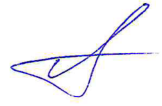


На правах рукописи



Морозов Андрей Павлович

**Стохастические модели релаксации остаточных напряжений
и кинетика микротвердости материала в поверхностно упрочненных
элементах конструкций в условиях ползучести**

01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Самара – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» на кафедре «Прикладная математика и информатика»

Научный руководитель

доктор физико-математических наук,
профессор
Радченко Владимир Павлович

Официальные оппоненты

Букатый Станислав Алексеевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», профессор кафедры «Прикладная механика»
Ермоленко Георгий Юрьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладная математика, информатика и информационные системы» ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения»

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь

Защита состоится «27» октября 2017 г. в 15 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.122.02 на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: Самара, ул. Галактионовская, 141, ауд. 33.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и на сайте

http://d99912202.samgtu.ru/sites/d99912202.samgtu.ru/files/morozov_dis.pdf

Отзывы на автореферат просьба высылать по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244, главный корпус.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета _____



Луц Альфия Расимовна

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Основными задачами современного машиностроения, в том числе автомобилестроения и авиадвигателестроения, является повышение срока службы и надежности изделий с одновременным снижением (или хотя бы не увеличением) их массы.

Одним из основных резервов повышения показателей надежности деталей является применение современных поверхностно упрочняющих технологий, при этом увеличение характеристик прочности, в частности сопротивления усталости, после поверхностного пластического деформирования детали связано с изменением физико-механического состояния поверхностного слоя и наличием в нем сжимающих остаточных напряжений.

Однако при эксплуатации в условиях высокотемпературной ползучести наблюдается релаксация наведенных остаточных напряжений. Поэтому возникает задача разработки методов решения краевых задач ползучести упрочненных элементов конструкций для оценки устойчивости остаточных напряжений к температурно-силовым нагрузкам. Решение этой задачи затрудняется тем, что деформации пластичности и ползучести при высоких температурах имеют существенный разброс. Поэтому требуется разработка не только стохастических моделей реологического деформирования, но и методов решения стохастических краевых задач механики упрочненных конструкций. И если в детерминированной постановке эти задачи находятся в стадии разработки и решены в некоторых частных случаях, то в стохастической постановке такого рода задачи вообще не рассматривались.

При упрочнении проявляется благоприятное влияние двух факторов: с одной стороны, сжимающих остаточных напряжений, а с другой, – появление в поверхностном слое особой структуры металла за счет динамики упрочнения. Поэтому исследование эффективности упрочнения должно развиваться не только в направлении изучения влияния остаточных напряжений, например, на повышение сопротивления усталости, но и в направлении изучения физико-механических характеристик материала упрочненного слоя (шероховатости поверхности, ее микротвердости, степени и глубины деформированного упрочнения, величины остаточных напряжений).

Вышеизложенное определяет актуальность дальнейших исследований и позволяет сформировать цель и задачи настоящей диссертационной работы.

Целью работы является разработка стохастических математических моделей ползучести поверхностно упрочненных элементов конструкций; комплексный анализ и систематизация результатов исследований по влиянию режимов пневмодробеструйной обработки, температурно-силовых нагрузок в условиях ползучести и многоцикловых усталостных испытаний на кинетику остаточных напряжений и характеристики микроструктурного состояния материала поверхностного слоя упрочненных деталей в вероятностно-статистической постановке.

Для реализации поставленной цели в работе поставлены следующие задачи:

- 1) проведение комплексного анализа стохастических полей реологических деформаций, микротвердости и шероховатости в пределах рабочей части цилиндра

дрических образцов из сплава АД1 для оценки влияния предварительной пластической деформации на последующую ползучесть;

2) проведение экспериментального исследования стохастических полей деформации ползучести по пространственно-временным координатам в полых поверхностно упрочненных цилиндрических образцах из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения при температуре $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$;

3) построение феноменологических стохастических уравнений ползучести в условиях одноосного и сложного напряженных состояний для сплава Д16Т при $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ и их экспериментальная проверка;

4) разработка методики идентификации оценок случайных величин стохастических уравнений ползучести на основе анализа локальных реологических деформаций в пределах одного образца, позволяющей сократить объем определяющих экспериментальных исследований и учитывать реальные флуктуации деформации ползучести относительно ее макросредней величины;

5) разработка метода численного решения стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочненных изделий и его реализация для полого цилиндра из сплава Д16Т в условиях одноосного растяжения;

6) исследование релаксации остаточных напряжений и получение статистических оценок для полей остаточных напряжений в процессе ползучести полого цилиндра из сплава Д16Т в различные временные сечения;

7) проведение комплексного анализа влияния режимов поверхностного пластического упрочнения гидро- и пневмодробеструйной обработкой, ползучести в условиях термоэкспозиции, многоциклового нагружения на формирование и кинетику остаточных напряжений, микротвердость и шероховатость, микроструктуру материала в поверхностно упрочненных плоских и цилиндрических образцах.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

1) выполнен комплексный анализ результатов экспериментальных исследований стохастических полей реологических деформаций, макроструктуры, микротвердости и шероховатости цилиндрических образцов из сплава АД1, на основании которого установлено, что развитие деформации пластичности и ползучести идет независимо для каждой из этих компонент; это позволяет не учитывать влияние предварительной пластической деформации на последующую ползучесть поверхностно упрочненных цилиндрических образцов;

2) впервые экспериментально исследовано распределение локальной деформации ползучести по пространственно-временным координатам в пределах одного поверхностно упрочненного цилиндрического образца из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения при температуре $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ и установлено, что в пределах одного образца разброс локальной деформации ползучести по отношению к макросредней может достигать 150-200%;

3) предложены феноменологические стохастические уравнения ползучести для сплава Д16Т при $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях одноосного и сложного напряженного состояний; разработана новая методика идентификации оценок случайных величин стохастических уравнений ползучести на основе анализа локальных реологических деформаций в пределах одного образца, позволяющая существенно сократить объем экспериментальных исследований и учитывать реаль-

ные флуктуации деформации ползучести относительно ее макросредней (среднеинтегральной) величины;

4) разработана методика численного решения стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочненных изделий, реализованная для полого цилиндра из сплава Д16Т в условиях одноосного растяжения при температуре $T = 125^\circ\text{C}$, на основании которой исследована релаксация остаточных напряжений и впервые получены статистические оценки для полей остаточных напряжений в процессе ползучести в различные временные сечения;

5) выполнены новые исследования влияния режимов упрочнения, температурных выдержек, ползучести и многоцикловых усталостных испытаний на кинетику микроструктуры и физико-механических параметров упрочнённых плоских и цилиндрических образцов из сплавов В95, Д16Т, ЭИ698ВД и стали 20, позволившие установить повышение значений микротвердости для всех типов упрочненных образцов по сравнению с неупрочненными, при этом распределение микротвердости по глубине поперечного шлифа крайне неоднородное: в упрочненной (периферийной) зоне значения микротвердости существенно выше, чем в более отдаленных от поверхности зонах;

6) установлено, что многоцикловые испытания на усталость и ползучесть в условиях термоэкспозиции приводят к уменьшению значений микротвердости в упрочненных образцах вплоть до исходного состояния для неупрочненных образцов, что в основном связано с релаксацией наведенных в процессе упрочнения остаточных напряжений.

