервалов соответствия между макро- и микроскоростью РУТ сделан в работе [16].

В [17] показан сложный характер зависимости da / dN и S от КИН K_{\max} . Установлено, что макро- и микроскорости РУТ близки между собой в интервале $8 \cdot 10^{-7} \dots 4 \cdot 10^{-6}$ м/цикл. Ниже $da / dN = 8 \cdot 10^{-7}$ м/цикл и до начала второго участка КДУР шаг бороздок практически постоянен, тогда как на первом участке отмечается уменьшение межбороздчатых расстояний по мере снижения K_{\max} .

Исследования стали 12Г2А [10] убедительно подтверждают, что макро- и микроскорости РУТ зависят от коэффициента асимметрии цикла нагружения R . Так, при $R = 0$ и $0,5$ зависимости шага бороздок в изломе и макроскорости РУТ от размаха КИН ΔK представлены в виде пересекающихся линий (особенности образования таких областей пересечения отмечены в работе [15]). При симметричном растяжении–сжатии ($R = -1$) скорость РУТ, определенная микрофрактографическим методом, адекватна скорости, измеренной на боковой поверхности образца.

В [14] установлено хорошее соответствие между значениями макро- и микроскорости РУТ в титановом сплаве при частоте нагружения 20 Гц, при снижении частоты до 0,2 Гц эти значения отличаются.

В работе [18] на примере алюминиевого сплава 2024-T3 и стали М50 (0,13%С) показано, что с уменьшением частоты нагружения увеличиваются межбороздчатые расстояния. Там же получена экспериментальная зависимость шага бороздок S от размаха КИН ΔK и частоты f нагружения.

В [19] предложена зависимость шага бороздок S от эффективного размаха КИН ΔK_{eff} , учитывающего величину среднего напряжения посредством некоторой функции коэффициента асимметрии R цикла нагружения $\Delta K_{eff} = (0,5 + 0,4R)\Delta K$. Указанная зависимость характеризуется меньшим разбросом экспериментальных данных по сравнению с зависимостью $S - \Delta K$. Функциональные связи S и ΔK_{eff} при разных частотах нагружения, хотя и зависят от последних, все же находятся в одной полосе разброса зависимостей $S - \Delta K$ [15, 19]. Шаг бороздок S связан с ΔK_{eff} степенным соотношением типа

$$S = B \left(\frac{\Delta K_{eff}}{E} \right)^p, \quad (1)$$

где B , p – константы; E – модуль упругости. Однако достоверность определения эффективного размаха КИН ΔK_{eff} в границах наличия закрытия трещины [19] низкая из-за отсутствия методики текущего раскрытия вер-

шины трещины. В связи с этим расширяется полоса разброса зависимостей $S - \Delta K_{eff}$ и уменьшается интервал совпадения макро- и микроскорости РУТ.

Согласно известным данным [1–3, 6, 7, 15–24], для определенного класса материалов и условий испытаний существует интервал скоростей РУТ, в котором происходит формирование одной бороздки за цикл нагружения. Таким интервалом можно считать область значений скоростей РУТ от 10^{-8} до 10^{-6} м/цикл [7, 12, 15, 16, 22–24]. Важным представляется тот факт [15, 25], что для различных классов металлических материалов и условий испытаний область наилучшей корреляции между макро- и микроскоростью находится в области значения скорости 10^{-7} м/цикл, т.е. на среднем участке КДУР. Именно при этой скорости отмечается совпадение макро- и микроскорости РУТ [26].

В работах [16, 22] обобщенная зависимость S от ΔK , совмещенная с КДУР, показана в виде S-образной кривой. Она имеет плато (горизонтальный участок, параллельный оси абсцисс) в области низких и высоких скоростей РУТ. Между плато лежит область совпадения макро- и микроскорости РУТ. Начало интервала совпадения обозначено пороговыми размахом КИН ΔK_s и скоростью $(da/dN)_s$, которая чаще всего близка к скорости $da/dN = 10^{-7}$ м/цикл – “точки вращения” [16, 25].

Автор работы [27] принял наибольший КИН K^* при скорости РУТ, равной $(da/dN)^* = 10^{-7}$ м/цикл, и описал средний участок КДУР выражением

$$da/dN = (da/dN)^* \left(\frac{K_{max}}{K^*} \right)^n, \quad (2)$$

где n – характеристика материала.

