

Каранаева Оксана Валериевна

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
В УПРОЧНЕННОМ ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ
ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Специальность 01.02.06. – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2006

Работа выполнена на кафедре сопротивления материалов Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (СГАУ).

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор С.А. Бордаков,
доктор технических наук, профессор В.Ф. Павлов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Ю.К. Пономарев,
кандидат физико-математических наук М.Н. Саушкин.

Ведущее предприятие:

ОАО «Самарское конструкторское бюро машиностроения»

Защита диссертации состоится "25" декабря 2006 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.02 при СГАУ по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан "24" ноября 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

В.Н. Матвеев

Актуальность темы диссертации. Обоснование рационального решения инженерных задач, связанных с проектированием машин при минимальной затрате материалов надлежащей прочности и жесткости, которые обеспечат необходимую надежность и заданную долговечность рассматриваемой конструкции является основной задачей современного машиностроения, авиа – и ракетостроения. Решение реальных задач прочности невозможно без внедрения новой прогрессивной технологии, дальнейшего развития теоретических, основанных прежде всего на использовании метода конечных элементов (МКЭ), и экспериментальных исследований в области сопротивления усталости, направленных на повышение прочности, надежности и на увеличение допустимого срока безопасной службы машин и аппаратов современной техники.

Детальному изучению сопротивления усталости деталей, имеющих концентраторы напряжений в последнее время уделяется большое внимание как отечественными, так и зарубежными исследователями. Пластические деформации, предшествующие разрушению, вначале возникают именно в зонах концентрации напряжений, а их развитие в большинстве случаев, особенно при циклическом нагружении, оказывается определяющим для расчета несущей способности элементов конструкций. Поэтому для оценки прочности необходимо установить наиболее точную картину распределения напряжений и деформаций в зоне концентрации.

Также известно, что разрушение любой детали начинается с поверхности. Поэтому важнейшим вопросом прочности современного машиностроения, безусловно, является прочность поверхностных слоев материала элементов конструкции и их сопротивление разрушению в процессе эксплуатации. Поэтому большое практическое значение приобретают различные виды и технологии упрочнения поверхности в зависимости от вида детали, материала, из которого она изготовлена, и условий ее эксплуатации. Применение этих технологий позволяет как существенно повысить сопротивление усталости и контактной коррозии, так и снизить износ деталей. Широкое распространение в машиностроении получило поверхностное пластическое деформирование (ППД), создающее сжимающие остаточные напряжения в поверхностных слоях деталей.

Однако в настоящее время недостаточно изучена проблема перераспределения остаточных напряжений при циклическом нагружении в концентраторах после ППД. Выявление закономерностей этого процесса дает возможность создания методики прогнозирования предела выносливости цилиндрических деталей с концентраторами, принципиально не требующей долговременных и дорогостоящих испытаний на усталость. Поэтому тема диссертации, посвященная проблеме установления закономерностей формирования и перераспределения остаточных напряжений в деталях в условиях действия циклических нагрузок, является актуальной.

Цель диссертации: разработать методику прогнозирования предела выносливости деталей с концентраторами напряжений, упрочненных ППД, с использованием принципов механики остаточных напряжений и с учетом наличия аномальной механической неоднородности поверхностного слоя реальных материалов.

Научная новизна. На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

- модель формирования остаточных напряжений при ППД в цилиндрических деталях с концентраторами напряжений с учетом аномальности механических характеристик поверхностного слоя детали;
- закономерности перераспределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей, упрочненных ППД, под действием переменных нагрузок;
- методика прогнозирования предела выносливости упрочненных ППД деталей с концентраторами напряжений.

