

УДК 621.452-226:620.191

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОГО РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В ДИСКАХ ТУРБИНЫ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПРОСТОМ И СЛОЖНОМ ЦИКЛАХ НАГРУЖЕНИЯ

© 2009 Н. В. Туманов, М. А. Лаврентьева, С. А. Черкасова, А. Н. Серветник

Центральный институт авиационного моторостроения, г. Москва

Разработаны фрактографический и расчетный методы моделирования кинетики трещин малоциклового усталости при простом и сложном циклах нагружения. Методы применены для прогнозирования периода устойчивого роста усталостных трещин в дисках турбины авиадвигателей и верификации прогноза. Показано, что расчетные значения хорошо согласуются с экспериментальными данными. Установлена воспроизводимость продолжительности устойчивого роста однотипных трещин в разных дисках одной и той же конструкции при одинаковых условиях нагружения, что обеспечивает возможность надежного детерминированного прогнозирования.

Малоцикловая усталость (МЦУ), кинетика усталостных трещин, механизм периодического расслаивания-разрыва (МППР), электронная микроскопия поверхности разрушения, усталостные бороздки, конечно-элементное моделирование трещин

Для дисков турбины авиадвигателей малоцикловая усталость (МЦУ) является основным повреждающим фактором и период развития трещин МЦУ составляет значительную долю общей циклической долговечности (до окончательного разрушения). В этих условиях надежное моделирование докритического (устойчивого) роста трещин МЦУ позволяет существенно увеличить ресурс безопасной эксплуатации дисков [1] и определить интервалы их дефектоскопического контроля [2].

В настоящей работе представлены методы моделирования устойчивого роста усталостных трещин – фрактографический (на основе электронно-микроскопического анализа поверхности разрушения) и расчетный. Первый обеспечивает реконструкцию развития реальных трещин, второй – прогнозирование развития возможных трещин. Методы основаны на теории устойчивого роста усталостных трещин, кратко изложенной в первом разделе. Описание методов и примеры их применения в условиях простого и сложного циклов нагружения приведены во втором разделе. Особенностью исследований является сочетание физического (структурного) и механического (континуального) подходов, что необходимо для понимания механизма устойчивого роста усталостных трещин, установления его связи с внешней нагрузкой и разработки инженерных методов расчета.

1. Теория устойчивого роста усталостных трещин

Стадия устойчивого роста усталостных трещин соответствует второму участку кинетической

диаграммы «скорость роста трещины усталости (СРТУ) V – размах коэффициента интенсивности напряжений (КИН) ΔK ». Микрофрактографическим признаком устойчивого роста являются усталостные бороздки на поверхности разрушения, расстояние S между которыми (шаг бороздок) определяет подрастание трещины в каждом цикле нагружения, т.е. СРТУ.

После обнаружения степенной зависимости V от ΔK [3] возникла необходимость теоретического обоснования этой парадоксальной связи между параметром, который характеризует сингулярные поля напряжений в вершине идеальной трещины (математического разреза) в линейно-упругом теле, и разрушением, происходящим в пластической зоне у фронта реальной трещины. Попытки объяснить указанную зависимость в рамках механики разрушения (не рассматривая механизм развития трещины) оказались безуспешными. В результате появились многочисленные эмпирические соотношения с ограниченной областью применения. В то же время в ряде работ для разных материалов была установлена квадратичная зависимость шага бороздок S от ΔK [4-6]. Более того, коэффициент пропорциональности между S и $(\Delta K/E)^2$ (E – модуль Юнга, характеризующий прочность межатомных связей) оказался одинаковым для сплавов на основе железа, никеля, титана и алюминия [4], что свидетельствовало о наличии фундаментального механизма разрушения, управляющего устойчивым ростом усталостных трещин в металлических материалах.

В механике разрушения зависимость V

от ΔK объясняется пренебрежимо малым влиянием пластической деформации на кинетику трещины вследствие незначительного размера пластической зоны в вершине усталостной трещины. Надуманность этой интерпретации очевидна, если учесть, что процесс разрушения при развитии усталостной трещины развивается непосредственно перед ее фронтом в глубине пластической зоны. На стадии устойчивого роста, где наблюдается наиболее стабильная связь между СРТУ и КИН, характерный масштаб процесса разрушения, равный шагу усталостных бороздок, на несколько порядков меньше размера пластической зоны.

В рамках механического подхода, базирующегося на моделях однородного континуума, не учитывается наличие перед фронтом трещины фрагментированной (разориентированной) деформационной структуры, которая была обнаружена в многочисленных экспериментах (см., например, [6-8]). Сложившиеся представления о влиянии структур деформации на кинетику усталостных трещин сформулированы в монографии [5, с.309]: «Поскольку эти формирования нехарактерны для явления усталости, их можно, по-видимому, рассматривать как вторичный побочный продукт, полученный в результате циклической пластической деформации. Вообще же, (...) этот процесс не может рассматриваться как фактор, определяющий распространение усталостной трещины».

Настоящий подход является результатом радикального изменения точки зрения на роль пластической деформации и деформационных структур в распространении усталостной трещины. В соответствии с ним устойчивый рост трещины обеспечивается действием на ее фронте высокоэнергетического механизма периодического расслаивания-разрыва (МПРР) [9-11], аналогичного меха-

низму Гордона-Кука для анизотропных материалов [12] и механизму расслаивания при статическом нагружении [13]. Как и последний, МПРР детерминирован крупномасштабными элементами двухуровневой (микро- и мезоскопической) фрагментированной критической (предшествующей разрушению) деформационной структуры (КДС) – большеугловыми мезограницами разориентации деформационного происхождения (ножевыми границами [13]), которые образуются при фрагментации материала в результате локализованной у фронта трещины интенсивной многократной пластической деформации. Эти границы ориентированы вдоль главных осей деформации и являются концентраторами внутренних напряжений [13]. Действие МПРР можно схематизировать следующим образом (рис.1):

- В результате хрупкого поперечного расслаивания вдоль границы мезофрагментов формируется Т-образная вершина трещины, и на обеих поверхностях разрушения образуются расслоения – усталостные бороздки. Максимум напряжений от внешней нагрузки (приложенных напряжений) σ_x^{ext} , перпендикулярных фронту трещины и действующих в ее плоскости, достигается на некотором расстоянии λ от фронта. При возрастании нагрузки приложенные напряжения σ_x^{ext} суммируются с локализованными у границ мезофрагментов внутренними напряжениями σ_x^{int} , образовавшимися в результате многократной пластической деформации в предыдущих циклах. Когда эта сумма достигает предельного значения, появляется новое хрупкое расслоение вдоль границы на расстоянии $\approx \lambda$ от фронта (первичное разрушение).