По мнению авторов [15, 27], параметр K^* приобретает физический смысл КИН, по достижении которого за один цикл нагружения образуется одна бороздка в изломе. Если $K_{max} < K^*$, то для подрастания трещины на расстояние, соответствующее шагу бороздки, требуется более одного цикла нагружения. При $K_{max} \geq K^*$ формирование одной бороздки может происходить за время, равное или меньше одного цикла, что сопровождается ускорением распространения усталостной трещины. Момент такого ускорения роста трещины для различных материалов и структурных состояний определяется разными значениями параметра K^* , который таким образом становится структурно-чувствительной характеристикой циклической трещиностойкости материала. Наблюдаемое при $K_{max} > K^*$ несоответствие между числом циклов нагружения и количеством бороздок в изломе, по мнению ряда исследователей, обусловлено реализацией наряду с бороздками микро-механизмов разрушения статического типа (сколов, ямочного отрыва, расщеления по плоскости скольжения).

В работе [16] отмечается, что при больших скоростях развития трещины (в области высоких значений ΔK) несоответствие между макро- и микроскоростью РУТ связано с действием механизмов статического разру-

шения, приводящих к появлению ямок, фасеток скола, фасеток межзеренного разрушения. Кроме того, РУТ может ускоряться вследствие хрупкого разрушения, вызванного образованием микротрещин на частицах [4], или в результате выпрямления фронта [26]. При низких скоростях РУТ (в области низких значений ΔK) причины несоответствия не столь однозначны и могут быть связаны с влиянием среды, структуры материала, геометрии образца и фронта трещины, с разрешающей способностью электронного микроскопа, с дискретностью процесса роста трещины, с механизмом образования бородок.

Проанализировав исследования разных авторов, возникает следующий вопрос: “Какова же истинная причина несоответствия между макро- и микроскоростью РУТ на втором участке КДУР”.

Для ответа на этот вопрос воспользуемся работами [28–32]. Здесь важным является тот факт, что для различного класса металлических материалов и условий испытаний в пределах, определяемых экспериментально, от критического эффективного порогового размаха КИН $\Delta K_{fcl.th,R}$ до критического эффективного размаха КИН $\Delta K_{fcl,R}$ присутствует явление закрытия вершины усталостной трещины в каждом цикле нагружения до уровня КИН K_{op} , соответствующего началу полного раскрытия трещины по толщине образца. Учет влияния закрытия трещины, выраженного через эффективный размах КИН ΔK_{eff} и определяемого методом измерения текущего (непрерывного) раскрытия вершины трещины [30], позволяет ответить на поставленный вопрос.

В связи с этим в настоящей работе предпринята попытка установить зависимость между макро- и микроскоростью роста усталостной трещины на втором участке кинетической диаграммы усталостного разрушения с учетом влияния закрытия вершины усталостной трещины.

О причинах несоответствия между макро- и микроскоростью роста усталостной трещины на втором участке кинетической диаграммы усталостного разрушения. Для различных металлических материалов и условий испытаний в работах [28–30] и на рис. 1 показано, что если номинальный размах КИН ΔK в цикле находится в пределах $\Delta K_{fcl.th,R} \geq \Delta K \geq \Delta K_{fcl,R}$, то явление закрытия–раскрытия (смыкание–размыкание) трещины в цикле отсутствует и не оказывает влияния на скорость РУТ. Однако при $\Delta K_{fcl,R} > \Delta K_{eff} > \Delta K_{fcl.th,R}$ имеет место закрытие–открытие трещины и оказывает влияние на скорость РУТ. Поэтому в указанном диапазоне нагрузок необходима оценка кинетики РУТ с помощью эффективного размаха КИН ΔK_{eff} (вместо номинального ΔK), который стимулирует скорость роста усталостной трещины в верхней части растягивающей половины цикла нагружения, учитывает влияние закрытия трещины [28] и определяется как разность

$$\Delta K_{eff} = \Delta K - \Delta K_{cl}^{op}. \quad (3)$$

В нижней части растягивающей половины цикла нагружения усталостная трещина остается закрытой, а ее характеристика закрытия ΔK_{cl}^{op} определяется как разность [29]:

$$\Delta K_{cl}^{op} = K_{op} - K_{min} \quad (4)$$

Таким образом, эффективный размах КИН ΔK_{eff} при заданном номинальном размахе КИН ΔK будет в основном зависеть от характеристики закрытия трещины ΔK_{cl}^{op} .

