На правах рукописи

Саушкин Михаил Николаевич

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНО–УПРОЧНЕННОМ СЛОЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

01. 02. 04 — Механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Самара — 2001

Работа выполнена в Самарском государственном университете

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук,
профессор Радченко Владимир Павлович.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук,
профессор Сараев Леонид Александрович;
доктор технических наук,
профессор Бордаков Сергей Александрович.

Ведущая организация
Институт машиноведения УрО РАН, г.Екатеринбург.

Защита состоится "20" ноября 2001 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.218.06 в Самарском государственном университете по адресу: 443011, г. Самара, ул. Ак. Павлова, 1, ауд. 203 (х/б).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного университета.

Автореферат разослан "18" октября 2001 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н, доцент Л.В. Степанова

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Развитие методов повышения сопротивления деталей машин и элементов конструкций является центральной проблемой общего, энергетического, нефтехимического и аэрокосмического машиностроения. Один из самых распространенных методов при решении указанной проблемы — это метод поверхностного пластического деформирования (ППД). Повышение сопротивления усталости, длительной прочности, коррозионному растрескиванию обусловлено, главным образом, наличием в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений. Однако условия эксплуатации оказывают существенное влияние на состояние упрочненного слоя: под действием рабочих квазистатических и циклических нагрузок, а также высоких температур происходит (в основном, за счет появления деформаций ползучести) существенное изменение остаточных напряжений в поверхностном слое. В этой связи весьма актуальной становится проблема оценки релаксации остаточных напряжений на фоне общей ползучести детали (конструктивного элемента) и связанного с процессом релаксации напряжений изменения сопротивления детали во времени. Общепринято, что "благоприятное" действие ППД сказывается до тех пор, пока остаточные напряжения имеют отрицательный знак. Поэтому величину остаточных напряжений в процессе ползучести конструктивного элемента можно использовать как один из параметров в задачах параметрической надежности для диагностики остаточного ресурса деталей при эксплуатации по техническому состоянию.

В связи с изложенным, актуальность разработки методов расчета релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое в условиях ползучести не вызывает сомнений. Как правило, существующие на сегодняшний день методики расчета предложены для простейших конструктивных элементов (типа цилиндрического образца) и базируются: во-первых, на простейших теориях ползучести (типа квазилинейных уравнений установившейся ползучести), которые не учитывают процессы накопления поврежденности и разрушения материала; во-вторых, вместо полной картины кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС) в поверхностно-упрочненном слое используется упрощенная схема эквивалентного напряженного состояния. В настоящей работе развивается метод решения задачи о релаксации напряжений в поверхностно-упрочненном слое при ползучести на основании реологической модели, учитывающей три стадии ползучести, пластическую деформацию, процессы накопления поврежденности и разрушения с учетом полной картины тензорного характера НДС для трехмерного случая в упрочненном слое.

Целью работы являлась разработка расчетно-феноменологического метода восстановления НДС в поверхностно-упрочненном слое изделия по одной из экспериментально определенной компоненте тензора напряжений после процедуры ППД и метода расчета релаксации остаточных напряже-

ний в поверхностном слое на фоне ползучести конструктивного элемента.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1) Разработан расчетно-феноменологический метод восстановления НДС в поверхностно-упрочненном слое на вогнутой и выпуклой поверхностях элементов конструкций по одной экспериментально определенной компоненте тензора напряжений.

2) Решен ряд новых задач восстановления НДС в поверхностно-упрочненном слое для типовых элементов конструкций (цилиндрический образец; тонко- и толстостенная трубы, толстостенная сфера; толстостенная плита с концентраторами типа глубокой выточки, полукругового и кругового концентратора; концентратор произвольной формы; диск ГТД с круговым концентратором).

3) Решены краевые задачи неупругого реологического деформирования и разрушения для ряда конструктивных элементов (толстостенная сфера под действием внутреннего давления, толстостенная труба под действием внутреннего и внешнего давлений и растягивающей осевой силы, толстостенная плита с концентраторами различного вида при действии растягивающих нагрузок и внутренних давлений по поверхности концентратора, диск ГТД со сквозным круговым концентратором).

4) Разработан метод решения краевой задачи для оценки кинетики остаточных напряжений в тонком поверхностно-упрочненном слое при его деформировании в режиме "жесткого" нагружения (при заданных значениях тензора деформаций) на вогнутой и выпуклой поверхностях в условиях ползучести.

5) Разработан метод склейки решений краевых задач неупругого реологического деформирования для тонкого поверхностно-упрочненного слоя и самого конструктивного элемента для оценки кинетики НДС в поверхностном слое.

6) Решен ряд задач оценки кинетики НДС в поверхностно-упрочненном слое для ряда типовых конструктивных элементов (цилиндрический образец; тонко- и толстостенная трубы, толстостенная сфера; толстостенная плита с концентраторами типа глубокой выточки, полукругового и кругового концентраторов; концентратор произвольной формы; диск ГТД с круговым концентратором) и выполнен их детальный численный анализ.

