

На правах рукописи

Афанасьева Ольга Сергеевна

**Феноменологические методы расчёта  
остаточных напряжений в упрочнённых деталях  
с концентраторами напряжений в условиях  
ползучести**

01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2010

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

Научный руководитель: доктор физико–математических наук,  
профессор

Радченко Владимир Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Ермоленко Георгий Юрьевич

кандидат технических наук, доцент

Кичаев Евгений Константинович

Ведущая организация:

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится 12 ноября 2010 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.217.02 в ГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Галактионовская, 141, корпус № 6, ауд. 28.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Самарского государственного технического университета.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
Д212.217.02

Денисенко А. Ф.

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Одним из способов повышения долговечности многих изделий является наведение сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое (упрочнение). При этом повышение, например, сопротивления усталости обусловлено главным образом сжимающими остаточными напряжениями в поверхностном слое, которые препятствуют выходу на поверхность различного рода дислокаций и вакансий. Однако в процессе эксплуатации при высоких температурах вследствие ползучести происходит процесс релаксации остаточных напряжений (уменьшение сжимающих напряжений по модулю) на фоне реологического деформирования самой конструкции.

Существующие на сегодняшний день методики расчёта остаточных напряжений в упрочнённом слое носят в подавляющем большинстве экспериментальный характер и позволяют определить одну или две компоненты тензора остаточных напряжений.

Однако без полной (трёхмерной) картины напряжённо-деформированного состояния (НДС) после процедуры упрочнения невозможно решать краевые задачи при последующем нагружении и ползучести. Разработанные в этом направлении методы справедливы лишь для простейших гладких деталей и для режимов так называемого изотропного поверхностного упрочнения (гидро- и пневмодробеструйная обработка, азотирование, термопластическое упрочнение). Для режимов анизотропного упрочнения поверхности (обкатка роликами, алмазное выглаживание, дорнование и другие) требуется модификация и обобщение существующих методов.

Вопросы релаксации наведённых остаточных напряжений в условиях ползучести мало разработаны, причём существующие методы решения краевых задач относятся в основном к деталям с «гладкой» поверхностью, без концентраторов напряжений.

Методики, позволяющие описать релаксацию остаточных напряжений в концентраторах, находятся в стадии становления. Важность этой задачи определяется прямой связью величины остаточных напряжений в концентраторе с повышением предела выносливости упрочнённых образцов и по эволюции остаточных напряжений вследствие ползучести можно определить кинетику приращения предела выносливости.

Всё вышеизложенное и определяет актуальность тематики диссертации.

**Целью диссертационной работы** является разработка феноменологических методов определения остаточных напряжений после процедуры анизотропного упрочнения и их релаксации вследствие ползучести для деталей с концентраторами напряжений и их приложений к решению важных технических задач для ряда конструкций: вращающиеся прямолинейная и за-

крученая лопатки переменного сечения ГТД, диск ГТД и цилиндрические образцы с концентраторами напряжений.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- 1) разработан феноменологический метод расчёта трёхмерных полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрическом образце, позволяющий, в отличие от существующих методов, учитывать анизотропию процесса упрочнения, и выполнена его экспериментальная проверка для цилиндрических образцов из сталей 45 и 30ХГСА, упрочнённых обкаткой роликом;
- 2) разработан прямой метод решения краевой задачи о релаксации остаточных напряжений в цилиндрическом образце при ползучести с учётом анизотропии поверхностного пластического упрочнения и выполнена его экспериментальная проверка для образцов из стали ЭИ691 при  $T = 400$  °С в условиях термоэкспозиции (температурной выдержки без нагрузки);
- 3) выполнен анализ влияния параметра анизотропии упрочнения на напряжённно-деформированное состояние в упрочнённом слое после процедуры упрочнения и на процесс релаксации остаточных напряжений в процессе ползучести; показано, что наблюдается существенное расслоение окружных и осевых остаточных напряжений в зависимости от параметра анизотропии, в отличие от случая, соответствующего изотропному упрочнению, где они практически совпадают;
- 4) разработана методика расчёта приращения предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурно-силовых выдержках в условиях ползучести;
- 5) разработана методика расчёта остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкций с произвольной границей, базирующаяся на идеях декомпозиции и склейки решений краевых задач, на основании которой решены новые задачи о релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести для упрочнённых прямолинейной лопатки ГТД, закрученной лопатки первой ступени турбины высокого давления газотурбинного комплекса ГТК-10-4, диска ГТД и цилиндрических образцов с концентраторами и выполнен их детальный численный анализ.

**Практическая значимость работы** в теоретическом плане заключается в разработке новых математических моделей и методик расчёта остаточных напряжений в условиях ползучести и их влияния на предел выносливости анизотропно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. С прикладной (инженерной) точки зрения разработанные методы, во-первых, позволяют решить ряд важных прикладных задач для упрочнённых элементов конструкций ГТД и цилиндрических деталей с концентраторами напряжений, а, во-вторых, могут служить основой для разработки методов оценки

надёжности (по величине остаточных напряжений) поверхностно упрочнённых элементов конструкций в энергетическом, машиностроительном, нефтехимическом и аэрокосмическом промышленных комплексах.

**Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается адекватностью модельных математических представлений реальному физико-механическому поведению материала в упрочнённом слое при 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 методов экспериментального исследования упрочнённых деталей; экспериментальной проверкой используемых гипотез и результатов решений задач.