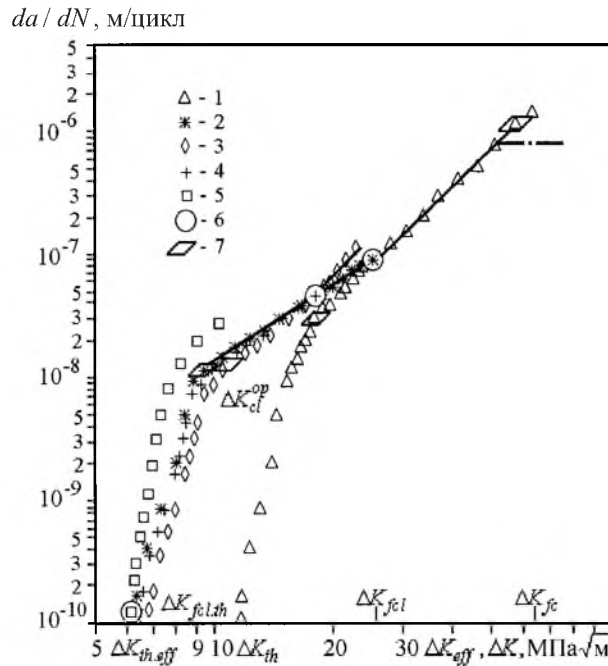


Рис. 1. Зависимость скорости роста усталостной трещины da/dN от ΔK (1, 3, 5), ΔK_{eff} (2, 4) для стали 30L-1 при комнатной температуре и различной асимметрии цикла: 1, 2 – $R = 0,1$; 3, 4 – $R = 0,6$; 5 – $R = 0,7$; 6 – момент исчезновения закрытия трещины при исследованных асимметриях цикла R (соответствует $\Delta K_{fcl,R}$); 7 – начало второго участка КДУР при разных асимметриях R (соответствует $\Delta K_{1-2,R}$), при эффективном размахе КИН ΔK_{eff} (соответствует ΔK_{eff1-2}) и его конец (соответствует $\Delta K_{2-3,R}$).

Можно предположить, что экспериментально полученная зависимость характеристики ЗТ ΔK_{cl}^{op} от номинального размаха КИН ΔK (рис. 2) отображает и обобщает учет влияния действующих механизмов закрытия вершины усталостной трещины (шероховатость, окислы и фреттинг-коррозия на поверхностях излома, размер циклической пластической зоны в вершине усталостной трещины с пластическим потоком вдоль ее берегов) на кинетику ее роста в материале (рис. 1). При этом оказывается, что закрытие трещины представляет собой “запас” циклической трещиностойкости материала, который позволяет (в пределах наличия явления смыкания–размыкания трещины) процессу разрушения протекать одинаково, независимо от асимметрии цикла нагружения и других факторов (*Авт.*), а зависимость $\Delta K_{cl}^{op} - \Delta K$ выступает в роли измерения этого запаса. Подтверждением сказанному является инвариантность КДУР в пределах наличия закрытия трещины (см. рис. 1 и работы [28–30]).

