

Просвиркина Елена Анатольевна

**МЕТОД РАСЧЁТА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЕННЫХ
СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ
ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ**

01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико – математических наук

Самара – 2006

Работа выполнена в Самарском государственном техническом университете

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Радченко Владимир Павлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Клебанов Яков Мордухович,
доктор физико-математических наук, профессор Стружанов Валерий Владимирович

Ведущая организация

Самарский государственный аэрокосмический университет

Защита состоится «4» декабря 2006 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.218.06 при Самарском государственном университете по адресу: 443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1, зал заседаний

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Самарского государственного университета

Автореферат разослан «___» ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Глушечков В.С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Теоретические и прикладные исследования последних лет привели к пониманию того, что работоспособность отдельных деталей и элементов конструкций в целом в большой степени зависит от качества поверхностного слоя. Хорошо известно, что поверхностный слой детали с точки зрения прочностных характеристик является ослабленным. Для увеличения прочностных характеристик поверхностного слоя разработан целый арсенал упрочняющих технологий, при этом повышение эксплуатационных характеристик (сопротивление усталости, длительная прочность, коррозионное растрескивание и другие эффекты) обусловлено, главным образом, наличием в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений. Однако при повышенных температурах остаточные напряжения релаксируют и их положительное влияние снижается. На уровне механики сплошных сред процесс релаксации остаточных напряжений при высоких температурах можно рассматривать как явление, вызванное ползучестью материала. Существующие на сегодняшний день методики оценки кинетики остаточных напряжений в упрочнённом слое носят в подавляющем большинстве экспериментальный характер.

Систематические теоретические исследования находятся в стадии становления и в этом направлении решены задачи только для простых конструктивных элементов (цилиндрический образец, толстостенная труба), при этом в подавляющем большинстве случаев вместо полной картины кинетики напряжённо – деформированного состояния (НДС) в поверхностно упрочнённом слое используется упрощённая схема эквивалентного напряжённого состояния. Поэтому возникает необходимость в теоретическом обобщении существующих методик для простых конструктивных элементов (цилиндрический образец, толстостенная труба) на случай криволинейной поверхности элемента конструкции в условиях объёмного неоднородного напряжённого состояния, что и определяет актуальность рассматриваемой тематики.

Целью диссертации являлась разработка универсального расчётно – феноменологического метода восстановления НДС в поверхностно упрочнённом слое изделия после упрочнения с учетом процедуры наведения ориентированных остаточных напряжений и разработка метода расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностном слое на фоне ползучести элемента конструкции в условиях объёмного неоднородного напряжённого состояния.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Разработан универсальный расчётно – феноменологический метод восстановления НДС в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкций после процедуры наведения ориентированных остаточных напряжений.

2. Решены новые задачи восстановления НДС в поверхностно упрочнённом слое для ряда типовых элементов конструкций (цилиндрический образец, круговой концентратор, криволинейные стержни постоянного и переменного сечений, прямолинейные и закрученные лопатки переменного сечения).

3. Разработан метод оценки кинетики тензора остаточных напряжений в тонком поверхностно упрочнённом слое на основе идей декомпозиции и склейки решений краевых задач ползучести для объёмного неоднородного напряжённого состояния.

4. Решены новые задачи оценки кинетики НДС в поверхностно упрочнённом слое для ряда модельных и промышленных конструктивных элементов (цилиндрический образец, круговой концентратор, криволинейные стержни постоянного и переменного сечений, прямолинейные и закрученные лопасти переменного сечения) в условиях ползучести и выполнен их детальный численный анализ.

5. Разработано математическое и программное обеспечение для реализации методов восстановления остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкций и их релаксации при ползучести.

Практическая значимость работы в теоретическом плане заключается в модификации существующего расчётно – феноменологического метода восстановления и метода оценки релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое простейших элементов конструкций и его обобщение на стержневые конструкции постоянного и переменного сечений имеющих сложную пространственную кривизну. С практической точки зрения разработанные методы и программно–математическое обеспечение позволили решить ряд важных прикладных задач и 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.

На защиту выносятся:

1) модифицированный расчётно – феноменологический метод восстановления НДС в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкций после процедуры наведения ориентированных остаточных напряжений;

2) решение ряда новых задач восстановления НДС в поверхностно упрочнённом слое для ряда типовых элементов конструкций (цилиндрический образец, круговой концентратор, криволинейные стержни постоянного и переменного сечений, прямолинейные и закрученные лопасти переменного сечения);

3) метод расчёта кинетики тензора остаточных напряжений в тонком поверхностно упрочнённом слое криволинейной поверхности на основе идей декомпозиции и склейки решений краевых задач ползучести для объёмного неоднородного напряжённого состояния;

4) решение ряда новых задач расчета кинетики НДС в поверхностно упрочнённом слое для ряда модельных и промышленных конструктивных элементов (цилиндрический образец, круговой концентратор, криволинейные стержни постоянного и переменного сечений; прямолинейные и закрученные лопасти переменного сечения) в условиях ползучести;

5) качественные и количественные результаты, полученные при решении краевых задач для типовых упрочнённых конструктивных элементов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка источников из 157 наименований. Работа содержит 175 страницы основного текста.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на шестой научной межвузовской конференции «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 1996), на пятой Международной конференции молодых учёных «Актуальные проблемы современной науки» (г. Самара, 2004), четырнадцатой зимней школе по механике сплошных сред (г. Пермь, 2005), второй и третьей Всероссийских научных конференциях «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2005, 2006 гг.), Всероссийской конференции «Дифференциальные уравнения и их приложения» (г. Самара, 2005), Всероссийской научной конференции «Математика. Механика. Информатика» (г. Челябинск, 2006), IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (г. Нижний Новгород, 2006), VI Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (г. Сочи, 2005), VII Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (г. Kisловодск, 2006), XV Всероссийской школе – конференции молодых учёных «Математическое моделирование в естественных науках» (г. Пермь, 2006), Всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно – неоднородных сред и конструкций» (г. Новосибирск, 2006), на научных семинарах «Механика и прикладная математика» Самарского государственного технического университета (рук. проф. Радченко В.П., 2003 – 2006 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, список которых приведён в конце автореферата.