Практическая ценность. Разработанная в диссертации методика прогнозирования предела выносливости упрочненных поверхностным пластическим деформированием деталей с концентраторами напряжений позволяет значительно сократить или исключить натурные испытания деталей на усталость.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях и семинарах, в том числе: Второй международной научно-технической конференции «Проблемы динамики и прочности в газотурбостроении» (г. Киев, 2004 г.), Третьей Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2006 г.), Международной научно-технической конференции, посвященной памяти генерального конструктора аэрокосмической техники академика Н.Д.Кузнецова «Проблемы и перспективы двигателестроения» (г. Самара, 2006 г.), НТС кафедры «Сопротивление материалов» СГАУ (предс. к.т.н., доцент В.К.Шадрин), НТС кафедры «Прочности летательных аппаратов» СГАУ (предс. д.т.н., профессор Ю.Л.Тарасов).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка использованной литературы. Содержит 131 страницу машинописного текста, включая 47 рисунков, 12 таблиц и библиографию из 152 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования и изложена цель работы, заключающаяся в создании методики прогнозирования предела выносливости упрочненных цилиндрических деталей с концентраторами.

В **первой главе** проведен анализ литературы по теме диссертации, из которого следует, что проблемам остаточных напряжений, их роли в сопротивлении усталости деталей машин посвящено много работ таких авторов как И.А. Биргер, С.И. Иванов, И.В. Кудрявцев, Н.Н. Давиденков, А.А. Ильюшин, Р.Р. Мавлютов, Г.С. Писаренко, Ю.М.

Работнов, С.В. Серенсен, В.Т. Трошенко, С.А. Бордаков, В.Ф. Павлов и других отечественных и зарубежных исследователей. На основании данных исследований физически неоднородного поверхностного слоя и возникающих в нем остаточных напряжений видно, что теоретические разработки по проблеме остаточных напряжений, особенно в случае их наведения и перераспределения в процессе циклического нагружения, еще не завершены. Не существует достоверной модели формирования остаточных и перераспределения технологических напряжений в поверхностном слое деталей при циклическом нагружении. Существующие методики определения механических характеристик поверхностного слоя не отвечают заданным требованиям точности и не позволяют количественно определить различие пределов текучести на растяжение и сжатие ослабленного поверхностного слоя. Отсутствуют достоверные методики определения механических характеристик упрочненного поверхностным пластическим деформированием слоя.

Известно, что на снижение выносливости материалов влияет концентрация напряжений. Поэтому решение проблемы прогнозирования предела выносливости деталей с концентраторами с использованием достаточно обоснованной математической модели является в настоящее время весьма актуальным.

На основании вышеизложенного был выявлен наиболее точный метод определения остаточных напряжений в поверхностном слое, установлена научная основа для создания математической модели формирования остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании, что позволило сформулировать цель диссертации: разработать научно-обоснованный подход к изучению перераспределения остаточных напряжений при циклическом нагружении, учитывая влияние поверхностного пластического деформирования и физико-механических свойств упрочненного слоя.

Для достижения поставленной цели были выработаны основные задачи:

1. Построить математическую модель формирования остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндрических деталей при поверхностном пластическом деформировании.
2. Изучить влияние механических характеристик ослабленного поверхностного слоя и пластичности материала, различных видов деформации, степени концентрации на величину и распределение остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя, которые формируются при поверхностном пластическом деформировании.
3. Выявить закономерности процесса перераспределения остаточных напряжений в деталях, обработанных поверхностным пластическим деформированием, при циклическом нагружении.
4. Разработать методику расчета предела выносливости цилиндрических деталей, обработанных поверхностным пластическим деформированием, с учетом концентрации напряжений.

Во второй главе были рассмотрены методики экспериментального определения остаточных напряжений и механических характеристик поверхностного слоя гладких образцов и образцов с концентраторами.

Одним из наиболее характерных концентраторов напряжений является кольцевой надрез V – образного профиля, предусмотренный ГОСТ 25.502-79. В качестве объекта исследования в диссертации были взяты цилиндрические образцы с таким надрезом (рис. 1), геометрические параметры представлены в табл.1.