7) Даны рекомендации оценки эффективности ППД по критерию величины остаточных напряжений в поверхностном упрочненном слое в условиях ползучести.

На защиту выносятся:

1) расчетно-феноменологический метод восстановления НДС в поверхностно-упрочненном слое на вогнутой и выпуклой поверхностях элементов конструкций после процедуры ППД по одной экспериментально определенной компоненте тензора напряжений;

2) решение задач восстановления НДС в поверхностно-упрочненном слое после процедуры ППД для типовых элементов конструкций: цилинд-

рического образца; тонко- и толстостенной труб; толстостенной сферы; толстостенной плиты с концентраторами типа глубокой выточки, полукругового концентратора и кругового концентратора; ГТД с концентратором типа сквозного кругового отверстия;

3) решение краевых задач неупругого реологического деформирования и разрушения для элементов конструкций, перечисленных в пункте 2, и проверка их адекватности известным результатам;

4) метод решения краевой задачи для оценки релаксации остаточных напряжений в тонком поверхностно-упрочненном слое при его деформировании в режиме "жесткого" нагружения (при заданных значениях компонент тензора деформаций) на выпуклой и вогнутой поверхностях в условиях ползучести;

5) метод склейки решений краевых задач неупругого реологического деформирования для тонкого поверхностно-упрочненного слоя и самого конструктивного элемента для оценки кинетики НДС в поверхностном слое и его реализация для типовых изделий.

6) качественные, количественные и экспериментальные (численные) результаты, полученные при решении соответствующих краевых задач для типовых конструктивных элементов.

Практическая значимость работы заключается в разработке расчетно-феноменологического метода формирования и метода оценки релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое элементов конструкций в условиях неупругого реологического деформирования и решения ряда важных прикладных задач на их основе. С одной стороны, это является существенным научным вкладом в соответствующий раздел механики деформируемого твердого тела и служит целям внутренней завершенности последнего. С другой стороны, разработанный метод позволяет эффективно его использовать в прикладных задачах для оценки параметрической надежности (по величине остаточных напряжений) элементов конструкций с поверхностно-упрочненным слоем в энергетическом, машиностроительном, нефтехимическом и аэрокосмическом промышленных комплексах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка источников из 160 названий. Работа содержит 222 страниц основного текста.

Апробация работы. Результаты научных исследований опубликованы в 13 печатных работах и докладывались на международном семинаре "Нелинейное моделирование и управление" (г. Самара, 1998 г.), международной конференции "Надежность и качество в промышленности, энергетике и на транспорте" (г. Самара, 1999 г.), международной конференции молодых ученых "Актуальные проблемы современной науки" (г. Самара, 2000, 2001 гг.), международной конференции "Разрушение и мониторинг свойств металлов" (г. Екатеринбург, 2001 г.), межвузовской конференции "Математическое моделирование и краевые задачи" (г. Самара, 1999, 2001 гг.),

международной конференции "Математическое моделирование" (г. Самара, 2001 г.), Втором Всероссийском симпозиуме по прикладной и промышленной математике (г. Самара, 2001 г.), VIII Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (г. Пермь, 2001 г.); на семинаре "Механика и прикладная математика" СамГТУ (рук. проф. В.П. Радченко, 1999–2001 гг.), на семинаре "Актуальные проблемы механики сплошных сред" СамГУ (рук. проф. В.И. Астафьев, 1999–2001 гг.), на научном семинаре института механики и технологии СамГТУ (рук. проф. Я.М. Клебанов, 2001 г.), на совместном научном семинаре кафедр "Прикладная механика и информатика" и "Мосты и транспортные сооружения" СГТУ (рук. проф. В.В. Петров и проф. И.Г. Овчинников, 2001 г.), на научно-техническом семинаре кафедры "Сопротивление материалов" СГАУ (рук. проф. В.Ф. Павлов и проф. С.И. Иванов, 2001 г.).

Работа выполнялась в рамках программы научно-исследовательских работ Самарского государственного университета; включена в межвузовский план госбюджетных НИР по научному направлению "Механика", утвержденному Министерством образования Российской Федерации на 1998–2003 гг. (тема: "Надежность механических систем в промышленности, энергетике и на транспорте"). Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 00-01-81067 Бел2000$_a$).

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определяются цели исследований, 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

В **разделе 1** делается краткий обзор литературы, посвященный вопросу определения остаточных напряжений и остаточных деформаций в поверхностно-упрочненном слое после процедуры ППД; проблеме кинетики остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое элементов конструкций при действии внешних факторов (нагрузки, температуры и т.д.); вопросу влияния остаточных напряжений на эксплуатационные характеристики (сопротивление усталости, долговечность, твердость, износостойкость, трещиностойкость и т.д.).

