

На правах рукописи

БАНИКОВ МИХАИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

**СТРУКТУРНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В
РЕЖИМАХ МНОГО- И ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ**

01.02.04. – Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Пермь 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте механики сплошных сред
Уральского отделения Российской Академии Наук

Научный руководитель: Наймарк Олег Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, зав. лаб. физических основ прочности, Института механики сплошных сред уральского отделения Российской академии наук

Официальные оппоненты: Скрябина Наталья Евгеньевна, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра физики твердого тела, Пермский государственный национальный исследовательский университет

Гаришин Олег Константинович, доктор физико-математических наук, с.н.с. Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита состоится 26 июня 2013 года в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 004.012.01 при ИМСС УрО РАН по адресу: 614013 г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, тел. (342)237-83-88, сайт института www.icmm.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИМСС УрО РАН.

Автореферат разослан «__» мая 2013 г.

Ученый секретарь

Березин Игорь Константинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Механические компоненты машин и конструкций во время эксплуатации неизбежно подвержены циклическим напряжениям ниже предела текучести. Такие циклические нагрузки могут быть результатом ротаций, растяжений-сжатий материала или вибраций. При напряжениях существенно ниже, чем предел статической прочности материала разрушение происходит по достижении определенного числа циклов. Это явление называют усталостью материалов. Еще до 80-х годов считалось, что такие материалы, как высокопрочные стали, титан и его сплавы обладают пределом усталости при напряжениях, ниже которого материал может служить неограниченно долго. Однако ряд исследователей Bathias C., Wang Z., Murakami Y., Zou J., Mughrabi H. показали отсутствие такого предела, в том числе при сверхмалых амплитудах нагружения, в области, так называемой, гигацикловой усталости. Современные требования к долговечности машин и конструкций предполагают достижение базы нагружения до 10^9 циклов, что делает актуальной задачу по созданию новых конструкционных материалов, отвечающих современным условиям эксплуатации, а также разработку методов комплексной оценки и прогнозирования их временного ресурса.

Повышение прочностных свойств конструкционных материалов в последнее время достигается за счет формирования микро- и нанокристаллической структуры. Однако традиционные методики не обеспечивают оценку усталостного ресурса в области гигацикловых режимов нагружения, что привело к появлению новых методов, основанных на применении инфракрасных камер высокого разрешения, ультразвуковых испытательных машин и исследованию морфологии поверхностей разрушения современными методами структурного анализа.

Работы А. А. Шанявского, С. Bathias, Y. Murakami, H. Mughrabi, T. Sakai показывают, что именно механизмами инициирования трещин в режиме гигацикловой усталости связаны дефектами структуры. Изучение масштабно-инвариантных свойств поверхностей разрушения, проведенное в работах В. С. Ивановой, Л. Р. Ботвиной, М. Wnuk, E. Vouchaud, позволило установить связь эволюции ансамбля дефектов, развития процесса усталостного разрушения с масштабно-инвариантными характеристиками поверхностей разрушения и использовать эти результаты при описании кинетики образования и развития усталостных трещин.

Настоящая работа посвящена исследованию механизмов инициирования и развития усталостных трещин применительно к перспективным материалам (технически чистый титан *Ti Grade-4* с различной микроструктурой, его сплавы *OT-4 (Ti4AlMn)*, *BT-6 (Ti6Al4V)*, высокопрочная сталь *R-4 (32CrNiMo10)*), установлению связи закономерностей

усталостного разрушения и эволюции дефектной подсистемы материала на основе количественного анализа морфологии поверхностей разрушения.

Основные результаты были получены в рамках исследований, проводимых с участием автора по программе президиума РАН «Исследование механических процессов в деформируемых материалах и конструкциях с учетом физических и химических явлений» (12-П-1-1018), ФЦП «Разработка методов диагностики для оценки надежности объемных субмикроструктурных материалов авиационного назначения» и проектам РФФИ: 11-01-00153-а, 11-0100712-а, 11-01-96005-р_урал_а, 12-01-31145_мол_а.

Цель диссертационной работы. Исследование термодинамических закономерностей деформирования титановых сплавов при усталостном нагружении; изучение механизмов много- и гигациклового разрушения металлов при различных состояниях микроструктуры (включая субмикроструктурное) с использованием данных количественной фрактографии рельефа поверхностей разрушения; экспериментальное и структурное обоснование промежуточно-асимптотического характера закона Пэриса на основе определения масштабного инварианта (показателя Херста), соответствующего качественным изменениям морфологии поверхности разрушения.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1. Проведение серии экспериментов на сплаве *VT-6* и титане *Ti Grade-4* с различным состоянием микроструктуры (размера зерна, включая субмикроструктурный) с целью определения ее влияния на усталостную прочность при много- и гигацикловых режимах нагружения.
2. Разработка методов количественного анализа морфологии поверхностей разрушения с целью установления значений масштабного инварианта (показателя Херста), соответствующего различным механизмам и стадиям развития разрушения в условиях много- и гигациклового разрушения.
3. Обоснование кинетической модели роста трещин, отражающей многомасштабные механизмы развития поврежденности в вершине трещины в условиях много- и гигацикловой усталости.
4. Исследование термодинамики процесса деформирования в металлах при многоцикловом усталостном нагружении с использованием метода инфракрасной термографии.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые в терминах масштабного инварианта рельефа поверхностей разрушения установлены качественные и количественные различия механизмов инициирования и распространения усталостных трещин при много- и гигацикловых режимах нагружения, установлена связь кинетики роста усталостных трещин с масштабными инвариантами рельефа поверхности разрушения и обоснован промежуточно-асимптотический характер кинетики роста усталостных трещин, обусловленный многомасштабным накоплением поврежденности в вершине трещины.