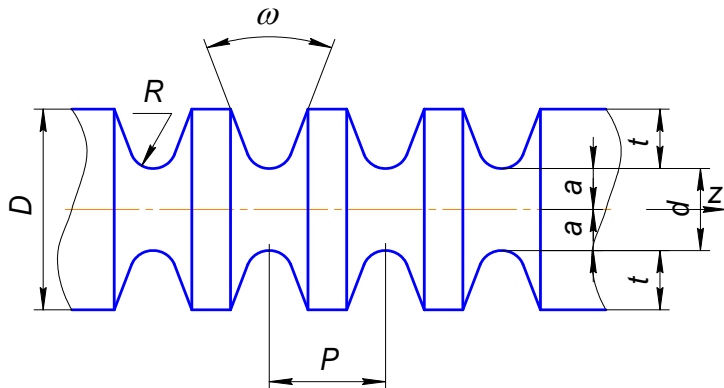


Рис. 1. Цилиндрический образец с надрезами V-образного профиля

Основной задачей эксперимента являлось получение достаточно точного распределения остаточных напряжений в поверхностном слое впадин надрезов. Для решения этой задачи был выбран метод измерения остаточных напряжений в цилиндрических деталях с надрезами V – образного профиля, основанный на

Таблица 1

Геометрические параметры образцов с надрезом V-образного профиля

№ варианта	D, мм	d, мм	a, мм	t, мм	R, мм	ω , град.
1	10,0	5,0	2,5	2,5	0,50	65
2	10,0	5,0	2,5	2,5	0,25	50
3	10,0	5,0	2,5	2,5	2,00	80
4	12,0	7,5	3,75	2,25	0,25	50
5	15,0	7,5	3,75	3,75	0,50	50
6	15,0	7,5	3,75	3,75	0,26	45
7	12,0	7,5	3,75	2,25	1,09	70
8	15,0	7,5	3,75	3,75	1,09	70

определении связи остаточных напряжений и перемещений, возникающих в результате удаления слоев материала в пределах половины поверхности криволинейной части впадины надреза. Было установлено, что увеличение шага между надрезами R свыше $2,5D$ (рис.1) практически не сказывается на величине остаточных напряжений, т.е. каждый из надрезов можно считать одиночно расположенным; основной вклад в деформацию образца вносит зона криволинейной части концентратора, ограниченная углом 40° . Результаты определения остаточных напряжений подвергались статистической обработке по данным 10-15 образцов для каждого исследуемого варианта.

Испытания при статическом растяжении и сжатии проводились на испытательной машине ЦДМ-30. Статические испытания проводились для получения макроскопических механических характеристик материала и ослабленного поверхностного слоя по расчетно-экспериментальной методике. Испытания на усталость, включающие эксперименты с целью определения предела выносливости и циклические испытания с различными базой и нагрузками для исследования остаточных напряжений, проводились для случая растяжения-сжатия на машине УММ-01 и для случая чистого изгиба с вращением - на МУИ-6000. Экспериментальные результаты подвергались статистической обработке с отсеиванием грубых ошибок измерения по специально разработанной программе с применением метода наименьших квадратов и методики, рекомендуемой ГОСТ 11.002-73. Для повышения чистоты эксперимента исследуемая область образцов в районе их наименьшего сечения перед испытаниями

подвергались электрополированию для исключения остаточных напряжений, наведенных при их изготовлении.

Вторая глава также была посвящена вопросу влияния механических характеристик ослабленного поверхностного слоя на величину и распределение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей и установлена зависимость между остаточными напряжениями, формирующимися в процессе циклического нагружения, и характеристиками поверхностного слоя. Это дает возможность связать воедино свойства ослабленного поверхностного слоя и предел выносливости материала через критерий, учитывающий уровень и характер распределения остаточных напряжений. В связи с этим была разработана расчетно-экспериментальная методика определения механических характеристик ослабленного поверхностного слоя по полученному экспериментально распределению остаточных напряжений в образцах с надрезами V-образного профиля, подвергнутых однократно статическому нагружению.