В этом же разделе анализируется развитие двух подходов к проблеме определения остаточных напряжений и деформаций, а именно: аналитического (не экспериментального определения остаточных напряжений) и расчетно-феноменологического (комбинации эмпирических подходов и вспомогательных расчетных методик). Аналитический подход представлен работами таких ученых, как А.Н. Архипов, В.Б. Бойцов, С.А. Бордаков, Г.Н. Гутман, Р.Р. Мавлютов, В.Ф. Павлов, Ю.Н. Радаев, В.П. Скрипняк,

П.А. Чепа, Г.Н. Чернышов, А.А. Шапарин, W. Gambin и др. Расчетно-феноменологический подход представлен работами таких ученых, как В.Н. Анисимов, А.Н. Архипов, В.Ф. Балашов, М.А. Балтер, М.А. Биргер, М.В. Гринченко, О.В. Колотникова, Б.А. Кравченко, А.Н. Петухов, Ю.В. Полоскин, K.J. Kang, S.Y. Seol, H. Wern и др. Проводится анализ возможностей, ограничений и недостатков каждого из подходов. Делается вывод, что расчетно-феноменологический подход более предпочтителен, чем аналитический, так как при этом подходе имеется частичная экспериментальная информация о тензоре остаточных деформаций, которая может служить реперной точкой в разработке соответствующей методики восстановления НДС в поверхностно-упрочненном слое.

Показано, что для деталей, работающих в условиях ползучести, упрочнение ППД приводит к повышению эксплуатационных характеристик, таких, как сопротивление усталости, долговечность, износо- и трещиностойкость. В этом плане проанализированы работы В.В. Белозерова, Г.Н. Гутмана, В.А. Дегтярева, Е.А. Ефимова, В.С. Иванова, Б.А. Кравченко, П.И. Кудрявцева, В.Т. Трощенко, В.Ф. Павлова, А.М. Сулимы, В.В. Покровского, В.Г. Фокина и др.

В связи с изложенным, отмечается интерес к кинетике остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое при высоких температурах (фактически при ползучести) в конструкциях, к примеру, в работах В.И. Егорова, Б.А. Кравченко, В.Г. Круцило и др. авторов. Но при исследовании процесса релаксации в условиях ползучести используются модели, справедливые только в пределах первых двух стадий. Однако отмечается, что начальные значения остаточных напряжений могут иметь существенные значения и составлять порядок 600–1000 *МПа.* Ясно, что расчетные теории при таких уровнях напряжения должны описывать не только третью стадию ползучести и процессы накопления поврежденности, 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. Локощенко, Н.Н. Малинина, В.В. Новожилова, А.Ф. Никитенко, Ю.Н. Работнова, Ю.Н. Радаева, В.П. Радченко, Ю.П. Самарина, О.В. Соснина, С.А. Шестерикова, И.Ю. Цвелодуба, Беттена (J.A. Betten), Мураками (S. Murakami) и мн. других авторов.

Здесь же, в первом разделе, по результатам литературных данных сформулированы основные глобальные цели и задачи исследований настоящей диссертационной работы.

Раздел 2 посвящен разработке метода релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое цилиндрического изделия после ППД. При этом поставленная задача разбивается на следующие подзадачи:

1) разработка расчетно-феноменологического метода восстановления

полей остаточных напряжений и деформаций по схеме сложного напряженного состояния после применения ППД для цилиндрического изделия;

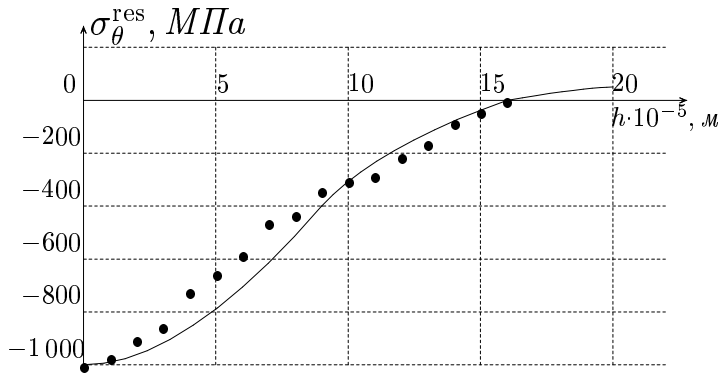

Рис. 1. Эпюры остаточных напряжений $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$ (сплав ЖС6–КП): сплошная линия — расчет по (1); точки — экспериментальные данные.

2) разработка метода описания процесса релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое цилиндрического изделия на фоне ползучести самого изделия (цилиндрического образца).

