



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

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

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

04.06.2018 № 104-2985

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор

чл.-корр. РАН, доктор технических наук



Е. В. Шахматов

1 июня 2018 года

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Цветкова Виталия Владимировича

«Краевые задачи ползучести поверхностно упрочнённых цилиндров

при различных видах квазистатического нагружения»,

представленной на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

1. Актуальность темы диссертации. Причиной многих аварийных ситуаций, происходящих при эксплуатации элементов конструкций при нормальной и повышенной температурах, являются не только напряжения от внешних нагрузок, но и остаточные напряжения после штатных технологических поверхностного пластического упрочнения. Необходимость усиления теоретических и экспериментальных исследований в механике упрочнённых конструкций обусловлена важностью остаточных напряжений в технике и отсутствием систематической теории для решения соответствующих краевых задач, совершенно недостаточным уровнем наших знаний о процессах релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести при сложном напряжённом состоянии, невозможностью надёжного экспериментального измерения распределения всех компонент тензора остаточных напряжений по толщине упрочнённого поверхностного слоя. Недостатки только экспериментальных / расчётно-экспериментальных методов очевидны и хорошо известны: во-первых, они позволяют определить либо одну, либо две компоненты тензора остаточных напряжений, но не позволяют определить осталь-

ные компоненты тензора напряжений и, тем более, компоненты остаточных пластических деформаций; во-вторых, распределение напряжений по толщине упрочнённого слоя можно определить только разрушающими методами; в-третьих, в условиях ползучести существенно повышается трудоёмкость исследований, длительность испытаний, удорожание исследований.

Проблема количественной оценки остаточных напряжений находится на одном из первых мест, поскольку они непосредственно влияют на повышение характеристик долговечности деталей. В связи с указанными трудностями экспериментальных / расчётно-экспериментальных методов важная роль отводится теоретическим методам решения проблемы формирования остаточных напряжений и их релаксации в условиях высокотемпературной ползучести: это постановки новых краевых формирования и остаточных напряжений после упрочнения, задач ползучести упрочнённых элементов конструкций, разработка методов решения этих краевых задач и создание алгоритмического и программного обеспечения для реализации методов. Особо остро эта задача стоит при исследовании упрочнённых деталей в условиях ползучести при сложном напряжённом состоянии в поле внешних температурно-силовых нагрузок. Здесь уместно отметить, что в настоящее время задачи данного типа в полном объёме решены лишь для цилиндрических деталей в условиях термоэкспозиции (чисто температурной выдержки упрочнённой детали без приложения механических нагрузок), либо при одноосном растяжении сплошного цилиндра. В связи с этим диссертационная работа Цветкова В. В., направленная на разработку новых теоретических методов прогнозирования кинетики полей остаточных напряжений в сплошных и полых цилиндрических образцах в условиях ползучести при разных видах сложного напряжённого состояния, безусловно, является своевременной и актуальной.

2. Новизна проведённых исследований и полученных результатов.

При оценке научной новизны основных результатов диссертационной работы В. В. Цветкова нужно исходить из выше отмеченного факта, что систематических теоретических фундаментальных подходов к исследованию напряжённо-деформированного состояния (НДС) в упрочнённом слое типовых элементов конструкций после упрочнения, к анализу влияния температурно-силовых внешних полей на релаксацию остаточных напряжений в условиях ползучести при разных видах напряжённого состояния в настоящее время практически не имеется. Решаются в основном задачи частного характера.

Оценку научной новизны и основных результатов выполним по главам.

Несмотря на обзорный характер **первой главы** и формулировку основных задач исследования, соискатель прежде выявил принципиальные сложности экспериментальных исследований и теоретических подходов к исследуемой проблеме, порождающих неоднозначность в принимаемых гипотезах и многообразии в подходах при моделировании НДС упрочнённых элементов конструкций. Автор аргументированно объясняет его предпочтение в выборе конкретных математических моделей и структурировании диссертации (см. рис. 1.1), подробно изложил основные положения проблематики, указал место принимаемых гипотез с их обсуждением, что существенно расширяет понимание цитируемых статей. Такой подход следует отнести к достоинствам работы, поскольку это упрощает понимание многих вопросов при знакомстве с ней.

