

Смыслов Виталий Андреевич

Методы расчёта остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических образцах при температурно-силовом нагружении в условиях ползучести

01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических 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:**

Хромов Александр Игоревич,
доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладная математика и информатика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

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

Ведущая организация

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

Защита диссертации состоится «__» _____ 2015 года в _____ на заседании диссертационного совета Д 004.012.01 в Институте механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института механики сплошных сред УрО РАН и на сайте <http://icmm.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

И.К. Березин

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Основные эксплуатационные свойства элементов конструкций – износостойкость, прочность и сопротивление усталости – существенно зависят от состояния поверхностного слоя. Истощение запаса наработки на отказ детали и её разрушение начинается, как правило, с поверхностного слоя. Поэтому при изготовлении деталей в процессе их механической обработки или специальных упрочняющих технологий в поверхностном слое наводятся сжимающие остаточные напряжения (ОН), которые препятствуют выходу на поверхность различного рода дислокаций и вакансий.

В процессе эксплуатации изделия энергетического и транспортного машиностроения, авиастроения подвергаются сильному механическому, тепловому и другим воздействиям, сопровождающимся появлением реологических деформаций. Это приводит к перераспределению полей ОН, их релаксации и снижению эффективности упрочнения. Поэтому естественным образом возникает актуальность разработки методов решения краевых задач оценки кинетики остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых элементах конструкций при ползучести с начальным напряжённо-деформированным состоянием (НДС).

В настоящее время большинство методик определения ОН в поверхностном слое носит преимущественно экспериментальный характер. На практике опытным путём обычно удаётся получить лишь одну или две компоненты тензора ОН, а компоненты тензора остаточных пластических деформаций определить невозможно. Однако без полной картины НДС после процедуры упрочнения невозможно решать краевые задачи при последующем температурно-силовом нагружении в условиях ползучести.

Существующие теоретические модели восстановления полной картины НДС после процедуры упрочнения и релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести разработаны в основном для сплошных цилиндрических образцов и справедливы лишь для режимов так называемого изотропного поверхностного упрочнения (гидро- и пневмодробеструйная обработка, азотирование, термопластическое упрочнение). Однако имеется ряд упрочняющих технологий (обкатка роликом, алмазное выглаживание, дорнование и др.), которые приводят к существенной анизотропии распределения остаточных пластических деформаций. Методики оценки остаточного НДС после такого рода процедур упрочнения в настоящее время находятся в стадии становления. Очевидно, требуется обобщение и развитие существующих подходов на другие конструкции, в частности, на полые цилиндрические образцы. Требуют своего развития методы решения краевых задач расчёта кинетики остаточных напряжений и деформаций при температурном и температурно-силовом нагружении в условиях реологического деформирования, а также разработка экспериментальных подходов анализа этой проблемы.

Всё вышеизложенное и определяет актуальность тематики диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка новых и совершенствование существующих методов решения краевых задач механики анизотроп-

но упрочнённых цилиндрических конструкций в условиях ползучести, теоретические и экспериментальные исследования влияния температурно-силового нагружения на релаксацию остаточных напряжений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 1) разработан феноменологический метод расчёта полей остаточных напряжений и пластических деформаций в полом цилиндрическом образце после процедуры упрочнения, позволяющий, в отличие от существующих методов, учитывать анизотропию поверхностного пластического упрочнения, и выполнена его экспериментальная проверка для широкого спектра технологий и режимов упрочнения, материалов и геометрических параметров образцов;
- 2) предложены новые методики идентификации параметров модели для оценки напряжённо-деформированного состояния в упрочнённом слое цилиндрического образца и коэффициента анизотропии упрочнения на основе известной экспериментальной информации;
- 3) выполнен анализ влияния параметра анизотропии упрочнения на распределение полей остаточных напряжений в полом и сплошном цилиндрах после процедуры упрочнения; установлено существенное расслоение эпюр окружной и осевой компонент тензора напряжений в зависимости от параметра анизотропии, в отличие от случая, соответствующего процедуре изотропного упрочнения, где они практически совпадают;
- 4) разработан прямой метод решения краевой задачи о ползучести упрочнённого полого цилиндра в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении и выполнена проверка его адекватности экспериментальным данным для цилиндрических образцов из сплавов Д16Т и В95 при $T = 125^\circ\text{C}$ в условиях термоэкспозиции (температурная выдержка без растягивающих нагрузок);
- 5) выполнены теоретические и экспериментальные исследования по влиянию растягивающей нагрузки на скорость релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести в сплошных цилиндрических образцах из сплава ЖС6КП при $T = 800^\circ\text{C}$; показано, что скорость релаксации в поверхностно упрочнённом слое цилиндрического изделия при действии растягивающей нагрузки в условиях ползучести носит «немонотонный» характер в зависимости от величины растягивающей нагрузки и её длительности, в частности, увеличение нагрузки может замедлять скорость релаксации остаточных напряжений; установлено соответствие расчётных и экспериментальных данных для полей остаточных напряжений в различные временные сечения для всех режимов нагружения.
- 6) разработано новое математическое и программное обеспечение для численной реализации разработанных методов решения краевых задач механики анизотропно упрочнённых цилиндрических деталей в условиях ползучести.

