

На правах рукописи

Костичев Владислав Эдуардович

**ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ
ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Самара – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет) на кафедре сопротивления материалов.

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент **Кирпичев Виктор Алексеевич**

Официальные оппоненты:

Радченко Владимир Павлович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика»;

Федорченко Дмитрий Геннадьевич, кандидат технических наук, акционерное общество «Металлист-Самара», главный конструктор.

Ведущая организация:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение «Самарский государственный университет путей сообщения», г. Самара.

Защита состоится 21 декабря 2017 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.08, созданного на базе федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте федерального государственного образовательного учреждения высшего образования при государственном учреждении высшего профессионального образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» по электронному адресу: http://www.ssau.ru/resources/dis_protection/kostichev/.

Автореферат разослан «_____» _____ 20 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д212.215.08
доктор технических наук, доцент

Г. М. Макарьянц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из основных тенденций развития машиностроения в настоящее время является повышение эксплуатационных характеристик и ресурса элементов машин путём оптимизации конструктивных параметров. Основным направлением оптимизации является совершенствование технологии изготовления деталей, позволяющей повысить надёжность и долговечность наиболее ответственных узлов машин, к которым, в частности, относятся и двигатели внутреннего сгорания. Обеспечение указанных показателей осуществляется путём применения различных методов упрочняющей обработки.

Применение упрочняющей обработки позволяет значительно повысить предел выносливости деталей, за счёт формирования благоприятных сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое деталей.

В настоящее время существует множество различных экспериментальных, аналитических и расчётных методов и методик по исследованию влияния остаточных напряжений на сопротивление усталости деталей. С учётом постоянного роста требований к расчёту деталей машин на прочность, допущения и упрощения, общепринятые ещё несколько лет назад, в настоящее время являются причиной появления существенной погрешности при оптимизации конструкции или назначении режимов упрочняющей обработки.

С развитием информационных технологий появилась возможность существенно снизить трудоёмкость решения некоторых задач, связанных с повышением сопротивления усталости деталей, однако потенциал расчётных методов исследования механики образования остаточных напряжений не раскрыт в полной степени и, нередко, для подтверждения результатов расчёта требуется проведение целого комплекса экспериментов.

Минимизация экспериментальных данных, увеличение расчётных методов для оценки влияния упрочняющей обработки на повышение сопротивления усталости деталей машин и, в частности, коленчатых валов тепловых двигателей является актуальной научно-технической и производственной задачей в настоящее время.

Степень разработанности темы диссертации.

На основе обзора методов оценки сопротивления усталости, применяемых на практике, установлено, что определение приращения предела выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений является теоретически обоснованным и практически подтверждённым многочисленными экспериментами методом. Однако данный метод требует экспериментального определения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя детали.

Требуют совершенствования и методы исследования напряжённо-деформированного состояния, имеющие ряд преимуществ, основным из которых является максимальное приближение модели к реальной конструкции.

В ряде работ, представляющих расчётные методы оценки остаточных напряжений, такие попытки были предприняты, но без учёта всего комплекса условий, приближающих расчётную модель к реальной конструкции, таких как: изменение свойств материала в процессе упрочнения, технологических факторов, эксплуатационных нагрузок, их изменения в зависимости от времени.

Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости представлено в работах Биргера И.А., Гликмана Л.А., Давиденкова Н.Н., Иванова С.И., Кравченко Б.А., Кудрявцева И.В., Одингга И.А., Папшева Д.Д., Туровского М.Л., Школьника Л.М., Подзея А.В., Абрамова В.В., Головина Г.Ф., Борздыка А.М., Гецова Л.Б., а также зарубежных учёных Алмена И., Бюлера Г., Дои О., Закса Г., Тума А., Макклинтока Ф., Аргона А. и других.

В большинстве работ оценка сопротивления усталости коленчатых валов производится на основе анализа напряжённо-деформированного состояния, полученного методом конечных элементов в статической постановке. Основным недостатком данных подходов является отсутствие учёта влияния упрочняющей обработки или постановка задачи с рядом допущений, приводящих к появлению значительных погрешностей.

Предприняты попытки оценки влияния остаточных напряжений, возникающих после упрочнения коленчатого вала методами поверхностного пластического деформирования, однако недостаточно исследован вопрос анализа и оценки напряжённо-деформированного состояния коленчатого вала под действием рабочих нагрузок с учётом упрочняющей обработки.

Цель работы. Повышение сопротивления усталости коленчатых валов тепловых двигателей путём разработки и внедрения комплексной методики анализа и оценки динамическим моделированием напряжённо-деформированного состояния, учитывающей совместное действие технологических факторов, а также различные виды эксплуатационных нагрузок.