**На защиту выносятся:**

- 1) феноменологический метод расчёта трёхмерных полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрическом образце, позволяющий, в отличие от существующих методов, учитывать анизотропию процесса упрочнения;
- 2) прямой численный метод решений краевой задачи о релаксации остаточных напряжений в цилиндрическом образце при ползучести с учётом анизотропии поверхностного пластического упрочнения;
- 3) методика оценки влияния температурно-силовых выдержек на приращение предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений в условиях ползучести;
- 4) методика оценки кинетики остаточных напряжений вследствие ползучести в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкций с произвольной границей, на основе которой решены новые прикладные задачи релаксации остаточных напряжений для прямолинейной и закрученной лопаток переменного сечения ГТД, диска ГТД и цилиндрического образца с концентраторами в условиях ползучести;
- 5) результаты новых экспериментальных исследований по определению напряжённо-деформированного состояния в упрочнённом слое после анизотропного упрочнения (обкатка роликом) и в условиях ползучести.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка источников из 154 наименований. Работа содержит 223 страницы основного текста.

**Апробация работы.** Результаты научных исследования опубликованы в 25 печатных работах и докладывались на ряде конференций различного уровня: на конференции «Дифференциальные уравнения и их приложения» (г. Самара, 2006 г.), на Четвёртой, Шестой и Седьмой Всероссийских научных конференциях с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2007, 2009, 2010 гг.), на Зимней

школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2007 г.), на Седьмом Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (г. Сочи, 2007 г.), на V, VI Всероссийской конференции «Механика микронеоднородных материалов и разрушение» (г. Екатеринбург, 2008, 2010 гг.), на Всероссийской конференции «Проблемы нелинейной механики деформируемого твёрдого тела» (г. Пермь, 2008 г.), на седьмой международной конференции «Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов» (г. Ульяновск, 2009 г.), на IV Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2009 г.), на международной научно-технической конференции «Прочность материалов и элементов конструкций» (г. Киев, 2010), на научном семинаре «Механика и прикладная математика» Самарского государственного технического университета (руководитель профессор В.П. Радченко, 2008–2010 гг.).

**Работа выполнялась при финансовой поддержке** Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 10-01-00644-а, 07-01-00478-а), Министерства образования и науки (проект РНП. 2.1.1/3397 и государственный контракт № П818) и в рамках темплана СамГТУ 199.1.4.09.

**Внедрение.** Результаты диссертационной работы внедрены в ОКБ инженерного центра ОАО «Кузнецов» г. Самара, использованы в учебном процессе кафедры «Прикладная математика и информатика» и включены в лекционный материал курсов «Реологические модели», «Математические модели механики сплошных сред», «Численные методы решения краевых задач».

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 27 печатных работах, из них 12 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК [1–12], 7 статей в сборниках трудов конференций и 8 тезисов докладов.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук В. П. Радченко за постановки задач и поддержку работы, а также научному консультанту доценту, кандидату физико-математических наук М. Н. Саушкину за консультации и постоянное внимание к работе.

**Личный вклад автора.** Работа [11] выполнена самостоятельно, в основных работах [1–10, 12] диссертанту принадлежит совместная постановка задачи и разработка методов решения, ей лично принадлежит алгоритмизация, реализация методов в виде программного продукта и анализ результатов. В остальных работах [13–19], опубликованных в соавторстве, автору в равной степени принадлежат как постановки задач, так и результаты выполненных исследований.

## Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определяются цели исследования, излагаются научная новизна и практическая значимость работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, приводятся структура диссертационной работы, а также сведения об апробации работы и публикациях.

### Глава 1. Аналитический обзор и постановка задач исследований

В пункте 1.1 проанализированы физико-механические и технологические факторы, приводящие к возникновению остаточных напряжений.

В пункте 1.2 проанализированы методы определения остаточных напряжений в гладких деталях и деталях с концентраторами, отмечены их возможности, достоинства и недостатки. Отмечается, что все существующие экспериментальные методы позволяют определить лишь часть компонент тензора остаточных напряжений в упрочнённом слое, а остаточные пластические деформации определить невозможно, т. е. полная картина восстановления НДС в поверхностно-упрочнённом слое чисто экспериментальными методами в настоящее время не разрешима.

В пункте 1.3 анализируются 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, С. И. Иванова, О. В. Колотниковой, Б. А. Кравченко, Р. Р. Мавлютова, С. И. Няшина, В. Ф. Павлова, Д. Д. Папшева, А. Н. Петухова, А. А. Поздеева, Ю. В. Полоскина, В. П. Радченко, Ю. П. Самарина, М. Н. Саушкина, В. П. Скрипняка, Ю. М. Темиса, П. В. Трусова, П. А. Чепы, Г. Н. Чернышова, А. О. Чернявского, А. А. Шапарина, E. Altis, W. Gambin, R. Ganelius, K. J. Kang, S. Y. Seon, D. Sclafar, G. S. Sehajer, D. Vandi, H. Wern и др. Проводится анализ возможностей, ограничений и недостатков каждого из подходов. Делается вывод, что расчётно-феноменологический подход более предпочтителен, чем чисто аналитический, так как при этом подходе имеется частичная экспериментальная информация о тензоре остаточных напряжений, к которому привязываются все расчётно-экспериментальные методики.

В пункте 1.4 исследованы работы, посвящённые влиянию температурно-силового нагружения на релаксацию остаточных напряжений в упрочнённых деталях в условиях ползучести.

Показано, что для деталей, работающих в условиях ползучести, упрочнение ППД приводит к повышению эксплуатационных характеристик, таких, как сопротивление усталости, долговечность, износ- и трещиностойкость. В связи с этим отмечается интерес к проблеме кинетики остаточных напря-

жений в поверхностно упрочнённом слое при высокой температуре в условиях ползучести в элементах конструкций в работах Л. Б. Гецова, И. Г. Гринченко, С. И. Иванова, В. А. Кирпичёва, Б. А. Кравченко, В. Г. Круцило, О. В. Колотниковой, П. И. Кудрявцева, А. А. Маталина, В. Ф. Павлова, В. П. Радченко, Ю. П. Самарина, М. Н. Саушкина, М. Khadraoui, O. Vohringger и других.

