

На правах рукописи



Оборин Владимир Александрович

**МАСШТАБНО-ИНВАРИАНТНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
РАЗВИТИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ И РАЗРУШЕНИЕ ПРИ
ДИНАМИЧЕСКОМ И УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ**

1.1.8– механика деформируемого твёрдого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Пермь – 2021

Работа выполнена в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: **Наймарк Олег Борисович**, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Панфилов Петр Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики конденсированного состояния и наноразмерных систем ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург);

Шлянников Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией механики деформирования и разрушения ФГБУН Федеральный исследовательский центр "Казанский научный центр Российской академии наук" (г. Казань).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), г. Екатеринбург

Защита состоится **07 октября 2021 г.** в 10:30 часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук (филиал – Институт механики сплошных сред УрО РАН) по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1; тел: (342) 237-84-61; факс: (342) 237-84-87; сайт: www.icmm.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук.

Автореферат разослан « ____ » сентября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, доцент



/ А.Л. Зуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. При создании современных промышленных устройств, средств транспорта возрастают требования к оценке надежности и ресурса элементов конструкций, включая экстремальные температурно-силовые условия нагружения. Эти тенденции характерны для деталей авиационных двигателей, газовых и паровых турбин, двигателей внутреннего сгорания, оборудования атомной и традиционной энергетики, высокоскоростного транспорта. Оценка безопасного срока службы особенно важна для предотвращения отказов, которые могут иметь катастрофические социальные последствия.

Разработка методов оценки текущего состояния конструкций на основе перспективных материалов предполагает установление связи эволюции структуры материала и физико-механических свойств, сопровождающих процессы пластического деформирования и разрушения. Разрушение материалов связано с развитием дефектов на разных масштабных уровнях, их взаимодействием между собой и внешними физическими полями. Дефекты, являясь носителями структурных нарушений в материалах в процессе деформирования, обеспечивают реализацию механизмов релаксации и диссипации энергии, обеспечивая, тем самым, эксплуатационный ресурс.

Развитие экспериментальных методов привело к появлению новых подходов оценки надежности и временного (усталостного) ресурса, основанных на применении высокоточного измерительного оборудования (интерферометр-профилометр, атомно-силовой микроскоп), позволяющие количественно анализировать морфологию поверхности. Исследования в этой области связаны с изучением масштабно-инвариантных свойств поверхности разрушения.

Изучение масштабно-инвариантных свойств поверхностей разрушения, проведенное в работах В.С. Ивановой, А.А. Шанявского, Л.А. Тепляковой, Л.Р. Ботвиной, E. Bouchaud, M. Zaiser 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.

В работах M. Zaiser и E. Bouchaud для количественной характеристики поверхностных структур, образующихся при деформировании и разрушении нагруженных твердых тел, был предложен метод, основанный на концепции масштабной инвариантности деформированной поверхности. Основным методом исследования морфологии поверхности является измерение фрактальной размерности и показателя Хёрста, инвариантных относительно преобразования масштаба.

Многочисленными исследованиями установлено, что до 80% усталостного ресурса материалов и конструкций приходится на формирование дислокационных субструктур, микротрещин. Изучение многомасштабной эволюции дефектов приобретает важное значение для оценки долговечности при усталостном нагружении, в частности, для приложений в авиационном моторостроении применительно к распространенным ситуациям случайных динамических воздействий на лопатки газотурбинных двигателей (соударение с твёрдыми

частицами). Данная проблема получила название в зарубежной литературе как «foreign object damage» (T. Nicholas, J.O. Peters, R. O. Ritchie) и её решение предполагает использование результатов фундаментального характера, устанавливающих связь стадийности поврежденности с многомасштабной эволюцией ансамблей дефектов в материалах при различных условиях нагружения, в сочетании с современными методами структурного анализа и методами моделирования

Актуальным является обоснование методов оценки усталостного ресурса, стадийности разрушения, в том числе при комбинированном динамическом и много- (гигацикловом) нагружении, с учетом масштабно-инвариантных закономерностей развития поврежденности и перехода к разрушению.

Целью диссертационной работы является установление связи масштабно-инвариантных закономерностей стадийности развития поврежденности в алюминиевых сплавах на основе данных количественной профилометрии и механизмами разрушения при комбинированном динамическом и последующем много- и гигацикловом усталостном нагружении.

Для достижения этой цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Исследовать масштабно-инвариантные закономерности эволюции деформационного рельефа на поверхности монокристалла алюминия при квазистатическом нагружении.
2. Разработать методологию для проведения исследований при комбинированном нагружении, позволяющую определение усталостного ресурса при динамическом и последующем гигацикловом нагружении.
3. Установить влияние предварительного динамического нагружения на усталостный (много- гигацикловый) ресурс алюминиевых сплавов на основе анализа масштабно-инвариантных закономерностей рельефа поверхностей разрушения.
4. Установить масштабно-инвариантные характеристики морфологии поверхности разрушения динамически преднагруженных алюминиевых образцов для оценки параметров кинетического уравнения роста усталостной трещины в режиме гигациклового нагружения.

Научная новизна результатов работы:

1. С использованием современного оборудования (оптической и электронной микроскопии) и оригинальных экспериментов впервые проведено исследование масштабно-инвариантных закономерностей развития пластической деформации и разрушения при комбинированном динамическом, много- и гигацикловом усталостном нагружении алюминиевых сплавов.
2. По данным профилометрии высокого разрешения установлена масштабная инвариантность деформационных структур, образующихся на поверхности монокристалла алюминия в условиях растяжения.
3. Впервые установлена связь усталостного ресурса алюминиевых сплавов, подвергнутых предварительному динамическому нагружению, с характеристиками масштабной инвариантности рельефа поверхностей разрушения.
4. Определены параметры кинетического уравнения роста усталостных трещин в режиме гигацикловой усталости для предварительно нагруженных образцов из сплава алюминия, учитывающее характеристики масштабной инвариантности рельефа поверхностей разрушения.

Достоверность результатов обеспечивается соответствием методологии проведения экспериментов по механическому нагружению материалов, профилометрии поверхностей разрушения, обоснованными методами вычисления пространственных инвариантов поверхностного рельефа, использованием поверенного метрологического оборудования, устойчивой воспроизводимостью результатов, корректностью физических и математических постановок задач, сопоставлением с результатами других авторов.

Теоретическая и практическая значимость работы обусловлена необходимостью совершенствования методов прогноза эксплуатационного ресурса материалов и конструкций с учётом механизмов развития разрушения на различных масштабных уровнях. Ряд результатов может быть использован для оценки усталостного ресурса материалов при комбинированных условиях нагружения, в том числе применительно к элементам конструкций авиационного моторостроения.

Методология и методы диссертационного исследования

Основные экспериментальные результаты диссертационной работы получены на оригинальном оборудовании лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН и лаборатории LAMEFIP ENSAM Bordeaux, (Франция). Предварительное динамическое нагружение образцов реализовано с использованием инерционного нагружающего устройства и разрезного стержня Гопкинсона-Кольского. Для проведения гигацикловых нагружений применялась ультразвуковая испытательная машина Shimadzu USF-2000, позволяющая испытывать образцы на базе 10^8 - 10^{10} циклов с частотой нагружения 20 кГц. При проведении экспериментальных исследований использовались методики, согласующиеся с российскими и международными стандартами.

Установление корреляций между механическими свойствами и масштабнo-инвариантными характеристиками рельефа поверхностей разрушения, формирующихся в процессе квазистатического нарушения, много- и гигацикловой усталости, использовался интерферометр-профилометр New View 5010, позволяющий получать 3D образ поверхности с разрешением: вертикальное от 0,1 нм, горизонтальное от 0,1 мкм. Полученные оптические изображения рельефа, образующегося в процессе нагружения, исследовались с использованием апробированных методов вычисления пространственных инвариантов.