Для решения первой задачи в п. 2.1 были введены гипотезы: 1) цилиндрический образец после ППД находится в ненагруженном состоянии; 2) предполагается, что в силу малой толщины упрочненного слоя по сравнению с радиусом образца a на бесконечно малой области слоя упрочнение происходит так же, как в слое полуплоскости. Здесь же приводится методика восстановления полей остаточных напряжений и пластических деформаций по экспериментально определенной окружной компоненте остаточных напряжений $\sigma_\theta^{\text{res}}$ (см. рис. 1), для аппроксимации которой использовалось выражение вида:

$$\sigma_\theta^{\text{res}}(r) = \sigma_0 - \sigma_1 \exp\left(-\frac{(a-r)^2}{b^2}\right), \tag{1}$$

где σ_0, σ_1 и b — параметры, методика определения которых приведена в п. 2.2. Здесь же разработана методика восстановления полей остаточных напряжений и пластических деформаций, окончательные выражения для которых задаются следующими соотношениями:

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

$$\begin{aligned} q_\theta(r) = \frac{1-2\nu}{E(1+\nu)r^{\frac{3}{1+\nu}}} \int\limits_0^r z^{\frac{2-\nu}{1+\nu}}[\sigma_r^{\text{res}}(z) + 2\sigma_\theta^{\text{res}}(z)]\,dz - \\ -\frac{1}{E}\big[(1-\nu)\sigma_\theta^{\text{res}}(r) - \nu\sigma_r^{\text{res}}(r)\big], \\ q_\theta(r) = q_z(r) = -\frac{q_r(r)}{2}. \end{aligned} \tag{3}$$

$$\varepsilon_z^0 = \frac{2}{a^2}\int\limits_0^a r\left\{q_z(r) - \frac{\nu}{E}[\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r)]\right\}dr. \tag{4}$$

$$\sigma_z^{\text{res}}(r) = E\left[\varepsilon_z^0 - q_z(r)\right] + \nu\left[\sigma_r^{\text{res}}(r) + \sigma_\theta^{\text{res}}(r)\right], \tag{5}$$

Здесь ν и E — упругие константы материала.

В п. 2.3 разрабатывается методика расчета процесса релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое цилиндрического образца в условиях ползучести при продольном растягивающем усилии $F(t)$. В силу того, что толщина поверхностного слоя мала по сравнению с радиусом цилиндрического образца, то упрочненный слой не оказывает существенного влияния на жесткость и деформируемость самого цилиндра. Поэтому тонкий упрочненный поверхностный слой можно представить себе "наклеенным" на цилиндр и деформирующимся с ним в режиме "жесткого" нагружения под действием силы $F(t)$. Таким образом, для решения поставленной задачи необходимо иметь решение соответствующей краевой задачи о неупругом деформировании цилиндра при растягивающей нагрузке $F(t)$.

В качестве основной реологической модели взята модель энергетического типа, предложенная и апробированная в работах Ю.П. Самарина и В.П. Радченко. Согласно этой модели полная деформация представляется в виде суммы упругой, пластической деформаций и деформации ползучести. В свою очередь деформация ползучести представляется аддитивной составляющей вязкоупругой, вязкопластической и вязкой компонент. Введен параметр поврежденности, который полагается пропорциональным линейной комбинации работы истинного напряжения на деформациии пластичности и ползучести.

Для прогнозирования времени разрушения материала t_* используется критерий разрушения энергетического типа

$$\Omega(t_*) = \int\limits_0^{t_*} \frac{\sigma_{ij}\, dq_{ij}}{A_*} + \int\limits_0^{t_*} \frac{\sigma_{ij}\, dp_{ij}}{A_*^c(S_0)} = 1, \tag{6}$$

где A_* и $A_*^c(S_0)$ — соответственно критические величины работ разрушения истинного напряжения на пластической деформации и деформации ползучести. (S_0 — интенсивность номинальных напряжений). При этом материал находится в неразрушенном состоянии, если $\Omega(t) < 1$, и разрушается при выполнении (6).

В п. 2.3.2 выводятся основные расчетные соотношения для оценки релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое цилиндрического образца. Здесь тонкий поверхностно-упрочненный слой представляется "наклеенным" на цилиндр и деформирующимся вместе с ним в режиме "жесткого" нагружения при заданных значениях $\varepsilon_r(t)$, $\varepsilon_z(t)$, $\varepsilon_\theta(t)$, определяемых одноосной ползучестью цилиндрического образца.

В качестве иллюстрации предложенного алгоритма в пункте 2.4 приведены результаты расчетов релаксации остаточных напряжений для ци-

линдрического образца при наличии растягивающей нагрузки ($F(t) \neq 0$) и ее отсутствии ($F(t) = 0$).

В качестве примера на рис. 2 и рис. 3 представлена кинетика остаточных напряжений $\sigma_\theta^{\text{res}}$ и σ_z^{res} в поверхностно-упрочненном слое для растягиваемого нагрузкой $\sigma = F/\pi a^2 = 300$ *МПа* цилиндрического образца из сплава ЭИ-698 при T=700°C (a — радиус цилиндра).