Задачи исследования:

- разработать комплексную методику анализа и оценки динамическим моделированием напряжённо-деформированного состояния, учитывающую совместное действие технологических факторов, различных видов эксплуатационных нагрузок и упрочняющей обработки;

- исследовать напряжённо-деформированное состояние коленчатого вала после упрочнения методом обкатки роликом с учётом совместного действия технологических факторов и различных видов эксплуатационных нагрузок;

- используя разработанную комплексную методику анализа и оценки напряжённо-деформированного состояния, исследовать характер распределения остаточных напряжений в концентраторах напряжений и оценить их влияние на сопротивление усталости коленчатого вала;

- исследовать возможность повышения сопротивления усталости коленчатого вала в условиях существующего производства;

- разработать методику контроля изменения начальных конструктивных размеров вала и определения величины технологических деформаций в результате упрочнения поверхности вала.

Научная новизна.

1. Впервые с помощью средств расчётной системы ANSYS/LS-DYNA разработана комплексная методика анализа и оценки напряжённо-деформированного состояния коленчатых валов тепловых двигателей, учитывающая совместное действие технологических факторов, различных видов эксплуатационных нагрузок и позволяющая проводить расчёт приращения предела выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений.

2. Установлена связь между пределом выносливости и остаточными напряжениями в галтельных переходах к цилиндрической части шейки коленчатого вала.

3. Разработана методика анализа влияния различных режимов упрочнения на изменение первоначальных конструктивных размеров коленчатого вала.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что:

- доказаны повышение точности и достоверности оценок сопротивления усталости коленчатого вала при учёте совместного действия технологических факторов и различных видов эксплуатационных нагрузок.

- разработанный комплекс методик и приёмов оценки напряжённо-деформированного состояния коленчатых валов позволяет расширить границы применения методов вычислительной прочности.

Практическая значимость работы

Разработанная в диссертации комплексная методика оценки динамическим моделированием напряжённо-деформированного состояния коленчатых валов тепловых двигателей позволяет минимизировать объём экспериментальных исследований при оптимизации параметров упрочняющей обработки методами поверхностно-пластического деформирования.

Методы исследований.

Работа выполнена на основе классических методов теории упругости, теории пластичности и ползучести, механики деформируемого твёрдого тела. Расчёты НДС реализованы с использованием метода конечных элементов в среде программного комплекса ANSYS/LS-DYNA. Обработка результатов экспериментов осуществлялась с применением статистических методов и компьютерной техники.

Положения, выносимые на защиту.

1. Комплексная методика анализа и оценки напряжённо-деформированного состояния коленчатого вала, включающая в себя:

- методику расчёта напряжённо-деформированного состояния деталей, упрочнённых различными методами поверхностного пластического деформирования;

- методику расчёта напряжённо-деформированного состояния деталей под действием рабочих нагрузок;
- методику расчёта приращения предела выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений.

2. Результаты исследования остаточных напряжений в образцах и деталях с концентраторами напряжений с использованием разработанных методик.

3. Оценка влияния остаточных напряжений на предел выносливости коленчатого вала теплового двигателя.

4. Методика оценки влияния остаточных напряжений после упрочнения на технологические остаточные деформации деталей тепловых двигателей.

5. Рекомендации о путях использования результатов диссертации в практике назначения оптимальных способов и режимов упрочнения коленчатых валов тепловых двигателей.

Степень достоверности и апробации результатов обусловлена корректностью постановки задач исследования, использованием апробированных аналитических и численных методов анализа и расчёта, проведением расчётов на современной вычислительной технике, корректным заданием исходных данных, а также совпадением теоретических расчётов с экспериментальными результатами, полученными в диссертации, а также результатами других авторов.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы позволили произвести оптимизацию упрочняющей обработки коленчатого вала двигателя ЯМЗ-238 на ПАО «Автодизель» (г. Ярославль).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, из них 4 в периодических научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, содержит 192 страницы текста, 72 рисунка, 25 таблиц, 2 приложения и список литературы из 188 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель проведённого исследования и перечень положений, вынесенных на защиту.

В **первой главе** даётся аналитический обзор литературы, посвящённой вопросам расчётного и экспериментального исследования остаточных напряжений и их влияния на сопротивление усталости в условиях концентрации напряжений.

Рассмотрены методы оценки приращения предела выносливости, применяемые в расчётах на прочность. Установлено, что наиболее актуальным является теоретически обоснованный и подтверждённый многочисленными экспериментальными данными метод определения приращения предела выносливости по критерию средних интегральных остаточных напряжений.

Во **второй главе** дано описание математической модели метода динамического моделирования, разработана комплексная методика анализа и

оценки динамическим методом напряжённо-деформированного состояния коленчатого вала.

Разработан универсальный алгоритм анализа упрочняющей обработки и её влияния на напряжённо-деформированное состояние деталей в рабочих условиях, под реализацию которого выбран программный продукт ANSYS/LS-DYNA.

