



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,
ИНН 6316000632, КПП 631601001

УТВЕРЖДАЮ

И.о. первого проректора - проректора
по научно-исследовательской работе

Зубарев Н. Ю.

« 12 » 2023 года

05 ДЕК 2023

№ 104-6508

На № _____ от _____

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**на диссертацию Мыльников Владимира Викторовича
на тему «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**

Актуальность темы

Одной из фундаментальных задач современного материаловедения и механики деформируемого твердого тела является изучение природы и причин усталостного разрушения, поскольку от сопротивления усталости во многом зависит работоспособность, долговечность и живучесть конструкций и изделий в машиностроении, авиастроении, энергетике и других отраслях промышленности. Свойство материала сопротивляться усталостному разрушению приобретает особое значение в связи с усложнением современных конструкций, ужесточением режимов эксплуатации, многократным увеличением частот и скоростей новейших машин и агрегатов и интенсификацией их работы. Анализ разрушений деталей машин и элементов конструкций показывает, что большинство из них происходит вследствие усталости металлов, под которой подразумевается постепенная деградация механических свойств материала в результате постепенного накопления повреждений под действием переменных (часто циклических) напряжений с образованием и развитием трещин, что обуславливает его разрушение за определённое время. Частые случаи

усталостного разрушения объясняются недостаточной изученностью явления усталости металлов, которое характеризуется исключительной сложностью и разнообразием процессов, происходящих в материалах в условиях действия переменных нагрузок, а также большой чувствительностью этих процессов к влиянию различных технологических, эксплуатационных и конструктивных факторов. Исследование процессов образования, накопления и развития повреждений является одной из особо актуальных проблем усталости металлов и сплавов, т.к. знание кинетики обозначенных процессов позволяет достоверно оценивать долговечности деталей и элементов конструкций в конкретных эксплуатационных условиях. Все указанные причины обуславливают актуальность диссертационного исследования Владимира Викторовича Мыльникова.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка используемых источников и приложения. Структура диссертационной работы В.В. Мыльникова отражает особенности исследуемых проблем. Во введении сформулирована цель и задачи исследования, нацеленного на выявления природы и закономерностей усталостного нагружения металлических образцов в условиях сложных систем нагружения. Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, обозначены позиции научной новизны, указывается практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения об апробации результатов исследования и личном вкладе автора.

В первой главе «Усталостная прочность и долговечность металлов и сплавов при циклической деформации, особенности повреждения и разрушения» автор приводит общую характеристику усталостного разрушения металлических материалов. В главе выполнен обзор проблем разрушения деталей при многократно повторяющейся нагрузке и полученных результатов, начиная с 1829 г. Мыльников В.В. отмечает, что испытания на усталость определяется как схемами нагружения (жесткое и мягкое), так и амплитудными и частотными изменениями циклов. В главе вводятся в рассмотрение параметры оценки сопротивления усталости металлов и сплавов. Так, вводится в рассмотрение параметр повреждаемости поверхности и тангенс угла наклона ветви кривой усталости к горизонтальной оси. Для количественной оценки повреждаемости предлагается использовать параметр, связанный с общим количеством зерен, количеством поврежденных зерен, разницей количества неповрежденных и поврежденных зерен по всей площади зерна, общим числом полос скольжения в поврежденных зернах, фактической площади микроструктуры, площадью рабочей поверхности образца.

Вторая глава «Методика проведения исследований» посвящена описанию материалов исследования, конструкций и принципов работы экспериментальных установок для испытаний на усталость. Подробно изложена методика проведения экспериментов на усталость по различным схемам. Излагается методика подготовки образцов к проведению исследований микроструктуры. Предлагаются новый метод исследования материалов по прочностным характеристикам и новые методики исследования макро- и микроструктур металлических материалов с использованием цифрового микроскопа. Во второй главе представлены методики изучения поверхности разрушения материалов в 3-D изображении с использованием режима e-Preview Optimal Image, методика макроструктурного анализа исследуемых образцов с использованием режима e-Preview Optimal Image, методики микроструктурного анализа исследуемых образцов с использованием 2-D и 3-D измерительных систем, методика изучения поверхности разрушения в поле зрения микроскопа, методика изучения поверхностей разрушения, превышающих максимальное поле зрения микроскопа, методика изучения деформационного рельефа на разных этапах наработки при циклических испытаниях, алгоритм комплексного исследования структуры металлических материалов и его аппаратная реализация.

