

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Бербасовой Татьяны Игоревны «Методы расчета формирования и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных призматических и тонкостенных цилиндрических элементах конструкций при ползучести», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**1. Структура и объем диссертации.** На отзыв представлены диссертационная работа и автореферат. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, основных результатов и выводов, списка используемой литературы из 166 наименований и двух приложений. Содержит 170 страниц текста, включая 53 рисунка, 5 таблиц. По объему и структуре работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» к оформлению диссертаций. Изложение диссертационной работы соответствует заявленной теме и подчинено решению поставленных задач.

**2. Актуальность.** Основным направлением развития современной науки и инженерной практики в машиностроении, энергетическом и аэрокосмическом промышленных комплексах является повышение показателей эксплуатационной надёжности при одновременном снижении материалоёмкости, энергетических и экономических затрат и ужесточении температурно-силовых режимов нагружения элементов конструкций.

Разрушение деталей при эксплуатации, как правило, начинается с поверхности вследствие того, что поверхностные слои оказываются наиболее нагруженными при всех видах напряженного состояния и подвергаются активному воздействию внешней среды. Этому способствуют также облегченные условия пластического течения металла в поверхностном слое по сравнению с сердцевиной детали (облегченный выход дислокаций и вакансий на поверхность).

Как известно, сопротивление усталости основных силовых деталей двигателя можно повысить металлургическими, конструктивными, технологическими и эксплуатационными методами, причем технологические методы, например поверхностного пластического упрочнения, являются наиболее эффективными, поскольку, во-первых, не увеличивают

материалоёмкость деталей, во-вторых, практически не влияют на геометрические параметры обрабатываемого изделия.

Повышение требований к надежности и долговечности конструкций приводит к использованию различных упрочняющих обработок поверхности деталей для создания в поверхностном слое благоприятных сжимающих остаточных напряжений. Они позволяют, например, повысить нижнюю границу сопротивления усталости.

подавляющее большинство работ в области механики упрочнения при нормальной температуре носит чисто экспериментальный характер. Определение остаточных напряжений, как правило, осуществляется на основе разрушающих методов контроля, при этом определяются не все компоненты тензора остаточных напряжений в слое, а лишь некоторые эквивалентные характеристики напряженного состояния. Методы определения остаточных пластических деформаций в упрочненном слое вообще оказываются за рамками существующих и экспериментальных, и расчетных методов механики упрочненных конструкций. Но для решения, например, краевых задач прочности, связанных с оценкой кинетики наведенных в процессе упрочнения остаточных напряжений при действии температурно-силовых нагрузок, даже стандартными вычислительными пакетами, необходимо иметь начальное напряженно-деформированное состояние в упрочненном слое. Отсюда естественным образом следует актуальность задачи определения полной картины для тензоров остаточных напряжений и остаточных пластических деформаций по глубине упрочненного слоя.

Одной из таких проблем является оценка степени релаксации остаточных напряжений в условиях высокотемпературной ползучести. Систематические исследования по определению остаточных напряжений и их влиянию на характеристики долговечности при нормальной температуре ведутся уже более полувека и здесь достигнуты определенные результаты в области исследования мало- и многоциклового усталости, трибологии, структуры упрочненного материала, качества поверхностного слоя и его микротвердости. Вместе с тем процессы релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести, например, в упрочненных деталях компрессора и турбины, продуктопроводах газотурбинного двигателя исследованы фрагментарно, в частности, при одностороннем поверхностно пластическом упрочнении цилиндрических деталей. Поэтому задачи релаксации для упрочненных плоских призматических

деталей и тонкостенных продуктопроводов в состоянии поставки и после двухстороннего упрочнения в настоящий момент требуют решения.

Таким образом, вопросы прогнозирования кинетики остаточных напряжений в упрочненных деталях сложной геометрии в условиях ползучести представляют собой важную задачу теории и практики производства деталей машин и поэтому актуальность научных исследований в данном направлении не вызывает сомнений.

**3. Научная новизна основных результатов исследования.** Экспериментальное определение остаточных напряжений в поверхностно упрочненных деталях трудоёмко и требует материальных затрат. И если для определения остаточных напряжений после технологических операций разработанные методы (как правило – разрушающего характера) хорошо отработаны и частично автоматизированы, то их определение в условиях высокотемпературной ползучести представляет большую проблему, поскольку необходимо применять разработанные методы в различные моменты времени, прерывая процесс ползучести и охлаждая деталь. В силу разрушающего характера методов определения остаточных напряжений необходимо иметь большое количество упрочненных образцов, испытываемых при одинаковых программах температурно-силового нагружения в условиях ползучести. Поэтому естественным образом возникает потребность в разработке аналитических методов расчета релаксации остаточных напряжений в упрочненных элементах конструкций при ползучести с минимальным привлечением экспериментальных исследований в некоторых реперных точках временного интервала исследования (например, в конечной точке этого интервала) для проверки адекватности расчетных методов. Исходя из выше изложенного, можно сформулировать основное научное достижение автора настоящей диссертационной работы – это полученные впервые и нашедшие отражение в его публикациях, разработка феноменологических методов реконструкции полей остаточных напряжений в поверхностно упрочненных призматических образцах и в тонкостенных цилиндрических оболочках в состоянии поставки и после двухстороннего упрочнения, а также разработка методов расчета эволюции остаточных напряжений в процессе высокотемпературной ползучести в условиях сложного напряженного состояния, т.е. решения в определенной мере новых краевых задач

реологического деформирования с начальным напряженно-деформированным состоянием.