Положения, выносимые на защиту

1. Связь масштабной инвариантности множественных областей локализованного сдвига с развитием макроскопического пластического течения материала, установленную по данным морфологии поверхностного рельефа деформированного монокристалла алюминия.
2. Закономерности изменения пространственных масштабов зон поврежденности, связь с усталостным ресурсом (на примере сплавов алюминия 2017А-Т3 (аналог Д1) и 5454-О (аналог АМг2.5м)) при последовательных динамических и усталостных (многоцикловых) нагружениях.
3. Результаты и методология проведения исследований при комбинированном нагружении, позволяющие экспериментальное определение усталостного ресурса (на примере сплавов алюминия АМг6 и Д16Т) при динамическом и последующем гигацикловом нагружении.

4. Результаты количественного анализа морфологии поверхности разрушения при комбинированных видах нагружения, позволяющий описание кинетики разрушения предварительно динамически нагруженных образцов (на примере сплавов алюминия АМг6 и Д16Т) в режиме гигацикловой усталости с учетом масштабнo-инвариантных характеристик рельефа поверхности разрушения.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 10 российских и 14 международных конференциях в том числе: Зимние Школы по Механике Сплошных Сред (2007, 2009, 2011, 2017, 2019, 2021 Пермь), серия международных конференций «Петербургские чтения по проблемам прочности» (2012, 2014, 2016, 2018 Санкт-Петербург), Multilevel approach to fracture of materials, components and structures, 17th European Conference on Fracture (2008, Brno, Czech Republic), Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2016, 2018), Международная конференция «Актуальные проблемы прочности» (Пермь, 2017) Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций» (Томск, 2017, 2018, 2019, 2020), Всероссийские конференции молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах» (2007, 2009, 2010, 2011, Пермь), 19th European Conference on Fracture (Казань, 2012), 21th European Conference on Fracture (2016, Катания).

Основные результаты работы были получены в рамках исследований, проводимых в соответствие с госбюджетной темой № АААА-А19-119013090021-5», проектам РФФИ: № 18-08-01186, 19-48-590009.

Публикации. Результаты исследований по теме диссертационной работы опубликованы в 39 научных публикациях, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК, 11 статей, опубликованных в изданиях, индексируемых в WoS или Scopus, 10 статей и тезисы 14 докладов в сборниках трудов международных и российских конференций.

Личный вклад автора

Автором получены основные результаты, представленные в диссертации. Разработана методология оценки стадийности поврежденности с использованием масштабнo-инвариантных закономерностей, полученных на оригинальных данных профилометрии высокого разрешения. Автор непосредственно участвовал в проведении экспериментов по квазистатическому нагружению монокристалла алюминия, много- и гигацикловому испытанию образцов из сплава алюминия.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 130 страницах и содержит 82 рисунка, 9 таблиц, список цитируемой литературы из 103 наименований.

Благодарности. Автор диссертационной работы выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н., профессору О.Б. Наймарку и всем сотрудникам лаборатории Физических основ прочности ИМСС УрО РАН за обсуждение и плодотворное время совместной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследований, показана научная новизна результатов и их практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации носит обзорный характер. В параграфах 1.1 и 1.3 приведён обзор работ Панина В.Е., Козлова Э.В., Коневой Н.А., Владимирова В.И., Рыбина В.В., Мещерякова Ю.И., Тепляковой Л.А., касающихся развития ансамблей дефектов при деформировании и разрушении материалов, обсуждается концепция многоуровневого развития пластической деформации, проявления неоднородности пластической деформации на разных масштабных уровнях, а также закономерности сдвиговой деформации в металлах и сплавах. В параграфе 1.2 приведён обзор работ Баренблатта Г.И., Ботвиной Л.Р., Carpinteri A., Наймарка О.Б., посвященных, статистической автомодельности пространственных распределений деформационных дефектов на различных масштабных уровнях, связь с закономерностями разрушения. Обсуждается вид функции распределения данных дефектов, имеющий универсальный характер в некоторых безразмерных (автомодельных) координатах.

В параграфе 1.4 приведён обзор работ Bouchaud E., Zaiser M. по исследованию морфологии поверхности нагруженных материалов и основных масштабно-инвариантных закономерностей, наблюдаемых при деформировании и разрушении металлов и сплавов. Отмечается, что масштабная инвариантность структур наблюдается не только при анализе следов скольжения на поверхности деформированных монокристаллов, но и при количественных исследованиях деформационных дефектов в объёме моно- и поликристаллов металлов и сплавов. Обсуждается связь масштабных структурных инвариантов с кинетикой роста трещин, установленной в работах А.А. Шанявского.

В параграфе 1.5 сформулированы цель работы и задачи исследования, обоснован выбор материалов и методов исследования.

Вторая глава диссертационной работы посвящена экспериментальному исследованию масштабно-инвариантных закономерностей эволюции рельефа поверхности пластически деформируемого монокристалла алюминия.

В параграфе 2.1 приведены основные механические свойства рассматриваемого монокристалла алюминия. В параграфе 2.2 описан принцип работы измерительного комплекса NewView 5010 для получения трехмерного изображения поверхности. Параграф 2.3 посвящен условиям проведения экспериментов, описанию методик и основным результатам. Исследование включало эксперименты по квазистатическому растяжению монокристалла алюминия, изучению масштабно-инвариантных закономерностей (в терминах показателя Хёрста) локализации пластической деформации на основе данных профилометрии высокого разрешения (интерферометр-профилометр New View 5010).

Монокристалл высокочистого алюминия был выращен по методу Чохральского в вертикальной печи в тигле из алюминия высокой чистоты с использованием «затравки» ориентации [001]. Геометрические размеры образца 41x3,8x1,8 мм с максимальным размером вдоль оси роста монокристалла с ориентацией близкой к [001].

Вырезанный образец механически полировался на наждачных бумагах с постепенным уменьшением зерна абразива, последующим электрохимическим полированием для удаления деформированного в процессе резки слоя и получения зеркальной рабочей поверхности.

Образец фиксировался в специально сконструированном приспособлении для исключения изгибных напряжений. Пошаговое (23 стадии нагружения) квазистатическое растяжение монокристалла реализовано в диапазоне деформаций $\varepsilon=1,2-12,2\%$ при комнатной температуре на установке ZWICK Z100/SN5A со скоростью перемещения траверсы 0,2 мм/мин вдоль оси роста кристалла и сопровождалось сканированием поверхности образца после каждого этапа деформирования.

Для изучения микроструктуры деформационного рельефа монокристалла алюминия после заданной величины нагрузки образец вместе со специальными захватами, обеспечивающими одноосность деформирования, извлекался из испытательной машины и исследовался с помощью интерферометра профилометра New View 5010 и сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400. Это позволило исследовать деформационный рельеф свободной поверхности монокристалла алюминия на разных масштабных уровнях в зависимости от степени деформации.

На поверхности монокристалла наблюдалось образование системы сопряженных мезополос областей локализованного сдвига, ориентированных под углом $\sim 45^\circ$ к направлению растяжения (рисунок 1).

