

## ОТЗЫВ

официального оппонента Банщиковой Инны Анатольевны  
на диссертационную работу **Мыльников Владимир Викторович**  
«Структурно-деформационные особенности и закономерности динамики  
эволюции усталостных характеристик металлических материалов в условиях  
различных видов нагружения», представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук по специальности  
1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертационная работа Мыльникова В.В. посвящена *актуальной тематике* связанной с вопросами прочности и усталостной долговечности. В настоящее время активно разрабатываются новые высокопрочные материалы. Существующие расчетные методы оценки надежности и долговечности натурального оборудования и конструкций не в полной мере учитывают влияние изменения структуры поверхности на повреждаемость тонкого активного поверхностного слоя и связанных с ней показателей сопротивления усталости. Установление связи между структурно-деформационными особенностями материала и динамикой эволюции усталостных характеристик в условиях различных спектров нагружения на различных стадиях циклической деформации и разрушения, а также модернизация ранее разработанных методов прогноза кривых усталости и разработка новых универсальных критериев прогнозирования долговечности конструкций является актуальным направлением исследования. С применением современных средств и комплексных подходов в работе исследован широкий круг конструкционных и модельных материалов с различными типами кристаллической решетки при циклическом консольном плоском изгибе, чистом изгибе, изгибе с вращением и пульсирующем растяжении-сжатии в большом частотно-скоростном диапазоне прикладываемых напряжений.

**Структура и содержание работы.** Диссертационная работа изложена на 369 страницах и состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 353 наименований, одного приложения, включает 186 рисунков, 14 таблиц.

**Во введении** (с.7-18) обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и решаемые задачи, положения, выносимые на защиту, отмечены новизна и практическая значимость результатов, сведения об апробации работы и личном вкладе автора.

В **первой главе** (с.19-79) приведен содержательный обзор работ в области исследования структурных изменений на различных стадиях деформации и разрушения в условиях циклического нагружения, использования параметров оценки сопротивления усталости металлов и сплавов для прогнозирования усталостных характеристик материалов по параметрам микроструктуры и накопления повреждений поверхности.

**Вторая глава** диссертации (с. 80-141) посвящена методам исследования, описанию использованных в работе материалов и установок для механических испытаний, описанию новых разработанных автором методов структурных исследований, расчетных алгоритмов и методик проведения экспериментов и комплексного исследования структуры металлических материалов и его аппаратная реализация.

В **третьей главе** (с. 142-195) представлены полученные автором данные физико-механических характеристик при циклической деформации, с учетом которых вычислена энергия активации повреждаемости поверхностного слоя материалов при различных частотно-амплитудных режимах нагружения различных групп материалов.

**Четвертая глава** (с.196-244) содержит подробное описание результатов исследований параметров сопротивления усталости конструкционных сплавов после различных видов термической обработки при разных спектрах нагружения с учетом структурных изменений. Приводится анализ прочностных характеристик и стабильности поведения сплавов при испытаниях на усталость, учитывая частотно-скоростные характеристики цикла нагружения. Вычисляется повреждаемость поверхности при разной степени циклической наработки, а также выполняется оценка деформационного упрочнения при развитии локализованной циклической деформации и выявляется стадийность зарождения и развития усталостных трещин в циклически нагруженных материалах.

В **пятой главе** (с. 245-285) автором детально анализируются результаты экспериментальных исследований на частотную стабильность и усталостную прочность конструкционных сплавов. На основе анализа разработаны методические особенности изучения частотных характеристик и выявления динамики частотной стабильности образцов при высокочастотном циклическом деформировании сплавов.

В **шестой главе** (с.286-320) представлены критерии и методы прогнозирования циклической прочности и долговечности. Приведены

полученные по результатам экспериментальных и теоретических исследований графические зависимости предела выносливости от показателя сопротивления усталости, зависимости показателя сопротивления усталости от частоты нагружения, от истинного предела прочности, от абсолютных размеров детали и повреждаемости поверхности при изменении предела прочности вследствие термообработки. В главе обосновываются аналитические уравнения для описания поведения кривых усталости и приводятся результаты прогноза показателей сопротивления усталости деталей шасси самолета и упругих элементов приборостроения.

В разделе «**Заключение**» сформулированы основные результаты и выводы по работе.

**Научная новизна результатов и выводов.** Все полученные результаты новые и оригинальные. Разработан новый подход для оценки материалов по динамике эволюции безразмерных прочностных показателей по системе параметров, который дает возможность обеспечить целостность описания процессов «упрочнения-разупрочнения», не конкретизируя такие параметры, как искажение кристаллической решетки, интенсивность дробления зерен на фрагменты и другие. Разработаны и апробированы методики оценки: 3D-структуры для определения наиболее уязвимых мест в зонах локализации деформации и поверхностях разрушения на основе выявления резких перепадов и значительных величин экстремумов в профиле; стабильности усталостных свойств и долговечности материала при высокочастотном нагружении. Получены общие аналитические уравнения для описания кривых усталости поликристаллических сплавов с учетом дефектности, структурно-энергетического состояния, релаксационной способности, напряженно-деформированного состояния в зависимости от внешних условий циклического нагружения. Выявлены две группы материалов: в первой наблюдается увеличение параметров сопротивления усталости с ростом частотно-скоростных характеристик и жесткости напряженного состояния; во второй уменьшение параметров сопротивления усталости при повышении величины частоты нагружения и смягчении схемы напряженного состояния. Получены математические выражения для каждой группы материалов. Выявлены закономерности физических величин, изменения структур и показателей сопротивления усталости в динамике процесса циклического нагружения по различным схемам чистых металлов с разной атомно-кристаллической структурой и конструкционных материалов, определена корреляция с их усталостной прочностью и долговечностью.