При решении основной задачи диссертационного исследования Бербасова Т.И. получила ряд новых логически связанных научных результатов частного порядка, в том числе:

- предложен и реализован метод реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций после поверхностного пластического упрочнения для двух математических моделей – полупространства и призматического образца, сделан логически и экспериментально обоснованный выбор в сторону второй модели;
- разработан метод расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном призматическом образце при ползучести в условиях термоэкспозиции и двухосного нагружения;
- получен ряд нетривиальных результатов, связанных с замедлением процесса релаксации при двухосном растяжении упрочненного призматического образца и интенсификации релаксации в условиях сжатия по сравнению со случаем чистой термоэкспозиции;
- разработан метод реконструкции полей остаточных напряжений и пластических деформаций на внешней и внутренней поверхностях в тонкостенных трубках в состоянии поставки и после двухстороннего упрочнения в условиях существенной анизотропии остаточных пластических деформаций в осевом и окружном направлениях и выполнена его экспериментальная проверка;
- предложен метод расчета релаксации остаточных напряжений на внутренней и внешней поверхностях в тонкостенных цилиндрических трубопроводах в условиях ползучести;
- параметрический анализ напряженно-деформированного состояния в упрочненных призматических образцах и тонкостенных продуктопроводах в достаточно широком диапазоне изменения внешних нагрузок для обоих конструктивных элементов;
- научно-обоснованный анализ соответствия полученных соискателем решений с экспериментальными данными;
- разработка нового алгоритмического и программного продукта для реализации методов решения краевых задач методов реконструкции

остаточных напряжений и их релаксации в процессе ползучести для обоих типов конструктивных элементов;

- результаты новых теоретических исследований влияния вида температурно-силового нагружения на напряженно-деформированное состояние и релаксацию остаточных напряжений в упрочненных призматических и тонкостенных цилиндрических образцах из сплава ЭП742 и стали Х18Н10Т, соответственно, имеющих широкое применение, например, в авиадвигателестроении, энергетическом машиностроении, продуктопроводах пневмогидросистем различного назначения.

Исходя из выше изложенного, следует признать, что основные научные результаты и выводы диссертационной работы обладают научной новизной.

Таким образом, поставленная в диссертационном исследовании цель – разработка методов реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния после поверхностного пластического деформирования призматических образцов и двухстороннего упрочнения тонкостенных продуктопроводов и методов расчета релаксации остаточных напряжений в этих элементах конструкций в условиях ползучести при сложных программах нагружения - выполнена Бербасовой Т.И. в полном объеме.

**4. Достоверность результатов диссертации.** Достоверность результатов обеспечивается корректностью постановок математических и физических задач, использованием научно-обоснованных расчетных схем, применением апробированных численных методов расчета, реализацией алгоритмов и вычислительных процедур с использованием современных технологий программирования корректным заданием исходных данных, объективным анализом полученных результатов.

Диссертантом использован достаточный объем экспериментальных данных для обоснования вводимых гипотез, проведена проверка адекватности основных расчетных моделей для оценки характера распределения остаточных напряжений после процедуры поверхностного пластического деформирования и в процессе ползучести. Выполнено сопоставление результатов, полученных численным методом и методами с использованием существующих справочных данных с опубликованными результатами исследований, с известными экспериментальными данными, при этом наблюдается достаточно точная коррелированность расчетных и опытных данных.

## 5. Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики.

### *Значимость результатов для науки:*

- разработан новый расчетно-экспериментальный метод реконструкции остаточного напряженно-деформированного состояния в упрочненном призматическом образце с учетом анизотропии остаточных пластических деформаций в плоскости упрочнения;
- разработан метод релаксации остаточных напряжений в упрочненном призматическом образце в условиях ползучести;
- разработан метод оценки остаточных напряжений на внутренней и внешней поверхностях тонкостенных прямолинейных трубопроводов в состоянии поставки и после двухстороннего упрочнения и в процессе ползучести цилиндрического образца;
- установлены закономерности распределения остаточных напряжений в призматических образцах и тонкостенных цилиндрах после упрочнения и в любые временные сечения в процессе их релаксации в условиях ползучести.