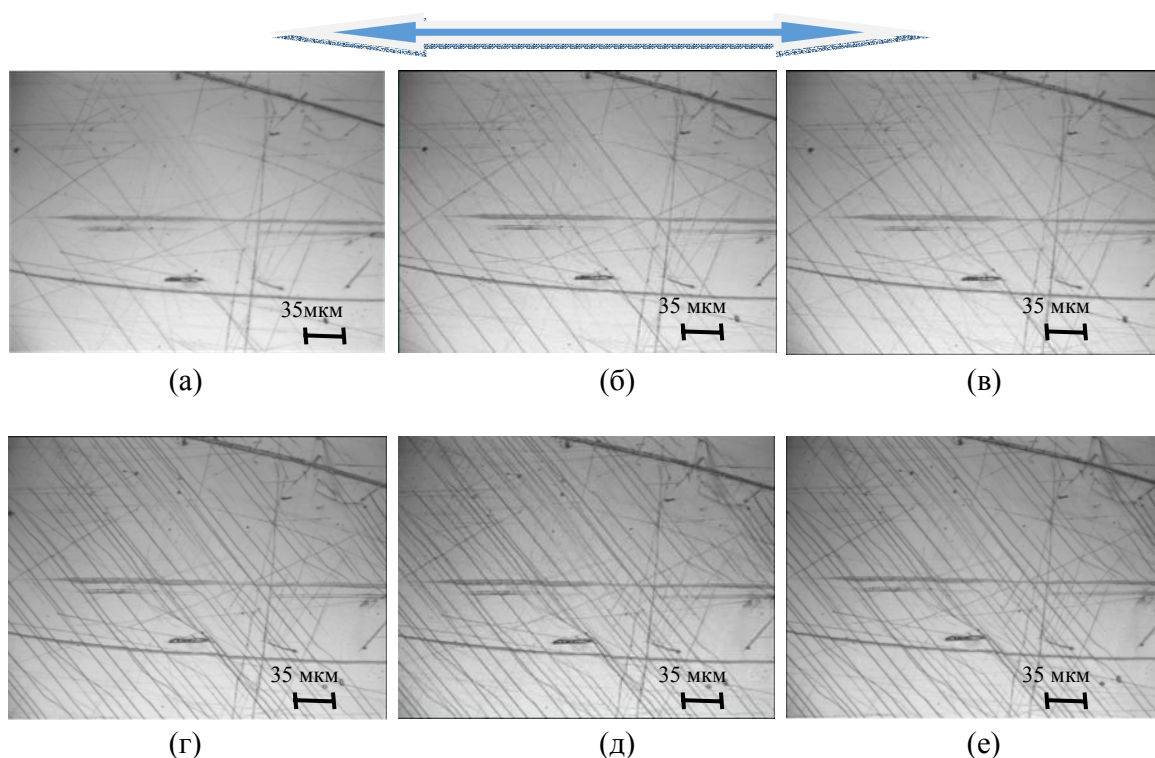


Рисунок 1 – Поверхность монокристалла алюминия, подвергнутых одноосному растяжению, относительная деформация образца: а) $\varepsilon=1,2\%$; б) $\varepsilon=1,9\%$; в) $\varepsilon=2,3\%$; г) $\varepsilon=6,7\%$; д) $\varepsilon=7,3\%$; е) $\varepsilon=8,4\%$

Использование различных методик позволило провести количественный анализ морфологии поверхности и вычисление масштабно-инвариантного показателя

(показателя Хёрста) в широком диапазоне масштабов. Полученные оптические изображения макро- и микро-рельефа боковой поверхности монокристаллического образца, соответствующие различным значениям пластической деформации, анализировались по методике определения показателя Хёрста, заключающейся в вычислении функции корреляции:

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

где $K(r)$ представляет собой усреднённую разность значений высот рельефа поверхности $z(x+r)$ и $z(x)$ на окне размером r , H – показатель Хёрста (масштабно-инвариантный показатель).

Анализировались одномерные образы-срезы рельефа поверхности вдоль оси растяжения. До 10 одномерных «срезов» анализировались в пределах «окна» размером $0,4 \times 2,1$ мм, обеспечивая представительность данных о структуре рельефа, индуцированного дефектами.

Представление зависимости $K(r)$ в логарифмических координатах в соответствие с соотношением (1) позволяет провести оценку показателя Хёрста H , определяемого постоянством наклона зависимости $\log_2 K(r)$ от $\log_2(r)$ в диапазоне масштабов (L_{\min} , L_{\max}), определяемых проекцией линейного сегмента функции корреляции $K(r)$ на ось абсцисс, рисунок 2.

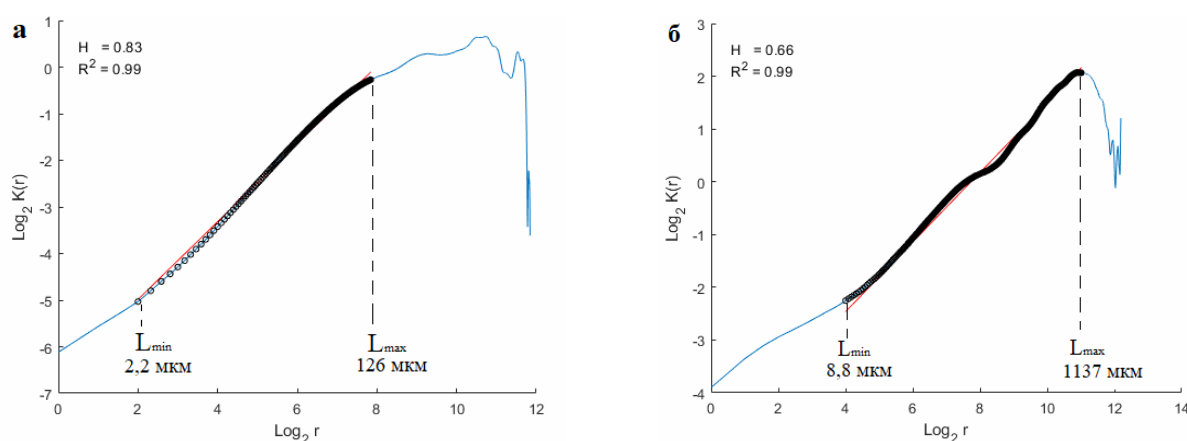


Рисунок 2 – Характерный вид зависимости $\log_2 K(r)$ от $\log_2(r)$ для:
 а) недеформированного монокристалла Al, б) деформированного монокристалла Al ($\varepsilon=7,3\%$)

Распределение полосовых структур различного масштаба при растяжении монокристалла алюминия (рисунок 1) обнаруживает признаки самоподобия. Наблюдался следующий сценарий изменения границ масштабов в зависимости от деформации растяжения. Малым деформациям монокристалла до $\varepsilon \sim 1,9\%$ (рисунки 2а-б) соответствуют значения границ масштабов $L_{\min}=2-9$ мкм и $L_{\max} \sim 120$ мкм при значении $H \sim 0,8$, при достижении $\varepsilon \sim 2,3\%$ наблюдается резкий рост верхней границы масштабов до величины $L_{\max}=1137$ мкм при значении $H \sim 0,7$ (рисунок 2в, стадия I), которые не изменяются (в пределах экспериментальной погрешности) до значений деформации $\varepsilon \sim 7,3\%$ (рисунки 2в-е). При достижении $\varepsilon \sim 7,9\%$ наблюдается резкий рост нижней границы масштабов до величины $L_{\min}=14-19$ мкм при $H \sim 0,7$ (стадия II), соответствующей началу образования более грубой системы мезополос сдвига, рисунки 2д-е.

Анализ оптических изображений позволил установить две стадии формирования полос скольжения: первая стадия роста верхней границы масштаба в диапазоне деформаций $\varepsilon=2,3-7,3\%$ (рисунки 1в-г) соответствует формированию макроскопических полос, расположенных на поверхности кристалла под углом $\sim 45^\circ$ к направлению внешней силы, вторая стадия роста минимального масштаба в диапазоне деформаций $\varepsilon=7,9-12,2\%$ (рисунки 2д-е) соответствует образованию более грубой системы мезополос скольжения.

Таким образом, фрактальный анализ деформационного рельефа поверхности монокристалла алюминия после разной степени деформации позволил установить, что на поверхности монокристалла наблюдаются отчётливые самоподобные картины следов скольжения, о чём свидетельствует наличие постоянных к величине пластической деформации значений показателя Хёрста ($H\sim 0,7$) в широком диапазоне пространственных масштабов (5–1100 мкм).

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию масштабнo-инвариантных закономерностей при усталостном деформировании предварительно нагруженных образцов из сплава алюминия.

В параграфе 3.1 приведен обзор работ Вёллера, Мэнсона, Коффина по исследованию усталостного нагружения материалов, обсуждаются результаты Bathias С., Murakami Y., Ботвиной Л.Р., касающиеся особенностей гигациклового разрушения.

В параграфе 3.2 показано, что взаимосвязь структурных изменений и свойств материалов является ключевой проблемой в оценке долговечности, длительной и усталостной прочности. Экспериментальные исследования реакций материалов на нагружение в широком интервале интенсивностей и скоростей деформации обнаруживают ряд закономерностей в процессах пластичности и разрушения и показывают их связь с коллективными свойствами типичных мезоскопических дефектов (дислокационных субструктур, микросдвигов, микротрещин). Яркие черты данных закономерностей проявляются при циклическом, динамическом и ударно-волновом нагружениях, когда времена эволюции структуры приближаются к характерным временам нагружения.

