

На правах рукописи



Лунин Валентин Валериевич

**Методы расчёта напряжённно-деформированного  
состояния и предела выносливости упрочнённых  
цилиндрических деталей с концентраторами  
напряжений при ползучести**

01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Самара – 2015

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика и информатика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: *Радченко Владимир Павлович*,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Официальные оппоненты: *Аптуков Валерий Нагимович*,  
доктор технических наук, заведующий кафедрой фундаментальной математики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

*Букатый Станислав Алексеевич*,  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», профессор кафедры «Прикладная механика»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится 8 октября 2015 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета ДМ212.188.05 на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета и Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Пермского национального исследовательского политехнического университета (<http://pstu.ru>).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,

доктор технических наук, доцент



*Щербинин А. Г.*

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Центральной проблемой современного машиностроения и авиадвигателестроения, в частности, является разработка теоретико-экспериментальных и технологических методов для повышения срока службы и надёжности изделий при одновременном снижении их материалоёмкости, при этом одна из основных задач состоит в повышении нижней границы сопротивления усталости. Одним из резервов повышения сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений являются технологические процедуры поверхностного пластического упрочнения, в результате применения которых в приповерхностном слое наводятся «благоприятные» сжимающие остаточные напряжения (ОН).

Ряд проблем сопротивления усталости в связи с действием остаточных напряжений требует дальнейшего исследования: влияние масштабного фактора для однотипных элементов конструкций, различная степень концентрации напряжений, рабочая температура в поле внешних нагрузок, параметры качества поверхностного слоя, среди которых остаточные напряжения играют ключевую роль.

Оценка влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости производится либо качественно, либо с использованием остаточных напряжений на поверхности детали, в то время как эксперименты свидетельствуют о значительном влиянии характера распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя. Недостаточно данных о влиянии остаточных напряжений для деталей с концентраторами, изготовленных из высокопрочных алюминиевых и жаропрочных сплавов, особенно при повышенных температурах, вызывающих деформации ползучести, которые приводят к существенной их релаксации и снижению эффективности упрочнения.

Таким образом, разработка методик оценки влияния характера распределения остаточных напряжений на сопротивление усталости при нормальной температуре и в условиях высокотемпературной ползучести с учётом масштабного фактора является важной задачей как с теоретических позиций, так и обусловленной потребностями практики. Вышеизложенное и определяет актуальность тематики диссертационной работы.

**Целью диссертационной работы** является разработка и реализация экспериментальных и расчётных методик оценки релаксации остаточных напряжений в полых цилиндрических образцах под действием растягивающей нагрузки в условиях ползучести, обоснование использования критерия среднеинтегральных остаточных напряжений для оценки предела выносливости поверхностно упрочнённых цилиндрических деталей с различной степенью концентрации напряжений.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Разработана методика численного расчёта остаточных напряжений в поверхностных слоях цилиндрических образцов с круговым надрезом полукруглого профиля с использованием распределения остаточных напряжений гладкого образца, определённых экспериментальными способами, позволяющая существенно сократить базовые экспериментальные исследования по определению остаточных напряжений для образцов с концентраторами.

2. Проведены новые экспериментальные и теоретические исследования в области многоциклового усталости при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых дробью полых цилиндрических образцов с надрезами из высокопрочных алюминиевых сплавов В95 и Д16Т при нормальной температуре как до, так и после термоэкспозиции при температуре 125°С, которые позволили расширить область применимости критерия среднеинтегральных остаточных напряжений для оценки предела выносливости для условий высокотемпературной ползучести при термоэкспозиции.
3. Проведены новые экспериментальные и теоретические исследования в области многоциклового усталости при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых обкаткой роликом сплошных цилиндрических образцов большого диаметра с надрезами из стали 40ХН (диаметр 45 мм) и стали 20 (диаметр 50 мм) при нормальной температуре, позволившие расширить область применимости критерия среднеинтегральных остаточных напряжений для оценки предела выносливости с учётом масштабного фактора на образцы большого диаметра.
4. Обоснована возможность использования теории влияния остаточных напряжений на предел выносливости в условиях концентрации применительно к упрочнённым деталям из высокопрочных алюминиевых сплавов В95 и Д16Т, сталей 40ХН и 20, и на этой основе создан метод расчёта предела выносливости таких деталей при нормальной температуре, а для деталей из сплавов В95 и Д16Т — и при повышенных температурах.
5. Выполнен цикл новых экспериментальных и теоретических исследований по влиянию растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений вследствие ползучести в упрочнённых пневмодробеструйной обработкой полых цилиндрических образцах из сплава Д16Т при температуре 125 °С; установлено существенное возрастание скорости релаксации остаточных напряжений с увеличением величины растягивающей нагрузки.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика численного расчёта остаточных напряжений в поверхностных слоях цилиндрических образцов с круговым надрезом полукруглого профиля с использованием распределения остаточных напряжений гладкого образца, определённых экспериментальными способами.
2. Результаты экспериментальных и теоретических исследований в условиях многоциклового усталости при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых дробью полых цилиндрических образцов с надрезами из алюминиевых сплавов В95 и Д16Т при нормальной температуре как до, так и после термоэкспозиции при температуре 125°С.
3. Результаты экспериментальных и теоретических исследований в условиях многоциклового усталости в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых обкаткой роликом сплошных цилиндрических образцов большого диаметра с надрезами из стали 40ХН (диаметр 45 мм) и стали 20 (диаметр 50 мм) при нормальной температуре.
4. Обоснование возможности использования теории влияния остаточных напряжений на предел выносливости в условиях концентрации применительно к упрочнённым деталям из высокопрочных алюминиевых сплавов В95

и Д16Т, сталей 40ХН и 20 и созданный на этой основе метод расчёта предела выносливости таких деталей при нормальной температуре, а для деталей из сплавов В95 и Д16Т — и при повышенных температурах.

5. Методика и результаты новых экспериментальных и теоретических исследований по влиянию растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений вследствие ползучести в упрочнённых пневмодробеструйной обработкой полых цилиндрических образцах из сплава Д16Т при температуре 125°С.

**Практическая значимость работы** в теоретическом плане заключается в разработке методики расчёта релаксации остаточных напряжений в полых цилиндрических образцах под действием растягивающей нагрузки и расширении области применимости критерия среднеинтегральных остаточных напряжений для оценки предела выносливости с учётом масштабного фактора и высокотемпературной ползучести. С прикладной точки зрения разработанная методика, реализованная в виде программного комплекса, позволяет провести расчёт релаксации остаточных напряжений в упрочнённых деталях и на этой основе, прогнозировать предел выносливости поверхностно упрочнённых деталей с учётом релаксации остаточных напряжений.

**Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается корректностью использования математического аппарата, законами механики деформируемого твёрдого тела; апробируемостью используемых численных и экспериментальных методов для определения полей остаточных напряжений; экспериментальной проверкой используемых гипотез и критериев для оценки предела выносливости и результатов решения задач релаксации остаточных напряжений в цилиндрических изделиях.

**Структура и объём диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав и списка источников из 233 наименований. Работа содержит 170 страниц основного текста, 70 рисунков, 15 таблиц и 2 приложения.

**Апробация работы.** Результаты научных исследований опубликованы в 31 печатной работе и были представлены на конференциях различного уровня: на международной научно-технической конференции «Прочность материалов и элементов конструкций» (г. Киев, 2010, 2011 гг.), на Четвёртой международной научно-технической конференции «Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении» (г. Киев, 2011, 2014 гг.), на Международной научно-технической конференции «Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций» (г. Киев, 2013 г.), на Шестой, Седьмой, Восьмой, Девятой Всероссийских научных конференциях с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2009, 2010, 2011, 2013 гг.), на Второй Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2009 г.), на Международной молодёжной научной конференции по естественно-научным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу — творчество молодых» (г. Йошкар-Ола, 2010 г.), на Международной молодёжной научной конференции «XVIII Туполевские чтения» (г. Казань, 2010 г.), на Региональной научно-практической конференции, посвящённой 50-летию первого полёта человека в космос (г. Самара, 2011 г.), на II Международной дистанционной научно-технической конференции «Актуаль-

ные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения» (г. Орёл, 2011 г.), на XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых учёных «Современная техника и технологии» (г. Томск, 2011 г.), на VII Российской конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (г. Екатеринбург, 2012 г.), на Симпозиуме «Самолётостроение России. Проблемы и перспективы» (г. Самара, 2012 г.), на Международном научно-техническом форуме, посвящённом 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ (г. Самара, 2012 г.), на конференции «XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред» (г. Пермь, 2013 г.), на Всероссийской научной конференции, посвящённой 75-летию со дня рождения доктора физико-математических наук, профессора Г. И. Быковцева «Актуальные проблемы математики и механики» (г. Самара, 2013 г.), на Всероссийской молодёжной научной конференции, посвящённой 55-летию Уфимского института путей сообщения, филиала Самарского государственного университета путей сообщения (СамГУПС) (гг. Уфа, Самара, 2013 г.), на Международной молодёжной научной конференции «XII Королёвские чтения» (г. Самара, 2013 г.), на 2-ой Международной научно-технической конференции «Динамика и виброакустика машин» (г. Самара, 2014 г.), на Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, 2014 г.), на VIII Российской научно-технической конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2014 г.), на III Всероссийской конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения академика Ю. Н. Работнова «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций» (г. Новосибирск, 2014 г.), III Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и практические аспекты развития Отечественного Авиастроения» (г. Ульяновск, 2014 г.), на научных семинарах «Механика и прикладная математика» Самарского государственного технического университета (рук. д.ф.-м.н., профессор В. П. Радченко, 2013–2015 гг.); кафедры «Вычислительная математика и механика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (рук. д.т.н., профессор Н. А. Труфанов, 2015 г.), Института механики сплошных сред УрО РАН (рук. академик РАН В. П. Матвеев, 2015 г.).

**Работа выполнялась при финансовой поддержке** Министерства образования и науки (проект №2.1.1/13944) и в рамках государственного задания в части проведения научно-исследовательских работ (№1.312.2011).

**Внедрение.** Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры «Прикладная математика и информатика» ФГБОУ ВПО «СамГТУ» и включены в лекционный материал курсов «Математические основы механики поверхностного пластического упрочнения» и «Ползучесть и релаксация в поверхностного упрочнённых конструкциях» основной образовательной программы подготовки аспирантов, а также в расчётную практику профильных отделов АО «Ракетно-космический Центр «Прогресс» (г. Самара) и ОАО «Кузнецов» (г. Самара)».

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 32 печатных работах, из них 7 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 8 статей в сборниках трудов конференций и 17 тезисов докладов, основные 15 из которых приведены ниже.

**Личный вклад автора.** Работа [15] выполнена самостоятельно, в основных работах [1–7] диссертанту принадлежит совместная постановка задач, совместное проведение экспериментальных исследований, анализ и систематизация результатов, проведение расчётов. В остальных работах, опубликованных в соавторстве, автору в равной степени принадлежат как постановка задач, так и результаты выполненных экспериментальных и теоретических исследований.

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

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определяются цели исследования, излагается научная новизна и практическая значимость работы, формируются основные положения, выносимые на защиту, приводятся структура диссертационной работы, а также сведения о публикациях автора.

### **Глава 1. Аналитический обзор и постановка задач исследования.**

**В пункте 1.1** излагаются общие сведения об остаточных напряжениях, их классификации; проанализировано влияние остаточных напряжений на статическую прочность, а также на характеристики сопротивления усталости деталей.

**В пункте 1.2** выполнен анализ экспериментальных методов определения остаточных напряжений в пластинах, цилиндрах, трубах, в деталях с различными концентраторами напряжений. Отмечается, что значительный вклад в развитие теории определения остаточных напряжений и их роли в сопротивлении усталости, коррозии, короблению деталей внесли отечественные учёные А. Н. Архипов, В. Ф. Балашов, М. А. Балтер, И. А. Биргер, В. Б. Бойцов, С. А. Бордаков, Л. А. Гликман, М. В. Гринченко, Г. Н. Гутман, Н. Н. Давиденков, С. И. Иванов, Н. В. Калакуцкий, В. А. Кирпичёв, Б. А. Кравченко, И. В. Кудрявцев, Ю. И. Няшин, И. А. Одинг, В. Ф. Павлов, Д. Д. Папшев, А. А. Поздеев, Ю. В. Полоскин, В. П. Радченко, Ю. П. Самарин, М. Н. Саушкин, М. Н. Степнов, Ю. М. Темис, П. В. Трусков, М. Л. Туровский, И. А. Умнов, П. А. Чепа, А. О. Чернявский, А. А. Шапарин, Л. М. Школьник, а также зарубежные учёные И. Алмен, Г. Бюлер, О. Дои, Г. Закс, А. Тум, W. Gambin, H. Wern и др.

