

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 004.036.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ПЕРМСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
(ФИЛИАЛ – ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД)
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 07.10.2021 № 78

О присуждении Оборину Владимиру Александровичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Масштабно-инвариантные структурные закономерности развития поврежденности и разрушение при динамическом и усталостном нагружении» по специальности 1.1.8 (01.02.04) «Механика деформируемого твёрдого тела» принята к защите 05.08.2021, протокол № 72, диссертационным советом Д 004.036.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр (филиал – Институт механики сплошных сред) Уральского отделения Российской академии наук, 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1, утвержденным приказом Минобрнауки России № 87/нк от 26 января 2018 г.

Соискатель Оборин Владимир Александрович 1982 г. рождения, в 2000 г. окончил ГОУ ВПО "Пермский государственный университет" по специальности «Физика конденсированного состояния вещества». В 2008 г. окончил аспирантуру очной формы обучения в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН) по научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. В настоящее время работает ведущим инженером лаборатории физических основ прочности ИМСС УрО РАН. Диссертация выполнена в ИМСС УрО РАН – филиале ФГБУН "Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук".

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией физических основ прочности ИМСС УрО РАН Наймарк Олег Борисович.

Официальные оппоненты:

1. 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);
2. 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);

дали положительные отзывы на диссертацию

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), г. Екатеринбург, в своем положительном заключении, составленном д.т.н., профессором, заведующим лабораторией механики деформаций, гл.н.с. ИМАШ УрО

РАН А.В.Коноваловым, и утвержденном директором по научно-исследовательской деятельности ФГБУН ИМАШ УрО РАН, д.т.н., профессором В.П.Швейкиным, указала, что диссертация выполнена на высоком научном уровне, хорошо оформлена и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, имеющую фундаментальное и прикладное значение. Совокупность научных исследований можно классифицировать как разработку новых и модификацию известных методов экспериментального исследования процессов усталостного деформирования и разрушения материалов различной структуры, в том числе при комбинированном динамическом нагружении. Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы. Работа базируется на достаточном объеме полученных экспериментальных и теоретических результатов и вносит существенный вклад в соответствующий раздел механики деформируемого твердого тела. Представленная диссертационная работа «Масштабно-инвариантные структурные закономерности развития поврежденности и разрушение при динамическом и усталостном нагружении» удовлетворяет требованиям Положения «О присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Оборин Владимир Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 (01.02.04) – Механика деформируемого твёрдого тела.

Соискателем опубликовано 15 статей в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень, рекомендованный ВАК:

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.

В работе с помощью интерферометра профилометра New-View исследованы поверхности разрушения алюминиевых сплавов после комбинированных испытаний.

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. – Т. 36, № 22. – С. 76-82.

В работе получено кинетическое уравнение роста усталостной трещины, учитывающее характеристики масштабной инвариантности рельефа поверхностей разрушения.

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. – Т. 37, № 5. – С. 105-110.

В работе с помощью метода фрактального анализа на основе показателя Херста исследованы поверхности разрушения алюминиевых сплавов после комбинированного квазистатического, динамического и последующего усталостного нагружения.

4. **Оборин В.А.**, Банников М.В., Баяндин Ю.В., Соковиков М.А., Билалов Д.А., Наймарк О.Б. Фрактальный анализ поверхности разрушения сплава АМг6 при усталостном и динамическом нагружении // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – №. 2. С. 116-126.

В работе с помощью интерферометра профилометра New-View исследованы масштабно-инвариантные закономерности деформационных структур, образующихся на поверхности образцов из сплава АМГб после усталостного и динамического нагружения.

5. **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. – V. 34 – P. 479-483.

В работе с помощью интерферометра профилометра New-View исследованы масштабно-инвариантные закономерности деформационных структур, образующихся на поверхности образцов из сплава АМГб после комбинированного динамического и последующего гигациклового нагружения.

6. **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.

В работе проведен химический состав зоны усталостного разрушения с помощью электронного сканирующего микроскопа и приставки Inca.

7. **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.

Проведен химический состав зоны усталостного разрушения с помощью электронного сканирующего микроскопа и приставки Inca образцов из сплава АМГб после комбинированного динамического и последующего гигациклового нагружения.

8. Bannikov M.V., **Oborin V.A.**, Naimark O.B. Self-similar aspects of fracture of metals in gigacycle fatigue loading // *Letters on materials*. – 2015. V. 5, № 4. – P. 448-453.