Практическая значимость работы заключается в экспериментальном обосновании и разработке стохастических моделей ползучести материалов, создание на этой основе численного метода решения стохастических краевых задач ползучести поверхностно упрочненных цилиндрических изделий для получения статистических оценок полей остаточных напряжений в различные временные сечения. Такая информация является основой для создания методик прогнозирования ресурса упрочненных элементов конструкций по параметрическому критерию отказа – величине остаточных напряжений. С прикладной точки зрения полученные экспериментальные и теоретические результаты позволяют научно-обоснованно оценивать устойчивость наведенных при упрочнении остаточных напряжений в упрочненных деталях к температурно-силовым воздействиям в условиях ползучести. Полученные новые экспериментальные данные дополняют соответствующую информационную базу данных и востребованы в инженерной практике.

Положения, выносимые на защиту:

1) феноменологическая стохастическая модель ползучести для сплава Д16Т при $T = 125^\circ\text{C}$ в условиях одноосного и сложного напряженных состояний и результаты проверки ее адекватности экспериментальным данным;

2) методика идентификации оценок случайных величин стохастических уравнений ползучести на основе анализа локальных реологических деформаций в пределах одного образца, позволяющая сократить объем определяющих экспериментальных исследований и учитывать реальные флуктуации деформации ползучести относительно ее макросредней величины;

3) выводы из комплексного анализа результатов экспериментальных и теоретических исследований стохастических полей деформации ползучести и пластичности, макроструктуры, микротвердости и шероховатости цилиндрических образцов из сплава АД1, на основании которого обоснованно сформулирована гипотеза аддитивности стохастических полей распределения деформаций пластичности и ползучести, что позволяет не учитывать влияние предварительной пластической деформации на последующую ползучесть поверхностно упрочненных цилиндрических элементов конструкций;

4) метод численного решения стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочненного полого цилиндра при осевом растяжении и результаты его применения для статистических оценок полей остаточных напряжений в образцах из сплава Д16Т при $T = 125$ °С в различные временные сечения;

5) результаты экспериментальных и теоретических исследований по влиянию режимов упрочнения, температурных выдержек, ползучести и многоцикловых усталостных испытаний на кинетику остаточных напряжений, микроструктуру материала в упрочненной зоне и микротвердость в плоских и цилиндрических образцах из сплавов В95, Д16Т, ЭИ698ВД, позволивших установить, что увеличение микротвердости в упрочненных образцах по сравнению с неупрочненными связано в основном с наличием остаточных напряжений в упрочненном слое, а ее уменьшение после термоэкспозиции до значений в неупрочненных образцах – с релаксацией остаточных напряжений вследствие ползучести материала.

Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций, а также достоверность полученных результатов исследований подтверждается корректностью использования математического аппарата, законов механики деформируемого твердого тела; апробируемостью используемых численных и экспериментальных методов для определения полей остаточных напряжений, микроструктуры материала, микротвердости и шероховатости упрочненных образцов; адекватностью имеющихся модельных представлений физической картины исследуемых процессов; удовлетворительным совпадением результатов расчетов по предложенным стохастическим моделям с экспериментальными данными.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и списка источников из 181 наименования. Работа содержит 206 страниц основного текста, 98 рисунков, 21 таблицу и 2 приложения.

Апробация работы. Результаты научных исследований опубликованы в 56 печатных работах и были представлены на Пятом Международном форуме молодых ученых «Актуальные проблемы современной науки» (Самара, 2010 г.); Международных молодежных научных конференциях по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых» (Йошкар-Ола, 2010, 2011 гг.); VI, VII Всероссийских конференциях «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (Екатеринбург, 2010, 2012 гг.); VII, VIII, IX, X Всероссийских научных конференциях с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2010, 2011, 2013, 2016 гг.); III Международной научно-практической конференции «Новые технологии и инновационные разработки» (Тамбов, 2010 г.); VI, VII междуна-

родной научно-практической конференции «Wykszaicenie i nauka bez granic» (Пшемысль, Польша, 2010, 2011 гг.); V Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2011 г.); VI Всероссийской молодежной научной конференции «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений» (Тольятти, 2011 г.); VII, VIII Международной научно-практической конференции «Vedecky prumysl Evropskeho kontinentu» (Прага, Чехия, 2011, 2012 гг.); XXI Уральской школе металловедов-термистов «Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов» (Магнитогорск, 2012 г.); XVIII, XIX Международных конференций «Физика прочности и пластичности материалов» (Самара, 2012, 2015 гг.); симпозиуме с международным участием «Самолетостроение России. Проблемы и перспективы» (Самара, 2012 г.); Международном научно-техническом форуме, посвященном 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ (Самара, 2012 г.); Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2012 г.); Международной научно-технической конференции «Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций» (Киев, 2013 г.); Всероссийской молодежной научной конференции «Современное техническое образование и транспортный комплекс России: состояние, проблемы и перспективы развития» (Уфа, 2013 г.); III Международной научно-технической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития» (Курск, 2013 г.); Международной молодежной научной конференции «XII Королевские чтения» (Самара, 2013 г.); VI Международной школе с элементами научной школы для молодежи «Физическое материаловедение» (Тольятти, 2013 г.); IX международной научно-практической конференции «Perspektywiczne orgasowania są nauką i technikami» (Пшемысль, Польша, 2013 г.); IX международной научно-практической конференции «Achievement of high school» (София, Болгария, 2013 г.); II Всероссийской научно-практической конференции «Молодежь, наука, инновации» (Грозный, 2013 г.); VIII Российской научно-технической конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (Екатеринбург, 2014 г.); Пятой международной научно-практической конференции «Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении» (Киев, 2014 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и практические аспекты развития отечественного авиастроения» (Ульяновск, 2014 г.); Международном научно-техническом сборнике «Надежность и долговечность машин и сооружений» (Киев, Украина, 2015 г.); Материалы международной научно-практической конференции «Современное научное знание: теория, методология, практика» (Смоленск, 2015 г.); а также на научных семинарах «Механика и прикладная математика» Самарского государственного технического университета (рук. – профессор Радченко В.П. 2012-2016 гг.)