Практическая значимость работы в теоретическом плане заключается в разработке новых методов решения краевых задач механики упрочнённых ци-

линдрических конструкций с начальным напряжённо-деформированным состоянием в условиях ползучести. С прикладной точки зрения разработанные методики, реализованные в виде программного комплекса, во-первых, позволяют решить ряд прикладных задач оценки долговечности и остаточного ресурса упрочнённых цилиндрических деталей и элементов конструкций, а, во-вторых, могут быть использованы для проведения параметрического анализа влияния условий упрочнения на НДС в упрочнённом слое после процедуры упрочнения и на процесс релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести при последующей эксплуатации изделий.

На защиту выносятся:

- 1) феноменологический метод расчёта трёхмерных полей остаточных напряжений и пластических деформаций в полом цилиндрическом образце после процедуры упрочнения, позволяющий, в отличие от существующих методов, учитывать анизотропию процесса упрочнения;
- 2) прямой численный метод решения краевой задачи о релаксации остаточных напряжений в полом цилиндрическом образце при ползучести в условиях температурно-силового нагружения с учётом анизотропии поверхностного пластического упрочнения;
- 3) методики идентификации параметров модели для оценки напряжённо-деформированного состояния в упрочнённом слое цилиндрического образца и коэффициента анизотропии упрочнения на основе известной экспериментальной информации;
- 4) результаты исследования влияния параметра анизотропии упрочнения, технологий и режимов упрочнения, материала и геометрических параметров на характер распределения остаточных напряжений в полых и сплошных цилиндрических изделиях;
- 5) результаты новых теоретических и экспериментальных исследований по влиянию температурно-силовых нагрузок на процесс релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых сплошных и полых цилиндрических изделиях в условиях ползучести;
- 6) математическое и программное обеспечение для численной реализации разработанных методов решения краевых задач механики анизотропно упрочнённых цилиндрических изделий в условиях ползучести.

Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается адекватностью модельных математических представлений реальному физико-механическому поведению материала в упрочнённом слое при силовых нагрузках и высоких температурах; корректностью использования математического аппарата, законов механики деформируемого твёрдого тела; сравнением численных решений рассматриваемых краевых задач с известными результатами в частных случаях; апробированностью используемых численных и экспериментальных методов исследования НДС; частичной экспериментальной проверкой используемых гипотез и результатов решения задач.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка источников из 169 наименований. Работа содержит 180 страниц основного текста, 79 рисунков, 37 таблиц и 4 приложения.

Апробация работы. Результаты научных исследований опубликованы в 21 печатной работе и были представлены на конференциях различного уровня: на научных молодёжных конференциях по естественнонаучным и техническим дисциплинам с международным участием «Научному прогрессу – творчество молодых» (г. Йошкар-Ола, 2009, 2010 гг.), на IV Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2009г.), на VI и VII Всероссийских конференциях «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (г. Екатеринбург, 2010, 2012 гг.), на Шестой, Седьмой и Девятой Всероссийских конференциях с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2009, 2010, 2013 гг.), на 4-м и 5-м Международных форумах молодых учёных «Актуальные проблемы современной науки» (г. Самара, 2008, 2010 гг.), на международной научно-технической конференции «Прочность материалов и элементов конструкций» (г. Киев, 2010г.), на XVIII Зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2013г.), на Всероссийской конференции «Актуальные проблемы математики и механики», посвящённой 75-летию д.ф.-м.н., профессора Г.И. Быковцева (г. Самара, 2013г.), на III Всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций» (г. Новосибирск, 2014г.), на VIII Всероссийской конференции по механике деформируемого твёрдого тела (г. Чебоксары, 2014г.), на IV международной конференции «Математическая физика и её приложения» (г. Самара, 2014г.), на научных семинарах «Механика и прикладная математика» Самарского государственного технического университета (руководитель профессор В.П. Радченко 2011-2013 гг.).

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-01-00699), Министерства образования и науки (проект № 2.1.1/13944), в рамках базовой части государственного задания № 2014/199 и 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 «Реологические модели», «Математические модели механики сплошных сред», «Численные методы решения краевых задач».

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 21 печатной работе, из них 4 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 5 статей в сборниках трудов конференций и 12 тезисов докладов.

Личный вклад автора. Работы [4, 5, 8, 13, 15, 17–20] выполнены самостоятельно, в основных работах [1–3] 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 [6, 7, 9–12, 14, 16, 21], опубликованных в соавторстве, ав-

тору в равной степени принадлежат как постановка задачи, так и результаты выполненных исследований.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук В. П. Радченко за постановку задач и поддержку работы, а также доценту, кандидату физико-математических наук М.Н. Саушкину за консультации 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 задачи исследования

В пункте 1.1 рассматриваются физико-механические и технологические факторы, приводящие к возникновению остаточных напряжений в поверхностном слое детали, а также проанализировано влияние остаточных напряжений на прочностные характеристики изделий.