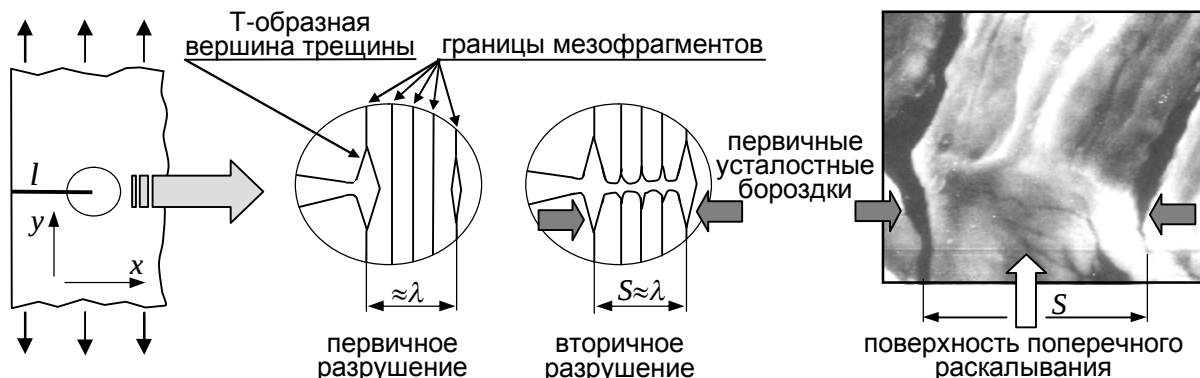


Рис.1. Схема действия механизма периодического расслаивания-разрыва (МПРР) (поперечное сечение фронта трещины) и микрофрактограмма бороздчатой структуры, расколовшейся в поперечном направлении к бороздкам

• Последующий разрыв перемычки между расслоением и фронтом (вторичное разрушение) приводит к подрастанию трещины на величину $\approx \lambda$, образованию нового фронта с Т-образной вершиной и новых усталостных бороздок, отделенных от предыдущих разорванной перемычкой (см. микрофрактограмму на рис.1). При вторичном разрушении могут происходить расслаивания вдоль границ мезофрагментов внутри перемычки, что приводит к образованию вторичных бороздок.

• Последовательные процессы расслаивания перед фронтом трещины и разрыва перемычки между расслоением и фронтом повторяются в каждом цикле нагружения, в результате чего среднее расстояние между соседними первичными усталостными бороздками (шаг бороздок) $S \approx \lambda$ соответствует среднему перемещению фронта трещины за один цикл, т.е. определяет СРТУ V.

Рассмотренная модель позволяет объяснить основные закономерности устойчивого роста усталостных трещин. Его высокая энергоемкость является результатом «увязания» трещины в поперечных расслоениях вдоль границ мезофрагментов. Последние создают независимые от исходной (металлургической) структуры очаги разрушения, что приводит к слабой зависимости МПРР от особенностей исходной структуры, т.е. связь МПРР с самоорганизующейся универсальной КДС вызывает снижение его чувствительности к разнообразным исходным структурам. Ориентация плоскости распространения усталостной трещины на этапе устойчивого роста по нормали к направлению максимальной главной деформации объясняется развитием первичного хрупкого расслаивания вдоль указанного направления; при этом разрыв перемычки формирует поверхность разрушения в перпендикулярном направлении (см. рис.1).

Переход к неустойчивому росту трещины соответствует началу третьего участка диаграммы $V-\Delta K$ и связан с началом действия у фронта трещины механизма роста и объединения микротрещин, которые зарождаются на границах микрофрагментов фрагментированной КДС [13]. Этот механизм формирует ямочный микрорельеф излома.

Независимость МПРР от разнообразных исходных структур, его связь с универсальной предельно фрагментированной деформационной структурой (прочность материалов с такой структурой приближается к теоретической [14]) и хрупкий характер первичного разрушения (т.е. сохранение линейно-упругих свойств вплоть до зарождения первичного расслаивания) позволяют при определении величины S моделировать материал в виде однородной линейно-упругой среды, имеющей теоретическую прочность. При этом связь S с ΔK обеспечивается математическим инвариантом: величина $\sigma_{x \max}^{ext}$ и местоположение λ максимума напряжений σ_x^{ext} в линейно-упругом теле в плоскости $y=0$ перед фронтом трещины с Т-образной вершиной при $L \ll l$ слабо зависят от конфигурации тела и трещины, а также от типа растягивающей нагрузки (рис.2)

$$\sigma_{x \max}^{ext} = (0.26 \div 0.29) K / \sqrt{L}, \quad (1)$$

$$\lambda = (1 \div 1.2) L, \quad (2)$$

где l и L – соответственно, длина трещины и симметричного расслоения в ее вершине, K – КИН для идеальной трещины (без расслоения) длиной l .

Как следует из (1) и (2),

$$K \approx 3.5 \sigma_{x \max}^{ext} \sqrt{\lambda}, \quad (3)$$

т.е. для трещин разной конфигурации при различной нагрузке КИН характеризует величину и местоположение максимума напряжений, действующих в линейно-упругом теле перед фронтом трещины с Т-образной вершиной в плоскости основной трещины при условии, что величина расслоения в вершине трещины значительно меньше ее длины.

Поскольку предполагается, что первичное разрушение хрупкое, т.е. до его зарождения при возрастании нагрузки в цикле нагружения материал у фронта трещины находится в упругом состоянии, приложенные σ_x^{ext} и внутренние σ_x^{int} напряжения суммируются при формулировке условия первичного разрушения