На основании анализа исследований, посвящённых определению остаточных напряжений в гладких деталях и деталях с концентраторами напряжений, делается вывод о том, что ни один из известных методов не лишён недостатков, но для дальнейших исследований выбран метод колец и полосок С. И. Иванова, поскольку объектом экспериментов являлись цилиндрические детали (гладкие и с концентраторами). Отмечается, что необходимо теоретическое и экспериментальное исследование влияния на остаточные напряжения типа и характера концентраторов, специфики технологии упрочнения, температурных нагрузок и других параметров цилиндрических деталей.

**В пункте 1.3** рассматриваются аналитические и феноменологические методы формирования остаточных напряжений после процедуры упрочнения. Отмечено, что все известные 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 НДС в поверхностно-упрочнённом слое гладких цилиндрических образцов, изложенный в ряде работ В. П. Радченко и М. Н. Саушкина.

**В пункте 1.4** анализируются методы расчёта релаксации остаточных напряжений в упрочнённых 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 выполнены только для термоэкспозиции образцов.

**В пункте 1.5** рассматривается влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости поверхностно упрочнённых деталей машин. Для оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости используются два критерия: остаточные напряжения  $\sigma_{\text{ост}}^{\text{пов}}$  на поверхности опасного сечения детали и среднеинтегральные остаточные напряжения  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали, равной критической глубине  $t_{\text{кр}}$  нераспространяющейся трещины усталости. Отмечается, что расчёт приращении предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей по критерию  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  приводит к более точным результатам, так как этот критерий учитывает не только величину остаточных напряжений, но и характер их распределения по толщине поверхностного слоя опасного сечения детали.

По результатам анализа литературных источников в пункте 1.5 сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

## **Глава 2. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённых сплошных и полых цилиндрических образцов.**

Глава 2 посвящена разработке методик определения остаточных напряжений и их влиянию на предел выносливости упрочнённых пневмодробеструйной обработкой цилиндрических гладких образцов и образцов с круговыми надрезами полукруглого профиля из высокопрочных алюминиевых сплавов В95, Д16Т и упрочнённых обкаткой роликом образцов из сталей 20 и 40ХН.

**В пункте 2.1** представлены механические характеристики исследуемых материалов, образцы для испытаний на усталость и определения остаточных напряжений, приведены режимы упрочнения образцов из сплавов В95 и Д16Т при пневмодробеструйной обработке и из сталей 20 и 40ХН при обкатке роликом, режимы термоэкспозиции неупрочнённых и упрочнённых образцов из сплавов В95 и Д16Т, описана подготовка образцов к определению остаточных напряжений.

**В пункте 2.2** приведена методика экспериментального определения остаточных напряжений в упрочнённых сплошных и полых цилиндрических образ-



цах, описаны приспособления и оборудования для определения остаточных напряжений, представлен анализ результатов определения остаточных напряжений различными методами (колец, полосок, удаления части цилиндрической поверхности) после пневмодробеструйной обработки, на основании которого делается вывод о том, что все используемые в данном диссертационном исследовании экспериментальные методы приводят к практически одинаковым результатам.

**В пункте 2.3** приведены результаты определения остаточных напряжений в гладких образцах. В полых образцах из сплавов В95 и Д16Т диаметром 15 мм с отверстием 5 мм остаточные напряжения исследовались как непосредственно после пневмодробеструйной обработки (ПДО), так и после ПДО с последующей термоэкспозицией при  $T = 125$  °С в течение 100 часов.

Распределение остаточных напряжений в этих образцах по толщине поверхностного слоя  $a$  приведено на рис. 1, из которого следует, что термоэкспозиция упрочнённых ПДО образцов приводит к снижению (релаксации) сжимающих остаточных напряжений вследствие ползучести, особенно в образцах из сплава В95.

На рис. 2 приведены экспериментальные значения (точки) осевых  $\sigma_z^{\text{res}}$  и окружных  $\sigma_\theta^{\text{res}}$  остаточных напряжений по толщине упрочнённого слоя  $a$  в обкатанных роликом при усилии  $P = 1,0$  кН сплошных образцах диаметром 45 мм из стали 40ХН. Здесь наблюдается существенное расслоение осевых и окружных остаточных напряжений, что теоретически описано введением параметра анизотропии упрочнения  $\alpha$  в соотношении  $q_z = \alpha q_\theta$  ( $q_z$  и  $q_\theta$  — осевая и окружная компоненты тензора пластических деформаций после упрочнения соответственно) в работе<sup>1</sup>, при этом согласно методике данной работы соответствующие расчётные значения  $\sigma_z^{\text{res}}$  и  $\sigma_\theta^{\text{res}}$  на рис. 2 представлены сплошными линиями, а величина  $\alpha = 4,4$ . При изотропной процедуре упрочнения (ПДО, гидродробеструйная обработка, термопластическое упрочнение и др.) величина  $\alpha = 1$  и эпюры  $\sigma_\theta^{\text{res}}$  и  $\sigma_z^{\text{res}}$  практически совпадают, что и отражено на рис. 1.

В этом же пункте приведены результаты экспериментальных исследований для цилиндрических образцов диаметром 50 мм из стали 20, упрочнённых обкаткой роликом при усиллии обкатки  $P = 0,5$  кН и  $P = 1,0$  кН.

**В пункте 2.4** приведены результаты определения остаточных напряжений в образцах с надрезами полукруглого профиля после опережающего поверхностного пластического деформирования (ОППД). На гладкие упрочнённые ПДО образцы диаметром 15 мм с отверстием диаметром 5 мм из сплавов В95 и Д16Т наносились круговые надрезы полукруглого профиля двух радиусов:  $\rho = 0,3$  мм и  $\rho = 0,5$  мм, на упрочнённые роликом образцы диаметром 45 мм из стали 40ХН — радиуса  $\rho = 3,0$  мм, на упрочнённые роликом образцы диаметром 50 мм из стали 20 — трёх радиусов:  $\rho = 0,3$  мм,  $\rho = 0,5$  мм,  $\rho = 1,0$  мм. В результате нанесения надреза в области образца, прилегающей к надрезу, происходит перераспределение остаточных напряжений и возникают дополнительные остаточные напряжения. Эти напряжения определялись двумя расчётными методами: приближённым аналитическим<sup>2</sup> и численным на основе

<sup>1</sup> Радченко В.П., Саушкин М.Н. Метод расчёта остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учётом анизотропии процесса поверхностного упрочнения // ПМТФ. 2011. Т. 52. № 2. С. 173–182

<sup>2</sup> Иванов С. И., Шатунов И. П., Павлов В. Ф. Влияние остаточных напряжений на выносливость

МКЭ, разработанным в диссертации.