В пункте 1.5 рассмотрены работы, в которых исследовано влияние остаточных напряжений на повышение предела сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений как при нормальной температуре, так и при повышенных температурах, когда решающая роль в релаксации остаточных напряжений принадлежит деформации ползучести.

По результатам литературных источников в пункте 1.6 сформулированы основные задачи исследований настоящей диссертационной работы.

## **Глава 2. Расчёт полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрическом образце после процедуры анизотропного упрочнения**

Глава 2 посвящена разработке метода расчёта полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрическом образце после процедуры анизотропного поверхностно пластического упрочнения, его экспериментальной проверке, анализу влияния параметра анизотропии на картину напряжённо-деформированного состояния в упрочнённом слое.

В пункте 2.1 выполнена классификация основных технологий упрочнения по характеру упрочнения поверхности цилиндрического образца.

Отмечается, что в цикле работ Ю. П. Самарина, В. П. Радченко, М. Н. Саушкина в качестве основной гипотезы для расчёта полей остаточных напряжений и пластических деформаций использовалось предположение, что поля окружной  $q_\theta$  и осевой  $q_z$  компонент остаточных пластических деформаций (в цилиндрической системе координат) после процедуры ППД удовлетворяют условию  $q_\theta = q_z$ . Процедуры упрочнения, удовлетворяющие этому условию, получили название изотропного упрочнения (в направлении осей  $Oz$  и  $O\theta$  в цилиндрической системе координат). К таким упрочняющим технологиям относятся гидро- и пневмодробеструйная обработки, ТПУ, азотирование и некоторые другие. Однако для ряда технологий (обкатка роликом, алмазное выглаживание, дорнование и других)  $q_\theta$  и  $q_z$  могут быть связаны более общим соотношением:

$$q_z(r) = \alpha q_\theta(r) \quad (0 < \alpha < \infty, \alpha \neq 1). \quad (1)$$

Процедуры упрочнения, для которых выполняется гипотеза (1), получили название анизотропного упрочнения. Отмечается, что детальное теоретическое исследование формируемого НДС в упрочнённом слое при выполнении (1) в научной литературе не приводилась.



В пункте 2.2 приведена методика расчёта полей ОН напряжений и пластических деформаций в цилиндрическом образце с учётом анизотропии процесса поверхностного упрочнения (1). Вводя стандартную цилиндрическую систему координат, обозначая через  $\sigma_\theta^{\text{res}}$ ,  $\sigma_z^{\text{res}}$  и  $\sigma_r^{\text{res}}$  — окружное, осевое и радиальное остаточные напряжения, а через  $q_\theta$ ,  $q_z$  и  $q_r$  — соответствующие остаточные пластические деформации, из уравнений равновесия, совместности деформаций, закона Гука, гипотезы (1) и условия пластической несжимаемости все компоненты НДС можно выразить через  $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$  по следующим формулам:

$$\sigma_r^{\text{res}}(r) = \frac{1}{r} \int_0^r \sigma_\theta^{\text{res}}(\xi) d\xi, \quad (2)$$

$$q_\theta(r) = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{E(1+\alpha\mu)^2} r^{-\frac{2+\alpha}{1+\alpha\mu}} \int_0^r \xi^{\frac{1+\alpha-\alpha\mu}{1+\alpha\mu}} \left[ \sigma_r^{\text{res}}(\xi) + (1+\alpha)\sigma_\theta^{\text{res}}(\xi) \right] d\xi - \frac{1+\mu}{E(1+\alpha\mu)} \left[ (1-\mu)\sigma_\theta^{\text{res}}(r) - \mu\sigma_r^{\text{res}}(r) \right], \quad (3)$$

$$q_z(r) = \alpha q_\theta(r), \quad q_r = -q_\theta(1+\alpha), \quad (4)$$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{R^2} \int_0^R \xi \left\{ q_z(\xi) - \frac{\mu}{E} \left[ \sigma_r^{\text{res}}(\xi) + \sigma_\theta^{\text{res}}(\xi) \right] \right\} d\xi, \quad (5)$$

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

где  $\mu$  и  $E$  — упругие константы материала,  $R$  — радиус цилиндра.

В пункте 2.3 изложена методика идентификации параметров математической модели. Из формул (2)–(6) следует, что если известна величина  $\alpha$  в (1), то  $\sigma_r^{\text{res}}$ ,  $\sigma_\theta^{\text{res}}$ ,  $q_r$ ,  $q_\theta$ ,  $q_z$  определяются через  $\sigma_\theta^{\text{res}}$ . Но экспериментально её можно определить только в тонком упрочнённом слое (области сжатия), поэтому данные для  $\sigma_\theta^{\text{res}}$  необходимо экстраполировать в область растяжения, но таким образом, чтобы не нарушилось свойство самоуравновешенности для этого напряжения. В настоящей работе рассматривается широкий спектр наблюдаемых в эксперименте диаграмм для  $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ , при аппроксимации которых используется выражение

$$\sigma_\theta^{\text{res}}(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(R - h^* - r)^2}{b^2}\right), \quad (7)$$

где  $h^* = R - r^*$  — глубина слоя, при котором компонента  $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$  принимает свой локальный минимум,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$ ,  $b$  — параметры, подлежащие определению. В случае, если параметр  $\alpha$  задан (или  $\alpha = 1$ ), величины  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$ ,  $b$  определяются из системы трёх нелинейных уравнений.

Однако на практике величина  $\alpha$  в соотношении (1) неизвестна и её можно определить лишь после проведения экспериментальных исследований. При этом в качестве исходной экспериментальной информации необходимо иметь экспериментальные зависимости  $\sigma_{\theta}^{\text{res}}(r)$  и  $\sigma_z^{\text{res}}(r)$ , а параметр анизотропии  $\alpha$  подлежит идентификации. В этом случае задача идентификации сводится к задаче оптимизации, которая решается релаксационным методом.