$$\sigma_x^{ext} + \sigma_x^{int} = \sigma_{th}, \quad (4)$$

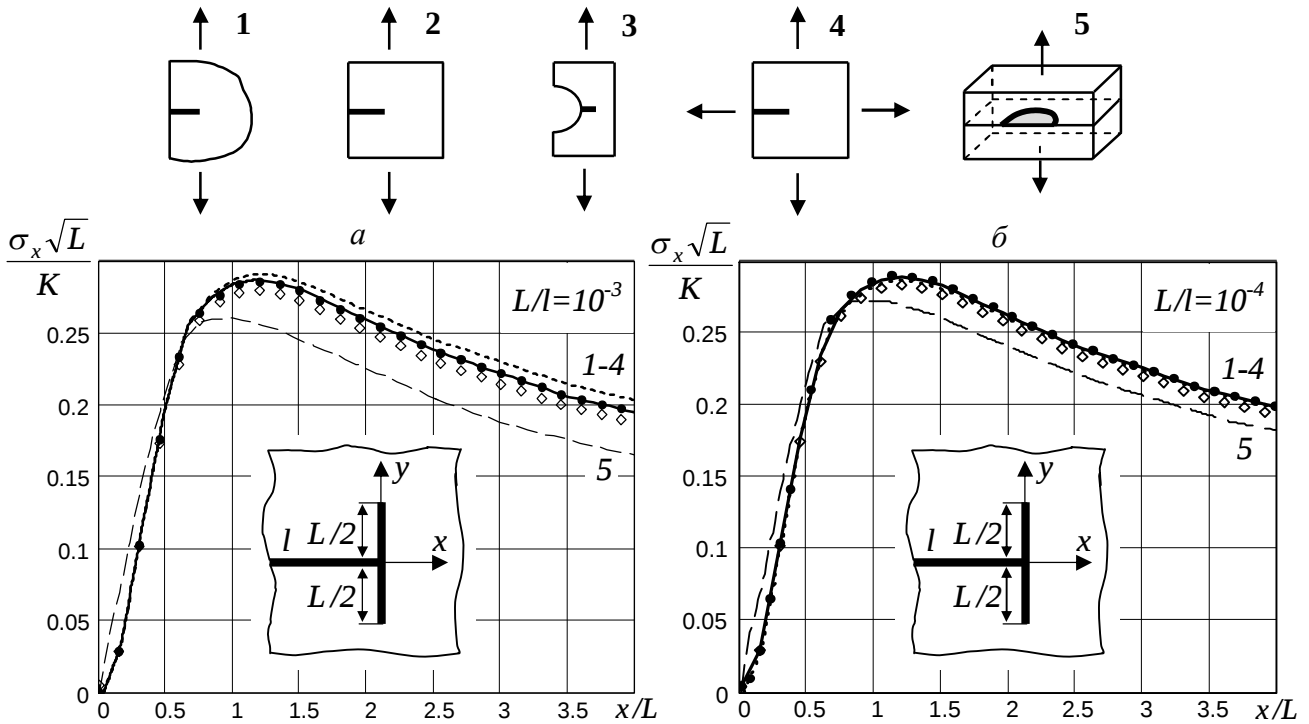


Рис.2. Распределения нормированных напряжений σ_x перед фронтом трещин с Т-образной вершиной в плоскости $y=0$ в линейно-упругом теле в условиях $L/l=10^{-3}$ (а) и $L/l=10^{-4}$ (б) при разной конфигурации тела и трещины и различной нагрузке (расчет методом конечных элементов; для полукруглой трещины – модель №5 – вычисления проведены в точке максимальной глубины)

где σ_{th} – теоретическая прочность на отрыв. Если возрастание нагрузки в цикле нагружения происходит квазистатически и первичное разрушение возникает в плоскости $y=0$ в месте максимума напряжений σ_x^{ext} , то с учетом $S/l \approx 10^{-4} \dots 10^{-3}$ из (1), (2) и (4) при $S=\lambda$ и $\sigma_{th} = 0,1 E$ получим

$$S = B(\alpha / \beta)^2 (\Delta K / E)^2, \quad (5)$$

где $\alpha = K_* / \Delta K$, $\beta = 1 - \sigma_x^{int} / \sigma_{th}$, K_* – значение КИН в момент зарождения первичного разрушения, $B=7 \dots 10$ (с точностью до целых значений). При увеличении (уменьшении) вклада приложенных напряжений в первичное разрушение значения параметров α и β одновременно возрастают (убывают), что обеспечивает стабильность их отношения.

Для того чтобы экспериментально определить величину α/β и значение показателя m степенной зависимости СРТУ от размаха КИН (5), следует измерить шаг бороздок в нескольких точках вдоль пути распространения трещины и рассчитать в них размах КИН, после чего построить линейную рег-

рессионную зависимость S от ΔK в двойных логарифмических координатах и вычислить ее коэффициенты. В результате реализации этой процедуры при исследовании трещин МЦУ, которые развивались в дисках компрессора и турбины (из жаропрочных сплавов на основе титана и никеля) в контролируемых условиях при эквивалентно-циклических испытаниях, было установлено, что $\alpha/\beta \approx 1$ и $m = 2$ [15]. Таким образом, при прогнозировании устойчивого роста усталостных трещин в дисках авиадвигателей в условиях повторно-статического нагружения может применяться кинетическое уравнение

$$S = 10 (\Delta K / E)^2 \quad (6)$$

(для обеспечения консервативной оценки периода устойчивого роста значение коэффициента B в кинетическом уравнении (5) целесообразно принять равным верхней границе диапазона его изменения).

Соотношение (6) включает КИН и характеристику прочности межатомных связей $\sigma_{th} = 0,1 E$, т.е. объединяет макроскопический и атомно-микроскопический подходы. Это объединение обусловлено тем, что на

мезомасштабный уровень, где действует МПРР, с макроуровня переносится возможность моделирования среды в виде однородного континуума (благодаря «гомогенизации» материала перед фронтом трещины в результате интенсивной фрагментации и инвариантности МПРР относительно разнообразных исходных структур), а с микроуровня – применимость фундаментального микроскопического критерия разрушения (из-за коррелированных разрывов межатомных связей вдоль границы мезофрагментов КДС в процессе первичного разрушения, определяющего величину S).

2. Моделирование устойчивого роста усталостных трещин

2.1. Простой цикл нагружения

При действии МПРР в условиях простых циклов повторно-статического нагружения, типичных для дисков двигателей гражданской авиации, в каждом полетном и испытательном цикле образуется одна усталостная бороздка. Если МПРР реализуется вдоль всего фронта трещины, то средний шаг бороздок характеризует СРТУ. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований кинетики усталостной трещины в образце из гранулированного жаропрочного никелевого сплава ЭП 741НП (рис.3). Испытания проводились при температуре 200°C, соответствующей температуре области распространения трещин в диске турбины на наиболее нагруженном (взлетном) режиме. Усталостные линии 1 и 2 маркируют положение фронта трещины в начале и в конце нагружения с 10-минутной выдержкой при максимальной нагрузке. Таких циклов было произведено 100, все остальные циклы – без выдержки, но с той же максимальной нагрузкой. Как видно на рис.3, расстояние между усталостными линиями составляет ≈ 25 мкм, т.е. среднее продвижение фронта трещины в течение цикла равно $25/100=0.25$ мкм, что совпадает со средним шагом усталостных бороздок внутри полосы, а также перед и за ней. Отсюда следует, что величина S определяет СРТУ, и последняя не зависит от выдержки под нагрузкой в данных условиях нагружения.

Таким образом,

$$S(l) = \frac{dl}{dN},$$

где l – длина (глубина) трещины, N – число циклов. Тогда экспериментальная зависимость периода устойчивого роста трещины от ее длины (глубины)

$$N_{\dot{\gamma}}(l) = \int_{l_0}^l \frac{dl}{S(l)}, \quad (7)$$

где l_0 – начальная длина (глубина) трещины, а расчетная зависимость с учетом кинетического уравнения (6) имеет вид

$$N_p(l) = \frac{E^2}{10} \int_{l_0}^l \frac{dl}{[\Delta K(l)]^2}. \quad (8)$$

Фрактографический метод моделирования устойчивого роста усталостных трещин основывается на использовании соотношения (7). Предварительно необходимо измерить шаг усталостных бороздок вдоль направления измерения длины трещины l , получить кривую регрессии $S(l)$, а затем определить зависимость (7), которая позволяет вычислить количество циклов до достижения трещиной любой заданной длины на стадии устойчивого роста.