Личный вклад автора. Автором получены основные результаты, представленные в работе, проведены эксперименты по усталостному (много- и гигацикловому) нагружению исследуемых материалов (титан в различных состояниях микроструктуры, сплавы титана *BT-6* и *OT-4*, сталь *R-4*); исследована с применением профилометрии высокой разрешающей способности морфология поверхностей разрушения и установлены в терминах масштабного инварианта (показателя Херста) количественные признаки зон инициирования и распространения трещин, обоснован автомоделный промежуточно-асимптотический характер кинетики роста усталостных трещин в режиме много- и гигацикловой усталости.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты сравнительного анализа закономерностей разрушения сплавов титана с субмикроструктурной и обычной поликристаллической структурой при гигацикловых режимах нагружения, установившие увеличение усталостной прочности для сплавов с субмикроструктурной структурой.

2. Результаты количественного анализа морфологии поверхностей усталостного разрушения на основе данных профилометрии высокой разрешающей способности, методики вычисления масштабного инварианта, позволившие впервые установить качественные различия режимов много- и гигацикловой усталости, обусловленные механизмами инициирования и распространения трещин.

3. Обоснование автомоделного промежуточно-асимптотического характера кинетики роста усталостных трещин при много- и гигацикловом режиме, обусловленного масштабными инвариантами закономерностями развития поврежденности в вершине трещины, установленными при количественном анализе рельефа поверхности разрушения с использованием профилометрии высокой разрешающей способности.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на российских и международных конференциях, в том числе: XVI, XVII, XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь (2009, 2011, 2013), Всероссийская конференция молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах», Пермь (2009, 2010, 2012), International Workshop «Advanced Problems of Mechanics and Physics of Mesoscopic Systems» Perm 2011, XIX и XX Петербургские чтения по проблемам прочности, Санкт-Петербург (2010, 2012), 19th European Conference on Fracture “Fracture Mechanics for Durability reliability and Safety”, Kazan, Russia (2012).

Публикации. Основные результаты работы изложены в 24 научных публикациях, из них 6 статей в российских журналах, в том числе в 3 статьях в журналах из перечня ВАК, в 1 статье в рецензируемом зарубежном журнале и в 14 статьях в периодических сборниках, трудах международных и российских конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и выводов по результатам исследования. Работа изложена на 139 страницах и содержит 78 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 87 наименований.

Благодарности. Автор диссертационной работы выражает благодарность сотрудникам лаборатории Lamefir ENSAM ParisTech (Франция) за предоставление современного испытательного оборудования и совместное обсуждение результатов, сотрудникам лаборатории Физических основ прочности Института механики сплошных сред УрО РАН за помощь в проведении экспериментов, научному руководителю д.ф.-м.н., профессору О.Б. Наймарку за обсуждение и плодотворное время совместной работы, родным и близким за поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность, цели и задачи исследования, апробация результатов, формулируются краткие выводы по основным результатам.

Первая глава носит обзорный характер. В ней описаны основные результаты, полученные ранее при исследовании усталостного разрушения металлов в режиме многоциклового и сверхмногоциклового (гигациклового) усталости, механизмы возникновения усталостных трещин и законы их роста. В обзоре рассмотрены основные экспериментальные методы исследования усталостного нагружения, проанализированы известные экспериментальные результаты, касающиеся определения факторов, влияющих на процесс накопления дефектов и роста трещин в металлах, рассмотрены теоретические подходы к описанию процессов усталостного разрушения при различных условиях нагружения.

Целью второй главы является применение методики определения коэффициента интенсивности напряжений по температурному полю вблизи вершины усталостной трещины с использованием данных инфракрасного сканирования и подходов термоупругости.

Параграф 2.1 посвящен теоретическому описанию процессов теплопроводности и эффектов термоупругости в процессе циклического нагружения. Приведены уравнения, описывающие распределение температуры при циклическом нагружении без учета и с учетом зависимости упругих модулей материала от температуры.