В пункте 2.4 описана методика экспериментальных исследований, направленных на проверку адекватности выдвинутых гипотез и результатов расчёта по модели (2)–(6). Исследования проводились на гладких образцах радиуса 8 мм из стали 30ХГСА и радиуса 7,5 мм из стали 45. Образцы из стали 30ХГСА упрочнялись обкаткой с усилием на трёхроликовом приспособлении роликами диаметром 50 мм и профильным радиусом 13 мм при частоте вращения заготовки 400 об/мин и подаче 0,43 мм/об, а усилие обкатки принималось равным 4,3; 6,45; 8,6 и 10,75 кН. Для образцов из стали 45 применялась обкатка на токарном станке роликом с профильным радиусом 1,6 мм при частоте вращения 400 об/мин и подаче 0,11 мм/об с усилием обкатки 0,49 кН. Остаточные напряжения определялись при комнатной температуре методом колец и полосок. На рис. 1 и 2 приведены полученные экспериментальные значения для  $\sigma_{\theta}^{\text{res}}$  и  $\sigma_z^{\text{res}}$  (значки), которые существенно отличаются от соответствующих зависимостей для случая изотропного упрочнения ( $\alpha = 1$ ), где они практически совпадают.

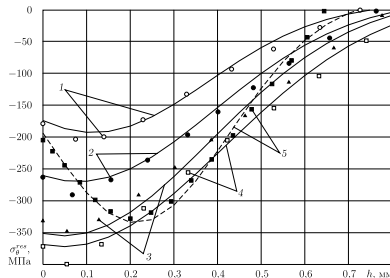


Рис. 1. Экспериментальные (значки) и расчётные (линии) эпюры окружной компоненты остаточных напряжений в упрочнённом слое: 1–4 — сталь 30ХГСА, 5 — сталь 45. Усилие обкатки: 1 — 4,3 кН, 2 — 6,45 кН, 3 — 8,6 кН, 4 — 10,75 кН, 5 — 0,49 кН

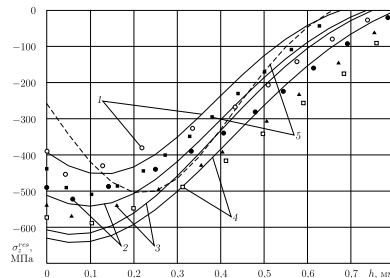


Рис. 2. Экспериментальные (значки) и расчётные (линии) эпюры осевой компоненты остаточных напряжений в упрочнённом слое: 1–4 — сталь 30ХГСА, 5 — сталь 45. Усилие обкатки: 1 — 4,3 кН, 2 — 6,45 кН, 3 — 8,6 кН, 4 — 10,75 кН, 5 — 0,49 кН

В пункте 2.5 выполнена проверка адекватности модели (1)–(6) экспериментальным данным. На рис. 1 и 2 сплошными линиями показаны расчётные данные по модели, а в таблице 1 — значения параметра анизотропии  $\alpha$ , откуда

следует, что его значения для реальных технологий упрочнения принимают достаточно большие величины.

Кроме этого, выполнен детальный анализ влияния параметра  $\alpha$  на эпюры  $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$  и  $\sigma_z^{\text{res}}(r)$  для модельного расчёта: сплав ЭИ698 ( $T = 700$  °C),  $R = 3,76$  мм, результаты которого показали, что при одном и том же распределении  $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$  величина  $\sigma_z^{\text{res}}(r)$  может отличаться от  $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$  более чем в 3 раза (в зависимости от значения  $\alpha$ ), чего не наблюдается при процедуре изотропного упрочнения ( $\alpha = 1$ ).

В пункте 2.6 приведены выводы по главе 2.

### Глава 3. Релаксация остаточных напряжений в цилиндрическом образце в условиях ползучести

В пункте 3.1 сформулирована постановка задачи.

В пункте 3.2 приведён разработанный прямой метод решения краевой задачи релаксации остаточных напряжений в упрочнённом цилиндрическом изделии в условиях ползучести под действием растягивающей нагрузки  $F(t)$ , базирующийся на уравнениях равновесия, совместности деформаций, гипотезе плоских сечений.

При этом полная деформация  $\varepsilon_{ij}$  представляется следующим образом

$$\varepsilon_{ij}(r, t) = e_{ij}(r, t) + e_{ij}^p(r, t) + p_{ij}(r, t), \quad (8)$$

где  $e_{ij}$ ,  $e_{ij}^p$ ,  $p_{ij}$  — упругая, пластическая деформации и деформация ползучести. В качестве начального НДС принимается состояние после процедуры упрочнения при  $t=0$ . Решение поставленной задачи осуществляется «шагами по времени». В итоге 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 аналогично (5), (6) — напряжение  $\sigma_z(r, t)$ .

В пункте 3.3 обоснован выбор реологической модели для реализации метода, изложенного в пункте 2.2. В качестве основной выбрана модель ползучести Ю. П. Самарина и В. П. Радченко.

В пункте 3.4 предложена методика численного решения и алгоритм расчёта релаксации остаточных напряжений в упрочнённом цилиндрическом образце в условиях ползучести.

Таблица 1: Значения параметра анизотропии  $\alpha$  для упрочнённых образцов из сталей 45 и 30ХГСА

Материал	№ линии на рис. 1 и 2	$\alpha$
Сталь 30ХГСА	1	20,0
	2	8,1
	3	4,8
Сталь 45	4	4,8
	5	3,0

В пункте 3.5 приводятся результаты расчёта релаксации остаточных напряжений в упрочнённом цилиндрическом образце и выполнена проверка адекватности метода экспериментальным данным по термоэкспозиции (температурная выдержка без нагрузки) для гладких, упрочнённых алмазным выглаживанием, цилиндрических образцов диаметром 7,5 мм из стали ЭИ691 при  $T = 400$  °С. Остаточные напряжения определялись при нормальной температуре после процедуры упрочнения и после высокотемпературной выдержки в течение  $t = 100$  часов методом колец и полосок, и представлены на рис. 3 (точки).