Для расчетного моделирования устойчивого роста используется зависимость (8). При ее определении возможная трещина располагается в наиболее напряженном месте, плоскость трещины ориентируется перпендикулярно первым главным напряжениям, которые и используются при расчете КИН. На основании расчетов находят зависимость $\Delta K(l)$, а затем по формуле (8) – $N_p(l)$.

При определении безопасных интервалов дефектоскопического контроля с помощью соотношений (7) и (8) для обеспечения консервативности оценки этих интервалов в качестве начальной длины l_0 целесообразно принять размер максимального дефекта материала, не выявляемого при контроле перед началом эксплуатации (при определении интервала до первого осмотра), или длину минимальной трещины, надежно выявляемой при контроле в ходе эксплуатации или ремонта (при определении интервала между осмотрами), а в качестве критической длины трещины l_k – расстояние от очага развития

трещины до границы ее устойчивого роста, соответствующей окончанию второго участка диаграммы V-ΔK. Если применяется

фрактографический метод, то эта граница определяется по появлению ямочного микрорельефа излома.

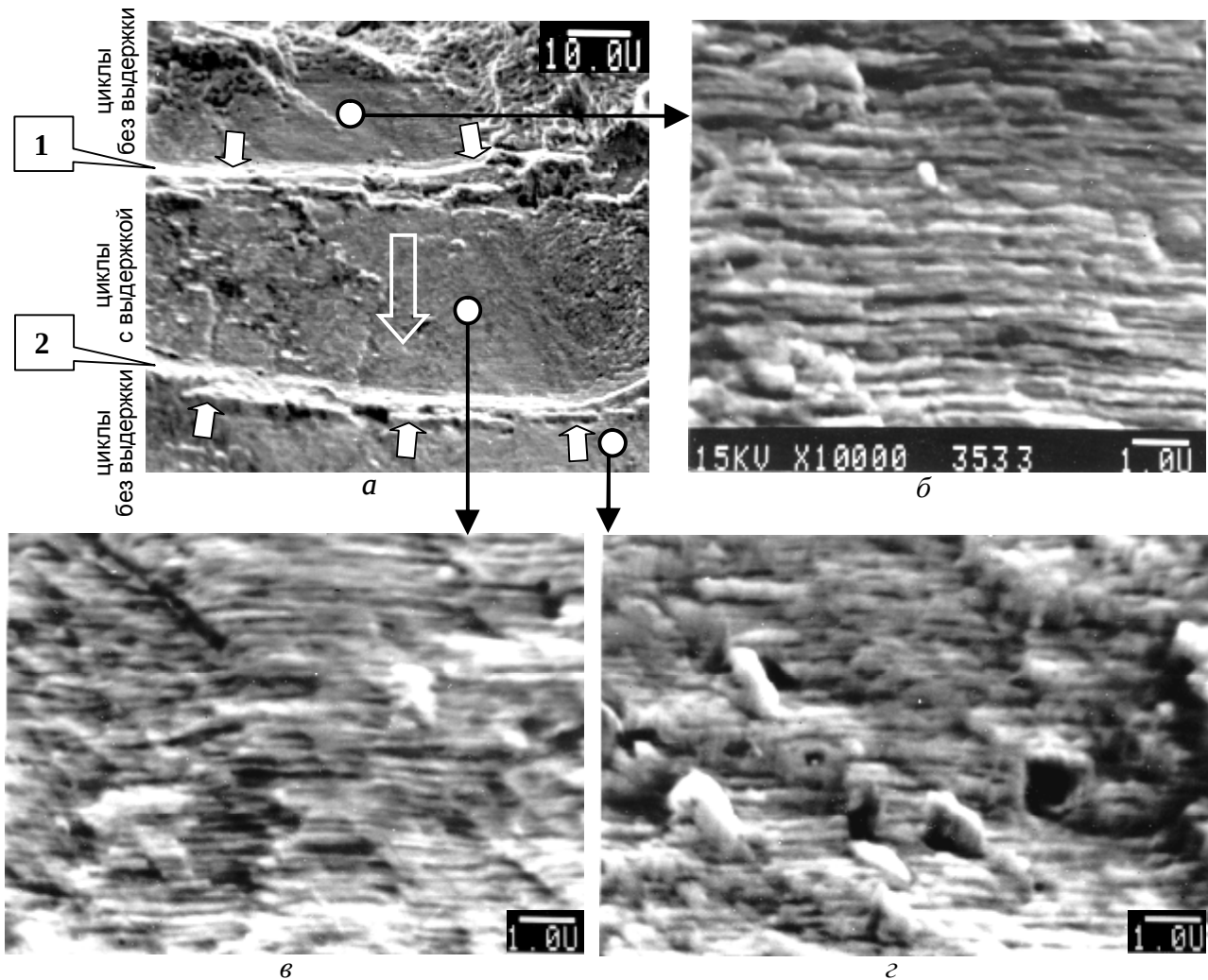


Рис.3. Исследование связи между шагом бороздок и скоростью роста усталостной трещины, а также влияния выдержки в цикле нагружения на кинетику трещины: а – исследуемый участок поверхности разрушения (контурная стрелка – направление роста трещины, белыми стрелками отмечены макролинии 1 и 2, маркирующие положения фронта трещины в начале (1) и в конце (2) нагружения с выдержкой); б-г – микрорельеф поверхности разрушения при развитии трещины без выдержки (б,г) и с выдержкой (б) (масштаб указан в мкм)

При использовании расчетного метода величина l_k вычисляется из уравнения (6) и зависимости $\Delta K(l)$ при значении $S = 2 \text{ мкм}$, которое согласно экспериментальным данным соответствует началу неустойчивого роста трещин МЦУ.

На рис.4 показаны результаты применения соотношения (8) для прогнозирования развития усталостной трещины в диске турбины высокого давления двигателя гражданской авиации (диск изготовлен из гранулированного никелевого сплава ЭП 741НП). Верификация проводилась с использованием соотношения (7) при исследовании двух аналогичных трещин, развившихся в области

болтовых отверстий при эквивалентно-циклических испытаниях двух дисков (рис.4а). Выдержка под нагрузкой в каждом цикле составляла около одной минуты, температура в области распространения трещин – 570°C . Исследование состояло из следующих этапов:

- Электронно-микроскопический фрактографический анализ, в ходе которого определялись форма и размеры развивающейся трещины, зависимости $S(l)$ (одна из них приведена на рис.4б) и критическая глубина трещины l_k .