Расчёт для компоненты  $\sigma_z^{\text{res}}$ , которая играет решающую роль при оценке сопротивления усталости, по обоим методам даёт практически одинаковые результаты. В качестве примера на рис. 3 представлены расчётные значения осевых остаточных напряжений  $\sigma_z^{\text{res}}$  в упрочнённых образцах с надрезом из сплавов В95 и Д16Т.

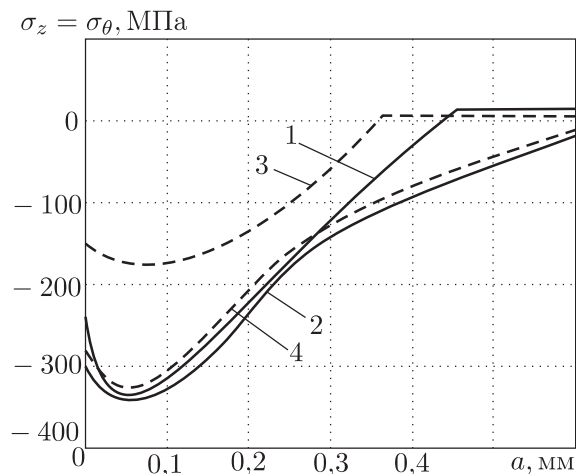


Рис. 1. Остаточные напряжения в гладких образцах после ПДО (1, 2), ПДО и термоэкспозиции (3, 4): 1, 3 – В95, 2, 4 – Д16Т

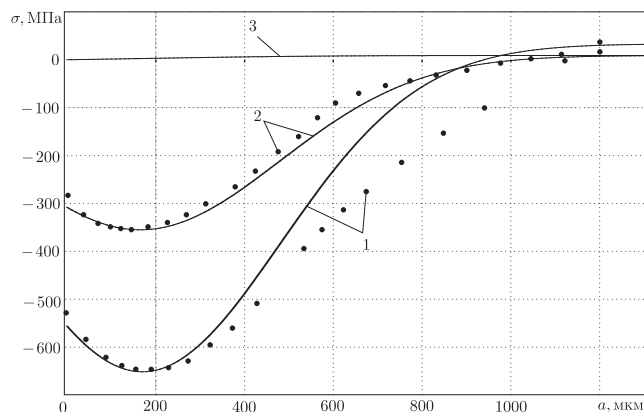


Рис. 2. Расчётные (сплошные линии) и экспериментальные (точки) значения остаточных напряжений в обкатанных роликом сплошных образцах диаметром 45 мм из стали 40ХН: 1 –  $\sigma_z^{\text{res}} = \sigma_z^{\text{res}}(a)$ ; 2 –  $\sigma_\theta^{\text{res}} = \sigma_\theta^{\text{res}}(a)$ ; 3 –  $\sigma_r^{\text{res}} = \sigma_r^{\text{res}}(a)$

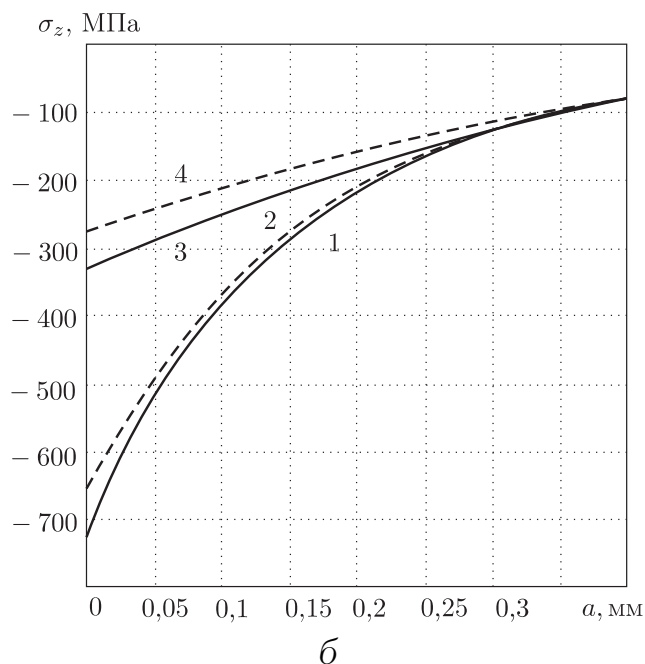
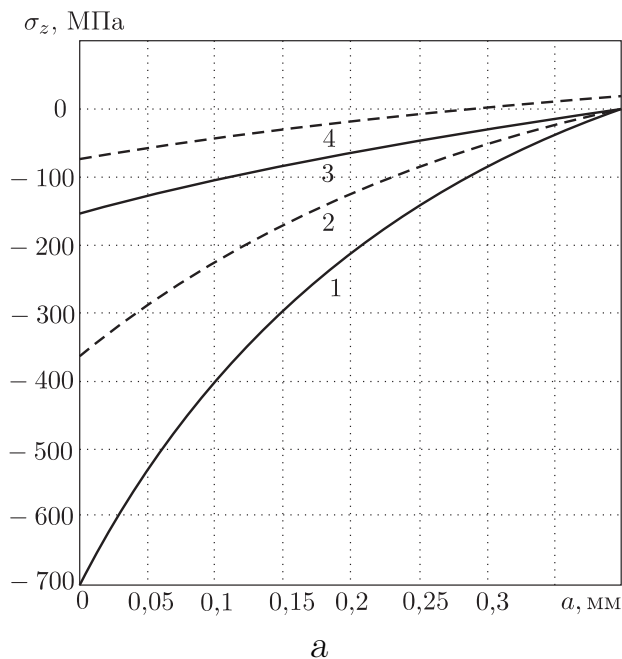


Рис. 3. Остаточные напряжения в образцах с надрезом из сплава В95 (а) и Д16Т (б) после ПДО (1, 3), ПДО и термоэкспозиции (2, 4): 1, 2 –  $\rho = 0,3$  мм; 3, 4 –  $\rho = 0,5$  мм

образцов с надрезом // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. Куйбышев: КуАИ, 1974. Вып. 1. С. 88-95.