Разработана ANSYS-совмещенная подпрограмма для расчёта приращения предела выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений с использованием результатов.

С помощью разработанной комплексной методики предусмотрено решение трех типов задач:

- а) моделирование процесса упрочнения в явной постановке;
- б) учёт остаточных напряжений после упрочнения для оценки влияния напряжённо-деформированного состояния детали под действием рабочих нагрузок;
- в) определение приращения предела выносливости по результатам расчётов напряженно-деформированного состояния после упрочнения.

Проведена оценка адекватности разработанной методики на стандартных образцах:

- оценка влияния изменений свойств материала по времени, выполненная на примере расчёта процесса испытаний при растяжении по жёсткому синусоидальному циклу стандартных цилиндрических образцов;

- оценка влияния параметров конечно-элементной модели на напряжённо-деформированное состояние рассмотренная на примере процесса обкатки роликом гладких цилиндрических образцов;

- оценка возможности применения разработанной методики для быстропротекающих по времени процессов поверхностно-пластического деформирования рассмотренная на примере моделирования дробеструйной обработки пластины;

- оценка возможности применения разработанной методики для процессов, характеризующихся наличием больших значений коэффициента трения скольжения при упрочнении, рассмотренная на примере алмазного выглаживания.

Сравнение расчётов по разработанной комплексной методике с экспериментальными данными других авторов показало хорошую сходимость разработанной методики.

В **третьей главе** выполнена оценка адекватности разработанной методики в производственных условиях ПАО «Автодизель» на примере коленчатого вала двигателя ЯМЗ-238, подвергаемого упрочнению методом обкатки галтелей коренных и шатунных шеек роликом.

Процесс упрочнения представляет собой обкатку галтели радиусом $R = 6$ мм роликом с профильным радиусом $r = 5,75$ мм, изготовленным из стали P25. Формирование требуемого уровня остаточных напряжений обеспечивается за 10 оборотов вала без продольной подачи ролика с усилием $F = 1$ кН. Диаметр

шатунной шейки $D = 88$ мм. Коленчатый вал ЯМЗ-238 изготовлен из стали 50Г с последующим улучшением и закалкой токами высокой частоты цилиндрической части коренных и шатунных шеек. Обкатка производится на специальном станке фирмы «Hegenscheidt».

В результате расчётов с использованием разработанной методики получено НДС коленчатого вала после упрочнения методом обкатки, с помощью которого получено распределение осевых остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя в опасном сечении (рисунок 1).

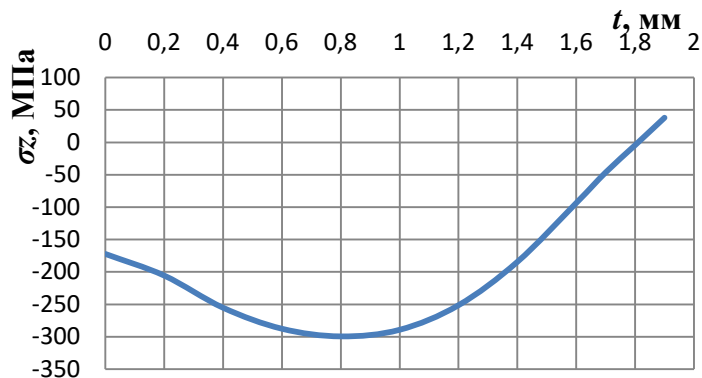


Рисунок 1 – Эпюра осевых остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя вала в опасном сечении

На основе анализа индикаторной диаграммы работы двигателя внутреннего сгорания ЯМЗ-238 созданы модели фрагментов поршневой группы (поршневые пальцы, шатуны, подшипники скольжения) а также установлен номер шатунной шейки и угол поворота коленчатого вала в момент максимальной нагрузки.

После получения НДС упрочнённого фрагмента вала внесены изменения в расчётную модель, позволяющие оценить НДС коленчатого вала под действием рабочих нагрузок, сохраняя при этом остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое, полученные на первом этапе.

В результате расчётов получено НДС коленчатого вала под действием рабочих нагрузок с учётом упрочняющей обработки.

Отмечено, что под действием рабочих нагрузок происходит снижение растягивающих напряжений по поверхности галтели упрочнённого и неупрочнённого вала до 18%. Применение упрочняющей обработки приводит к существенному повышению предела выносливости по отношению к неупрочнённому валу, однако также приводит к падению уровня остаточных напряжений сжатия, вследствие наличия короткой зоны упрочнения.

По результатам проведённых исследований предложены мероприятия по повышению предела выносливости за счёт снижения эффекта короткой зоны и оптимизации режимов упрочняющей обработки.