Третья глава диссертационной работы носит название «Исследование физико-механических характеристик материалов с учетом эволюции структурно-фазовых состояний в широком диапазоне частотно-амплитудных режимов и технологических схем нагружения при усталостных испытаниях». В главе детально обсуждается вопрос о влиянии частоты циклического нагружения на повреждаемость поверхности металлов. В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований физико-механических характеристик материалов с учетом эволюции структурно-фазовых состояний в широком диапазоне частотно-амплитудных режимов и технологических схем нагружения при усталостных испытаниях.

Четвертая глава диссертации посвящена выявлению и анализу закономерностей параметров сопротивления усталости в зависимости от структурно-чувствительных факторов при различных видах термических обработок и видов нагружения. В четвертой главе приведены: исследование кривых усталости конструкционных сплавов, испытанных по разным схемам нагружения и изменений микроструктуры, исследование кривых усталости конструкционных сплавов с различными видами термической обработки при разных спектрах нагружения с учетом структурных изменений, закономерности прочностных характеристик и стабильности поведения сплавов при испытаниях на усталость с учетом частотно-скоростных

характеристик цикла нагружения, расчет повреждаемости поверхности при разной степени циклической наработки, анализ материалов по динамике эволюции предложенных показателей усталостной прочности.

Глава 5 «Частотная стабильность и усталостная прочность при циклическом нагружении» содержит частотные характеристики и динамику частотной стабильности испытаний образцов при испытании на усталость. В главе приведены характеристики сопротивления усталости при высокочастотном циклическом деформировании сплавов с различными режимами термической обработки, анализ изменения частоты циклов нагружения материалов в истинных координатах.

Глава 6 «Критерии и методы прогнозирования циклической прочности и долговечности с учетом полученных экспериментальных результатов» излагаются численные и графические зависимости параметров сопротивления усталости, критерии и методы прогноза циклической прочности и долговечности на основании полученных экспериментальных результатов. В главе обсуждается влияние различных параметров на закономерности поведения материалов при усталости, общие уравнения для описания поведения кривых усталости.

Научная новизна полученных результатов

1. Предложен новый подход анализа поведения металлических материалов при действии циклических нагрузок, основанный на экспериментальных наблюдениях и анализе микроструктуры поверхности образцов.

2. Предложены новые экспериментальные методики оценки микроструктуры материала, базирующиеся на применении современного экспериментального оборудования.

3. Предложена связь макроскопических величин (угол наклона кривой усталости) с микроскопическим параметром повреждаемости, измеряемым с помощью экспериментального анализа поврежденной поверхности материала.

Практическая значимость работы

1. Разработаны, изготовлены и экспериментально протестированы установки для испытаний на усталость чистых легкоплавких металлов и особо легкоплавких металлов, в которых осуществлена схема консольного изгиба вращающегося цилиндрического образца, а величина нагрузки, пропорциональная растяжению пружины динамометра, определяется сопротивлением деформации (изгибу) образца.

2. Разработан и изготовлен уникальный лабораторный комплекс, включающий электромагнитную установку для испытаний на усталость и исследования стабильности свойств материалов, обеспечивающую испытания при консольном изгибе в одной плоскости по «мягкой» схеме нагружения, которая исключает динамические погрешности измерения изгибающего момента, действующего в корневой части испытуемого образца в зависимости от частоты нагружения и обеспечивает легкость балансировки амплитуд в автоколебательной системе.

3. Выявленные физико-механические закономерности динамики усталостных характеристик металлических материалов в условиях различных спектров нагружения, могут быть использованы для дальнейшего развития теории прочности и пластичности, а также способствовать накоплению статистических данных для формирования и обновления универсальных баз данных по физико-механическим свойствам материалов и расширению возможностей применения методов с использованием искусственного интеллекта.

