



САМАРСКИЙ
ПОЛИТЕХ
Опорный университет

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное
бюджетное образовательное
учреждение
высшего образования
«Самарский государственный
технический университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)


ул. Молодогвардейская, 244,
гл. корпус, г. Самара, 443100
Тел.: (846) 278-43-11, факс (846)
278-44-00

E-mail: rector@samgtu.ru
ОКПО 02068396, ОГРН
1026301167683,
ИНН 6315800040, КПП 631601001

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор – проректор по научной
работе ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический
университет»,
технических наук, профессор



 Ненашев М.В.

ноября 2022 г.

№ _____

На № _____ от _____

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Лыковой Анастасии Васильевны
«Малоцикловая усталость конструкционных сплавов при сложных
термомеханических воздействиях»,
представленную в диссертационный совет 99.0.067.02,
созданный на базе ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет» и
ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр Уральского
отделения Российской академии наук, к защите
на соискание учёной степени
кандидата технических наук по специальности
1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела

1. Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, в котором изложена общая характеристика работы, пяти глав, заключения, списка используемой литературы из 181 наименования. Содержит 140 страниц текста, включая 67 рисунков, 15 таблиц и заключение. По объёму и структуре работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней» к оформлению диссертаций. Изложение

диссертационной работы соответствует заявленной теме и подчинено решению поставленных задач.

2. Актуальность. Развитие методов повышения сопротивления усталости деталей машин и элементов конструкций в условиях много- и малоциклового нагружения, совершенствование методик расчёта напряжённо-деформированного состояния с учётом влияния вида напряжённого состояния на механические характеристики материала конструкции, минимизация материалоёмкости, соответствие геометрических размеров и формы деталей нормативным требованиям являются основными проблемами современного машиностроительного и аэрокосмического комплексов. Из анализа характера отказов деталей машин и элементов конструкций в различных отраслях, в частности, авиадвигателестроения, следует, что более половины дефектов связано с процессами усталостных разрушений деталей, при этом современный тренд при эксплуатации элементов конструкций характеризуется ростом числа нестационарных режимов термоциклического нагружения, существенным расширением температурного диапазона работы машиностроительных конструкций, сложным напряженным состоянием материалов и сложными режимами циклических нагрузок.

Несмотря на то, что в настоящее время достаточно глубоко изучена проблема малоциклового усталости, но в основном необозримое большинство работ в этом направлении посвящены исследованиям при нормальной («комнатной») температуре. Вопросы же оценки усталостной многоциклового прочности при повышенных температурах рассматриваются в крайне ограниченном числе публикаций, что связано со сложностью экспериментальных исследований при высоких температурах и, зачастую, просто с отсутствием соответствующего оборудования, а экспериментальные данные являются базовыми для построения соответствующих феноменологических моделей. Появление новых материалов, проектирование и эксплуатация конструкций и аппаратов новой техники в условиях малоциклового усталости при зависимости механических свойств материалов от скорости изменения напряжений и/или деформаций в цикле, длительности и формы цикла нагружения, деградиационных процессов при нормальных (и особенно при повышенных) температурах безусловно свидетельствует об актуальности экспериментальных и теоретических

исследований рецензируемой диссертационной работы, в которой и рассматриваются отмеченные выше проблемные вопросы.

3. Основные результаты и научная новизна.

При оценке научной новизны результатов исследований нужно исходить из того, что настоящая диссертационная работа выполнена в рамках Научной Школы, сложившейся в центре экспериментальной механики ПНИПУ. Поэтому соискателем сделан определённый шаг в области малоциклового усталости, что является одним из научных направлений этой Школы, заключающийся в систематическом исследовании влияния формы и длительности цикла нагружения, блочных циклов, сложного напряжённого состояния и повышенной температуры на показатели для оценки малоциклового усталости на примере четырёх материалов.

В рамках полученных научных результатов, обладающих новизной, отметим нижеследующие.

1. Разработана методология экспериментальных исследований на малоцикловую усталость в условиях сложных циклов нагружения и сложного напряжённого состояния для анализа влияния двухосных стационарных нагрузок на циклическую долговечность при нескольких формах циклов и коэффициентах асимметрии, реализации испытаний при повышенных температурах, что представляет дополнительные трудности в связи с решением проблем, например, равномерного прогрева образцов по всей рабочей части, особенностями работы датчиков измеряемых величин, согласованием механической и информационной составляющих оборудования со встроенным программным обеспечением.