Установлено, что увеличение упрочняемого участка галтели более чем на 6 мм приведёт практически к полному снятию эффекта короткой зоны (рисунок 2 и 3), однако, учитывая конструктивные особенности вала, увеличение зоны упрочнения для применяемого метода допустимо лишь не более чем на 1 мм.

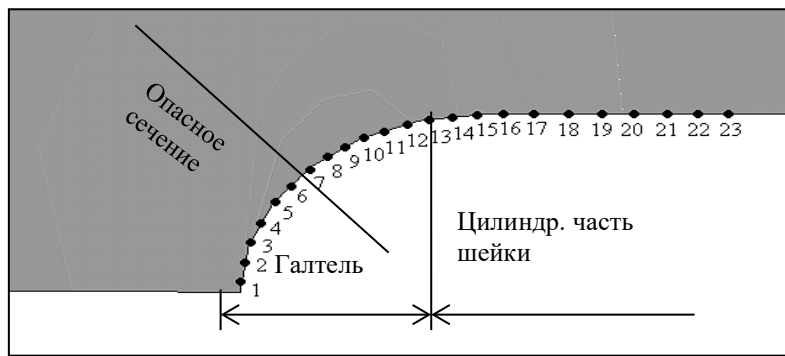


Рисунок 2 – Схема для построения распределения напряжений по поверхности галтели под действием рабочих нагрузок

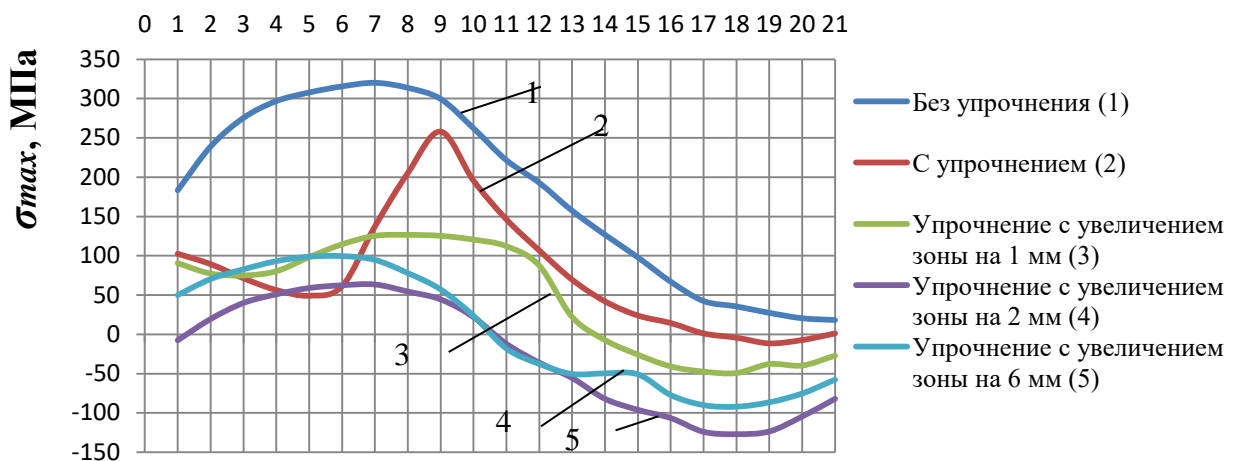


Рисунок 3 - Распределение напряжений по поверхности галтели под действием рабочих нагрузок

Произведён анализ геометрических параметров упрочняемого ролика, на основании которого предложено увеличение контактной площадки ролика с обеспечением выхода рабочей части профиля на цилиндрическую часть шатунной шейки.

По разработанной методике произведены расчёты для базового технологического процесса упрочнения и модернизированного роликом новой конфигурации. Распределение осевых остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя для различных вариантов упрочнения представлено на рисунке 4.

Для обеспечения требуемого уровня сжимающих остаточных напряжений при обкатке роликом с новым профилем исследовались режимы упрочнения отличные от базовых, как по усилию обкатки, так и по числу оборотов коленчатого вала. Усилие обкатки для ролика с большей контактной площадкой было увеличено с 1кН до 1,3 кН.