Работа выполнялась в рамках научно – технической программы по фундаментальным исследованиям Федерального агентства по образования (тема «Разработка математических моделей формирования и релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкций, номер темы №532/02 темплана СамГТУ, 2002 – 2005 гг).

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю д.ф.–м.н., профессору В.П. Радченко за постановки задач и поддержку работы, а также научному консультанту к.ф.–м.н., доценту Саушкину М.Н. за консультации и постоянное внимание к работе.

Личный вклад автора. Автору во всех работах, опубликованных в соавторстве, в равной степени принадлежат как постановки задач, так и результаты выполненных исследований.

Краткое 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 задачи исследований

В главе 1 делается краткий обзор литературы, посвященный вопросу определения остаточных напряжений и остаточных деформаций в поверхностно упрочнённом слое после процедуры поверхностно–пластического деформирования (ППД); проблеме кинетики остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкций при действии внешних факторов (нагрузки, температура и т.д.); вопросу влияния остаточных напряжений на эксплуатационные характеристики деталей (сопротивление усталости, долговечность, твёрдость, износостойкость, трещиностойкость и т.д.).

Отмечается, что с точки зрения прочностных характеристик поверхностный слой детали является ослабленным, поэтому для увеличения прочностных характеристик поверхностных слоёв элементов конструкций разработан целый арсенал упрочняющих технологий, важное место среди которых занимает процедура ППД. Первым исследуемым вопросом является проблема определения полей остаточных напряжений и остаточных деформаций. Анализируется развитие двух подходов к проблеме определения остаточных напряжений и деформаций, а именно: аналитического и расчётно–феноменологического (комбинации эмпирических подходов и вспомогательных расчётных методик). Аналитический подход представлен работами А.Н. Архипова, В.Б. Бойцова, С.А. Бордакова, Г.Н. Гутмана, Р.Р. Мавлютова, В.Ф. Павлова, Ю.Н. Радаева, В.П. Скрипняка, П.А. Чепа, Г.Н. Чернышов, А.А. Шапарин, W Gambin и др. Расчётно–феноменологический подход представлен работами В.Н. Анисимова, А.Н. Архипова, В.Ф. Балашова, М.А. Балтера, М.А. Биргера, М.В. Гринченко, О.В. Колотниковой, Б.А. Кравченко, А.Н. Петухова, Ю.В. Полоскина, В.П. Радченко, Ю.П. Самарина, М.Н. Саушкина, E. Altus, R. Ganelius, K.J. Kang, S.Y. Seon, D. Sclafer, 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.

Показано, что для деталей, работающих в условиях ползучести, упрочнение ППД приводит к повышению эксплуатационных характеристик, таких, как сопротивление усталости, долговечность, износо– и трещиностойкость. В связи с этим отмечается интерес к проблеме кинетики остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое при высокой температуре в условиях ползучести в элементах конструкций в работах Л.Б. Гецова, И.Г. Гринченко, Б.А. Кравченко, В.Г. Круцило, О.В. Колотниковой, П.И. Кудрявцева, А.А. Маталина, В.П. Радченко, Ю.П. Самарина, М.Н. Саушкина, M. Khadraoni, O. Vohrigger и других. Указывается, что подавляющее большинство работ носят экспериментальный характер и имеются лишь единичные работы, которые посвящены построению моделей релаксации остаточных напряжений в упрочнённых конструкциях.

Отмечается, что поскольку начальные значения остаточных напряжений в упрочнённом слое могут иметь существенные значения и составлять порядок 600–1000 МПа, то расчётные теории при таких уровнях напряжения должны

описывать не только третью стадию ползучести и процессы накопления повреждённости, но и деформацию пластичности. В этом плане отмечается достаточное число подходов построения такого рода феноменологических реологических моделей, предложенных в работах В.И. Астафьева, В.В. Болотина, Б.В. Горева, Ю.И. Кадашевича, Л.М. Качанова, Г.Ф. Лепина, А.М. Локошенко, Н.Н. Малинина, В.В. Новожилова, А.Ф. Никитенко, Ю.Н.Работнова, Ю.Н. Радаева, В.П. Радченко, К.И. Романова, Ю.П. Самарина, О.В. Соснина, С.А.Шестерикова, И.Ю. Цвелодуба, J.A. Betten, S. Murakami и др.

По результатам указанных литературных источников сформулированы основные глобальные цели и задачи исследований настоящей диссертационной работы.

