

На правах рукописи

Кирпичёв Виктор Алексеевич

**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ УПРОЧНЁННЫХ
ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ**

Специальность 01.02.06 –Динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Самара – 2009

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

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Павлов Валентин Фёдорович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Еленевский Дмитрий Сергеевич

доктор технических наук, профессор
Кулаков Геннадий Алексеевич

доктор физико-математических наук, профессор
Радченко Владимир Павлович

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие « Государственный научно-
производственный ракетно-космический центр
«ЦСКБ-Прогресс»

Защита состоится «__» декабря 2009 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д212.215.02 при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королёва» по адресу: 443086, г.Самара, Московское шоссе, 34, ауд.209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королёва»

Автореферат разослан « » ноября 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д212.215.02
доктор технических наук, профессор

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 материалоёмкости конструкций приводит к появлению всё большего числа деталей сложной формы с резкими концентраторами напряжений. Применение высокопрочных современных материалов значительно повысило прочность таких деталей при статических нагрузках, но повысить нижнюю границу сопротивления усталости во многих случаях не удаётся в силу большой чувствительности высокопрочных материалов к концентрации напряжений.

Конструктивные методы повышения прочности при переменных нагрузках приводят к увеличению массы конструкций и числа комплектующих, усложнению технологии изготовления, ухудшают унификацию и стандартизацию. Поэтому основным резервом повышения сопротивления усталости деталей с концентраторами напряжений является применение современных видов и средств упрочняющих технологий. Ряд проблем сопротивления усталости в связи с действием остаточных напряжений требует дальнейшего изучения: влияние асимметрии цикла, масштабного фактора, различной степени концентрации, рабочих температур. При работе деталей в области нормальных температур остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое повышают сопротивление усталости, особенно возрастает влияние остаточных напряжений в местах концентрации напряжений. При работе деталей в области высоких температур следует учитывать релаксацию остаточных напряжений. Работы последних лет в области механики остаточных напряжений позволили выяснить влияние технологических факторов на уровень остаточных напряжений. Предпринимались попытки оценить влияние остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённых образцов и деталей с концентраторами. Но известные из литературных источников данные об оценке приращения предельной амплитуды разобщены, имеют большой разброс, а порой противоречивы. Поэтому оценка влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости деталей является актуальной задачей теории и практики производства деталей машин.

Цель работы. Разработка научных методов прогнозирования сопротивления усталости упрочнённых деталей с концентраторами при нормальной и повышенной температурах на основе исследования остаточных напряжений с учётом влияния различных технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов.

Задачи исследования.

1. Разработка методов определения остаточных напряжений в поверхностных слоях различных концентраторов.

2. 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).

3. Разработка метода построения диаграммы предельных амплитуд цикла деталей с концентраторами и прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами при различной степени асимметрии цикла.

4. Разработка расчётно-экспериментального метода восстановления компонент тензоров остаточных напряжений и деформаций в поверхностном слое цилиндрических и плоских деталей по одной из экспериментально замеренных компонент напряжений.

5. Разработка метода расчёта кинетики остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрических и плоских деталей в условиях ползучести.

6. Оценка влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений.

7. Разработка методов прогнозирования сопротивления усталости упрочнённых деталей с концентраторами в широком диапазоне типоразмеров деталей и концентраторов, используемых материалов и видов деформации.

Объект исследования. Величина и характер распределения остаточных напряжений в образцах прямоугольного поперечного сечения, цилиндрических сплошных и полых образцах с концентраторами, характерными для деталей машин, а также в резьбе болтов после различного вида упрочняющих обработок.

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

Методы исследования. Работа выполнена на основе классических методов теории упругости, теории пластичности и ползучести, механики деформируемого твёрдого тела. Для определения остаточных напряжений в образцах с надрезами решались плоская и осесимметричная задачи теории упругости. 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. Использовались аналитические и численные методы определения остаточных напряжений в гладких деталях и в деталях с концентраторами после опережающего поверхностного пластического деформирования. Для решения задач применялся метод конечных элементов. Анализ и обработка результатов экспериментов выполнялись классическими статистическими методами с использованием компьютерной техники.

Научная новизна.

1. Разработан метод определения остаточных напряжений в деталях прямоугольного поперечного сечения и в цилиндрических деталях с концентраторами V-образного профиля, учитывающий изменение геометрии детали при удалении слоёв материала.

2. На основании решения о перераспределении остаточных напряжений на дне полуэллиптического надреза методом конечных элементов получено решение о перераспределении остаточных напряжений на дне надреза полукруглого профиля и определены остаточные напряжения после различных методов поверхностного пластического деформирования.

3. На основании известного метода предложен феноменологический подход к моделированию напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое цилиндрических и плоских деталей.

4. В результате выполнения расчётно-экспериментальных исследований предложен метод расчёта кинетики остаточных напряжений в условиях ползучести.

5. Проведена оценка влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений с учётом технологических, конструктивных и эксплуатационных факторов как при нормальной, так и при повышенных температурах.

6. Предложено осуществлять прогнозирование предела выносливости в случае асимметричного цикла с помощью разработанного метода построения диаграмм предельных амплитуд цикла упрочнённой детали.

7. Разработаны научные методы прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами в широком диапазоне типоразмеров деталей и концентраторов, использованных материалов и видов деформации.

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.

На защиту выносятся:

1. Методы определения остаточных напряжений в поверхностных слоях V-образных концентраторов.

2. Результаты теоретического и экспериментального исследования перераспределения остаточных напряжений в цилиндрических деталях, изготовленных с использованием различных методов обработки ППД и ОППД.

3. Расчётно-экспериментальный метод восстановления компонент тензоров остаточных напряжений и деформаций в поверхностном слое цилиндрических деталей по одной из экспериментально замеренных компонент напряжений.

4. Методика расчёта кинетики остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое цилиндрических деталей в условиях ползучести.

5. Оценка влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений.

6. Метод построения диаграмм предельных амплитуд цикла упрочнённых деталей с концентраторами и прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами при различной степени асимметрии цикла.

7. Прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами в широком диапазоне типоразмеров деталей и концентраторов, использованных материалов и видов деформации.

Практическая значимость проведённых в диссертационной работе исследований заключается в следующем:

1. Разработанный метод определения остаточных напряжений в надрезах V-образного профиля для плоских и цилиндрических образцов, учитывающий изменение геометрии концентратора в процессе удаления слоёв материала, позволяет существенно повысить точность определения остаточных напряжений. Вычислены коэффициенты, определяющие связь перемещений образца при удалении слоёв материала и остаточных напряжений.

2. Решение задачи о перераспределении остаточных напряжений на дне мелкого надреза полукруглого профиля позволяет определять остаточные напряжения в деталях с концентраторами после различных видов ОППД, возникающих за счёт перераспределения остаточных усилий гладкой детали.

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

4. 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.

5. На основе экспериментального определения остаточных напряжений и проведения испытаний на усталость осуществлена количественная оценка влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости для различных материалов, концентраторов и деформаций, результаты которой легли в основу методов прогнозирования предела выносливости.

6. Разработанный для случая растяжения-сжатия метод предельных амплитуд цикла упрочнённой детали позволяет прогнозировать предел выносливости упрочнённых деталей с концентраторами при любой асимметрии цикла.

7. Созданные методы прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений являются методической основой для использования в инженерной практике при проведении расчётов на прочность.

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» и проект РНП 2.1.1/889 «Теоретические и экспериментальные исследования влияния диссипативных процессов на механические характеристики и разрушение материалов»).

Реализация результатов работы. Представленные в работе методы и методики использованы в расчётах на прочность деталей и элементов двигателей летательных аппаратов в ОАО СКБМ, ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова.

Методические разработки, предложенные автором, используются в учебном процессе ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева на кафедре сопротивления материалов по теме «Переменные напряжения» и на кафедре прочности летательных аппаратов при подготовке магистров по направлению 01.10.00 – «Механика. Прикладная математика».

