

Авторефер  
И201

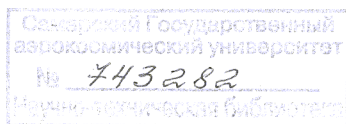
На правах рукописи

Иванов Денис Всеволодович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ  
УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ  
НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НОРМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ  
И В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ**

Специальность 01.02.06 –Динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук



Авто рефер  
И 201

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королёва» на кафедре сопротивления материалов

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Павлов Валентин Фёдорович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Пономарёв Юрий Константинович

доктор физико-математических наук, профессор Радченко Владимир Павлович

Ведущая организация: ОАО «Самарское конструкторское бюро машиностроения»

2009 года в 12-00 часов на заседании при ГОУ ВПО «Самарский аэрокосмический университет имени академика С.П.Королёва» в аудитории 34, ауд.209.

храниться в библиотеке ГОУ ВПО «Самарский аэрокосмический университет имени академика С.П.Королёва» по адресу: Самарское шоссе, 34а, ауд. 132.

2009 г.

443 282

Д.Л.Скуратов

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### Актуальность темы.

Снижение материальных и трудовых затрат при создании и изготовлении более совершенных машин с одновременным повышением их срока службы, надёжности, снижением массы является основной задачей современного машиностроения, транспорта, авиа- и ракетостроения.

Усложнение функциональных возможностей, повышение требований к надёжности, долговечности и материалоемкости конструкций приводит к появлению всё большего числа деталей сложной формы с резкими концентраторами напряжений. Так как конструктивные методы повышения прочности при переменных нагрузках приводят к увеличению массы конструкций и числа комплектующих, усложнению технологии изготовления, ухудшают унификацию и стандартизацию, основным резервом повышения сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений является применение современных видов и средств поверхностного упрочнения деталей машин.

Методы поверхностного упрочнения основаны на использовании благоприятного эффекта сжимающих остаточных напряжений, влияние которых особенно возрастает в условиях концентрации напряжений. При нормальной температуре остаточные напряжения в поверхностном слое отличаются стабильностью. При работе деталей в области высоких температур их положительное влияние уменьшается вследствие релаксации. В связи с этим тема диссертации, посвящённая прогнозированию предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений при нормальной температуре и в условиях ползучести, является актуальной.

**Цель работы.** Обеспечение надёжности и безопасности машин за счёт повышения точности прогнозирования предела выносливости упрочнённых цилиндрических деталей в случае изгиба при нормальной температуре и в условиях ползучести на основе исследования остаточных напряжений в образцах и деталях с концентраторами напряжений.

#### Задачи исследования.

1. Разработка расчётно-экспериментального метода восстановления компонент тензоров остаточных напряжений и деформаций в поверхностном слое цилиндрических деталей по одной из экспериментально измеренных компонент напряжений, необходимых для прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей.

2. Разработка метода расчёта кинетики остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрических деталей в условиях ползучести.

3. Проведение теоретического и экспериментального исследований перераспределения остаточных напряжений в цилиндрических деталях, изготовленных с использованием различных методов обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) и опережающим поверхностным пластическим деформированием (ОППД).

4. Расчётно-экспериментальное определение остаточных напряжений в деталях с концентраторами после ППД и ОППД с последующей термоэкспозицией.

5. Оценка влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости и прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений.

**Объект исследования.** Цилиндрические сплошные и полые образцы с концентраторами, характерными для деталей машин, после различного вида упрочняющих обработок при нормальной температуре и после термоэкспозиции.

**Предмет исследования.** Расчётно-экспериментальные методы количественной оценки приращения предела выносливости деталей с концентраторами после поверхностного пластического деформирования при нормальной и повышенной температурах.

**Методы исследования.** Работа выполнена на основе классических методов теории упругости, теории пластичности и ползучести, механики деформируемого твёрдого тела. При изучении влияния высокотемпературных выдержек на процесс релаксации остаточных напряжений использовался феноменологический подход к моделированию напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое детали, основанный на положениях теории ползучести. Анализ и обработка результатов экспериментов выполнялись классическими статистическими методами с использованием компьютерной техники.

#### Научная новизна.

1. Предложен феноменологический подход к моделированию напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое цилиндрических деталей.

2. Предложен метод расчёта кинетики остаточных напряжений в условиях ползучести.