Работа проводилась в рамках проектов 2.1.1/3397, 2.1.1/13944, 1.312/2011, Государственного контракта №П818, выполняемых при поддержке и финансировании Министерстве образования и науки Российской Федерации, а также в рамках проектов РФФИ № 13-01-00699, 16-01-00249.

Внедрение. Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ «СамГТУ» и включены в лекционный материал курсов «Математические основы механики

поверхностного пластического упрочения», «Численные методы решения краевых задач механики деформируемого твердого тела» и «Реологические модели» основной образовательной программы подготовки аспирантов и бакалавров, а также в расчетную практику профильных отделов ПАО «Кузнецов» (г. Самара).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 57 печатных работах, из них 1 статья в журнале из базы Scopus, 6 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 24 статьи в сборниках трудов конференций и 26 тезисов докладов.

Личный вклад автора. Работы [9–16] выполнены самостоятельно, в основных работах [1–7] диссертанту принадлежит совместная постановка задачи и разработка методов решения, ему лично принадлежит алгоритмизация, реализация методов в виде программного комплекса и анализ результатов. В остальных работах [8, 17–24], опубликованных в соавторстве, автору в равной степени принадлежат как постановка задачи, так и результаты выполненных исследований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук профессору В.П. Радченко за постановку задачи и поддержку работы, а также доктору технических наук профессору В.Ф. Павлову за консультации по экспериментальной части исследования и постоянное внимание к работе.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, излагаются научная новизна и практическая значимость работы, формируются основные положения, выносимые на защиту, приводится структура диссертационной работы, а также сведения о публикациях автора.

Глава 1. Аналитический обзор и постановка задачи исследования

Излагаются общие сведения об остаточных напряжениях, их классификации; проанализировано влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости детали и статическую прочность в условиях хрупкого разрушения.

Выполнен анализ методов оценки характеристик длительной прочности, пластичности и ползучести, отмечены их возможности, преимущества и недостатки. Отмечается, что опытные данные по реологической деформации и времени до разрушения при ползучести имеют, зачастую, большой разброс. Сделан вывод о необходимости использования стохастических методов оценки характеристик длительной прочности, пластичности и ползучести, оценки показателей надежности элементов конструкций в условиях неупругого реологического деформирования и разрушения материала. Указано на существенное различие структуры полей макро- и микронеоднородностей реологических характеристик материала, выявленное, в частности, в работах Ю.П. Самарина и его учеников В.А. Кузнецова, Н.Н. Попова, В.П. Радченко и других. Отмечается, что построение стохастических моделей ползучести основано на обобщении детерминированных моделей, спектр которых достаточно широк и представлен работами В.И. Астафьева, Ю.И. Кадашевича и В.В. Новожилова, А.Ф. Никитенко, С.А. Шестерикова и А.М. Локощенко, Ю.Н. Работнова, Ю.Н. Радаева, В.П. Радченко,

Ю.П. Самарина и Я.М. Клебанова, О.В. Соснина, J.A. Betten, J.T. Boyle и J. Sprence и других ученых.

Рассмотрены аналитические и феноменологические методы формирования остаточных напряжений после процедуры упрочнения. Указывается, что значительный вклад в развитие теории остаточных напряжений внесли А.Н. Архипов, И.А. Биргер, В.Б. Бойцов, С.А. Бордаков, В.С. Вакулук, М.В. Гринченко, Г.Н. Гутман, С.И. Иванов, В.А. Кирпичев, Б.А. Кравченко, И.В. Кудрявцев, Ю.И. Няшин, И.А. Одинг, В.Ф. Павлов, Д.Д. Папшев, А.А. Поздеев, В.П. Радченко, Ю.П. Самарин, М.Н. Саушкин, М.Н. Степнов, А.М. Сулима, Ю.М. Темис, П.В. Трусов, П.А. Чепя, А.О. Чернявский, W. Gambin, H. Wern и многие другие ученые. Отмечено, что все известные экспериментальные методы позволяют определить одну или две компоненты тензора остаточных напряжений и не позволяют определить компоненты тензора остаточных пластических деформаций. Выделен научно-обоснованный феноменологический метод восстановления полной картины напряженно-деформированного состояния (НДС) в поверхностно-упрочненном слое гладких цилиндрических образцов, изложенный в ряде работ В.П. Радченко и М.Н. Саушкина.

Анализируются методы расчета релаксации остаточных напряжений в упрочненных деталях вследствие высокотемпературной ползучести. Отмечается, что эффективность остаточных напряжений в условиях повышенных температур определяется их устойчивостью и релаксационной стойкостью к температурно-силовым нагрузкам, экспериментально установлены факты положительного влияния упрочнения для деталей, эксплуатирующихся при повышенных температурах. Показано, что подавляющее число работ по релаксации остаточных напряжений в условиях высокотемпературного нагружения носит, во-первых, экспериментальный характер, а во-вторых, исследования в основном выполнены только для термоэкспозиции образцов (температурная выдержка без нагрузок).

По результатам анализа литературных источников в пункте 1.5 сформулированы основные задачи исследований настоящей работы.

Глава 2. Экспериментальное исследование стохастических полей реологических деформаций и физико-механических параметров поверхностного слоя цилиндрических и плоских образцов

Глава 2 посвящена анализу экспериментальных исследований стохастических полей реологических деформаций и физико-механических параметров (макроструктуры, микротвердости, шероховатости) поверхностного слоя цилиндрических и плоских образцов.