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научно-технических конференциях, совещаниях и симпозиумах: II Всесоюзной конференции «Современные проблемы строительной механики и прочности ЛА» (Куйбышев, 1986 г.), XI Всесоюзной конференции «Конструкционная прочность двигателей» (Куйбышев, 1988 г.), III Всесоюзной конференции «Повышение надёжности машин и сооружений» (Запорожье, 1988 г.), Областной конференции «Интенсификация производства и повышение качества изделий поверхностным пластическим деформированием» (Тольятти, 1989 г.), Всесоюзной конференции «Остаточные напряжения – резерв прочности в машиностроении» (Ростов, 1991 г.), XIII Всесоюзной конференции «Конструкционная прочность двигателей» (Самара, 1991 г.), Втором Российско-китайском симпозиуме по космической науке и технике (Самара, 1992 г.), Международной научно-технической конференции, посвящённой памяти генерального конструктора аэрокосмической техники академика Н.Д.Кузнецова (Самара, 2001 г.), II Международной научно-технической конференции (Киев, 2004 г.), Международной научно-технической конференции «Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций» (Киев, 2005 г.), Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2006, 2007, 2008, 2009 г.г.), Международной научно-технической конференции «Надёжность и долговечность машин и сооружений» (Киев, 2006, 2008 г.г.), Третьей международной научно-технической конференции «Проблемы динамики и прочности в газотурбостроении» (Киев, 2007 г.), Всероссийской научно-технической интернет-конференции «Высокие технологии в машиностроении» (Самара, 2008 г.), 4-ом Международном форуме (9-й Международной конференции) «Актуальные проблемы современной науки. Естественные науки» (Самара, 2008 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, 2006, 2009 г.г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 2 монографии, 19 статей, в том числе 12 – в изданиях, определённых ВАК России, 45 тезисов докладов.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, семи разделов, основных результатов и выводов, списка используемой литературы из 256 наименований и двух приложений. Содержит 259 страниц текста, включая 88 рисунков, 53 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, обоснована 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. 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. Не существует достаточно точного метода определения остаточных напряжений в плоских и цилиндрических деталях с V-образными надрезами. Кроме этого, большая группа деталей работает в условиях повышенных температур, при которых происходит релаксация остаточных напряжений. В целях прогнозирования предела выносливости деталей при повышенных температурах 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. Нет достоверных критериев оценки влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости (за исключением изгиба), нет простых методов прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами, которые учитывали бы различные технологии изготовления, конструктивные особенности концентраторов, условия эксплуатации деталей.

Во втором разделе изложен расчётно-экспериментальный метод определения остаточных напряжений в плоских и цилиндрических деталях с V-образными надрезами. Для увеличения разрешающей способности метода использовали детали с несколькими идентичными надрезами, отстоящими друг от друга на расстоянии P (рисунки 1 и 2).

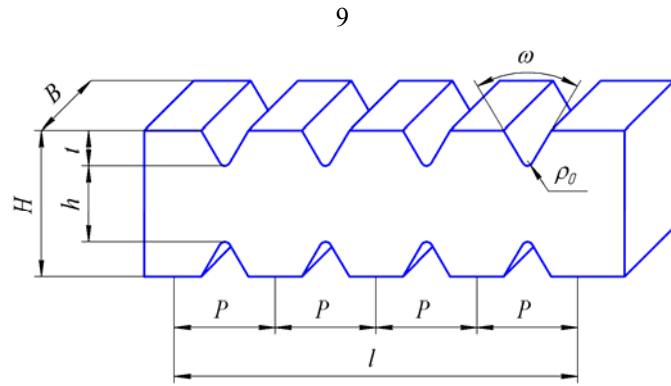


Рисунок 1 - Рабочая часть плоской детали для измерения остаточных напряжений

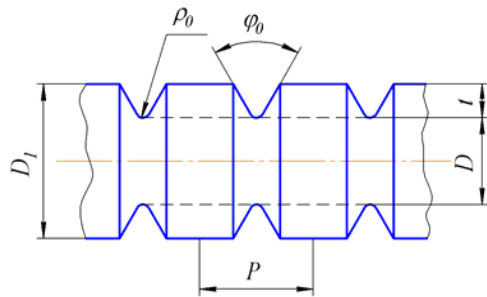


Рисунок 2 - Цилиндрическая деталь с V-образными надрезами

Предложенный метод основан на решении задач теории упругости (плоская деформация – для плоских образцов, осесимметричная задача – для цилиндрических образцов) о связи остаточных напряжений и перемещений $f(a)$ образца с удлинителем (рисунок 3), возникающих при удалении слоёв материала в пределах криволинейной части поверхности надрезов.

Удаление слоя толщиной a (рисунок 3) эквивалентно нагружению меридиональными σ_φ и радиальными σ_ρ остаточными напряжениями, взятыми с обратным знаком. Радиальные напряжения в соответствии с уравнением равновесия через меридиональные выражаются по формуле

$$(\rho_0 + a)\sigma_\rho = \int_{\rho_0}^{\rho_0+a} \sigma_\varphi d\rho, \quad (1)$$

где ρ_0 - начальный радиус впадины концентратора.

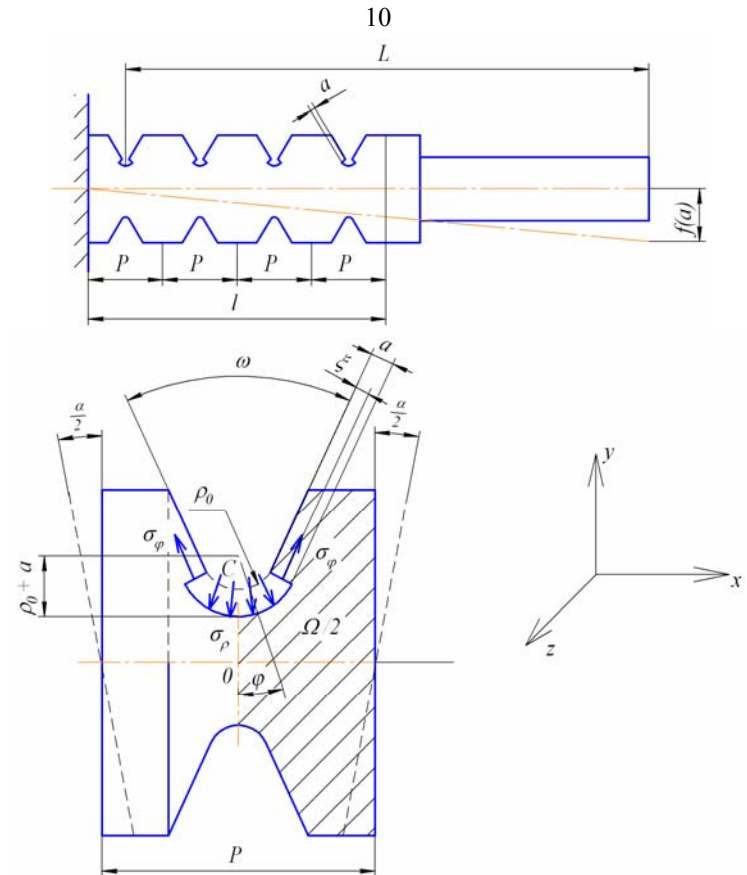


Рисунок 3 - Схема замера перемещений $f(a)$ и нагружение элемента образца, эквивалентное удалению слоя толщиной a впадины надреза

В силу периодичности надрезов торцевые сечения элемента длиной P (рисунок 3) остаются плоскими и поворачиваются одно относительно другого на угол α . Полное перемещение $f(a)$ можно выразить через α в виде суммы перемещений, вызываемых каждым надрезом, в виде

$$f(a) = \sum_{i=1}^n f_i(a) = \sum_{i=1}^n \alpha \left(L - \frac{2i-1}{2} P \right), \quad (2)$$

где L – длина образца с удлинителем, измеряемая от середины первого надреза (рисунок 3); n – число исследуемых надрезов. Имея ввиду, что $n \cdot P = l$, из формулы (2) получим

$$\alpha = \frac{f(a)}{n \left(L - \frac{P}{2} \right)}. \quad (3)$$

Поставленную задачу теории упругости решали методом конечных элементов. Конечно-элементная идеализация расчётной области $\Omega/2$ (рисунок 3) осуществлялась с помощью треугольных трёхузловых конечных элементов. Искомая зависимость между углом α и остаточными напряжениями с учётом (1) получена в виде

$$\int_{\rho_0}^{\rho_0+a} \sigma_{\varphi} d\rho = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)XP(a)} \alpha, \quad (4)$$

где E – модуль продольной упругости; μ – коэффициент Пуассона; $XP(a)$ – коэффициент, зависящий от геометрических параметров образца с концентраторами и толщины удалённого слоя материала a . Продифференцировав (4) и заменив угол α по (3), получим зависимость для меридиональных остаточных напряжений σ_{φ} , ответственных за изменение характеристик сопротивления усталости,

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)\left(L-\frac{l}{2}\right)n} \cdot \frac{d}{da} \left[\frac{f(a)}{XP(a)} \right]. \quad (5)$$

Для различных вариантов размеров H , B , h , t , ρ_0 , ω образцов, рекомендованных ГОСТ 25.502 для исследования чувствительности материалов к концентрации напряжений, были вычислены на ЭВМ коэффициенты $XP(a)$, значения которых при $P=1,5h$ и $a=0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$ мм приведены в таблице 1, где номера вариантов соответствуют вариантам размеров образцов с V-образным надрезом по ГОСТ 25.502.

Для всех вариантов образцов было изучено влияние расстояния P между надрезами на значения коэффициента $XP(a)$. Установлено, что с увеличением P коэффициент $XP(a)$ возрастает, однако при $P \geq 1,5h$ влияние соседних надрезов на значения этого коэффициента практически не проявляется. Поэтому для оценки остаточных напряжений в образцах прямоугольного поперечного сечения с одной парой симметричных V-образных надрезов возможно использование данных образцов с периодическими концентраторами, у которых $P \geq 1,5h$. В этом случае формула (5) примет вид

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)L} \cdot \frac{d}{da} \left[\frac{f(a)}{XP(a)} \right]. \quad (6)$$

К аналогичному виду приведены выражения меридиональных остаточных напряжений σ_{φ} цилиндрических образцов с V-образными надрезами. Для вариантов размеров цилиндрических образцов (таблица 2) были определены коэффициенты $XP(a)$, которые приведены в таблице 3.

