

На правах рукописи

Махалов Максим Сергеевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
РАЗМЕРНЫМ СОВМЕЩЕННЫМ ОБКАТЫВАНИЕМ**

05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул - 2007

Работа выполнена в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет» (ГОУ ВПО КузГТУ).

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор
Блюменштейн В.Ю.

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Рахимьянов Х.М.

Кандидат технических наук, доцент
Ятло И.И.

Ведущая организация МГТУ «МАМИ», г. Москва

Защита состоится «25» мая 2007г. в 10⁰⁰ часов в ауд. 326ГК на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Отзывы в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просьба направлять по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

Автореферат разослан «___» апреля 2007г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Шевцов Ю.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Актуальной задачей современного машиностроения является обеспечение долговечности деталей машин, которая в существенной мере определяется качеством поверхностного слоя (ПС). Поверхностный слой формируется на протяжении всего технологического процесса, при этом важную роль играет явление технологического наследования (ТН).

Повышение качества поверхностного слоя возможно на основе совершенствования методов упрочняющей обработки, а также выявления закономерностей ТН и их влияния на эксплуатационную долговечность детали, в том числе, и в условиях приложения усталостных нагрузок.

Одним из путей повышения качества деталей машин является применение технологических процессов на основе совмещенных способов поверхностного пластического деформирования (ППД), в том числе, и способа размерного совмещенного обкатывания (РСО). Особенностью РСО является оригинальная схема работы режущего и деформирующего инструментов, в соответствии с которой, резец срезает пластическую волну металла, возникающую впереди деформирующих роликов.

Данный способ обеспечивает высокую точность деталей машин, параметры шероховатости и упрочнения поверхностного слоя при обработке широкого круга ответственных деталей, таких как штоки, валы, оси и др., изготовленных из различных конструкционных материалов и работающих в условиях приложения циклических знакопеременных нагрузок.

Применительно к таким процессам упрочняющей обработки актуальной является разработка аналитического аппарата, позволяющего рассчитывать эксплуатационную долговечность на основе учета всего комплекса наследуемых свойств поверхностного слоя, поскольку появление новых материалов и усложнение условий эксплуатации машин требуют снижения сроков конструкторско-технологической подготовки производства за счет сокращения экспериментальных работ и увеличения расчетных.

По мнению автора, решение этой задачи возможно на основе раскрытия наследственных физических закономерностей, как формирования состояния поверхностного слоя при обработке размерным совмещенным обкатыванием, так и трансформации этого состояния при эксплуатационном усталостном нагружении детали. Для исследования таких закономерностей адаптированным является аппарат механики технологического наследования, основанный на учете непрерывного накопления деформаций, исчерпания запаса пластичности и формирования остаточных напряжений металлом поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла (ЖЦ) деталей машин, в том числе, на стадии эксплуатационного усталостного нагружения. Применение аппарата механики ТН позволяет в единых терминах и категориях описать физическую природу поведения металла на стадиях ЖЦ и привести результаты исследований к форме, удобной для инженерного использования.

Таким образом, широкие возможности способа в отношении обеспечения качества и точности с одной стороны, и отсутствие технологических рекомендаций по обеспечению циклической долговечности упрочненных ответственных деталей, с другой, сдерживают широкое применение РСО в промышленности.

Учитывая возрастающие требования к качеству и необходимость обеспечения долговечности деталей в процессе эксплуатации, данная работа, направленная на разработку аналитического аппарата и методик проектирования технологических процессов упрочняющей обработки, является актуальной.

Объект исследования. Наследственное состояние поверхностного слоя, формирующееся в результате пластического течения металла в очаге деформации при обработке способом РСО и трансформирующееся в процессе эксплуатационного усталостного нагружения.

Цель работы. Повышение долговечности упрочняемых размерным совмещенным обкатыванием деталей машин на основе учета наследуемых свойств поверхностного слоя.

Задачи работы. Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Выполнить анализ и определить пути управления качеством и долговечностью упрочняемых деталей машин.
2. Разработать структурную и расчетно-аналитическую модели формирования поверхностного слоя и влияния его наследуемых свойств на циклическую долговечность упрочненных деталей машин.
3. Раскрыть физические закономерности формирования поверхностного слоя с учетом явления технологического наследования.
4. Разработать аналитическую модель формирования остаточных напряжений и определить влияние режимов обработки на величину и характер их распределения.
5. Выполнить экспериментальные исследования и установить взаимосвязи режимов обработки, интегральных параметров качества поверхностного слоя и циклической долговечности упрочненных РСО деталей машин.
6. Разработать методику и программу проектирования упрочняющей технологии РСО и внедрить их в промышленность.