В третьей главе рассматривается процесс формирования остаточных напряжений в поверхностном слое деталей поверхностным пластическим деформированием, обеспечивающим равномерное упрочнение всей поверхности детали. В качестве упрочнения применялась обработка микрошариками, как один из немногих способов ППД, позволяющих упрочнять впадину концентратора с достаточно малыми радиусами его дна.

Построена математическая модель формирования остаточных напряжений в поверхностном слое при ППД. В качестве исходных данных использовались механические характеристики упрочненного физически неоднородного поверхностного слоя, которые определялись по специально разработанной экспериментально-теоретической методике. А в качестве составляющей внешней нагрузки, которая прикладывается в самом начале моделирования и не изменяется во времени, являются изотропные первоначальные деформации, адекватно описывающие остаточные напряжения деформированного состояния упрочненного ППД поверхностного слоя.

Для проверки математической модели формирования остаточных напряжений и доказательства ее работоспособности были проведены расчеты остаточного напряженного состояния так называемых локальных зон упрочнения цилиндрических деталей. При обкатке роликом или шариком без продольной подачи, азотировании и цементации малых зон наблюдаются упрочненные участки длиной, протяженность которых соизмерима с толщиной упрочненного слоя. Расчеты показали, что совпадение полученных и известных результатов удовлетворительное.

Результаты экспериментального определения меридиональных остаточных напряжений (сталь 45) после статического сжатия и растяжения представлены на рис.2. Видно, что при значительных нагрузках в случае сжатия ($k_1=0,6-0,9$, где k_1 -коэффициент перегрузки) наблюдается уменьшение уровня остаточных напряжений на глубине до 75 мкм, а при статическом растяжении до $k_1=1,5$ происходит некоторое увеличение остаточных напряжений на глубине до 45 мкм. Характер распределения остаточных напряжений после испытаний на сжатие указывает на наличие значительного увеличения предела текучести по толщине поверхностного слоя, причем наибольший

рост предела текучести на сжатие наблюдается на поверхности. Аналогичные результаты были получены для других используемых в диссертации материалов.

Расчеты с использованием построенной математической модели, для которой исходными данными служили остаточные напряжения гладкой детали после упрочнения и предварительные сведения о распределении предела текучести на сжатие и растяжение поверхностного слоя, путем подбора адекватного распределения пределов текучести экспериментальным эпюрам остаточных напряжений дали результаты, приведенные на рис.3, где штриховой линией показаны первоначальное распределение пределов текучести неупрочненного поверхностного слоя.

Из характерных особенностей отметим, что предел текучести на сжатие поверхности имеет величину большую, чем у основного материала примерно на 40%, а по сравнению с пределом текучести неупрочненного ослабленного поверхностного слоя он возрос более чем в 2 раза. В то же время предел текучести на растяжение несколько понизился. Наличие экстремума предела текучести на сжатие в зоне границы поверхностного слоя (для стали 45 около

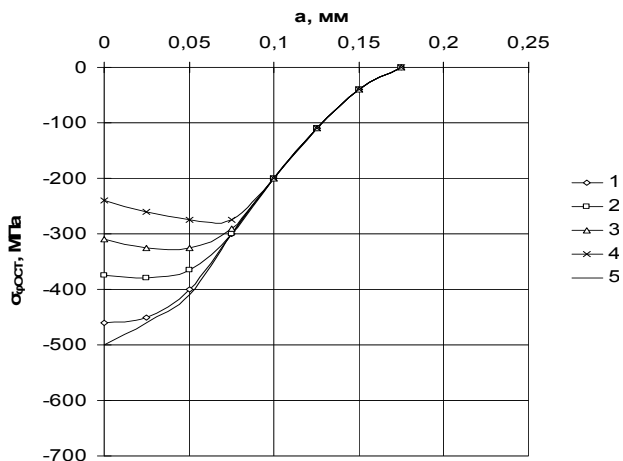


Рис. 2. Распределение меридиональных остаточных напряжений в образцах из стали 45 после статического сжатия (2, 3, 4) и растяжения (5) при 1 - $k_1=0$; 2 - $k_1=0,6$; 3 - $k_1=0,8$; 4 - $k_1=0,9$; 5 - $k_1=1,5$