Из приведённых на рис. 3 данных видно, что после нанесения надрезов на упрочнённые ПДО образцы из сплавов В95 и Д16Т на их дне возникают значительные по величине сжимающие остаточные напряжения. Термоэкспозиция упрочнённых образцов из сплавов В95 и Д16Т привела к заметному снижению сжимающих остаточных напряжений, особенно в образцах из сплава В95.

Здесь же выполнен анализ экспериментальных эпюр распределения остаточных напряжений для образцов из стали 20, который показал, что с увеличением усилия обкатки роликом сжимающие остаточные напряжения в наименьшем сечении образцов с надрезами после ОППД повышаются. Наблюдаемое явление объясняется тем, что при повышении усилия обкатки увеличивается толщина слоя гладких образцов со сжимающими остаточными напряжениями при практически одинаковых наибольших напряжениях.

**В пункте 2.5** представлена оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости упрочнённых образцов при изгибе по критериям  $\sigma_{\text{ост}}^{\text{ПОВ}}$  и  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  по формулам:

$$\begin{aligned}\sigma_{-1}^{\text{УПР}} &= \sigma_{-1}^0 - \psi_{\sigma} \sigma_{\text{ост}}^{\text{ПОВ}}, \\ \sigma_{-1}^{\text{УПР}} &= \sigma_{-1}^0 - \bar{\psi}_{\sigma} \bar{\sigma}_{\text{ост}},\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\sigma_{-1}^{\text{УПР}}$  — предел выносливости упрочнённого образца,  $\sigma_{-1}^0$  — предел выносливости неупрочнённого образца,  $\psi_{\sigma}$  и  $\bar{\psi}_{\sigma}$  — феноменологические коэффициенты влияния упрочнения на предел выносливости по критериям  $\sigma_{\text{ост}}^{\text{ПОВ}}$  и  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  соответственно.

Критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости упрочнённой детали имеет вид<sup>2</sup>:

$$\bar{\sigma}_{\text{ост}} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z^{\text{res}}(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (2)$$

где  $\sigma_z^{\text{res}}(\xi)$  — осевые остаточные напряжения в наименьшем (опасном) сечении детали,  $\xi = y/t_{\text{кр}}$  — расстояние от дна концентратора до текущего слоя,  $t_{\text{кр}}$  — критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали на предел выносливости (феноменологический параметр).

Испытания образцов с надрезами из сплавов В95, Д16Т на усталость при чистом изгибе в случае симметричного цикла проводились на машинах МУИ-6000, из сталей 40ХН, 20 — при поперечном изгибе в случае симметричного цикла на машине УМП-02. Усреднённые результаты испытаний на усталость представлены в табл. 1–3.

Таблица 1. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений образцов из сплавов В95 и Д16Т после ПДО

Материал	Радиус надреза $\rho$ , мм	Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы					
			$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_{\text{ост}}^{\text{ПОВ}}$ , МПа	$\psi_{\sigma}$	$t_{\text{кр}}$ , мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ , МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
В95	0,3	105	200	−686	0,138	0,310	−249	0,382
	0,5	107,5	132,5	−151	0,166	0,320	−72,2	0,347
Д16Т	0,3	82,5	182,5	−720	0,139	0,300	−261	0,383
	0,5	82,5	157,5	−322	0,233	0,320	−197	0,381

Таблица 2. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений образцов из сплавов В95 и Д16Т после ПДО и термоэкспозиции

Материал	Радиус надреза $\rho$ , мм	Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы					
			$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_{\text{ост}}^{\text{пов}}$ , МПа	$\psi_{\sigma}$	$t_{\text{кр}}$ , мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ , МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
В95	0,3	105	155	-361	0,139	0,310	-141	0,355
	0,5	107,5	115	-670	0,112	0,320	-21,3	0,352
Д16Т	0,3	82,5	175	-652	0,142	0,320	-250	0,370
	0,5	82,5	150	-275	0,245	0,310	-171	0,395

Таблица 3. Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений образцов из сталей 40ХН и 20 после обкатки роликом

Материал	$\rho$ , мм	Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы						
			обра- ботка, кН	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_{\text{ост}}^{\text{пов}}$ , МПа	$\psi_{\sigma}$	$t_{\text{кр}}$ , мм	$\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ , МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
40ХН	3,0	127,5	$P = 1,0$	147,5	-94	0,213	0,860	-60,4	0,331
Сталь 20	0,3	87,5	$P = 0,5$	117,5	-898	0,033	1,040	-94	0,322
			$P = 1,0$	130	-1004	0,042	1,110	-128	0,332
	0,5	92,5	$P = 0,5$	122,5	-396	0,078	1,077	-82	0,366
			$P = 1,0$	132,5	-547	0,073	1,024	-112	0,357
	1,0	92,5	$P = 0,5$	110	-126	0,139	1,073	-46	0,380
			$P = 1,0$	115	-166	0,136	1,035	-62	0,363

Из приведённых данных табл. 1–3 видно, что оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости упрочнённых образцов с надрезами по критерию  $\sigma_{\text{ост}}^{\text{пов}}$  приводит к значительному рассеянию соответствующего коэффициента  $\psi_{\sigma}$  — этот коэффициент изменяется от 0,033 до 0,245, то есть его величина между максимальным и минимальным значениями отличается в 7,5 раз. Такое значительное изменение коэффициента  $\psi_{\sigma}$  не позволяет использовать критерий  $\sigma_{\text{ост}}^{\text{пов}}$  для оценки влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей в условиях концентрации напряжений. При оценке влияния упрочнения на предел выносливости по критерию  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  соответствующий коэффициент  $\bar{\psi}_{\sigma}$  изменяется от 0,322 до 0,395, то есть его разброс гораздо ниже, чем у  $\psi_{\sigma}$ . Таким образом, на основании проведённых экспериментов следует вывод о том, что для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений из сплавов В95, Д16Т и сталей 40ХН, 20 необходимо использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\sigma_{\text{ост}}$ . На основании этого вывода в диссертации предложен метод расчёта предела выносливости таких деталей при нормальной температуре и в условиях ползучести.