Влияние случайных статических или динамических нагрузок, малоциклового нагружения на долговечность материалов в условиях много- и гигацикловой усталости вызывает в настоящее время большой интерес в авиационном моторостроении в связи с необходимостью решения проблемы надежности (долговечности) в условиях эксплуатации, например, лопаток газотурбинных двигателей при соударении с твёрдыми частицами, получившей в западной литературе определение «foreign object damage».

В параграфе 3.2.1 приведены химический состав и квазистатические свойства исследуемых материалов. Исследовались два сплава алюминия: **Al-Cu** (2017A-T3, аналог Д1) и **Al-Mg** (5454-O, аналог АМг2.5м), используемые в авиационной промышленности и автомобилестроении. Эксперименты на сплавах алюминия проводились в сотрудничестве с французскими коллегами (лаборатория LAMEFIP ENSAM Bordeaux).

В параграфе 3.2.2 приведено описание эксперимента. Предварительное нагружение образцов осуществлялось двумя способами – квазистатическим и динамическим растяжением, после чего образцы подвергались циклической нагрузке, соответствующей базовому сроку службы (приблизительно $2 \cdot 10^5$ циклов)

при комнатной температуре, с последующим изучением фрактографии изломов с помощью интерферометра-профилометра и сканирующего электронного микроскопа.

Квазистатическое предварительное нагружение осуществлялось на сервогидравлической испытательной машине Instron 8500. Динамическое предварительное нагружение образцов проводилось с применением инерционного нагружающего устройства (рисунок 3), позволяющего реализовать динамическое деформирование на фиксированное значение деформации до значений скоростей деформации $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$.

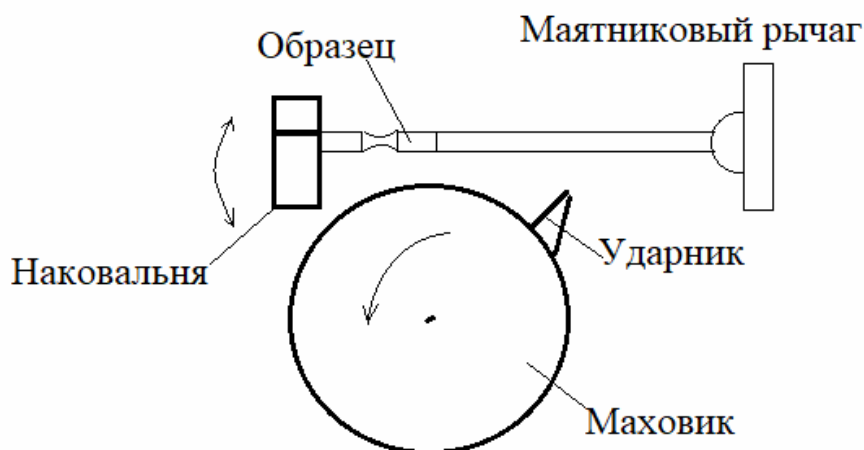


Рисунок 3 – Схема инерционного нагружающего устройства

Испытания на усталость реализовывались на машине резонансного типа Amsler Vibrophore с контролем усилия в условиях полностью обратимого цикла нагрузки-разгрузки. Данная установка позволяет осуществлять регистрацию частотных характеристик деформируемого образца и остановку процесса усталостного нагружения при резком изменении импеданса при зарождении усталостной трещины или формировании зоны локализации разрушения. Изменение частоты на 0,4 Гц соответствовало появлению трещины с характерным размером ~ 1 мм. Уровень приложенных напряжений позволял проводить исследования усталостного ресурса до значений, соответствующих $2 \cdot 10^5$ циклов.

Исследование долговечности выполнялось для уровня напряжений (220 МПа для Al-Cu и 140 МПа для Al-Mg), соответствующих критическому количеству циклов $\sim 2 \cdot 10^5$, оцениваемых для материалов в исходном (недеформированном) состояниях для условий многоциклового усталости.

Результаты испытаний представлены на рисунке 4 и отражают зависимость критического числа циклов (с учетом дисперсии) в зависимости от величины степени предварительной деформации k , определяемой отношением заданной величины деформации к деформации разрушения.

Исследовалось от 5 до 10 образцов для каждого типа предварительного нагружения. Эти зависимости (рисунок 4) отражают высокую чувствительность сплава Al-Cu и низкую чувствительность сплава Al-Mg к предварительному нагружению.

Количественные значения масштабных инвариантов рельефа поверхностей разрушения были использованы для определения структурного состояния

материалов, подвергнутых различной истории предварительного нагружения, и при последующем усталостном нагружении.

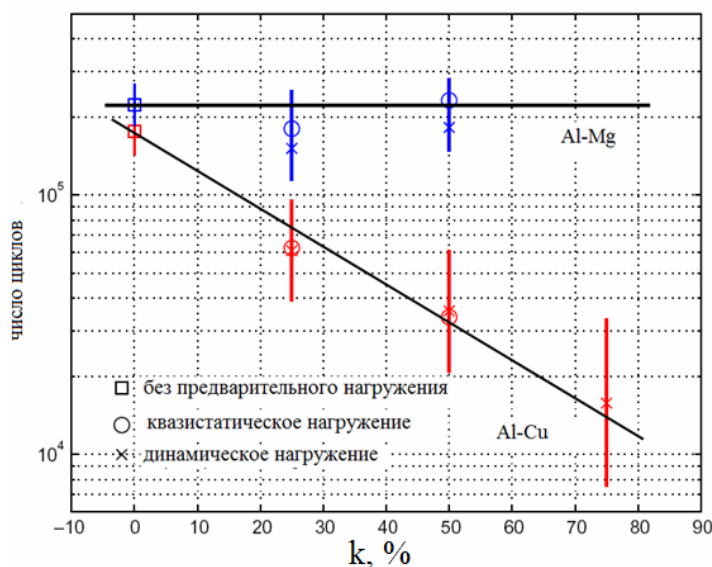


Рисунок 4 – Долговечность предварительно деформированных образцов алюминиевых сплавов

Области сканирования распределялись по зоне 2 (рисунок 5) и анализировались одномерные образы-срезы рельефа поверхности в радиальном направлении по отношению к границе раздела между зонами 1 и 2, полученные с помощью интерферометра-профилометра New-View.

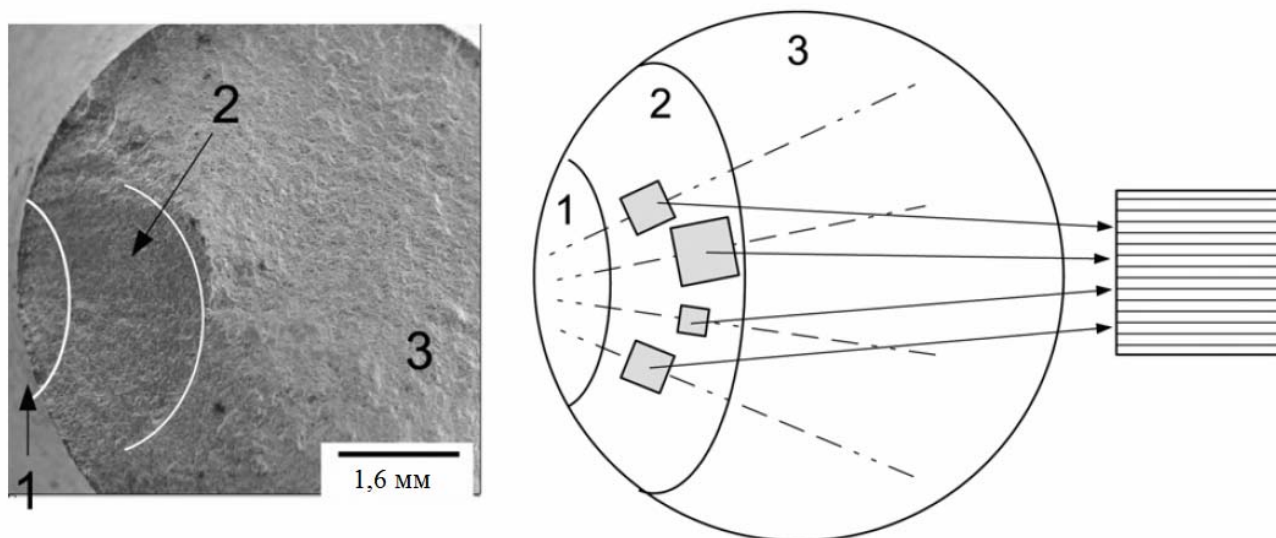


Рисунок 5 – Схематическое представление процедуры сканирования зоны усталостного разрушения (1-зона зарождения трещины, 2- зона роста трещины, 3- зона долома)

До 13 одномерных «срезов» (рисунок 5) анализировались в пределах каждого «окна», обеспечивая представительность данных о структуре рельефа, индуцированного дефектами, с вертикальным разрешением $\sim 0,1$ нм и горизонтальным $\sim 0,1$ мкм.