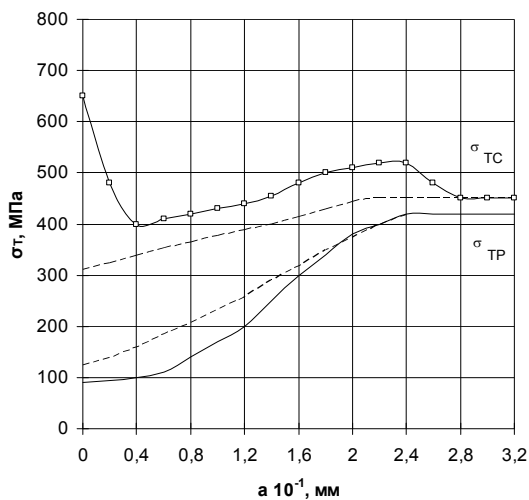


Рис. 3. Распределение по толщине поверхностного слоя пределов текучести на растяжение и сжатие упрочненных ППД образцов из стали 45

200 мкм) является лишь прогнозируемым в связи с невозможностью получить результаты на этой глубине предлагаемым методом.

На основании проведенных исследований разработана методика определения механических характеристик упрочненного ППД физически неоднородного поверхностного слоя деталей:

- из исследуемого материала изготавливаются гладкие образцы и образцы с концентраторами
- образцы подвергаются упрочнению по одинаковым режимам
- по гладким образцам и частично по образцам с надрезами экспериментально определяется распределение остаточных напряжений
- часть образцов с надрезами подвергается статическим испытаниям на сжатие и растяжение
- после статических испытаний образцы с надрезами подвергаются разрушающему методу определения остаточных напряжений поверхностного слоя
- с использованием математической модели определяется распределение пределов текучести на растяжение и сжатие физически неоднородного поверхностного слоя, упрочненного поверхностным пластическим деформированием. В качестве исходных данных используются остаточные напряжения гладкого образца, для которых подбирается соответствующее распределение предварительных деформаций, и остаточных напряжений детали с надрезами после статических испытаний.

Четвертая глава посвящена влиянию поверхностного пластического деформирования и физико-механических свойств упрочненного слоя на перераспределение остаточных напряжений при циклическом нагружении.

Путем расчетных экспериментов было выявлено, что остаточные напряжения в поверхностном слое циклически изменяются. В качестве характеристики остаточного напряженно-деформированного состояния в данном исследовании принимались средние за полный цикл остаточные напряжения $\sigma_{\varphi_{ост}}^{\nabla}$, вычисляемые по формуле:

$$\sigma_{\varphi_{ост}}^{\nabla} = \frac{\sigma_{\varphi_{ост}}^{(1)} + \sigma_{\varphi_{ост}}^{(2)}}{2},$$

где $\sigma_{\varphi_{ост}}^{(1)}$ и $\sigma_{\varphi_{ост}}^{(2)}$ - остаточные напряжения после цикла растяжения и цикла сжатия соответственно, взятые со своим знаком.

Результаты расчета величины $\sigma_{\varphi_{ост}}^{\nabla}$ в физически-неоднородном поверхностном слое цилиндрических образцов с надрезами V-образного профиля, изготовленных из стали 45, представлены на рис.4,