- Трехмерные конечно-элементные расчеты диска с трещиной на разных этапах ее

развития (конфигурация трещин устанавливалась на основании фрактографических исследований), вычисление КИН (прямым методом напряжений [16]) и определение зависимости $\Delta K(l)$ (рис.4в,г).

- Определение расчетной (8) и экспериментальных (7) зависимостей периода устойчивого роста трещины от ее глубины при одинаковых значениях начальной l_0 и конечной l_k глубины трещины (рис.4д); начальная глубина $l_0 = 0.4$ мм соответствовала максимальному размеру не выявляемых методами неразрушающего контроля дефектов материала, исследованных ранее фрактографическим методом, конечная – критической глубине трещины $l_k = 3$ мм.

Как видно на рис.4д, расчетный период устойчивого роста хорошо согласуется с результатами эксперимента (расхождение не превышает 5%) и экспериментальные зависимости (7) для разных дисков близки между собой. Такая воспроизводимость продолжительности устойчивого роста однотипных трещин обеспечивает возможность надежно-го детерминированного прогнозирования.

2.2. Сложный цикл нагружения

Сложный полетный или испытательный цикл повторно-статического нагружения дисков двигателей маневренной авиации представляет собой блок простых циклов с различными значениями размаха напряжений. Если значения ΔK , рассчитанные для каждого простого цикла, соответствуют второму участку кинетической диаграммы V- ΔK , МПРР реализуется вдоль всего фронта трещины и в каждом простом цикле шаг бороздок, равный приращению длины трещины в течение этого цикла, определяется кинетическим уравнением (6), то шаг блока бороздок S_B , характеризующий подрастание трещины в течение сложного цикла, может быть вычислен следующим образом:

$$S_B(l) = \frac{10}{E^2} \sum_{j=1}^L n_j [\Delta K_j(l)]^2, \quad (9)$$

где n_j – число простых циклов j -го типа в сложном цикле, содержащем L типов простых циклов; $\Delta K_j(l)$ – зависимость ΔK от l для простого цикла j -го типа (значения ΔK_j рассчитываются при длине трещины, соответствующей началу сложного цикла); ин-

декс $j=1$ отвечает простому циклу с максимальным размахом напряжений; индекс $j=2$ – простому циклу со следующим по величине размахом и т.д. Преобразуем (9) к виду

$$S_B(l) = \frac{10 [\Delta K_1(l)]^2}{E^2} \sum_{j=1}^L n_j \left[\frac{\Delta K_j(l)}{\Delta K_1(l)} \right]^2. \quad (10)$$

Так как

$$S_B(l) = \frac{dl}{dN_B}, \quad (11)$$

где N_B – число сложных циклов (блоков), то экспериментальная зависимость периода устойчивого роста усталостной трещины от ее длины имеет вид

$$N_{B\Delta}(l) = \int_{l_0}^l \frac{dl}{S_B(l)}. \quad (12)$$

При расчете по усредненному типовому полетному циклу $n_j = \text{const}$. Тогда, с учетом слабой зависимости величины $\Delta K_j / \Delta K_1$ от l , из (10) и (11) получим расчетную зависимость периода устойчивого роста усталостной трещины

$$N_{B\Delta}(l) = \frac{E^2}{10 A} \int_{l_0}^l \frac{dl}{[\Delta K_1(l)]^2}, \quad (13)$$

где

$$A = \sum_{j=1}^L n_j \left(\frac{\Delta K_j}{\Delta K_1} \right)^2. \quad (14)$$

Соотношение (12) применяется при моделировании устойчивого роста трещины по фрактографическим данным; для этого на основании электронно-микроскопических исследований излома должна быть определена зависимость $S_B(l)$ шага блока бороздок от длины трещины. Расчетное моделирование проводится с использованием выражения (13); при этом параметр A (14) рассчитывается при заданных значениях n_j и вычисленных значениях ΔK_j . Как видно из сравнения (8) и (13), параметр A характеризует, во сколько раз период устойчивого роста при простом цикле нагружения, которому соответствует зависимость $\Delta K(l)$, больше, чем при сложном цикле с $\Delta K_1(l) = \Delta K(l)$.

Результаты применения изложенной методики для расчетного прогнозирования устойчивого роста усталостной трещины в диске турбины высокого давления двигателя маневренной авиации (диск изготовлен из сплава ЭП 741НП) приведены на рис.5.