Научная новизна:

1. разработана структурно-аналитическая модель формирования механического состояния и остаточных напряжений при обработке РСО;
2. разработаны экспериментально-аналитические модели и установлены закономерности накопления деформации, исчерпания запаса пластичности металла и формирования остаточных напряжений при обработке размерным совмещенным обкатыванием;
3. установлены наследственные взаимосвязи циклической долговечности с параметрами качества поверхностного слоя упрочненных деталей машин;
4. предложены и научно обоснованы пути обеспечения качества поверхностного слоя и циклической долговечности на основе выбора рациональных технологических режимов размерного совмещенного обкатывания.

Практическая ценность:

1. разработаны и апробированы методики исследования напряженно-деформированного состояния металла поверхностного слоя, позволяющие рассчитать наследуемые деформационные параметры, остаточные напряжения и

- циклическую долговечность детали с учетом исходных механических свойств и режимов обработки размерным совмещенным обкатыванием;
2. разработан аналитический аппарат расчета остаточных напряжений при обработке размерным совмещенным обкатыванием, позволяющий прогнозировать их величину и распределение по глубине поверхностного слоя детали в зависимости от режимов обработки;
 3. разработаны рекомендации по обеспечению циклической долговечности на основе учета наследуемых параметров механического состояния при обработке размерным совмещенным обкатыванием;
 4. разработан алгоритм проектирования технологических процессов упрочняющей обработки на базе способа РСО, обеспечивающих заданную циклическую долговечность и параметры качества поверхностного слоя деталей машин;
 5. разработаны и прошли регистрацию в Российском агентстве по патентам и товарным знакам программные продукты, позволяющие автоматизировать проектирование технологических процессов упрочняющей обработки размерным совмещенным обкатыванием.

Достоверность полученных результатов. Результаты работы получены с использованием базовых положений технологии машиностроения и методов общенаучной методологии, в том числе, структурного моделирования и синтеза, статистического и компьютерного моделирования, механики деформируемых сред, метода конечных элементов, и других, что в целом обеспечило корректность постановки и решения задач, а также адекватность полученных математических и статистических моделей. Сформулированные научные положения, результаты работы, выводы и рекомендации обоснованы теоретическими решениями и экспериментальными данными, не противоречат известным положениям технических и фундаментальных наук и основаны на строго доказанных выводах, предложенных авторами ранних исследований.

Реализация результатов работы. Результаты научных исследований апробированы и приняты к внедрению в виде технологических процессов, методики и компьютерных программ с суммарным годовым экономическим эффектом около 330 000 рублей в условиях инновационного учебно-научно-производственного центра «КузбассРИЦ», ООО фирма «Фалар» и НПО «Развитие».

Результаты работы используются в курсах лекций «Научные основы технологии машиностроения» для студентов направления подготовки 150900 – «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств», а также в методических указаниях к лабораторным работам по технологии машиностроения и новым методам обработки для студентов специальности 151001 – «Технология машиностроения».

Представленные в диссертационной работе исследования выполнялись в рамках научно-технической программы Минобробразования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», подпрограмма 205 – «Транспорт», раздел – 205.03 «Наземные транспортные средства» в период с 2000 по 2003 гг.

Апробация работы. Основные положения работы были доложены и получили одобрение на:

- всероссийской научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении», Юрга, 2003-2004, 2006;
- VII Международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы в машиностроительном и строительном комплексах «Технология - 2006», Орел, 2006;
- заседаниях кафедры «Технология машиностроения» ГОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 3 в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, в том числе 3 программы для ЭВМ, зарегистрированные в Российском агентстве по патентам и товарным знакам.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка использованной литературы из 174 наименований и 4 приложений.

Работа содержит 298 страниц, в том числе 220 страниц основного текста, 148 рисунков, 32 таблицы и приложения на 8 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко определен объект исследований, изложены суть поставленной научной задачи, цель и задачи исследования, приведены основные результаты работы.