Во второй главе диссертант обоснованно подошёл к выбору реологической модели и критерию разрушения материалов, сформулировал своё предпочтение выбора (и дальнейшего обобщения на случай анизотропии свойств материала) энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности с подробным изложением методики идентификации параметров модели. После выбора реологической модели на её основе разработана методика решения краевой задачи ползучести и длительной прочности полых и сплошных неупрочнённых цилиндрических образцов при совместном действии растягивающей осевой силы, крутящего момента и внутреннего давления (для полых образцов). Отметим, что данная задача (в квадратурах) решена впервые, хотя в дальнейшем для вычисления интегралов приходится прибегать к численным методам. Выполнена большая работа по проверке адекватности метода решения краевой задачи (а значит, и эффективности реологической модели) известным экспериментальным данным по ползучести и длительной прочности сплошных и полых цилиндров при следующих внешних нагрузках: осевое растяжение, чистый сдвиг, кручение, действие внутреннего давления, растяжение + кручение, растяжение + внутреннее давление, кручение + внутреннее давление. Установлено хорошее соответствие данных расчёта и экспериментальных данных. Получены новые расчётные данные для полей напряжений и деформаций в полых и сплошных цилиндрах из стали 45 ($T = 725\text{ °C}$, $T = 740\text{ °C}$), сплава АМГ-6М ($T = 450\text{ °C}$), стали 20 ($T = 500\text{ °C}$), стали ЭИ694 ($T = 700\text{ °C}$), стали 12Х18Н10Т ($T = 850\text{ °C}$), сплава ЭИ698ВД ($T = 750\text{ °C}$) в различные временные сечения при разных видах напряжённого состояния. Эти данные сами по себе представляют интерес в прикладных задачах, поскольку указанные материалы широко ис-

пользуются в энергетическом машиностроении, авиадвигателестроении и других отраслях.

Отдельно отметим предложенный соискателем вариант теории ползучести и длительной прочности, описывающий анизотропию свойств ползучести при чистом растяжении и чистом сдвиге, адекватность которого экспериментальным данным проиллюстрирована на примере решения краевых задач для цилиндров из сплава Д16Т ($T = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$) и сплава РА6 ($T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Результаты, полученные во второй главе диссертации, нашли логическое продолжение **в третьей главе**, где впервые предложен метод решения краевых задач ползучести поверхностно упрочнённых полых и сплошных цилиндрических образцов при различных видах напряжённого квазистатического нагружения: термоэкспозиция, осевое растяжение, кручение, внутреннее давление и их комбинации. Это основной и ключевой элемент новизны рецензируемой работы. Отметим, что данный тип задач относится к типу краевых задач с начальным (собственным) напряжённо-деформированным состоянием, трудность решения которых связана с удовлетворением начальных напряжений и неупругих деформаций уравнениям равновесия и совместности деформаций. Выше уже отмечалось, что экспериментальные данные по релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести приведены буквально в единичных работах, в которых процесс релаксации для цилиндров из сплавов ЖС6УВИ ($T = 675\text{ }^{\circ}\text{C}$) и ЖС6КП ($T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) исследован в условиях чистой термоэкспозиции и осевого растяжения соответственно. И именно по данным этих работ соискатель выполнил проверку адекватности разработанного метода с хорошим соответствием данных расчёта и опытных данных, что следует из анализа графиков, представленных на рис. 3.1, рис. 3.3, рис. 3.4 и рис. 3.5 диссертации (частично эти данные представлены на рис. 1 автореферата). Также отметим, что указанные сплавы используются при изготовлении лопаток турбин в двигателестроении и полученные данные по релаксации остаточных напряжений будут полезны в прикладных задачах инженерной практики.

В четвёртой главе, используя разработанный метод как «рабочий инструмент», соискателем выполнен вариативный анализ влияния вида напряжённого состояния на скорость релаксации остаточных напряжений в упрочнённых образцах. Приведены новые расчётные данные для распределения всех компонент тензора напряжений при чистом кручении и кручении с растяжением (сплошные цилиндры) и при внутреннем давлении и комбинации внутреннего давления с растягивающей нагрузкой, либо

с крутящим моментом. Отмечен эффект увеличения скорости релаксации напряжений при наложении одного вида нагружения на другой.