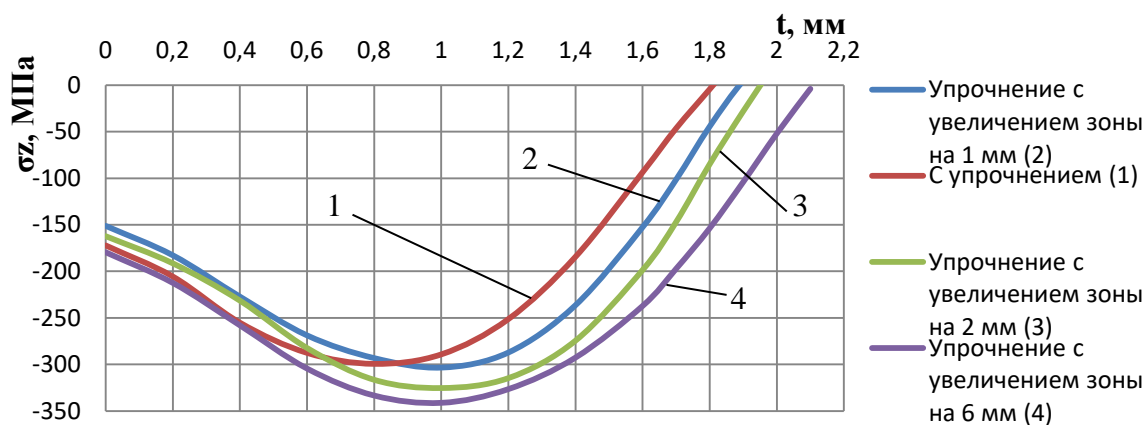


Рисунок 4 - Распределение осевых остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя

На основе расчётов получено распределение осевых сжимающих остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя для базового и нового процесса упрочнения на различных режимах (рисунок 5).

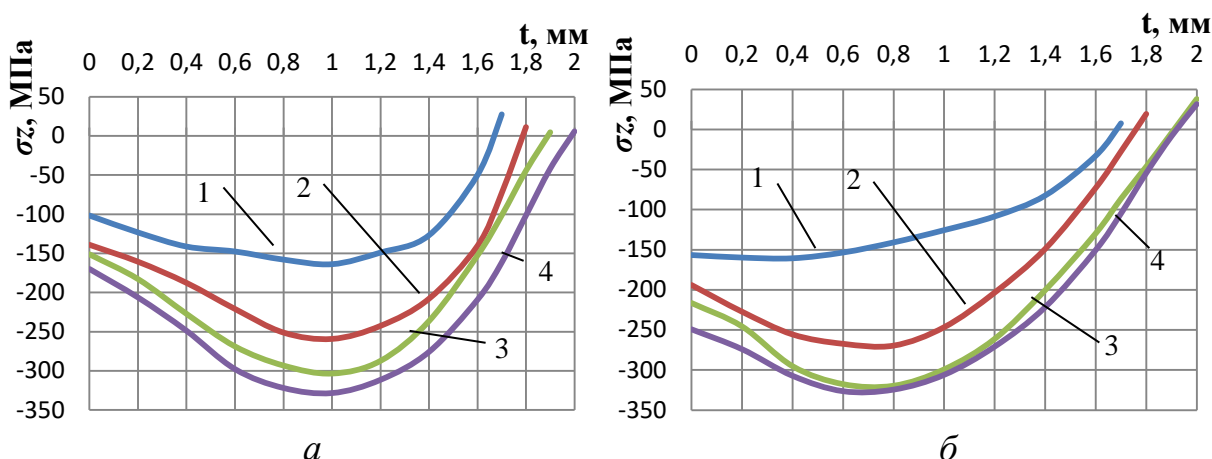


Рисунок 5 - Распределение осевых остаточных напряжений в поверхностном слое галтелей: *а* – с базовым профилем, *б* – с новым профилем.

Количество оборотов обкатного ролика:

1 – 5 оборотов; 2 – 10 оборотов; 3 – 15 оборотов; 4 – 20 оборотов

На основании полученных результатов разработана конструкция обкатного ролика нового профиля, даны рекомендации по корректировке режимов упрочнения и установлено, что для полного снятия эффекта короткой зоны необходимо увеличение упрочняемого участка более чем на 6 мм.

В четвёртой главе проведена оценка приращения предела выносливости по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений деталей с применением разработанной комплексной методики стандартных образцов, подвергаемых упрочнению методом обкатки и алмазного выглаживания. Результаты расчётов для стандартных образцов сравнивались с экспериментальными данными других авторов (таблица 1).

Для проверки предложенных в главе 3 мероприятий по повышению сопротивления усталости вала, в производственных условиях ПАО

«Автодизель» изготовлены ролики и произведена обкатка по базовому и новому технологическому процессу упрочнения.

Таблица 1 – Результаты расчётов и эксперимента

Метод упрочнения	Упрочняемая деталь	Параметр	Эксперимент	Расчёт	Погрешность определения ΔP_R
Обкатка роликом с продольной подачей	Валик $d=10$ мм	σ_{-1} , МПа	280	-	16%
		$t_{кр}$, мм	0,198	0,216	
		$\bar{\psi}_p$	0,384	0,384	
		$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	-273	-317	
		ΔP_R	105	121,7	
Алмазное выглаживание	Валик $d=7,5$ мм	σ_{-1} , МПа	380	-	7%
		$t_{кр}$, мм	0,160	0,164	
		$\bar{\psi}_p$	0,356	0,356	
		$\bar{\sigma}_{ост}$, МПа	-422	-451,9	
		ΔP_R	150,2	160,9	