Получены новые зависимости показателей сопротивления усталости деталей, позволяющие определить их прочность и долговечность. Обоснована применимость новых характеристик поверхностных эффектов, используемых для прогнозирования прочности и долговечности деталей машин и конструкций по повреждаемости их поверхности.

***Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.*** Содержащиеся в диссертации все положения, выводы и рекомендации обоснованы численно и экспериментально. Достоверность обеспечивается корректным использованием методов вычислительной математики, сопротивления материалов, статистического анализа, механики упругого и пластического тела, сравнительным анализом экспериментальных данных, обработанных по разным методикам. Для надежности выполнялось сопоставление результатов, полученных с использованием различного оборудования макро- и микровизуального контроля. Исследование материалов проводилось на современном стандартизованном оборудовании и экспериментальных установках, разработанных в лабораторных условиях, для которых приведены технические характеристики и проведен ряд тестовых исследований и испытаний.

Экспериментальные данные, полученные автором, позволили выявить основные закономерности между эволюцией усталостных характеристик и структурно-деформационными особенностями металлических материалов в условиях различных видов нагружения, стадийностью деформации и разрушения поликристаллических материалов с различными типами кристаллической решетки, оценить влияние вида термической обработки на показатели сопротивления усталости, установить параметры частотной стабильности сплавов при неупругом циклическом деформировании и причины ее изменения при перерывах в испытаниях.

***Значимость результатов для науки и производств, рекомендации по их использованию.*** Результаты имеют важное теоретическое и прикладное значение. Разработаны, изготовлены и протестированы:

– установки для испытаний на усталость чистых легкоплавких металлов и особо легкоплавких металлов по схеме консольного изгиба вращающегося цилиндрического образца;

– уникальный лабораторный комплекс, включающий электромагнитную установку для испытаний на усталость и исследования стабильности свойств материалов при консольном изгибе в одной плоскости по «мягкой» схеме

нагрузки, исключая динамические погрешности измерения изгибающего момента в зависимости от частоты нагружения и обеспечивающую легкость балансировки амплитуд в автоколебательной системе.

Выявлены физико-механические закономерности динамики усталостных характеристик металлических материалов в условиях различных спектров нагружения. Сформулированы рекомендации по выбору марок сталей для изготовления деталей машин и конструкций для эксплуатации в условиях нагружения, относящихся к исследованному частотно-скоростному диапазону с учетом стоимости и вида предварительной обработки детали. Решен ряд практических задач прогнозирования показателей сопротивления усталости лабораторных образцов и натуральных деталей.

Разработанные методы прогнозирования показателей сопротивления усталости были применены для определения прочности и долговечности с учетом асимметрии цикла нагружения ряда деталей системы взлета-посадки учебно-тренировочного самолета на предприятии Нижнего Новгорода НОАО «Гидромаш». Натурные испытания системы и ее эксплуатация подтвердили правильность полученных результатов.

Научные и методические наработки внедрены в учебный процесс Нижегородского государственного Архитектурно-строительного университета, Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, в ЧОУ ДПО «Учебный центр Головного Аттестационного Центра Верхне-Волжского региона».

***По диссертации и автореферату имеется несколько замечаний:***

1). Большинство публикаций из списка Web of Science и Scopus являются переводными версиями статей автора из списка публикаций ВАК, т.е. являются изложением одной и той же информации на разных языках. С другой стороны наличие переводной версии журналов и включение их в международные базы свидетельствует об их высоком качестве.

В список публикаций по теме диссертации включены три статьи из списка публикации по теме диссертации на соискание автором степени кандидата наук. Так как одно из требований, предъявляемых к работе, является ее новизна, то автору необходимо пояснить включение этих работ в список.

В практической значимости работы указано, что полученные научные и методические наработки включены в два учебных пособия, которые

используются в учебном процессе в нескольких ВУЗах. Понять что это за пособия невозможно, так как отсутствуют ссылки на них.

2). В работе встречаются опечатки.

В описании структуры работы и ее объема указано, что рисунков 184 и таблиц 9. Однако нумерация рисунков 27 и 28 (стр. 218, 219) встречается повторно на стр. 230 и 233 и, таким образом, рисунков 186. Подсчет числа таблиц также дает их иное число — 14.

На стр. 250 имеется ссылка на таблицу 1 и на стр. 287 ссылка на таблицу 3.35, б, но таблицы с такими номерами отсутствуют.