В пункте 2.1 выполнен комплексный анализ экспериментальных исследований стохастических полей реологических деформаций, макроструктуры, микротвердости и шероховатости цилиндрических образцов из сплава АД1, которые использовались в работе¹ для исследования одномерных полей деформации ползучести и пластичности в пределах рабочей части образцов, для дополни-

¹ Радченко В.П., Дудкин С.А., Тимофеев М.И. Экспериментальное исследование и анализ полей неупругих микро- и макродеформаций сплава АД-1 // Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та: Сер. физ.-мат. науки. Вып. 16. 2002. С. 111-117

тельного обоснования выдвинутой в этой работе гипотезы об отсутствии влияния деформаций ползучести и пластичности друг на друга и возможности строить стохастические модели для этих компонент реологической деформации независимо. Корреляционный анализ¹ показал слабую коррелированность полей пластической деформации и деформации ползучести и сильную коррелированность деформаций одного вида, даже при чередовании режимов упругопластической догрузки и выдержек во времени при постоянном напряжении. Кроме этого выполнены дополнительные исследования макроструктуры металла, микротвердости и шероховатости поверхности всех разрушенных в процессе испытаний образцов. Изучение макроструктуры проведено на металлографическом микроскопе МБС-10, измерение микротвердости – на микротвердомере ММ-6, измерение шероховатости – на приборе «Surftest SJ-201 P». Все указанные параметры для образцов, испытанных только в упругопластической области и в области ползучести, оказались совершенно различными. В частности, поверхность пластически деформированных образцов неровная, с ярко выраженными следами и полосами; в области же ползучести поверхность достаточно гладкая, с низкими значениями шероховатости.

Результаты комплексного анализа позволили обоснованно сделать вывод о возможности строить физические стохастические уравнения состояния для деформаций ползучести и пластичности независимо для каждой из компонент и, в частности, не учитывать влияние предварительной пластической деформации на последующую ползучесть поверхностно упрочненных цилиндрических образцов.

В пункте 2.2 описано исследование стохастических полей деформаций пластичности плоских образцов из сплава АД1. Представлены графики распределения деформации в продольном и поперечном направлениях после разных ступеней нагружения (разгрузка и замер деформаций осуществлялись при достижении макросредней деформации в 3%). Выявлено существенное количество выбросов и отклонений от общего тренда графика. Этот факт также подтверждает стохастическую природу неупругих деформаций. Установлено, что в пределах образца компоненты тензора деформаций пластичности могут отличаться на 20–30% и более.

В пункте 2.3 описаны результаты экспериментальных исследований стохастических полей деформаций ползучести в полых поверхностно-упрочненных цилиндрических образцах диаметром 15 мм с отверстием диаметром 5 мм и длиной рабочей части 60 мм из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения при температуре $T = 125$ °С. Приведена информация об установке для испытаний и методике проведения испытаний образцов на ползучесть. Для определения разброса деформации ползучести по длине образца на его рабочей части вдоль образующей наносились метки, по которым затем измеряли длины участков перед испытанием и в процессе ползучести через различные промежутки времени, и далее рассчитывалась деформация локальных участков p_{i-i+1} ($i = \overline{1,9}$). Растягивающие осевые напряжения σ_z составляли величины 353; 385; 406,2; 420 МПа. Приведены среднеинтегральные (по всей рабочей части образца) экспериментальные значения деформации ползучести, а также экспериментальные кривые

ползучести локальных участков образцов. В качестве примера на рис. 1, а, приведены среднеинтегральные кривые ползучести, а на рис. 1, б – кривые ползучести участков для образца №3 при $\sigma_z = 406,2$ МПа. Установлен значительный разброс локальной деформации ползучести по отношению к макросредней, достигающий величины 150-200% в пределах одного образца. В дальнейшем эти же образцы использовались для определения остаточных напряжений после ползучести методом колец и полосок.

Глава 3. Построение стохастической математической модели ползучести сплава Д16Т при $T = 125$ °С

В главе 3 изложена методика построения стохастической математической модели ползучести сплава Д16Т при $T = 125$ °С как для одноосного случая, так и для сложного напряженного состояния.

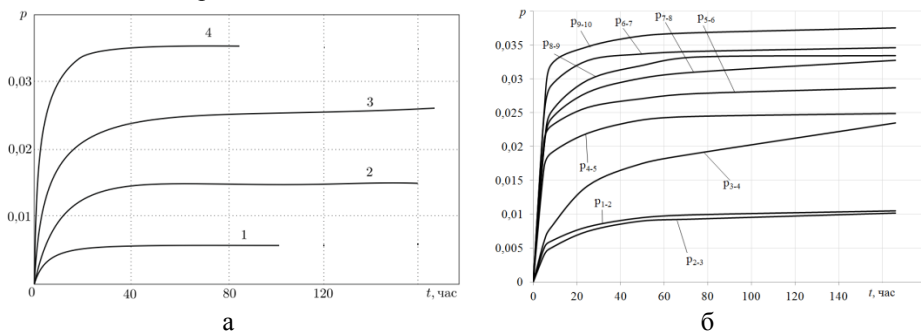


Рис. 1. Экспериментальные среднеинтегральные (а) и локальные (б) кривые ползучести сплава Д16Т в условиях осевого растяжения при $T = 125$ °С: Цифры: а – 1 – $\sigma_z = 353$ МПа; 2 – $\sigma_z = 385$ МПа; 3 – $\sigma_z = 406,2$ МПа; 4 – $\sigma_z = 420$ МПа; б – $\sigma_z = 406,2$ МПа

В пункте 3.1 описано построение одноосной стохастической модели на основе обобщения детерминированной модели Ю.П. Самарина² заменой в ней части детерминированных параметров на случайные: они и будут характеризовать индивидуальность деформации ползучести в пределах локального участка. В одноосном случае стохастическая модель для сплава Д16Т имеет вид:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= v(t) + w(t); \\
 \dot{v}(t) &= \begin{cases} \lambda \left[A_1 \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma^*} \right)^n - v(t) \right], & A_1 \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma^*} \right)^n > v(t), \\ 0, & A_1 \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma^*} \right)^n \leq v(t); \end{cases} \\
 \dot{w}(t) &= A_2 \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma^*} \right)^m,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где A_1 и A_2 – случайные величины, n , m , σ^* , λ – детерминированные величины. Здесь v – вязкопластическая, w – вязкая компоненты деформации ползучести p . Выполнено теоретическое обоснование стохастической модели, изложена мето-

² Самарин Ю.П. Уравнения состояния материалов со сложными реологическими свойствами. Куйбышев: Куйбышевский университет, 1979. 84 с.