Испытания коленчатого вала на усталость при изгибе в случае симметричного цикла проводили на специальном электромеханическом стенде, база испытаний $10 \cdot 10^6$ циклов нагружения. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний коленчатого вала на усталость

№ щеки	Нагрузка, $2M_u$, кНм	Число циклов нагружения до появления трещины, млн. циклов		Предел выносливости вала при изгибе по данным бюро расчётно-динамических исследований ПАО «Автодизель»	
		Базовый процесс	Новый процесс	Базовый процесс	Новый процесс
1	9,0	0,83	0,84	-	-
2	8,0	10,0	10,0	404 МПа	-
3	8,5	2,0	2,08	-	-
4	8,5	0,975	2,2	-	-
5	8,1	1,3	10,0	-	420 МПа
6	7,5	10,0	10,0	-	-
ΔP_R по результатам испытаний				16 МПа (что составляет 4%)	

Произведена оценка приращения предела выносливости коленчатого вала двигателя ЯМЗ-238 по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений для базового и модернизированного процесса упрочнения галтелей шатунных шеек. Приращение предела выносливости ΔP_R упрочнённой детали с остаточными напряжениями при использовании критерия $\bar{\sigma}_{ост}$ определяли по формуле (1).

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_p \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (1)$$

где $\bar{\psi}_p$ - коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению, $\bar{\sigma}_{ост}$ - среднеинтегральные ОН, определяемые по формуле (2).

$$\bar{\sigma}_{осм} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi \quad (2)$$

Коэффициент $\bar{\psi}_\sigma$ влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости детали в случае симметричного цикла при изгибе и в зависимости от степени концентрации напряжений определялся по следующим формулам (3) и (4):

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081\alpha_\sigma \quad (3)$$

$$\bar{\psi}_\sigma = 0,612 - 0,081K_\sigma, \quad (4)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений при изгибе, K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений.

Теоретический коэффициент концентрации напряжений при изгибе определялся расчётным методом, средствами программного комплекса ANSYS с использованием осесимметричных гармонических конечных элементов.

Результаты расчётов приращения предела выносливости по базовому и новому процессу, а также результаты эксперимента представлены в таблице 3. Приращение предела выносливости составило от 4,13% до 13,7%.

Таблица 3 – Результаты расчётов и испытаний коленчатого вала на усталость

Параметр	Базовый вариант		Новый вариант			
	Испытания	Расчёт	Испытания (увеличение участка на 1 мм)	Расчёт (увеличение участка на 1 мм)	Расчёт (увеличение участка на 2 мм)	Расчёт (увеличение участка на 6 мм)
σ_{-1} , МПа	404	-	420	-	-	-
$t_{кр}$, мм	1,7	1,9	2	1,9	1,9	1,9
α_σ^u	-	1,056	-	1,056	1,056	1,056
$\bar{\psi}_p$	-	0,526	-	0,526	0,526	0,526
$\bar{\sigma}_{осм}$, МПа	-	-153,2	-	-184,98	-211,7	262,34
ΔP_R , МПа	-	80,58	-	97,3	111,35	137,99
ΔP_R по результатам расчётов			16,72 МПа (4,13%)		28,66 (7,1%)	55,3 (13,7%)

В пятой главе изучалось влияние остаточных напряжений, возникающих в результате упрочнения коленчатого вала методом обкатки роликом, на технологические остаточные деформации, которые приводят к отклонению конструктивных размеров вала. Рассмотрено влияние остаточных напряжений после обкатки роликами базового и нового профилей.

Средствами программного комплекса ANSYS создана геометрически уточнённая конечно-элементная модель фрагмента коленчатого вала с отдельно выделенным поверхностным слоем, в который загружались начальные осевые остаточные напряжения сжатия, полученные в третьей главе, для базового и нового вариантов процесса упрочнения соответственно.

На основе анализа полученных деформаций выявлены основные отклонения размеров от конструкторской документации для двух вариантов упрочнения (таблица 4).

Таблица 4 – Отклонения основных размеров коленчатого вала

Параметр	По КД	Расчёт по базовому тех. процессу	Расчёт по-новому тех. процессу
Диаметр шатунной шейки D , мм	88 ^{-0,022}	87,9987	88,0000
Расстояние между щеками L , мм	83 ^{+0,14}	83,0075	83,0093

По результатам расчётов сделан вывод о возможности оценки технологических остаточных деформаций как после упрочнения поверхности поверхностным пластическим деформированием, так и после химической и химико-термической обработки. Для реализации такой оценки необходима эпюра распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя, которую можно получить с помощью разработанной комплексной методики.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведённого исследования решена научно-техническая задача, имеющая существенное значение для повышения прочности и надёжности коленчатых валов тепловых двигателей.

Основные результаты и выводы выполненной работы выражаются в следующем.