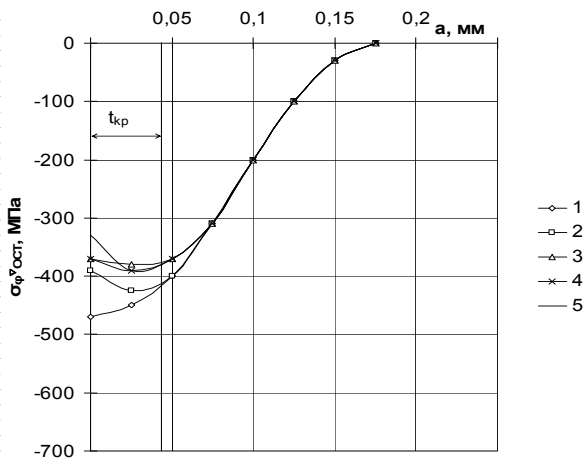


Рис. 4. Перераспределение меридиональных остаточных напряжений в поверхностном слое наименьшего сечения образцов с надрезом V-образного профиля (тип 1, табл.2.1), изготовленных из стали 45 при циклическом растяжении-сжатии: 1 - $k_v=0$; 2 - $k_v=0,8$; 3 - $k_v=0,9$; 4 - $k_v=1,0$; 5 - $k_v=1,1$

где k_v —коэффициент перегрузки, равный отношению действующей нагрузки к нагрузке, соответствующей пределу выносливости детали.

Видно, что с ростом амплитуды внешней нагрузки наблюдается некоторое падение остаточных напряжений, в основном, в слое толщиной, равной глубине нераспространяющейся трещины усталости $t_{кр}$. Причем, начиная со значения k_V от 0,85 до 1,0 наблюдается некоторое увеличение остаточных напряжений в подповерхностном слое при постоянных остаточных напряжениях на поверхности. При дальнейшем увеличении k_V выше 1,0 наблюдается снижение остаточных напряжений на поверхности. Моделирование процесса разгрузки показало, что остаточные напряжения в большей степени восстанавливают свою величину при приближении k_V к значению, равному 0. Основные закономерности, выявленные для стали 45, подтверждаются и для других материалов.

С учетом закономерностей перераспределения остаточных напряжений в образцах при циклическом нагружении была разработана методика прогнозирования предела выносливости упрочненных деталей с концентраторами, заключающаяся в следующем:

- гладкие образцы и образцы с концентраторами напряжений, подвергаются электрополированию с целью удаления наклепанного при изготовлении слоя.
- затем упрочняются микрошариками по одинаковым режимам.
- на гладких образцах определяются остаточные напряжения, наведенные поверхностным пластическим деформированием.
- на образцах с надрезами V-образного профиля (рис.1) с использованием специальной разработанной методики определения механических характеристик наклепанного физически неоднородного слоя определяются пределы текучести на растяжение и сжатие поверхностного слоя.
- используя найденные механические характеристики поверхностного слоя, остаточные напряжения и применяя разработанную математическую модель определяется зависимость критерия сжимающих остаточных напряжений (1) от амплитуды внешней, циклически изменяющейся нагрузки (рис.5 и 6).

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

где $\xi = y/t_{кр}$ - расстояние от поверхности до текущего слоя, выраженное в долях $t_{кр}$.

- определяется экстремальное значение критерия и амплитуда нагрузки, при которой он достигается, соответствует пределу выносливости образца или детали.

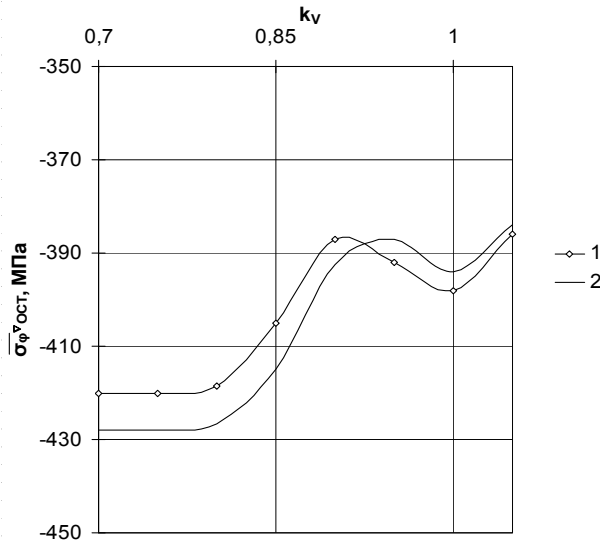


Рис. 5. Зависимость критерия остаточных напряжений от коэффициента перегрузки k_v для образцов с надрезами V-образного профиля (тип 1 и 2 по табл.1), изготовленных из стали 45, при циклическом растяжении-сжатии