Закономерности разрушения перспективных материалов авиационного моторостроения (сплав алюминия АМгб, технический титан марки Grade-4 и титановый сплав ВТ-6) исследуются в условиях много- и гигацикловой усталости, в том числе, с учетом влияния предварительного динамического нагружения на усталостную долговечность.

9. **Оборин В.А.**, Банников М.В., Баяндин Ю.В., Наймарк О.Б. Долговечность сплава АМгб при последовательном ударно-волновом и гигацикловом нагружении // *Вестник ПНИПУ. Механика*. – 2019. – № 1. – С. 121-128.

Экспериментально реализована программа испытаний по сверхмногоциклового нагружению (количество циклов 10^7 - 10^9) образцов, изготовленных из массивных плоских мишеней (алюминиевый сплав АМгб) и подвергнутых плоско-волновому нагружению (метод взрывного генератора).

10. Bannikov M., Bilalov D., **Oborin V.**, Naimark O. Damage evolution in the AlMg6 alloy during high and very high cycle fatigue // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2019. – V. 13, № 49. – P. 383-395.

На основе данных по измерению амплитуды второй гармоники в режиме реального времени в работе в процессе усталостных испытаний определено число циклов на зарождение и рост усталостной трещины для образцов из сплава АМГб после комбинированного динамического и последующего гигациклового нагружения.

11. **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. – 2020. – Т. 2310, №. 1. – С. 020228.

Приведены данные усталостных испытаний для сплава АМГб после комбинированного динамического и последующего гигациклового нагружения. Построена 3D модель поверхности разрушения сплава АМГб в зоне «рыбий глаз» («fish-eye»).

12. **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. – Т. 22, №. 2. – P. 141-151.

В работе проведено исследование кинетики роста усталостных трещин в сплавах алюминия АМгб и Д16Т в режиме гигацикловой усталости при предварительном динамическом деформировании.

13. 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 АМГб // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46, №. 8. – С. 44-46.

В работе приведены данные усталостных испытаний для сплава АМГб после комбинированного динамического и последующего гигациклового нагружения.

14. Билалов Д.А., **Оборин В.А.**, Наймарк О.Б. Влияние интерметаллидных включений на образование подповерхностных трещин в сплаве АМГб при гигацикловой усталости // Письма о материалах. – 2020. – Т. 10, №. 2. – С. 206-210.

В работе приведены данные усталостных испытаний для сплава АМГб после комбинированного динамического и последующего гигациклового нагружения. Исследовано влияние интерметаллидных включений в зоне «рыбий глаз» («fish-eye»).

15. Naimark O., **Oborin V.**, Bannikov M., Ledon D. Critical dynamics of defects and mechanisms of damage-failure transitions in fatigue // Materials. – 2021. V. 14, № 10. – P. 2554.

В работе показана связь параметров кинетического уравнения (показателем степени в обобщенном законе Пэриса) с масштабными инвариантами дефектных структур, формирующих рельеф поверхности разрушения в процессе гигациклового нагружения.

Публикации содержат в сумме 108 страниц и в полной мере отражают основные научные результаты работы. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах в тексте диссертации отсутствуют.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: от оппонентов и ведущей организации.

1. Положительный отзыв официального оппонента Панфилова П.Е. В отзыве представлен анализ содержания диссертации, отмечается актуальность темы диссертации; новизна, научная и практическая значимость полученных результатов; обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. Оппонент отмечает следующие замечания по диссертации и автореферату:

- вопрос о том, что автор не раз не упомянул, что основным механизмом пластической деформации в нем, как и в любом другом ГЦК-металле, является октаэдрическое скольжение;
- Пожелание о том, что наблюдение «плавающей» концентрации магния на изломе

твердого раствора магния в алюминии никак не связано с основной задачей диссертации и его не следовало включать в работу.

2. Положительный отзыв официального оппонента Шлянникова В.Н. В отзыве отмечено, что диссертация посвящена актуальной проблеме изучения взаимосвязи механизмов деформирования и разрушения на различных масштабных уровнях по отношению к параметру структуры материала с характеристиками выносливости и развития дефектов при комплексном многофакторном нагружении. Оппонент отмечает следующие замечания:

- замечание о том, что пункт 1 научной новизны не завершен в формулировке – указано что выполнено, но не сформулированы выводы из этих результатов;
- пожелание о том, что словосочетание терминов “Масштабно-инвариантные закономерности” используется как постулат;
- замечание об отсутствии в литературном обзоре ссылки на работы известного специалиста в области сверхмногоциклового усталости проф. Y.Hong и классическую работу G.I.Taylor (1938);
- замечание о том, что не введены четкие определения для динамического нагружения, усталостного нагружения и усталостного ресурса, а также понятие длины кроссовера;
- замечание о том, что не определена роль и значение анализа рельефа поверхности монокристалла алюминия при статическом деформировании в последующем изучении развития повреждений и разрушении при комбинированном циклическом нагружении;
- замечание об отсутствии диапазона масштабов структуры монокристалла алюминия на котором наблюдается инвариантность в классификации В.Е. Панина или В.И. Владимирова и др.;
- замечание о том, что раздел 3.1 более уместен в студенческом курсе введения в специальность, чем в диссертации;
- пожелание о том, что раздел 3.2 содержит повторы ранее представленного текста и должен был быть помещен в главе 1 в рамках литературного обзора;
- замечание об не обоснованном переходе от монокристалла алюминия в первой главе к сплавам систем Al-Cu и Al-Mg в третьей главе в качестве объектов исследований;
- вопрос о том, как осуществлялся переход от общей поверхности наблюдения и измерений образца к характерным одномерным срезам рельефа поверхности разрушения, по которым осуществлялись сравнения распределений между собой;
- замечание о том, что не мотивирован переход к алюминиевым сплавам АМг6 и Д16Т в четвертой главе в качестве объектов исследований, которые не используются в двигателестроении, как полагает автор;
- замечание, что одна и та же формула для функции корреляции гуляет по страницам диссертации под номерами 1.4, 2.1, 3.2 и 4.1;
- вопрос о статистической достоверности возможного приложения уравнения 4.4 в расчетах долговечности;
- замечание о том, что отсутствует какое-либо объяснение скачков скорости роста трещин на рисунках 4.23 и 4.24;
- пожелание по поводу обобщения по характеристикам масштабной инвариантности дефектных структур сплавов АМг6 и Д16Т при гигацикловой усталости, подобных

распределений в монокристалле алюминия и традиционном диапазоне усталости для систем Al-Cu и Al-Mg.

3. Положительный отзыв ведущей организации. В отзыве отмечается, что диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу в области совершенствования методов прогноза эксплуатационного ресурса материалов и конструкций с учётом механизмов развития разрушения на различных масштабных уровнях. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и существенную практическую значимость – ряд результатов может быть использован для оценки усталостного ресурса материалов при комбинированных условиях нагружения, в том числе применительно к элементам конструкций авиационного моторостроения.

Ведущая организация отмечает следующие замечания:

- замечание, что литературный обзор занимает слишком большой объём в тексте диссертации.
- пожелание о том, что для исследования рельефа зоны “Fish-eye” (с. 105), правильной было бы изучить его на обеих половинках разрушенных образцов.
- замечание о том, что необходимо более детальное обоснование методологии анализа 3D морфологии поверхностей по данным одномерных «срезов» шероховатости поверхностей разрушения.
- замечание о том, что при обсуждении результатов исследований и в выводах к главе 3 упоминается влияние только предварительного динамического нагружения.

На автореферат поступило 11 отзывов:

1. Положительный отзыв от Балохонова Р.Р., д.ф.-м.н., заведующего лабораторией механики структурно-неоднородных сред; Романовой В.А., д.ф.-м.н., вед.н.с., ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения СО РАН", г. Томск (2 замечания);
2. Положительный отзыв от Ботвиной Л.Р., д.т.н., профессора., главного научного сотрудника ФГБУН "Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН", г. Москва (3 замечания);
3. Положительный отзыв от Гладкого И.Л., к.т.н., начальника отдела прочности силовых схем и перспективных методов анализа, АО "ОДК-Авиадвигатель", г. Пермь (3 замечания);
4. Положительный отзыв от Зуева Л.Б., д.ф.-м.н., профессора, заведующего лабораторией физики прочности ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения СО РАН", г. Томск (без замечаний).
5. Положительный отзыв от Кащенко М.П., д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой общей физики ФГБОУ ВО "Уральский государственный лесотехнический университет", г. Екатеринбург (без замечаний);
6. Положительный отзыв от Майера А.Е., д.ф.-м.н., доцента, заведующего кафедрой общей и прикладной физики ФГБОУ ВО "Челябинский государственный университет", г. Челябинск (2 замечания);
7. Положительный отзыв от Макарова П.В., д.ф.-м.н., профессора, главного научного сотрудника ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения СО РАН", г. Томск (без замечаний);
8. Положительный отзыв от Мейснер Л.Л., д.ф.-м.н., профессора, главного научного

сотрудника ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения СО РАН", г. Томск (4 замечания);