4. Сформулированы рекомендации по предпочтительному выбору широко применяемых марок сталей для изготовления реальных деталей машин и конструкций для эксплуатации в условиях нагружения, относящихся к исследованному частотно-скоростному диапазону с учетом стоимости и вида предварительной обработки детали.

5. Решен ряд практических задач прогнозирования показателей сопротивления усталости лабораторных образцов и натуральных деталей.

Несомненным достоинством данной работы является опора на концепцию прогнозирования усталостных характеристик материала по параметрам микроструктуры и накопления поврежденности поверхности.

По диссертации можно сформулировать ряд замечаний.

1. Автор допустил большое число орфографических и пунктуационных ошибок в тексте, что затрудняет чтение диссертации. Автор очень часто не использует необходимые знаки препинания (не выделяет причастные и деепричастные обороты), например, стр. 225: «С учетом данных таблицы 4.4 и использую предложенные методики расчета получаем повреждаемость поверхности исследованных металлов и сплавов, которая показана в таблице 4.5». Содержатся стилистические неточности и ошибки, например, стр. 294: «Если переменную нагрузку описывать с помощью законов (графиков) нагружения, то оно может быть нерегулярным, случайным или подчиняться определенному закону». Нумерация формул в диссертации не является аккуратной и не привязана к правому краю страницы (например, стр. 67).

2. Список литературы практически не содержит новых источников, опубликованных за последние пять лет. Если читатель видит ссылку,

относящуюся к 2019-2023 гг., то это, за редким исключением, работы соискателя. Таким образом, литературный обзор не отражает современное состояние проблемы.

3. Практически все публикации автора относятся к материаловедению, в публикациях по теме диссертации мы видим такие журналы как Металловедение и термическая обработка металлов, Цветная и черная металлургия, Порошковая металлургия и функциональные покрытия, Металлы, Заготовительные производства в машиностроении. Отсутствуют публикации, относящиеся непосредственно к специальности 1.1.8 Механика деформируемого твердого тела.

4. Диссертация, на наш взгляд содержит противоречивые утверждения. Так на стр. 66 автор пишет, что в работах Я. Хульта [167] отмечается, что в механике деформируемого твердого тела сложились два совершенно разных представления о том, что следует понимать под поврежденностью. Первое предложено А. Пальмгреном [168] и развито в последствии А. Майнером [169], а второе – Л. М Качановым [170] и Ю. Н. Работновым [171]. Во-первых, в работе Я. Хульта, ибо ссылка приведена на одну работу; во-вторых, это утверждение было сформулировано в 1983 году, однако, с тех пор прошло 40 лет и в настоящее время не говорят о сложившихся двух совершенно разных представлениях к описанию поврежденности. В-третьих, мы читаем далее: «Согласно Пальмгрену – Майнеру мерой усталостного повреждения является отношение числа циклов нагружения к числу циклов до разрушения при заданном уровне циклических напряжений». Далее, в тексте: «...на основе ее (на основе этой концепции) построен ряд гипотез и приводятся кинетические уравнения подхода Качанова-Работнова», который является, согласно автору диссертации, «совершенно другим представлением». Далее, соискатель обращается к введенной им классификации и дает определение меры поврежденности как отношение площадей – площади, занятой микротрещинами, порами, и начальной площади поперечного сечения. Определение (1.11) – это определение параметра поврежденности Работнова и геометрическая интерпретация введенного ранее параметра сплошности Качанова, но соискатель ссылается на существенно более поздние работы других авторов, а ссылки на пионерские работы Л.М. Качанова и Ю.Н. Работнова не приведены.

5. На стр. 69, где приводится формула для количественной оценки повреждаемости, ничего не сказано о том, что следует понимать под поврежденным зерном. Ничего не сказано о том, сколько зерен наблюдается, по какому числу зерен следует рассчитывать параметр поврежденности. Как получить это количество зерен? Дают ли экспериментальные исследования эти числа? С какой точностью могут быть определены эти количества? Каковы характерные размеры зерен для рассмотренных материалов?

