

МИНОБНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИМАШ УрО РАН)
URAL BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
INSTITUTE OF ENGINEERING SCIENCE
Комсомольская ул., д. 34, г. Екатеринбург, 620049
Тел.: (343) 374-47-25, факс: (343) 374-53-30, E-mail: ges@imach.uran.ru
ОГРН 1036603482992, ИНН/КПП 6660005260/667001001

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН) доктор технических наук


В.П. Швейкин

«16» сентября 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Оборина Владимира Александровича
«Масштабно-инвариантные структурные закономерности развития поврежденности и разрушение при динамическом и усталостном нагружении»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 - механика деформируемого твердого тела.

Актуальность темы выполненной диссертации.

Диссертационная работа Оборина В.А. посвящена обоснованию 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. В диссертации с использованием современного оборудования (оптической и электронной микроскопии) и оригинальных экспериментов проведено исследование масштабно-инвариантных закономерностей развития пластической деформации и разрушения при комбинированном динамическом, много- и гигацикловом усталостном нагружении алюминиевых сплавов. Определены параметры кинетического уравнения роста усталостных трещин в режиме гигацикловой усталости для предварительно нагруженных образцов из сплава алюминия, учитывающего характеристики масштабной инвариантности рельефа поверхностей разрушения. В работе получены новые данные о связи усталостного ресурса алюминиевых сплавов, подвергнутых предварительному динамическому нагружению, с характеристиками масштабной инвариантности рельефа поверхностей разрушения. В работе показана эффективность использования

интерферометра-профилометра New-View 5010 для получения поверхностей разрушения в цифровом виде и метода фрактального анализа на основе вычисления масштабно-инвариантного показателя (показателя Хёрста) для изучения алюминиевых сплавов после механических испытаний.

Основной 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.

Структура и содержание диссертации.

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

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. Приведён обзор работ, 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, 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.

Приведён обзор работ 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. 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.

Показано, что след скольжения является наиболее типичным элементом деформационного рельефа в ГЦК однофазных металлических моно- и поликристаллах при небольших степенях деформации.

Приведены эксперименты по квазистатическому растяжению монокристалла алюминия, изучение масштабно-инвариантных закономерностей (в терминах показателя Хёрста) локализации пластической деформации на основе данных профилометрии высокого разрешения (интерферометр-профилометр New View 5010).

Фрактальный анализ деформационного рельефа поверхности монокристалла алюминия после разной степени деформации позволил установить, что при небольших степенях деформации монокристалла на поверхности 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 масштабно-инвариантных закономерностей при усталостном деформировании предварительно нагруженных образцов из сплава алюминия.

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 в лаборатории

LAMEFIP ENSAM Bordeaux, Франция. Предварительное нагружение образцов осуществлялось двумя способами – квазистатическим и динамическим растяжениями, 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 New View 5010.

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.

Установлено, что 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 AMg6 и D16T в режиме гигацикловой усталости при предварительном динамическом деформировании. Актуальность постановки определялась приложениями – оценкой ресурса материалов и элементов конструкций авиационных газотурбинных двигателей в условиях полетного цикла при случайных динамических воздействиях.

Предварительное нагружение образцов осуществлялось динамическим растяжением на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского при скоростях деформации до $\sim 10^3$ 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. Ультразвуковая испытательная машина позволяет испытывать образцы на базе 10^8 - 10^{10} циклов с амплитудой от 1-го и до нескольких десятков микрометров с частотой 20 кГц, что позволяет существенно сократить время испытания до в отличие от классических усталостных установок. Проведен анализ многомасштабных закономерностей формирования поверхностного рельефа на основе пространственных инвариантов (показателя Херста), используемого для количественного анализа морфологии поверхностей разрушения. Исследовался химический состав сплава AMg6 в зоне локализации поврежденности (зоны «рыбьего глаза» - «fish-eye») с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400n по спектру излучения отраженных электронов с помощью модуля INCA.

Для описания кинетики роста трещины для размеров, меньших размера «трещин Пэриса», предложено феноменологическое соотношение, которое, наряду с макроскопической характеристикой напряженного состояния в вершине трещины (ΔK) включало структурные параметры.

В **заключении** диссертации приводятся основные результаты и выводы.

Достоверность результатов работы Оборова В.А. подтверждается комплексным подходом к решению поставленных задач с использованием современных методов исследования, а также согласием полученных результатов с литературными данными других авторов.

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.

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.

По работе сделаны следующие **замечания**:

1. Литературный обзор занимает слишком большой объем в тексте диссертации. Помимо раздела 1 (30 стр.) в главе 3 на 8 стр. представлены общие сведения о современных представлениях об усталости металлов.

2. Для того, чтобы судить о рельефе зоны “fish-eye” (с.105), правильней было бы изучить его на обеих половинках разрушенных образцов.

3. Представляется необходимым более детальное обоснование методологии анализа 3D морфологии поверхностей по данным одномерных «срезов» шероховатости поверхностей разрушения.

4. В главе 3 приведены результаты исследований влияния предварительного квазистатического и динамического нагружений на показатель Хёрста, рассчитанный по результатам анализа профиля поверхностей разрушения образцов после усталостных испытаний. Однако, при обсуждении результатов исследований и в выводах к главе упоминается влияние только предварительного динамического нагружения.

Заключение

Высказанные замечания не снижают ценности результатов, полученных в диссертационной работе.

Диссертационная работа **Оборина Владимира Александровича** выполнена на высоком научном уровне, хорошо оформлена и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, имеющую фундаментальное и прикладное значение. Представленный в работе материал прошёл хорошую апробацию на всероссийских и международных конференциях. 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. Количество и качество публикаций соответствует требованиям ВАК. Текст **автореферата** и публикаций достаточно полно отражают содержание диссертационной работы.

Считаю, что диссертационная работа **Оборина Владимира Александровича** по объёму выполненных исследований, новизне и значимости полученных научных результатов удовлетворяет п.9. «Положения о порядке присуждения ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, а её автор **Оборин Владимир Александрович** заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8.- механика деформируемого твёрдого тела.

Отзыв подготовлен доктором технических наук (05.16.05– Обработка металлов давлением), профессором, заведующим лабораторией механики деформаций, главным научным сотрудником Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН) Коноваловым Анатолием Владимировичем (620049, Россия, г. Екатеринбург, ул.Комсомольская, 34, , тел. +7(343) 375-35-61, avk@imach.uran.ru).

Диссертационная работа и отзыв рассмотрены и одобрены на заседании научного семинара

отдела механики машин и технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН).

Присутствовало на заседании 21 человек.

Результаты голосования: «за» - 21 человек, «против» - 0, «воздержалось» - 0 (протокол № 5 от 16 сентября 2021 г.).

Руководитель семинара, заведующий лабораторией механики деформаций, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), доктор технических наук, профессор

А.В.

Коновалов Анатолий Владимирович

Подпись д.т.н. профессора Коновалова А.В. заверяю
_____ ученый секретарь ИМАШ УрО РАН, к.т.н. Поволоцкая А.М.



Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН)

Адрес: 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская 34,

Телефон: +7(343) 374-47-25

Email: ges@imach.uran.ru