В этом же разделе приведено решение осесимметричной задачи об определении дополнительных остаточных напряжений, возникающих за счёт перераспределения остаточных усилий гладкой упрочнённой детали в результате нанесения надреза полукруглого профиля. Складывая затем дополнительные напряжения с напряжениями гладкой детали, получали

остаточные напряжения детали с концентратором, которые использовались в дальнейшем для прогнозирования сопротивления усталости.

Таблица 1 - Значения коэффициентов $XP(a)$, $мм^{-1}$ для образцов по ГОСТ 25.502

Вариант	a , мм				
	0	0,1	0,2	0,3	0,4
1	2	3	4	5	6
1	0,681	0,861	1,022	1,168	1,316
2	0,486	0,697	0,885	1,053	1,206
3	0,375	0,475	0,559	0,632	0,694
4	0,252	0,359	0,449	0,525	0,590
5	0,243	0,300	0,343	0,381	0,414
6	0,165	0,224	0,272	0,311	0,345

Таблица 2 - Варианты размеров образцов

Вариант	D_1 , мм	D , мм	t , мм	ρ_0 , мм	φ_0 , град	ρ , мм
1	15	7,5	3,75	0,5	60	8
2	15	7,5	3,75	0,5	60	12
3	15	7,5	3,75	0,5	60	24
4	15	7,5	3,75	0,5	60	36
5	11,25	5,625	2,813	0,375	60	9
6	7,5	3,75	1,875	0,25	60	6

Таблица 3 - Значения коэффициентов $XP(a)$, $мм^{-1}$ для вариантов 1-6

Вариант	a , мм			
	0	0,1	0,2	0,3
1	0,510	0,818	0,919	1,055
2	0,511	0,824	0,929	1,070
3	0,513	0,830	0,930	1,077
4	0,518	0,840	0,933	1,083
5	0,681	1,095	1,237	1,423
6	1,023	1,638	1,855	2,135

В третьем разделе изучались влияние эксплуатации при повышенных температурах и реологические свойства материала на состояние упрочнённого слоя под действием нагрузок в результате 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_θ , q_z , q_r обозначены окружная, осевая и радиальная компоненты тензора остаточных пластических деформаций, возникающих в цилиндре после поверхностного пластического деформирования, а через σ_θ , σ_z , σ_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

$$q_\theta(r) = q_z(r), \quad (7)$$

т.е. пластические деформации в слое бесконечно малого участка поверхности цилиндрического образца наводятся также, как в слое полупространства. С учётом условия пластической несжимаемости материала $q_\theta + q_z + q_r = 0$ из (7) имеем

$$q_\theta(r) = q_z(r) = -\frac{q_r}{2}. \quad (8)$$

Для решения задачи используется уравнение равновесия

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r = \sigma_\theta, \quad (9)$$

из которого следует

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \int_0^r \sigma_r(\xi) d\xi; \quad (10)$$

условие нулевого суммарного усилия, действующего на образец

$$\int_0^{R_1} r \sigma_z(r) dr = 0, \quad (11)$$

где R_1 - радиус цилиндра, и уравнение совместности деформаций

$$r \frac{d\varepsilon_\theta}{dr} + \varepsilon_\theta = \varepsilon_r, \quad (12)$$

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:

$$\sigma_\theta(r) \rightarrow \sigma_r(r) \rightarrow q_\theta(r) \rightarrow q_z(r), \sigma_r(r) \rightarrow \varepsilon_z^* \rightarrow \sigma_z(r), \quad (13)$$

где $\sigma_r(r)$ определяется из (10);

$$q_\theta(r) = \frac{1}{r^{1+\mu}} \int_0^r z^{\frac{2-\mu}{1+\mu}} g(z) dz, \quad (14)$$

$$g(r) = \frac{\sigma_r(r) - \sigma_\theta(r)}{E} - \frac{r}{E} \left[(1-\mu) \frac{d\sigma_\theta(r)}{dr} - \mu \frac{d\sigma_r(r)}{dr} \right], \quad (15)$$

E , μ - модуль продольной упругости и коэффициент Пуассона; q_z и q_r - из (8);

$$\varepsilon_z^* = \frac{2}{R_1^2} \int_0^{R_1} r \left(q_z(r) - \frac{\mu}{E} [\sigma_r(r) + \sigma_\theta(r)] \right) dr, \quad (16)$$

$$\sigma_z(r) = E(\varepsilon_z^* - q_z(r)) + \mu(\sigma_r + \sigma_\theta(r)). \quad (17)$$

Для реализации изложенного метода разработано программное обеспечение, позволяющее решать задачу восстановления НДС в автоматическом режиме. На рисунке 4 представлены результаты соответствующих расчётов, 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.

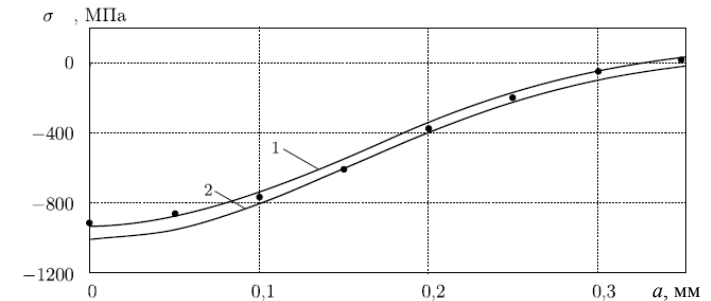


Рисунок 4 - Компоненты остаточных напряжений в цилиндрическом образце радиуса 7,5 мм из стали ЭИ 961 после алмазного выглаживания:

точки - экспериментальные значения σ_z ; 1 - расчётные значения σ_z ;

2 - расчётные значения σ_θ

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

$$\begin{aligned} \varepsilon_z(t) &= e_z(t) + p_z, \\ p_z(t) &= u_z(t) + v_z(t) + w_z(t), \end{aligned} \quad (18)$$

где $e_z(t) = \frac{f(t)}{E\pi R_1^2}$ – упругая деформация, p_z – деформация ползучести, u_z , v_z , w_z – вязко-упругая, вязко-пластическая и вязкая компоненты p_z ,

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

$$\varepsilon_i(t) = -\mu \frac{\sigma^0(t)}{E} - \mu' u_z(t) - \mu'' v_z(t) - \frac{1}{2} w_z(t), \quad i = r, \theta, \quad (19)$$

где μ – коэффициент Пуассона в упругой области, μ' и μ'' – коэффициенты Пуассона для обратимой u_z и необратимой v_z компонент деформации ползучести (соответственно).

Кинетику напряжённо-деформированного состояния в поверхностном слое можно считать 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 (18), (19).

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

$$\varepsilon_z(t) + \varepsilon_z^0 = q_z(r) + e_z(r, t) + p_z(r, t). \quad (20)$$

Здесь $\varepsilon_z(t)$ – полная осевая деформация цилиндрического образца, рассчитываемая с помощью соотношений (18), (19); ε_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

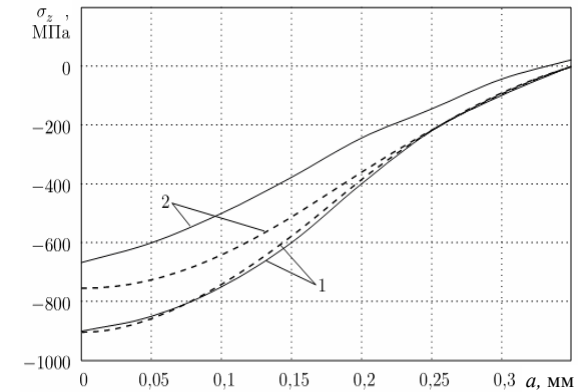
$$g_i(r, t) = \varepsilon_i(t) + \varepsilon_i^0 - q_i(r) - p_i(r, t),$$

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

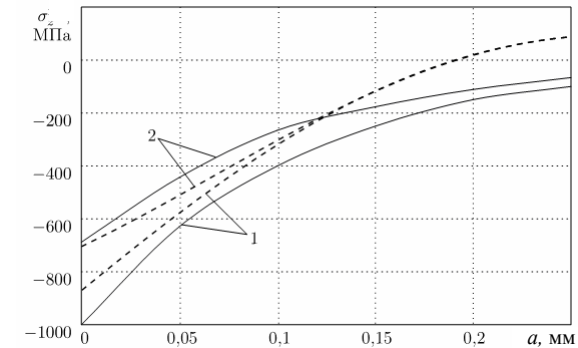
$$\sigma_i(r, t) = \frac{E}{1+\mu} g_i(r, t) + \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} (g_r(r, t) + g_z(r, t) + g_\theta(r, t)) \quad \text{при } i = r, z, \theta. \quad (21)$$

Численная реализация предложенного метода и проверка адекватности расчётных значений экспериментальным данным проводилась для цилиндрического круглого образца радиуса $R_1 = 3,75$ мм и образца с надрезом радиуса $\rho_0 = 0,3$ мм из стали ЭИ 961 после алмазного выглаживания и последующей термоэкспозиции при температуре без нагрузки (величина $F(t) = 0$) в течение 100 ч при $T = 400^\circ\text{C}$.