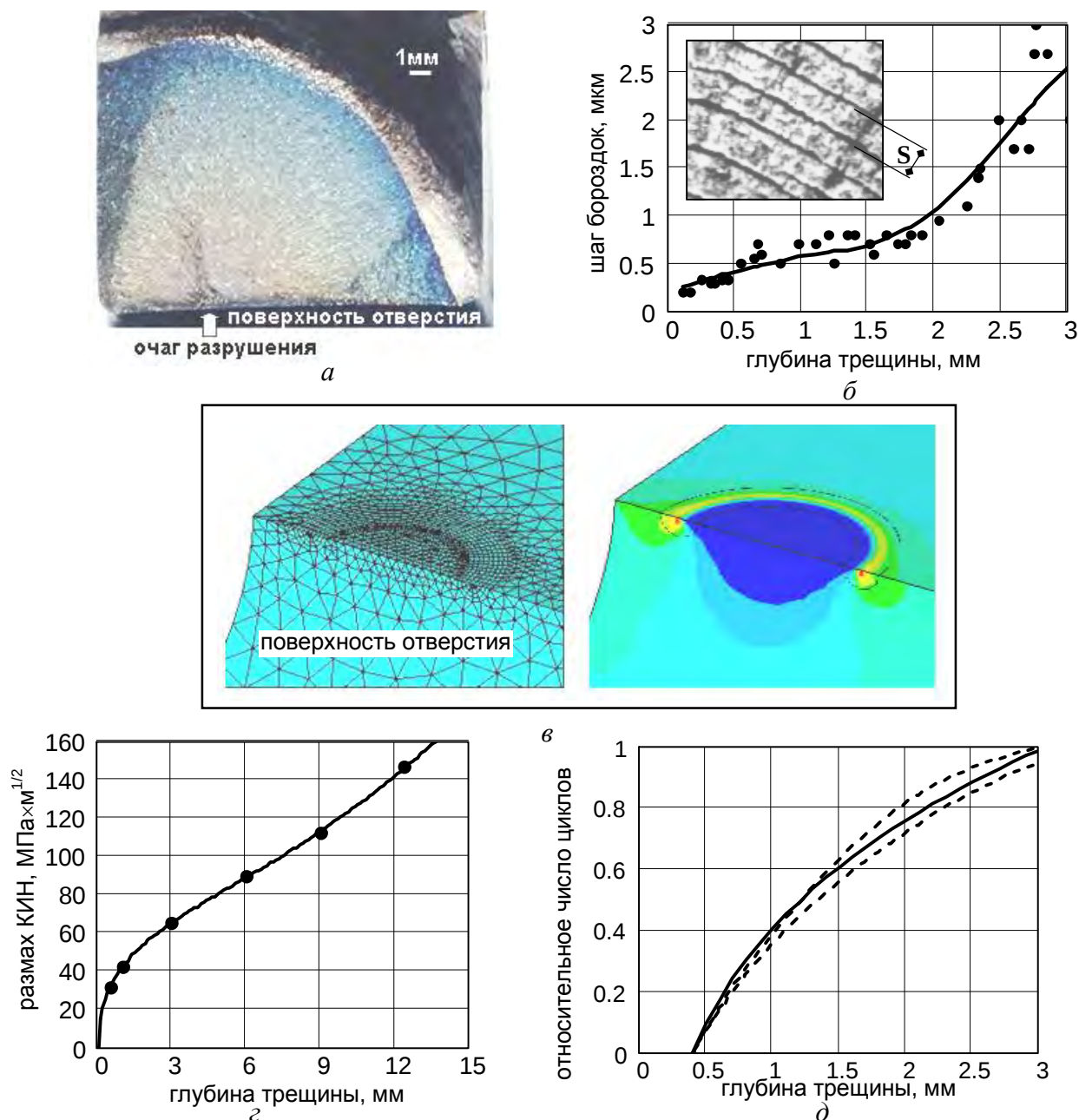


Рис.4. Расчетно-экспериментальные исследования устойчивого роста усталостных трещин в дисках турбины при простом цикле нагружения: поверхность усталостного разрушения (а); зависимость $S(l)$ (экспериментальные точки и кривая регрессии) и микрофрактограмма усталостных бороздок (б); конечно-элементная модель диска с трещиной глубиной 3 мм и распределение напряжений в плоскости трещины (в); зависимость $\Delta K(l)$ (расчетные точки и аппроксимирующая функция) (г); расчетная (сплошная линия) и экспериментальные (пунктирные линии) зависимости периода устойчивого роста трещины от ее глубины (д)

Верификация расчета проводилась с использованием соотношения (12) на основании результатов микрофрактографической реконструкции кинетики усталостных трещин в дисках двух двигателей. Трещины развились в условиях эксплуатации в одинаковых зонах – в области перехода от полотна к ободу в перемычках между отверстиями для подвода охлаждающего воздуха к рабочим лопаткам (рис.5а,б). В одном из дисков исследованы четыре аналогичные трещины, в другом – три. Температура в области рас-

пространения трещин составляла около 600°C. Граница устойчивого роста достигалась при глубине трещины 2 мм; до этой глубины преимущественным типом микрорельефа излома являются усталостные бороздки и их блоки, соответствующие сложным полетным циклам (рис.5в). Для каждой трещины определялась функция $S_B(l)$ (график одной из них приведен на рис.5г), а затем строились усредненные функции для каждого диска, по которым определялась зависимость (12).

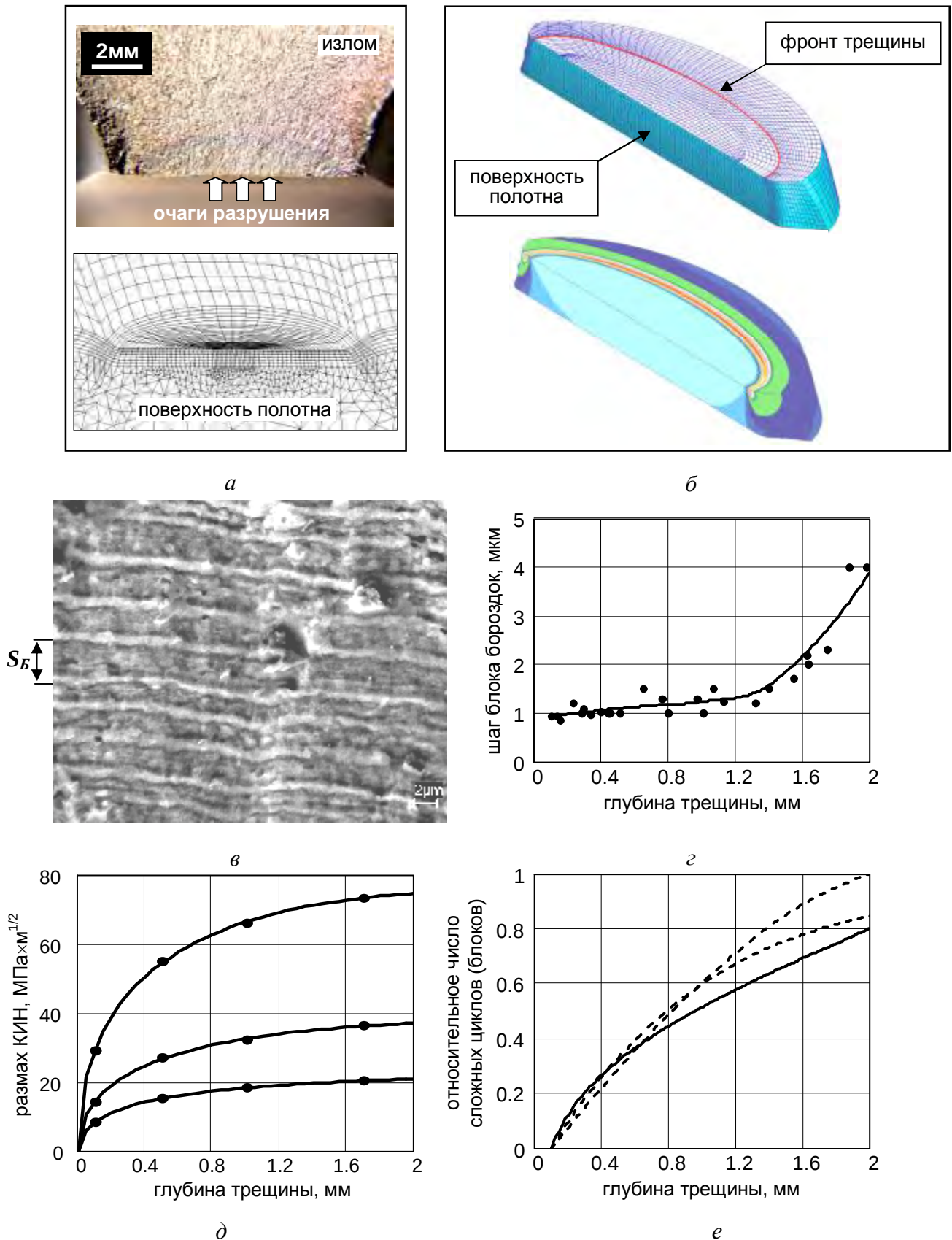


Рис.5. Расчетно-экспериментальные исследования устойчивого роста усталостных трещин в дисках турбины при сложном цикле нагружения: фрагмент диска с поверхностью усталостного разрушения и его конечно-элементная модель (а); детализированная конечно-элементная сетка у фронта трещины (глубиной 1.7мм) и распределение напряжений в плоскости трещины (б); микрофрактограмма блоков усталостных бороздок, соответствующих сложным циклам (в); зависимость $S_B(l)$ (экспериментальные точки и кривая регрессии) (г); зависимости $\Delta K_I(l)$ (расчетные точки и аппроксимирующие функции) (д); расчетная (сплошная линия) и экспериментальные (пунктирные линии) зависимости периода устойчивого роста трещины от ее глубины (е)