3. На основании решения задачи о перераспределении остаточных напряжений на дне надреза полукруглого профиля определены остаточные напряжения после различных методов поверхностного пластического деформирования.

4. Проведена оценка влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости при изгибе упрочнённых деталей с концентраторами напряжений как при нормальной, так и при повышенной температурах, на основании которой разработана методика прогнозирования предела выносливости упрочнённых поверхностным пластическим деформированием деталей.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается корректностью постановки задач исследования, использованием научно обоснованных расчётных схем, применением апробированных аналитических и численных методов анализа и расчёта, проведением расчётов на современной вычислительной технике, корректным заданием исходных данных, а также

сопоставлением теоретических расчётов с экспериментальными результатами других исследователей, опубликованными в научных изданиях, и полученными лично автором.

**Практическая значимость** проведённых в диссертационной работе исследований заключается в следующем:

1. Разработанный феноменологический подход к моделированию напряжённо-деформированного состояния позволяет осуществлять восстановление компонент тензоров остаточных напряжений по одной из экспериментально замеренных компонент напряжений.

2. Разработанный метод расчёта кинетики остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрических деталей в условиях ползучести позволяет следить за процессом релаксации остаточных напряжений в упрочнённом слое.

3. На основе расчётного и экспериментального определения остаточных напряжений и проведения испытаний на усталость осуществлена количественная оценка влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости деталей с концентраторами напряжений в случае изгиба при нормальной температуре и после термоэкспозиции.

**Основные результаты** получены при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию (проект РНП 2.1.1/3397 «Разработка методов решения краевых задач, расчётно-информационная база данных и программный комплекс для оценки релаксации остаточных напряжений при ползучести и сопротивления усталости упрочнённых элементов конструкций с концентраторами напряжений»).

**Реализация результатов работы.** Разработанная на основании проведённых исследований методика прогнозирования предела выносливости деталей с концентраторами напряжений при нормальной температуре и в условиях ползучести с учётом релаксации остаточных напряжений внедрена в ФГУП «ЦНИИ имени академика А.Н.Крылова», г. Санкт-Петербург, а также в ЗАО «Акватик», г. Москва и используется для расчёта предела выносливости буровых райзеров из алюминиевых сплавов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на научно-технических конференциях: Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2007, 2008, 2009 г.), «Проблемы динамики и прочности в газотурбостроении» (Киев, 2007 г.), седьмой международной конференции «Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов» (Ульяновск, 2009 г.), XVII международной конференции «Физика прочности и пластичности материалов» (Самара, 2009 г.), международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2009 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 2 статьи – в изданиях, определённых ВАК России.



**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх разделов, основных результатов и выводов, списка используемой литературы из 218 наименований и приложения. Содержит 124 страницы текста, включая 31 рисунок, 8 таблиц.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель диссертационной работы, представлена научная новизна и даётся краткое описание содержания разделов диссертации.

**Первый раздел** посвящён обзору литературы по теме диссертации. Анализ работ Биргера И.А., Иванова С.И., Кудрявцева И.В., Когаева В.П., Кравченко Б.А., Павлова В.Ф., Папшева Д.Д., Подзея А.В., Радченко В.П., Сулимы А.М., Серенсена С.В., Степнова М.Н., Туровского М.Л., Алмена И., Булера Г., Дои О., Закаса Г. и других отечественных и зарубежных авторов, посвящённых исследованию остаточных напряжений в деталях с концентраторами, их влиянию на сопротивление усталости и прогнозированию предела выносливости упрочнённых деталей, показал, что теоретические разработки по проблеме остаточных напряжений в концентраторах пока ещё далеки от завершения. В целях прогнозирования предела выносливости деталей при повышенной температуре необходимо следить за процессом релаксации остаточных напряжений в условиях ползучести. Для решения задач ползучести необходимо знать трёхмерное распределение остаточных напряжений в поверхностном слое упрочнённой детали, а известные методы позволяют определить лишь одну или две составляющие (компоненты) полного напряжённого состояния. Кроме этого, отсутствуют методы прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами при повышенной температуре.

На основании выводов, сделанных по результатам проведённого анализа, сформулированы задачи исследования.