Глава 2. Исследование кинетики полей остаточных напряжений в цилиндрическом образце с учётом организации процесса поверхностного пластического деформирования в условиях ползучести

Глава 2 посвящена исследованию кинетики остаточных напряжений в цилиндрическом образце в условиях ползучести. Отмечается, что в цикле работ Самарина Ю.П., Радченко В.П., Саушкина М.Н. в качестве основной гипотезы для расчёта полей остаточных напряжений и пластических деформаций использовалось предположение, что распределение полей окружной q_θ и осевой q_z компонент остаточных пластических деформаций (в цилиндрической системе координат) после процедуры ППД по глубине слоя не отличаются, т.е. $q_\theta(r) = q_z(r)$. Этот случай возможен, если, например, бомбардировать поверхность изделия большим количеством микрошариков по направлению нормали к поверхности (радиус шарика значительно меньше радиуса цилиндрического изделия), тогда деформации будут наводиться так же, как в полупространстве. Однако процесс бомбардировки можно организовать так, что поток микрошариков будет составлять некоторый угол φ с касательной плоскостью к цилиндрической поверхности, и тогда осевые и окружные остаточные деформации можно связать соотношением:

$$q_z(r) = \alpha q_\theta(r), \quad (1)$$

где α – параметр «упрочнения», $0 < \alpha < \infty$.

В **пункте 2.1** на основании гипотезы (1) приводится методика восстановления полей остаточных напряжений и пластических деформаций в упрочнённом слое по экспериментально определённой окружной компоненте остаточных напряжений $\sigma_\theta^{res}(r)$, для аппроксимации которой использовалось выражение вида

$$\sigma_\theta^{res}(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(a-r)^2}{b^2}\right), \quad (2)$$

где a – радиус цилиндра, σ_0, σ_1 и b – параметры. Окончательные выражения для остаточных напряжений и пластических деформаций задаются следующими соотношениями:

$$\sigma_r^{res}(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \frac{b\sqrt{\pi}}{2r} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{a}{b}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{a-r}{b}\right) \right], \quad (3)$$

$$q_{\theta}(r) = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1+\alpha\nu)^2} r^{-\frac{2+\alpha}{1+\alpha\nu}} \int_0^r \frac{1+\alpha-\alpha\nu}{1+\alpha\nu} \left[\sigma_r^{res}(z) + (1+\alpha)\sigma_{\theta}^{res}(z) \right] dz - \frac{1+\nu}{E(1+\alpha\nu)^2} \left[(1-\nu)\sigma_{\theta}^{res}(z) - \nu\sigma_r^{res}(z) \right]. \quad (4)$$

$$q_z(r) = \alpha q_{\theta}(r), \quad q_r = -q_{\theta}(1+\alpha) \quad (5)$$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{a^2} \int_0^a r \left\{ q_z(r) - \frac{\nu}{E} \left[\sigma_r^{res}(r) + \sigma_{\theta}^{res}(r) \right] \right\} dr, \quad (6)$$

$$\sigma_z^{res}(r) = E \left(\varepsilon_z^0 - q(r) \right) + \nu \left(\sigma_r^{res}(r) + \sigma_{\theta}^{res}(r) \right). \quad (7)$$

где ν и E – упругие константы материала, α – параметр «упрочнения».

В пункте 2.2 предложена методика идентификации параметров аппроксимации (2) по экспериментальной диаграмме $\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta}(r)$ в упрочнённом слое и выполнен анализ полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрическом изделии после процедуры ППД в соответствии с гипотезой (1). На рис. 1 показаны зависимости распределения осевой компоненты остаточных напряжений $\sigma_z^{res}(h)$ в зависимости от параметра α по глубине слоя h

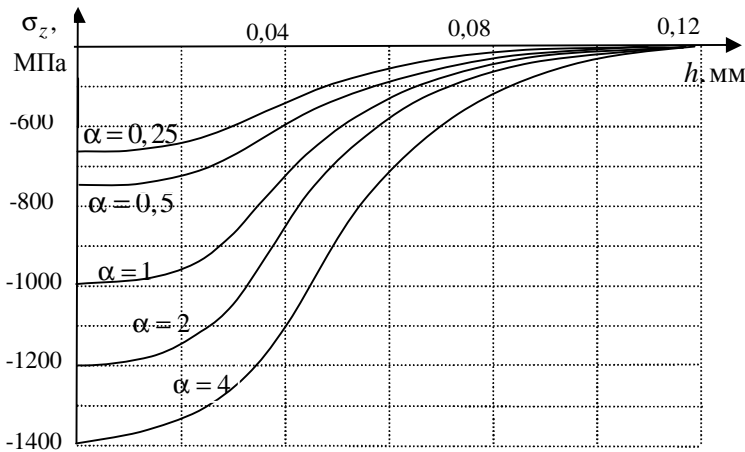


Рис. 1. Распределение осевой компоненты тензора остаточных напряжений σ_z^{res} в зависимости от параметра α для одной и той же заданной компоненты σ_{θ}^{res}

по известной зависимости с параметрами аппроксимации (2): $a = 37,6$ мм, $b = 0,75$ мм, $\sigma_0 = 18,7$ МПа, $\sigma_1 = 1018,7$ МПа.

Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что можно существенно увеличить максимальную величину осевой компоненты сжимающих напряжений σ_z^{res} за счёт управления технологией упрочнения (математически – за счёт выбора параметра α).

В пункте 2.3 рассмотрены вопросы релаксации остаточных напряжений в упрочнённом цилиндрическом образце при продольном растягивающем усилии $F(t)$ в условиях ползучести с учётом гипотезы (1).

В силу того, что толщина поверхностного слоя мала по сравнению с радиусом цилиндрического образца, то упрочнённый слой не оказывает существенного влияния на жёсткость и деформируемость самого цилиндра. Поэтому тонкий поверхностный слой можно представить «наклеенным» на цилиндр и деформирующимся с ним в режиме «жёсткого» нагружения под действием силы $F(t)$. Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо иметь решение краевой задачи о неупругом деформировании цилиндра при действии

растягивающей силы $F(t)$, из которой определяются деформации $\varepsilon_r(t)$, $\varepsilon_\theta(t)$, $\varepsilon_z(t)$ на поверхности цилиндра. Эти три величины являются входными данными для решения краевой задачи о релаксации остаточных напряжений в тонком поверхностном слое.