В пункте 2.5 приводятся основные выводы по разделу 2.

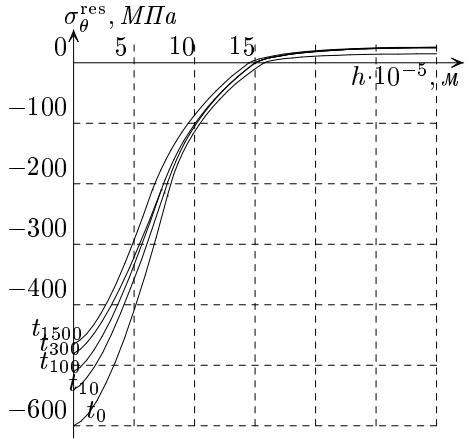

Рис. 2. Эпюры остаточных напряжений $\sigma_\theta^{\text{res}}(r,t)$ в процессе релаксации цилиндрического образца (сплав ЭИ-698 при T=700°C) при $\sigma = F/\pi a^2 = 300$ *МПа*. Метки: t_0 — $t = 0-0$, 0 *ч*, t_{10} — $t = 10$ *ч*, t_{100} — $t = 100$ *ч*, t_{300} — $t = 300$ *ч*, t_{1500} — $t = 1500$ *ч*.

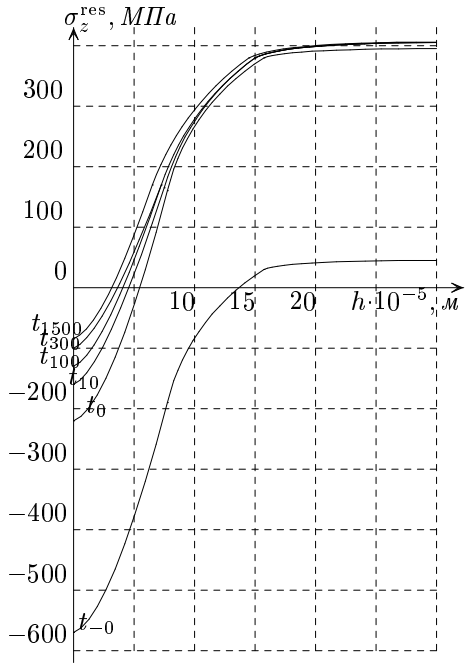

Рис. 3. Эпюры остаточных напряжений $\sigma_z^{\text{res}}(r,t)$ в процессе релаксации цилиндрического образца (сплав ЭИ-698 при T=700°C) при $\sigma = F/\pi a^2 = 300$ *МПа*. Метки:t_{-0} — $t = 0-0$, t_0 — $t = 0$ *ч*, t_{10} — $t = 10$ *ч*, t_{100} — $t = 100$ *ч*, t_{300} — $t = 300$ *ч*, t_{1500} — $t = 1500$ *ч*.

В **разделе 3** разрабатывается метод оценки релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое кругового концентратора для плоской задачи при ползучести. Согласно общей схеме эта задача также разбивается на две самостоятельные задачи: 1) восстановление полей остаточных напряжений и остаточных пластических деформаций в поверхностно-упрочненном слое кругового концентратора бесконечной плиты на основе экспериментальных данных для одной из компонент напряжений; 2) оценка релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое кругового концентратора при ползучести в поле осесимметричных нагрузок.

В п. 3.1 рассматривается бесконечная плита со сквозным круговым отверстием. Как и в случае для цилиндрического образца (раздел 2) в качестве исходной информации считается известной величина $\sigma_\theta^{\text{res}}(r)$. Схема определения остаточных напряжений $\sigma_r^{\text{res}}(r)$, $\sigma_z^{\text{res}}(r)$ и остаточных пластических деформаций в упрочненном слое аналогична задаче для цилиндра. При этом тонкий упрочненный слой также считался "наклеенным" на контур отверстия и деформирующимся вместе с ним в режиме "жесткого" нагружения при тензоре деформаций, получаемом из решения соответствую-