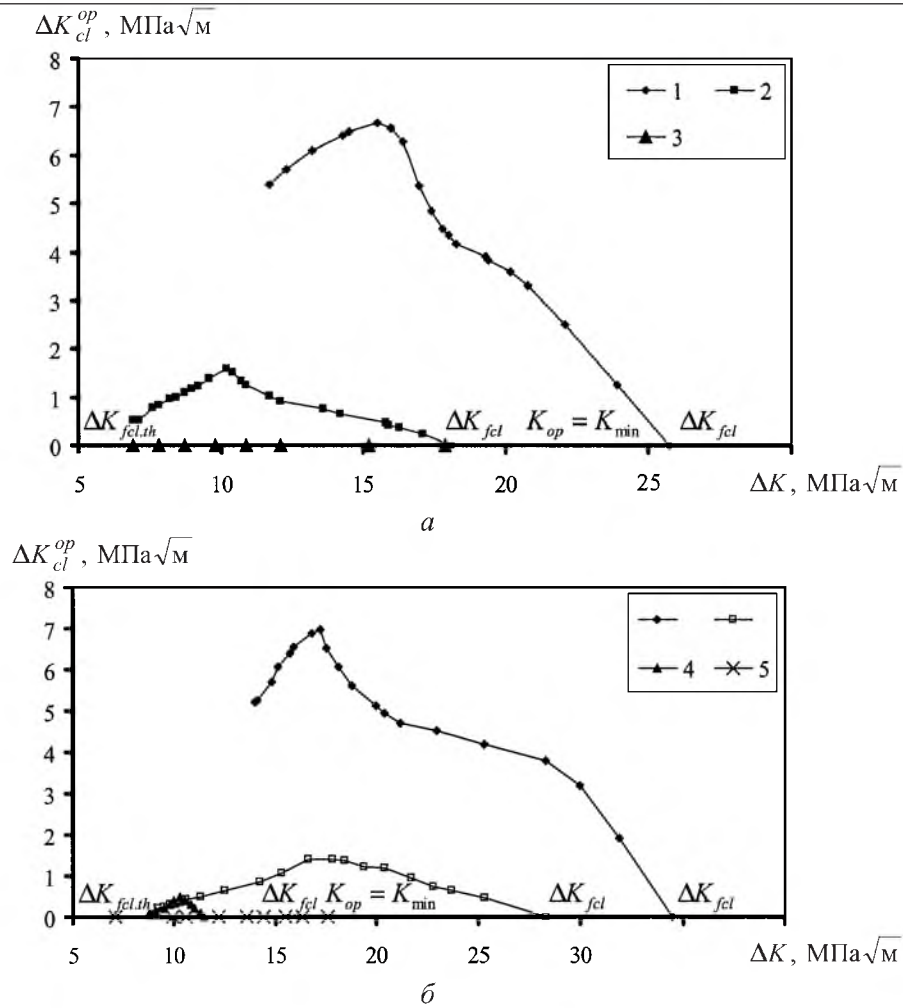


Рис. 2. Зависимость характеристики закрытия трещины ΔK_{cl}^{op} от номинального размаха КИН ΔK для сталей 30L-1 (а) и D9H (б) при $T = 293$ К, частоте нагружения $f = 15$ Гц и различной асимметрии цикла: 1 – $R = 0,1$; 2 – $R = 0,6$; 3 – $R = 0,7$; 4 – $R = 0,65$; 5 – $R = 0,75$.

Кроме того, необходимо отметить, что среди механизмов закрытия трещины главная роль в обеспечении инвариантности эффективных КДUR к разным факторам на втором и третьем (при наличии эффекта ЗТ) участках принадлежит механизму Элбера – размер циклической пластической зоны в вершине усталостной трещины с пластическим потоком вдоль ее берегов.

Для исследованных ранее [28, 29] сталей D9H и 30L-1 на рис. 3 схематически показано, что в каждом цикле нагружения до N_{i+x} при КИН K_{max} имеет место только механизм Элбера. Он представляет собой лишь реальную (не идеальную, которая присуща идеальной трещине, т.е. острый надрез нулевой ширины) пластическую зону в вершине трещины, на которую воздействует неразрушенная часть сечения. Пластический поток отсутствует, но затем появляется снова в цикле и вместе с другими механизмами ЗТ закрывает вершину трещины при значениях КИН от K_{cl} до K_{op} . В N_{i+x} цикле нагружения пластический поток (наличие на берегах реальной уста-

лостной трещины пластически деформированного материала, увеличенного в размерах по сравнению с исходным недеформированным материалом) окончательно переходит в реальную пластическую зону в вершине трещины при равенстве КИН раскрытия вершины трещины K_{op} и минимального K_{min} (при критическом эффективном размахе КИН $\Delta K_{fcl,R}$ и эффективном пороговом размахе КИН $\Delta K_{fcl,th,R}$, нижней и верхней границе роста трещины при наличии эффекта закрытия трещины). После наступления равенства КИН $K_{op} = K_{min}$ трещина в цикле остается постоянно раскрытой, а пластический поток вдоль ее берегов отсутствует. Существует только реальная пластическая зона в вершине усталостной трещины.

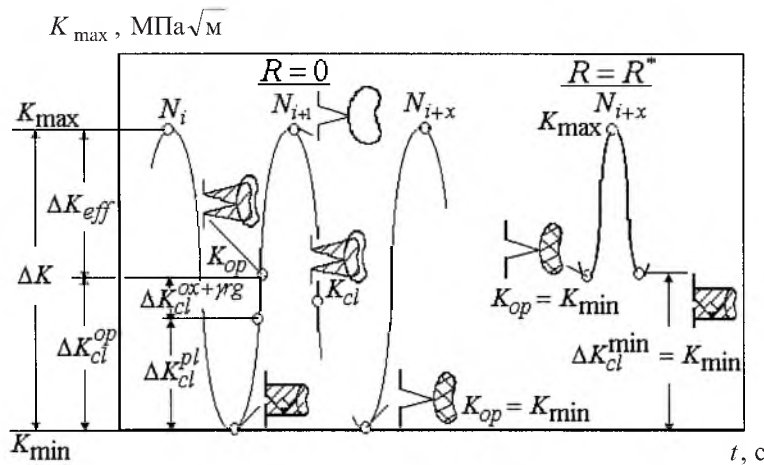


Рис. 3. Модель поведения пластического потока в исследованных сталях 30L-1 и D9H.