### *Значимость результатов для практики:*

- разработанный метод прогнозирования скорости релаксации остаточных напряжений в различные временные сечения при ползучести для упрочненных призматических образцов и реальных тонкостенных продуктопроводов пневмогидросистем ГТД может быть использован для оценки эффективности поверхностного пластического упрочнения в условиях высоких температур и действия механических эксплуатационных нагрузок;
- выявление закономерности распределения остаточных напряжений в плоских деталях из сплава ЭП742 ( $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и прямолинейных участках тонкостенных продуктопроводов пневмогидравлических систем ГТД ( $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , сталь X18H10T и  $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , сталь 08X18H9) могут быть использованы в задачах параметрической надежности упрочненных элементов конструкции (по величине остаточных напряжений);
- разработанные теоретические положения, методики, алгоритмы внедрены на предприятии ПАО «Кузнецов» (г. Самара) и могут использоваться на

других отечественных предприятиях авиадвигателестроения и энергетического машиностроения, а также в учебном процессе в высших учебных заведениях.

**6. Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы Бербасовой Т.И. в достаточном объеме опубликованы в научных журналах (в том числе, в требуемом минимуме из перечня ВАК) и трудах конференций различного статуса, докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня и научных семинарах в ведущих университетах. Считаю, что рецензируемая диссертационная работа в достаточной мере опубликована и апробирована.

**7. Диссертация и автореферат** написаны понятным научным языком с правильным использованием научной и технической терминологии. Содержание диссертации подробно, ясно и в полном объеме раскрывает постановку, методы, алгоритмы, процедуры и результаты решения поставленных задач. Автореферат в целом отражает основное содержание диссертации. Оформление диссертации и автореферата в целом соответствует существующим требованиям.

**8. Замечания по содержанию и оформлению работы.** Существенных замечаний, влияющих на положительное отношение к диссертационной работе, в автореферате и диссертации не выявлено.

Тем не менее, можно сделать следующие замечания.

1. Процедура идентификации параметров аппроксимации для компоненты  $\sigma_\theta = \sigma_\theta(r)$  (формула (4.2) диссертации) сводится к решению сложной нелинейной системы функционально-интегральных уравнений (4.5) – (4.9). Поскольку эта задача нелинейная, то вопрос единственности для параметров аппроксимации (4.2) – далеко не тривиальная задача. Фактически этот вопрос не исследован.

2. При построении модели реконструкции остаточных напряжений диссертант использовал в качестве одной из гипотез отсутствие вторичных пластических деформаций в области сжатия материала приповерхностного слоя. Однако при ступенчатом увеличении температуры, при которой происходит релаксация остаточных напряжений, происходит существенное падение предела текучести материала и здесь возможно вторичное пластическое течение материала в приповерхностном слое. Эта ситуация в диссертации не прокомментирована.

3. Поскольку автореферат является самостоятельным «научным произведением», то его текст должен быть понятен без обращения к тексту диссертации. В этом плане отметим некоторые замечания по автореферату.

1) В тексте автореферата не приведены численные значения температур  $T_0$ ,  $T_1$  при описании третьей и четвертой глав. Не приведено численное значение параметра анизотропии упрочнения  $\alpha$  в модели (13) для результатов расчетов на рис. 4 и рис. 5. Эта информация позволила бы оценить степень анизотропии пластических (необратимых) деформаций в состоянии поставки и после двухстороннего упрочнения внешней и внутренней поверхностей тонкостенных трубок.

2) Поскольку диссертация защищается по техническим наукам, то в автореферате более подробно нужно было бы дать информацию по пункту 9 «Заключения».

Вместе с тем отмеченные недостатки носят частный характер и не влияют на общее положительное отношение к рецензируемой работе.

**9. Заключение по диссертации.** Оценивая диссертационную работу и автореферат в целом, считаю, что диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным соискателем на высоком научном уровне и самостоятельно. Соискателем решена значимая научно-техническая задача в области разработки расчетных методов формирования остаточных напряжений вследствие технологических операций упрочнения для призматических и тонкостенных цилиндрических элементов конструкций и их релаксации в процессе высокотемпературной ползучести.

Достоверность полученных теоретических результатов, сформулированных выводов не вызывает сомнений. Работа базируется на достаточном объеме полученных теоретических результатов, которые в частных случаях коррелируют с экспериментальными данными.

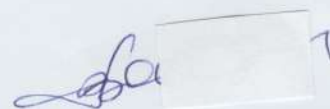
Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа Бербасовой Татьяны Игоревны «Методы расчета формирования и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненных призматических и тонкостенных цилиндрических элементах конструкций при ползучести» является завершенным научным исследованием, выполненным на достаточно высоком научном и методическом уровне, соответствует специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела», имеет научное и

прикладное значение, отвечает пункту 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 года (в редакции от 01.10.2018 года). Рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, а ее автор – Бербасова Татьяна Игоревна – заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Доцент кафедры сопротивления материалов,  
кандидат технических наук по специальности  
01.02.06 – Динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры, доцент



Сазанов Вячеслав Петрович

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королёва» (Самарский университет)  
443086, Россия, Самара, Московское шоссе, 34.  
Кафедра сопротивления материалов  
тел.: (8-846)2674526  
e-mail: sopromat@ssau.ru