Другой заслуживающий внимания факт состоит в том, что третья стадия ползучести практически не влияет на кинетику остаточных напряжений. Это объясняется тем, что к началу третьей стадии произошла практически полная релаксация остаточных напряжений, сформированных после процедуры упрочнения (по крайней мере – для рассмотренных в диссертации материалов).

В пятой главе приводится описание численных алгоритмов, программного обеспечения (ПО) для реализации разработанных теоретических методов решения краевых задач. Отметим уникальность разработанного ПО, поскольку даже в мощных современных вычислительных комплексах типа ANSYS (и других) опций для решения задач ползучести после процедуры упрочнения не имеется. Этим определяется новизна разработанного программного комплекса.

Все отмеченные выше позиции новизны диссертационной работы полностью соответствуют паспорту специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

3. Степень обоснованности, достоверность результатов и выводов диссертации. Достоверность полученных Цветковым В. В. результатов и выводов обеспечивается: корректной постановкой новых краевых задач ползучести упрочнённых и неупрочнённых цилиндрических образцов; строгим научным обоснованием методов их решения; использованием научно-обоснованных гипотез и положений, не противоречащих основам механики деформируемого твёрдого тела; использованием научно-обоснованных расчётных схем вычислительной математики, широко используемых информационных технологий и современных программно-вычислительных комплексов. Адекватность результатов и выводов обоснована сопоставлением значительного объёма расчётных данных по моделям соискателя с экспериментальными данными и данными расчётов из независимых источников.

4. Значимость результатов диссертации. Высокая значимость для науки и практики результатов представленной на отзыв диссертации заключается в том, что решённый автором комплекс задач по разработке методов решения краевых задач ползучести и длительной прочности для упрочнённых и неупрочнённых цилиндрических образцов позволяет:

- выполнять анализ кинетики остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых цилиндрах вследствие ползучести в различные временные сечения при различных видах напряжённого состояния в широком диапазоне технологий упрочнения, свойств материала изделий, геометрических параметров и внешних комбинированных воздействий;
- использовать на практике полученные результаты по релаксации остаточных напряжений в цилиндрических образцах из ряда материалов, широко используемых в различных отраслях промышленности;
- использовать в расчётной практике разработанный программный комплекс для автоматизации расчётов и оценки ресурса упрочнённых изделий в условиях ползучести по параметрическим критериям отказа (величина остаточных напряжений).

5. Апробация работы. Основные результаты работы в достаточной мере опубликованы в рецензируемых журналах из перечня ВАК и международных баз данных, трудах конференций, докладывались на ряде научных конференций различного статуса.

6. Диссертация и автореферат написаны ясным и понятным языком, технически грамотно. Содержание диссертации полно, подробно и ясно раскрывает постановки, методы и полученные результаты решения рассматриваемых задач. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

7. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Полученные в диссертации решения и связанные с ними выводы, касающиеся особенностей постановок краевых задач и разработанных методов их решения, выполненный анализ решений для образцов для ряда сталей и сплавов найдут своё практическое использование при планировании технологий упрочнения и эксплуатации упрочнённых цилиндрических деталей в условиях высокотемпературной ползучести при сложных режимах нагружения. Полученные в диссертационной работе результаты позволяют рекомендовать их предприятиям авиационной и ракетно-космической отраслей, энергетического машиностроения, нефтехимии, проектирующим и изготавливающим ответственные детали со штатной технологией упрочнения, эксплуатирующим упрочнённые узлы агрегатов в условиях реологического деформирования.

Конкретно, использование результатов диссертации рекомендуется продолжить в:

- 1) Институте машиноведения РАН (г. Москва);
- 2) Институте гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск);
- 3) Институте машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре);
- 4) Самарском национальном исследовательском университете имени академика С. П. Королева (г. Самара);
- 5) Самарском государственном техническом университете (г. Самара);
- 6) Институте механики сплошных сред УрО РАН (г. Пермь);
- 7) Пермском национальном исследовательском политехническом университете (г. Пермь);
- 8) ПАО «Кузнецов» (г. Самара);
- 9) ПАО «Ракетно-космический центр «Прогресс» (г. Самара)

и других организациях.