Опечатки в формулах: на стр. 96 в формуле (2.4) степень куб необходимо заменить на квадрат; на стр. 97 в выражении для  $A_m$  слагаемое в скобках  $l/a$  нужно заменить на  $l/2$ , здесь же вместо параметров  $J_1$  и  $J_2$  используются  $I_1$  и  $I_2$ . Аналогичные опечатки в формулах содержатся в автореферате. В автореферате нумерация формулы (12) встречается два раза на стр. 12 и 15.

На стр. 115 диссертации в конце названия подраздела 2.6 добавлена ссылка на литературные источники [186-187], а в оглавлении на стр. 3 эта ссылка отсутствует.

3). На стр. 206 отмечается, что при низких частотах нагружения (рис. 4.12, кривые 1, 2) в малоцикловой области наблюдаются равные величины усталостной прочности при одинаковой наработке. Во-первых, на рис. 4.12 отсутствуют кривые с номерами 1 и 2. Второй вопрос касается малоцикловых испытаний. В разделе 2 подробно описано проведение многоцикловых испытаний и их обработка по формулам (п. 2.2), однако описание испытаний на малоцикловую усталость практически отсутствует.

4). На стр. 67 приведены гипотезы накопления повреждений ряда авторов (Работнов Ю. Н., Качанов Л. М., Голуб В. П. и др.). Гипотезы описывают изотропное повреждение материала. Следует отметить, что Качанов Л. М. в своих работах предложил учитывать не только величину повреждения, но и его направление, т.е. векторный характер накопления повреждений. Тензорный характер поврежденности был предложен в классической монографии Ю. Н. Работнова. Обзор этих работ можно найти в монографии Локощенко А. М. («Ползучесть и длительная прочность металлов», 2016). Различное накопление повреждений может быть связано с прокатом исходного материала. Не ясно, как вырезались экспериментальные образцы из проката, учитывалось ли направление вырезки (вдоль проката, поперек проката) при обработке экспериментальных данных.

5). Исследовалось ли влияние глубины поверхностного слоя на повреждаемость поверхности? В поверхностном слое в результате проката могут возникать остаточные напряжения, в процессе испытаний они «накладываются» на «рабочие» напряжения и также влияют на повреждаемость. Проводилась ли оценка влияния этих напряжений на накопление повреждений в поверхностном слое? Не ясно, как рассчитывается напряжение при прогнозировании кривых усталости натуральных деталей.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Проведено и обработано большое число испытаний для самых различных материалов, полученные данные могут быть полезны в качестве справочного материала. Результаты диссертации в достаточной степени *апробированы и опубликованы*. Исследования были широко представлены на Всероссийских и Международных конференциях, опубликовано 23 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК (из них 13 индексируются в базах WEB of Science и Scopus), общее число статей, индексируемых в базах WEB of Science и Scopus — 14. Зарегистрированы 3 патента на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. По теме диссертации опубликовано две монографии.

#### ***Соответствие содержания диссертации указанной специальности***

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, полученные Мыльниковым В. В. результаты можно квалифицировать как новое крупное достижение. По своим целям, задачам, методике исследования и научной новизне диссертация соответствует пунктам 1, 3, 5, 6, 10, 13 паспорта специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела. Так как работа нацелена на получение общих аналитических уравнений для описания кривых усталости поликристаллических сплавов и на решение задач прочности и долговечности деталей машин и конструкций с учетом внешних условий циклического нагружения, то по научной новизне и методам исследования она может быть отнесена к физико-математическим наукам.

***Оформление и соответствие автореферата содержанию диссертации.*** Работа оформлена в соответствии с требованиями системы стандартов, предъявляемых к диссертации и автореферату диссертации. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертационной работы, ее результаты и выводы.

### **Заключение о соответствии работы требованиям ВАК.**

Диссертация «Структурно-деформационные особенности и закономерности динамики эволюции усталостных характеристик металлических материалов в условиях различных видов нагружения» является законченной научно-квалификационной работой, направленной на решение актуальных проблем прочности материалов и конструкций и прогнозирования их эксплуатационного ресурса в условиях циклического нагружения, имеет важное теоретическое и прикладное значение, соответствует требованиям п.п. 9 – 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями и дополнениями) в части, касающейся ученой степени доктора наук, а ее автор, Мыльников Владимир Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Я, Банщикова Инна Анатольевна, согласна на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Мыльникова В. В.

### **Официальный оппонент**

доктор физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, старший научный сотрудник лаборатории статической прочности Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

Банщикова Инна Анатольевна

« 27 » ноября 2023 г.

**Почтовый адрес:** 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 15, ИГиЛ СО РАН; **телефон** 8(383) 333-27-50; **email:** [bia@hydro.nsc.ru](mailto:bia@hydro.nsc.ru)

Подпись Банщиковой И. А. заверяю

Ученый секретарь Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,

телефон: +7 (383) 333-29-66  
к.ф.-м.н.

Хе Александр Канчерович

27.11.2023 г.