В параграфе 2.2 приведено описание исследуемого материала и методики проведения экспериментов. Исследованы механизмы усталостного разрушения сплава титана OT-4 (Ti4AlMn) в режиме многоциклового усталости с частотами нагружения от 1 до 10 Гц и коэффициентом асимметрии цикла $R=0$ и $R=-0,01$. Для определения «in-situ» процессов диссипации и накопления энергии в вершине трещины использовался метод инфракрасной термографии [1]. Образцы изготавливались из листа толщиной 3 мм, размеры рабочей зоны 200x55 мм. В центре рабочей зоны создавался концентратор напряжений в виде трех перекрывающихся отверстий диаметром 4 мм для центрального и 3 мм для крайних отверстий. На рисунке 1 показано инфракрасное изображение вершины усталостной трещины в процессе эксперимента (рисунок 1а) и графики изменения максимальной температуры в вершине трещины, напряжения и раскрытия трещины в процессе нагружения (рисунок 1б).

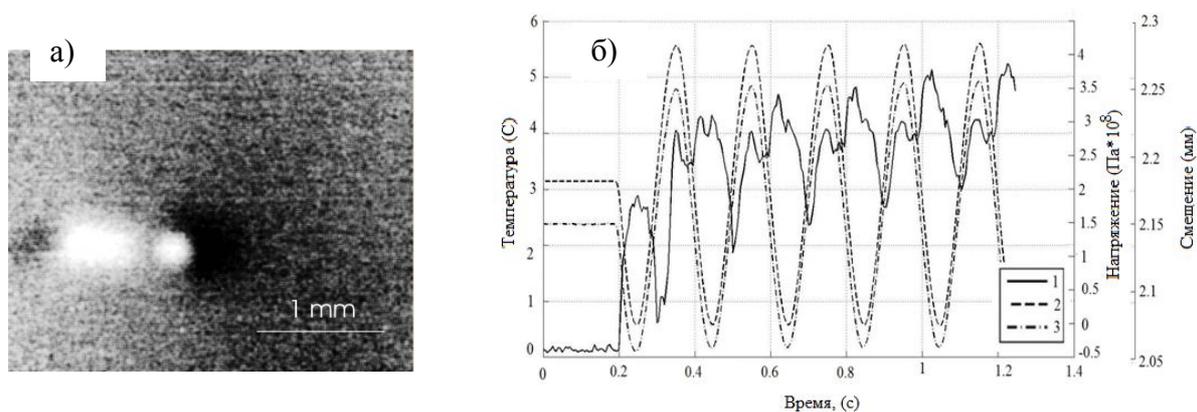


Рисунок 1 – а) Распределение температуры в вершине и на берегах усталостной трещины при циклическом деформировании; б) графики зависимости изменения максимальной температуры в вершине трещины (1), напряжения (2), и раскрытия трещины (3) от времени в процессе усталостного нагружения при амплитуде напряжения 212 МПа, среднем напряжении 212 МПа и частоте 5 Гц

Данные датчика перемещения, закреплённого на берегах трещины, позволяют утверждать, что раскрытие берегов трещины изменяется синфазно с приложенным напряжением. Анализ температурных данных показал, что максимум приложенных напряжений и максимум интенсивности тепловыделения в вершине усталостной трещины не совпадают во времени. На каждом цикле нагружения наблюдается участок падения температуры, вызванный термоупругим эффектом, переходящий в участок роста температуры, связанный с локальным переходом через предел пропорциональности и образованием зоны пластического деформирования. При уменьшении напряжения в вершине трещины тепловыделение возрастает, и температура достигает максимума практически при нулевом напряжении.

В параграфе 2.3 описывается методика определения коэффициента интенсивности напряжений в вершине усталостной трещины по полю температур. Изменение температуры в приближении линейной термоупругости определяется соотношением [2]:

$$\Delta T = -\frac{\beta T_0}{\rho c} \Delta \sigma_i, \quad (1)$$

где ΔT - изменение температуры образца, T_0 - начальная температура, при которой проводился эксперимент, $\Delta \sigma_i$ - изменение суммы главных напряжений, β - коэффициент температурного расширения, ρ - плотность, c - удельная теплоёмкость.

Применяя асимптотические формулы для компонент напряжений в вершине трещины I типа, выражение для коэффициента интенсивности напряжений (КИН) может быть представлено в виде:

$$\Delta K_I = \sqrt{\frac{\pi r}{2}} \Delta \sigma_i. \quad (2)$$

Подстановка (1) в уравнение (2) дает следующее выражение для коэффициента интенсивности напряжений:

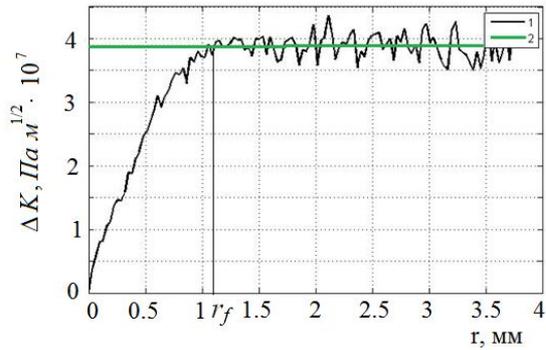
$$\Delta K_I = -\sqrt{\frac{\pi r}{2}} \frac{\Delta T \rho c}{\beta T_0} \Delta \sigma_i. \quad (3)$$

Из этого соотношения можно вычислить размах коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины по полю температуры и сравнить его с классической формулой определения КИН для данной геометрии образца:

$$\Delta K_I = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \left(\text{Sec} \left(\frac{\pi a}{W} \right) \right)^{1/2}, \quad (4)$$

где $\Delta \sigma$ - размах приложенных напряжений, a - длина трещины, W - ширина образца.