**Во втором разделе** изучались влияние условий эксплуатации при повышенной температуре и реологические свойства материала на состояние упрочнённого слоя под действием нагрузок при ползучести цилиндрической детали. Задаче оценки кинетики напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое в условиях ползучести материала должна предшествовать задача феноменологического восстановления полей остаточных напряжений и деформаций в поверхностном слое после ППД. Поэтому рассматривались следующие задачи: 1) восстановление полей остаточных напряжений и деформаций по схеме сложного напряжённого состояния после применения поверхностного упрочнения для цилиндрической детали; 2) математическое моделирование процесса релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрической детали на фоне ползучести самой детали.

При решении первой задачи определяются поля остаточных напряжений и пластических деформаций в детали после упрочнения. В стандартной цилиндрической системе координат через  $q_\theta$ ,  $q_z$ ,  $q_r$  обозначены окружная, осевая и радиальная компоненты тензора остаточных пластических деформаций,

возникающие в цилиндре после поверхностного пластического деформирования, а через  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$  - соответствующие компоненты остаточных напряжений. Предполагается, что касательные компоненты у тензоров остаточных напряжений и деформаций малы и ими можно пренебречь, а для нормальных компонент вводится гипотеза, согласно которой

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

т.е. пластические деформации в слое бесконечно малого участка поверхности цилиндрического образца наводятся так же, как в слое полупространства. С учётом условия пластической несжимаемости материала  $q_\theta + q_z + q_r = 0$  из (1) имеем

$$q_\theta(r) = q_z(r) = -\frac{q_r}{2}. \quad (2)$$

Для решения задачи используется уравнение равновесия

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r = \sigma_\theta, \quad (3)$$

из которого следует

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \int_0^r \sigma_\theta(\xi) d\xi; \quad (4)$$

условие нулевого суммарного усилия, действующего на образец

$$\int_0^R r \sigma_z(r) dr = 0, \quad (5)$$

где  $R$  - радиус цилиндра, и уравнение совместности деформаций

$$r \frac{d\varepsilon_\theta}{dr} + \varepsilon_\theta = \varepsilon_r, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_i = e_i + q_i$  - полная деформация,  $e_i$  - упругая деформация ( $i = r, \theta, z$ ).

Все параметры напряжённо-деформированного состояния (НДС) после упрочнения выражены через  $\sigma_\theta(r)$  по следующей схеме:

$$\sigma_\theta(r) \rightarrow \sigma_r(r) \rightarrow q_\theta(r) \rightarrow q_z(r), \sigma_r(r) \rightarrow \varepsilon_z^* \rightarrow \sigma_z(r), \quad (7)$$

где  $\sigma_r(r)$  определяется из (4);

$$q_\theta(r) = \frac{1}{r} \int_0^r z^{\frac{2-\mu}{1+\mu}} g(z) dz, \quad (8)$$

$$g(r) = \frac{\sigma_r(r) - \sigma_\theta(r)}{E} - \frac{r}{E} \left[ (1-\mu) \frac{d\sigma_\theta(r)}{dr} - \mu \frac{d\sigma_r(r)}{dr} \right], \quad (9)$$

$E$ ,  $\mu$  - модуль продольной упругости и коэффициент Пуассона;  $q_z$  и  $q_r$  - определяются из формулы (2);

$$\varepsilon_z^* = \frac{2}{R^2} \int_0^R r \left( q_z(r) - \frac{\mu}{E} [\sigma_r(r) + \sigma_\theta(r)] \right) dr, \quad (10)$$

$$\sigma_z(r) = E(\varepsilon_z^* - q_z(r)) + \mu(\sigma_r + \sigma_\theta(r)). \quad (11)$$

Для реализации изложенного метода разработано программное обеспечение, позволяющее решать задачу восстановления НДС в автоматическом режиме. На рис. 1 представлены результаты соответствующих расчётов для цилиндрических образцов из стали ЭИ961 по толщине поверхностного слоя  $a$ , из которых видно, что теоретически полученные данные хорошо согласуются с экспериментом.

Для решения второй задачи применялся известный метод расчёта процесса релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрической детали при продольном растягивающем усилии  $F(t)$ . При этом сжимающие осевые напряжения в поверхностном слое несколько уменьшаются по модулю. При не слишком больших значениях  $F(t)$  осевые сжимающие напряжения вблизи от поверхности остаются значительными и релаксируют во времени на фоне ползучести детали, которая в целом удлиняется.