В этом же пункте выполнен статистический анализ экспериментальных результатов. Подробно изложена статистическая обработка результатов испытаний на усталость образцов диаметром 45 мм с надрезом  $\rho = 3$  мм из стали 40ХН, выполненных по методу ступенчатого изменения нагрузки (метод «вверх — вниз»), приведены оценки математического ожидания  $\sigma_{-1}$  и его среднеквадратического отклонения для упрочнённых и неупрочнённых образцов. Приведены спектры экспериментальных значений  $t_{\text{кр}}^{\text{э}}$  и феноменологических параметров  $\bar{\psi}_{\sigma}$  и  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ , входящих в критериальные зависимости (1) и (2). Так для

сплошных образцов из стали  $20 t_{кр}^э \in [1,022 \div 1,077]$  мм для надреза  $\rho = 0,5$  мм и  $t_{кр}^э \in [1,035 \div 1,073]$  мм для  $\rho = 1$  мм; величина  $\bar{\psi}_\sigma \in [0,357 \div 0,366]$  для  $\rho = 0,5$  мм и  $\bar{\psi}_\sigma \in [0,363 \div 0,380]$  для  $\rho = 1$  мм. Аналогичные данные приведены для полых образцов из сплавов В95 и Д16Т. На основании выполненного статистического анализа сделан вывод об устойчивости метода определения сопротивления усталости к внешним условиям испытаний (нагрузки, материал, геометрия образца и концентратора, технология упрочнения, температурные нагрузки).

### Глава 3. Теоретическое и экспериментальное исследование влияния температурно-силового нагружения на кинетику остаточных напряжений в полых цилиндрических образцах вследствие ползучести

Глава 3 посвящена исследованию влияния продольной нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в полых цилиндрическом образце из сплава Д16Т при температуре  $T = 125$  °С, при которой существенной является деформация ползучести.

В пункте 3.1 приведены результаты экспериментального исследования ползучести поверхностно упрочнённых образцов из сплава Д16Т при осевом растяжении при  $T = 125$  °С, причём кривые ползучести получены при испытаниях упрочнённых образцов, поскольку тонкий упрочнённый слой незначительно влияет на деформативность образца; затем эти же образцы использовались для определения остаточных напряжений после ползучести.

Образцы подвергались ПДО на тех же режимах, что и образцы для испытаний на усталость.

На рис. 4 приведены осреднённые (среднеинтегральные) кривые ползучести образцов при осевых напряжениях  $\sigma = 353, 385, 413$  и  $420$  МПа, которые в дальнейшем использовались для построения соответствующей теории ползучести.

В пункте 3.2 представлены результаты исследования остаточных напряжений в упрочнённых полых цилиндрических образцах из сплава Д16Т после испытаний на ползучесть. В качестве примера на рис. 5 приведены распределения осевых  $\sigma_z$  и окружных  $\sigma_\theta$  остаточных напряжений упрочнённых ПДО

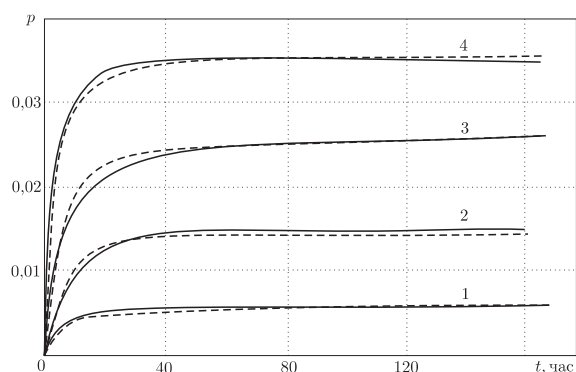


Рис. 4. Экспериментальные (сплошные линии) и расчётные (штриховые линии) кривые ползучести сплава Д16Т при  $T = 125$ °С. Цифры: 1 —  $\sigma = 353$  МПа; 2 —  $\sigma = 385$  МПа; 3 —  $\sigma = 413$  МПа; 4 —  $\sigma = 420$  МПа

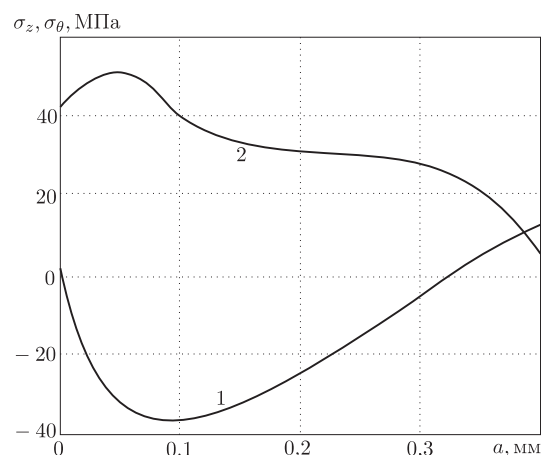


Рис. 5. Экспериментальные значения осевых  $\sigma_z$  (1) и окружных  $\sigma_\theta$  (2) остаточных напряжений в образце №1 из сплава Д16Т после испытаний на ползучесть при  $\sigma = 353$  МПа

образцов после испытаний на ползучесть при действии растягивающей нагрузки при  $T = 125$  °С.

Из представленных на рис. 5 распределений остаточных напряжений следует, что по сравнению с исходным распределением после ПДО (рис. 1, кривая 2) и после ПДО и термоэкспозиции (рис. 1, кривая 4) происходит существенное качественное и количественное изменение остаточных напряжений. Если термоэкспозиция практически не повлияла на процесс релаксации остаточных напряжений, то приложение нагрузки привело к существенной релаксации и изменению их характера распределения. Анализ зависимостей остаточных напряжений в упрочнённом слое образцов после ползучести под нагрузкой свидетельствует о том, что их величина отличается почти на порядок от соответствующих величин сразу после процедуры упрочнения дробью. С учётом естественного разброса данных по ползучести можно констатировать, что в образцах произошла практически полная релаксация остаточных напряжений в процессе реологического деформирования.

**В пункте 3.3** выполнено построение реологической модели ползучести сплава Д16Т при  $T = 125$  °С на основании экспериментальных данных, представленных на рис. 4. При построении модели использовалась теория ползучести Ю. П. Самарина<sup>3</sup>, которая для одноосного напряжённого состояния при  $\sigma = \text{const}$  даёт следующую зависимость для деформации ползучести:

$$p(t) = \sum_{k=1}^s a_k (1 - e^{-\lambda_k t}) \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^n + c \left(\frac{\sigma}{\sigma^*}\right)^m t, \quad (3)$$

где  $c$ ,  $m$ ,  $\lambda_k$ ,  $a_k$ ,  $n$ ,  $\sigma^*$ ,  $s$  — параметры модели. Используя экспериментальные данные (рис. 4), вычислялись параметры аппроксимации (3) (а значит, и модели ползучести). На рис. 4 штриховыми линиями приведены расчётные значения деформации ползучести.