Для определения масштабно-инвариантного показателя H и границ масштабной инвариантности L_{\min} и L_{\max} (рисунок 6) измеренных профилей использовался метод определения показателя Хёрста, описанный в главе 2.

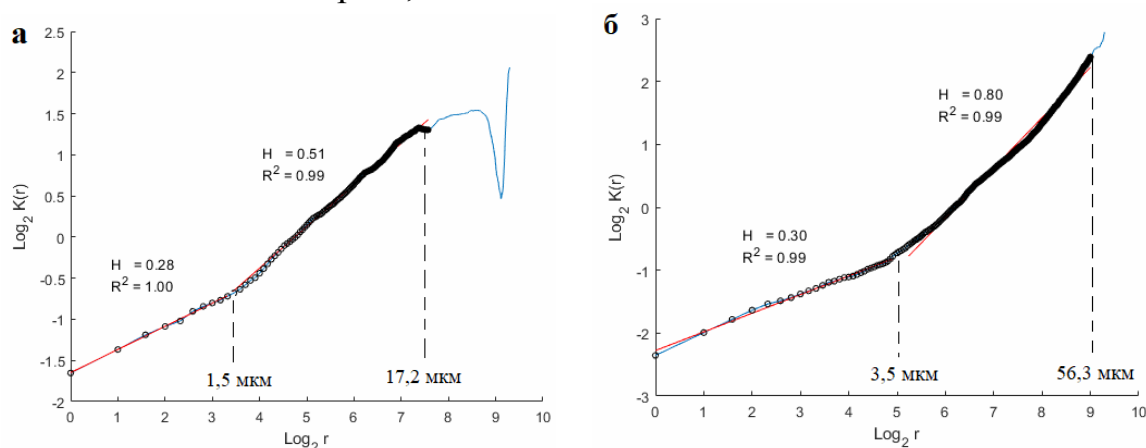


Рисунок 6 – Характерный вид зависимости $\log_2 K(r)$ от $\log_2(r)$ при динамическом растяжении образца на 1,5 мм: а) Al-Mg №4, б) Al-Cu №11

Экспериментальные результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Зависимость показателя Хёрста для различных условий предварительного деформирования.

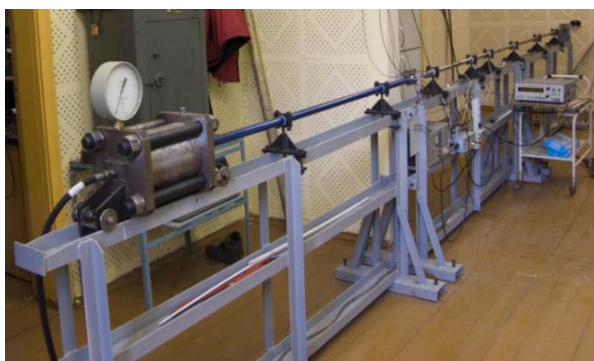
Сплав	Номер образца	Тип нагружения	Удл. (мм)	H	L_{\min} , мкм	L_{\max} , мкм
5454-O (Al-Mg)	1	Недеформированный	0	$0,66 \pm 0,04$	$0,7 \pm 0,3$	$11,9 \pm 0,3$
	2	Квазистатическое растяжение	1,5	$0,70 \pm 0,03$	$1,7 \pm 0,2$	$28,2 \pm 1,4$
	3	Квазистатическое растяжение	2,5	$0,57 \pm 0,05$	$1,6 \pm 0,2$	$20,4 \pm 0,4$
	4	Динамическое растяжение	1,5	$0,51 \pm 0,04$	$1,6 \pm 0,1$	$17,7 \pm 0,5$
	5	Динамическое растяжение	2,5	$0,64 \pm 0,05$	$0,6 \pm 0,3$	$12,7 \pm 1,5$
2017A-T3 (Al-Cu)	6	Недеформированный	0	$0,56 \pm 0,09$	$0,9 \pm 0,2$	$28,2 \pm 0,3$
	7	Квазистатическое растяжение	0,5	$0,53 \pm 0,05$	$0,9 \pm 0,3$	$14,1 \pm 0,2$
	8	Квазистатическое растяжение	1	$0,44 \pm 0,04$	$1,8 \pm 0,2$	$28,2 \pm 0,4$
	9	Динамическое растяжение	0,5	$0,62 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,3$	$14,1 \pm 0,3$
	10	Динамическое растяжение	1	$0,46 \pm 0,10$	$1,8 \pm 0,2$	$28,2 \pm 0,3$
	11	Динамическое растяжение	1,5	$0,71 \pm 0,09$	$3,5 \pm 0,2$	$56,3 \pm 0,5$

Обнаружена высокая чувствительность сплава Al-Cu к предварительному нагружению, что проявляется в увеличении верхних границ пространственных масштабов до ~56 мкм, на которых показатель Херста остаётся постоянным по сравнению со сплавом Al-Mg ~28 мкм. Роль этих масштабов может быть отражена в соответствующей форме закона роста усталостной трещины. Низкая чувствительность сплава Al-Mg к предварительному нагружению обусловлена высокой степенью адаптации материала к различным режимам предварительного нагружения – иницированием механизмов структурной релаксации различного масштабного уровня.

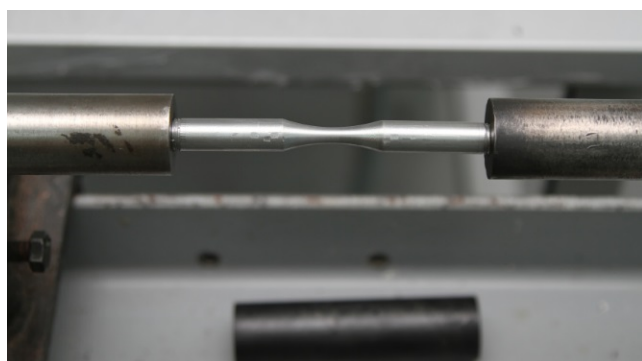
Четвертая глава посвящена исследованию кинетики роста усталостных трещин в сплавах алюминия АМг6 и Д16Т в режиме гигацикловой усталости при предварительном динамическом деформировании. Актуальность постановки

определяется важными приложениями – оценкой ресурса материалов и элементов конструкций авиационных газотурбинных двигателей в условиях полетного цикла при случайных динамических воздействиях. Проблема оценки ресурса ответственных машиностроительных конструкций, в частности, авиационного моторостроения поставили ряд качественно новых задач фундаментального характера по оценке надежности материалов для значений, превышающих $10^8 - 10^{10}$ циклов нагружения, в области, так называемой, гигацикловой усталости. Это связано с тем, что усталостный ресурс многих ответственных конструкций, работающих в режиме циклических нагрузок, превышает многоцикловый диапазон. В свою очередь, поведение материалов в области гигацикловой усталости обнаруживает ряд качественных отличий: условий зарождения трещин (в объеме образца), особенностей распространения, связанных со сменой механизмов зарождения и развития усталостных трещин.