1. Разработана комплексная методика анализа и оценки напряжённо-деформированного состояния деталей тепловых двигателей динамическим моделированием с применением расчётной системы ANSYS/LS-DYNA, учитывающая совместное действие технологических факторов, различные виды эксплуатационных динамических нагрузок и позволяющая с помощью разработанной ANSYS-совмещённой подпрограммы проводить оценку приращения предела выносливости коленчатых валов по критерию среднеинтегральных остаточных напряжений. Подтверждена достоверность разработанной комплексной методики на стандартных образцах, упрочнённых различными видами поверхностного пластического деформирования, путём сравнения расчётов с экспериментальными данными других авторов.

2. Путём численных экспериментов с использованием разработанной комплексной методики в системе ANSYS/LS-DYNA выполнен анализ напряжённо-деформированного состояния коленчатого вала после упрочнения методом обкатки роликом с учётом рабочих нагрузок, соответствующих реальному циклу работы теплового двигателя. Используя напряжённо-деформированное состояние коленчатого вала, в концентраторах напряжений получено расчётное распределение остаточных напряжений в поверхностном слое галтелей после упрочнения по заводской технологии. Эти напряжения в дальнейшем использовались для прогнозирования сопротивления усталости коленчатого вала.

3. Установлено, что существующие на предприятии режимы упрочнения шеек коленчатых валов, а также форма обкатного ролика не в полной мере

обеспечивают уровень сжимающих остаточных напряжений для обеспечения безаварийной работы валов. Главной причиной разрушения коленчатых валов является недостаточная протяжённость зоны упрочнения, связанная с особенностями конструкции вала и процесса его упрочнения.

4. Расчётным методом с использованием данных анализа и оценки напряжённо-деформированного состояния коленчатого вала разработана форма нового обкатного ролика с изменённой рабочей поверхностью, обеспечивающего упрочнение не только галтели, но и цилиндрической части шатунной шейки.

Применение ролика новой конфигурации привело к увеличению приращению предела выносливости коленчатого вала на 13,7% по сравнению с штатным роликом.

5. Разработана методика анализа влияния различных режимов упрочнения на изменение первоначальных конструктивных размеров коленчатого вала, позволяющая дать оценку технологических остаточных деформаций как после упрочнения поверхности поверхностным пластическим деформированием, так и после химической и химико-термической обработки. Необходимую для этих целей эпюру распределения остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя можно получить с помощью комплексной методики оценки напряжённо-деформированного коленчатых валов тепловых двигателей.

6. Представленные в диссертации методики расчёта и результаты исследований использованы на ПАО «Автодизель» (г. Ярославль) (Приложение 1) для прогнозирования приращения предела выносливости коленчатого вала и подтверждены актом внедрения (Приложение 2).

Таким образом, поставленная цель диссертации достигнута.

В дальнейших исследованиях предполагается развивать разработанные в диссертации методики количественной оценки напряжённо-деформированного состояния и предела выносливости коленчатых валов тепловых двигателей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из перечня ВАК Минобрнауки России:

1. Букатый, А.С. Повышение сопротивления усталости деталей технологическими методами с использованием динамического моделирования [Текст] / Е.А. Денискина, А.С. Букатый, **В.Э. Костичев** // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева (национального исследовательского университета). – 2013. - №3(10) Ч.2. — С. 41-45.

2. Вакулюк, В.С. Определение положения опасного сечения в шлицевых деталях [Текст] / В.С. Вакулюк, В.П. Сазанов, О.Ю. Семенова, С.А. Колычев, **В.Э. Костичев** // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2014. – Т.16. - №6(2) — С. 382-384.

3. **Костичев, В.Э.** Применение динамического моделирования для оценки влияния упрочняющей обработки на сопротивление усталости [Текст] / В.Э. Костичев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева (национального исследовательского университета). – 2015. - № 1(14) Ч. 1. — С. 147-153.

4. Павлов, В.Ф. Определение положения опасного сечения в шлицевых деталях [Текст] / В.Ф. Павлов, Н.А. Сургутанов, В.В. Сазанов, П.А. Шляпников, **В.Э. Костичев** // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т.16. - №6(2) – Самара, 2014. - С. 550-554.

В других изданиях:

5. Букатый, А.С. Исследование НДС коленчатого вала после упрочнения методами поверхностного пластического деформирования [Текст] / А.С. Букатый, **В.Э. Костичев** // 10-я международная конференция «Покрывтия и обработка поверхности». М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2013. – С. 22.

6. Букатый, А.С. Исследование НДС коленчатого вала после упрочнения методами поверхностного пластического деформирования [Текст] / А.С. Букатый, **В.Э. Костичев** // Сборник тезисов «66 научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием». – Ярославль: ЯГТУ, 2013.- С. 179.