В качестве основной реологической модели взята модель энергетического типа, предложенная и апробированная в работах Ю.П. Самарина и В.П. Радченко.

В пункте 2.4 выполнен обстоятельный численный анализ релаксации остаточных напряжений на фоне ползучести цилиндрического образца в зависимости от первоначального напряжённо деформированного состояния, определяемого на основании гипотезы (1).

В качестве примера на рис. 2 приведена типичная картина кинетики остаточных напряжений σ_θ^{res} на поверхности упрочнённого цилиндрического образца при $r=a$ (a – радиус цилиндра) растягиваемого нагрузкой $\sigma = \frac{F}{\pi a^2} = 300 \text{ МПа}$, в зависимости от величины параметра «упрочнения» α .

Выполненный анализ позволяет сделать следующие выводы: 1) начальное напряжённо – деформированное состояние в упрочнённом слое после процедуры ППД и кинетика остаточных напряжений в процессе ползучести существенно зависят от параметра α (исходной технологии наведения остаточных напряжений); 2) показано, что имеется возможность повысить эффективность упрочнённого слоя за счёт выбора параметра α : при $\alpha > 1$ релаксация напряжений σ_θ^{res} и

σ_z^{res} идёт медленнее, чем в «классическом» случае $\alpha = 1$, поэтому величина исчерпания ресурса (по величине остаточных сжимающих напряжений) при $\alpha > 1$ наступает гораздо позже, чем в случае $\alpha = 1$.

Глава 3. Решение некоторых краевых задач релаксации остаточных напряжений в упрочнённом слое кругового цилиндрического образца в условиях ползучести

В главе 3 рассматриваются решения некоторых важных (как с теоретической, так и практической точек зрения) краевых задач релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое кругового цилиндрического образца.

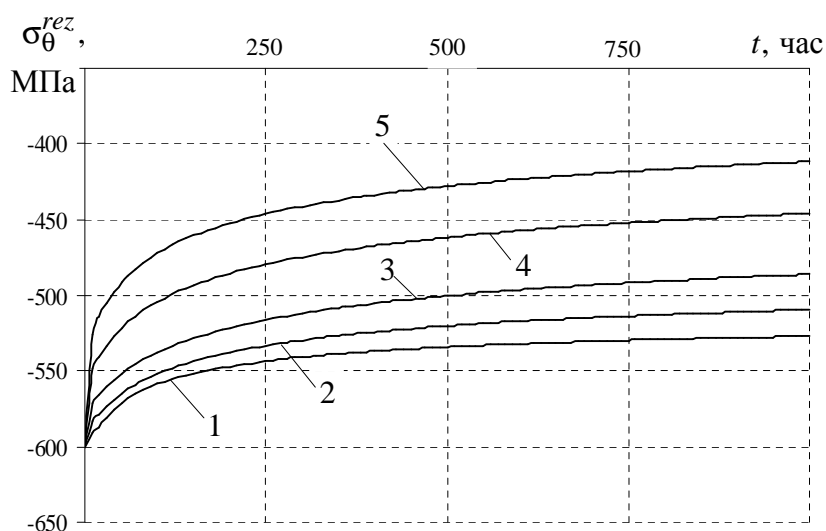


Рис. 2. Кривые релаксации остаточных напряжений $\sigma_\theta^{res}(a, t)$ для цилиндрического образца в условиях ползучести (сплав ЭИ 698, $T = 700^\circ\text{C}$) при растягивающей нагрузке: 1– $\alpha = 4$; 2– $\alpha = 2$; 3– $\alpha = 1$; 4– $\alpha = 0,5$; 5– $\alpha = 0,25$

В пункте 3.1 решена задача о релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое в условиях неоднородного напряжённого состояния при ползучести на примере вращающегося цилиндрического стержня кругового сечения. Выполнен подробный анализ задачи и показано, что процесс релаксации по длине стержня неоднороден: наибольшая скорость релаксации наблюдается у оси вращения, наименьшая – на противоположной части стержня.

В пункте 3.2 выполнено исследование влияния циклической компоненты нагружения, наложенной на квазистатическую нагрузку, на процесс релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрического кругового образца в условиях ползучести. На модельном примере показано, что циклическая компонента вызывает расслоение кривых релаксации остаточных напряжений по отношению к процессу релаксации при квазистатическом нагружении. При этом скорость релаксации существенно зависит от коэффициента амплитуд $A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$ (σ_m, σ_a – соответственно квазистатическое напряжение и амплитудное значение циклической компоненты). Отмеченные факты проиллюстрированы примерами расчётов.

Пункт 3.3 посвящён моделированию процесса релаксации остаточных напряжений с учётом вторичных пластических деформаций в упрочнённом слое. Показано, что чем выше была величина первоначальной остаточной деформации, тем интенсивнее идёт процесс релаксации остаточных напряжений в упрочнённом слое. Приведены результаты расчёта.

Глава 4. Метод расчёта кинетики напряжённо–деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое вращающихся элементов конструкций при ползучести

В пункте 4.1 изложена идея метода расчёта кинетики напряжённо – деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое вращающихся элементов конструкций типа криволинейных стержней переменного сечения с произвольной формой границы разнознаковой кривизны, типичным представителем которых является, например, вращающаяся лопатка газотурбинного двигателя (в общем случае пространственно закрученная).

В пункте 4.2 предложена методика расчёта кинетики напряжённо деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкций с произвольной границей в условиях ползучести для плоской задачи.