В первой главе проведен анализ технологического обеспечения качества поверхностного слоя и долговечности деталей, обрабатываемых совмещенными способами поверхностного пластического деформирования. Значительный вклад в развитие этого направления внесли труды П.Г. Алексеева, М.А. Балтер, Я.М. Бараца, В.Ф. Безъязычного, В.М. Браславского, М.С. Дрозда, М.М. Жасимова, С.А. Зайдеса, А.В. Киричека, Е.Г. Коновалова, И.В. Кудрявцева, А.Г. Лазуткина, Е.М. Макушка, Л.И. Маркуса, Л.Г. Одинцова, Д.Д. Папшева, В.В. Петросова, В.Н. Подураева, Ю.Г. Проскуракова, О.А. Розенберга, Э.В. Рыжова, В.М. Смелянского, А.Г. Сулова, Л.А. Хворостухина, П.А. Чепы, П.С. Чистосердова, Л.М. Школьника, Ю.Г. Шнейдера, Д.Л. Юдина, П.И. Ящерицына и других.

Одним из эффективных способов совмещенного ППД является размерное совмещенное обкатывание, технологические возможности которого исследованы в работах В.М. Смелянского, В.Ю. Блюменштейна, В.А. Васильева, В.Б. Игнатова и Т. Ныклевича.

Способ размерного совмещенного обкатывания основан на пластическом волнообразовании; при этом обработка осуществляется двумя или тремя роликами, жестко настроенными на определенный размер обработки детали (рис. 1). Принципиальным является наличие в зоне волнообразования резца, который частично или полностью удаляет пластическую волну. Натяги деформирующих роликов существенно превышают принятые для ППД и достигают величин в 1 мм, однако разрушения поверхности при этом не происходит вследствие удаления резцом части металла в районе вершины пластической волны.