Параграф 4.1 посвящен методике проведения экспериментов по комбинированному динамическому и последующему усталостному (гигацикловому) нагружению, приведен химический состав, основные механические свойства алюминиевых сплавов АМг6 и Д16Т, геометрия образцов. Предварительное нагружение образцов осуществлялось динамическим растяжением на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского (РСГ) (рисунок 7а) при скоростях деформации до $\sim 10^3 \text{ с}^{-1}$, последующем гигацикловом нагружении на ультразвуковой испытательной машине Shimadzu USF-2000 и количественным анализом фрактографии изломов на основе данных профилометрии и сканирующей электронной микроскопии.



а



б

Рисунок 7 – Испытательный комплекс в лаборатории Физических основ прочности ИМСС УрО РАН: а) разрезной стержень Гопкинсона-Кольского, б) образец, установленный в РСГ для предварительного динамического нагружения (обойма для наглядности снята)

В параграфе 4.2 образцы, подвергнутые предварительному динамическому нагружению (рисунок 7б), приводились к необходимой геометрии в соответствии с методикой испытаний гигациклового нагружения. Усталостное нагружение с частотой 20кГц осуществлялось на испытательной машине резонансного типа Shimadzu USF-2000 при уровнях напряжений 105-162 МПа с коэффициентом асимметрии $R=-1$.

Циклическое нагружение при указанных режимах показало снижение до $\sim 25\%$ предельного напряжения разрушения предварительно нагруженного сплава АМг6 с уровня напряжения 152 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня

напряжений 112 МПа (рисунок 8а), соответствующего критическому количеству циклов $\sim 10^9$.

Обнаружено также снижение до $\sim 30\%$ предельного напряжения разрушения предварительно нагруженного сплава Д16Т с уровня напряжения 150 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня напряжений 105 МПа (рисунок 8б), соответствующего критическому количеству циклов $\sim 10^9$.

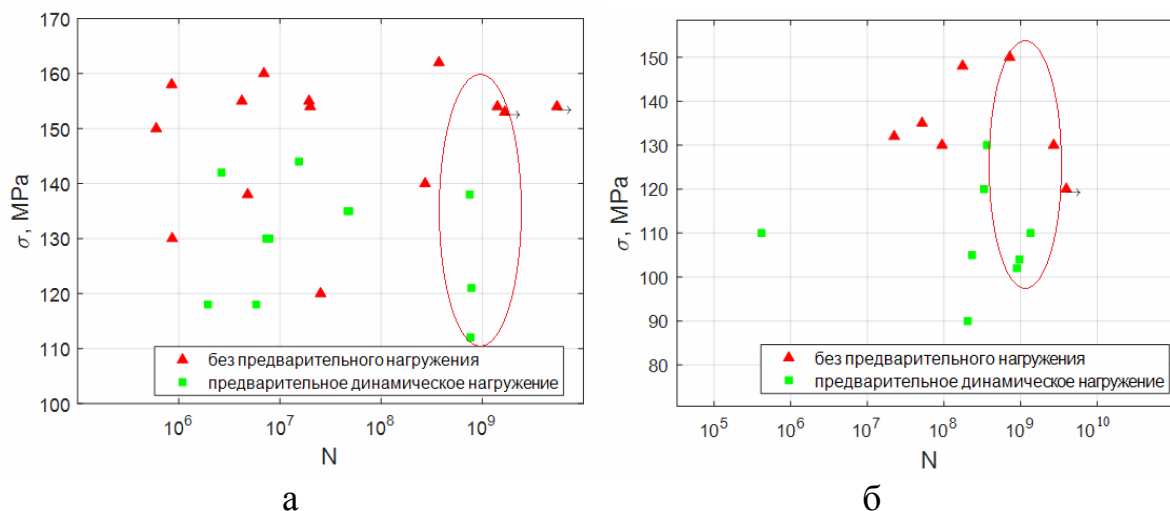


Рисунок 8 – σ - N кривая в случае динамического предварительного нагружения и без предварительного нагружения: а) АМгб; б) Д16Т

В параграфе 4.3. исследовался поверхностный рельеф разрушенных образцов с помощью интерферометра-профилометра высокого разрешения New-View 5010 и затем анализировался методами фрактального анализа для установления связи коррелированного поведения шероховатости, обусловленной многомасштабным развитием поврежденности и соответствующей зонам зарождения и распространения трещин.

При усталостных испытаниях сплава АМгб наблюдались два типа разрушения образцов. Первый, когда образцы разрушались непосредственно во время эксперимента. Второй, когда образцы, обладающие явными признаками разрушения (сильное изменение резонансной частоты испытаний, выход усталостной трещины на поверхность), уже были не способны продолжать выдерживать усталостную нагрузку на резонансной частоте. Поверхность разрушения образцов первого и второго типа «вскрывалась» охлаждением образцов жидким азотом при последующем «доломе». Предполагалось, что поверхность разрушения в режиме гигацикловой усталости уже сформировалась в процессе эксперимента и занимает большую часть поверхности разрушения, что сопровождается изменением резонансной частоты испытаний.

При разрушении цилиндрических образцов за число циклов, соответствующих многоциклового усталости (10^6 - 10^7), трещина образуется с поверхности образца. При разрушении предварительно нагруженных образцов из сплава АМгб на базе 10^8 циклов и более наблюдалось формирование трещины внутри образца, и на поверхности разрушения видна характерная для такого режима усталости область излома – «рыбий глаз» («fish-eye»), в центре которой находится очаг разрушения,

окруженный областью с фрагментированной (субмикроструктурной) структурой (светлая область), рисунок 9.

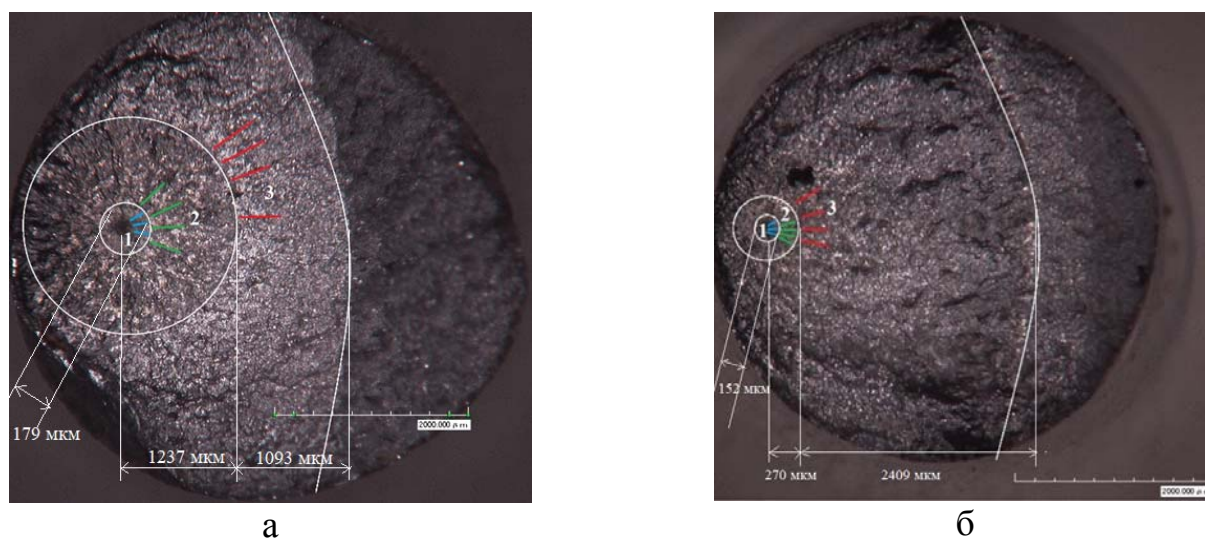


Рисунок 9 – Характерный рельеф поверхности зоны усталостного разрушения сплава АМг6: а) образец №2 ($\sigma = 120$ МПа, $N = 7,82 \cdot 10^8$), б) образец №10 ($\sigma = 138$ МПа, $N = 7,51 \cdot 10^8$)

Количественный анализ морфологии поверхностей разрушения проводился на интерферометре-профилометре New-View 5010. Области сканирования распределялись по зоне роста усталостной трещины (рисунок 10) и анализировались одномерные образы-срезы рельефа поверхности в радиальном направлении по отношению к границе раздела между зонами 1 и 3.