В пунктах 4.2.1 и 4.2.2 рассматривается бесконечная плита со сквозным круговым отверстием. Как и в случае для цилиндрического образца (раздел 2) в задаче восстановления НДС в качестве исходной информации считается известной величина $\sigma_{\theta}^{res}(r)$. Схема определения остаточных напряжений $\sigma_r^{res}(r)$, $\sigma_z^{res}(r)$ и остаточных пластических деформаций в упрочнённом слое аналогична задаче для цилиндра. Для задачи ползучести упрочнённый слой также считался «наклеенным» на контур отверстия и деформирующимся с ним в режиме «жёсткого» нагружения при тензоре деформаций, получаемом из ре-

шения соответствующей краевой задачи о ползучести плиты в поле сил, приводящих к плоской задаче.

В пункте 4.2.3 разрабатывается метод оценки релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое для цилиндрических элементов конструкций с произвольной (в общем случае – многосвязной) границей двояковыпуклой кривизны при ползучести для случая плоской задачи.

Рассматривается цилиндрическое тело, в сечении которого имеем область Ω с односвязной L (рис. 3,а) или многосвязной $L = L_1 \cup L_2$ (рис. 3,б) границей, на которой приложены распределённые $\alpha_i(x, y, t)$ ($i = \overline{1, n}$) и сосредоточенные $P_j(x_j, y_j, t)$ ($j = \overline{1, n}$) силы ($x, y, x_j, y_j \in L$). Координату z направим перпендикулярно плоскости xOy . Считается, что вдоль координаты z , линейный размер тела достаточно большой. Полагается, что в любом сечении, перпендикулярном оси Oz , напряжённо – деформированное состояние является одинаковым. При этом допускается, что могут действовать и равномерно распределённые нагрузки вдоль оси Oz .

Предполагается, что боковая поверхность цилиндрического изделия предварительно подверглась поверхностному пластическому упрочнению. Задача состоит в оценке релаксации наведённых остаточных напряжений в процессе ползучести в любой точке контура L при действии заданных нагрузок.

Здесь возникают два варианта: точка лежит на вогнутом и выпуклом участках L (точки B и A на рис. 3). Имея аналитическое уравнение контура, заданное априори, либо полученное одним из интерполяционных многочленов приближённо, нетрудно построить соприкасающуюся окружность в каждой из точек A и B с радиусами R_1 и R_2 , определяемыми по формуле

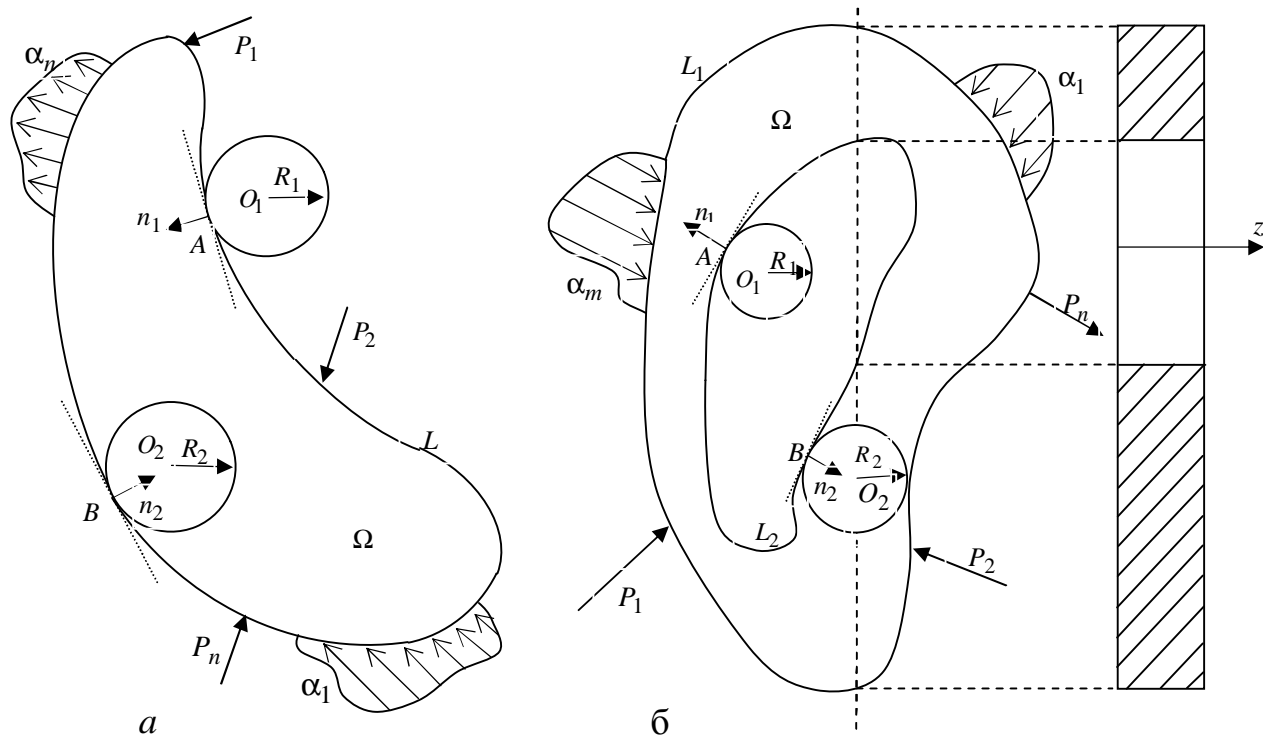


Рис. 3. Схема к математической модели расчёта остаточных напряжений для плоской задачи

$R = \left[1 + (y')^2 \right]^{3/2} / |y''|$, где $y = y(x)$ – уравнение границы, и центрами в точках O_1 и O_2 (см. рис. 3). Далее вводится гипотеза, согласно которой оценка релаксации остаточных напряжений в поверхностном слое в точке B по нормали \vec{n}_2 может быть выполнена как для поверхностно упрочнённого цилиндра радиуса R_2 в локальной цилиндрической системе координат с центром в точке O_2 по методике, изложенной в разделе 2. Релаксацию же остаточных напряжений в поверхностном слое в точке 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 в точке O_1 .