В пункте 1.2 выполнен анализ методов определения остаточных напряжений в упрочнённых элементах конструкций, отмечены их возможности, преимущества и недостатки. Отмечается, что все существующие экспериментальные методы позволяют определить остаточные напряжения в упрочнённом слое лишь частично, а тензор остаточных пластических деформаций определить невозможно. Сделан вывод о неразрешимости задачи получения полной картины восстановления напряжённо-деформированного состояния в поверхностно-упрочнённом слое чисто экспериментальными методами, известными в настоящее время. Рассмотрены аналитические и расчётно-аналитические методы определения остаточных напряжений после процедуры упрочнения, представленные работами А. Н. Архипова, В. Ф. Балашова, М. А. Балтера, М. А. Биргера, В. Б. Бойцова, С. А. Бордакова, М. В. Гринченко, Г. Н. Гутмана, В. А. Кирпичёва, Ю. И. Няшина, В. Ф. Павлова, Д. Д. Папшева, А. А. Поздеева, Ю. В. Полоскина, В. П. Радченко, Ю. П. Самарина, М. Н. Саушкина, Ю. М. Темиса, П. В. Трусова, П. А. Чепы, А. О. Чернявского, А. А. Шапарина, W. Gambin, H. Wern и др. Проводится анализ возможностей, достоинств и недостатков каждого из подходов. Делается вывод о том, что феноменологические методы более предпочтительны, чем аналитические, так как они основываются на частично известной информации об эпюрах остаточных напряжений, которая может быть принята как реперная точка при разработке методов восстановления полной картины напряжённо-деформированного состояния в поверхности детали после процедуры упрочнения. Феноменологические методы, представленные в цикле работы В. П. Радченко и М. Н. Саушкина, принимаются основополагающими для дальнейших исследований. Излагается их суть применительно к гладкому цилиндрическому образцу.

В пункте 1.3 рассматривается вопрос релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочнённом слое детали, эксплуатируемой в условиях ползуче-

сти под действием силовых и температурных нагрузках. Анализируются работы, посвящённые кинетике остаточных напряжений. Делается вывод о том, что наиболее предпочтительным для решения задач ползучести является метод, изложенный в цикле работ В. П. Радченко и М. Н. Саушкина и представляющий собой наиболее общий, систематизированный и научно-обоснованный подход для решения краевых задач релаксации остаточных напряжений.

По результатам анализа литературных источников в пункте 1.4 сформулированы основные задачи исследований настоящей работы.

Глава 2. Восстановление напряжённо-деформированного состояния в поверхностном слое полого цилиндра

Глава 2 посвящена разработке феноменологического метода восстановления напряжённо-деформированного состояния по одной (режим изотропного упрочнения) или двум (режим анизотропного упрочнения) экспериментально замеренным компонентам тензора остаточных напряжений для полого цилиндрического образца, упрочнённого с внешней стороны одной из технологий поверхностного пластического деформирования.

В пункте 2.1 приводится разработанный феноменологический метод восстановления напряжённо-деформированного состояния в поверхностном слое анизотропно упрочнённых полых цилиндрических образцов по одной или двум экспериментально замеренным компонентам тензора остаточных напряжений. Задача решается в стандартной цилиндрической системе координат r, θ, z . Введены обозначения: $\sigma_r^{res}, \sigma_\theta^{res}, \sigma_z^{res}$ – радиальное, окружное и осевое остаточные напряжения соответственно; q_r, q_θ, q_z – соответствующие остаточные пластические деформации. Недиагональными компонентами тензоров остаточных напряжений и деформаций пренебрегаем. Используя уравнения равновесия, совместности деформаций, закон Гука и условие пластической несжимаемости, показано, что все компоненты напряжённо-деформированного состояния можно выразить через $\sigma_\theta^{res}(r)$ с помощью следующих соотношений:

$$\sigma_r^{res}(r) = -\frac{1}{r} \int_{R_1}^r \sigma_\theta^{res}(x) dx; \quad (1)$$

$$q_\theta(r) = \frac{1+\mu}{1+\alpha\mu} r^{-\frac{2+\alpha}{1+\alpha\mu}} \int_{R_1}^r x^{\frac{1+\alpha-\alpha\mu}{1+\alpha\mu}} g(x) dx; \quad (2)$$

$$q_z = \alpha q_\theta; \quad (3)$$

$$q_r = -q_\theta(1+\alpha); \quad (4)$$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} r \left\{ q_z(r) - \frac{\mu}{E} [\sigma_r^{res}(r) + \sigma_\theta^{res}(r)] \right\} dr; \quad (5)$$

$$\sigma_z^{res}(r) = E(\varepsilon_z^0 - q(r)) + \mu(\sigma_r^{res}(r) + \sigma_\theta^{res}(r)), \quad (6)$$

где R_1 и R_2 – внутренний и внешний радиусы образца соответственно, μ и E – упругие константы материала, α – параметр анизотропии упрочнения,

$$g(r) = \frac{[\sigma_r^{res}(r) - \mu \sigma_\theta^{res}(r)]}{E} - \frac{r}{E} \left[(1-\mu) \frac{d\sigma_\theta^{res}(r)}{dr} - \mu \frac{d\sigma_r^{res}(r)}{dr} \right].$$

Таким образом, схема расчёта полей остаточных напряжений и пластических деформаций в полном цилиндре после упрочнения внешней поверхности имеет следующий вид:

$$\sigma_\theta^{res}(r) \xrightarrow{1} \sigma_r^{res}(r) \xrightarrow{2} q_\theta(r) \xrightarrow{3,4} \xrightarrow{3,4} q_z(r), q_r(r) \xrightarrow{5} \varepsilon_z^0 \xrightarrow{6} \sigma_z^{res}(r). \quad (7)$$

Здесь стрелками показана последовательность определения величин; цифры над стрелками – номера формул, по которым определяются эти величины. Однако на практике величина α в соотношении (3) неизвестна и её можно определить лишь после проведения экспериментальных исследований. При этом в качестве исходной экспериментальной информации необходимо иметь экспериментальные зависимости $\sigma_\theta^{res}(r)$ и $\sigma_z^{res}(r)$, а параметр анизотропии α подлежит идентификации. В этом случае процедура идентификации сводится к задаче минимизации функционала среднеквадратического отклонения расчётных и экспериментальных данных, которая решается релаксационным методом.