**В пункте 3.4** проведено теоретическое исследование процесса релаксации остаточных напряжений в полом цилиндрическом образце из сплава Д16Т при  $T = 125$  °С вследствие ползучести при осевом растяжении.

Исследование выполнено на основе программного комплекса<sup>4</sup>, реализующего решение соответствующей краевой задачи на основе построенной модели ползучести для данного сплава. На рис. 6 приведены расчётные значения для остаточных напряжений  $\sigma_z^{\text{res}}$  по глубине слоя  $a$  непосредственно после процедуры упрочнения и после ползучести при растягивающей нагрузке  $\sigma_{z0} = 420$  МПа, из которого следует, что и теоретический расчёт даёт существенное влияние растягивающей нагрузки на процесс релаксации остаточных напряжений (почти на порядок).

Таким образом, с точки зрения инженерных приложений экспериментальные и расчётные данные дают практически полную релаксацию остаточных напряжений вследствие ползучести для сплава Д16Т ( $T = 125$  °С) в исследованном силовом диапазоне приложенной нагрузки.

**В пункте 3.5** приведены выводы по главе 3.

<sup>3</sup> Самарин Ю. П. Уравнения состояния материалов со сложными реологическими свойствами. Куйбышев: Куйбышевский госуниверситет, 1979. 84 с.

<sup>4</sup> STRELAX: свид. о гос. регистрации программы ЭВМ №2013619758 / Смыслов В.А., Саушкин М.Н.; правообладатель Смыслов В.А. — заявка №2013615774; заявл. 09.07.2013; зарегистр. 14.10.2013

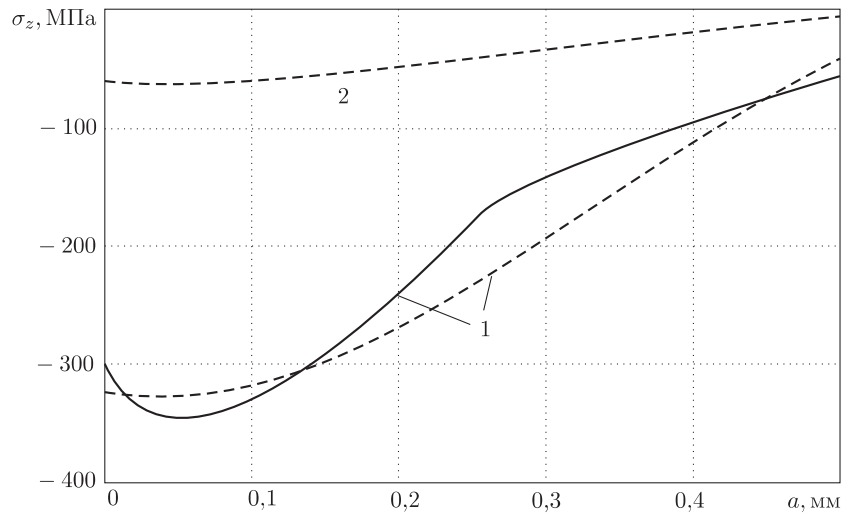


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений  $\sigma_z^{\text{res}} = \sigma_z^{\text{res}}(a)$  в полном цилиндрическом образце из сплава Д16Т в процессе ползучести при  $T = 125^\circ\text{C}$  при осевой растягивающей нагрузке  $\sigma_{z0} = 420$  МПа. Цифры: 1 — экспериментальная (сплошная линия) и расчётная (штриховая линия) эпюры после процедуры упрочнения; 2 — расчётные значения после ползучести в течение 83 часов

**В заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. На основе метода конечных элементов разработана расчётная методика определения остаточных напряжений в поверхностных слоях цилиндрических образцов с круговыми надрезами полукруглого профиля с использованием распределения остаточных напряжений гладкого образца, определённых экспериментальными способами.
2. Проведён цикл испытаний на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых пневмодробеструйной обработкой образцов с надрезами из сплавов В95 и Д16Т при нормальной температуре как до, так и после термоэкспозиции. Теоретически и экспериментально обоснована возможность использования теории влияния остаточных напряжений на предел выносливости в условиях концентрации применительно к цилиндрическим деталям из высокопрочных алюминиевых сплавов В95 и Д16Т и на этой основе создан метод расчёта предела выносливости таких деталей при нормальной температуре и после термоэкспозиции в условиях ползучести, на основе критерия среднеинтегральных остаточных напряжений.
3. Проведены испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых обкаткой роликом «крупногабаритных» сплошных образцов из сталей 40ХН и 20 диаметром 45 мм и 50 мм, соответственно, при нормальной температуре. Теоретически и экспериментально установлено, что при оценке влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости в условиях концентрации напряжений и для таких образцов следует использовать критерий среднеинтегральных остаточных напряжений. Показано, что оценка приращения предела выносливости упрочнённых деталей из сталей 40ХН, 20 и сплавов В95, Д16Т по величине остаточных напряжений только на поверхности концентратора

приводит к существенной погрешности, поэтому прогнозирование предела выносливости по этому критерию нецелесообразно.

4. Разработана и изготовлена установка для проведения испытаний цилиндрических образцов из сплава Д16Т на ползучесть при повышенной температуре с блоком терморегулирования и поддержания заданной температуры в процессе испытаний.
5. Впервые проведены экспериментальные исследования ползучести упрочнённых ПДО полых цилиндрических образцов из сплава Д16Т под действием растягивающих нагрузок при температуре 125 °С для определения устойчивости остаточных напряжений к высокотемпературным деформациям и оценки их кинетики во времени. Установлено, что под действием растягивающей нагрузки распределение экспериментальных осевых  $\sigma_z$  и окружных  $\sigma_\theta$  остаточных напряжений в упрочнённых ПДО образцах из сплава Д16Т претерпевает значительное изменение, перераспределяясь из сжимающих в растягивающие остаточные напряжения.
6. Построена феноменологическая модель ползучести сплава Д16Т при  $T = 125^\circ\text{C}$  для условий одноосного и сложного напряжённых состояний и на её основе реализован метод расчёта релаксации остаточных напряжений в упрочнённом полом цилиндрическом образце в условиях одноосного растяжения ползучести для образцов из сплава Д16Т при  $T = 125^\circ\text{C}$ . Расчётным путём показано, что происходит существенное падение уровня остаточных напряжений в 4 ÷ 7 раз по отношению к их значениям после процедуры упрочнения. Анализ расчётных и экспериментальных зависимостей остаточных напряжений с точки зрения инженерных приложений позволяет сделать вывод о практически полной релаксации остаточных напряжений в упрочнённых полых цилиндрических образцах из сплава Д16Т в условиях одноосного растяжения вследствие ползучести.
7. Выполненная статистическая обработка экспериментальных данных и феноменологических параметров свидетельствует об устойчивости метода определения предела выносливости упрочнённых и неупрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами на основе критерия среднеинтегральных остаточных напряжений к условиям испытаний (циклические силовые нагрузки, материал, геометрия образца и концентратора, технология упрочнения, температурные выдержки).
8. Выполненные исследования на образцах из сталей 40ХН и 20, сплавов В95 и Д16Т, имеющих широкое применение в машиностроении и авиационной промышленности, существенно расширяют номенклатуру материалов и деталей из них с концентраторами напряжений, для которых изучено влияние поверхностного упрочнения и температурных воздействий на предел выносливости с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений.