Конфигурация трещин при конечно-элементном моделировании устанавливалась на основании результатов фрактографических исследований (см. рис.5а,б). Значения КИН (рис.5д) вычислялись с использованием J -интеграла [16]. Значения n_j при расчете параметра A (13) соответствовали усредненным условиям эксплуатации. Расчетная (13) и экспериментальные (12) зависимости периода устойчивого роста от глубины трещины (рис.5е) определялись при начальной глубине трещины $l_0=0.1$ мм, при которой на поверхности исследованных изломов становится измеримым бороздчатый микрорельеф, что делает возможной количественную фрактографическую реконструкцию кинетики трещин. Период устойчивого роста трещины вычислялся при ее конечной глубине 2мм, соответствующей началу неустойчивого роста. Как видно на рис.5е, расчетная оценка периода устойчивого роста консервативна: она меньше экспериментальных значений на 6 и 20%. Последние различаются у двух исследованных дисков на 15%. Для обоих дисков период устойчивого роста трещин и полный период их роста (при одной и той же начальной глубине $l_0=0.1$ мм) составили приблизительно 60 и 80% общей циклической долговечности, соответственно.

Таким образом установлено, что устойчивый рост усталостных трещин обусловлен действием высокоэнергетического структурно детерминированного механизма периодического расслаивания-разрыва (МПРР), при котором подрастание трещины в каждом цикле нагружения сдерживается поперечным расслаиванием вдоль границы критической фрагментированной структуры, образующейся перед фронтом трещины в результате локализованной здесь интенсивной многократной пластической деформации. Фрактографическим признаком МПРР являются усталостные бороздки – следы, остающиеся в каждом цикле на парных поверхностях разрушения фронтом трещины с Т-образной вершиной, сформированной поперечным расслоением. Расстояние между соседними расслоениями (шаг бороздок) характеризует приращение длины трещины за цикл нагружения, т.е. локальную скорость роста трещины усталости (СРТУ), и приблизительно равно расстоянию от вершины

трещины до местоположения максимума напряжений от внешней нагрузки, действующих перед фронтом трещины в ее плоскости. При этом коэффициент интенсивности напряжений (КИН) определяет в соответствии с соотношением (3) величину и местоположение указанного максимума для трещин разной конфигурации при различной нагрузке (при условии, что величина расслоения в вершине трещины значительно меньше ее длины). Для трещин малоциклового усталости при реализации МПРР вдоль всего фронта величина СРТУ связана с размахом КИН кинетическим уравнением (6).

На основе теории МПРР разработаны фрактографический и расчетный методы моделирования кинетики трещин малоциклового усталости при простом и сложном циклах нагружения. Методы применены для прогнозирования периода устойчивого роста усталостных трещин в дисках турбины авиадвигателей и верификации прогноза. Показано, что расчетные значения хорошо согласуются с экспериментальными данными. Установлена воспроизводимость продолжительности устойчивого роста однотипных трещин в разных дисках одной и той же конструкции при одинаковых условиях нагружения, что обеспечивает возможность надежного детерминированного прогнозирования.

Библиографический список

1. Махутов, Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования/Н.А. Махутов. - Новосибирск: Наука, 2008. - 528 с.
2. Туманов, Н.В. Определение безопасных интервалов контроля критических деталей авиадвигателей/Н.В. Туманов, М.А. Лаврентьева, С.А. Черкасова // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций: тр. междунар. Конф. В 2 т. -Т.2. -СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. -С. 352-362.
3. Paris, P. A critical analysis of crack propagation laws/P. Paris, F. Erdogan // Journal of Basic Engineering (Trans. ASME). -1963. -№ 12. -P. 528-534.
4. Bates, R.C. Fractography and fracture mechanics / R.C. Bates, W.G. Clark // Trans. Quart. ASM. -1969. Vol. 62. -N 2. -P. 380-389.
5. Екобори, Т. Научные основы прочности и разрушения /Т. Екобори. -Киев: Наук. думка, 1978. -352 с.

6. Матохнюк, Л.Е. Влияние частоты нагружения на закономерности и микромеханизмы роста усталостных трещин в титановых сплавах / Л.Е. Матохнюк, Т.Ю. Яковлева // Проблемы прочности. -1988. -№1. -С.21-31.

7. Grosskreutz, J.C. Fine subgrain structure adjacent to fatigue cracks / J.C. Grosskreutz, G.G. Shaw // Acta metallurgica. -1972. -Vol. 20. N 4. -P.523-528.

8. Klesnil, M. Fatigue of metallic materials /M.Klesnil, P. Lukáš. Amsterdam: Elsevier, 1992. -270 p.

9. Tumanov, N.V. Mechanisms of fatigue fracture in metals/ N.V. Tumanov // Proc. 7th Int. Conf. on Fatigue. Higher Education Press. -1999. -Vol. 2. -P. 765-770.

10. Туманов, Н.В. Механизм устойчивого роста усталостных трещин/ Н.В. Туманов // Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов: тр. XXXV конф. «Актуальные проблемы прочности». -В 2 т. -Т.1. -Псков: 1999. -С. 307-314.

11. Туманов, Н.В. Стадийность кинетики усталостных трещин и механизм периодического расслаивания-разрыва / Н.В. Туманов // Деформация и разрушение материалов: тр. I междунар. Конф. -В 2 т. -Т.1. -М.: ИМЕТ РАН, 2006. -С. 85-87.

12. Cook, J. A mechanism for the control of crack propagation in all-brittle systems/ J. Cook, J.E. Gordon // Proc. Royal Soc. Ser. A. -1964. -Vol. 282, -N 1393. -P. 508-520.

13. Рыбин, В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов/ В.В. Рыбин. -М.: Металлургия, 1986. -224 с.

14. Инденбом, В.Л. Физика прочности сегодня / В.Л. Инденбом, А.Н. Орлов // Физика металлов и металловедение. -1992. -№4. -С. 4-7.