дика идентификации детерминированных параметров и статистических оценок случайных величин A_1 и A_2 на основе экспериментальных данных локальных участков при всех четырех уровнях растягивающих напряжений. Для этого использовано решение (1) при $\sigma(t) = \sigma_0 = \text{const}$ в виде

$$p(t) = A_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma_*} \right)^n (1 - e^{-\lambda t}) + A_2 \left(\frac{\sigma}{\sigma_*} \right)^m t.$$

На основе регрессионного анализа с использованием кривых ползучести всех локальных участков определены выборки случайных величин A_1 и A_2 , найдены их статистические моменты, установлена статистическая некоррелированность этих величин. Аналитически описан случайный процесс развития деформации ползучести во времени при одноосном растяжении.

Применение данной методики идентификации оценок случайных величин A_1 и A_2 модели (1) применительно к сплаву Д16Т позволило, во-первых, более чем в 8 раз сократить объем экспериментальных исследований по сравнению с известным подходом, когда выборка строится на основании статистического набора среднеинтегральных кривых одноосной ползучести конкретных образцов, а во-вторых, учесть реальные флуктуации деформации ползучести по пространственной координате в пределах одного образца.

В пункте 3.2 произведено обобщение стохастической одноосной модели ползучести на сложное напряженное состояние аналогично тому, как в работе² осуществлен переход от детерминированной одноосной модели к модели при сложном напряженном состоянии. Приведены стохастические уравнения состояния.

В пункте 3.3 приведены основные выводы, полученные при построении стохастической математической модели ползучести сплава Д16Т при $T = 125$ °С.

Глава 4. Решение стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочнённого полого цилиндрического образца из сплава Д16Т в условиях растяжения при $T = 125$ °С

Глава 4 посвящена решению стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочнённого полого цилиндрического образца из сплава Д16Т в условиях растяжения при $T = 125$ °С.

В пункте 4.1 приведена постановка задачи главы 4.

В пункте 4.2 описан метод решения детерминированной краевой задачи ползучести упрочнённого полого цилиндрического образца. Решение этой задачи состоит из двух этапов. На первом этапе находится начальное напряженно-деформированное состояние после процедуры поверхностного пластического деформирования по методике, изложенной в работе³, согласно которой определяются осевые ($q_z = q_z(r)$), окружные ($q_\theta = q_\theta(r)$) и радиальные ($q_r = q_r(r)$) пластические деформации и соответствующие им компоненты тензора остаточных напряжений σ_z , σ_θ и σ_r ($R_1 \leq r \leq R_2$, R_1 и R_2 – внутренний и внешний радиусы). В

³ Радченко В.П., Саушкин М.Н. Феноменологический метод расчета остаточных напряжений и пластических деформаций в полом поверхностно упрочнённом цилиндрическом образце // Прикладная математика и информатика. – 2013. – Т. 77, № 1. – С. 143-152.

силу симметрии задачи остальные компоненты тензоров остаточных напряжений и пластических деформаций полагаются равными нулю. На втором этапе решается задача ползучести в классической постановке, но с начальным напряженно-деформированным состоянием. В итоге получены следующие соотношения для остаточных напряжений в процессе ползучести

$$\begin{aligned}\sigma_r(r, t) &= \int_{R_1}^r \frac{1}{\xi^3} \left(\int_{R_1}^{\xi} g(\eta, t) \eta d\eta \right) d\xi + \frac{C}{2} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{r^2} \right), \\ \sigma_\theta(r, t) &= \sigma_r(r, t) + r \frac{d\sigma_r(r, t)}{dr}, \\ \sigma_z(r, t) &= [\varepsilon_z^* - q_z(r) - p_z(r, t)]E + \mu[\sigma_r(r, t) + \sigma_\theta(r, t)], \\ g(r, t) &= \frac{E}{1 - \mu^2} \left[\frac{2 + \alpha}{1 + \alpha} q_r(r) + p_r(r, t) - p_\theta(r, t) - \right. \\ &\quad \left. - r \left(\frac{dp_\theta(r, t)}{dr} + \mu \frac{dp_z(r, t)}{dr} \right) + \frac{r}{1 + \alpha} (1 + \alpha\mu) \frac{dq_r(r)}{dr} \right], \\ C &= -\frac{2R_1^2 R_2^2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{\xi^3} \left(\int_{R_1}^{\xi} g(\eta, t) \eta d\eta \right) d\xi, \\ \varepsilon_z^*(t) &= \frac{1}{E} \sigma_{z0} + \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} \left(q_z(r) + p_z(r, t) - \frac{\mu}{E} (\sigma_r(r, t) + \sigma_\theta(r, t)) \right) r dr,\end{aligned}$$

где E , μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона, α – параметр анизотропии упрочнения (const), деформации ползучести $p_i(r, t)$ ($i = r, \theta, z$) вычисляются численно «шагами по времени» по выбранной теории ползучести.

В пункте 4.3 приводится численный метод решения стохастической краевой задачи ползучести упрочненного полого цилиндрического образца из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения. При решении краевой задачи будем исходить из упрощенной схемы, считая, что мы имеем достаточно длинный полый цилиндрический упрочненный стержень. Разбивая его на конечное число элементарных локальных образцов, предполагаем, что в пределах каждого такого образца свойства деформации ползучести описываются двумя случайными величинами A_1 и A_2 , значения которых в пределах элементарного образца не изменяются. Тогда конкретные значения случайных величин A_1 и A_2 в пределах конкретного образца и определяют индивидуальность его свойств ползучести. Каждой паре значений A_1 и A_2 будет соответствовать поле остаточных напряжений, а совокупность таких полей для всего набора элементарных образцов задаст спектр реализаций σ_r , σ_θ и σ_z . Применяя далее методы математической статистики, можно найти математическое ожидание, дисперсию, среднеквадратическое отклонение и другие статистические моменты функций $\sigma_r = \sigma_r(r, t)$, $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r, t)$ и $\sigma_z = \sigma_z(r, t)$.

Таким образом, численное решение стохастической задачи сводится к конечному числу решений детерминированной краевой задачи при выбранном количестве пар генерируемых значений случайных величин $\{A_1, A_2\}$.