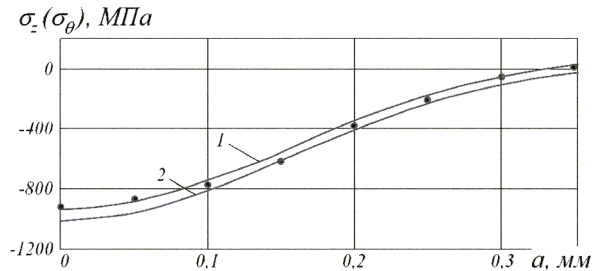


Рисунок 1 - Компоненты остаточных напряжений в цилиндрическом образце радиуса 3,75 мм из стали ЭИ 961 после алмазного выглаживания:

точки – экспериментальные значения  $\sigma_z$ ; 1 – расчётные значения  $\sigma_z$ ;

2 – расчётные значения  $\sigma_\theta$

В силу того, что толщина поверхностного слоя мала по сравнению с радиусом цилиндрической детали, он (упрочнённый слой) не оказывает существенного влияния на жёсткость и деформируемость самой детали. Поэтому тонкий упрочнённый поверхностный слой можно представить себе «наклеенным» на деталь и деформирующимся с ней в режиме «жёсткого» нагружения под действием силы  $F(t)$ .

Тогда для вычисления осевых компонент деформации имеем

$$\begin{aligned} \varepsilon_z(t) &= e_z(t) + p_z(t), \\ p_z(t) &= u_z(t) + v_z(t) + w_z(t), \end{aligned} \quad (12)$$

где  $e_z(t) = \frac{F(t)}{E\pi R^2}$  – упругая деформация,  $p_z(t)$  – деформация ползучести,  $u_z(t)$ ,

$v_z(t)$ ,  $w_z(t)$  – вязко-упругая, вязко-пластическая и вязкая компоненты  $p_z(t)$ .

Поперечные деформации цилиндрического образца  $\varepsilon_r(t)$ ,  $\varepsilon_\theta(t)$ , возникающие за счёт Пуассоновского сужения материала, рассчитываются на основании формул

$$\varepsilon_i(t) = -\mu \frac{\sigma^0(t)}{E} - \mu' u_z(t) - \mu'' v_z(t) - \frac{1}{2} w_z(t), \quad i = r, \theta, \quad (13)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона в упругой области,  $\mu'$  и  $\mu''$  – коэффициенты Пуассона для обратимой  $u_z(t)$  и необратимой  $v_z(t)$  компонент деформации ползучести (соответственно).

Кинетику напряжённо-деформированного состояния в поверхностном слое можно вычислять независимо, считая что он (упрочнённый слой) деформируется в режиме «жёсткого» нагружения при заданных значениях  $\varepsilon_r(t)$ ,  $\varepsilon_z(t)$ ,  $\varepsilon_\theta(t)$ , определяемых по соотношениям (12), (13).

На основании изложенного осевую компоненту полной деформации в поверхностно упрочнённом слое можно представить в виде

$$\varepsilon_z(t) + \varepsilon_z^0 = q_z(r) + e_z(r, t) + p_z(r, t). \quad (14)$$

Здесь  $\varepsilon_z(t)$  – полная осевая деформация цилиндрического образца, рассчитываемая с помощью соотношений (12), (13);  $\varepsilon_z^0$  – величина полных остаточных осевых деформаций после ППД;  $q_z(r)$  – компонента остаточных пластических деформаций;  $e_z(r, t)$  – компонента упругих деформаций;  $p_z(r, t)$  – компонента деформации ползучести. При этом величины  $e_z(r, t)$ ,  $p_z(r, t)$  рассчитываются через напряжения  $\sigma_z(r, t)$ ,  $\sigma_\theta(r, t)$ ,  $\sigma_r(r, t)$  в поверхностном слое.

В аналогичном виде можно представить радиальную и окружную компоненты деформаций в поверхностном слое.