При исследовании трубной стали 17ГС разных модификаций такого перехода не наблюдается, по-видимому, из-за образования при высоких значениях номинального размаха КИН ΔK (ближе к критическому значению размаха КИН ΔK_{fc}) вдоль магистральной трещины множества коротких трещин. Следствием существования у вершин коротких трещин реальных пластических зон, видимо, является образование общего пластического потока вдоль магистральной трещины (присутствует практически до разрушения образца), который ее закрывает и не позволяет корректно определить критический размах КИН ΔK_{fc} . Это явление требует тщательного изучения с помощью методики измерения текущего раскрытия вершины усталостной трещины.

Зависимости $\Delta K_{cl}^{op} - \Delta K$ (рис. 2) иллюстрируют поведение характеристики закрытия трещины ΔK_{cl}^{op} , которая отсутствует ($\Delta K_{cl}^{op} = 0$) при критическом эффективном размахе КИН $\Delta K_{fcl,R}$: для стали 30L-1 при $R = 0,1$ и $0,6$, для стали D9H при $R = 0,1; 0,6$ и $0,65$. Для указанных сталей при $R^* = 0,7$ и $0,75$ закрытие трещины в цикле исчезает уже на пороге трещиностойкости при $\Delta K_{fcl,th,R}$ (рис. 1, [30]), и тогда $\Delta K_{cl}^{op} = 0$, а $K_{op} = K_{min}$ (на оси абсцисс рис. 2 прямая линия).

По-видимому, закрытие трещины (в пределах его наличия) оказывает существенное влияние на макро- и микроскорости роста усталостной трещины на втором участке кинетической диаграммы усталостного разрушения (рис. 1, 2). Значит, можно предположить, что бороздка усталости S будет образовываться в цикле N только под влиянием эффективного размаха КИН ΔK_{eff} . При нагрузке ΔK_{cl}^{op} (трещина закрыта) бороздка усталости не развивается. В связи с этим можно заключить, что появление противоречивых высказываний [1–27] относительно различия между макро- и микроскоростью РУТ на втором участке КДУР обусловлено неучетом границ наличия закрытия трещины от критического эффективного порогового размаха КИН $\Delta K_{fcl.th.R}$ до критического эффективного размаха КИН $\Delta K_{fcl.R}$ (рис. 1) и зависимости характеристики закрытия трещины ΔK_{cl}^{op} от номинального размаха КИН ΔK (рис. 2). Зависимость $\Delta K_{cl}^{op} - \Delta K$ свидетельствует о влиянии закрытия трещины на кинетику РУТ и позволяет определять постоянно изменяющийся эффективный размах КИН ΔK_{eff} (3) вплоть до момента исчезновения закрытия трещины $\Delta K_{fcl.R}$. Границы наличия закрытия трещины и зависимости $\Delta K_{cl}^{op} - \Delta K$ определяются с помощью созданной методики измерения текущего раскрытия вершины трещины, частично описанной в [30].

Таким образом, плато в области низких скоростей РУТ на зависимости $S - \Delta K$, совмещенной с КДУР [16, 22], есть не что иное как отражение влияния явления закрытия трещины на кинетику РУТ. Учет этого влияния через характеристику трещиностойкости ΔK_{eff} , определенную по методу текущего раскрытия вершины трещины, позволяет достоверно описать это плато и расширить область соответствия макро- и микроскорости роста усталостной трещины на втором участке КДУР вплоть до характеристики $\Delta K_{fcl.R}$. Совпадение макро- и микроскорости РУТ показано на рис. 1 сплошными линиями при разных асимметриях цикла.

Выше уровня нагрузки $\Delta K_{fcl.R}$, когда закрытие трещины отсутствует, бороздка усталости образуется в цикле уже под воздействием номинального размаха КИН ΔK . Момент развития трещины под воздействием величины ΔK дает возможность сформировать одну бороздку усталости за время, равное одному циклу нагружения. Следует полагать, что за один цикл нагружения образуется одна бороздка усталости в изломе вплоть до конца второго участка КДУР. Однако возможно и несоответствие между макро- и микроскоростью РУТ, обусловленное появлением механизмов статического типа (фасеток скола и межзеренного разрушения, ямочного отрыва, расслоений по плоскостям скольжения). Влияние механизмов такого типа, а также ряд других причин [4, 15, 16, 22, 26] приведут к несоответствию между макро- и микроскоростью РУТ или образованию плато в области высоких скоростей РУТ на зависимости $S - \Delta K$, совмещенной с КДУР (на рис. 1 штрихпунктирная линия).