Приведены графики расчетных случайных реализаций напряжений $\sigma_z = \sigma_z(h)$ по глубине поверхностного слоя ($h = R_2 - r$) в процессе ползучести при осевом растяжении $\sigma_{z0} = 353$ МПа в моменты времени $t = 10$ часов и 100

часов. Также представлены доверительные интервалы для осевой компоненты остаточных напряжений $\sigma_z = \sigma_z(h)$ по глубине упрочненного слоя h , когда растягивающая нагрузка σ_{z0} принимает значения {353; 386; 406,2 и 420} МПа в моменты времени $t = 10, 50$ и 100 ч с вероятностью $p = 0,99$. В качестве примера на рис. 2 приведены доверительные интервалы для остаточного напряжения $\sigma_z = \sigma_z(h)$ при двух значениях растягивающей нагрузки после ползучести в течение 100 часов, а на рис. 3 – исходная эпюр этого напряжения после процедуры упрочнения. Сравнительный анализ этой информации свидетельствует о существенной релаксации остаточных напряжений. Полученные результаты характеризуют степень устойчивости наведенных остаточных напряжений в цилиндрических полых изделиях из сплава Д16Т к осевым силовым нагрузкам в условиях стохастической неоднородности деформации ползучести по пространственной координате.

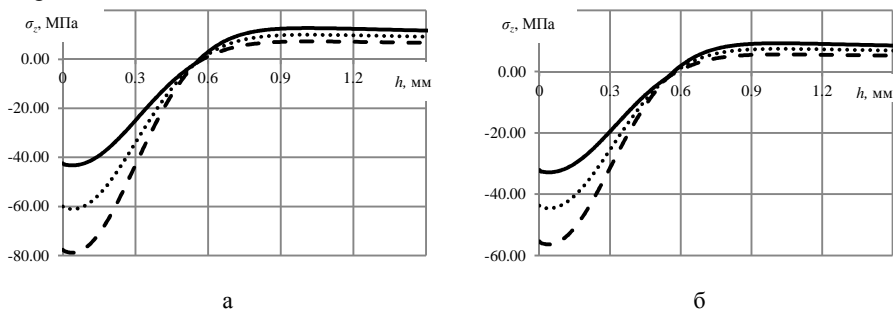


Рис. 2. Расчетные доверительные интервалы для $\sigma_z = \sigma_z(h)$ при доверительной вероятности 0,99 в момент $t = 100$ ч: а – $\sigma_{z0} = 385$ МПа; б – $\sigma_{z0} = 420$ МПа. Сплошная и штриховая линии – верхняя и нижняя границы; пунктирная линия – математическое ожидание

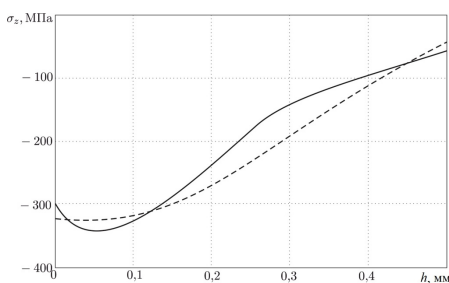


Рис. 3. Расчетные (штриховая линия) и экспериментальные (сплошная линия) эпюры остаточных напряжений после упрочнения в образцах из сплава Д16Т

Глава 5. Исследования влияния температурных выдержек, ползучести и многоцикловых усталостных испытаний на кинетику микроструктуры и физико-механических параметров упрочнённых плоских и цилиндрических образцов

Глава 5 посвящена анализу влияния различных режимов испытаний на характеристики макроструктуры и физико-механических параметров упрочненных плоских и цилиндрических образцов.

В пункте 5.1 приведена постановка задачи главы 5.

Пункт 5.2 посвящен исследованию влияния механической обработки, режимов поверхностного пластического деформирования и многоциклового нагружения на физико-механические характеристики плоских образцов из сплава ЭИ698ВД. Исследовалось влияние поверхностного пластического деформирования (ППД) на характеристики микротвердости, шероховатости и на изменение величины зерна по глубине упрочненного слоя. На всех упрочненных образцах наблюдалось существенное увеличение микротвердости и незначительное увеличение шероховатости по сравнению с неупрочненными образцами. Существенного изменения зерна в процессе ППД не наблюдалось. Показано, что многоциклового испытания на усталость при изгибе упрочненных образцов приводят к «релаксации» микротвердости в областях с максимальными значениями напряжений от изгиба, что, по-видимому, связано с релаксацией наведенных остаточных напряжений. В то же время усталостные испытания не оказывают влияния на шероховатость поверхности. Сделан вывод, что повышение микротвердости после процедуры упрочнения в образцах из сплава ЭИ698ВД связано с наличием остаточных напряжений, а не с изменением металлографической природы материала.

Пункт 5.3 посвящён исследованию поверхностного пластического упрочнения, температурных выдержек в условиях ползучести и многоциклового нагружения на микротвердость, шероховатость и металлофизическое состояние материала полых цилиндрических образцов из сплавов В95 и Д16Т. Представлены результаты измерения микротвердости и шероховатости поверхностного слоя, а также микротвердости по глубине поперечного шлифа образцов. Проведенные исследования позволили получить ряд новых результатов.

Пневмодробеструйная обработка значительно влияет на рост микротвердости (в особенности на образцах из сплава В95, где ее значения возрастают на 1000-3000 НК по сравнению с исходной структурой). Термоэкспозиция (в условиях ползучести) снижает значения микротвердости практически до исходного состояния, что особенно заметно для образцов из сплава В95. Пневмодробеструйная обработка повышает параметры шероховатости поверхностного слоя; последующая термоэкспозиция не оказывает влияния на данные параметры. Распределение микротвердости по глубине поперечного шлифа упрочненных цилиндрических образцов крайне неоднородное: в упрочненной (периферийной) зоне значения микротвердости значительно выше, чем в более отдаленных от поверхности зонах. Термоэкспозиция приводит к частичному уменьшению признаков наклепанной структуры. Внешним проявлением этого является релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое, наблюдаемая после термоэкспозиции, что обусловлено деформацией ползучести и процессом перераспределения напряжений во времени.

Установлено, что при упрочнении и при термоэкспозиции происходят изменения в металле по глубине вдоль радиуса образцов из сплавов Д16Т и В95. Но эти изменения, по всей видимости, не вносят существенных изменений в характеристики микротвердости, а их увеличение связано в первую очередь с наличием сжимающих остаточных напряжений.