В пункте 2.2 изложена методика идентификации параметров математической модели. Из формул (1)–(6) следует, что если известна величина α в (3), то σ_r^{res} , σ_z^{res} , q_r , q_θ , q_z определяются через σ_θ^{res} . Но экспериментально её можно определить только в тонком упрочнённом слое (области сжатия), поэтому опытные данные для σ_θ^{res} необходимо экстраполировать в область растяжения, но таким образом, чтобы не нарушилось свойство самоуравновешенности для этой компоненты напряжения. Предложена аналитическая зависимость для аппроксимации и последующей экстраполяции дискретных экспериментальных значений эпюры окружной компоненты тензора остаточных напряжений по глубине упрочнённого слоя h :

$$\sigma_\theta^{res}(r) = \left(\sigma_0 - \sigma_1 \exp \left(- \frac{(R_2 - h^* - r)^2}{b^2} \right) \right) \cdot (r - R_1), \quad (8)$$

где h^* – расстояние от внешней поверхности полого цилиндра, на котором располагается экстремум (локальный минимум) эпюры; σ^* – экспериментальное значение σ_θ^{res} при $h = h^*$; h_0 – глубина слоя, при которой значение $\sigma_\theta^{res}(h_0) = 0$; σ_0 , σ_1 и b – параметры, подлежащие определению.

Приводится методика определения параметров аппроксимации (8), обеспечивающих выполнение условий самоуравновешенности ОН в детали.

В пункте 2.3 выполнена экспериментальная проверка математической модели (1)–(8) расчёта полей остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых полых цилиндрических образцах из стали 40X с внутренним радиусом $R_1 = 5$ мм и внешним – $R_2 = 12,5$ мм и стали 45 ($R_1 = 5$ мм, $R_2 = 7,5$ мм), упрочнённых в режимах изотропного (гидродробеструйная обработка (ГДО), в формуле (3) коэффициент $\alpha = 1$) и анизотропного (обкатка роликом, $\alpha = 16,2$ для стали 40X и $\alpha = 6,6$ для стали 45) упрочнений. Наблюдается соответствие расчётных и экспериментальных зависимостей для компонент $\sigma_\theta^{res} = \sigma_\theta^{res}(h)$ и $\sigma_z^{res} = \sigma_z^{res}(h)$.

Кроме этого выполнена обстоятельная экспериментальная проверка аналогичной (1)–(8) методики для сплошных цилиндрических образцов в широком диапазоне вариаций геометрических параметров, технологий упрочнения, материала образцов (стали 12X18H10T, 30ХГСА, 45, ЭИ691, сплавы ЭИ437Б, В93 – ГДО; стали 12X18H10T, 30ХГСА – обработка микрошариками; стали 12X18H10T, 30ХГСА, 40X – обкатка роликом; сталь ЭИ691 – алмазное выглаживание). Показано, что и для сплошных образцов наблюдается хорошее соответствие расчётных и экспериментальных зависимостей для окружных и осевых компонент тензора остаточных напряжений (максимальная погрешность в среднеквадратической норме не превышает 16,7%), при этом величина параметра анизотропии упрочнения α для технологий обкатки роликом и алмазного выглаживания лежит в диапазоне от 8,2 до 16,6.

В пункте 2.4 проведён теоретический анализ влияния параметра анизотропии на распределение полей остаточных напряжений. Показано, что при одном и том же распределении $\sigma_\theta^{res}(r)$ величина $\sigma_z^{res}(r)$ может отличаться от $\sigma_\theta^{res}(r)$ более чем в 3 раза (в зависимости от значения α).

Сделан вывод о том, что повышая α для конкретной технологии ППД, можно добиться значительного увеличения величины осевых сжимающих ОН. Ввиду того, что эта компонента используется для оценки эффективности упрочнения, тем самым можно повысить эффективность процедуры поверхностного пластического деформирования.

В свою очередь, неучёт параметра анизотропии при решении краевых задач механики упрочнённых конструкций может привести к значительным погрешностям.

В пункте 2.5 приведены выводы по главе 2.

Глава 3. Математическое моделирование кинетики полей остаточных напряжений и деформаций при температурном нагреве изделия

В главе 3 приведён разработанный метод оценки перераспределения остаточных напряжений в упрочнённом поверхностном слое цилиндрического изделия вследствие изменения модуля упругости, обусловленного чисто температурным нагревом детали.

В пункте 3.1 сформулирована постановка задачи.

В пункте 3.2 рассматривается сплошной цилиндрический образец, в поверхностном слое которого наведены поля остаточных напряжений и пластических деформаций при температуре T_0 (модуль Юнга материала E_0). Затем обра-

зец нагревается до температуры T_1 (рассматривается установившееся (стационарное) температурное поле цилиндрического образца) и модуль Юнга принимает значение E_1 . Далее приводится методика расчёта кинетики напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое при изменении температуры от T_0 до T_1 .