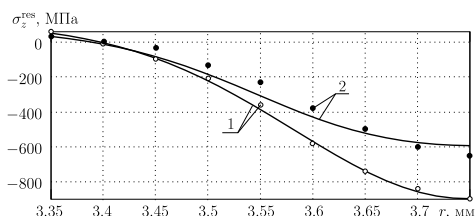


Рис. 3. Экспериментальные (точки) и расчётные эпюры (сплошные линии) остаточных напряжений в цилиндрическом образце из стали ЭИ961 в процессе термоэкспозиции: 1 —  $t = 0$  — 0; 2 —  $t = 100$  ч

образцов, растягиваемых нагрузкой  $F(t)$  и установлено, что приложение растягивающей нагрузки существенно ускоряет и интенсифицирует процесс релаксации остаточных напряжений по сравнению со случаем термоэкспозиции.

В пункте 3.6 исследовано влияние параметра анизотропии упрочнения на процесс релаксации остаточных напряжений в упрочнённом цилиндрическом образце и показано, что в зависимости от значения параметра анизотропии  $\alpha$  может происходить как замедление, так и интенсификация скорости релаксации по сравнению со случаем изотропного упрочнения ( $\alpha = 1$ ). С инженерной точки зрения это означает, что выбором технологии упрочнения можно управлять скоростью релаксации наведённых остаточных напряжений.

В пункте 3.7 приводятся выводы по главе 3.

#### Глава 4. Исследование температурно-силовых режимов нагружения на релаксацию остаточных напряжений и кинетику приращенния предела выносливости упрочнённых элементов конструкций с концентраторами напряжений в условиях ползучести

В пункте 4.1 приведена постановка задачи главы 4.

В пункте 4.2 предложена методика расчёта кинетики напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое элементов конструк-

На рис. 3 сплошной линией были показаны результаты расчёта процесса релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести в условиях термоэкспозиции (температурной выдержки без нагрузки), из которого следует хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных.

Кроме этого выполнен ряд модельных расчётов для упрочнённых цилиндрических образ-

ций с произвольной границей при ползучести для плоской задачи, основанная на методе декомпозиции. Вводится гипотеза, согласно которой элемент конструкции разбивается на «тело» конструкции и тонкий упрочнённый поверхностный слой, при этом слой можно представить «наклеенным» на «тело» и деформирующимся вместе с ним в режиме «жёсткого» нагружения при заданных значениях компонент тензора деформаций на поверхности «тела», которые можно рассчитать без учёта поверхностного слоя.

Предварительно решены две модельные задачи: для растягиваемого упрочнённого цилиндрического образца и упрочнённого кругового концентратора толстостенной плиты.

Для обоснования общего случая рассматривается цилиндрическое тело с произвольной границей, сечением которого является область  $\Omega$  с границей  $L$  (рис. 4). Полагается, что в любом сечении, перпендикулярном образующей цилиндрического изделия, напряжённо-деформированное состояние является одинаковым.

Предполагается, что боковая поверхность цилиндрического изделия предварительно подверглась поверхностному пластическому упрочнению.

Здесь возникают два варианта: точка лежит на вогнутом и выпуклом участках  $L$  (точки  $B$  и  $A$  на рис. 4). Далее вводится гипотеза, согласно которой оценка релаксации остаточных напряжений в поверхностном слое точки  $B$  по нормали  $\vec{n}_2$  может быть выполнена как для поверхностно упрочнённого цилиндра радиуса  $R_2$  в локальной цилиндрической системе координат с центром соприкасающейся окружности в точке  $O_2$ . Релаксацию же остаточных напряжений в поверхностном слое точки  $A$  в направлении нормали  $\vec{n}_1$  можно оценить как для кругового концентратора радиуса  $R_1$  в бесконечной плите в локальной цилиндрической системе координат с центром соприкасающейся окружности в точке  $O_1$ .

В пункте 4.3 разработана и реализована методика расчёта кинетики приращения предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами при температурно-силовых выдержках в условиях ползучести. ППД, например, цилиндрических изделий с концентраторами напряжений, приводит к приращению предела выносливости по сравнению с пределом выносливости неупрочнённых образцов при нормальной температуре. В. Ф. Павловым был предложен критерий для оценки предела сопротивления

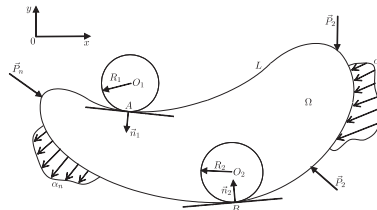


Рис. 4. Схема к математической модели релаксации остаточных напряжений в концентраторе в виде отверстия для плоской задачи

выносливости упрочнённой детали  $\Delta P_R$  в виде

$$\Delta P_R = P_R - P_R^0 = \bar{\psi}_p \bar{\sigma}_{\text{ост}}, \quad (9)$$

$P_R$  и  $P_R^0$  — пределы выносливости упрочнённой и неупрочнённой деталей;  $\bar{\psi}_p$  — феноменологический параметр,

$$\bar{\sigma}_{\text{ост}} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z^{\text{res}}(\xi) d\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}, \quad (10)$$