2. С точки зрения «паспортизации» механических свойств и аттестации материалов можно констатировать, что получены новые экспериментальные данные в области малоциклового усталости для титанового сплава (влияние повышенной температуры при одноосном нагружении на растяжение-сжатие в условиях «жёсткого» (контроль деформаций) и «мягкого» (контроль напряжений) режимов в цикле на усталостную долговечность), никелевого сплава (влияние формы цикла, включая сложную М-образную, на характеристики малоциклового усталости), алюминиевого сплава (влияние формы и амплитуды цикла, коэффициента асимметрии, блочного режима нагружения и многоосного нагружения при действии постоянной силовой нагрузки, вызывающей растяжение или кручение на усталостную

долговечность), стали ЭП517Ш (влияние формы цикла, блочности циклического нагружения, непропорциональности двухосного нагружения при нормальной и повышенной температурах на циклическую долговечность). Полученные экспериментальные данные, во-первых, сами по себе играют важную роль в смысле паспортизации материала в области малоциклового усталости, а во-вторых, они являются базовой информацией для построения моделей оценки циклической долговечности на основе феноменологических теорий неупругого деформирования и накопления поврежденности.

3. Получен ряд новых эффектов в условиях малоциклового усталости при повышенных температурах для титанового сплава ($T=150-400^{\circ}\text{C}$) и стали ЭП517Ш ($T=600^{\circ}\text{C}$). К сожалению, диссертант просто констатирует полученные эффекты как факт без попытки теоретического объяснения полученных результатов, а они не тривиальные, особенно для титанового сплава (рис. 3.13, 3.14 и 3.15). Для этого сплава при температурах $T=150-200^{\circ}\text{C}$ происходит увеличение длительности циклической долговечности при этих температурах по сравнению с долговечностью при нормальной температуре для одной и той же величины амплитудного значения деформации при испытаниях по схеме «жесткого» нагружения (контроль деформации, $\dot{\epsilon}=\text{const}$), а при температурах $300-400^{\circ}\text{C}$, но при схеме «мягкого» нагружения (контроль напряжений, $\dot{\sigma}=\text{const}$), наблюдается обратный эффект. По нашему мнению, это результат проявления реологических свойств материала (появления деформации ползучести), которой обладают все материалы, даже при комнатной температуре, при напряжениях, выше предела упругости (текучести), что следует из экспериментальных исследований А.М. Жукова. В его статье (Жуков А.М. Ползучесть при комнатной температуре после малой частичной нагрузки// Прочность, пластичность и вязкоупругость материалов и конструкций. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. С. 64-68) показано, что если на диаграмме «напряжение-деформации» за пределом упругости зафиксировать напряжение, то в течении от 0,4 до 4 секунд развивается необратимая деформация во времени (а это и есть реологическая деформация), которая может составлять до 15% от накопленной пластической деформации к моменту фиксации напряжения. Поэтому эффекты увеличения долговечности в режиме «жесткого» нагружения при повышенных

температурах объясняются тем, что в каждом цикле происходит релаксация напряжений σ и процесс идёт при напряжениях, меньше, чем при нормальной температуре, а процессы накопления повреждённости от ползучести ещё не существенны. В режиме «мягкого» нагружения (контроль напряжений, $\dot{\sigma} = const$) напряжение в каждом цикле не меняется, явление ползучести приводит к дополнительной повреждённости (к повреждённости от пластической деформации) при высокой температуре по отношению к нормальной температуре (а при 300–400°С ползучесть титанового сплава существенна), что и приводит к снижению долговечности образцов при повышенной температуре по сравнению с нормальной температурой для этого режима нагружения.

Что же касается снижения долговечности стали ЭП517Ш при $T = 600^\circ\text{C}$ при «жёстком» режиме нагружения (фиксация скорости деформирования в цикле), то при этой температуре у этой стали наблюдается высокая интенсивность образования деформации ползучести, и фактически для всех режимов выполняется циклическая ползучесть с интенсивным накоплением повреждённости даже на фоне релаксации напряжений, что и приводит к существенному снижению долговечности по отношению к долговечности при нормальной температуре.