9. Положительный отзыв от Панина С.В., д.т.н., профессора, заведующего лабораторией композиционных материалов; Еремина А.В., к.т.н., м.н.с. ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения СО РАН", г. Томск (4 замечания);
10. Положительный отзыв от Скрипняка В.А., д.ф.-м.н., профессора, заведующего кафедрой механики деформируемого твердого тела ФГАОУ ВО "Национальный исследовательский Томский государственный университет", г. Томск (без замечаний);
11. Положительный отзыв от Шаркеева Ю.П., д.ф.-м.н., профессора, заведующего лабораторией физики наноструктурных композитов; Ерошенко А.Н., к.т.н., с.н.с., ФГБУН "Институт физики прочности и материаловедения СО РАН", г. Томск (5 замечаний).

В отзывах на автореферат содержатся следующие замечания:

- замечание о том, что термин «Foreign Object Damage» - FOD - в общем случае не относится к «проблемам», а относится к определенным требованиям подтверждения надежности авиационной техники;
- замечание о том, что решение «проблемы» FOD в общем случае не «предполагает использований результатов фундаментального характера» как сказано в автореферате (до сих пор эти вопросы успешно решались с использованием прикладных исследований), это предложение автора диссертации;
- замечание о том, что в автореферате не отражено что происходит необратимое изменение поверхности детали - повреждение поверхностного слоя, макроразрывы материала;
- замечание об отсутствии рисунков 2в-е и 2д-е на стр. 9;
- замечание об отсутствии верхней границы скорости деформации;
- замечание об опечатке на стр.6 автореферата в написании страны Crech Republic), правильное написание - Czech;
- замечание об отсутствии изображения поверхности монокристалла, деформированного до 12,2%;
- замечание об ошибке подписи к рисунку 1;
- замечание об опечатке на странице 10, необходимо указать «рисунки 1 д-е»;
- замечание о неясности на (стр. 9) признаков самоподобия;
- замечание о неясности на (стр, 16) почему автор характеризует структуру разрушения как фрагментированную, субмикроструктурную;
- замечание о неправильном написании названия СЭМ/ЭДС спектра на рис. 12б;
- замечание о том, что выделение зон излома недостаточно, поскольку в пределах зоны скорость роста трещины меняется, и изменения высоты профиля излома на случайных участках протяженностью от 1 мкм до 1-2 размеров зерен не могут характеризовать макроскопическое поведение образца, тем более что преобладающий механизм усталостного разрушения материала во всей зоне и на выделенном участке не изучены;
- замечание о неясности физического смысла оцененных критических параметров I_{sc} и

L_{pz} , не подтвержденного структурными наблюдениями и оценкой размера пластической зоны;

- замечание о том, что облако точек на рис. 8 вряд ли можно назвать σ -N кривой. Причины такого разброса не объяснены, как и причины высокой чувствительности к предварительному нагружению сплава Al-Cu и низкой чувствительности сплава Al-Mg;
- замечание о том, что результаты оценки усталостной долговечности и ее изменения после предварительного деформирования приведены без указания статистики измерений;
- замечание о том, что анализ результатов, приведенных в таблицах 1 и 2, не позволяет в полной мере проследить взаимосвязь показателя Херста с масштабными уровнями;
- замечание о том, что на рисунке 8 приведены не « σ -N кривые», а только отдельные точки;
- пожелание о том, что представляется интерес о том, как показатель Херста изменяется в процессе статического или циклического нагружения, и как это отражается на стадийности процесса;
- вопрос о выборе количественного критерия определения показателя Херста и выбора диапазона;
- замечание о том, что на рис. 2 приведены только две панели.

В отзывах отмечено, что диссертация является законченным исследованием и представляет научный интерес, прошла достаточную апробацию, содержит новые результаты, достоверность которых обоснована, тема работы является актуальной, результаты имеют высокую научную ценность и большое прикладное значение.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

официальные оппоненты являются одними из ведущих специалистов в области физики, механики деформирования и разрушения, имеют большое число публикации с результатами теоретических и экспериментальных исследований; обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов;

ведущая организация ФГБУН ИМАШ УрО РАН является одним из ведущих научных центров в области механики, в нем активно ведутся фундаментальные и прикладные исследования по физике и механике деформирования и разрушения сплошных структурированных материалов, в том числе, в экстремальных условиях; безопасность, ресурс, живучесть машин и сложных технических систем; математическое и физическое моделирование перспективных конструкций и материалов. Институт ежегодно организует и проводит Всероссийские конференции “Ресурс и диагностика материалов и конструкций” и “Механика микронеоднородных материалов и разрушение”. Институт является учредителем Международного электронного научного журнала “Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures”. Журнал публикует научные статьи с результатами оригинальных фундаментальных и прикладных исследований по механике, материаловедению и неразрушающему контролю.