Для точного определения коэффициента интенсивности напряжений необходимо корректно установить координату вершины трещины. По данным инфракрасной камеры, а



1 – значения КИН, полученные по формуле (3); 2 – значения КИН, полученные формуле (4)

Рисунок 2 – Сопоставление значений КИН в зависимости от расстояния до вершины трещины

именно, по полю температуры, вычисляются значения коэффициента интенсивности напряжений ΔK_I для расстояний r вблизи вершины трещины (рисунок 2). Сравнивая значения, полученные по формулам (3) и (4), можно установить расстояние до вершины трещины r_f , по достижении которого решения, полученные по формулам (3), (4), близки к величине погрешности 7,5%, которую можно связать с неучтенными проявлениями нелинейности термоупругого эффекта и микропластических деформаций. Предполагается, что за пределами расстояния r_f материал ведет себя в соответствии с классическими представлениями механики разрушения. Для различных уровней приложенных напряжений и размеров трещин значение расстояния r_f колеблется в пределах $1 \div 2$ мм. Данный метод имеет ограничения: для точного определения коэффициента интенсивности напряжений необходимо корректно установить координату вершины трещины – небольшое изменение координаты вершины ведет к сильным изменениям значения КИН; анализ термоупругого поля напряжений может проводиться только на начальном этапе первого цикла нагружения, когда исключается влияние локализации пластической деформации вызывающей сильный нагрев.

Целью 3 главы является исследование механизмов разрушения в режимах многоциклового и гигациклового усталости применительно к субмикроструктурным и обычным поликристаллическим металлическим материалам.

В параграфе 3.1 описывается методика испытаний металлических материалов на гигацикловую усталость и принцип работы ультразвуковых усталостных машин. Приводится оценка влияния микроструктуры чистого титана *Grade-4* на усталостную прочность (многоциклового режима) с помощью метода Ризитано-Люонга [3]. Показано, что при циклических нагрузках ниже предела усталости среднее значение температуры поверхности образцов с ультрамелкозернистой структурой выше температуры образца с поликристаллической структурой. При амплитудах, стремящихся к пределу усталости, наблюдается обратная ситуация: среднее значение температуры поликристаллического титана становится намного выше, чем у субмикроструктурного образца. Установлено существенное влияние структуры исследуемого материала на зависимость температуры образца от приложенных циклических напряжений (рисунок 3).

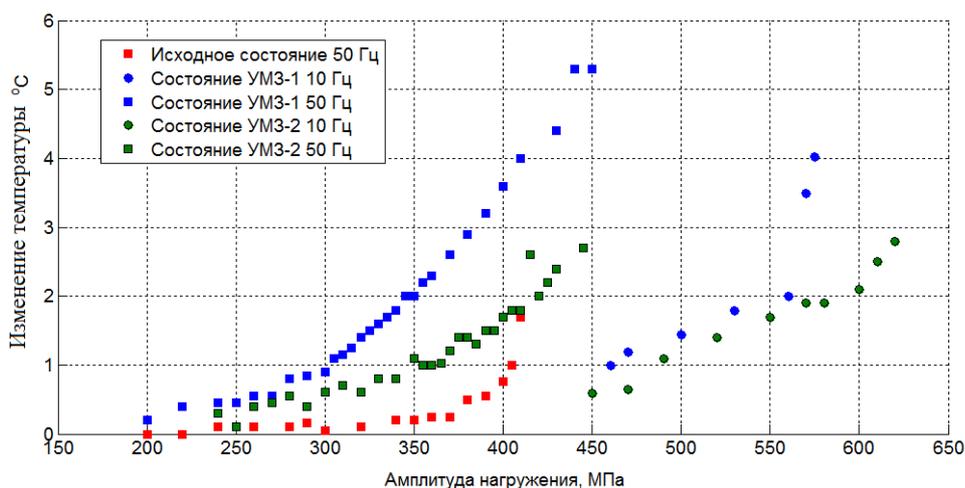
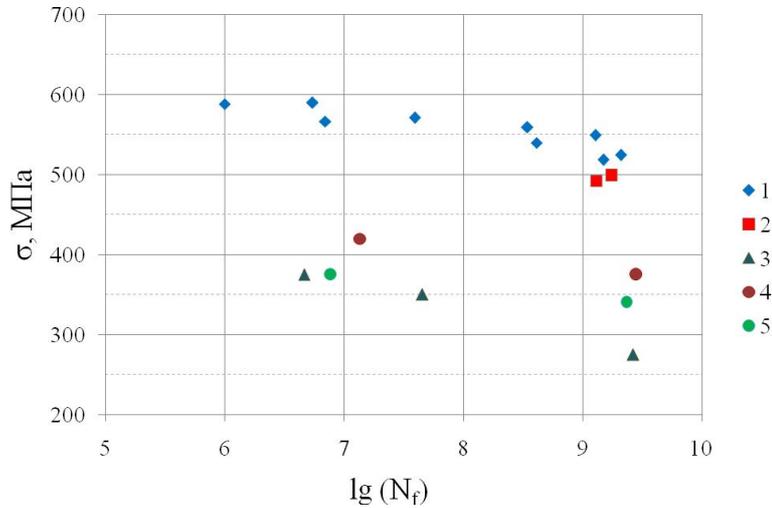