Экспериментальные значения для компоненты $\sigma_z(r)$ в образцах после упрочнения и после термоэкспозиции (вследствие ползучести) представлены на рисунке 5 сплошными линиями.



а)



б)

Рисунок 5 - Экспериментальные (сплошные линии) и расчётные (штриховые) эпюры остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (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 при $T = 400^\circ\text{C}$ использовался частный случай реологической модели ползучести вида

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

где λ_k, b_k, m, n, c – параметры модели.

На рисунке 6 в качестве примера приведены расчётные значения кинетики напряжений $\sigma_\theta(R_1, t)$, $\sigma_z(R_1, t)$ на поверхности гладкого образца во времени.

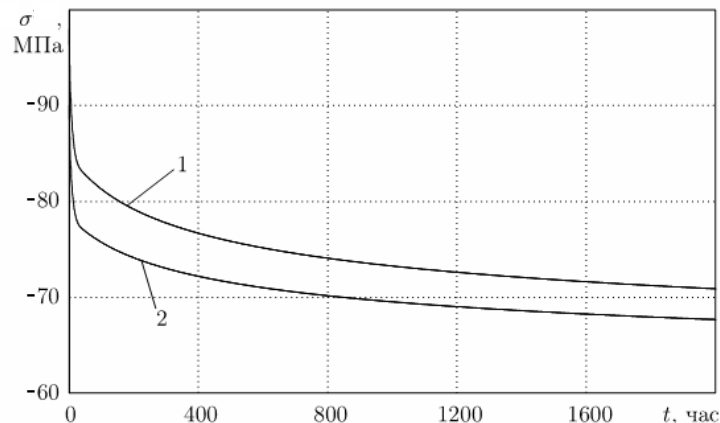


Рисунок 6 - Кривые релаксации остаточных напряжений на поверхности упрочнённой гладкой детали при термоэкспозиции: 1 – $\sigma_\theta(R_1, t)$, 2 – $\sigma_z(R_1, t)$

Из данных рисунка 6 видно, что релаксация остаточных напряжений за 1000 часов привела к их уменьшению на 70 процентов и далее процесс стабилизируется, т.е. и при повышенных температурах сохраняется значительный запас остаточных напряжений.

Четвёртый раздел посвящён экспериментальным методам определения остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений и проведения испытаний на усталость. Исследования проводились на образцах и деталях, изготовленных из сталей 45, 30ХГСА, 12Х18Н10Т, 38Х2МЮА, 40Х, 16ХСН, ЖС6У, ВНС40, ЭИ961, алюминиевых сплавах В93, В95, Д16Т, титановом – ВТ6, жаропрочных – ЭИ698ВД, ЭИ437Б. Исследованию подвергались сплошные и полые цилиндрические образцы с надрезами полукруглого профиля различного радиуса, цилиндрические и плоские образцы и детали с надрезами V-образного профиля, валы с галтельными переходами и напрессованной втулкой, резьбовые детали, которые подвергались обработке микрошариками, гидро- и пневмодробеструйной обработке, ультразвуковому упрочнению, обкатке роликом, алмазному выглаживанию, азотированию. Приведены механические

характеристики исследуемых материалов, размеры поперечных сечений образцов и деталей, размеры концентраторов, режимы упрочняющих обработок.

В зависимости от размеров поперечного сечения остаточные напряжения гладких цилиндрических образцов определялись либо методом колец и полосок, либо методом удаления части поверхности.

Остаточные напряжения в плоских и цилиндрических образцах с V-образными надрезами, в резьбовых деталях в результате непосредственного упрочнения концентратора после его изготовления определялись по формуле (6). 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 упрочнённую гладкую деталь, определялись методом конечных элементов. Остаточные напряжения в образцах с надрезом определялись как сумма дополнительных напряжений и напряжений гладких образцов. Эти остаточные напряжения использовались в дальнейшем для прогнозирования предела выносливости.

Испытания на усталость проводили на машинах МУИ-6000, УММ-01, УМП-02. Испытания болтов М6 из сплава ВТ16 и 16ХСН проводили на вибрационном электродинамическом стенде ВЭДС-500. Предел выносливости определялся как по методике, предусмотренной ГОСТ 25.502, так и по методу ступенчатого изменения нагрузки. База испытаний составляла для сталей $3 \cdot 10^6$ циклов, а для цветных сплавов – $10 \cdot 10^6$ циклов.

В этом разделе приводится также теория влияния остаточных напряжений на предел выносливости, используемая для прогнозирования предела выносливости.

При достаточно больших переменных напряжениях, близких к пределу выносливости, в упрочнённой детали с концентраторами всегда возникают нераспространяющиеся трещины (рисунок 7).

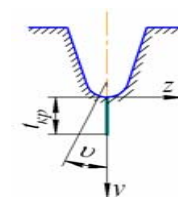


Рисунок 7 - Нераспространяющаяся трещина усталости в детали с концентратором напряжений

Было установлено, что по мере развития трещины остаточные напряжения на её дне растут, и достигнув наибольшей величины, останавливают трещину. В связи с этой особенностью сопротивления усталости за искомым критерий были приняты остаточные напряжения на дне трещины, в качестве которых рассматривали дополнительные остаточные напряжения, возникающие за счёт перераспределения остаточных усилий детали в результате образования трещины

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (22)$$

где $\sigma_z(\xi)$ - осевые остаточные напряжения в наименьшем сечении детали с концентратором; $\xi = y/t_{kp} = \cos \vartheta$ - расстояние от дна надреза до текущего слоя, выраженное в долях t_{kp} . Через t_{kp} обозначена максимально возможная глубина нераспространяющейся усталостной трещины, возникающей при работе детали на пределе выносливости. При анализе результатов измерения t_{kp} установлено, что для исследованных случаев её величина определяется только размерами поперечного сечения детали и для сплошных цилиндрических деталей хорошо описывается линейной зависимостью

$$t_{kp} = 0,0216D, \quad (23)$$

где D - диаметр поперечного сечения детали.

Для полых деталей

$$t_{kp}^o = 0,0216D \left[1 - 0,04 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,54 \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right], \quad (24)$$

где d - диаметр отверстия.

Формула для вычисления приращения предела выносливости упрочнённой детали с использованием критерия $\bar{\sigma}_{ocm}$ будет иметь вид

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_p |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (25)$$

где $\bar{\psi}_p$ ($\bar{\psi}_\sigma$, $\bar{\psi}_\tau$) определяется экспериментально, а среднеинтегральные остаточные напряжения $\bar{\sigma}_{ocm}$ вычисляются с помощью формулы (22) по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости t_{kp} (23) или t_{kp}^o (24).

Пятый раздел посвящён разработке методов прогнозирования сопротивления усталости упрочнённых деталей в зависимости от технологических факторов.

Рассматривались методы поверхностного упрочнения, материал, последовательность образования концентратора, влияние степени наклёпа и коротких зон упрочнения.

При различных видах поверхностного пластического упрочнения, таких как пневмо-и гидродробеструйная обработка, обкатка роликом, алмазное выглаживание, обработка микрошариками, ультразвуковое упрочнение были определены остаточные напряжения в образцах, изготовленных из различных материалов, с надрезом полукруглого профиля в случае непосредственного упрочнения концентратора и в случае создания сжимающих остаточных напряжений в опасном сечении детали за счёт перераспределения остаточных усилий после нанесения надреза на гладкую упрочнённую деталь. Определены

значения пределов выносливости при изгибе и растяжении-сжатии в случае симметричного цикла, глубин нераспространяющихся трещин усталости t_{kp} , среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$, коэффициентов влияния остаточных напряжений на предел выносливости детали $\bar{\psi}_\sigma$. Проведённые эксперименты показали, что прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений в виде полукруглого, V-образного профиля для рассмотренных методов упрочнения и материалов можно оценивать по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$ с помощью формулы (25), приняв в ней коэффициент $\bar{\psi}_\sigma = 0,36$, который был определён по результатам экспериментов.

В диссертации проводили исследование коротких зон упрочнения расчётным путём. Для подтверждения расчётного исследования были проведены испытания на усталость гладких образцов диаметром 10 мм из стали 45. В качестве упрочняющей обработки использовалось обкатывание роликом диаметром 60 мм и профильным радиусом 1,6 мм. Четыре из пяти изготовленных партий образцов до проведения испытаний на усталость были упрочнены на различных режимах.

Первая партия образцов испытывалась после точения (исходное состояние). Вторая и третья подвергались равномерному упрочнению по всей поверхности рабочей части образца. На образцы четвёртой и пятой партий за один оборот наносились одиночные следы упрочняющим роликом без продольной подачи.

Равномерное упрочнение образцов привело к существенному (до 32%) увеличению предела выносливости. Предел выносливости четвёртой и пятой партий несколько снизился по сравнению с исходным состоянием. Необходимо отметить, что все поломки образцов этих партий произошли по середине следа от упрочняющего ролика. Измерялись ширина одиночного кольцевого следа ролика, которую можно принять за протяжённость зоны упрочнения $S_{упр}$, и толщина упрочнённого слоя δ .