6. Данное замечание связано с замечанием 2 и является его продолжением. Соискатель на стр. 73 пишет: «В последнее время, используя статические методы, Макконен [201] предложил новый способ построения расчетных кривых». Однако, работа Макконена (Makkonen M. Predicting the total fatigue life in metals // International Journal of Fatigue. 2009. Vol. 31. No. 7. pp. 1163–1175) опубликована в 2009 году и не может относиться к последнему времени. С тех прошло 14 лет.

7. Диссертация содержит косноязычные утверждения, например, на стр. 74: «...теория распространения трещин может быть выражена...» и приводится формула для скорости усталостного подрастания трещины в упругопластическом материале, связывающая скорость с инвариантным J-интегралом. По всей видимости, фраза должна звучать как: «...в условиях упругопластического разрушения скорость усталостного подрастания трещины связывают с инвариантным J-интегралом...».

8. В третьей главе, являющейся, по всей видимости, чисто материаловедческой, сложно увидеть эволюцию структурно-фазовых состояний металлов. Структурные изменения – изменения, вызванные пластическим течением, приводящие к изменению формы зерен путем перемещения дислокаций по плоскостям скольжения, показаны на рисунках. Структурно-фазовые изменения? Фаза – однородная часть системы, отделенная от других частей замкнутыми поверхностями. Рассмотрен широкий набор материалов: цинк, кадмий, медь, лантан, иттрий, висмут. О какой эволюции структурно-фазовых изменений в каждом из рассмотренных материалов идет речь? Приведены кривые усталости для перечисленных материалов, но остается не ясным вопрос о том, какие фазовые изменения происходят?

9. Пункт 3.1 носит название «Исследование кривых усталости материалов с различными типами кристаллического строения при разной частоте циклической нагрузки и изменений микроструктуры». Вообще-то, понятие частоты к изменению микроструктуры не относится, по крайней мере, скорость изменения микроструктуры не сопоставима с величиной частоты циклической нагрузки. В главе 3 перечислены материалы, но не указан тип их кристаллического строения. Например, лантан существует в трех кристаллических модификациях: с гексагональной решеткой, с кубической решеткой типа меди и кубической объемноцентрированной решеткой. Поэтому разумным представляется в п.3.1 с таким названием указать различные типы кристаллических решеток всех рассмотренных материалов. По всей видимости, материаловеду все кристаллические строения и симметрии принятых для исследования материалов известны, но диссертация защищается по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого

тела, физико-математические науки. Лишь в автореферате на стр. 10 указаны типы кристаллических решеток рассмотренных материалов.

10. Пункт 6.3. носит название Общие аналитические уравнения для описания поведения кривых усталости. Что автор подразумевает под термином «аналитические уравнения»? Что автор понимает под термином «комплексное математическое уравнение» (Стр. 295: «Между тем, до сих пор нет общего комплексного математического уравнения, отражающего влияние на повреждение металлов при усталости таких важных характеристик поликристаллов, как плотность (дефектность), скорость релаксации напряжений, скорость нагружения, структурно-энергетическое состояние материала (прочность, твердость) и приложенное возникающее напряженно-деформированное состояние)»?

11. Несомненным достоинством данной работы является опора на концепцию прогнозирования усталостных характеристик материала по параметрам микроструктуры и накопления поврежденности поверхности. Однако, в механике деформируемого твердого тела при учете процессов накопления повреждений для описания усталостного разрушения наряду с самим параметром поврежденности вводят эволюционное (кинетическое) уравнение накопления повреждений. В настоящее время предложен целый ряд кинетических уравнений для случаев циклического нагружения. В настоящее время многие научные школы пытаются на основании эксперимента определить параметры кинетических уравнений. В диссертации В.В. Мыльниковой приводятся классические кинетические уравнения в обзорной части работы, однако сам автор не прибегает к кинетическому уравнению, а ведь именно оно дает возможность прогнозирования усталостного разрушения.

12. В работе недостаточно математической строгости в представлении результатов. Например, в пункте 6.6. описывается решение линейного дифференциального уравнения (6.28). Характеристическое уравнение, соответствующее дифференциальному уравнению, можно получить только после формулировки граничных условий задачи, которые не обсуждаются и не формулируются.