Рисунок 3 – Зависимость разности температуры поверхности образца (между началом циклической нагрузки и ее завершением) от приложенного циклического напряжения в титане *Grade-4* с различным размером зерна: в исходном состоянии – 25 мкм; в ультрамелкозернистом состоянии УМЗ-1 – 100 нм; в ультрамелкозернистом состоянии УМЗ-2 – 200 нм

Материал с исходной кристаллической структурой (размер зерна 25 мкм) демонстрирует двухстадийный рост температуры при многоцикловом режиме нагружения: на первой стадии температура поверхности слабо изменяется при приложении нагрузки в упругой области, тогда как на второй стадии наблюдается нелинейный рост температуры. В соответствии с методикой Резитано-Люонга определение характерной амплитуды перехода между стадиями используется для оценки предела усталости, и ее значение для *Ti Grade-4* в исходном состоянии составляет 375 МПа. Для материалов с ультрамелкозернистой структурой температура поверхности начинает заметно расти при низких значениях приложенных напряжений. Пошаговое приращение температуры от приращения напряжения соответствует линейной зависимости, однако при достижении высоких значений амплитуды напряжения наблюдается резкое увеличение температуры.

В параграфе 3.2 представлены результаты испытаний в гигацикловом режиме нагружения металлических материалов: чистый титан *Grade-4* в трех различных состояниях структуры (исходное и ультрамелкозернистые состояния УМЗ-1 и УМЗ-2 с размерами зерен ~100 нм и ~200 нм соответственно), сплав титана *BT-6 (Ti6Al4V)* и сталь *R4 (32NiCrMo10)*. Усталостное разрушение сплава *BT-6* на базе 10^9 циклов нагружения наблюдалось при напряжении 495 МПа. Разрушение *Ti Grade-4* на базе 10^9 циклов наблюдалось при напряжениях 275 МПа для исходного состояния и 375 МПа и 340 МПа для ультрамелкозернистых состояний соответственно. Результаты усталостных испытаний сплава титана *BT-6 (Ti6Al4V)* при гигацикловом режиме нагружения согласуются с литературными данными [4]. Субмикроструктурный титан *Grade-4* УМЗ-1 с размером зерна ~100 нм проявляет более высокие усталостные свойства по

сравнению с состоянием УМЗ-2 (размер зерна ~ 200 нм) и поликристаллическим состоянием с размером зерна 25 мкм. Сводный график зависимостей амплитуды нагружения от числа циклов изображен на рисунке 4.



1 – *Ti6Al4V* по данным Bathias [4]; 2 – Сплав *BT-6*; 3 – *Ti Grade-4* в исходном состоянии;
4 – *Ti Grade-4* в состоянии *УМЗ-1*; 5 – *Ti Grade-4* в состоянии *УМЗ-2*

Рисунок 4 – Зависимости амплитуды нагружения ($\Delta\sigma$) от числа циклов (N_f)

Проявление автомодельных закономерностей роста трещины исследовалось методами теории подобия и размерностей [5] на основе введения безразмерных комплексов, учитывающих напряженное состояние в вершине трещины и влияние структурных масштабов на кинетику роста трещины:

$$\frac{da}{dN} = l_{sc} \left(\frac{\Delta K_{eff}}{E \sqrt{l_{sc}}} \right)^\alpha, \quad (5)$$

где $\Delta K_{eff} = \Delta K \left(\frac{L_{pz}}{l_{sc}} \right)^{\beta/\alpha}$, ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений; E –

модуль Юнга; l_{sc} – минимальный пространственный масштаб в окрестности вершины трещины (зоны процесса разрушения), на котором начинают проявляться масштабно-инвариантные закономерности рельефа поверхности разрушения, L_{pz} – масштаб зоны процесса разрушения в вершине трещины; α и β – степенные показатели, отражающие промежуточно-асимптотический характер кинетики роста трещины от безразмерных переменных $\frac{\Delta K}{E \sqrt{l_{sc}}} \ll 1$, $\frac{L_{pz}}{l_{sc}} \gg 1$. Зависимость (5), построенная по результатам

эксперимента по изучению кинетики роста трещины в стали *R-4* с учетом значений структурного масштаба l_{sc} , позволяет оценить значение степенного показателя по наклону прямой (5) в логарифмических координатах: $\alpha \sim 2.16$ (рисунок 5).