Установлено, что для образцов с одиночным кольцевым следом выполняется условие $S_{упр} < \delta$, поэтому, в соответствии с расчётным исследованием в среднем сечении образца возникают растягивающие остаточные напряжения, чем и объясняется уменьшение предела выносливости четвёртой и пятой партий образцов по сравнению с первой.

Наблюдаемое снижение предела выносливости, как показали найденные значения эффективного коэффициента концентрации, не является следствием концентрации рабочих напряжений, возникающей на дне кольцевого следа.

Таким образом, уменьшение предела выносливости, локализация очага разрушения, параметры зоны упрочнения образцов с одиночным кольцевым следом от обкатного ролика подтверждают выявленное расчётным путём возникновение растягивающих остаточных напряжений при упрочнении малых по протяжённости зон деталей.

Шестой раздел посвящён разработке методов прогнозирования сопротивления усталости упрочнённых деталей в зависимости от конструктивных факторов. Рассматривалось влияние типа и размеров концентраторов, поперечных размеров деталей, в том числе и диаметра

отверстия, на остаточные напряжения и предел выносливости деталей и образцов. Остаточные напряжения и предел выносливости определялись для деталей и образцов с концентраторами в виде полукруглых и V-образных надрезов, галтелей различного радиуса, напрессованной втулки. На рисунке 8 представлены остаточные напряжения в гладких образцах и образцах с надрезом различного радиуса после гидродробеструйной обработки и обкатки роликом.

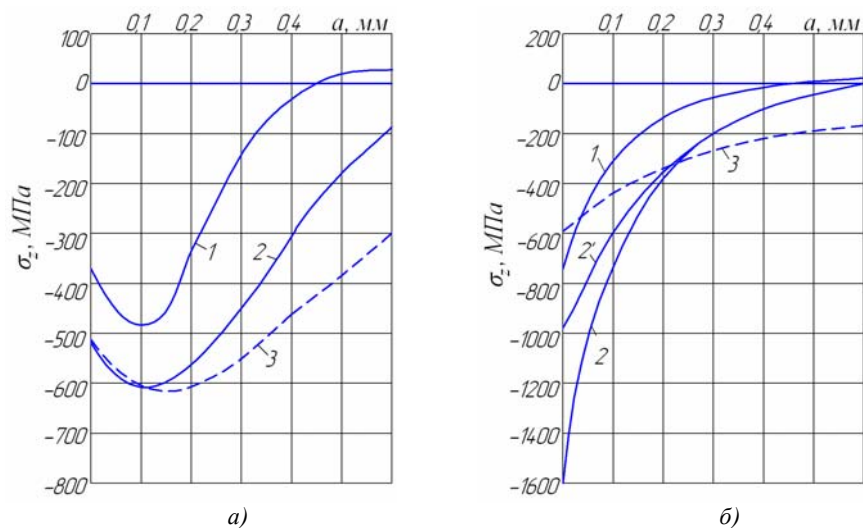


Рисунок 8 - Остаточные напряжения в гладких образцах (а) и в образцах с надрезом (б) из сталей 30ХГСА (1,2) и 40Х (3): 1 – ГДО, $\rho_0=0,3\text{мм}$; 2 – ОР, $\rho_0=0,3\text{мм}$; 2 – ОР, $\rho_0=0,5\text{мм}$; 3 – ОР, $\rho_0=1,0\text{мм}$

В результате исследования установлено, что для образцов с надрезами и галтелями различного радиуса коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$, отражающий влияние упрочнения через критерий среднеинтегральных остаточных напряжений, изменяется также, как и в предыдущих опытах, в небольших пределах и равен в среднем $\bar{\psi}_\sigma=0,361$. Это значение близко к величине $\bar{\psi}_\sigma$ в других экспериментах. Рассмотренные в этом разделе концентраторы следует дополнить V-образными надрезами с радиусами $\rho_0=0,5$ и $2,5$ мм, изученными в разделе 5, для которых $\bar{\psi}_\sigma$ имел такие же значения. Полученный коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ можно применять и в этом случае для прогнозирования предела выносливости.

Седьмой раздел посвящён разработке методов прогнозирования сопротивления усталости упрочнённых деталей в зависимости от эксплуатационных факторов. Рассматривались различные типы деформации,

асимметрия цикла, рабочая температура, степень концентрации на остаточные напряжения и прогнозирование предела выносливости.

Деформации изгиба и растяжения-сжатия изучались в разделах 5 и 6. Переменное кручение в настоящей работе специально не исследовалось, а для прогнозирования предела выносливости деталей с концентраторами напряжений при кручении с использованием критерия среднеинтегральных остаточных напряжений применялись данные, полученные другими авторами. Оказалось, что и при кручении прогнозирование предела выносливости можно осуществлять с помощью критерия $\bar{\sigma}_{осм}$, приняв в формуле (25) значение коэффициента $\bar{\psi}_\sigma = 0,181$.

Представляет определённый интерес исследовать совместное влияние остаточных и средних напряжений на предельную амплитуду цикла и установить возможность прогнозирования предела выносливости при различной асимметрии цикла. С увеличением среднего напряжения коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ уменьшается. Для прогнозирования предельной амплитуды с помощью критерия среднеинтегральных остаточных напряжений предлагается использовать диаграмму Ганна предельных амплитуд цикла напряжений $\sigma_a = \sigma_a(\sigma_m)$ (рисунок 9).

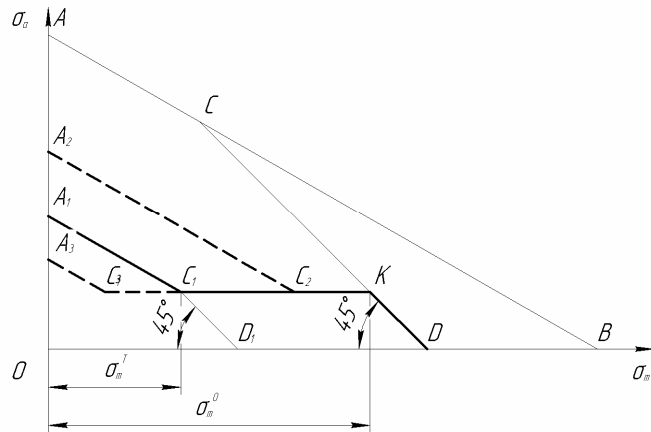


Рисунок 9 - Диаграммы предельных амплитуд цикла: ACD – материала, A_1C_1KD – детали без остаточных напряжений, A_2C_2KD – детали со сжимающими остаточными напряжениями, A_3C_3KD – детали с растягивающими остаточными напряжениями

В осях $\sigma_m - \sigma_a$ (σ_m - среднее напряжение, σ_a - амплитуда напряжений цикла), прежде всего, строится диаграмма предельных амплитуд цикла для материала детали (рисунок 9). По оси σ_a откладывается предел выносливости материала при симметричном цикле в случае растяжения-сжатия, $OA = \sigma_{-1p}$, по

оси σ_m – сопротивление материала разрыву $OB = S_k$. Ограничивая работу материала по текучести, по оси абсцисс откладывается предел текучести $OD = \sigma_T$ и проводится прямая DC под углом 45° к оси абсцисс. Тогда ACD – диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений материала детали, учитывающая как усталость, так и текучесть.

Далее строится диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений для детали, изготовленной без остаточных напряжений в наиболее нагруженном сечении детали. Наличие концентратора уменьшает предел выносливости материала при симметричном цикле σ_{-1p} , в K_σ раз, где K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений. В соответствии с этим по оси ординат откладывается отрезок $OA_1 = \sigma_{-1p} / K_\sigma$ и из точки A_1 проводится прямая A_1C_1 параллельно AB до пересечения с прямой D_1C_1 , ограничивающей работу детали по текучести. Здесь $OD_1 = \sigma_T / \alpha_\sigma$, где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений. Для прямых A_1C_1 и D_1C_1 можно записать уравнения через известные механические характеристики материала в виде

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{-1p}} K_\sigma + \frac{\sigma_m}{S_k} K_\sigma = 1, \quad (26)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_T} \alpha_\sigma + \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \alpha_\sigma = 1. \quad (27)$$

Точка C_1 характеризует начало локальной текучести в наиболее нагруженном сечении детали, т.е. в области концентратора. Среднее напряжение σ_m^T , при котором начинается локальная текучесть, определяется из совместного решения (26) и (27)

$$\sigma_m^T = \frac{S_k \left(\sigma_T - \sigma_{-1p} \frac{\alpha_\sigma}{K_\sigma} \right)}{\alpha_\sigma (S_k - \sigma_{-1p})}. \quad (28)$$

Эксперименты показали, что до тех пор, пока напряжения во впадине не достигнут предела текучести материала σ_T по всему опасному сечению детали (рисунок 9, точка K), предельная амплитуда σ_{Ra} не зависит от среднего напряжения σ_m , поэтому диаграмма предельных амплитуд цикла резбовой детали без остаточных напряжений опишется ломаной A_1C_1KD .