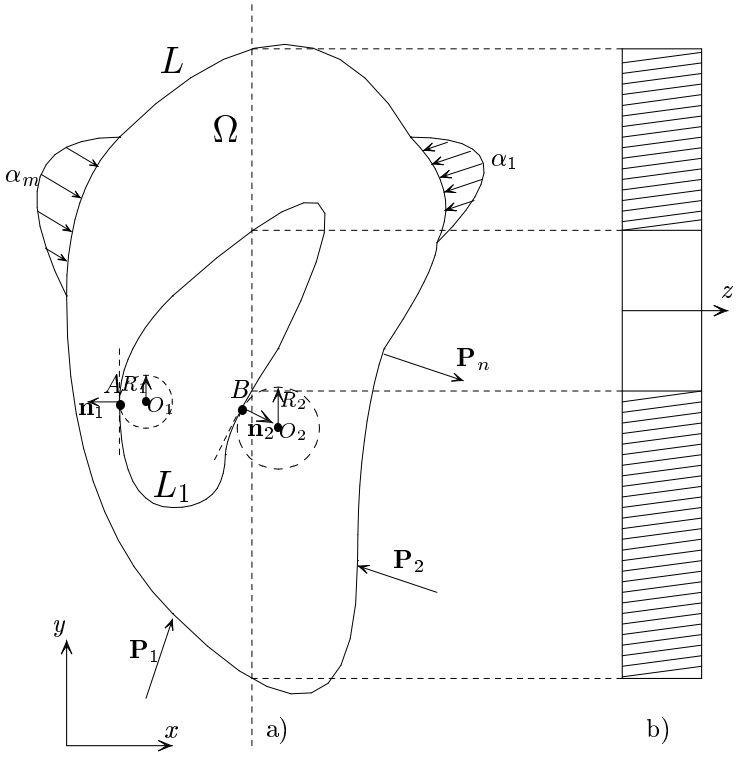

Рис. 4. Схема к математической модели релаксации остаточных напряжений в концентраторе в виде отверстия при плоском напряженном состоянии.

щей краевой задачи о ползучести плиты (п. 3.2).

В п. 3.3 разработанный метод применен к оценке релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое толстостенной трубы под действием внутреннего давления $P(t)$ и растягиваемой продольной силой $F(t)$. Выполнен детальный численный анализ задачи, приведены и проанализированы результаты расчетов в широком диапазоне вариаций геометрических и силовых параметров для различных материалов.

В п. 3.4 приводятся основные выводы по разделу 3.

В **разделе 4** разрабатывается общая методика релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое сквозного цилиндрического концентратора с произвольной границей в изделии в условиях ползучести для случая плоской задачи.

В п. 4.1 рассматривается область Ω, на границе которой L приложены распределенные $\alpha_i(x, y, t)$ $(i = 1, \dots, n)$ и сосредоточенные $P_j(x_j, y_j, t)$ $(j = 1, \dots, n)$ силы $(x, y, x_j, y_j \in L)$. Координата z направлена перпендикулярно плоскости xOy. В этой области имеется концентратор (в виде сквозного отверстия), ограниченный контуром L_1 (см. рис. 4). Полагается, что в любом сечении, перпендикулярном оси z, напряженно-деформированное состояние является одинаковым. При этом допускается, что могут действовать и равномерно распределенные нагрузки, нормальные к плоскости

рис. 4, а.

Предполагается, что поверхность концентратора предварительно подверглась поверхностному пластическому упрочнению. Задача состоит в оценке релаксации наведенных остаточных напряжений в процессе ползучести в любой точке контура L_1 при действии заданных нагрузок.

Здесь рассматриваются два варианта: точка лежит на вогнутом и выпуклом участке L_1 (соответственно точки B и A на рис. 4, а). Имея аналитическое уравнение контура, заданное либо априори, либо полученное одним из интерполяционных многочленов приближенно, строится соприкасающаяся окружность в каждой из точек A и B с радиусами R_1 и R_2, определяемыми по формуле $R = \left[1 + (y')^2\right]^{3/2} / |y''|$, и центрами в точках O_1 и O_2 (см. рис. 4, а). Далее оценка релаксации остаточных напряжений в поверхностном слое точки B по нормали $\mathbf{n}_2$ может быть выполнена как для поверхностно упрочненного цилиндра радиуса R_2 по методике, изложенной в разделе 2. Релаксацию же остаточных напряжений в поверхностном слое точки A в направлении нормали $\mathbf{n}_1$ можно оценить как для цилиндрического отверстия радиуса R_1 в бесконечной плите по методике, изложенной в разделе 3.

Применение предложенного метода в пп. 4.2 и 4.3 иллюстрируется на примерах тонкостенной и толстостенной труб с двухсторонним упрочнением на внутренней и внешней боковых границах.

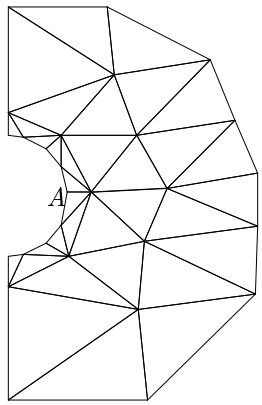

Рис. 5. Конечно-элементное разбиение сектора диска ГТД вблизи концентратора.

В п. 4.4 данный метод иллюстрируется на примерах растягиваемых пластин с концентраторами различного вида (круговое отверстие, полукруговая выточка, глубокая выточка).

В пункте 4.5 приведено решение задачи о релаксации наведенных остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое концентратора типа кругового отверстия для вращающегося диска ГТД в реальных условиях эксплуатации.