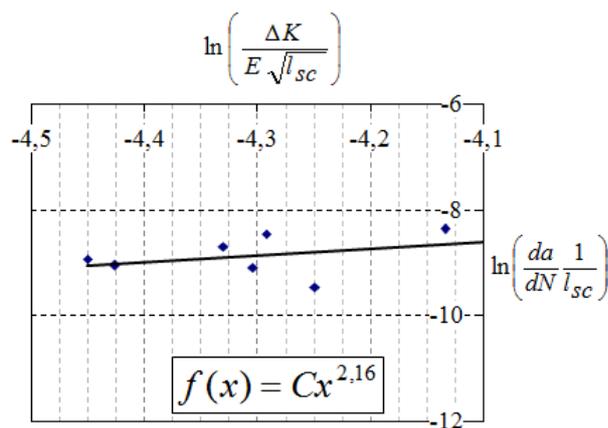


Рисунок 5 – Кинетика роста усталостной трещины (5) при гигацикловом режиме нагружения (сталь R-4), представленная в безразмерных (автомодельных) координатах

В 4 главе с целью изучения масштабно-инвариантных закономерностей инициирования и роста трещины приводятся результаты анализа поверхностей разрушения плоских и цилиндрических образцов, подвергнутых нагружению в режимах много и гигацикловой усталости. Методами оптической и электронной микроскопии проведен качественный анализ морфологии поверхности. По данным профилометрии высокого разрешения (интерферометр-профилометр *New View 5010*) определены масштабные инварианты рельефа поверхности разрушения (показатель Херста H), соответствующие одномерным профилям рельефа поверхности разрушения и вычисляемые по формуле [6]:

$$K(r) = \left\langle (z(x+r) - z(x))^2 \right\rangle_x^{1/2} \propto r^H, \quad (6)$$

где $K(r)$ - функция корреляции, $z(x)$ – высота рельефа, зависящая от координаты x ; угловые скобки отражают усреднение по x ; r – масштаб, по которому оценивается корреляция; H – показатель Херста. Показатель Херста соответствует наклону линейного участка зависимости $\ln K(r) \sim H \ln r$ и определяет диапазон масштабов (l_{sc} , L_{pz}) коррелированного поведения дефектной структуры материала, отраженной в особенностях рельефа поверхностей разрушения. Значения масштабов l_{sc} , L_{pz} определялись как начало и конец линейного участка функции корреляции соответственно.

Обнаружены две характерные зоны с различным значением показателя Херста (рисунок 6). Зона I диаметром ~ 300 мкм в окрестности очага разрушения обладает высокой шероховатостью и соответствует зоне инициирования усталостной трещины; зона II охватывает остальную часть поверхности разрушения, является более гладкой и может ассоциироваться с зоной распространения трещины. Данные результаты находятся

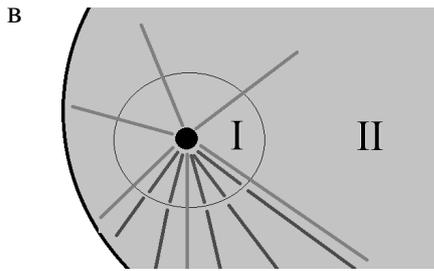


Рисунок 6 – Схематичное изображение поверхности разрушения цилиндрических образцов

соответствии с результатами качественной фрактографии, описанными в [7]. Для определения масштабных инвариантов, соответствующих зонам инициирования и распространения трещин, анализировались одномерные профили различной длины, охватывающие как обе характерные зоны, так и ограниченные только одной зоной. Функция корреляции (5), построенная по профилям, включающим обе характерные зоны, имеет два линейных участка с изломом, который соответствует смене механизмов формирования рельефа (рисунок 7). Функции корреляции, построенные по профилям внутри зон, имели только один линейный участок (рисунок 8). При этом значения показателя Херста H соответствовали значениям, полученным на профилях с двойным наклоном.