В пункте 4.3 разработанный в 4.2 метод расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое цилиндрических изделий обобщается для криволинейных вращающихся стержней переменного сечения (на примере прямолинейных и закрученных лопаток переменного сечения). Для этого применяется метод декомпозиции конструкции: семейством плоскостей, перпендикулярных оси, вдоль которой действуют центробежные массовые силы, стержень переменного сечения разбивается на ряд стержней постоянного сечения. В итоге мы получим ряд элементарных стержней постоянного сечения в поле массовых сил. Таким образом предполагается следующая упрощённая схема для расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочненном слое криволинейного стержня переменного сечения.

1. Выполняется решение краевой задачи о напряжённо деформированном состоянии стержня переменного сечения в поле массовых сил без учёта поверхностно упрочнённого слоя (например, методом конечных элементов) и определяется тензор деформаций ε_{ij}^1 в каждой интересующей точке поверхности в декартовой системе координат $Oxuz$.

2. Выполняется замена стержня переменного сечения на ряд элементарных стержней постоянного сечения в поле массовых центробежных сил.

3 В каждом сечении элементарного стержня в зависимости от выпуклости или вогнутости вводится локальная цилиндрическая система координат с началом в центре соприкасающейся окружности и осуществляется пересчет деформаций ε_{ij}^2 в цилиндрической системе координат по известным из расчета деформациям ε_{ij}^1 в декартовой системе координат для всех точек поверхности. Осуществляется расчет на выпуклой поверхности сечения как для упрочненного цилиндра, а на вогнутой поверхности – как для упрочненного кругового концентратора по методике, изложенной в пункте 4.2.

Выполнен детальный анализ кинетики остаточных напряжений в упрочнённом слое как для незакрученной, так и для закрученной лопаток первой ступени газотурбинного двигателя высокого давления длиной 150 мм при различных режимах нагружения: $\omega = 450$ рад/сек, $\omega = 350$ рад/сек и $\omega = 270$ рад/сек. Задача решена в пределах установившейся ползучести. На рис. 4 приведены два из четырёх сечений закрученной лопатки (корневое и отстоящее от него на 100

мм) и указаны характерные точки, в которых решалась задача о релаксации остаточных напряжений в слое. На рис. 5 – типичная картина кинетики осевого напряжения σ_{zz} на поверхности упрочнённого слоя по периметру лопатки в

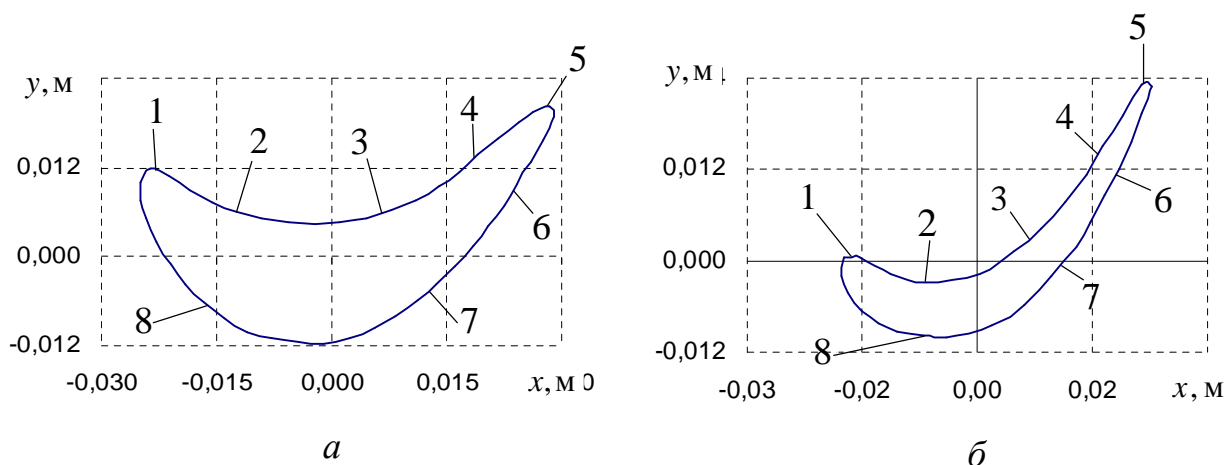


Рис. 4. Корневое (а), третье (б) сечения закрученной лопатки: цифры – характерные точки поверхности

корневом и третьем сечениях.