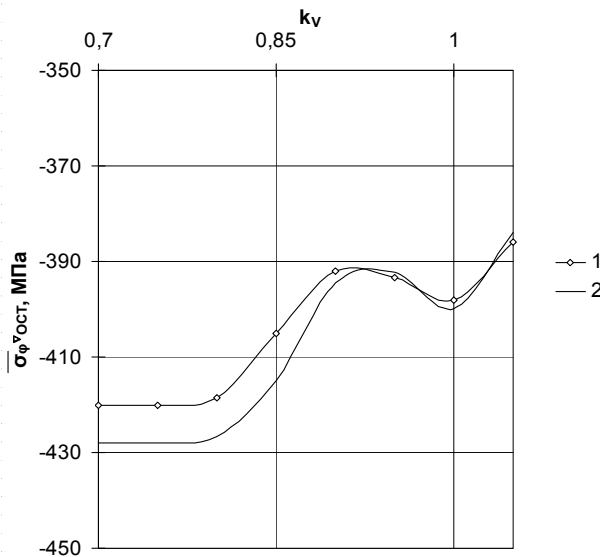


Рис. 6. Зависимость критерия остаточных напряжений от коэффициента перегрузки k_v для образцов с надрезами V-образного профиля (тип 1 и 2 по табл.1), изготовленных из стали 45, при чистом изгибе с вращением

В **заключении** представлены основные результаты и выводы диссертационной работы, основанные на проведенных теоретических исследованиях и подтвержденные испытаниями на усталость:

1. На основании экспериментально-теоретической методики определения механических характеристик неупрочненного физически неоднородного поверхностного слоя с использованием изотропных первоначальных деформаций создана математическая модель формирования остаточных напряжений в деталях с концентраторами после ППД, позволившая решить задачу перераспределения остаточных напряжений при знакопеременных нагрузках.

2. Расчетное исследование остаточных напряжений с использованием созданной математической модели в локальных зонах упрочнения деталей показали хорошее совпадение полученных и известных результатов. При этом выявлены закономерности формирования остаточных напряжений: значительное снижение сжимающих остаточных напряжений в середине зоны упрочнения и увеличение этих напряжений на границе упрочненной и неупрочненной зон.

3. С применением методики определения механических характеристик неупрочненного слоя, созданной Бордаковым С.А., предложена модифицированная методика определения указанных характеристик для упрочненного поверхностного слоя, которая позволила установить нелинейный характер зависимости пределов текучести на растяжение и сжатие по толщине упрочненного поверхностного слоя.

Показано, что предел текучести на сжатие на поверхности имеет величину на 40% большую, чем у основного материала. По сравнению с пределом текучести неупрочненного ослабленного поверхностного слоя эта характеристика возрастает более чем в 2 раза.

4. На базе созданной математической модели формирования остаточных напряжений и методики определения механических характеристик упрочненного поверхностного слоя построена математическая модель перераспределения остаточных напряжений в этом слое цилиндрической детали при циклическом нагружении. Это позволило установить теоретически и подтвердить экспериментально, что независимо от теоретического коэффициента концентрации увеличение коэффициента перегрузки приводит к снижению остаточных напряжений на поверхности, и это снижение тем больше, чем более пластичным является материал.

5. Доказано, что распределение критерия остаточных напряжений в зависимости от изменения внешней нагрузки имеет экстремум при коэффициенте перегрузки, равном единице, т.е. при нагрузке, соответствующей пределу выносливости. Это легло в основу создания методики прогнозирования предела выносливости упрочненных цилиндрических деталей с концентраторами напряжений.