7. Павлов, В.Ф. Влияние диаметра упрочнённых цилиндрических образцов из стали 20 на предел выносливости [Текст] / В.Ф. Павлов, Г.В. Семкин, А.Е. Кундыкеров, **В.Э. Костичев** // II всероссийская молодежная научная конференция «Современное техническое образование и транспортный комплекс России: состояние, проблемы и перспективы развития» - филиал ФГБОУ «Самарский государственный университет путей сообщения» 2014. – С.168-169.

8. Букатый, А.С. Оптимизация режимов упрочнения коленчатого вала на основе исследования его напряженно-деформированного состояния [Текст] / А.С. Букатый, **В.Э. Костичев** // 67 научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. - Ч.1. – Ярославль: ЯГТУ, 2014. - С.193.

9. Букатый, А.С. Разработка метода исследования деталей тепловых двигателей в концентраторах напряжений с учётом упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.С. Букатый, С.А. Букатый, **В.Э. Костичев** // Сборник тезисов докладов 16-ой международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика». - СПб.: С.-П. гос. политехн. ун-т, 2014. – С. 121-123.

10. Павлов, В.Ф. Назначение наиболее рациональных по сопротивлению усталости режимов поверхностного упрочнения деталей с концентраторами напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов, А.П. Филатов, В.В. Сазанов, В.Э. Костичев // VIII Российская научно-техническая конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций». – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2014. - С. 31.

11. Букатый, А.С. Повышение сопротивления усталости деталей технологическими методами с использованием динамического моделирования [Текст] / А.С. Букатый, Е.А. Денискина, **В.Э. Костичев** // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». - Том 1.– Самара: СГАУ, 2014. - С. 231-232.

12. Букатый, А.С. Применение динамического моделирования к решению упруго-пластических задач [Текст] / А.С. Букатый, С.А. Букатый, **В.Э. Костичев** // 2-ая международная научно-техническая конференция «Динамика и виброакустика машин». Самара. 2014. - С.427-430.

13. **Костичев, В.Э.** Влияние диаметра упрочнённых образцов из стали 20 на предел выносливости [Текст] / В.Э. Костичев, Г.В. Семкин, А.Е. Кундыкеров //

«Современное техническое образование и транспортный комплекс России: состояние, проблемы и перспективы развития». II всероссийская молодёжная научная конференция. - Уфа-Самара: СамГУПС, 2014. - С. 168-169.

14. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления многоциклового усталости поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов, А.С. Букатый, О.Ю. Семенова, В.В. Сазанов, **В.Э. Костичев** // 5-ая международная научно-техническая конференция «Проблемы динамики и прочности в турбомашиностроении». - Украина. Киев: Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, 2014. - С. 179-180.

15. Букатый, А.С. Динамическое моделирование сквозного упрочнения кромок лопаток ГТД [Текст] / А.С. Букатый, Е.А. Денискина, **В.Э. Костичев** // III всероссийская научно-техническая конференция «Теоретические и практические аспекты развития отечественного авиастроения». - Ульяновск. УлГТУ, 2014. - С. 21-23.

16. Павлов, В.Ф. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых валов с напесованной втулкой по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.П. Сазанов, О.В. Каранаева, А.С. Букатый, **В.Э. Костичев** // Вестник УГАТУ. - 2015. - Том 19. - №1(67). - С. 79-84.

17. Семенова, О.Ю. Зависимость предела выносливости от диаметра поверхностно упрочнённых деталей с концентраторами напряжений [Текст] / О.Ю. Семенова, В.В. Лунин, **В.Э. Костичев**, О.М. Пилипив // XVIII всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара: СГАУ, 2015. С. 55-59.

18. Шадрин, В.К. Исследование влияния протяжённости зоны упрочнения на распределение напряжений в галтельных переходах коленчатого вала под действием рабочих нагрузок [Текст] / В.К. Шадрин, В.В. Сазанов, **В.Э. Костичев**, Н.Ю. Николаев // XVIII всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара: СГАУ, 2015. - С. 31-33.

19. Сазанов, В.П. Влияние поверхностного упрочнения на многоцикловую усталость цилиндрических деталей из конструкционных сталей [Текст] / В.П. Сазанов, О.Ю. Семенова, Н.А. Сургутанов, **В.Э. Костичев** // Российская научно-техническая конференция "Мавлютовские чтения". – Уфа: УГАТУ, 2016. С.163-167.

20. Кирпичев, В.А. Влияние газотермического напыления молибденом на напряжённо-деформированное состояние деталей под действием рабочих нагрузок [Текст] / В.А. Кирпичев, **В.Э. Костичев**, Е.А. Денискина, А.В. Нагиев // Всероссийский семинар «Управление движением и навигация летательных аппаратов». – Самара: Самарский университет, 2016. – С. 22-24.