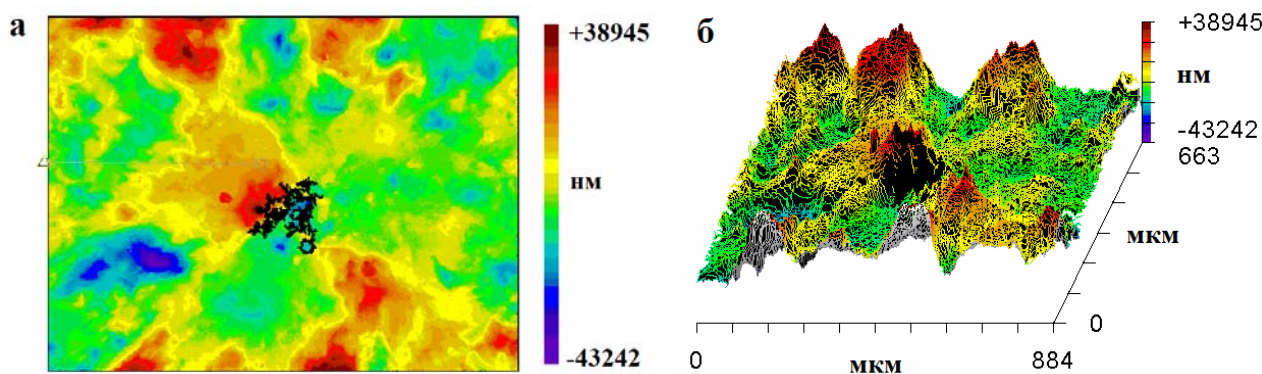


Рисунок 10 – Морфология поверхности разрушения (увеличение $\times 80$), образец АМг6 №2 ($\sigma = 120$ МПа, $N = 7,82 \cdot 10^8$): а) карта высот, б) 3D образ рельефа

От 12 до 18 одномерных «срезов» анализировались в пределах каждого «окна», обеспечивая представительность данных о структуре рельефа, индуцированного дефектами, с вертикальным разрешением $\sim 0,1$ нм и горизонтальным $\sim 0,1$ мкм.

Для определения минимального (критического) масштаба l_{sc} , соответствующему установлению длинно-корреляционных взаимодействий в ансамблях дефектов, использовался метод определения показателя Херста. По одномерным профилям рельефа поверхности разрушения вычислялась функция $K(r)$ по формуле (1).

Сравнение масштабов коррелированного поведения шероховатости рельефа поверхностей разрушения образцов, нагруженных в условиях много- и

гигацикловой усталости, позволило установить существенное уменьшение верхней границы пространственных масштабов, на которой показатель Хёрста остается постоянным для динамически преднагруженных образцов в зоне «fish-eye» (рисунок 11).

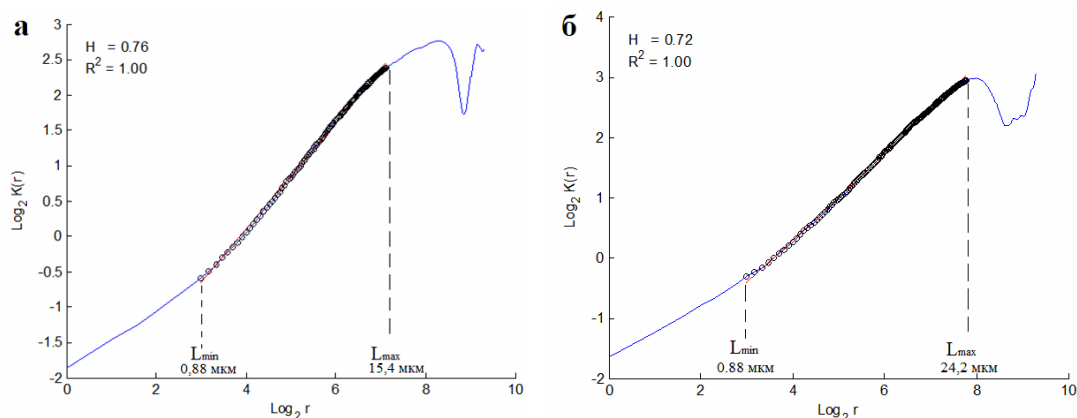


Рисунок 11 – Характерный вид зависимости $\log_2 K(r)$ от $\log_2(r)$ образец АМг6 №2 ($\sigma = 120$ МПа, $N = 7,82 \cdot 10^8$): а) внутри «fish-eye», б) вне «fish-eye»

Для описания кинетики роста малых трещины (для размеров, меньших размера «трещин Пэриса») предложено феноменологическое соотношение, которое, наряду с макроскопической характеристикой напряженного состояния в вершине трещины, отражает роль структурных масштабов l_{sc} на кинетику роста трещин dl/dN (l – длина трещины, N – число циклов):

$$\frac{da}{dN} = l_{sc} \left(\frac{\Delta K_{eff}}{E \sqrt{l_{sc}}} \right)^\alpha \quad (2)$$

где $\Delta K_{eff} = \Delta K \left(\frac{L_{pz}}{l_{sc}} \right)^{\beta/\alpha}$ – эффективный коэффициент интенсивности напряжений; 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. показателями скейлинга α и β , отражающие связь структурных масштабов с кинетикой трещин. Значения L_{pz} и l_{sc} для образцов с «fish-eye» (рисунок 9) определены экспериментально на основе исследования корреляционных свойств рельефа поверхности разрушения и вычисления показателя Херста (таблица 2).

Таблица 2 Значения показателя Херста H и критических масштабов L_{pz} и l_{sc} для образцов с «fish-eye»

Номер образца	Деформация в области наименьшего сечения образца ε_f , %	σ , МПа	ΔN , циклы	Номер зоны	l_{sc} мкм	L_{pz} мкм	H
2	17	120	$7,82 \cdot 10^8$	1	0,6±0,2	17,2±2,2	0,63±0,02
				2	0,9±0,2	26,3±1,9	0,62±0,02
				3	0,5±0,2	26,2±6,1	0,49±0,02
10	18	138	$7,51 \cdot 10^8$	1	0,8±0,2	11,6±2,2	0,49±0,02
				2	2,2±0,9	28,4±3,5	0,51±0,02
				3	0,4±0,2	16,6±1,7	0,60±0,02

В параграфе 4.4 проведено исследование химического состава сплава АМг6 (проведенное на кафедре «Физики твердого тела» ПГНИУ) с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400n по спектру излучения отраженных электронов с помощью модуля INCA (рисунок 12).