Предложен метод, сводящий поставленную задачу к задаче фиктивной ползучести, методика решения которой описана в цикле работ В. П. Радченко и М. Н. Саушкина.

В пункте 3.3 приводятся результаты расчёта перераспределения полей остаточных напряжений в поверхностном слое при нагреве сплошных образцов из различных материалов, упрочнённых по различным технологиям: сталь ЭИ691 ($R=5\text{ мм}$, алмазное выглаживание, коэффициент анизотропии $\alpha=14,6$), сталь 30ХГСА ($R=7,5\text{ мм}$, обкатка роликом, коэффициент анизотропии $\alpha=16,6$), сталь 12Х18Н10Т ($R=5\text{ мм}$, обкатка роликом, коэффициент анизотропии $\alpha=8,2$), сталь 45 ($R=5\text{ мм}$, гидродробеструйная обработка, коэффициент анизотропии $\alpha=1$).

В качестве примера на рис. 1 приведены эпюры остаточных напряжений в упрочнённом при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ цилиндрическом образце (алмазное выглаживание, коэффициент анизотропии упрочнения $\alpha=14,6$) из стали ЭИ691 и при температурном нагружении до величины $T_1 = 600^\circ\text{C}$, откуда следует, что наблюдается значительное уменьшение по модулю значений компонент тензора остаточных напряжений (до 35%). Это говорит о том, что нагрев изделия в значительной степени влияет на напряжённо-деформированное состояние упрочнённого образца.

В пункте 3.4 анализируются полученные в пункте 3.3 результаты. Одним из возможных применений разработанной методики является оценка скорости релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести как в условиях чисто температурных выдержек без внешних нагрузок (термоэкспозиция образца), так и в условиях температурно-силового нагружения цилиндрического образца. При этом НДС к окончанию момента прогрева ($T = T_1$) играет роль начальных данных для решения задачи ползучести упрочнённого образца.

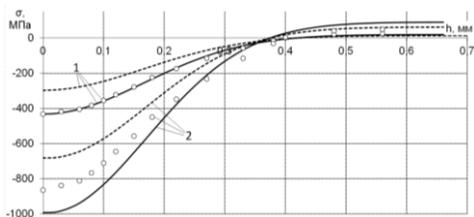


Рис. 1. Перераспределение остаточных напряжений при нагреве цилиндрического образца из стали ЭИ691: Окружная σ_{θ}^{res} (1) и осевая σ_z^{res} (2) компоненты; значки — экспериментальные данные; расчётные при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ (сплошные линии) и при $T_1 = 600^\circ\text{C}$ (штриховые линии) данные

Глава 4. Решение краевой задачи релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести

Глава 4 посвящена задаче расчёта кинетики напряжённо-деформированного состояния изделия в процессе эксплуатации в условиях высокотемпературной ползучести.

В пункте 4.1 приведена постановка задачи главы 4.

В пункте 4.2 описан разработанный прямой метод решения краевой задачи о ползучести растягиваемого полого цилиндра с наведёнными в поверхностном слое полями сжимающих остаточных напряжений.

Полная деформация ε_{ij} представляется следующим образом:

$$\varepsilon_{ij}(r,t) = e_{ij}(r,t) + e_{ij}^p(r,t) + p_{ij}(r,t),$$

где e_{ij} , e_{ij}^p , p_{ij} – упругая, пластическая деформации и деформация ползучести.

В качестве начального НДС принимается состояние после процедуры упрочнения при $t = 0$ и последующего чисто температурного нагружения. Стандартными для цилиндрической системы координат преобразованиями задача свелась к решению неоднородного дифференциального уравнения второго порядка с переменными коэффициентами относительно напряжения $\sigma_r(r,t)$, где t играет роль параметра. Решение этого уравнения получено в квадратурах. Затем из уравнения равновесия определяется $\sigma_\theta(r,t)$, а далее по формулам, аналогичным (5), (6), – напряжение $\sigma_z(r,t)$.

В пункте 4.3 приводится реологическая модель, используемая в диссертационном исследовании для оценки деформации ползучести при решении краевой задачи релаксации остаточных напряжений.

Целью пункта 4.4 являлась, во-первых, реализация разработанной в пункте 4.2 методики расчёта релаксации остаточных напряжений в упрочнённом полом цилиндрическом образце в условиях ползучести и, во-вторых, проверка адекватности модели имеющимся в научной литературе экспериментальным данным. Расчёты выполнялись для гладких цилиндрических образцов из Д16Т с внешним диаметром $D_1 = 15$ мм и внутренним отверстием $d = 5$ мм, упрочнённых на пневмодробеструйной установке, подвергавшихся в последующем термоэкспозиции (температурной выдержке без нагрузки) при температуре $T = 125^\circ\text{C}$ в течение 100 часов с последующей разгрузкой до комнатной температуры. Результаты расчётов кинетики остаточных напряжений $\sigma_z^{res} = \sigma_z^{res}(h,t)$ (h – глубина упрочнённого слоя) вследствие ползучести за счёт самоуравновешенных напряжений приведены на рис. 2. Здесь же представлены и имеющиеся экспериментальные данные¹.