Введя функции

$$g_i(r, t) = \varepsilon_i(t) + \varepsilon_i^0 - q_i(r) - p_i(r, t),$$

получим конечные соотношения, позволяющие следить за процессом релаксации остаточных напряжений в упрочнённом слое при неупругом растяжении цилиндрической детали

$$\sigma_i(r, t) = \frac{E}{1 + \mu} g_i(r, t) + \frac{E\mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} (g_r(r, t) + g_z(r, t) + g_\theta(r, t)), \quad i = r, z, \theta. \quad (15)$$

Численная реализация предложенного метода и проверка адекватности расчётных значений экспериментальным данным проводилась для цилиндрического образца радиуса  $R = 3,75$  мм и образца с надрезом радиуса  $\rho_0 = 0,3$  мм из стали

ЭИ 961 после алмазного выглаживания и последующей термоэкспозиции при температуре  $T=400^\circ\text{C}$  без нагрузки (величина  $F(t) = 0$ ) в течение 100 часов.

Экспериментальные значения для компоненты  $\sigma_z(r)$  в образцах после упрочнения и после термоэкспозиции (вследствие ползучести) представлены на рис. 2 сплошными линиями.

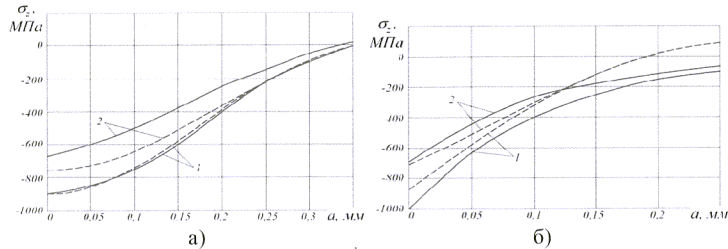


Рисунок 2 - Экспериментальные (сплошные линии) и расчётные (штриховые) эпюры остаточных напряжений в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом

$\rho_0 = 0,3$  мм (б) из стали ЭИ 961 после алмазного выглаживания:

1 – до термоэкспозиции ( $t=0$ ); 2 – после термоэкспозиции при  $T=400^\circ\text{C}$  в течение  $t=100$  ч

Для расчёта процесса релаксации остаточных напряжений во время термоэкспозиции использовался частный случай реологической модели ползучести, предложенной Ю.П. Самаринным и В.П. Радченко:

$$p_{ij}(t) = v_{ij}(t) + w_{ij}(t); \quad (16)$$

$$\dot{w}_{ij} = \frac{3}{2} c S^{m-1} \left( \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_1 \delta_{ij} \right);$$

$$v_{\omega\omega}(t) = \sum_{k=1}^N v_{\omega\omega}^k(t);$$

$$v_{\omega\omega}^k(t) = (1 + \mu') \beta_{\omega\omega}^k(t) - \mu' (\beta_{11}^k(t) + \beta_{22}^k(t) + \beta_{33}^k(t));$$

$$\dot{\beta}_{\omega\omega}^k = \begin{cases} \lambda_k \left[ b_k S^{n-1} \sigma_{\omega\omega} - \beta_{\omega\omega}^k \right] \cdot \dot{\sigma}_{\omega\omega} > 0; \\ \dot{\sigma}_{\omega\omega} < 0, \end{cases}$$

где  $W_{ij}$ ,  $V_{ij}$  – вязкая и вязкопластическая составляющие деформации ползучести

$p_{ij}$ ;  $\lambda_k$ ,  $c$ ,  $b_k$ ,  $n$ ,  $N$  – константы модели, с помощью которых описываются

первая и вторая стадии ползучести;  $\mu'$  – коэффициент Пуассона для

вязкопластической компоненты;  $\sigma_I = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$ ;  $S$  – интенсивность

напряжений, причём расчёт для компоненты  $V_{ij}$  ведётся в главных осях. При

одноосном напряжённом состоянии эта модель имеет вид

$$p(t) = \sum_{k=1}^N b_k (1 - e^{-\lambda_k t}) \sigma^m + c \sigma^n t. \quad (17)$$

На рис.3 в качестве примера приведены расчётные значения кинетики напряжений  $\sigma_\theta(R, t)$ ,  $\sigma_z(R, t)$  на поверхности гладкого образца из стали ЭИ961 во времени.