$\sigma_z^{\text{res}}(\xi)$  — осевое остаточное напряжение в наименьшем сечении детали с концентратором;  $\xi = \frac{y}{t_{\text{кр}}}$  — относительное расстояние от дна концентратора до текущего слоя;  $t_{\text{кр}}$  — максимально возможная глубина нераспространяющейся усталостной трещины (феноменологический параметр), возникающей при работе детали на пределе выносливости. В соотношения (9), (10) входит лишь величина  $\sigma_z^{\text{res}}$ , однако на величину  $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$  должны оказывать влияние и компоненты тензора остаточных напряжений  $\sigma_\theta^{\text{res}}$  и  $\sigma_r^{\text{res}}$ . Поэтому в данной работе (10) модифицирован следующим образом: вместо  $\sigma_z^{\text{res}}$  в (10) вводится величина  $\sigma_{\text{экв}}(\xi)$ , где для эквивалентного остаточного напряжения  $\sigma_{\text{экв}}$  использованы соотношения:  $\sigma_{\text{экв}}^1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r^{\text{res}} - \sigma_\theta^{\text{res}})^2 + (\sigma_r^{\text{res}} - \sigma_z^{\text{res}})^2 + (\sigma_\theta^{\text{res}} - \sigma_z^{\text{res}})^2}$ ,  $\sigma_{\text{экв}}^2 = |\sigma_{\text{max}}^{\text{res}}|$ ,  $\sigma_{\text{экв}}^3 = |\sigma_{\text{max}}^{\text{res}} - \sigma_{\text{min}}^{\text{res}}|$ .

При высокотемпературной ползучести происходит релаксация остаточных напряжений, поэтому  $\sigma_{\text{экв}}$  и величина  $\Delta P_R$  будут зависеть от времени. В данном пункте исследуется влияние термоэкспозиции и растягивающей нагрузки на величину  $\Delta P_R$ , которое описывается при помощи величины  $K = \Delta P_R(t) / \Delta P_R^0$ , где  $\Delta P_R(t)$  — текущее значение приращения предела выносливости в процессе температурно-силового нагружения, а  $\Delta P_R^0 = \Delta P_R(0)$  — значение приращения предела выносливости при  $t = 0$ , т. е. непосредственно после процедуры упрочнения.

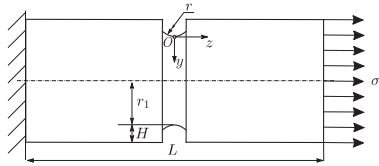


Рис. 5. Схема нагружения и основные характеристики концентратора

В качестве модельного примера (см. рис. 5) выполнен расчёт для цилиндра диаметром 10 мм с концентратором в виде кольцевой выточки на дне  $r = 0,75$  и общей глубиной  $H \in [0,75; 1,65]$  мм (материал — ЖС6КП,  $T = 1000$  °С).

Для сопоставимости результатов полагалось, что начальные эпюры остаточных напряжений на дне концентратора после процедуры упрочнения одинаковы при различных значениях величины  $H$ . В соответствии с методом декомпозиции на основе МКЭ определялась кинетика тензора деформаций  $\varepsilon_{ij}(t)$  от времени (без

упрочнённого слоя) в любой точке концентратора (в данной задаче — на дне концентратора). Компоненты  $\varepsilon_{ij}(t)$  являются входными для решения задачи о релаксации напряжений в упрочнённом слое, который деформируется в режиме жёсткого нагружения при заданных  $\varepsilon_{ij}(t)$ , при этом предполагается, что релаксация на дне концентратора происходит так же, как в сплошном цилиндре минимального радиуса изделия. В качестве примера на рис. 6 представлена типичная картина кинетики изменения величины  $K$  для концентратора при  $H = 0,9$  мм в зависимости от приложенного растягивающего напряжения. Как следует из результатов расчётов и их анализа, происходит снижение приращения предела выносливости во времени для всех эквивалентных напряжений (при термоэкспозиции — на 20–40%, при растягивающей нагрузке — на 50–60%), что свидетельствует об отрицательном влиянии термоэкспозиции и растягивающих нагрузок в условиях ползучести на приращение предела выносливости и снижение эффекта поверхностного пластического упрочнения.

В пункте 4.4 на основе метода декомпозиции решена задача о релаксации остаточных напряжений в круговом отверстии в полотне диска ГТД из сплава ЭИ698. Радиус центрального отверстия диска — 80 мм, радиус обода диска — 375 мм, радиус отверстия в полотне диска — 8 мм, количество отверстий — 8, угловая скорость  $\omega = 3630$  об/мин, распределённая нагрузка по ободу — 168 МПа. Температура по радиусу изменялась по линейному закону от 600 °С на ступице, до 856 °С на ободу диска. Температура в отверстии полотна — 700 °С. Расчёт релаксации остаточных напряжений в отверстии вёлся как для отверстия толстостенной плиты при заданных значениях компонент  $\varepsilon_{ij}(t)$ , которые получены решением задачи для НДС диска МКЭ. Приведены соответствующее графики релаксации.

В пункте 4.5 приведено решение задачи о релаксации остаточных напряжений в прямолинейной и закруглённой вращающихся лопаток переменного сечения (модельный материал — сплав ЖС6КП,  $T = 1000$  °С) первой ступени турбины высокого давления газотурбинного комплекса ГТК-10-4 в услови-

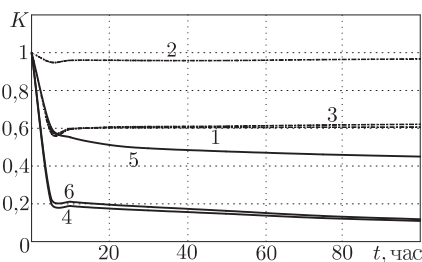


Рис. 6. Кинетика изменения величины  $K$  для различных вариантов  $\sigma_{\text{экв}}$  при  $H = 0,9$  мм в зависимости от длительности термоэкспозиции (пунктирная линия): 1 —  $\sigma_{\text{экв}}^{(1)}$ ; 2 —  $\sigma_{\text{экв}}^{(2)}$ ; 3 —  $\sigma_{\text{экв}}^{(3)}$  и температурно-силовой нагрузки при  $\sigma = 60$  МПа (сплошная линия): 4 —  $\sigma_{\text{экв}}^{(1)}$ ; 5 —  $\sigma_{\text{экв}}^{(2)}$ ; 6 —  $\sigma_{\text{экв}}^{(3)}$

ях ползучести. В любом сечении лопатки процесс релаксации рассчитывался по схеме упрочнённого цилиндра на выпуклой поверхности (точки 1, 8, 7, 6 на рис. 7) и по схеме кругового концентратора — на выпуклой поверхности (точки 2, 3, 4, 5 на рис. 7), при этом НДС всей лопатки рассчитывался по МКЭ. Геометрические характеристики всех лопаток:  $R_1 = 517$  м,  $R_2 = 667$  м. Для закрученной лопатки угол поворота хвостового сечения относительно корневого составил  $18^\circ$ . Детальный анализ проводился для четырёх сечений лопатки: 1 — корневое; 2, 3 — сечения, отстоящие от корневого на расстоянии  $1/3$  и  $2/3$  длины лопатки; 4 — хвостовое сечение.