Этот факт имеет важное значение, поскольку, во-первых, повышение сопротивления усталости поверхностно упрочненных (например, цилиндрических) деталей связывается со среднеинтегральными значениями от осевых остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя, а не с изменением механических параметров материала в области упрочнения⁴. Во-вторых, микротвердость можно использовать как диагностическую характеристику для оценки степени релаксации наведенных остаточных напряжений в процессе высокотемпературной ползучести. Однако здесь нужны обширные экспериментальные исследования по установлению феноменологической зависимости «микротвердость – остаточные напряжения», что не являлось целью настоящей работы.

Пункт 5.4 посвящен исследованию влияния поверхностного упрочнения и многоциклового нагружения на микротвердость цилиндрических деталей с галтелью. Представлены характеристики цилиндрических образцов из стали 20, а также данные по упрочнению и усталостным испытаниям. Установлено, что зарождение усталостной трещины происходит не в наименьшем сечении, а в сечении, расположенном под некоторым углом θ к наименьшему сечению. Приведены данные по измерению микротвердости поверхности образцов. Эти данные косвенно подтвердили выдвинутую ранее гипотезу о том, что положение опасного сечения в образце с галтельным переходом зависит от радиуса галтели. С увеличением радиуса опасное сечение перемещается в сторону наименьшего сечения образца.

В пункте 5.5 приведены основные выводы по разделу 5.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Выполнен комплексный анализ результатов экспериментальных исследований стохастических полей реологических деформаций, макроструктуры, микротвердости и шероховатости цилиндрических образцов из сплава АД1, позволивший установить, что развитие деформаций пластичности и ползучести идет независимо для каждой из этих компонент. Это позволяет строить физические стохастические уравнения состояния независимо для каждой из компонент и, в частности, не учитывать влияние предварительной пластической деформации на последующую ползучесть поверхностно упрочненных цилиндрических образцов.
2. Впервые экспериментально исследовано распределение локальной деформации ползучести по пространственно-временным координатам в пределах одного поверхностно упрочненного цилиндрического образца из сплава Д16Т в условиях осевого растяжения при температуре $T = 125$ °С и установлено, что в пределах одного образца разброс локальной деформации ползучести по отношению к макросредней может достигать 150-200%.

⁴ Павлов В.Ф., Кирпичев В.А., Вакулюк В.С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных деталей по остаточным напряжениям. Самара: «Издательство СНЦ РАН», 2012. 125 с.

3. Предложены феноменологические стохастические уравнения ползучести для сплава Д16Т при $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ в условиях одноосного и сложного напряженно-го состояний; разработана новая методика идентификации оценок случайных величин стохастических уравнений ползучести на основе анализа локальных реологических деформаций в пределах одного образца, позволяющая существенно сократить объем экспериментальных исследований и учитывать реальные флуктуации деформации ползучести относительно ее макросредней (среднеинтегральной) величины. Аналитически описан случайный процесс развития деформации ползучести во времени при одноосном растяжении.
4. Разработана методика численного решения стохастической краевой задачи ползучести поверхностно упрочненных изделий, реализованная для полого цилиндра из сплава Д16Т в условиях одноосного растяжения при температуре $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$, на основании которой исследована релаксация остаточных напряжений и впервые получены статистические оценки для полей остаточных напряжений в процессе ползучести в различные временные сечения. Установлено, что если ориентироваться на нижнюю границу доверительного интервала, то максимальное значение осевой компоненты сжимающих остаточных напряжений в процессе ползучести за 100 часов в зависимости от приложенной нагрузки [353; 420] МПа уменьшилось (по модулю) от 4 раз до порядка по сравнению с начальным состоянием после упрочнения. Полученные результаты свидетельствуют о крайне отрицательном влиянии растягивающей нагрузки на устойчивость (способность сохраняться) остаточных напряжений в образцах из сплава Д16Т в исследованном температурно-силовом диапазоне внешних нагрузок.
5. Выполнен комплексный анализ влияния режимов поверхностно пластического упрочнения пневмодробеструйной обработкой, термоэкспозиции, многоциклового нагружения на характеристики микротвердости, шероховатости и микроструктуру материала упрочненных плоских и цилиндрических образцов. Установлено повышение значений микротвердости для всех типов упрочненных образцов по сравнению с неупрочненными, связанное в основном с наличием сжимающих остаточных напряжений в приповерхностном слое упрочненных образцов. Распределение микротвердости по глубине поперечного шлифа упрочненных цилиндрических образцов крайне неоднородное: в упрочненной периферийной зоне значения микротвердости существенно выше, чем в более отдаленных от поверхности зонах. Показано, что многоцикловые испытания на усталость и ползучесть при термоэкспозиции приводят к уменьшению микротвердости в упрочненных образцах вплоть до исходного состояния неупрочненных образцов, что в основном связано с релаксацией наведенных в процессе упрочнения остаточных напряжений.
6. Микроструктурный анализ поперечного сечения упрочненных образцов позволил выявить наличие трех ярко выраженных зон: сильно наклепанной поверхностной, дефектной основной и слабо дефектной глубинной. Термоэкспозиция приводит к частичному уменьшению признаков наклепанной структуры. Внешним проявлением этого является уменьшение значений микротвердости в процессе термоэкспозиции вследствие релаксации остаточных

напряжений в поверхностно упрочненном слое, что в основном обусловлено деформацией ползучести и процессом перераспределения напряжений во времени.

Основные публикации по теме диссертации

В изданиях, входящих в базу Scopus

1. Радченко В.П., Саушкин М.Н., Морозов А.П. Стохастическая модель для расчета остаточных напряжений в поверхностно упрочненном полом цилиндра в условиях ползучести // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – №1. – С. 181-207.