Из других результатов можно отметить результаты исследований влияния параметров, формы цикла и блочного нагружения на долговечность в условиях малоциклового нагружения для никелевого сплава и алюминиевого сплава Д16Т (глава 3). В результате тонких экспериментальных исследований получены новые и полезные результаты для стали ЭП517Ш и сплава Д16Т в главе 4. Так, для усложнённых М-образных циклов пропорционального изменения осевых и сдвиговых деформаций и блочных циклов для стали ЭП517Ш снижение циклической долговечности при нормальной температуре составляет от 30 до 60%, а при повышенной температуре установлено, что долговечность при пропорциональном нагружении с треугольной формой цикла снижается на 25%, с М-образной формой цикла на 45% и при непропорциональном нагружении на 20%, при этом траектории осевых и сдвиговых деформаций при непропорциональном циклическом нагружении достаточно сложные (рис. 4.6) и экспериментальная их реализация требует определённого искусства от исследователя.

Заслуживают внимания результаты 4 главы и для сплава Д16Т, где установлены новые результаты при малоцикловой двухосевой усталости в условиях действия нормальной или касательной составляющих постоянной величины, демонстрирующие значительное снижение долговечности сплава с увеличением значений этих составляющих, в некоторых случаях до 10 раз.

4. Можно отметить и выполненный теоретический анализ применимости некоторых сугубо феноменологических моделей оценки долговечности материалов в условиях многоциклового нагружения, основы которых заложены более 70 лет назад (Марко-Старки, Сайнса), но у рецензента скептическое отношение к их использованию, хотя и показана возможность их применения для никелевого сплава и сплава Д16Т для конкретных режимов нагружения. Универсальностью на другие виды циклического нагружения эти модели не обладают.

Таким образом, полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют, что поставленная в диссертационном исследовании цель А.В. Лыковой выполнена в полном объёме.

4. Достоверность результатов. Основные положения диссертации в достаточной мере обоснованы и логически вытекают из поставленных диссертантом цели и задач. Достоверность полученных экспериментальных данных обосновывается тем, что они получены при использовании аттестованного оборудования и поверенных средств аккредитованной испытательной лаборатории «Центр экспериментальной механики ПНИПУ», одной из лучших в Российской Федерации. Теоретические результаты базируются на корректном использовании положений механики деформируемого твердого тела в области усталостной прочности материалов, а для частичной проверки адекватности теоретически разработанных методик оценки усталостной прочности материалов использованы надёжные экспериментальные данные, полученные им лично в соавторстве с коллегами.

5. Теоретическая и практическая ценность. При анализе теоретической и практической значимости полученных результатов следует отметить, что с точки зрения внутренней логической завершенности работы диссертантом сделан определённый шаг в направлении получения новых экспериментальных данных для четырёх сплавов в области малоцикловой усталости для комбинированных режимов нагружения образцов при

нормальной и повышенной температурах, которые, с одной стороны, имеют важное самостоятельное значение, а с другой стороны, они являются базой для построения феноменологических моделей оценки малоциклового усталости исследованных материалов.

С точки зрения внешней логической завершённости работы (её прикладного характера), очевидно, что результаты, полученные диссертантом, имеют не только ясные и прозрачные пути использования, в первую очередь, в авиадвигателестроении, поскольку материал элементов конструкций ГТД испытывает во многих случаях такие режимы термомеханического нагружения, которые и рассмотрены в диссертационной работе, а также в машиностроительной промышленности, на железнодорожном транспорте и других отраслях.

6. Апробация работы. Основные положения диссертационной работы Лыковой А.В. в достаточном объёме опубликованы в научных журналах (в том числе, в требуемом минимуме журналов из перечня ВАК Минобрнауки) и трудах конференций различного статуса, докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня, перечень которых достаточно внушительный. Полностью работа докладывалась на ряде профильных семинаров в ведущих университетах и академическом институте РАН, выполнялась в рамках трёх проектов РФФИ и Государственного задания Минвуза РФ, где проводится достаточно жёсткое рецензирование при оценке заявок. Считаем, что рецензируемая диссертационная работа в достаточной мере опубликована и апробирована.

7. Диссертация и автореферат написаны в основном понятным научным языком с корректным использованием научной и технической терминологии. Содержание диссертации подробно и в полном объёме раскрывает постановку, экспериментальные и расчётные методы и результаты решения поставленных задач. Автореферат в основном отражает содержание диссертации. Оформление диссертации и автореферата в основном соответствует существующим требованиям.

8. Соответствие паспорта научной специальности.

Рассматриваемая диссертация соответствует как минимум трём основным областям исследования специальности 1.1.8 «Механика деформируемого твёрдого тела» по следующим направлениям:

1. Задачи теории упругости, теории пластичности, теории вязкоупругости.
2. Прочность при сложных режимах нагружения. Теория накопления повреждений, Механика разрушения твёрдых тел.
3. Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях.