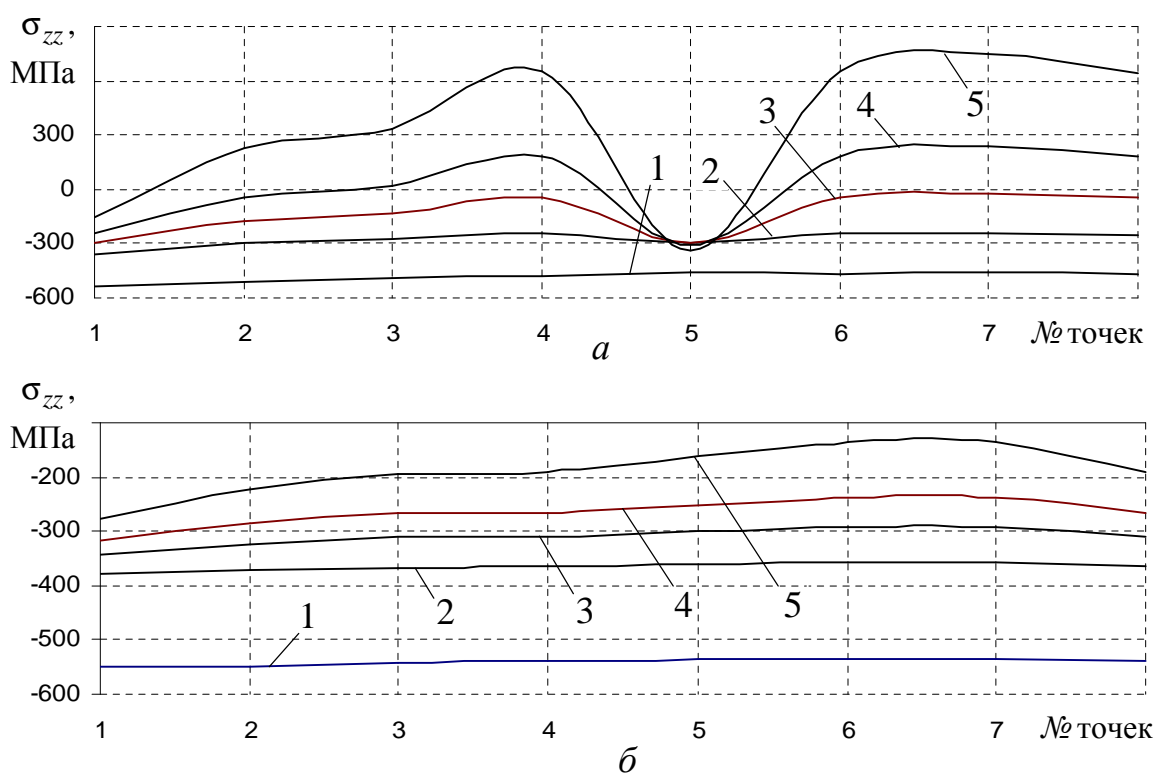


Рис. 5. Кинетика напряжений σ_{zz} на поверхности закрученной лопатки по периметру сечений: а – нулевое; б – сечение №3. Цифры: 1 – $t = 0 - 0$; 2 – $t = 10$; 3 – $t = 50$; 4 – $t = 100$; 5 – $t = 200$ час

Основные результаты диссертационной работы

1. Модифицирован и обобщён расчётно–феноменологический метод восстановления напряжённо–деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкций после процедуры наведения ориентированных остаточных напряжений, на основании которого решён ряд новых задач восстановления НДС в поверхностно упрочнённом слое для ряда типовых эле-

ментов конструкций (цилиндрический образец, круговой концентратор, криволинейные стержни постоянного и переменного сечений, прямолинейные и закрученные лопатки переменного сечения).

2. Показано, что за счёт управления технологией упрочнения (с математической точки зрения – выбора параметра α в гипотезе $q_z = \alpha q_\theta$) можно существенно увеличить ресурс цилиндрических элементов конструкций, находящихся в условиях растяжения при ползучести, по параметрическим критериям отказа (величине остаточных напряжений).

3. Разработан метод оценки кинетики тензора остаточных напряжений в тонком поверхностно упрочнённом слое на основе идей декомпозиции и склейки решений краевых задач в условиях ползучести для объёмного неоднородного напряжённого состояния, вызванного массовыми силами вращения.

4. Решён ряд новых задач оценки кинетики НДС в поверхностно упрочнённом слое для ряда модельных и промышленных конструктивных элементов (цилиндрический образец, круговой концентратор, криволинейные стержни постоянного и переменного сечений, прямолинейные и пространственно закрученные лопатки переменного и постоянного сечений) в условиях ползучести для однородного и неоднородного напряжённых состояний и выполнен их детальный численный анализ.

5. Исследовано влияние циклических нагрузок и величины остаточных пластических деформаций после процедуры упрочнения на интенсивность релаксации остаточных напряжений в упрочнённом слое и показано, что оба этих фактора существенно ускоряют процесс релаксации остаточных напряжений.

Основные результаты диссертации, опубликованные в рецензируемых сборниках:

1. *Просвиркина, Е. А.* Исследование полей остаточных напряжений и пластических деформаций при поверхностном упрочнении [Текст] / М. Н. Саушкин, Е. А. Просвиркина // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. «Физ.-мат. науки»*. – 2004. – № 26. – С. 194–195. (авт. 0,5 с.).

2. *Просвиркина, Е. А.* Математическая модель релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое при ползучести с учётом вторичных пластических деформаций [Текст] / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин, Е. А. Просвиркина // *Обозрение прикладной и промышленной математики* / Мат. Шестого Всерос. симп. по прикладной и промышленной математике. – М.: ОПиПМ. – 2005. – Т.12, Вып. 2. – С. 491–492. (авт. 0,3 с.).

3. *Просвиркина, Е. А.* Исследование влияния циклической компоненты нагружения на процесс релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрического образца в условиях ползучести [Текст] / М. Н. Саушкин, Е. А. Просвиркина // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. «Физ.-мат. науки»*. – 2006. – № 42. – С. 191–193. (авт. 0,5 с.).