13. Далее автор пишет, что любой корень характеристического уравнения отражает воздействие того или иного фактора на процесс изменения свойств материала при циклическом нагружении. Но почему это воздействие учитывается линейным образом? Зависимость от факторов может быть описана нелинейным уравнением и зависимость от факторов может быть нелинейной (не в виде отдельной экспоненты, а более сложной). В диссертации явно необходимо 1) обоснование уравнения (6.28) и 2) его решение и формулировка краевых условий.

14. На наш взгляд, не было никакой необходимости выносить в автореферат диссертации на соискание степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела решение краевой задачи для линейного обыкновенного дифференциального уравнения второго порядка (соотношения (3)-(6)).

15. Коэффициент ограниченной выносливости χ , показанный на диаграмме (рис. 2.8, на с.116) не соответствует формуле (2.39) на с.115.

16. Некоторые термины по сопротивлению усталости, например «пульсирующий цикл», «предел усталости», «усталостная прочность» по действующему ГОСТ 23207-78 являются недопустимыми.

17. В работе приведены многочисленные диаграммы – кривые усталости, построенные в координатах «напряжение – количество циклов до разрушения», т.е. $\sigma - N$, где напряжения определяются по известной формуле сопротивления материалов для упругого нагружения при изгибе. При этом не учитывается, что в области N до 10^5 циклов нагружений, т.е. в малоцикловой области напряжения превышают пределы пропорциональности и текучести и деформации становятся неупругими. Поэтому диаграммы в этой области строят в координатах «деформация – количество циклов до разрушения», т.е. $\varepsilon - N$. Механизм и тип разрушения материалов в малоцикловой и многоцикловой областях принципиально различен, и в работе следовало бы делать соответствующее разделение исследований.

Эта же причина – неупругость деформаций объясняет в ряде случаев: значительное рассеяние результатов усталостных испытаний относительно линейных зависимостей кривых усталости, приведённых в главе 3; завышенный уровень напряжений при наработке более 10^5 циклов нагружения, а также, возможно, противоречащее установившемуся положению об увеличении предела выносливости при увеличении частоты нагружения утверждение в главе 4, что предел выносливости стали 40 и титанового сплава ОТ-4-1 уменьшается.

18. По указанной в п. 17 причине при испытаниях на установке (рис. 2.3. на с. 87) при так называемом «мягком» нагружении в процессе циклического нагружения накапливались пластические деформации и в зависимости от свойств материала: упрочняющегося, разупрочняющегося или циклически стабильного, происходило отмеченное автором увеличение или уменьшение нагрузки. Нагружение становилось в большей или меньшей степени «не мягким» и утверждение автора на с. 87 «В результате величина номинального напряжения стремится оставаться постоянной в процессе испытания,...» становится не справедливым.

Отмеченные недостатки могут служить основанием и пожеланием автору к продолжению и совершенствованию своей работы, качественно не

вливают на степень обоснованности основных результатов и не отменяют положительной характеристики диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Мыльников В.В. «Структурно-деформационные особенности и закономерности динамики эволюции усталостных характеристик металлических материалов в условиях различных видов нагружения» содержит новые экспериментальные результаты и положения, представляющие научный интерес и обладают научной значимостью.

Уровень диссертации соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Мыльников Владимир Викторович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8. - Механика деформируемого твердого тела.

Доклад по диссертационной работе заслушан и одобрен на расширенном заседании кафедры математического моделирования в механике Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева 22 ноября 2023 года, протокол заседания № 4.

Профессор кафедры сопротивления
материалов, д.т.н.

Букатый Станислав Алексеевич

Заведующий кафедрой
математического моделирования
в механике, д.ф.-м.н.

Степанова Лариса Валентиновна

Федеральный государственный автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самарский университет)
Почтовый адрес: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34
Тел. (846) 335-18-26 (приемная ректора) (846) 267-43-70 (канцелярия)
Адрес электронной почты ssau@ssau.ru
Web-сайт организации: <http://ssau.ru>



Букатый С.А., Степанова Л.В.
_____ удостоверяю.
проведения деятельности
Самарского университета
_____ Бояркина У.В.
_____ 20 23 г.