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Павлов В.Ф., Бордаков С.А., Каранаева О.В. Устойчивость остаточных напряжений в резьбовых деталях под действием постоянной и переменной нагрузок // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды 12-ой межвузовской конференции. Часть 1. Самара: СамГТУ, 2002. С.143-145.
2. Павлов В.Ф., Бордаков С.А., Сургутанова Ю.Н., Каранаева О.В. Устойчивость технологических остаточных напряжений в эксплуатации // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды 13-ой межвузовской конференции. Самара: СамГТУ, 2003. С.126-129.
3. Павлов В.Ф., Бордаков С.А., Сургутанова Ю.Н., Каранаева О.В. Влияние эксплуатационных факторов на технологические остаточные напряжения // Проблемы и перспективы двигателестроения: Материалы докладов международной научно-технической конференции. Самара: СГАУ, 2003. С.59.
4. Павлов В.Ф., Бордаков С.А., Сургутанова Ю.Н., Каранаева О.В. Определение механических характеристик упрочненного поверхностного слоя // Проблемы динамики и прочности в газотурбостроении: Тезисы докладов 2-й международной научно-технической конференции. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2004. С.141-142.
5. Каранаева О.В. Механические характеристики упрочненного поверхностного слоя и методика их определения // XXV Российская школа по проблемам науки и технологий, посвященная 60-летию Победы: Тезисы докладов. МИАСС: МСНТ, 2005. С.25.
6. Павлов В.Ф., Бордаков С.А., Сургутанова Ю.Н., Хибник Т.А., Каранаева О.В. Прогнозирование предела выносливости упрочненных деталей // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды Второй Всероссийской научной конференции. Ч. 1. Самара: Сам ГТУ, 2005. С.231-234.
7. Хибник Т.А., Каранаева О.В., Чирков А.В., Николаев А.Н. Расчет предела выносливости по трещинообразованию с использованием принципов механики остаточных напряжений // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды Второй Всероссийской научной конференции. Ч. 1. Самара: Сам ГТУ, 2005. С.290-292.
8. Павлов В.Ф., Бордаков С.А., Сургутанова Ю.Н., Хибник Т.А., Каранаева О.В. Прогнозирование предела выносливости по разрушению деталей, изготовленных методами опережающего поверхностного пластического деформирования / Вестник Сам.ГТУ: Серия физико-математические науки. – 2005. - № 34. С.60-67.
9. Павлов В.Ф., Бордаков С.А., Кирпичев В.А., Вакулюк В.С., Каранаева О.В., Николаев А.Н. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости при повышенных температурах в условиях концентрации напряжений // Динамика, прочность и ресурс машин и конструкций: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. Том 2. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2005. С.145-146.

10. Каранаева О.В. Методика прогнозирования предела выносливости по механическим характеристикам поверхностного слоя деталей // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды Третьей Всероссийской научной конференции. Ч. 1: Математические модели механики, прочности и надежности элементов конструкций. - Самара: СамГТУ, 2006. С. 100-102.
11. Каранаева О.В., Сургутанова Ю.Н. Механические характеристики поверхностного слоя деталей и предел выносливости по разрушению // Проблемы и перспективы двигателестроения: Материалы докладов международной научно-технической конференции. – Самара: СГАУ, 2006. С. 63-64.
12. Павлов В.Ф., Бордаков С.А., Кирпичев В.А., Вакулюк В.С., Каранаева О.В., Николаев А.Н., Яковенко Н.И. Влияние остаточных напряжений на предел выносливости в условиях концентрации напряжений при повышенных температурах // Надежность и долговечность машин и сооружений: Международный научно-технический сборник. Выпуск 27. Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2006. С.16-21.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Печать оперативная. Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз.

СГАУ
443086 Самара, Московское шоссе, 34.