4. *Просвиркина, Е. А.* Исследование влияния циклической компоненты нагружения на процесс реологического деформирования элементов конструкций [Текст] / М. Н. Саушкин, Е. А. Просвиркина // *Обозрение прикладной и промышленной математики* / Мат. Седьмого Всерос. симп. по прикладной и промышленной математике. – М.: ОПиПМ. – 2006. – Т.13, Вып. 4. – С. 495–496.

(авт. 0,5 с.).

5. *Просвиркина, Е. А.* Моделирование трёхмерного напряжённо– деформированного состояния лопатки вращающегося диска в условиях ползучести [Текст] / В. П. Радченко, Е. А. Просвиркина // *Обозрение прикладной и промышленной математики* / Мат. Седьмого Всерос. симп. по прикладной и промышленной математике. – М.: ОПиПМ. – 2006. – Т.13, Вып. 4. – С. 708. (авт. 0,5 с.).

В других сборниках:

6. *Просвиркина, Е. А.* Построение математической модели шпирерного охлаждения. [Текст] / Л. В. Кайдалова, Е. А. Просвиркина // Мат. моделирование и краевые задачи. Тр. Шестой научной межвузовской конф. Самара: СамГТУ, 1996. –С. 44. (авт. 0,5 с.).

7. *Просвиркина, Е. А.* Численное решение краевой задачи о релаксации напряжений в поверхностном упрочнённом слое цилиндрического образца в условиях неупругого деформирования [Текст] / М.Н. Саушкин, Е. А. Просвиркина // *Актуальные проблемы современной науки*. Тр. Пятой международ. конф. молодых учён. – Ч. 4. – Самара: СамГТУ, 2004. – С. 72. (авт. 0,5 с.).

8. *Просвиркина, Е. А.* Распараллеливание расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкций в условиях ползучести [Текст] / В. П. Радченко, М. Н. Саушкин, Е. А. Просвиркина // *Четырнадцатая зим. шк. по механике сплошных сред*. – Пермь: ИМСС УрО РАН, – 2005. – С. 252. (авт. 0,3 с.).

9. *Просвиркина, Е. А.* Моделирование процессов релаксации остаточных напряжений в зависимости от технологии упрочнения изделия (цилиндрический образец) [Текст] / Е. А. Просвиркина, М. Н. Саушкин, Н. Б. Кротинов // Мат. моделирование и краевые задачи. Тр. Второй Всерос. научной конф. – Ч. 1. – Самара: СамГТУ, 2005. – С. 267–269. (авт. 1,75 с.).

10. *Просвиркина, Е. А.* Краевые задачи для оценки кинетики напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкции [Текст] / Е. А. Просвиркина, М. Н. Саушкин // *Диф. ур. и их приложения*. Тезисы докладов Всерос. конф. – Самара, СГУ, 2005. – С. 75–76. (авт. 1 с.).

11. *Просвиркина, Е. А.* Исследование эффекта Сен-Венана при растяжении лопатки вращающегося диска в поле центробежных сил [Текст] / Е. А. Просвиркина // Мат. моделирование и краевые задачи. Тр. Третьей Всерос. научной конф. – Ч. 1.– Самара: СамГТУ, 2006. – С. 172–176.

12. *Просвиркина, Е. А.* Релаксация остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое сплошного вращающегося цилиндра в условиях ползучести [Текст] / Е. А. Просвиркина, М.Н. Саушкин // Мат. моделирование и краевые задачи. Тр. Третьей Всерос. научной конф. – Ч. 1. – Самара: СамГТУ, 2006. – С. 192–199. (авт. 4 с.).

13. *Просвиркина, Е. А.* Исследование влияния циклических нагрузок на ползучесть и длительную прочность толстостенной трубы [Текст] / Е. А. Просвиркина, С. Н. Кубышкина, В. С. Гагаринский // Мат. моделирование и краевые задачи. Тр. Третьей Всерос. научной конф. – Ч. 1. – Самара: СамГТУ, 2006. – С. 129–131. (авт. 1 с.).

14. *Просвиркина, Е. А.* Распараллеливание расчёта релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое лопатки вращающегося диска [Текст] / Е. А. Просвиркина, М. Н. Саушкин // Тезисы докл. Всерос. научной конф. «Математика. Механика. Информатика». – Челябинск, 2006. – С. 110. (авт. 0,5 с.).

15. *Просвиркина, Е. А.* Модели ползучести и релаксации остаточных напряжений в упрочнённых конструкциях [Текст] / Е. А. Просвиркина, М. Н. Саушкин // IX Всерос. съезд по теор. и прикладной механике. Тезисы докладов. – Нижний Новгород, 2006. – С. 178. (авт. 0,5 с.).

16. *Просвиркина, Е. А.* Об одном подходе к решению краевых задач для поверхностно упрочнённых конструкций в условиях ползучести [Текст] / Е. А. Просвиркина, М. Н. Саушкин // XV Всерос. шк.–конференция молод. уч. Тезисы докладов. – Пермь, 2006. – С. 75–76. (авт. 1 с.).

17. *Просвиркина, Е. А.* Релаксация остаточных напряжений в упрочнённой вращающейся лопатке в условиях ползучести. [Текст] / Е. А. Просвиркина, М. Н. Саушкин // Всерос. конф. «Деформирование и разрушение структурно–неоднородных сред и конструкций». Тезисы докладов. – Новосибирск, 2006. – С. 112. (авт. 0,5 с.).

Подписано в печать 25 сентября 2006 г.

Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 1567. Отпечатано на ризографе.

Самарский государственный технический университет.

Отдел типографии и оперативной полиграфии.

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