Затем строится диаграмма предельных амплитуд цикла напряжений для детали с остаточными напряжениями, действующими в её опасном сечении, т.е. во впадинах концентратора. Влияние остаточных напряжений, как и средних напряжений, логично отнести только к амплитуде напряжений, одинаково при всех σ_m . Тогда для учёта действия сжимающих остаточных напряжений, увеличивающих предельную амплитуду, левую часть диаграммы A_1C_1 следует переместить параллельно вверх до положения A_2C_2 , а для учёта действия

растягивающих остаточных напряжений - вниз до положения A_3C_3 . Следовательно, для детали с сжимающими остаточными напряжениями диаграмма предельных амплитуд цикла будет представлена ломаной A_2C_2KD , с растягивающими – ломаной A_3C_3KD .

Далее следует решить вопрос о том, на какую величину необходимо перемещать прямую A_1C_1 . Простой перенос точки C_1 по оси абсцисс на величину максимальных остаточных напряжений неправомерен, т.к. не учитывает характер распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя опасного сечения и масштабный фактор. Поэтому следует перемещать точку A_1 по оси ординат на величину приращения предела выносливости $\Delta\sigma_{Ra}$ детали с концентратором при симметричном цикле, вычисляемого по зависимости (25).

Приращение предельной амплитуды σ_{Ra} за счёт остаточных напряжений во впадинах концентратора при любом среднем напряжении σ_m определяется зависимостью

$$\Delta\sigma_{Ra} = \bar{\psi}_{\sigma}^{(m)} |\bar{\sigma}_{ocm}|, \quad (29)$$

где $\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)}$ - коэффициент влияния остаточных напряжений на предельную амплитуду при среднем напряжении σ_m . Коэффициент $\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)}$ при $\sigma_m > \sigma_m^T$ вычисляется по формуле

$$\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)} = \bar{\psi}_{\sigma} - \frac{\sigma_{-1p}(\sigma_m - \sigma_m^T)}{S_k |\bar{\sigma}_{ocm}|}, \quad (30)$$

полученной из геометрических соображений с использованием данных рисунка 9. При $\sigma_m \leq \sigma_m^T$ величину $\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)}$ следует положить равной $\bar{\psi}_{\sigma}$, что следует из диаграмм предельных амплитуд цикла напряжений детали с концентратором напряжений (рисунок 9).

Таким образом, приращение предельной амплитуды детали за счёт остаточных напряжений для любого среднего напряжения σ_m представляется возможным вычислить по зависимости (29) при известных механических характеристиках материала $\sigma_T, \sigma_{-1p}, S_k$. Входящие в (29) значения $\bar{\psi}_{\sigma}^{(m)}$ и $\bar{\sigma}_{ocm}$ определяются по формулам (30) и (22) с использованием зависимости (28) для среднего напряжения σ_m , при котором начинается локальная текучесть, и (23) - для критической глубины t_{kp} нераспространяющейся трещины усталости сплошной детали и (24) – для полый детали.

По изложенному выше методу построена диаграмма (рисунок 10) предельных амплитуд для образцов прямоугольного поперечного сечения с V-образным надрезом, изготовленных из стали 45. Предел выносливости исследованной стали 45 при растяжении-сжатии в случае симметричного цикла (σ_{-1p}) составляет 240 МПа, который откладывается по оси σ_a . По оси σ_m откладывается не предел прочности σ_a , как это обычно принято, а

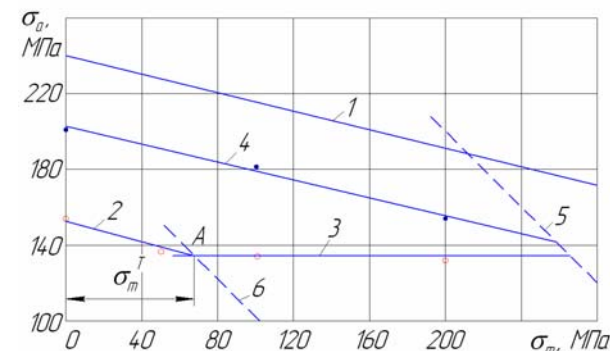


Рисунок 10 - Диаграммы предельных амплитуд цикла: 1 – материала; 2,3 – неупрочнённой детали; 4 – упрочнённой детали; 5,6 – по текучести

сопротивление разрыву $S_k = 1010$ МПа. Далее проводится схематизированная по линейному закону диаграмма предельных амплитуд цикла для материала (прямая 1). Справа диаграмма ограничивается условием текучести (прямая 5).

Затем строится диаграмма (ломаная прямая 2, 3) для упрочнённой детали с концентратором напряжений. Левая часть (прямая 2) этой диаграммы проводится параллельно диаграмме 1 материала, уменьшая амплитуду в K_{σ} раз, где K_{σ} – эффективный коэффициент концентрации напряжений. В нашем случае $K_{\sigma} = 1,55$, тогда предел выносливости детали при симметричном цикле $\sigma_{-1p}^{dem} = 154$ МПа. Точка A возникновения пластических деформаций в концентраторе находится на пересечении прямых 2 и 6. Здесь штриховая прямая 6 ограничивает текучесть. Далее предполагается, что среднее напряжение в надрезе с ростом статической нагрузки из-за течения материала не увеличивается, поэтому правая часть (прямая 3) диаграммы предельных амплитуд цикла проводится параллельно оси σ_m .

Для построения диаграммы предельных амплитуд цикла упрочнённой детали (прямая 4) по формуле (25) вычисляется предел выносливости детали с остаточными напряжениями. Приняв $\bar{\psi}_{\sigma} = 0,36$ и найденные из эксперимента $\bar{\sigma}_{ocm} = -134$ МПа, получим $\sigma_{-1p}^{dem} = 202$ МПа. Эта величина откладывается по оси σ_a и проводится прямая 4, параллельная диаграмме материала – это и будет диаграмма предельных амплитуд цикла для упрочнённой детали с концентратором. На рисунке 10 точками показаны экспериментальные данные. Можно видеть, что эксперимент достаточно хорошо согласуется с принятой диаграммой предельных амплитуд цикла, поэтому предложенный подход может быть использован в практических расчётах, причём и при других типах деформации.

Формула (30) справедлива при $\sigma_m > \sigma_m^T$. Если же $\sigma_m \leq \sigma_m^T$, то коэффициент $\bar{\psi}_\sigma^{(m)} = 0,36$ для случая, когда через концентратор не передаётся сила. Значение сопротивления разрыву S_k можно вычислить по формуле

$$S_k = \sigma_\sigma (1 + 1,35\psi), \quad (31)$$

где σ_σ – предел прочности материала, ψ – относительное остаточное сужение после разрушения (в долях).

Влияние температуры на остаточные напряжения и сопротивление усталости исследовали на сплошных и полых цилиндрических образцах с надрезами полукруглого профиля при изгибе с вращением и на образцах прямоугольного поперечного сечения с надрезами V-образного профиля, имитирующих ёлочный замок лопатки ГТД при асимметричном цикле растяжения-сжатия. Установлено, что повышенная температура приводит к снижению остаточных напряжений в поверхностном слое детали. Оставшиеся после воздействия температуры остаточные напряжения можно определить, используя расчётно-экспериментальный метод, изложенный в разделе 3. На рисунке 5 представлены результаты расчётов и экспериментальные данные для образцов из стали ЭИ961, которые имеют удовлетворительное совпадение. Результаты испытаний на усталость показали, что формулу (25) можно использовать для вычисления приращения предела выносливости упрочнённых деталей при повышенных температурах, заложив в неё оставшиеся после воздействия температуры напряжения.

Рассматривалось влияние остаточных напряжений на предел выносливости упрочнённых поверхностным пластическим деформированием цилиндрических образцов с такими концентраторами напряжений как надрез, галтель, напрессованная втулка и резьба. Концентраторы изготавливались как до упрочнения (галтель), так и после упрочнения (надрез и резьба) образца. Эффективный коэффициент концентрации напряжений K_σ для надрезов, галтелей и свободной резьбы (без гайки) вычислялся по формуле (32), в которой q_σ - коэффициент чувствительности к концентрации напряжений, α_σ - теоретический коэффициент концентрации напряжений, определяющиеся по справочной литературе. Коэффициент K_σ для напрессованной втулки и резьбы с гайкой определялся по данным литературных источников.

$$K_\sigma = 1 + q_\sigma (\alpha_\sigma - 1) \quad (32)$$

Было установлено, что коэффициенты $\bar{\psi}_\sigma$ для образцов с близкими теоретическим и эффективным коэффициентами концентрации (надрез, галтель) отличаются незначительно. Для образцов с напрессованной втулкой коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ заметно (в 1,4 раза) меньше, чем для других концентраторов напряжений. Это объясняется тем, что через напрессованную втулку передаётся усилие и коэффициенты концентрации α_σ и K_σ в этом случае заметно выше, чем для надреза и галтели.