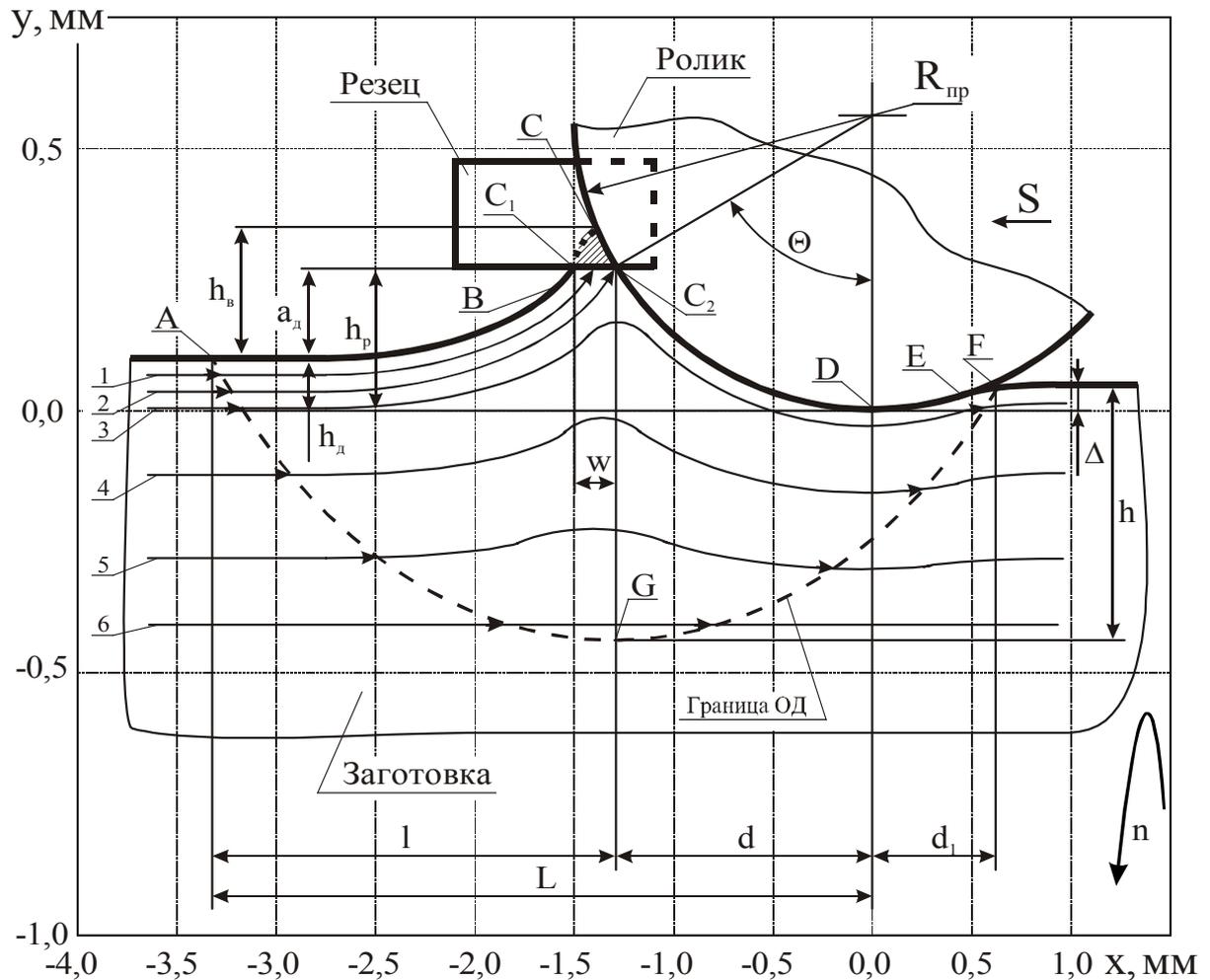


Рисунок 1 – Схема очага деформации при обработке размерным совмещенным обкатыванием: S - подача, n - частота вращения детали, $R_{пр}$ - профильный радиус ролика, h_p - расчетный натяг, a_d - действительный зазор реза, h_d – действительный натяг ролика

Способ РСО достаточно хорошо изучен в отношении обеспечения точности и качества поверхностного слоя. В частности установлено, что он позволяет в широких пределах обеспечивать такие параметры качества, как шероховатость ($Ra = 0,04..0,8$ мкм), глубину ($h = 0,5..15$ мм) и степень ($\delta = 0,2..0,8$) упрочнения при создании благоприятных эпюр сжимающих напряжений.

Однако при этом остаются не установленными возможности размерного совмещенного обкатывания в отношении обеспечения циклической долговечности деталей. Эти возможности особенно актуальны для широкой номенклатуры деталей, работающих в условиях усталостного нагружения.

Для решения этой задачи был выполнен анализ методик обеспечения качества и долговечности упрочненных деталей машин, особенностей формирования остаточных напряжений при упрочняющей обработке, а также анализ подходов к учету явления технологического наследования, изложенных в работах В.И. Аверченкова, И.А. Биргера, В.Ю. Блюменштейна, А.С. Васильева, А.М. Дальского, А.И. Кондакова, И.В. Кудрявцева, А.А. Маталина, А.Н. Овсеенко, А.В. Подзея, Э.В. Рыжова, В.М. Смелянского, А.Г. Сулова, А.В. Тотая, П.И. Ящерицына и других.

Выполнена постановка научной задачи разработки методики проектирования технологических процессов упрочняющей обработки способом РСО, обеспечивающей требуемую циклическую долговечность деталей машин и учитывающей явление технологического наследования.

Установлено, что адаптированным для решения такой задачи является аппарат механики технологического наследования, разработанный В.Ю. Блюменштейном, в рамках которого формирование и трансформация состояния поверхностного слоя на стадиях механической обработки и последующего эксплуатационного усталостного нагружения рассматриваются как единый непрерывный процесс накопления деформации и исчерпания запаса пластичности металлом поверхностного слоя.

Наряду с традиционными параметрами качества, используемый аппарат механики технологического наследования позволяет провести сквозное описание закономерностей формирования и трансформации свойств поверхностного слоя на стадиях механической обработки и последующего эксплуатационного усталостного нагружения в категориях интегральных, единых для всех стадий нагружения, параметров: степени деформации сдвига Λ , степени исчерпания запаса пластичности Ψ и тензора остаточных напряжений $[T\sigma_{ост}]$. Аппарат позволяет учесть влияние накопленных свойств поверхностного слоя на циклическую долговечность детали; при этом под последней понимают количество циклов нагружения до полного исчерпания запаса пластичности металлом поверхностного слоя и появления усталостной трещины. Для расчета степени исчерпания запаса пластичности Ψ используется критерий Калпина-Филиппова, который учитывает частичное «залечивание» дефектности металла и восстановление запаса пластичности в зоне смены знака деформации.

Анализ показал, что использование аппарата механики технологического наследования позволяет установить физические закономерности формирования поверхностного слоя, процессов, протекающих при обработке РСО в очаге деформации, а также закономерности влияния этих процессов на циклическую долговечность детали.