¹ Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Вакулюк В. С. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям. – Самара: СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

В пункте 4.5 выполнено теоретическое и экспериментальное исследование ползучести сплошного поверхностно упрочнённого цилиндрического образца из сплава ЖС6КП при $T = 800^\circ\text{C}$ при действии растягивающей нагрузки. Для экспериментального исследования образцы вырезались из прутка и подвергались механической обработке, термообработке и полированию по штатной технологии, исключая возникновение технологических остаточных напряжений. Для наведения остаточных напряжений использовалась процедура пневмодробеструйной обработки поверхности микрошариками при $T = 26^\circ\text{C}$ (давление воздуха – 0,3 МПа, скорость полёт микрошариков – 76 м/сек, время упрочнения – 45 сек). Экспериментальное исследование релаксации ОН вследствие ползучести в упрочнённых микрошариками образцах при $T = 800^\circ\text{C}$ осуществлялось методом полос и колец при растягивающих осевых распределённых нагрузках $N = 150$ МПа и 250 МПа в течение 50 и 200 часов. Теоретическое исследование выполнено на основе анализа решения краевой задачи ползучести сплошного упрочнённого образца по методике, аналогичной пункту 4.4. На рис. 3 приведены результаты расчёта релаксации остаточных напряжений при двух уровнях нагрузки. В целом наблюдается удовлетворительное соответствие расчётных и экспериментальных данных.

Анализ результатов расчёта показал, что приложение осевой растягивающей нагрузки замедляет процесс релаксации ОН по сравнению со случаем чистой термоэкспозиции (по крайней мере на исследуемых временных интервалах и при заданных в эксперименте значениях растягивающей нагрузки). Однако теоретические исследования в более широком диапазоне изменения растягивающей нагрузки (по сравнению с экспериментальными исследованиями) показали, что для нагрузок большей интенсивности (250 ÷ 300 МПа) замедление скорости релаксации наблюдается лишь на начальных участках временного интервала, а при больших временах скорость релаксации напряжений становится большей по сравнению со случаем термоэкспозиции.

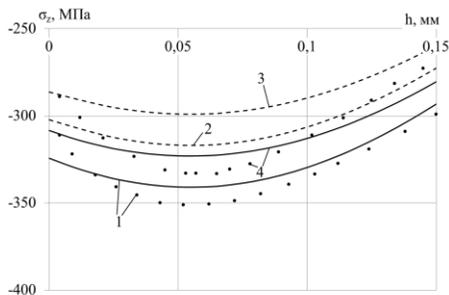


Рис. 2. Кинетика напряжения $\sigma_z^{res} = \sigma_z^{res}(h)$ сплава Д16Т в процессе термоэкспозиции: 1 – эпоюра после процедуры упрочнения при $t = 0-0$ ($T = 20^\circ\text{C}$); 2 – эпоюра после ступенчатого увеличения температуры при $t = 0+0$ ($T = 125^\circ\text{C}$); 3 – эпоюра в момент времени $t = 100-0$ ч. ($T = 125^\circ\text{C}$); 4 – эпоюра после температурной разгрузки $t = 100+0$ ч. ($T = 20^\circ\text{C}$). Значки – экспериментальные данные при $t = 0-0$ и $t = 100+0$ ч.

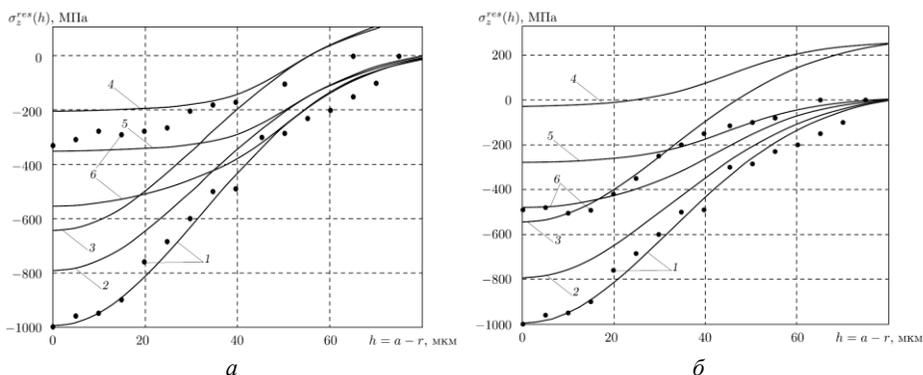


Рис. 3. Эпюры остаточных напряжений σ_z^{res} при температурной ($T = 800^\circ\text{C}$) и силовой (a — $N = 150$ МПа, b — $N = 250$ МПа) нагрузках: 1 — расчётные и экспериментальные (точки) значения после процедуры упрочнения при $T = 26^\circ\text{C}$ в момент времени $t = 0-0$; 2 — расчётные значения после температурной нагрузки при $T = 800^\circ\text{C}$ в момент времени $t = 0+0$; 3 — расчётные значения после температурно-силовой нагрузки при $T = 800^\circ\text{C}$ в момент времени $t = 0+0$; 4 — расчётные значения после ползучести при температурно-силовой нагрузке при $T = 800^\circ\text{C}$ в момент времени $t = 50-0$ ч; 5 — расчётные значения после силовой разгрузки при $T = 800^\circ\text{C}$ и $N = 0$ МПа в момент времени $t = 50+0$ ч; 6 — расчётные значения после температурно-силовой разгрузки при $T = 26^\circ\text{C}$ и $N = 0$ МПа в момент времени $t = 50+0$ ч

В пункте 4.6 приведены выводы по главе 4.