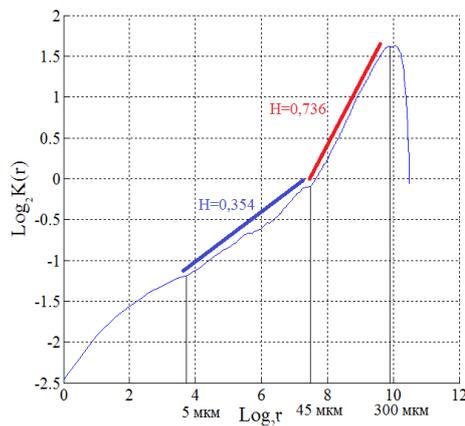


Рисунок 7 – Функция корреляции для двух характерных зон I и II

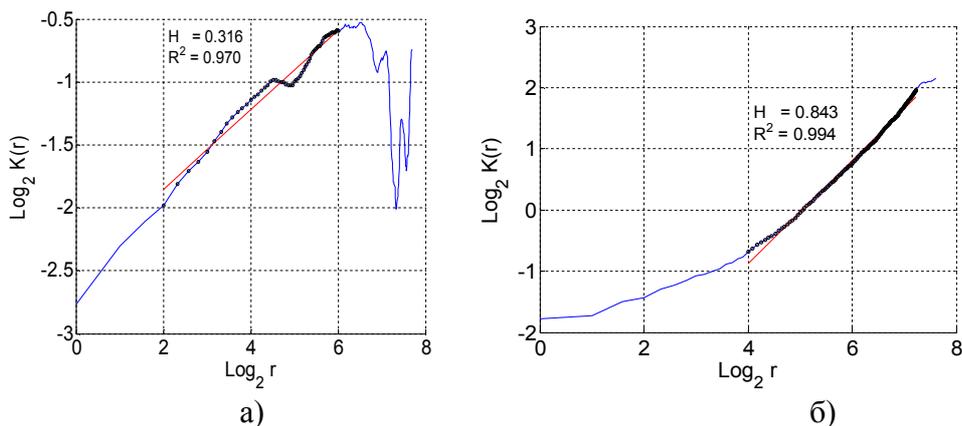


Рисунок 8 – Функция корреляции для поверхностей разрушения сплава ВТ-6: а) внутри зоны 1; б) внутри зоны 2

Проведено исследование влияния размера окна сканирования на величину показателя Херста. Зависимость показателя Херста от размера окна сканирования показана на рисунке 9.

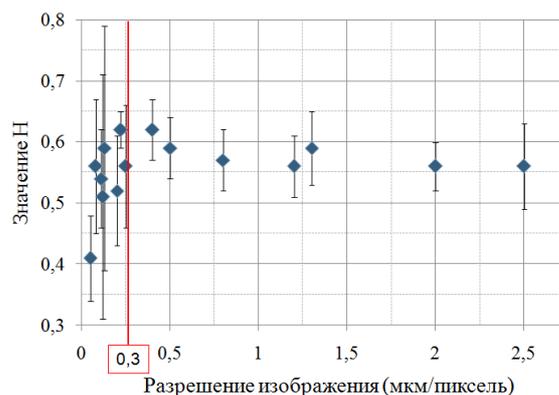


Рисунок 9 – Зависимость показателя Херста от размера окна сканирования (разрешения изображения)

Для определения зависимости показателя Херста от размера окна область поверхности разрушения сканировалась с различным увеличением: увеличениям $\times 80$ и $\times 2000$ соответствуют соответственно разрешения $2,5 \text{ мкм}$ и $0,1 \text{ мкм}$. Установлено, что при разрешении, превышающем $0,3 \text{ мкм}$ в 1 пикселе, значение показателя Херста остается постоянным. Значения масштабных инвариантов, полученные в работе, вычислялись по профилям поверхности разрушения, сканируемой при данном разрешении изображения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Впервые установлено на основе сравнительного анализа закономерностей усталостного разрушения титана с субмикроструктурной и обычной поликристаллической структурой увеличение усталостной прочности при гигацикловых режимах нагружения для титана с субмикроструктурной структурой.
2. Впервые на основе количественного анализа морфологии поверхностей усталостного разрушения по данным профилометрии высокого разрешения и вычисления масштабного инварианта (показателя Херста) установлены качественные различия режимов много- и гигацикловой усталости, обусловленные механизмами инициирования и распространения трещин.
3. Определены значения на основе количественного анализа рельефа поверхности разрушения по данным профилометрии высокого разрешения масштабного инварианта (показателя Херста) и соответствующие им масштабы, характеризующие развитие поврежденности в окрестности вершины усталостной трещины.
4. Установлен промежуточно-асимптотический характер автомодельной кинетики роста усталостных трещин при много- и гигацикловом режиме нагружения, обусловленный масштабными закономерностями развития поврежденности в вершине трещины.

Список цитируемой литературы

1. Jones, R. Application of infrared thermography to study crack growth and fatigue life extension procedures / R. Jones, M. Krishnapillai, K. Cairns, N. Matthews // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structure*. – 2010. – № 33. – P. 871-884.
2. Diaz, F. A. Measuring stress intensity factors during fatigue crack growth using thermoelasticity / F. A. Diaz, E. A. Patterson, R. A. Tomlison, J. R. Yates // *Fatigue Fract Engng Mater Struct*. – 2004. – № 27. – P. 571–583.
3. Luong, M. P. Infrared thermographics scanning of fatigue in metals / M. P. Luong // *Nuclear Engineering and Design*. – 1995. – № 158. – P. 363-376.
4. Bathias, C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice / C. Bathias, P. C. Paris. – Marcel Dekker Publisher Co. – 2005. – 328 p.
5. Баренблатт, Г. И. Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика / Г. И. Баренблатт. – Лен: Гидрометеиздат. – 1982. – 255 с.
6. Bouchaud, E. Scaling properties of cracks / E. Bouchaud // *J. Phys. Condens. Matter*. – 1997. – № 9. – P. 4319–4344.
7. Sakai, T. Review and Prospects for Current Studies on High Cycle Fatigue of Metallic Materials for Machine Structural Use / T. Sakai // *Jour. Solid Mech. and Mat. Eng*. – 2009. – V 3, № 3. – P. 425-439.