Во второй главе приведены результаты аналитических исследований, полученных с использованием разработанной структурно-аналитической модели накопления деформации, исчерпания запаса пластичности и формирования тензора остаточных напряжений на стадии размерного совмещенного обкатывания.

Для оценки и управления состоянием поверхностного слоя с целью обеспечения заданной циклической долговечности обработанных РСО деталей машин был принят аппарат механики технологического наследования, в соответствии с которым:

- при обработке РСО происходит накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности, которое приводит к формированию поверхностного слоя с определенными параметрами качества: глубиной и степенью упрочнения, шероховатостью и остаточными напряжениями;
- в процессе последующего эксплуатационного усталостного нагружения продолжается процесс накопления деформаций, исчерпания запаса пластичности и релакса-

ции остаточных напряжений, приводящий к непрерывной трансформации напряженного состояния и изменению степени упрочнения поверхностного слоя;
 - при накоплении предельных деформаций до уровня Λ_p происходит полное исчерпание запаса пластичности ($\Psi = 1$). Этому состоянию соответствует полная релаксация остаточных напряжений ($[\sigma_{ост}] = 0$) и появление начальной усталостной трещины.

Для структуризации, систематизации и дальнейшего решения поставленной задачи была разработана структурно-аналитическая модель формирования параметров механического состояния металла поверхностного слоя детали на стадии размерного совмещенного обкатывания с учетом явления технологического наследования в контексте обеспечения требуемой циклической долговечности.

Модель, построенная на базе CALS-технологий, основана на представлении рассматриваемого процесса как информационной системы. В качестве высокопоставленной выбрана функция «Управлять параметрами механического состояния поверхностного слоя металла на стадии PCO с целью обеспечения заданной циклической долговечности детали». Декомпозиция контекстной диаграммы позволила выделить основные параметры с целью управления механическим состоянием поверхностного слоя и описать их системой кинетических уравнений (формулы 1-3) (рис. 2).

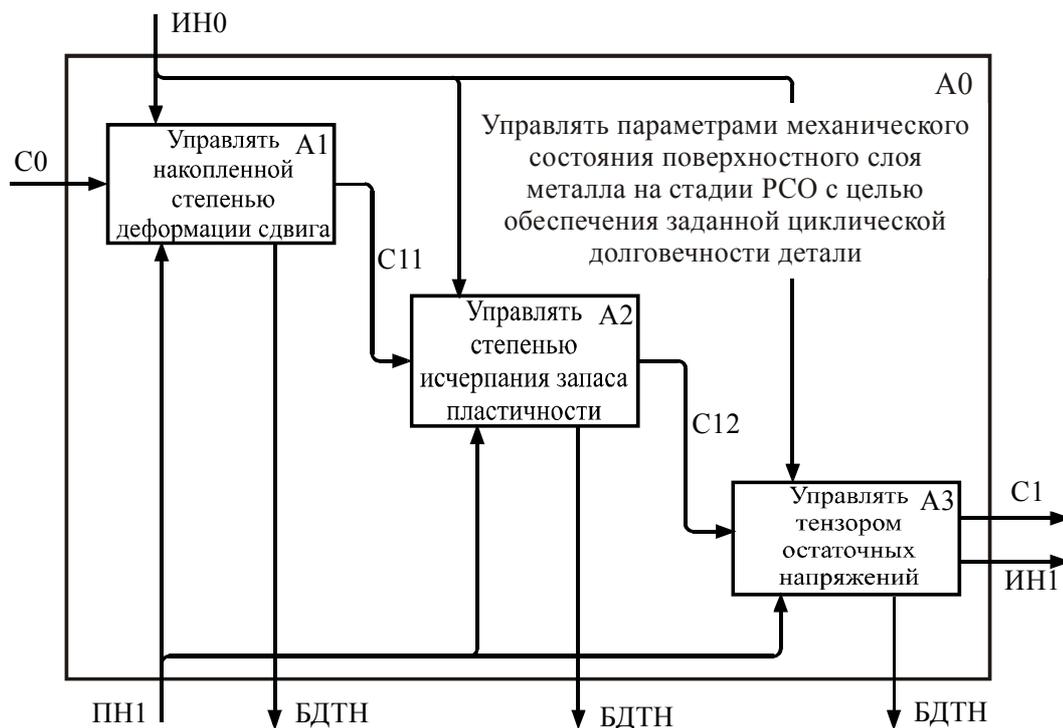


Рисунок 2 – Структурно-аналитическая модель формирования параметров механического состояния на стадии PCO: ИН1 – обновленная история нагружения (после PCO); C11, C12 – текущее состояние поверхностного слоя в момент обработки; БДТН – запрос к базе данных технологического наследования