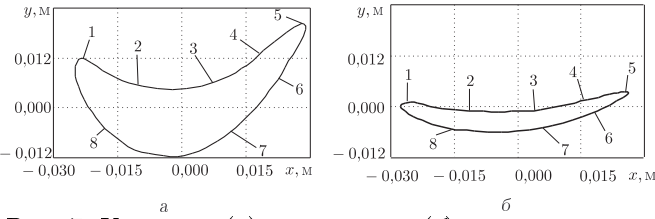


Рис. 7. Корневое (а) и хвостовое (б) сечения прямолинейной лопатки: цифры — характерные точки поверхности

Прoанализированы зависимости всех компонент тензора остаточных напряжений  $\sigma_\theta(r, t)$ ,  $\sigma_z(r, t)$  и  $\sigma_r(r, t)$  (в локальной цилиндрической системе координат) по периметру сечений и по длине лопатки.

В качестве примера на рис. 8 и рис. 9 представлены типичные зависимости, отражающие процесс релаксации остаточных напряжений в закрученной лопатке.

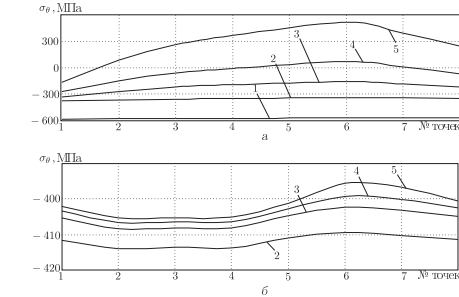


Рис. 8. Кинетика напряжений  $\sigma_\theta$  на поверхности закрученной лопатки по периметру сечений (сплав ЖС6КП,  $T = 1000^\circ\text{C}$ ,  $\omega = 450$  рад/сек): а — сечение № 2; б — сечение № 4. Цифры: 1 —  $t = 0$ ; 2 —  $t = 20$ ; 3 —  $t = 50$ ; 4 —  $t = 100$ ; 4 —  $t = 200$  часов

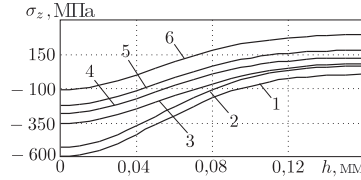


Рис. 9. Кинетика остаточных напряжений  $\sigma_z(h)$  в процессе ползучести для закрученной лопатки (сплав ЖС6КП,  $T = 1000^\circ$ ) при  $\omega = 450$  рад/сек во втором сечении (точка 1). Цифры: 1 —  $t = 0 - 0$ ; 2 —  $t = 0 + 0$ ; 3 —  $t = 10$ ; 4 —  $t = 50$ ; 5 —  $t = 100$ ; 6 —  $t = 200$  час



В пункте 4.6 приводятся выводы по главе 4.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Разработан феноменологический метод расчёта трёхмерных полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрическом образце после процедуры анизотропного поверхностно пластического упрочнения и выполнена его экспериментальная проверка для упрочнённых обкаткой роликом цилиндрических образцов из сталей 45 и 30ХГСА. Установлено соответствие расчётных и экспериментальных значений для окружных и осевых остаточных напряжений.
2. Выполнен анализ влияния параметра анизотропии упрочнения на напряжённо-деформируемое состояние в упрочнённом слое после процедуры упрочнения. Показано, что при одном и том же распределении окружного остаточного напряжения  $\sigma_{\theta}^{\text{res}}$  в зависимости от величины параметра анизотропии  $0 < \alpha < \infty$  величина осевого остаточного напряжения  $\sigma_z^{\text{res}}$  может отличаться более чем в 3 раза от  $\sigma_{\theta}^{\text{res}}$ . При изотропной процедуре упрочнения ( $\alpha = 1$ )  $\sigma_{\theta}^{\text{res}}$  и  $\sigma_z^{\text{res}}$  практически совпадает.
3. Разработан прямой метод решения краевой задачи о релаксации остаточных напряжений в цилиндрическом образце при ползучести с учётом анизотропии поверхностно пластического упрочнения. Выполнена его экспериментальная проверка для образцов из стали ЭИ691 при  $T = 400$  °С в условиях термоэкспозиции (температурная выдержка без нагрузки). Установлено хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных для осевой компоненты  $\sigma_z^{\text{res}}$  в конечный момент термоэкспозиции при  $t = 100$  часов.
4. Выполнен ряд модельных расчётов релаксации остаточных напряжений для цилиндрических гладких образцов из сплавов ЭИ698 при  $T = 700$  °С и ЖС6КП при  $T = 1000$  °С, широко используемых при изготовлении дисков и лопаток ГТД, с учётом анизотропии упрочнения в условиях чистой термоэкспозиции и совместного температурно-силового нагружения. Показано, что при чистой термоэкспозиции наведённые остаточные напряжения сохраняются при достаточно больших временах выдержек, однако приложении осевых рабочих нагрузок существенно интенсифицирует процесс релаксации остаточных напряжений.
5. На основе идей декомпозиции и склейки решений краевых задач разработана методика оценки кинетики остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкций с произвольной границей в условиях ползучести, на основании которой решены новые задачи

о релаксации остаточных напряжений в упрочнённых прямолинейной лопатке, закрученной лопатке первой ступени турбины высокого давления газотурбинного комплекса ГТК-10-4, круговом концентраторе диска ГТД в поле массовых центробежных сил, а также растягиваемом цилиндрическом образце с концентраторами напряжений различной формы и выполнен детальный анализ этих решений в зависимости от геометрических и температурно-силовых параметров.