Основные публикации по теме диссертационной работы в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Оборин, В. А. Масштабная инвариантность роста усталостной трещины при гигацикловом режиме нагружения / В. А. Оборин, **М. В. Банников**, О. Б. Наймарк, Т. Palin-Luc // *Письма в журнал технической физики*. – 2010 –Т. 36 № 22. – С. 76-82.
2. Оборин, В. А. Длинно-корреляционные многомасштабные взаимодействия в ансамблях дефектов и оценка надёжности алюминиевых сплавов при последовательных динамических и усталостных нагружениях / В. А. Оборин, **М. В. Банников**, О. Б. Наймарк, С. Froustey // *Письма в журнал технической физики*. – 2011. – Т. 37, № 5. – С. 105-110.
3. Froustey, C. Microstructure scaling properties and fatigue resistance of pre-strained aluminium alloys (part 1: Al-Cu alloy) / C. Froustey, O. Naimark, **M. Bannikov**, V. Oborin // *European Journal of Mechanics A/Solids*. – 2010. – № 29. – P.1008-1014.

4. Терехина, А. И. Экспериментальное исследование генерации тепла в вершине усталостной трещины / А. И. Терехина, **М. В. Банников**, О. А. Плехов, Э. В. Плехова // ПЖТФ. – 2012. – Т. 38, № 16. – С. 9-15.

Другие публикации

1. **Банников, М. В.** New View анализ структурного скейлинга при оценке влияния предварительного нагружения на усталостную прочность / М. В. Банников, С. Froustey, В. А. Оборин, О. Б. Наймарк // Сборник статей международной школы-семинара «Многоуровневые подходы в физической мезомеханике», г. Томск. – 2008. – С. 128-130.
2. **Банников, М. В.** Оценка надежности алюминиевых сплавов на основе анализа дефектных структур / М. В. Банников, В. А. Оборин, О. Б. Наймарк // 16 зимняя школа по механике сплошных сред, Россия, Пермь. – 2009. – С. 43.
3. Оборин, В. А. Экспериментальное исследование роста трещины при гигацикловой усталости / В. А. Оборин, **М. В. Банников**, О. Б. Наймарк // 16 зимняя школа по механике сплошных сред, Россия, Пермь. – 2009. – С. 44.
4. Оборин, В. А. Масштабно-инвариантные закономерности эволюции структуры и оценка надежности алюминиевых сплавов при последовательных динамических и усталостных нагружениях / В. А. Оборин, **М. В. Банников**, О. Б. Наймарк // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. – 2010. – № 2. – С. 87-97.
5. Оборин, В. А. Экспериментальное и теоретическое исследование разрушения в условиях гигацикловой усталости / В. А. Оборин, **М. В. Банников**, О. Б. Наймарк // Тезисы докладов международной конференция по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, Томск. – 2011. – С. 70.
6. **Банников М. В.**, Плехов О. А., Терехина А. И. Теоретическое и экспериментальное исследование эффекта термоупругости в металлах при росте усталостной трещины / М. В. Банников, О. А. Плехов, А. И. Терехина // Тезисы докладов международной конференции по физической мезомеханике, компьютерному конструированию и разработке новых материалов, Томск. – 2011. – С. 517.
7. **Банников, М. В.** Экспериментальное исследование особенностей процесса генерации тепла в вершине усталостной трещины / М. В. Банников, А. И. Терехина, О. А. Плехов

- // Вестник Пермского государственного технического университета. Механика. – 2011. – № 2. – С. 14-27.
8. Оборин, В. А. Экспериментальное и теоретическое исследование разрушения в условиях гигацикловой усталости / В. А. Оборин, **М. В. Банников**, О. Б. Наймарк // Тезисы докладов. XVII Зимняя школа по механике сплошных сред, Пермь. – 2011 – С. 241.
 9. **Bannikov, M. V.** Fatigue resistance and microstructure scaling properties of pre-strained aluminum alloys / M. V. Bannikov, V. A. Oborin, O. B. Naimark, C. Froustey // Book of abstract. International Workshop “Advanced Problems of Mechanics and Physics of Mesoscopic Systems”, ICMM UB RAS, Perm. – 2011. – P. 9.
 10. **Банников, М. В.** Экспериментальное исследование процесса генерации тепла в вершине усталостной трещины / М. В. Банников, О. А. Плехов, О. Б. Наймарк, А. И. Терехина // XX Петербургские чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 10-12 апреля 2012 г.: сборник материалов. – Ч.2.-СПб. – 2012. –С. 159-162.
 11. **Bannikov, M.** Infrared study of strain energy dissipation process in the fatigue crack tip / M. Bannikov, A. Terekhina, O. Plekhov, O. Naimark // Proceeding of the 19th European Conference on Fracture “Fracture Mechanics for Durability reliability and Safety”, Kazan, Russia, 26-31 August, 2012. – 2012. –P. 268 (CD-ROM).
 12. **Банников, М. В.** Экспериментальное и теоретическое исследование генерации энергии в вершине усталостной трещины / М. В. Банников, А. Ю. Федорова, О. А. Плехов, О. Б. Наймарк, А. И. Терехина // 18 зимняя школа по механике сплошных сред, Россия, Пермь, 18-22 февраля, 2013г, Тезисы докладов. Пермь-Екатеринбург. – 2013. – С. 38.