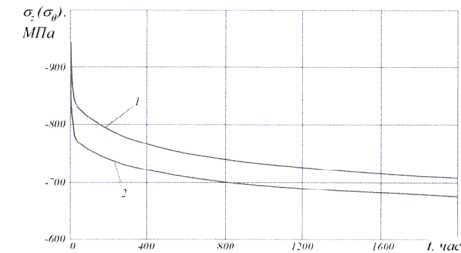


Рисунок 3 - Кривые релаксации остаточных напряжений на поверхности упрочнённого гладкого образца при термоэкспозиции  $T=400^\circ\text{C}$ :

1 –  $\sigma_\theta(R, t)$ , 2 –  $\sigma_z(R, t)$

Из данных рис. 3 видно, что релаксация остаточных напряжений за 1000 часов привела к их уменьшению на 30 процентов и далее процесс стабилизируется, т.е. и при повышенных температурах сохраняется значительный запас остаточных напряжений.

**Третий раздел** посвящён экспериментальным методам определения остаточных напряжений в деталях с концентраторами. Исследования проводились на сплошных цилиндрических образцах диаметром 7,5 мм с надрезом полукруглого профиля  $\rho_0 = 0,3$  мм из стали ЭИ961 и цилиндрических образцах диаметром 15 мм с отверстием диаметром 5 мм, с надрезами полукруглого профиля радиусов  $\rho_0 = 0,3$  и 0,5 мм, изготовленных из алюминиевых сплавов В95 и Д16Т. Стальные образцы подвергались алмазному



выглаживанию и термоэкспозиции в течение 100 часов при температуре 400°С, а образцы из сплавов В95 и Д16Т – пневмодробеструйной обработке (ПДО) и термоэкспозиции в течение 100 часов при температуре 125°С. Остаточные напряжения гладких образцов определялись методом колец и полосок.

Дополнительные остаточные напряжения в образцах с надрезами полукруглого профиля, возникающие за счёт перераспределения остаточных усилий в области, прилегающей к дну надреза, после его нанесения на упрочнённый гладкий образец, определялись методом конечных элементов. Остаточные напряжения в образцах с надрезом вычислялись как сумма дополнительных напряжений и напряжений гладких образцов. Эти остаточные напряжения использовались в дальнейшем для прогнозирования предела выносливости.

На рис. 2 и 4 представлены эпюры остаточных напряжений гладких и надрезанных образцов из стали ЭИ961 (рис. 2) после алмазного выглаживания и после алмазного выглаживания с последующей

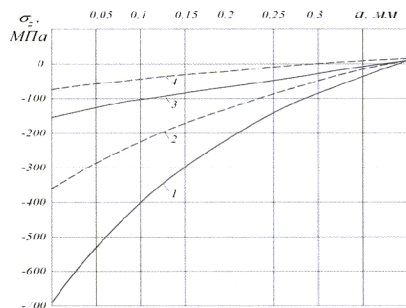


Рисунок 4 - Эпюры остаточных напряжений в образцах с надрезом из сплава В95 после ПДО (1,3), ПДО и термоэкспозиции при  $T=125^{\circ}\text{C}$  в течение  $t=100$  ч. (2,4):

1,2 –  $\rho_0 = 0,3$  мм; 3,4 – 0,5 мм

термоэкспозицией, а также из сплава В95 (рис. 4) после ПДО и после ПДО с термоэкспозицией.

**Четвёртый раздел** посвящён прогнозированию предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений при нормальной и повышенной температурах.

Испытания на усталость при нормальной температуре проводили на машинах МУИ-6000, а при повышенной температуре – на машине МВП 10000. Предел выносливости определялся как по методике, предусмотренной ГОСТ 25.502, так и по методу ступенчатого изменения нагрузки. База испытаний составляла для стали  $3 \cdot 10^6$  циклов, для сплавов –  $10 \cdot 10^6$  циклов нагружения. При повышенных температурах базу испытаний увеличивали до  $20 \cdot 10^6$  циклов.

Выстоявшие базу испытаний образцы на пределе выносливости доводились до разрушения на тех же машинах при напряжениях, больших предела выносливости. Во всех упрочнённых образцах с концентраторами напряжений наблюдались нераспространяющиеся трещины усталости. Поэтому прогнозирование предела выносливости проводили с помощью критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ . Приращение предела выносливости образцов с остаточными напряжениями при использовании критерия  $\bar{\sigma}_{ост}$  определялось по формуле

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} \left| \bar{\sigma}_{ост} \right|, \quad (16)$$

где  $\bar{\psi}_{\sigma}$  – коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости;

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (17)$$

$\sigma(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении образца;  $\xi = y/t_{кр} = \cos \vartheta$  – расстояние от дна надреза до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$ ;  $t_{кр}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости.