6. Разработана методика оценки влияния температурно-силовых выдержек на приращение предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений в условиях ползучести, на основании которой показано, что происходит падение приращения предела выносливости (в модельных примерах — на 20–60 %).

### **Список основных публикаций в рецензируемых журналах из перечня ВАК:**

- [1] Саушкин М. Н., Просвиркина Е. А., Афанасьева О. С. Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрического образца при совместном действии статических и циклических нагрузок в условиях ползучести // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2006. — № 43. — С. 112–116.
- [2] Саушкин М. Н., Афанасьева О. С. Исследование процесса релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое отверстия диска газотурбинного двигателя // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2007. — № 2(15). — С. 51–59.
- [3] Саушкин М. Н., Афанасьева О. С., Просвиркина Е. А. Оценка релаксации остаточных напряжений в упрочнённой вращающейся лопатке при ползучести // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2007. — № 1(14). — С. 62–70.
- [4] Саушкин М. Н., Просвиркина Е. А., Афанасьева О. С. Метод расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённых стержнях произвольной пространственной формы при ползучести // *Обозрение прикладной и промышленной математики.* — Т. 14. Часть IV. — 2007. — С. 336–337.
- [5] Саушкин М. Н., Афанасьева О. С. Краевые задачи для оценки кинетики напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкций // *Обозрение прикладной и промышленной математики.* — Т. 14. Часть II. — 2007. — С. 747–748.
- [6] Саушкин М. Н., Афанасьева О. С., Дубовова Е. В., Просвиркина Е. А. Схема расчёта полей остаточных напряжений в цилиндрическом образце с учётом организации процесса поверхностного пластического дефор-

- мирования // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2008. — № 1(16). — С. 85–89.
- [7] Саушкин М. Н., Афанасьева О. С. Схема «мягкого нагружения» для расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндра при ползучести // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2008. — № 2(17). — С. 133–142.
- [8] Саушкин М. Н., Кирпичёв В. А., Афанасьева О. С., Иванов Д. В. Расчётно-экспериментальные исследования устойчивости остаточных напряжений в упрочнённом слое цилиндрического изделия к температурным нагрузкам // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2009. — № 1(18). — С. 101–113.
- [9] Вакулюк В. С., Сазанов В. П., Филиппов А. А., Афанасьева О. С. Закономерности распределения остаточных напряжений при упрочнении концентратора // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2009. — № 2(19). — С. 107–113.
- [10] Радченко В. П., Афанасьева О. С. Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2009. — № 2(19). — С. 264–268.
- [11] Афанасьева О. С. Оценка сопротивления усталости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурно-силовом нагружении в условиях ползучести // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Техн. науки.* — 2010. — № 2(26). — С. 118–124.
- [12] Кирпичёв В. А., Саушкин М. Н., Афанасьева О. С., Смыслов В. А. Прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей при повышенной температуре // *Вестник Самарск. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки.* — 2010. — № 1(20). — С. 218–221.

#### **В других изданиях:**

- [13] Саушкин М. Н., Просвиркина Е. А., Афанасьева О. С. Об одном подходе к оценке релаксации остаточных напряжений в упрочненной вращающейся лопатке при ползучести // *Зимняя школа по механике сплошных сред. Сборник статей. Ч. 1.* — Пермь, 2007. — С. 54–57.
- [14] Саушкин М. Н., Просвиркина Е. А., Афанасьева О. С. О влиянии угловой скорости вращения лопатки на релаксацию остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое // *Математическое моделирование и краевые задачи: Труды Четвёртой Всероссийской научной конференции с международным участием.* — Самара: СамГТУ, 2007. — С. 231–240.

- [15] Саушкин М. Н., Афанасьева О. С., Дубовова Е. В. Влияние технологии упрочнения на процесс релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое цилиндрического образца // Механика микрон неоднородных материалов и разрушение. V Всероссийская конференция. Тезисы докладов. — Екатеринбург, 2008. — С. 82.
- [16] Радченко В. П., Саушкин М. Н., Афанасьева О. С. Методы оценки кинетики остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических элементах конструкций с концентраторами в условиях ползучести // Ресурс и диагностика материалов и конструкций. Тезисы докладов IV Российской научной технической конференции. — Екатеринбург, 2009. — С. 148.
- [17] Афанасьева О. С. Влияние термоэкспозиции и силового нагружения на релаксацию остаточных напряжений и сопротивление усталости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений в условиях ползучести // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды Седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. — Самара: СамГТУ, 2010. — С. 36–41.
- [19] Афанасьева О. С. Влияние температурно-силовых режимов нагружения на сопротивление усталости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений в условиях ползучести // Механика микрон неоднородных материалов и разрушение. IV Всероссийская конференция. Тезисы докладов. — Екатеринбург, 2010. — С. 119.
- [19] Афанасьева О. С., Вакулюк В. С. Влияние температурной выдержки и растягивающей нагрузки на релаксацию остаточных напряжений и снижение предела выносливости упрочнённого цилиндра с кольцевой выточкой // Прочность материалов и элементов конструкций. Международная научно-техническая конференция. Тезисы докладов. — Киев, 2010. — С. 20–22.

Подписано в печать 10.09.2010. Формат 60 × 84 1/16.

Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л.1.

Тираж 100 экз. Заказ № 4.

ГОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной печати

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