В изданиях из перечня ВАК

2. Радченко В.П., Морозов А.П. Влияние многоцикловых усталостных испытаний на физико-механическое состояние упрочненного слоя плоских образцов // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки, 2009. Вып. 3(25). С. 158-165.
3. Радченко В.П., Морозов А.П. Влияние режимов упругопластического нагружения и испытаний на ползучесть на характеристики поверхностного слоя образцов из алюминия АД-1 // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. Том 18, вып. 4, 2013. С. 1823-1824.
4. Радченко В.П., Морозов А.П. Исследование изменения макроструктуры металла упрочненных цилиндрических образцов из сплавов В95 и Д16Т вследствие температурных выдержек и многоцикловых усталостных испытаний // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки, 2010. № 7 (28). С. 107-112.
5. Радченко В.П., Морозов А.П. Экспериментальное исследование влияния пневмодробеструйной обработки, температурных выдержек и многоцикловых усталостных испытаний на физико-механическое состояние упрочненного слоя цилиндрических образцов из сплавов В95 и Д16Т // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки, 2010. № 5(21). С. 222-228.
6. Радченко В.П., Морозов А.П., Лунин В.В. Исследование кинетики физико-механических параметров упрочненных образцов из сплавов В95 и Д16Т вследствие температурных выдержек и многоцикловых усталостных испытаний // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки, 2012. № 1 (26). С. 123-131.
7. Радченко В.П., Кирпичев В.А., Лунин В.В., Филатов А.П., Морозов А.П. Экспериментальное исследование кинетики остаточных напряжений в упрочненных полых цилиндрических образцах из сплава Д16Т при осевом растяжении в условиях ползучести // Вестник Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки, 2016. Т. 20. № 2. С. 290-305

В других изданиях

8. Кирпичев В.А., Семёнова О.Ю., Денискина Е.А., Морозов А.П. Оценка погрешности расчёта критической глубины нераспространяющейся трещины усталости в упрочнённых деталях // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды Десятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. Самара: СамГТУ, 2016. С. 109-113.
9. Морозов А.П. Анализ изменения физико-механических характеристик поверхностного слоя в зависимости от различных режимов испытаний на пластичность и ползу-

- честь // V Международная школа «Физическое материаловедение», VI Всероссийская молодежная научная конференция "Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений". Тезисы докладов. 26 сентября – 1 октября 2011 г. Тольятти. С. 232
10. Морозов А.П. Влияние пластической деформации на параметры физико-механического состояния поверхностного слоя плоских образцов из алюминия АД-1 // *Materials VIII Mezinarodni vedecko-prakticka conference "Vedecky prumysl Evropskeho kontinentu – 2012"*. 27 listopadu – 05 prosincu 2012 roku. Praha. P. 23-25.
 11. Морозов А.П. Влияние пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции на металлофизические характеристики цилиндрических образцов из сплава Д16Т // *Материалы международной научной конференции «Образование и наука без границ»*. 7-15 декабря 2011 г. Польша. С. 65-66.
 12. Морозов А.П. Влияние режимов пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции на изменение физико-механического состояния поверхностного слоя // *II межвузовская научно-практическая конференция «Новые технологии и инновационные разработки»*. Материалы конференции. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет. 2010 г. С. 108-109.
 13. Морозов А.П. Влияние схемы упрочнения поверхности образцов из стали 20 на распределение остаточных напряжений в опасном сечении образцов // *Материалы III Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития»*. Курск. 2013. С. 133-136.
 14. Морозов А.П. Исследование характеристик поверхностного слоя алюминия В95 и Д16Т после пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции // *Сборник тезисов XIX международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов»*. Самара. 2015. С. 227.
 15. Морозов А.П. Распределение остаточных напряжений в опасном сечении образцов из стали 20 при испытании на усталость // *VI Международная школа с элементами научной школы для молодежи «Физическое материаловедение»*. Тольятти. 2013. С. 73-75.
 16. Морозов А.П. Экспериментальное исследование влияния усталостных испытаний на характеристики упрочненного слоя плоских образцов из сплава ЭИ698ВД // *Труды 5-го Международного форума (10-й Международной конференции) «Актуальные проблемы современной науки. Естественные науки. Части 1-3. Математика. Математическое моделирование. Механика»*. Самара: СамГТУ. 2009. С. 135-143.
 17. Морозов А.П., Лунин В.В. Комплексное исследование остаточных напряжений, предела выносливости и физико-механического состояния материала поверхностно упрочненных цилиндрических образцов с надрезами из сплавов В95 и Д16Т // *VII Российская научно-техническая конференция «Механика микронеоднородных материалов и разрушение»*. Тезисы докладов. Екатеринбург. 2012. С. 140.
 18. Морозов А.П., Смыслов В.А. Анализ параметров поверхностного слоя алюминиевых образцов после пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции. *Materialy IX międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji «Perspektywiczne opracowania są nauką i technikami-2013»*. 07 - 15 listopada 2013 roku. Volume 39. Techniczne nauki. Польша. С. 32-33
 19. Радченко В.П., Морозов А.П. Анализ влияния пластической деформации на изменение физико-механического состояния поверхностного слоя плоских образцов из алюминия АД-1 // *Труды девятой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи»*. Часть 1. Самара: СамГТУ, 2013. С. 184-187.

20. Радченко В.П., Морозов А.П. Влияние температурных полей и многоцикловых испытаний на физико-механическое состояние поверхностно упрочненного слоя деталей // Международная научно-техническая конференция «Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций». Материалы конференции. Киев, Украина. 2013. С. 239-241.
21. Радченко В.П., Морозов А.П. Изменение структуры и физико-механических характеристик поверхностного слоя под влиянием пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции // *Materialy VI miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji "Nauka I wyksztaicenie bez granic – 2010"*. 07-15 grudnia 2010 roku. Volume 23. Techniczne nauki. Болгария. Р. 88-90.
22. Радченко В.П., Морозов А.П. Исследование характеристик поверхностного слоя образцов из алюминия АД-1 в зависимости от режимов упругопластического нагружения и испытаний на ползучесть. *Materialy VII Mezinardni vedecko-prakticka conference «Vedecky prumysl Evropskeho kontinentu – 2011»*. 27.11.2011 – 05.12.2011. Чехия. С. 13-15
23. Радченко В.П., Морозов А.П. Комплексное исследование физико-механического состояния поверхностного слоя после различных режимов испытаний // Симпозиум с международным участием «Самолетостроение России». Самара: СГАУ, 2012. С. 331-333.
24. Смыслов В.А., Морозов А.П. Разработка методики и программного обеспечения для решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений. Материалы за IX международна научна практична конференция «Achievement of high school - 2013». Том 44. Технологии. Болгария. 2013. С. 49-51.

Научное издание

Морозов Андрей Павлович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук на тему:

Стохастические модели релаксации остаточных напряжений и кинетика
микротвердости материала в поверхностно упрочненных элементах конструкций
в условиях ползучести

Подписано в печать 23.06.2017.

Формат 60 x 90 1/16. Набор компьютерный.

Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 484.

Отпечатано на ризографе.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной печати

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.