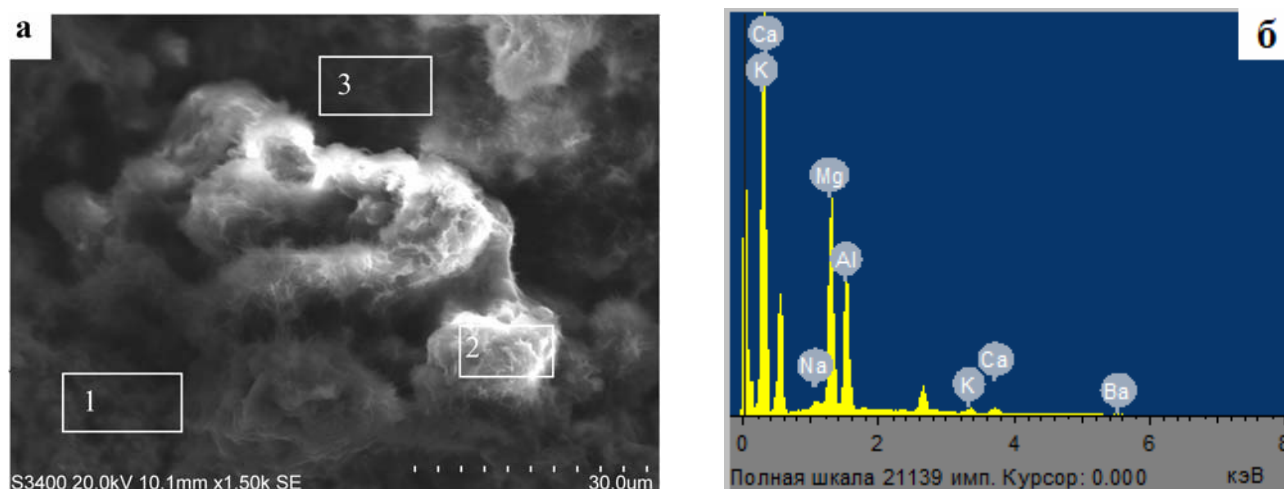


Рисунок 12 – а) Увеличенный фрагмент «fish-eye», б) суммарный спектр отраженных электронов в области 2, полученные на электронном сканирующем микроскопе для образца АМг6 №2 ($\sigma = 120$ МПа, $N = 7,82 \cdot 10^8$)

Исследовался спектр излучения в трех областях (рисунок 12а). Было обнаружено, что в центре «fish-eye» (в области 2) содержание Al и Mg 49% и 42% соответственно. В области 1, рядом с «fish-eye», концентрации Al и Mg 91% и 6% соответствуют традиционно наблюдаемым для сплава АМг6. В области «fish-eye» (зона 3) выделяется зона с концентрациями Al и Mg 72% и 24%. В алюминиево-магниевом сплаве диффузия магния в присутствие интерметаллидного включения может быть фактором, влияющим на образование зоны «fish-eye».

В **заключении** приведены основные результаты работы.

1. Установлена по данным профилометрии высокого разрешения масштабная инвариантность полос скольжения различного масштаба, образующихся на поверхности монокристалла алюминия в условиях квазистатического растяжения, соответствующая значениям показателя Хёрста ($H \sim 0,7$) в диапазоне пространственных масштабов (5–1100 мкм).
2. Развита методология на основе вычисления пространственных инвариантов по данным профилометрии рельефа поверхностей разрушения, устанавливающая связь критических условий распространения усталостной трещины с размером «зоны процесса», определяемым коррелированным поведением дефектов (постоянством показателя Херста).
3. Обоснован подход по оценке структурной восприимчивости материалов авиационного моторостроения (на примере Al-Cu, Al-Mg) к динамическим нагрузкам при последующих циклических нагрузках на основе количественных оценок структурных масштабов, «зоны процесса», определяемых постоянством масштабного инварианта (показателя Херста), вычисляемого по данным профилометрии поверхности разрушения.
4. Установлены на основе количественного анализа рельефа поверхности разрушения (по данным профилометрии высокого разрешения) масштабные

инварианты и соответствующие им масштабы, определяющие формирование зон инициирования разрушения «рыбий глаз» («fish-eye»), зарождения и распространения усталостной трещины в гигацикловом режиме в предварительно динамически нагруженных образцах из сплавов АМгб и Д16Т.

5. Установлена связь параметров кинетического уравнения роста трещины с масштабными инвариантами, определяющими формирование зон инициирования разрушения «рыбий глаз» («fish-eye»), зарождения и распространения усталостной трещины в гигацикловом режиме в предварительно динамически нагруженных образцах из сплавов АМгб и Д16Т.

6. Установлено влияние интерметаллидных включений и диффузии магния в сплаве АМгб на формирование зон локализации разрушения и образование зоны «рыбий глаз» («fish-eye»).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Froustey C., Naimark O., Bannikov M., Oborin V. Microstructure scaling properties and fatigue resistance of pre-strained aluminium alloys (part 1: Al-Cu alloy) // *European Journal of Mechanics A/Solids*. – 2010. – V. 29. – P.1008-1014. (Wos)

2. Оборин В.А., Банников М.В., Наймарк О.Б., Palin-Luc T. Масштабная инвариантность роста усталостной трещины при гигацикловом режиме нагружения // *Письма в журнал технической физики* – 2010. – том 36. – вып. 22. – С. 76-82. (ВАК)

3. Оборин В.А., Банников М.В., Наймарк О.Б., Froustey C. Длинно-корреляционные многомасштабные взаимодействия в ансамблях дефектов и оценка надёжности алюминиевых сплавов при последовательных динамических и усталостных нагружениях // *Письма в журнал технической физики*. – 2011. – том 37. – вып. 5. – С. 105-110. (ВАК)

4. Оборин В. А., Наймарк О. Б. Масштабно-инвариантные закономерности эволюции структуры пластически деформируемого монокристалла алюминия // *Вестник Пермского университета. Серия: Физика*. – 2012. – №. 4 (22).

5. Оборин В. А. Банников, М. В., Баяндин, Ю. В., Соковиков, М. А., Билалов, Д. А., Наймарк, О. Б. Фрактальный анализ поверхности разрушения сплава АМгб при усталостном и динамическом нагружении // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2015. – №. 2. (Scopus)

6. Oborin V., Bannikov M., Naimark O., Sokovikov M., Bilalov D. Multiscale study of fracture in aluminum-magnesium alloy under fatigue and dynamic loading // *Frattura ed Integrità Strutturale* – 2015. – Vol.34 – P.479-483. (Scopus)

7. Oborin V., Sokovikov M., Bilalov D., Naimark O. Multiscale study of morphology of the fracture surface aluminum- magnesium alloy with consecutive dynamic and gigacycle loading // *Procedia Structural Integrity*. – 2016. – V.2. – P.1063-1070. (Wos)

8. Oborin V., Bachurikhin V., Sokovikov M., Bilalov D., Naimark O. Structural and mechanical investigation of the estimating reliability of aluminum alloys with consecutive dynamic and gigacycle loading // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – V.1785. – P.030019. (Wos)

9. Bannikov, M.V., Oborin V.A., Naimark O.B., Self-similar aspects of fracture of metals in gigacycle fatigue loading // Letters on materials. – 2015. – 5(4). – P. 448-453. (Scopus)
10. Оборин В.А., Банников М.В., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Долговечность сплава АМг6 при последовательном ударно-волновом и гигацикловом нагружении // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2019. - №1. – С.121-128. (Scopus)
11. Bannikov M., Bilalov D., Oborin V., Naimark O. Damage evolution in the AlMg6 alloy during high and very high cycle fatigue // Frattura ed Integrita Strutturale. – 2019. – V. 13, No. 49. – P. 383-395. (Scopus)
12. Oborin V., Uvarov S., Sokovikov M., Simonov M., Shaimanov G., Naimark O. Evaluation of corrosion resistance of aluminum alloy under consecutive dynamic and VHCF regime //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2020. – T. 2310. – №. 1. – С. 020228. (Wos)
13. Oborin V.A., Bayandin Y.V., Bilalov D.A., Sokovikov M.A., Chudinov V.V., Naimark O.B. Self-Similar Patterns of Damage Development and Reliability Assessment of AMg6 and D16T Aluminum Alloys under Consecutive Dynamic and Gigacycle Loading // Physical Mesomechanics. – 2019. – T. 22. – №. 2. – P. 141-151. (Wos)
14. Билалов Д.А., Оборин В.А., Наймарк О.Б., Нарыкова М.В., Кадомцев А.Г., Бетехтин В.И. Влияние предварительного динамического нагружения на усталостную долговечность сплава АМг6 //Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46. – №. 8. – С. 44. (ВАК)
15. Билалов Д.А., Оборин В. А., Наймарк О. Б. Влияние интерметаллидных включений на образование подповерхностных трещин в сплаве АМг6 при гигацикловой усталости //Письма о материалах. – 2020. – Т. 10. – №. 2. – С. 206-210. (ВАК)
16. Naimark O., Oborin V., Bannikov M., Ledon D. Critical Dynamics of Defects and Mechanisms of Damage-Failure Transitions in Fatigue // Materials. – 2021. – 14(10). – 2554. (Wos)