Глава 5. Программное и информационное обеспечение методов решения задач механики анизотропно упрочнённых цилиндрических изделий при ползучести

Глава 5 посвящена описанию разработанного программного комплекса STRELAX, предназначенного для решения краевых задач восстановления и релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести в поверхностно упрочнённых цилиндрических деталях.

В пункте 5.1 приведено описание программного комплекса STRELAX: его функциональные возможности и элементы графического интерфейса пользователя.

В пункте 5.2 описана архитектура программного комплекса: основные модули и формат передачи информации между ними.

Пункт 5.3 посвящён объектной модели, заложенной в программе. Приведена блок-схема программной реализации расчётного ядра. Перечислены основные классы и обозначены связи между ними (наследование, агрегация).

В пункте 5.4 рассмотрен пример решения с помощью STRELAX краевой задачи восстановления и расчёта кинетики полей остаточных напряжений вследствие ползучести при $T = 800^\circ\text{C}$ в изотропно упрочнённом поверхностном слое

сплошного цилиндрического образца радиуса $R = 3,76$ мм из жаропрочного сплава ЖС6КП, упрочнённого с помощью обработки микрошариками. Решение задачи включает в себя восстановление полной картины напряжённо-деформированного состояния в поверхностном слое образца после упрочнения, оценку перераспределения полей остаточных напряжений вследствие нагрева и расчёт релаксации напряжений с течением времени в условиях ползучести.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Разработан феноменологический метод восстановления остаточных напряжений и пластических деформаций в полом цилиндрическом образце с учётом анизотропии поверхностного упрочнения.
2. Предложены методики идентификации параметров модели для оценки напряжённо-деформированного состояния в упрочнённом слое цилиндрического образца и коэффициента анизотропии упрочнения на основе известной экспериментальной информации.
3. Выполнена проверка адекватности данных расчёта остаточных напряжений в цилиндрическом изделии для широкого спектра технологий упрочнения (гидро- и пневмодробеструйная обработка, обкатка роликом, алмазное выглаживание), режимов упрочнения, материалов, геометрических параметров. Установлено соответствие расчётных и экспериментальных данных.
4. Выполнен анализ влияния параметра анизотропии упрочнения на распределение полей остаточных напряжений в полом и сплошном цилиндре после процедуры упрочнения. Установлено существенное расслоение эпюр окружной и осевой компонент тензора остаточных напряжений при значениях параметра, отличных от единицы.
5. Разработан прямой метод решения краевой задачи о ползучести упрочнённого полого цилиндра в условиях ползучести при температурно-силовом нагружении. Выполнен детальный анализ влияния значений силовых и температурных нагрузок на кинетику напряжённо-деформированного состояния. Выполнена проверка адекватности метода экспериментальным данным для цилиндрического образца из сплава Д16Т при $T = 125$ °С в условиях термоэкспозиции (температурная выдержка без растягивающих нагрузок).
6. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования по влиянию растягивающей нагрузки на скорость релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести в сплошных цилиндрических образцах из сплава ЖС6КП при $T = 800$ °С. Установлено, что скорость релаксации в поверхностно упрочнённом слое цилиндрического изделия при действии растягивающей нагрузки в условиях ползучести носит «немонотонный» характер в зависимости от величины растягивающей нагрузки и её длительности. В частности, увеличение нагрузки может замедлять скорость релаксации остаточных напряжений. Установлено соответствие расчётных и экспериментальных данных для полей остаточных

напряжений в различные временные сечения для всех режимов нагружения.

7. Разработан программный комплекс, позволяющий решать краевые задачи механики упругих цилиндрических изделий и реализующий все разработанные методики.

Список основных публикаций в рецензируемых журналах из перечня ВАК

- [1] Саушкин М. Н., Кирпичёв В. А., Смыслов В. А. Феноменологический подход к моделированию напряженно-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое цилиндрического изделия // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* – 2009. – №1(18). – С. 159-168.
- [2] Кирпичёв В. А., Саушкин М. Н., Афанасьева О. С., Смыслов В. А. Прогнозирование предела выносливости упрочненных деталей при повышенной температуре // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* – 2010. – №1(20). – С. 218-221.
- [3] Саушкин М. Н., Смыслов В. А. Блок расчёта начального напряжённо-деформированного состояния конструкций в программном комплексе STRELAX // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* – 2010. – №5(21). – С. 318-321.
- [4] Смыслов В. А. Расчёт полей остаточных напряжений и упругих деформаций при нагреве цилиндрического изделия // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки.* – 2013. – №4(40). – С. 120-125.