9. Замечания по содержанию и оформлению работы. Недостатков, ставящих под сомнение основные результаты и выводы работы, в диссертации не выявлено. Тем не менее, ряд замечаний по диссертационной работе Лыковой А.В. можно сформулировать и по существу работы, и по оформлению и подаче материала автореферата и диссертации.

1. В работе наблюдается некоторая логическая непоследовательность в выполненных экспериментальных исследованиях. Почему для каждого из четырёх материалов реализовывались разные режимы температурно-силового циклического нагружения, хотя можно было бы провести испытания по одной схеме для всех четырёх сплавов из стали?

2. Глава 1 написана сумбурно, в ущерб логики последовательного изложения материала, вместо того, чтобы естественным образом подойти к необходимости исследований, заявленных в цели работы. В частности, без всякой логики перехода вклинивается текст о влиянии сварки на механизмы разрушения материала (стр. 22). Какое это имеет отношение к тематике исследования? Исследование свойств материала при сварке – это целое научное направление в металловедении и машиностроении. В обзоре по тому или иному эффекту, зачастую, работы свалены в «кучу» (до 10-15 работ) без комментариев, что конкретно сделано этими авторами и в чём отличие результатов исследования. О каком «улавливании затвердевания материала» (стр. 24) или «среднем» напряжении (интенсивность напряжений, гидростатическое давление или что?) идёт речь?

3. Отсутствует теоретическая трактовка полученных результатов, особенно при высокой температуре. А результаты в определённой мере нетривиальные и противоречивы (см. рис. 3.13 и рис. 3.14). В пункте 3 настоящего отзыва дан комментарий возможных причин снижения и повышения циклической долговечности, связанных с учётом

реологической компоненты деформации (деформации ползучести), которая возникает за пределом упругости и при нормальной температуре. В связи с этим понятно, что скорость изменения нагрузки (напряжения) и деформации, общая длительность цикла нагружения оказывают существенное влияние на долговечность при циклическом термомеханическом нагружении. В этой связи число циклов до разрушения становится уже недостаточной характеристикой долговечности при малоцикловой усталости и необходимо учитывать временные характеристики процесса термомеханического разрушения. Именно в этом направлении и развиваются исследования в Научной Школе Института Механики Нижегородского государственного университета. Для этого достаточно ознакомиться с монографией: «Оценка усталостной долговечности элементов конструкций при термомеханическом нагружении» (И.А. Волков, И.С. Тарасов, Д.Н. Шипулин). Нижний Новгород, 2020, 138с, с которой, судя по списку литературы в диссертации, соискатель не знаком. В этой же связи, направление исследований по построению и адаптации долговечности малоцикловой усталости на основе «классических» подходов только на основе учёта циклов – малоперспективно. Конечно, можно ввести различного рода «поправочные» дополнительные коэффициенты (например, R_1 и R_2 – табл. 5.2) или различные коэффициенты показателей нелинейности m_i (табл. 5.3), справедливые лишь в рамках одного цикла нагружения, но, во-первых, эти поправочные коэффициенты лишены физического смысла, во-вторых, такой подход позволяет заниматься только интерполированием экспериментальных данных для конкретного вида и формы цикла, в-третьих, экстраполяция модели на другие виды напряжённого состояния, типы и формы циклов невозможна (нужно всегда пересчитывать параметры и увеличивать их количество).

4. Не приведён химический состав и марка никелевого сплава, численные значения его механических характеристик (в том числе, модуля Юнга и его зависимость от температуры, $\sigma_{0,2}$, σ_s и т.д.). Приведена лишь в главе 5 на рис. 5.2 «характерная» диаграмма деформирования на растяжение, но при какой температуре, в каком режиме нагружения («мягкое» или «жёсткое» нагружение), с какой скоростью нагружения (диаграмма существенно от неё зависит) она получена, не ясно. Всё это затрудняет анализ экспериментальные данных в главе 3. Не приведены численные

значения механических характеристик и для других материалов, в том числе, в зависимости от температуры.

5. Последний пункт в пункте «Положения, выносимые на защиту» банальный и очевидный, а предпоследний пункт – слишком общий, поскольку на самом деле возможность использования заявленных моделей можно реализовать лишь в узких рамках программ нагружения, рассмотренных в диссертации. Здесь же (второй и третий пункты), на защиту не выносятся ни «описания», ни «утверждения», выносятся полученные результаты.