15. Туманов, Н.В. Реконструкция и прогнозирование развития усталостных трещин в дисках авиационных газотурбинных двигателей / Н.В. Туманов, М.А. Лаврентьева, С.А. Черкасова // Конверсия в машиностроении. -2005. -№4-5. -С. 98-106.

16. Сиратори, М. Вычислительная механика разрушения/ М. Сиратори [и др.]. -М.: Мир, 1986. -334 с.

References

1. Makhutov N.A. Strength and safety: fundamental and applied study. Novosibirsk: Nauka, 2008. 528 p.

2. Tumanov N.V., Lavrenteva M.A., Cherkasova S.A. Safe non-destructive intervals determination of fracture critical parts // Assessment of reliability of materials and structures: problems and solutions. Proc. Int. Conf. Vol.2.

Sankt-Peterburg: Ed. Polytechnic University. 2008. P. 352-362.

3. Paris P., Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws // Journal of Basic Engineering (Trans. ASME). 1963. N 12. P. 528-534.

4. Bates R.C., Clark W.G. Fractography and fracture mechanics // Trans. Quart. ASM. 1969. Vol. 62, N 2. P. 380-389.

5. Ecobori T. Scientific background of strength and fracture. Kiev: Nauk. dumka, 1978. 352 p.

6. Matokhnyuk L.E., Yakovleva T.Yu. Influence of loading frequency on fatigue crack propagation micromechanisms in titanium alloys // Problems of strength. 1988. №1. P. 21-31.

7. Grosskreutz J.C, Shaw G.G. Fine subgrain structure adjacent to fatigue cracks // Acta metallurgica. 1972. Vol. 20, N 4. P. 523-528.

8. Klesnil M., Lukáš P. Fatigue of metallic materials. Amsterdam: Elsevier, 1992. 270 p.

9. Tumanov N.V. Mechanisms of fatigue fracture in metals // Proc. VII Int. Conf. on Fatigue. Higher Education Press, 1999. Vol. 2. P. 765-770.

10. Tumanov N.V. Mechanism of stable fatigue crack growth // Mechanisms of deformation and fracture of promising materials: Proc. XXXV Int. Conf. «Topical problems of strength». Vol.1. Pskov: 1999. P. 307-314.

11. Tumanov N.V. Fatigue crack kinetic stages and mechanism of periodic splitting-rupture // Deformation and structure of materials: Proc. I Int. Conf. Vol.1. Interkontakt Nauka, 2006. P. 85-87.

12. Cook J., Gordon J.E. A mechanism for the control of crack propagation in all-brittle systems // Proc. Royal Soc. Ser. A. 1964. Vol. 282, N 1393. P. 508-520.

13. Rybin V.V. Large plastic deformation and fracture of metals. Moscow: Metallurgia, 1986. 224 p.

14. Indenbom V.L., Orlov A.N. The state of the art in the physic of strength // Physic of metals and metal science. 1992. №4. P. 4-7.

15. Tumanov N.V., Lavrenteva M.A., Cherkasova S.A. Reconstitution and prediction of fatigue crack propagation in aero engine discs // Conversion in machine building of Russia. 2005. №4-5. P. 98-106.

16. Siratori M., Miesi T., Matsusita H. Computational fracture mechanics. Moscow: Mir, 1986. 334 p.

MODELING STABLE GROWTH OF FATIGUE CRACKS IN AERO ENGINE TURBINE DISCS UNDER SIMPLE AND COMPLEX LOADING CYCLES

© 2009 N. V. Tumanov, M. A. Lavrentyeva, S. A. Cherkasova, A. N. Servetnik

Techniques for modeling stable fatigue crack growth in highly stressed structural parts under simple and complex loading cycles have been developed which are based on the theory of local high-energy-type fracture mechanism acting at a crack front in the second stage of fatigue crack kinetics. The techniques have been verified with the use of 3D finite element modeling and microfractographic reconstitution of fatigue crack growth in aero engine turbine discs.

low cycle fatigue (LCF), fatigue crack kinetic, mechanism of periodic splitting-rupture (MPSR), electron microscopy of a fracture surface, fatigue striations, finite element modeling

Информация об авторах

Туманов Николай Ваганович, кандидат технических наук, начальник сектора Центрального института авиационного моторостроения. Тел. 552-90 37, 555-21-11. E-mail: tumanov@rtc.ciam.ru. Область научных интересов: микромеханизмы развития усталостных трещин, многомасштабное моделирование развития усталостных трещин, электронная микроскопия поверхности разрушения (электронная микрофрактография), экспертиза разрушений.

Лаврентьева Марина Александровна, ведущий конструктор Центрального института авиационного моторостроения. Тел. 552-90 37, 555-21-11. Область научных интересов: микромеханизмы развития усталостных трещин, многомасштабное моделирование развития усталостных трещин, электронная микроскопия поверхности разрушения (электронная микрофрактография), экспертиза разрушений.

Черкасова Светлана Александровна, ведущий конструктор Центрального института авиационного моторостроения. Тел. 552-90 37, 555-21-11. Область научных интересов: микромеханизмы развития усталостных трещин, многомасштабное моделирование развития усталостных трещин, электронная микроскопия поверхности разрушения (электронная микрофрактография), экспертиза разрушений.

Серветник Антон Николаевич, инженер Центрального института авиационного моторостроения. Тел. 552-90 37, 555-21-11. Область научных интересов: микромеханизмы развития усталостных трещин, многомасштабное моделирование развития усталостных трещин, электронная микроскопия поверхности разрушения (электронная микрофрактография), экспертиза разрушений.

Tumanov Nikolai Vaganovich, Candidate of Engineering Science, laboratory head of Central Institute of Aviation Motors. Phone: 552-90 37, 555-21-11. E-mail: tumanov@rtc.ciam.ru. Area of research: fatigue crack growth micromechanisms, multi-scale modeling fatigue crack growth, scanning electron microscopy of a fracture surface (electron microfractography), failure analysis.

Lavrentyeva Marina Alexandrovna, leading designer of Central Institute of Aviation Motors. Phone: 552-90 37, 555-21-11. Area of research: fatigue crack growth micromechanisms, multi-scale modeling fatigue crack growth, scanning electron microscopy of a fracture surface (electron microfractography), failure analysis.

Cherkasova Svetlana Alexandrovna, leading designer of Central Institute of Aviation Motors. Phone: 552-90 37, 555-21-11. Area of research: fatigue crack growth micromechanisms, multi-scale modeling fatigue crack growth, scanning electron microscopy of a fracture surface (electron microfractography), failure analysis.

Servetnik Anton Nikolaevich, engineer of Central Institute of Aviation Motors. Phone: 552-90 37, 555-21-11. Area of research: fatigue crack growth micromechanisms, multi-scale modeling fatigue crack growth, scanning electron microscopy of a fracture surface (electron microfractography), failure analysis.