Расчет НДС концентраторов осуществлялся на основе МКЭ. Выполнена частичная качественная и количественная проверка адекватности полученного при этом решения в условиях упругого и неупругого реологического деформирования материала известным фактам. Проведен детальный численный анализ рассмотренных задач о релаксации остаточных напряжений в поверхностных слоях рассмотренных элементов конструкций. В качестве примера на рис. 6 представлены эпюры остаточных напряжений $\sigma_\theta^{\mathrm{res}}(r,t)$ в точке A отверстия диска (рис. 5) при скорости вращения $\omega = 5650$ *об/мин.*

В п. 4.6 приводятся основные выводы по разделу 4.

В **разделе 5** метод релаксации остаточных напряжений в поверхност-

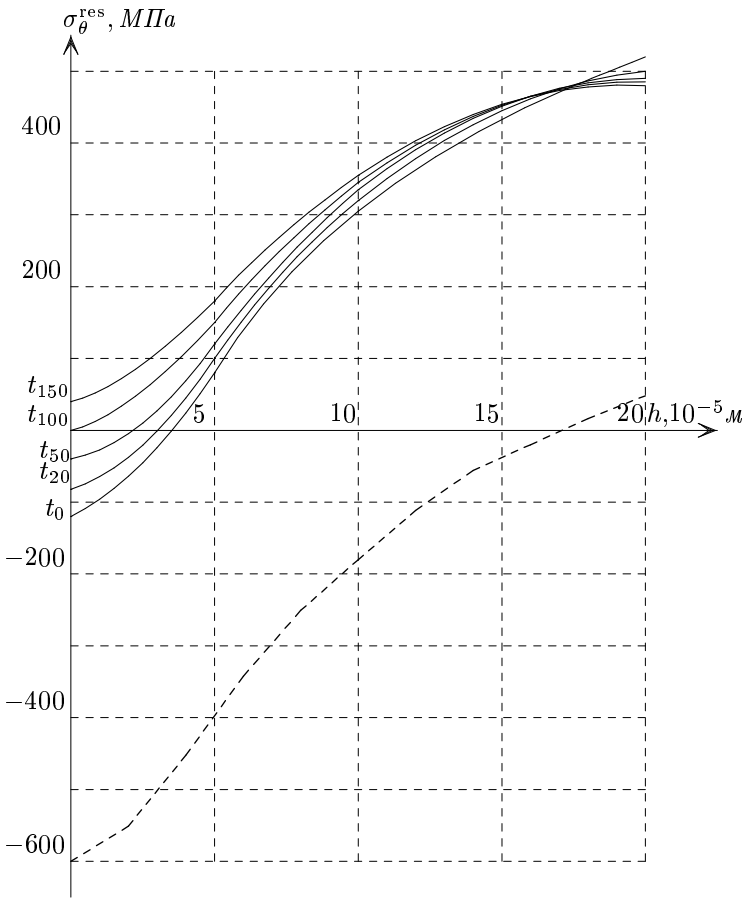

Рис. 6. Эпюры остаточных напряжений $\sigma_\theta^{\text{res}}(r,t)$ в узле А отверстия диска ГТД (материал ЭИ-698 при $T = 700°C$) при ползучести. Метки: t_0 — $t = 0$ *ч*, t_{20} — $t = 20$ *ч*, t_{50} — $t = 50$ *ч*, t_{100} — $t = 100$ *ч*, t_{150} — $t = 150$ *ч*. Штриховая линия — $t = 0 - 0$ *ч*.

но-упрочненном слое для изделий, разработанный в разделе 2, обобщается для случая толстостенной сферической оболочки в условиях ползучести.

Применение предложенного метода проиллюстрировано на примере ползучести толстостенной сферической оболочки (с внутренним упрочнением) при действии внутреннего давления. Решен ряд модельных задач оценки релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое на фоне неупругого деформирования и разрушения толстостенной сферической оболочки.

Основные результаты диссертационной работы

1) Разработан расчетно-феноменологический метод восстановления НДС в поверхностно-упрочненном слое на вогнутой и выпуклой поверхностях элементов конструкций по одной экспериментально определенной компоненте тензора напряжений.

2) Решен ряд новых задач восстановления НДС в поверхностно-упрочненном слое для типовых элементов конструкций (цилиндрический образец; тонко- и толстостенная трубы, толстостенная сфера; толстостенная пли-

та с концентраторами типа глубокой выточки, полукругового и кругового концентратора; концентратор произвольной формы; диск ГТД с круговым концентратором).

3) Решены краевые задачи неупругого реологического деформирования и разрушения для ряда конструктивных элементов (толстостенная сфера под действием внутреннего давления, толстостенная труба под действием внутреннего и внешнего давлений и растягивающей осевой силы, толстостенная плита с концентраторами различного вида при действии растягивающих нагрузок и внутренних давлений по поверхности концентратора, диск ГТД с круговым концентратором).