6. К сожалению, диссертация написана в определённой мере небрежно, она просто тщательно «не вычитана». Приведём лишь ряд примеров. Стр. 19 «В элементах конструкций газотурбинных двигателей практически не реализуется напряжённое состояние»!? Стр. 27 «Хотя в настоящее время доступно множество критериев прогнозирования многоосного ресурса ...» (ресурс не может быть многоосным, нагружение – может). Стр. 17 «Накопление усталостных повреждений для ступенчатой последовательности нагружения исследовано» (где, кем, когда?). Стр. 108 «Одной из первых ... гипотез суммирования повреждений была предложена Марко и Старки [12]» (но [12] – это работа Вахромеева А.М.). Стр. 76. В четвёртом пункте выводов по главе 3 текст такой, что температурные эффекты относятся ко всем трём сплавам (никелевый, титановый, Д16Т), но на самом деле это относится лишь к титановому сплаву. Имеются опечатки, нарушения пунктуации и т. д., но в незначительном количестве.

Кроме этого можно указать и на следующие недостатки редакционного характера. В автореферате указано, что библиографический список содержит 179 наименований, а фактически в списке литературы диссертации 181 публикация.

Не приведены данные для 5 группы нагружения (стр. 66) в таблице 3.1, на которую идёт ссылка в тексте.

На рис. 3.2., рис. 3.4 не указан масштаб по оси ординат (для деформации), аналогично на рис. 3.3 также не приведён масштаб для деформации, указано лишь начальное её значение.

При какой температуре выполнены испытания, режимы которых представлены для стали ЭП517Ш в пунктах 4.1-4.4, не ясно. Лишь из пункта 4.5 следует, что, по-видимому, при «комнатной» температуре.

Несмотря на достаточно большое количество замечаний, отмеченные недостатки носят всё-же частный характер и не влияют на общее положительное отношение к рецензируемой работе.

10. Рекомендации по использованию результатов работы.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы к использованию при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на стадии проектирования в организациях машиностроительной и авиационной отраслей при расчётах на долговечность элементов конструкций в условиях малоциклового усталости при нормальных и повышенных температурах и многоосных сложных циклах нагружения, например, в АО «ОДК-Пермские моторы» (г. Пермь), ПАО «ОДК – Кузнецов» (г. Самара), Пермском национальном исследовательском политехническом университете, Самарском национальном исследовательском университете им. академика С.П. Королёва, Институте машиноведения РАН (г. Москва), Институте машиноведения УрО РАН (Екатеринбург), Институте механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь), ВИАМ (г. Москва), ЦИАМ (г. Москва), ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество», Тверском государственном техническом университете, Тульском государственном университете, Нижегородском государственном университете, Самарском государственном техническом университете и многих других научных и научно-исследовательских организациях, занимающихся родственными проблемами.

11. Заключение по диссертации. Оценивая работу в целом, считаем, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Совокупность выполненных научных исследований можно классифицировать как разработку методологии экспериментального исследования для получения новых данных о влиянии параметров сложных режимов циклического термомеханического нагружения на малоцикловую усталость конструкционных сталей и сплавов и феноменологических моделей для прогнозирования долговечности материалов в условиях малоциклового усталости.

Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы. Работа базируется на достаточном объеме полученных экспериментальных и теоретических результатов и вносит существенный

вклад в решение теоретических и прикладных вопросов специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Исходя из вышеизложенного, считаем, что диссертационная работа Лыковой Анастасии Васильевны соответствует специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, имеет важное научное и прикладное значение, соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 года (в редакции от 07.07.2021 года), а её автор – Лыкова Анастасия Васильевна – заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Отзыв рассмотрен и утвержден на расширенном заседании кафедры «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» под председательством заведующего кафедрой, д.ф.-м.н., профессора Радченко В.П.

Присутствовало – 25 человек.

Результаты голосования: «за» – 25 человек, «против» – нет, «воздержалось» – нет.

Протокол №4 от 17 ноября 2022 г.

Отзыв подготовлен:

заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет», доктор физико-математических наук (01.02.04), профессор

Радченко Владимир Павлович

17 ноября 2022г.

Служебный телефон:
8(846)3370443, 8(846)2423573
E-mail: radchenko.vp@samgtu.ru

Служебный адрес:
443100, г. Самара
ул. Молодогвардейская ,244,
Главный корпус СамГТУ,
кафедра «Прикладная математика и информатика»

Подпись Владимира Павловича Радченко
заверяю,
учёный секретарь ФГБОУ ВО
«Самарский государственный
технический университет»
доктор технических наук,



Малиновская Ю.А.