В других изданиях:

- [5] Смыслов В. А. Аппроксимация поля остаточных напряжений при поверхностном упрочнении цилиндрического изделия // *Актуальные проблемы современной науки. Труды 4-го Международного форума молодых ученых. Части 1-3. Математика. Математическое моделирование. Механика.* – Самара: СамГТУ, 2008. – С. 234-237.
- [6] Радченко В. П., Саушкин М. Н., Смыслов В. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния в упрочнённом слое элементов конструкций для различных упрочняющих технологий // *Ресурс и диагностика материалов и конструкций. Тезисы докладов IV Российской научно-технической конференции.* – Екатеринбург, 2009. – С. 152.
- [7] Головкин В. В., Агафонов А. А., Смыслов В. А. Методика расчёта остаточных напряжений при нарезании резьбы с учётом ультразвуковых колебаний инструмента // *Ресурс и диагностика материалов и конструкций. Тезисы докладов IV Российской научно-технической конференции.* – Екатеринбург, 2009. – С. 153.
- [8] Смыслов В. А. Методика восстановления напряженно-деформированного состояния после поверхностного пластического упрочнения цилиндри-

- ческого изделия // Научному прогрессу – творчество молодых. Тезисы докладов Международной научной молодёжной конференции по естественным и техническим дисциплинам. – Йошкар-Ола, МарГУ, 2009. – С. 101–103.
- [9] *Головкин В. В., Смыслов В. А., Ромашикина О. В., Агафонов А. А.* Анализ напряжённо-деформированного состояния в упрочнённом слое при нарезании резьб с использованием ультразвуковой обработки // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды шестой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. – Самара: СамГТУ, 2009. – С. 82-90.
- [10] *Саушкин М. Н., Курпичёв В. А., Смыслов В. А.* Напряженно-деформированное состояние поверхностно-упрочнённого слоя цилиндрического изделия // Физика прочности и пластичности материалов. Сборник тезисов докладов XVII Международной конференции. – Самара, 2009. – С. 231.
- [11] *Дубовова Е. В., Смыслов В. А.* Расчет полей остаточных напряжений и пластических деформаций в поверхностно упрочненном слое кругового концентратора плиты с учетом организации процесса поверхностного пластического деформирования // Математическое моделирование и краевые задачи. Труды седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. – Самара: СамГТУ, 2010. – С. 130-133.
- [12] *Головкин В. В., Дружинина М. В., Ромашикина О. В., Смыслов В. А.* Исследование влияния вынужденных ультразвуковых колебаний на формирование остаточных напряжений при нарезании наружных резьб малого диаметра // Прочность материалов и элементов конструкций. Тезисы докладов международной научно-технической конференции. – Киев, 2010. – С. 98-100.
- [13] *Смыслов В. А.* Автоматизация расчета полей остаточных напряжений при поверхностном упрочнении концентратора и цилиндра // Актуальные проблемы современной науки. Труды 5-го Международного форума молодых ученых. Части 1-3. Математика. Математическое моделирование. Механика. – Самара: СамГТУ, 2010. – С. 218-222.
- [14] *Саушкин М. Н., Афанасьева О. С., Смыслов В. А.* Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в цилиндрических изделиях после процедуры анизотропного поверхностного упрочнения // Механика микронеоднородных материалов и разрушение. Тезисы докладов VI Российской научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2010. – С. 121.
- [15] *Смыслов В. А.* Математическое моделирование напряжённо-деформированного состояния при поверхностном упрочнении конструкций // Научному прогрессу – творчество молодых. Сборник материалов Международной молодежной научной конференции по естественным и техническим дисциплинам. – Йошкар-Ола, 2010. – С. 111.
- [16] *Саушкин М. Н., Куров А. Ю., Смыслов В. А.* Исследование влияния гео-

метрии концентратора на формирование остаточных напряжений поверхностно упрочнённых цилиндрических образцов // Механика микро-неоднородных материалов и разрушение: тезисы VII Российской конференции (23–27 апреля 2012 г.). – Екатеринбург, ИМАШ УрО РАН, 2012. – С. 138.

- [17] *Смыслов В. А.* Разработка математического и программного обеспечения для численного решения краевых задач механики упрочнённых конструкций // Всероссийская конференция «Актуальные проблемы математики и механики», посвящённая 75-летию д.ф.-м.н., профессора Г.И. Быковцева. – Самара, СамГУ. – 2013.
- [18] *Смыслов В. А.* Численные методы и программное обеспечение решения задач расчёта напряжённо-деформированного состояния упрочнённых цилиндрических тел // XVIII Зимняя школа по механике сплошных сред. Тезисы докладов. – Пермь, 2013. – С. 320.
- [19] *Смыслов В. А.* Решение краевых задач механики упрочнённых конструкций в цилиндрической системе координат // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды девятой Всероссийской конференции с международным участием. Ч. 1: Математические модели механики, прочности и надёжности элементов конструкций. – Самара: СамГТУ, 2013. – С. 212-217.
- [20] *Смыслов В. А.* Математическое и программное обеспечение для моделирования напряжённо-деформированного состояния упрочнённых цилиндрических образцов в условиях высокотемпературного нагружения // Материалы VIII Всероссийской конференции по механике деформируемого твёрдого тела (Чебоксары, 16–21 июня 2014 г.): в 2 ч. Ч. 2. / под ред. Н. В. Морозова, Б. Г. Миронова, А. В. Манжирова. – Чебоксары: Чуваш. гос. пед. ун-т, 2014. – С. 168-170.
- [21] *Радченко В. П., Смыслов В. А.* Кинетика напряжённо-деформированного состояния в упрочнённом цилиндрическом образце в условиях температурно-силового нагружения // Материалы Четвёртой международной конференции «Математическая физика и её приложения» – Самара, 2014 – С. 295.