Зависимость между макро- и микроскоростью роста усталостной трещины на втором участке КДУР при разных асимметриях цикла нагружения с учетом влияния закрытия трещины. На основе изложенного выше можно заключить, что макро- и микроскорости роста усталостной трещины на втором участке КДУР будут совпадать при разных асимметриях цикла нагружения (могут быть и другие факторы), если кинетику РУТ оценивать с помощью эффективного размаха КИН ΔK_{eff} до верхней границы роста трещины при наличии явления ее смыкания–размыкания. Согласно работам [31, 32] и рис. 1, скорости РУТ будут равны:

$$S_{II,eff-R} = (da / dN)_{II,R} = \frac{C_1 \Delta K_R^{n_2}}{\Delta K_{fcl,R}^{n_2-n_1}} \quad \text{при} \quad \Delta K_{1-2,R} \leq \Delta K_R \leq \Delta K_{2-3,R}. \quad (5)$$

Зависимость эффективного размаха КИН ΔK_{eff} от номинального размаха КИН ΔK_R на втором участке КДУР при разных асимметриях цикла в пределах наличия закрытия трещины описывается выражением [32]

$$\Delta K_{eff} = n_1 \sqrt{\frac{\Delta K_R^{n_2}}{\Delta K_{fcl,R}^{n_2-n_1}}} \quad \text{при} \quad \Delta K_{1-2,R} \leq \Delta K_R \leq \Delta K_{fcl,R}. \quad (6)$$

Взаимосвязь между структурой материала, макро- и микроскоростью роста усталостной трещины на втором участке КДУР при разных асимметриях цикла нагружения с учетом влияния закрытия трещины. Структура поликристаллического материала характеризуется размером зерна. В зависимости от микроскорости РУТ в зерне размером l_z могут образовываться бороздки m_z , т.е. размер зерна определяется соотношением

$$l_z = S m_z. \quad (7)$$

Согласно уравнению (5), размер зерна связан с микро- и макроскоростью РУТ при разных асимметриях цикла в пределах наличия закрытия трещины зависимостью

$$l_z = m_z \frac{C_1 \Delta K_R^{n_2}}{\Delta K_{fcl,R}^{n_2-n_1}} \quad \text{при} \quad \Delta K_{1-2,R} \leq \Delta K_R \leq \Delta K_{2-3,R}. \quad (8)$$

Экспертиза разрушения конструкционных материалов по макро- и микроскорости РУТ. Предлагается следующая схема проведения экспертизы (на примере разных коэффициентов асимметрии цикла нагружения):

1) определение кинетики РУТ в материале при пульсирующем цикле ($R = 0$) нагружения по методике измерения текущего раскрытия вершины трещины [30]. Нахождение характеристик трещиностойкости ($\Delta K_{th,0R}$;

$\Delta K_{th,eff}$; $\Delta K_{eff,1-2}$; $\Delta K_{1-2,0R}$; $\Delta K_{2-3,0R}$; $\Delta K_{fc,0R}$; C_1 , n_1 , n_2 ; $\Delta K_{fcl,0R}$; $\Delta K_{fcl,th,R}$) по КДУР согласно работам [8, 9, 28–32]. Сведение характеристик трещиностойкости в таблицу;

2) микрофрактографический анализ рельефа поверхности разрушения элемента конструкции и изломов исследованных образцов по бороздкам усталости S . Сопоставление макро- и микроскорости РУТ. При условии совпадения скоростей РУТ на втором участке КДУР можно заключить, что разрушение элемента конструкции произошло при пульсирующем цикле ($R = 0$). Если скорости совпали до определенной ширины бороздки $S_{fcl,xR}$ при $\Delta K_{fcl,xR}$, необходимо определиться с асимметрией R_x цикла, при которой произошло разрушение элемента конструкции;

3) установление момента исчезновения закрытия трещины при асимметрии R_x . Согласно работе [32], на отдельном компактном образце, зная $\Delta K_{fcl,0R}$ и повышая ступенчато асимметрию цикла, находим $\Delta K_{fcl,R}$ для каждого коэффициента асимметрии цикла нагружения R . При сопоставлении характеристики $\Delta K_{fcl,R}$ с $\Delta K_{fcl,xR}$ определим истинное значение последней, а также асимметрию R_x , при которой произошло разрушение элемента конструкции;