Линейная аппроксимация методом наименьших квадратов значений коэффициента влияния остаточных напряжений на предел выносливости по

разрушению $\bar{\psi}_\sigma$ от величины теоретического и эффективного коэффициентов концентрации напряжений α_σ и K_σ даёт для описанных в настоящем исследовании экспериментов следующие зависимости:

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081 \alpha_\sigma, \quad (33)$$

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,514 - 0,065 K_\sigma. \quad (34)$$

Таким образом, для прогнозирования приращения предела выносливости при изгибе и растяжении-сжатии в случае симметричного цикла упрочнённых деталей с различной степенью концентрации напряжений представляется возможным использовать формулу (25), коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ в которой определяется по зависимостям (33) или (34) по известным теоретическому α_σ или эффективному K_σ коэффициентам концентрации напряжений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведённых исследований решена крупная научно-техническая проблема, имеющая важное народно-хозяйственное значение для повышения качества, надёжности и ресурса машин и механизмов. Разработанные в диссертации научные методы прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений позволяют оценивать сопротивление усталости, резко сократить проведение длительных и дорогостоящих испытаний на усталость и полноту, ввести полученные коэффициенты в стандартные прочностные расчёты.

В ходе диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. На основе решения задач теории упругости разработан метод определения остаточных напряжений в плоских и цилиндрических деталях с периодическими V-образными надрезами, учитывающий изменение геометрии детали при удалении слоёв материала. Для цилиндрических и плоских деталей обоснована возможность применения этого метода для деталей с одной парой боковых надрезов (плоская деталь) и с одиночным надрезом (цилиндрическая деталь). Получены простые зависимости для определения меридиональных остаточных напряжений, ответственных за повышение сопротивления усталости деталей.

2. Для плоских образцов по ГОСТ 25.502, а также для образцов, имитирующих ёлочный замок лопатки турбины ГТД, цилиндрических образцов определены коэффициенты $XP(a)$ связи перемещений образца при удалении слоёв материала и остаточных напряжений.

3. Решена задача определения остаточных напряжений на дне надреза полукруглого профиля в результате перераспределения остаточных усилий гладкого цилиндрического образца.

4. Предложен расчётно-феноменологический метод, позволяющий моделировать напряжённо-деформированное состояние в поверхностно упрочнённом слое цилиндрической детали по одной экспериментально замеренной компоненте остаточных напряжений.

5. В результате расчётно-экспериментальных исследований по влиянию температурных нагрузок на релаксацию остаточных напряжений получены соотношения, позволяющие следить за процессом релаксации остаточных напряжений в упрочнённом слое при неупругом растяжении цилиндрической детали.

6. По результатам большого числа опытов при различных методах упрочнения, степенях наклёпа, размерах и формах концентраторов, асимметриях цикла напряжений обоснована возможность применения критерия оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению поверхностно упрочнённой детали с концентратором – среднеинтегральные остаточные напряжения, вычисляемые по толщине поверхностного слоя, равной критической глубине нераспространяющейся трещины усталости.

7. Подтверждено, что глубина нераспространяющейся трещины усталости в упрочнённой детали с концентратором определяется размерами поперечного сечения и не зависит от вида поверхностного упрочнения, материала, последовательности изготовления и упрочнения концентратора, наклёпа, типа и размеров концентратора, величины сжимающих остаточных напряжений, типа деформации и асимметрии цикла напряжений.

8. Установлено, что для исследованных видов поверхностного упрочнения (пнеumo- и гидродробеструйная обработка, обкатка роликом, алмазное выглаживание, обработка микрошариками, азотирование), различных материалов (стали 30ХГСА, 12Х18Н10Т, ЭИ961, ВНС40, 38Х2МЮА, 40Х, 45, 40; сплавы ЭИ43Б7, В93, В95, Д16Т), степеней равномерного и неравномерного наклёпа, величин (118-1530 МПа) и характера распределения сжимающих остаточных напряжений, типов и размеров концентраторов, поперечных размеров деталей прогнозирование предела выносливости можно проводить по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений $\Delta p_R = \bar{p}_p |\bar{\sigma}_{ocm}|$. В случае симметричного цикла при теоретическом $\alpha_\sigma = 2,6-3,8$ и эффективном $K_\sigma = 2,3-2,8$ коэффициентах концентрации коэффициент влияния остаточных напряжений по предложенному критерию составляет при изгибе и растяжении-сжатии $\bar{p}_\sigma = 0,36$.

9. Предложен и апробирован метод построения диаграммы предельных амплитуд цикла и расчёта предельной амплитуды упрочнённых деталей с концентраторами в случае асимметричного цикла напряжений.

10. Установлено, что критерий среднеинтегральных остаточных напряжений может быть использован для прогнозирования предела выносливости и в случае работы детали при повышенной температуре, но при этом в расчётах следует использовать остаточные напряжения детали в конце её ресурса, то есть с учётом релаксации. Эти напряжения можно определить разработанным в диссертации расчётно-экспериментальным методом исследования релаксации остаточных напряжений при высоких температурах вследствие ползучести.

11. Экспериментально подтверждены закономерности распределения остаточных напряжений, выявленные расчётом по первоначальным деформациям: повышение остаточных напряжений на поверхности концентратора и уменьшение толщины слоя с сжимающими напряжениями при увеличении теоретического коэффициента концентрации, повышение остаточных напряжений в области концентратора с увеличением толщины

упрочнённого слоя, увеличение остаточных напряжений гладкой детали с увеличением размеров поперечного сечения.

12. Уменьшением предела выносливости, локализацией очага разрушения, параметрами зоны упрочнения образцов с одиночным кольцевым следом от обкатного ролика подтверждено выявленное расчётным путём возникновение растягивающих остаточных напряжений при упрочнении малых по протяжённости зон деталей.

13. Разработан метод прогнозирования предела выносливости упрочнённых деталей с различными концентраторами напряжений по известным теоретическому или эффективному коэффициентам концентрации.

Основное содержание диссертации опубликовано:

в монографиях:

1. Расчёт остаточных напряжений в деталях с концентраторами напряжений по первоначальным деформациям / В.Ф.Павлов [и др.]. – Самара: ООО «Изд-во СНЦ», 2008. – 124 с.

2. Павлов, В.Ф. Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.Б. Иванов. – Самара: ООО «Изд-во СНЦ», 2008. – 64 с.

в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования науки Российской Федерации:

3. Кирпичёв, В.А. Использование критерия остаточных напряжений для прогнозирования сопротивления усталости деталей при повышенных температурах / В.А.Кирпичёв // Вестник Сам. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. – №2(10). Часть 2. – С. 87-90.

4. Кирпичёв, В.А. Остаточные напряжения и предельная амплитуда упрочнённых деталей с концентраторами при асимметричном цикле / В.А.Кирпичёв // Вестник Сам. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. – №3. – С. 21-24.

5. Павлов, В.Ф. Влияние вида концентратора на зависимость предела выносливости упрочнённых деталей от остаточных напряжений / В.Ф.Павлов, В.А.Кирпичёв // Вестник Сам. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. – №3. – С. 31-44.

6. Остаточные напряжения и сопротивление усталости при растяжении-сжатии в условиях концентрации напряжений / В.Ф.Павлов [и др.] // Известия вузов. Авиационная техника. – 2007. – №4. – С. 66-67.

7. Влияние распределения остаточных напряжений гладкой детали на дополнительные напряжения при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В.Ф.Павлов [и др.] // Вестник Сам. гос. аэрокосм. ун-та. – 2008. – №1(4). – С. 139-146.

8. Остаточные напряжения и сопротивление усталости цилиндрических винтовых пружин / В.А.Кирпичёв [и др.] // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.Физ.-мат. науки. – 2008. – № 2 (17). – С. 254-257.

9. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами при различных видах деформации /

В.А.Кирпичёв // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 3 (7). – С. 138-142.

10. Расчётно-экспериментальное исследование устойчивости остаточных напряжений в упрочнённом слое цилиндрического изделия к температурным нагрузкам /М.Н. Саушкин [и др.] // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.Физ.-мат. науки. – 2009. – № 1 (18). – С. 101-113.

11. Саушкин, М.Н. Феноменологический подход к моделированию напряжённо-деформированного состояния в поверхностно упрочнённом слое цилиндрического изделия / М.Н. Саушкин, В.А.Кирпичёв, В.А.Смыслов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер.Физ.-мат. науки. – 2009. – № 1 (18). – С. 159-168.

12. Павлов, В.Ф. Определение остаточных напряжений в цилиндрических образцах с V-образными надрезами / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, Ю.И. Кольцун // Известия вузов. Авиационная техника. – 1986. – №4. – С. 92-95.

13. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости при асимметричном цикле в случае растяжения-сжатия/ В.Ф. Павлов [и др.]// Известия вузов. Авиационная техника. – 1989. – №8. – С. 14-18.

14. Павлов, В.Ф. Остаточные напряжения в образцах прямоугольного сечения с надрезами V-образного профиля/ В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, С.А. Бордаков // Известия вузов. Авиационная техника. – 1989. – №9. – С. 6-10.

в других изданиях:

15. Павлов, В.Ф. Определение остаточных напряжений в плоских образцах с V-образными надрезами/ В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, Ю.И. Кольцун // Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов. Тезисы докладов II Всесоюзной конференции 1-3 июля 1986 г. – Куйбышев, 1986. – С. 106.

16. Оценка предельной амплитуды цикла напряжений резьбовых деталей по остаточным напряжениям/ В.Ф. Павлов [и др.] //«Авиационная промышленность». – 1992. – №2. – С. 8-11.