В табл. 1 и 2 представлены результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений образцов из стали ЭИ961 и сплавов В95 и Д16Т с надрезами полукруглого профиля, где содержится также глубина нераспространяющейся трещины усталости  $t_{кр}$ , критерий среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ , коэффициент влияния остаточных напряжений  $\bar{\psi}_{\sigma}$ .

**Таблица 1 – Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений образцов из стали ЭИ961**

Температура Град. С	Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы			
		$\sigma_{-1}$ , МПа	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
20	230	380	0,160	-422	0,356
400	190	270	0,160	-242	0,331

Из данных таблиц видно, что коэффициент  $\bar{\psi}_{\sigma}$  практически не зависит от материала образца и составляет в среднем 0,36. Следовательно, остаточные напряжения могут быть использованы для прогнозирования приращения предела

**Таблица 2 – Результаты испытаний на усталость и определения остаточных напряжений после ПДО и термоэкспозиции**

Материал	Радиус надреза $\rho_0$ , мм	Неупрочнённые образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы			
			$\sigma_{-1}$ , МПа	$t_{кр}$ , Мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_{\sigma}$
В95	0,3	105	155	0,310	-141	0,355
	0,5	107,5	115	0,320	-21,3	0,352
Д16Т	0,3	82,5	175	0,320	-250	0,370
	0,5	82,5	150	0,310	-171	0,395

выносливости в случае работы детали при повышенной температуре, но при этом в расчёт следует принимать остаточные напряжения детали в конце ресурса, то есть с учётом релаксации.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Выполнен научно-обоснованный комплекс теоретико-экспериментальных исследований по обеспечению надёжности и безопасности машин за счёт повышения точности прогнозирования предела выносливости упрочнённых цилиндрических деталей с концентраторами напряжений при нормальной температуре и в условиях ползучести. При этом получены следующие результаты:

1. Предложен расчётно-феноменологический метод моделирования напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое цилиндрической детали, что позволяет прогнозировать напряжённо-деформированное состояние в слое по одной экспериментально измеренной компоненте остаточных напряжений.

2. На основе использования разработанного метода осуществлено математическое моделирование процесса релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрической детали при ползучести, позволяющее отслеживать кинетику остаточных напряжений во времени и, в конечном счёте, вычислять величину остаточных напряжений в конце ресурса детали.

3. Методом конечных элементов вычислены остаточные напряжения в упрочнённых образцах с надрезом как сумма дополнительных напряжений и напряжений гладких упрочнённых образцов из стали ЭИ961 и сплавов В95, Д16Т, что позволяет осуществлять оценку влияния упрочнения на сопротивление усталости при нанесении надрезов полукруглого профиля на упрочнённую гладкую деталь.

4. Экспериментально установлено, что при изгибе образцов из стали ЭИ961 и сплавов В95, Д16Т с надрезами полукруглого профиля после алмазного выглаживания и пневмодробеструйной обработки коэффициент влияния остаточных напряжений, учитывающий увеличение предела выносливости, составляет в среднем 0,36.

5. Показано, что для прогнозирования приращения предела выносливости упрочнённых цилиндрических деталей с концентраторами напряжений из

вышеуказанных материалов следует использовать остаточные напряжения в конце ресурса, приняв найденное значение коэффициента влияния остаточных напряжений, равное 0,36, что существенно сокращает количество натурных испытаний на усталость и позволяет заменить испытания на усталость при повышенной температуре испытаниями при температуре нормальной.

**Основное содержание диссертации опубликовано: в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования науки Российской Федерации:**

1. Павлов, В.Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости при растяжении-сжатии в условиях концентрации напряжений / В.Ф.Павлов, В.А.Кирпичёв, Н.И.Яковенко, Д.В.Иванов // Известия вузов. Авиационная техника. – 2007. – №4. – С. 66-67.

2. Саушкин, М.Н. Расчётно-экспериментальное исследование устойчивости остаточных напряжений в упрочнённом слое цилиндрического изделия к температурным нагрузкам /М.Н. Саушкин, В.А.Кирпичёв, О.С.Афанасьева, Д.В.Иванов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.Физ.-мат. науки. – 2009. – № 1 (18). – С. 101-113.