## Основные публикации по теме диссертации

### В изданиях из перечня ВАК

- [1] Радченко В. П., Кирпичёв В. А., Лунин В. В. Влияние пневмодробеструйной обработки и термоэкспозиции на остаточные напряжения и предел выносливости образцов с надрезами из сплавов В95 и Д16Т // *Вестник СамГТУ. Сер.: Физ.-матем. науки.* 2011. № 3(24). С. 181–184.
- [2] Радченко В. П., Кирпичёв В. А., Лунин В. В. Влияние термоэкспозиции на остаточные напряжения образцов из сплава ЭП742 после ультразвукового упрочнения // *Вестник СамГТУ. Сер.: Технич. науки.* 2012. № 3(35). С. 147–154.
- [3] Радченко В. П., Морозов А. П., Лунин В. В. Исследование кинетики физико-механических параметров упрочнённых образцов из сплавов В95 и Д16Т вследствие температурных выдержек и многоцикловых усталостных испытаний // *Вестник СамГТУ. Сер.: Физ.-матем. науки.* 2012. № 1(26). С. 123–132.
- [4] Радченко В. П., Кирпичёв В. А., Лунин В. В. Влияние обкатки роликом на остаточные напряжения и сопротивление усталости образцов из стали 40ХН // *Вестник СамГТУ. Сер.: Технич. науки.* 2013. № 1(37). С. 142–150.
- [5] Радченко В. П., Кирпичёв В. А., Лунин В. В. Оценка влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости деталей различного диаметра в условиях концентрации напряжений // *Вестник СамГТУ. Сер.: Технич. науки.* 2015. № 1(45). С. 168–177.
- [6] Кирпичёв В. А., Вакулюк В. С., Букатый А. С., Каранаева О. В., Лунин В. В. Моделирование остаточного напряжённого состояния поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям образца-свидетеля // *Известия Самарского научного центра РАН.* 2014. Т. 16, № 6(2). С. 461–464.
- [7] Кирпичёв В. А., Вакулюк В. С., Букатый А. С., Лунин В. В., Михалкина С. А. Зависимость предела выносливости от характера распределения остаточных напряжений в поверхностном слое упрочнённых деталей // *Вестник СГАУ.* 2015. № 5(47). Часть 1. С. 180–187.

### В других изданиях

- [8] Вакулюк В. С., Букатый А. С., Афанасьева О. С., Лунин В. В., Сабанов Е. А. Влияние характера распределения сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя на предел выносливости образцов // *Надёжность и долговечность машин и сооружений. Тезисы докладов международной научно-технической конференции.* Киев: Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2014. С. 130–137.
- [9] Кирпичёв В. А., Букатый А. С., Семёнова О. Ю., Лунин В. В. Выбор оптимального режима пневмодробеструйной обработки по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений // *Математическое моделирование и краевые задачи. Ч. 1. Труды шестой всероссийской научной конференции с международным участием.* Самара: СамГТУ, 2009. С. 118–120.
- [10] Радченко В. П., Кирпичёв В. А., Лунин В. В. Остаточные напряжения и сопротивления усталости упрочнённых образцов из алюминиевых сплавов в условиях концентрации // *Математическое моделирование и краевые задачи. Ч. 1. Труды восьмой всероссийской научной конференции с международным участием.* Самара: СамГТУ, 2011. С. 169–173.
- [11] Вакулюк В. С., Сазанов В. П., Лунин В. В. и др. Анализ результатов испытаний на усталость образцов с учётом особенностей технологического процесса поверхностного упрочнения // *Математическое моделирование и краевые задачи. Ч. 1. Труды девятой всероссийской научной конференции с международным участием.* Самара: СамГТУ, 2013. С. 67–71.
- [12] Сазанов В. П., Шадрин В. К., Михалкина С. А., Иванова А. В., Лунин В. В. Исследование распределения компонент остаточного напряжённого состояния в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали с кольцевым надрезом // *Международный*

научно-технический форум, посвящённый 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ. Т. 1. Самара: СГАУ, 2012. С. 169–170.

- [13] *Кирпичёв В. А., Филатов А. П., Лунин В. В.* Экспериментальное исследование кинетики остаточных напряжений в упрочнённых полых цилиндрических образцах из сплавов В95 и Д16Т в условиях ползучести // XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред. Пермь: ИМСС УрО РАН, 2013. С. 168.
- [14] *Сазанов В. П., Вакулюк В. С., Лунин В. В., Колычев С. А.* Изменение распределения остаточных напряжений в упрочнённой цилиндрической детали в зависимости от первоначальных радиальных деформаций // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций. Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2014. С. 35.
- [15] *Лунин В. В.* Экспериментальное исследование кинетики остаточных напряжений в полых цилиндрических образцах из сплавов Д16Т и В95 при растяжении в условиях ползучести // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций. Сборник материалов III Всероссийской конференции, посвящённой 100-летию со дня рождения академика Ю. Н. Работнова. Новосибирск: НГТУ, 2014. С. 60–61.

*Научное издание*

Лунин Валентин Валериевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук на тему:

Методы расчёта напряжённо-деформированного состояния и предела выносливости  
упрочнённых цилиндрических деталей с концентраторами напряжений при ползучести

Подписано в печать 25.01.2015.  
Формат 60 × 90 1/16. Набор компьютерный.  
Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 256.

Отпечатано на ризографе.  
ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»  
Отдел типографии и оперативной печати  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.