Отзыв ведущей организации, содержащий подробную, по главам, характеристику содержания диссертационной работы; высокую положительную оценку актуальности темы исследования, достоверности, новизны, теоретической и практической значимости изложенных результатов обсужден и одобрен на заседании научного семинара отдела механики машин и технологий в присутствии признанных авторитетных специалистов по теме защищаемой диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана методология проведения исследований при комбинированном нагружении, позволяющая определение усталостного ресурса при динамическом и последующем гигацикловом нагружении;

предложено феноменологическое соотношение, которое, наряду с макроскопической характеристикой напряженного состояния в вершине трещины, отражает роль структурных масштабов в кинетике роста малых трещин (для размеров, меньших размера «трещин Пэриса»);

доказана возможность оценки усталостного ресурса материалов авиационного моторостроения (на примере алюминиевых сплавов) в условиях предварительного динамического нагружения с использованием количественных оценок структурных масштабов, вычисляемых по данным профилометрии поверхности разрушения;

введено определение минимального и максимального структурного масштабов, соответствующих масштабнo-инвариантным закономерностям формирования характерных областей поверхности разрушения, с формированием которых связываются условия распространения трещины.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны положения, составляющие основу методологии проведения исследований при комбинированном нагружении, позволяющие экспериментальное определение усталостного ресурса (на примере сплавов алюминия АМг6 и Д16Т) при динамическом и последующем гигацикловом нагружении, используя масштабнo-инвариантные характеристики рельефа поверхности разрушения;

Применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов):

использованы экспериментальные методики исследования пластической деформации и разрушения при комбинированном динамическом, много- и гигацикловом усталостном нагружении алюминиевых сплавов;

изложены подходы, позволяющие определить условия образования очага разрушения при комбинированном динамическом и последующем гигацикловом нагружении в алюминиевых сплавах;

раскрыты закономерности масштабной инвариантности формирования полос скольжения различного масштаба, образующихся на поверхности монокристалла алюминия в условиях квазистатического растяжения, в диапазоне пространственных масштабов (5–1100 мкм) по данным профилометрии высокого разрешения; **изучено** влияние интерметаллидных включений и диффузии магния в сплаве АМг6 на формирование зон локализации разрушения;

проведена модернизация экспериментальной установки метода Гопкинсона-Кольского с целью сохранения образцов из алюминиевого сплава для последующего гигациклового нагружения на ультразвуковой испытательной машине.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны подход и методология по оценке структурной восприимчивости материалов авиационного моторостроения (на примере Al-Cu, Al-Mg) к динамическим нагружениям при последующих циклических нагружениях на основе количественных оценок структурных масштабов, определяемых постоянством масштабного инварианта (показателя Херста), вычисляемого по данным профилометрии поверхности разрушения;

определены по данным профилометрии высокого разрешения масштабные инварианты и соответствующие им масштабы, определяющие формирование зон инициирования разрушения «рыбий глаз», зарождения и распространения усталостной трещины в гигацикловом режиме в предварительно динамически нагруженных образцах из сплавов АМгб и Д16Т;

представлены возможности использования развитого подхода—для описания эффекта изменения скорости роста усталостной трещины при переходе от одной характерной области к другой.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены с использованием метрологически аттестованного оборудования, поверенных средств измерений;

идея базируется на апробированных методах вычисления пространственных инвариантов поверхностного рельефа, корректностью физических и математических постановок задач;

использовано сравнение авторских данных экспериментальных исследований и данных, полученных другими исследователями по тематике диссертационной работы;

установлено для частных случаев качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами, представленными в независимых источниках по теме диссертационной работы;

использованы современное экспериментальное оборудование по гигацикловому нагружению и оптической профилометрии поверхностей разрушения.

Личный вклад соискателя состоит в разработке методологии оценки стадийности поврежденности с использованием масштабно-инвариантных закономерностей, полученных на оригинальных данных профилометрии высокого разрешения; непосредственном участии в проведении экспериментов по квазистатическому нагружению монокристалла алюминия, много- и гигацикловому испытанию образцов из сплава алюминия. Постановка задачи исследования, обсуждение результатов и подготовка публикаций в научных журналах проводилась совместно с научным руководителем.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи (проблемы) и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, концептуальности и взаимосвязи основных выводов.