4) Разработан метод решения краевой задачи для оценки кинетики остаточных напряжений в тонком поверхностно-упрочненном слое на вогнутой и выпуклой поверхностях в условиях ползучести при его деформировании в режиме "жесткого" нагружения (при заданных значениях тензора деформаций).

5) Разработан метод склейки решений краевых задач неупругого реологического деформирования для тонкого поверхностно-упрочненного слоя и самого конструктивного элемента для оценки кинетики НДС в поверхностном слое.

6) Решен ряд задач оценки кинетики НДС в поверхностно-упрочненном слое для ряда типовых конструктивных элементов (цилиндрический образец; тонко- и толстостенная трубы, толстостенная сфера; толстостенная плита с концентраторами типа глубокой выточки, полукругового и кругового концентраторов; концентратор произвольной формы; диск ГТД с круговым концентратором) и выполнен их детальный численный анализ.

7) Даны рекомендации оценки эффективности ППД по критерию величины остаточных напряжений в поверхностном упрочненном слое в условиях ползучести.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Саушкин М.Н.* Конечноэлементный вычислительный комплекс для решения краевых задач растягиваемых пластин с концентраторами// Нелинейное моделирование и управление. Тезисы докладов международного семинара. Самара, 1998. С. 131–132.
2. *Саушкин М.Н.* Исследование полей остаточных напряжений и пластических деформаций при поверхностном упрочнении толстостенной сферы// Математическое моделирование и краевые задачи. Тр. девятой межвузовской конференции. Ч. 1. Самара: СамГТУ, 1999. С. 167–173.
3. *Саушкин М.Н.* Исследование процесса релаксации напряжений в поверхностно упрочненном слое толстостенной сферы в условиях ползучести// Надежность и качество в промышленности, энергетике и на

транспорте. Тр. международной конференции. Ч. 1. Самара, 1999. С. 39–41.

4. *Радченко В.П., Саушкин М.Н.* Математическая модель реологического деформирования и разрушения толстостенной сферической оболочки// Вест. СамГУ. Самара: СамГУ, 2000, № 2(18). С. 90–101.
5. *Радченко В.П., Саушкин М.Н., Кубышкина С.Н.* Обобщенная модель неупругого деформирования и разрушения толстостенной сферической оболочки при ползучести// Вест. СамГТУ. Вып. 9. Серия: Физ.-мат. науки. Самара: СамГТУ, 2000. С. 46–54.
6. *Саушкин М.Н.* Численное решение краевой задачи о релаксации напряжений в поверхностно упрочненном слое толстостенной сферы в условиях неупругого деформирования// Актуальные проблемы современной науки. Тез. первой международной конференции молодых ученых. Ч. 1. Самара, 2000. С. 33.
7. *Саушкин М.Н.* Решение краевых задач для оценки напряженно-деформированного состояния элементов конструкций с поверхностно-упрочненным слоем в условиях ползучести// Разрушение и мониторинг свойств металлов. Тез. международной конференции. Екатеринбург, 2001. С. 71–72.
8. *Радченко В.П., Саушкин М.Н.* Расчет напряженно-деформированного состояния в поверхностно-упрочненном слое сферической оболочки при ползучести// Математическое моделирование и краевые задачи. Тр. одиннадцатой межвузовской конференции. Ч. 1. Самара: СамГТУ, 2001. С. 140–151.
9. *Радченко В.П., Саушкин М.Н.* Математическое моделирование кинетики остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое конструкций// Математическое моделирование/ Под редакцией А.А.Самарского. Тр. международной конференции. Самара. 2001, С. 40–41.
10. *Радченко В.П., Саушкин М.Н.* Расчет релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое цилиндрического изделия в условиях ползучести// Вест. СамГТУ. Вып. 12. Серия: Физ.-мат. науки. Самара: СамГТУ, 2001. С. 61–72.
11. *Радченко В.П., Саушкин М.Н.* Математические модели релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненном слое разрушающихся элементов конструкций в условиях ползучести// Обозрение прикладной и промышленной математики. Материалы Второго Всероссийского симпозиума по прикладной и промышленной математике. Москва: ТВП, 2001, Т. 8, Вып. 1. С. 298–299.
12. *Саушкин М.Н.* Математические модели релаксации напряжений в поверхностно упрочненном слое разрушающихся элементов при ползучести// Восьмой Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Аннотации докладов. Пермь, 2001. С. 518.

13. *Саушкин М.Н.* Исследование процесса релаксации остаточных напряжений в поверхностно-упрочненных слоях толстостенной и тонкостенной труб// Актуальные проблемы современной науки. Тез. второй международной конференции молодых ученых. Ч. 1. Самара, 2001. С. 166

Подписано в печать 15 октября 2001 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Печать оперативная.
Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 704.
443011 г. Самара, ул. Ак. Павлова, 1.
УОП СамГУ ПЛД № 69–43 от 19.02.98.