17. Павлов, В.Ф. Прогнозирование предела выносливости упрочнённых образцов с концентраторами при нормальной температуре / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк // Физика прочности и пластичности материалов: Труды XVII Международной конференции. – Самара, 2009. – С. 233.

18. 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.

19. Саушкин, М.Н. Напряжённо-деформированное состояние поверхностно упрочнённого слоя цилиндрического изделия/ Саушкин М.Н., Кирпичев В.А., Смыслов В.А. // Физика прочности и пластичности материалов: Труды XVII Международной конференции. – Самара, 2009. – С. 231.

20. Кирпичёв, В.А. Расчётно-экспериментальное моделирование остаточных напряжений в полых цилиндрических деталях после дробеструйной обработки / В.А.Кирпичёв, М.Н. Саушкин // Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов: Труды седьмой международной конференции. – Ульяновск, 2009. – С. 244-245.

21. Кирпичёв, В.А. К математическому моделированию полых пластических деформаций, возникающих при различных видах упрочняющей обработки / В.А.Кирпичёв, М.Н. Саушкин, В.А.Смыслов //Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов: Труды седьмой международной конференции. – Ульяновск, 2009. – С. 116-117.

22. Кирпичёв, В.А. Расчётно-экспериментальное моделирование остаточных напряжений в полых цилиндрических деталях после дробеструйной обработки / В.А.Кирпичёв, М.Н. Саушкин // Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов: Труды седьмой международной конференции. – Ульяновск, 2009. – С. 116-117.

23. Остаточные напряжения и предел выносливости упрочнённых деталей с концентраторами при различных видах упрочнения / В.Ф. Павлов [и др.] // Надёжность и долговечность машин и сооружений: Международный научно-технический сборник. – Киев, 2008. – Вып. № 30. – С. 108-113.

24. Влияние остаточных напряжений на предельную амплитуду упрочнённых деталей при различной асимметрии цикла / В.А.Кирпичёв [и др.] // Надёжность и долговечность машин и сооружений: Международный научно-технический сборник. – Киев, 2008. – Вып. № 30. – С. 69-75.

25. 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.

26. Моделирование остаточного напряжённого состояния поверхностного слоя упрочнённых деталей по первоначальным деформациям / В.Ф. Павлов [и др.]// Самар. гос. аэрокосм. ун-т. – Самара, 2008. – 68 с. – Деп. ВИНТИ РАН 07.07.2008 № 584 – в – 2008.

27. Кирпичёв, В.А. Оптимизация режимов упрочнения маложёстких деталей ГТД / В.А.Кирпичёв, А.С. Букатый, В.Ю.Поленов // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. – Самара, 2008. – С. 132-135.

28. Прогнозирование сопротивления усталости упрочнённых деталей с различными концентраторами напряжений / В.А. Кирпичёв [и др.]// Математическое моделирование и краевые задачи: Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. – Самара, 2008. – С. 143-147.

29. Релаксация остаточных напряжений в образцах с надрезами из сплавов ЭИ698ВД и ЖС6У / В.А.Кирпичёв [и др.]// Математическое моделирование и краевые задачи: Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. – Самара, 2008. – С. 139-143.

30. Прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей при различных деформациях / В.А. Кирпичёв [и др.] // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. – Самара, 2008. – С. 135-139.

31. Особенности распределения остаточных напряжений в цилиндрических деталях с отверстием после дробеструйной обработки /

В.Ф. Павлов [и др.] // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды пятой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1. – Самара, 2008. – С. 229-232.

32. Связь остаточных напряжений и предела выносливости упрочнённых деталей различного диаметра / В.Ф. Павлов [и др.] // Проблемы динамики и прочности в газотурбостроении: Тезисы докладов третьей международной научно-технической конференции. – Киев, Украина, 2007. – С. 149-150.

33. Остаточные напряжения и предел выносливости упрочнённых деталей с концентраторами при различных видах нагружения / В.Ф. Павлов [и др.] // Проблемы динамики и прочности в газотурбостроении: Тезисы докладов третьей международной научно-технической конференции. – Киев, Украина, 2007. – С. 147-148.

34. Влияние остаточных напряжений на предельную амплитуду упрочнённых деталей при различной асимметрии цикла / В.А. Кирпичёв [и др.] // Проблемы динамики и прочности в газотурбостроении: Тезисы докладов третьей международной научно-технической конференции. – Киев, Украина, 2007. – С. 83-84.

35. Влияние степени концентрации напряжений на зависимость предела выносливости детали от остаточных напряжений / В.А. Кирпичёв [и др.] // Проблемы динамики и прочности в газотурбостроении: Тезисы докладов третьей международной научно-технической конференции. – Киев, Украина, 2007. – С. 81-82.

36. Влияние масштабного фактора на сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений / В.Ф. Павлов [и др.] // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 2. – Самара, 2007. – С. 174-177.

37. Закономерности распределения остаточных напряжений в упрочнённых цилиндрических деталях с отверстием различного диаметра / В.Ф. Павлов [и др.] // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 2. – Самара, 2007. – С. 171-174.

38. Остаточные напряжения и предел выносливости деталей с концентраторами напряжений при центральном растяжении-сжатии / В.А. Кирпичёв [и др.] // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 2. – Самара, 2007. – С. 124-125.

39. Прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений при повышенных температурах / В.А. Кирпичёв [и др.] // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 2. – Самара, 2007. – С. 122-123.

40. Остаточные напряжения и предел выносливости упрочнённых деталей с концентраторами при повышенных температурах / В.Ф. Павлов [и др.] // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докладов международной научно-технической конференции: Часть II. – Самара, 2006. – С. 67-68.

41. Прогнозирование предела выносливости при изгибе упрочнённых деталей с концентраторами напряжений / В.Ф. Павлов [и др.] // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докладов международной научно-технической конференции. Часть II. – Самара, 2006. – С. 66-67.

42. Павлов, В.Ф. Прогнозирование предельной амплитуды упрочнённых деталей с концентраторами в случае асимметричного цикла нагружения / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, Н.И. Яковенко // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Материалы докладов международной научно-технической конференции. Часть II. – Самара, 2006. – С. 64-65.

43. Остаточные напряжения и предел выносливости при изгибе деталей с концентраторами напряжений / В.Ф. Павлов [и др.] // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды III Всероссийской научной конференции. – Самара, 2006. – С. 152-153.

44. Прогнозирование предела выносливости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений при растяжении-сжатии / В.Ф. Павлов [и др.] // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды III Всероссийской научной конференции. – Самара, 2006. – С. 150-151.

45. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости детали при различной степени концентрации / В.А. Кирпичёв [и др.] // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Труды Международной научно-технической конф. (24-26 июня 2009 г.). – Самара, 2009. – С. 178-179.

46. Моделирование упрочнённого поверхностного слоя маложёстких деталей ГТД / В.А. Кирпичёв [и др.] // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Труды Международной научно-технической конф. (24-26 июня 2009 г.). – Самара, 2009. – С. 175-176.

47. Исследование степени наклёпа и сопротивления усталости сплава ЭИ968 после упрочнения стеклянными и стальными микрошариками / В.А. Кирпичёв [и др.] // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Труды Международной научно-технической конф. (24-26 июня 2009 г.). – Самара, 2009. – С. 180-181.

48. Павлов, В.Ф. Прогнозирование приращения предела выносливости упрочнённых деталей по остаточным напряжениям / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Труды Международной научно-технической конф. (24-26 июня 2009 г.). – Самара, 2009. – С. 163-165.

49. Кирпичёв, В.А. Остаточные напряжения в детали при опережающем поверхностном пластическом деформировании / В.А. Кирпичёв, О.Ю. Семёнова, Е.А. Денискина // Высокие технологии в машиностроении: Тезисы докладов Всероссийской научно-технической интернет-конференции с международным участием (22-25 октября 2008 г.). – Самара, 2008. – С. 37-39.

50. Выбор оптимального режима пневмодробеструйной обработки по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений / В.А. Кирпичёв [и др.] // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды шестой Всероссийской научной конференции с международным участием (1-4 июня 2009 г.). – Самара, 2009. – С. 118-120.

51. Конечно-элементное моделирование поверхностного слоя деталей, подвергаемых упрочнению методами поверхностного пластического деформирования / В.А. Кирпичёв [и др.] // Математическое моделирование и

краевые задачи: Труды шестой Всероссийской научной конференции с международным участием (1-4 июня 2009 г.). – Самара, 2009. – С. 121-122.

52. Выбор оптимальных режимов поверхностного упрочнения трубопроводов холодильных машин по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений / В.А. Кирпичёв [и др.] // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды шестой Всероссийской научной конференции с международным участием (1-4 июня 2009 г.). – Самара, 2009. – С. 123-126.

53. Сопротивление усталости упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений / В.А. Кирпичёв [и др.] // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды шестой Всероссийской научной конференции с международным участием (1-4 июня 2009 г.). – Самара, 2009. – С. 126-131.

54. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости в условиях концентрации напряжений при повышенных температурах / В.Ф. Павлов [и др.] // Надёжность и долговечность машин и сооружений: Международный научно-технический сборник. – Киев, 2006. – Вып. № 27. – С. 16-21.