**в других изданиях:**

3. Иванов, Д.В. Прогнозирование предела выносливости образцов с надрезом из сплава Д16Т по остаточным напряжениям / Д.В.Иванов // Математическое моделирование и крайевые задачи: Труды шестой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. – Самара, 2009. – С. 110-112.

4. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование сопротивления усталости упрочнённых поверхностным пластическим деформированием деталей при повышенных температурах / В.А.Кирпичёв, М.Н. Саушкин, Д.В.Иванов // Физика прочности и пластичности материалов: Труды XVII Международной конференции. – Самара, 2009. – С. 232.

5. Кирпичёв, В.А. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости деталей при различной степени концентрации / В.А.Кирпичёв, А.П.Филатов, О.В.Каранаева, Д.В.Иванов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Материалы докладов международной научно-технической конференции. Часть 2. Самара, (24-26 июня 2009), 2009. – С. 178-179.

6. Саушкин, М.Н. Математическая модель релаксации остаточных напряжений в цилиндрических образцах с концентраторами напряжений / М.Н.Саушкин, О.С.Афанасьева, Е.А.Просвиркина, Д.В.Иванов // Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов. Труды седьмой международной конференции. Ульяновск, 2009. - С.244-245.

7. Иванов, Д.В. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых образцов из сплава Д16Т /Д.В.Иванов, Н.А.Сургутанов // Будущее машиностроения России: Сборник трудов второй Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов. – Москва, 2009. – С. 45-46.

8. Кирпичёв, В.А. Влияние асимметрии цикла на предельную амплитуду упрочнённых деталей / В.А.Кирпичёв, Д.В.Иванов, Н.А.Сургутанов // Актуальные проблемы современной науки. Естественные науки: Труды 4-го



Международного форума (9-й Международной конференции). Части 1-3. Математика. Математическое моделирование. Механика. – Самара, 2008. – С. 218-222.

9. Кирпичёв, В.А. Релаксация остаточных напряжений в образцах с надрезами из сплавов ЭИ698ВД и ЖС6У / В.А.Кирпичёв, Д.В.Иванов, В.П.Сазанов, Н.И.Яковенко // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. – Самара, 2008. – С. 139-143.

10. Павлов, В.Ф. Особенности распределения остаточных напряжений в цилиндрических деталях с отверстием после дробеструйной обработки / В.Ф. Павлов, В.А.Кирпичёв, О.Ю.Семёнова, Д.В.Иванов // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. – Самара, 2008. – С. 229-232.

11. Вакулюк, В.С. Особенности распределения остаточных напряжений после упрочнения плоской детали с глубокими надрезами / В.С.Вакулюк, Д.В.Иванов, В.П.Сазанов, А.А.Филиппов // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. – Самара, 2008. – С. 80-83.

12. Кирпичёв, В.А. Влияние степени концентрации напряжений на зависимость предела выносливости детали от остаточных напряжений / В.А.Кирпичёв, В.Ф.Павлов, Ю.Н.Сургутанова, Д.В.Иванов // Надёжность и долговечность машин и сооружений: Международный научно-технический сборник. Вып. 31. – Киев, 2008. – С. 97-103.

13. Кирпичёв, В.А. Влияние степени концентрации напряжений на зависимость предела выносливости детали от остаточных напряжений / В.А.Кирпичёв, В.Ф.Павлов, А.П.Филатов, Ю.Н.Сургутанова, Д.В.Иванов // Проблемы динамики и прочности в газотурбостроении: Тезисы докладов третьей международной научно-технической конференции. – Киев. Украина, 2007. – С. 81-82.

14. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений при повышенных температурах / В.А. Кирпичёв, В.П.Сазанов, В.С.Вакулюк, Д.В.Иванов // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды четвёртой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. – Самара, 2007. – С. 122-123.

15. Сургутанова, Ю.Н. Остаточные напряжения в физически неоднородном поверхностном слое после опережающего поверхностного пластического деформирования / Ю.Н. Сургутанова, О.В. Каранаева, Н.И. Яковенко, Д.В.Иванов // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды четвёртой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. – Самара, 2007. – С. 255-257.

Подписано в печать 13 ноября 2009 г.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. п. л. 2,25. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета. Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета  
443086, Московское шоссе, 34, СГАУ.