4) определение кинетики РУТ в экспертном материале при асимметрии цикла нагружения R_x и запись ее в координатах $\lg da / dN - \lg \Delta K$;

5) микрофрактографический анализ излома отдельного компактного образца. Сопоставление микроскорости РУТ в таком образце после величины $\Delta K_{fcl,xR}$ с макроскоростью РУТ, определенной в соответствии с п. 4);

6) по ширине последней бороздки усталости S_{xR} при асимметрии R_x (размере зерна l_z) и по зависимостям (5), (8) находим размах КИН ΔK_x , при котором произошло разрушение элемента конструкции.

Заключение. Причиной кажущегося несоответствия между макро- и микроскоростью роста усталостной трещины на втором участке КДУР служит наличие явления смыкания–размыкания трещины, оцениваемое изменяющимся во времени амплитудным значением характеристики закрытия трещины ΔK_{cl}^{op} . Влияние закрытия трещины на кинетику РУТ (в пределах его наличия) выражается эффективным размахом КИН ΔK_{eff} , определяемым по методике измерения текущего раскрытия вершины трещины. Размах КИН ΔK_{eff} позволяет расширить область совпадения микро- и макроскорости РУТ как минимум до критического эффективного размаха КИН $\Delta K_{fcl,R}$.

Определена зависимость между структурой материала, микро- и макроскоростью РУТ на втором участке КДУР с учетом влияния асимметрии цикла нагружения и явления закрытия трещины.

Разработана методика экспертизы разрушения конструкционных материалов по микро- и макроскорости РУТ.

Резюме

На основі експериментальних даних показано, що розбіжність між макро- та мікрошвидкістю росту втомної тріщини на другій ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування викликана явищем закриття тріщини в межах

його наявності. Встановлено залежності між макро- та мікрошвидкістю росту втомної тріщини, а також структурою матеріалу на другій ділянці за різних асиметрій циклу навантаження з урахуванням впливу закриття тріщини. Створена методика експертизи руйнування конструкційних матеріалів за мікро- та макрошвидкістю росту втомної тріщини.

1. *Meyn D. A.* Observations on micromechanisms of fatigue crack propagation in 2024 aluminium // *Trans. ASM, J. Basic Eng.* – 1968. – **61**, No. 1. – P. 42 – 51.
2. *Beachem C. D. and Pelloux R. M. N.* Electron fractography – a tool for the study of micromechanisms of fracturing processes // *ASTM STP 381.* – 1965. – P. 210 – 244.
3. *Broek D.* Some contributions of electron fractography to the theory of fracture // *Int. Met. Rev.* – 1974. – No. 19. – P. 135 – 182.
4. *Pelloux R. M.* Fractographic analysis of the influence of constituent particles of fatigue crack propagation in aluminum alloys // *Trans. ASME.* – 1964. – **57**, No. 2. – P. 511 – 519.
5. *Романив О. Н., Шур Е. А., Ткач А. Н.* Кинетика и механизм роста усталостной трещины в железе // *Физ.-хим. механика материалов.* – 1981. – № 2. – С. 57 – 66.
6. *Степаненко В. А., Красовский А. Я.* Микроструктурные особенности усталостного разрушения малоуглеродистой стали // *Пробл. прочности.* – 1974. – № 7. – С. 52 – 54.
7. *Красовский А. Я., Остап О. П., Степаненко В. А., Ярема С. Я.* Влияние низких температур на скорость и микрофрактографические особенности развития усталостной трещины низкоуглеродистой стали // *Там же.* – 1977. – № 4. – С. 74 – 79.
8. *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.
9. *Механика катастроф.* Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов: Методические рекомендации / Под ред. К. В. Фролова. – М.: МИБ СТС, 1995. – 359 с.
10. *Kocanda S., Sadowski J.* Korelacyjne badania predkosci zmechniowego pekania w elementach ze stali o podwyzszonej wytrzymalosci 12G2A // *Arch. Bud. Maszyn.* – 1977. – **24**, No. 2. – S. 239 – 263.
11. *Heiser F. A. and Hertzberg R. W.* Anisotropy of fatigue crack propagation // *Trans. ASME, J. Basic Eng.* – 1971. – **93**, No 6. – P. 211 – 217.
12. *Broek D.* The effect of intermetallic particles on fatigue crack propagation in aluminium alloys // *II Int. Congress Fract., Brighton.* – 1969, Session V. – 61 p.