8. Замечания по содержанию и оформлению работы. Недостатков, ставящих под сомнение справедливость какого-либо результата, в диссертации не обнаружено. Замечания по диссертационной работе можно классифицировать как по оформлению диссертации, так и по существу работы.

1. При реконструкции напряжённо-деформированного состояния после процедуры упрочнения вводится аналитическая экстраполяция для окружной компоненты тензора остаточных напряжений из области сжатия, где имеются экспериментальные данные, на всю область интегрирования в виде (3.7) для сплошного и в виде (3.8) для полого цилиндров. Однако из каких соображений выбрана именно такая аналитическая форма в диссертации не поясняется.
2. В пункте 3.1 (стр. 121) без внятного обоснования утверждается, что при чисто температурной нагрузке зависимости остаточных напряжений, полученные после процедуры упрочнения при комнатной температуре, умножаются на коэффициент E_1/E_0 , а при температурной разгрузке – на обратный коэффициент. Это требует пояснений.
3. В работе используется реологическая модель и критерий разрушения, в которых фигурирует только деформация ползучести. Во-первых, после процедуры упрочнения в теле цилиндра возникают первичные пластические деформации и они, строго говоря, должны учитываться и в параметре повреждённости, и в критерии разрушения, который по сути, является диссипативным. Во-вторых, при решении краевых задач за счёт внешних нагрузок могут возникнуть вторичные пластические

деформации, которые необходимо учитывать уже и в реологической модели. В диссертации чётко не сформулированы ограничения, позволяющие снять вопросы по указанным замечаниям.

4. Касаясь оформления работы и технических замечаний по ней, отметим следующие. На стр. 22 в формуле $q_z(r) = a q_\theta(r)$ текстуально не описана величина r , это описание даётся ниже. Имеется логическое противоречие на стр. 31, где утверждается, что «рабочие» напряжения σ нелинейно накладываются на остаточные напряжения σ^{res} , хотя в дальнейшем при решении краевых задач при приложении нагрузки идёт их линейное суммирование. На блок-схеме алгоритма исследования (стр. 18), по-видимому, отсутствуют логические связи блоков «расчётно-экспериментальные» и «расчётные» (методы) с блоком «начальное НДС после упрочнения». На стр. 92 (и далее) в подрисуночных подписях к рисункам 2.16-2.18, 2.20-2.25 нет расшифровки, что представляют сплошные и штриховые линии. На рис. 2.17 (стр. 96) компонента γ^p расшифровывается как «угол сдвига», а далее (в некоторых случаях) она расшифровывается как «сдвиговая деформация». На стр. 132, 134 и 137 отсутствует верхний индекс «0» у напряжений σ .

Разумеется, отмеченные недостатки носят частный характер и ни в коем случае не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Цветкова В. В.

9. Заключение по диссертации.

Диссертантом теоретически решена задача оценки напряжённо-деформированного состояния поверхностно упрочнённых цилиндрических деталей в условиях температурно-силового нагружения при ползучести. Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы.

На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа Цветкова В. В. «Краевые задачи ползучести поверхностно упрочнённых цилиндров при различных видах квазистатического нагружения» является завершённым научным исследованием, выполненном на высоком научно-методическом уровне, соответствует специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела, имеет важное научное и прикладное значение, соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней. Рецензируемая диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её ав-

тор – Виталий Владимирович Цветков – заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Отзыв рассмотрен и утверждён на расширенном заседании кафедры «Соппротивление материалов» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» от 31 мая 2018 г. (протокол заседания № 11).

Заведующий кафедрой
сопротивления материалов
Самарского университета,
доктор технических наук (01:02.06),
профессор



Павлов
Валентин Фёдорович

Раб. телефон: 8 (846) 267-45-26
E-mail: sopromat@ssau.ru

Профессор кафедры
космического машиностроения
имени генерального конструктора Д. И. Козлова
Самарского университета,
доктор физико-математических наук (01.02.04),
доцент



Буханько
Анастасия Андреевна

Раб. телефон: 8 (846) 267-48-57
E-mail: abukhanko@ssau.ru