13. *Taira S. and Tanaka K.* Microscopic study of fatigue crack propagation // Int. Conf., 1971, Society of Materials Science, Japan. – 1972. – Vol. 2. – P. 48 – 58.
14. *Moody N. R. and Herberich W. W.* Influence of frequency and microstructure on fatigue crack growth in Ti–6Al–6V–2Sn // J. Mater. Sci. – 1980. – **14**, No. 3. – P. 95 – 100.
15. *Романив О. Н., Зима Ю. В.* Количественная микрофрактография усталостного разрушения металлов и сплавов // Стандартизация фрактографического метода оценки скорости усталостного разрушения металлов. Вып. 5 / Под ред. О. Н. Романива. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – С. 6 – 30.
16. *Ботвина Л. Р., Лымарь Л. В., Лозовский В. Н.* К вопросу об оценке длительности роста трещины по ширине усталостных бороздок // Стандартизация фрактографического метода оценки скорости усталостного разрушения металлов. Вып. 5 / Под ред. О. Н. Романива. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – С. 38 – 54.
17. *Ботвина Л. Р., Ярема С. Я., Гречко В. В., Лымарь Л. В.* Кинетика усталостного разрушения титанового сплава ВТ3-1 // Физ.-хим. механика материалов. – 1981. – № 6. – С. 39 – 45.
18. *Yokobori T. and Kiyoshi S.* The effect of frequency on fatigue crack propagation rate and striation spacing in 2024-T3 aluminum alloy and SM-50 steel // Eng. Fract. Mech. – 1976. – **8**, No. 1. – P. 81 – 88.
19. *Hertzberg R. W. and Euw E. F. J.* Crack closure end fatigue striations in 2024-T3 aluminum alloy // Met. Trans. – 1973. – **4**, No. 3. – P. 887 – 889.
20. *Екименков Л. Н.* Определение скорости развития усталостных трещин методом количественной фрактографии // Стандартизация фрактографического метода оценки скорости усталостного разрушения металлов. Вып. 5 / Под ред. О. Н. Романива. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – С. 67 – 73.
21. *Степаненко В. А.* Фрактография и кинетика усталости конструкционных материалов // Стандартизация фрактографического метода оценки скорости усталостного разрушения металлов. Вып. 5 / Под ред. О. Н. Романива. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – С. 73 – 85.
22. *MP-189-86.* Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Метод оценки сопротивления металлических материалов усталостному разрушению по шагу усталостных бороздок. – М.: ВНИИНмаш, 1986. – 36 с.
23. *Ботвина Л. Р.* Кинетика разрушения конструкционных материалов. – М.: Наука, 1989. – 231 с.
24. *Krasowsky A. J. and Tot L.* Material characterization for the reliability assessment of cyclically loaded engineering structures / Ed. R. A. Smith. – London: Kluwer Academic Publishers, NATO ASY Series High Technology, 1997. – **39**. – P. 165 – 223.

25. *Tanaka K., Masuda C., and Nishiyama S.* The generalised relationship between the parameters C and m of Paris law for fatigue crack growth // *Scr. Met.* – 1981. – **15**, No. 3. – P. 259 – 264.
26. *Miller G. A.* Fatigue fracture appearance and the kinetics of striation formation in some high-strength steels // *Trans. Quart., ASME.* – 1969. – **62**, No. 3. – P. 651 – 658.
27. *Ярема С. Я.* О корреляции параметров уравнения Пэриса и характеристик циклической трещиностойкости материалов // *Пробл. прочности.* – 1981. – № 9. – С. 20 – 28.
28. *Піняк І. С.* Текущее значение раскрытия вершины трещины усталости как экспериментально обоснованный критерий ее роста // *Там же.* – 1998. – № 1. – С. 25 – 33.
29. *Піняк І. С.* Влияние закрытия трещины на определяемые характеристики циклической трещиностойкости сталей // *Там же.* – № 2. – С. 161 – 171.
30. *Піняк І. С.* Вплив явища закриття вістря втомної тріщини на асиметрію циклу навантаження та пороги тріщиностійкості // *Там же.* – 2000. – № 6. – С. 106 – 114.
31. *Піняк І. С.* О достоверном уравнении второго участка кинетической диаграммы усталостного разрушения // *Там же.* – 1999. – № 3. – С. 83 – 87.
32. *Піняк І. С.* Рівняння другої ділянки кінетичної діаграми втомного руйнування за різних додатніх асиметрій циклу навантаження // *Там же.* – 2000. – № 2. – С. 75 – 80.

Поступила 10. 11. 99