Исходное состояние поверхностного слоя (C0) детали перед PCO формируется на предыдущих стадиях механической обработки и описывается с учетом истории

нагружения (ИН0) совокупностью параметров напряженно-деформированного состояния металла поверхностного слоя Λ , Ψ , $[T\sigma_{ост}]$, а также традиционных параметров упрочнения, микроструктуры, волнистости, шероховатости и др.:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Lambda_{\Sigma} = \Lambda_{мех}; \\ \Psi_{\Sigma} = \Psi_{мех}; \\ \Lambda_p = \Lambda_p(\Pi); \\ \Psi_{мех} = \int_0^{\Lambda_{мех}} \left[n\varphi_0\Lambda_j^{n-1} + (1-\varphi_0\Lambda_p^n) \frac{1}{\Lambda_p} \right] d\Lambda; \\ [T\sigma_{ост}] = [T\sigma_{ост}]_{мех}. \end{array} \right. \quad (1)$$

где Λ_{Σ} – суммарная накопленная степень деформации сдвига; $\Lambda_{мех}$ – степень деформации сдвига, накопленная на предшествующих стадиях механической обработки; Ψ_{Σ} – суммарная степень истощения запаса пластичности; $\Psi_{мех}$ – степень истощения запаса пластичности, достигнутая на предшествующих стадиях механической обработки; $[T\sigma_{ост}]_{мех}$ – тензор остаточных напряжений первого рода, сформированный в результате механической обработки. В случае, если РСО применяется для необработанной заготовки, поверхностный слой не упрочнен, остаточные напряжения в нем отсутствуют.

В соответствии с основными положениями механики технологического наследования, при обработке РСО, в зоне контакта инструмента с деталью возникает асимметричный очаг деформации (ОД), напряженно-деформированное состояние которого характеризуется компонентами тензоров напряжений и скоростей деформаций. Частицы металла, формирующие поверхностный слой детали, смещаются вдоль линий тока 3, 4, 5, 6 (рис. 1), при этом происходит накопление деформации, истощение запаса пластичности и формирование остаточных напряжений. Начальными условиями для расчета параметров механического состояния вдоль этих линий тока являются свойства материала и форма и геометрические размеры ОД. Интенсивность протекания этих явлений определяется характерной для каждой стадии программой нагружения (ПН) металла, которая представляет собой зависимость накопленной степени деформации сдвига Λ от показателя схемы напряженного состояния Π . Состояние поверхностного слоя после обработки (С1) описывается совокупностью тех же параметров:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Lambda_{\Sigma} = \Lambda_{мех} + \Lambda_{PCO}; \\ \Psi_{\Sigma} = \Psi_{мех} + \Psi_{PCO}; \\ \Lambda_p = \Lambda_p(\Pi); \\ \Psi_{PCO} = \int_{\Lambda_{мех}}^{\Lambda_{PCO}} \left[n\varphi_0\Lambda_j^{n-1} + (1-\varphi_0\Lambda_p^n) \frac{1}{\Lambda_p} \right] d\Lambda; \\ [T\sigma_{ост}] = [T\sigma_{ост}]_{PCO}. \end{array} \right. \quad (2)$$

где Λ_{PCO} – степень деформации сдвига, накопленная на стадии РСО; Ψ_{PCO} – степень истощения запаса пластичности, достигнутая на стадии РСО; $[T\sigma_{ост}]_{PCO}$ – тензор остаточных напряжений, сформированный в результате обработки РСО.

Для определения напряженно-деформированного состояния использовался метод конечных элементов (МКЭ). Задача решалась в плоско-деформированной постановке, в соответствии с которой обрабатываемая деталь моделировалась как упруго-пластическое тело, граница которого представляла собой контур очага деформации ABC_1C_2DEF (рис. 1). На основе полученных результатов определялись координаты точек линий тока, параметры напряженно-деформированного состояния пересчитывались из узловых точек конечно-элементной модели в точки линий тока, после чего рассчитывались накопленные параметры механического состояния, как вдоль линий тока, так и по глубине упрочненного поверхностного слоя (рис. 3).

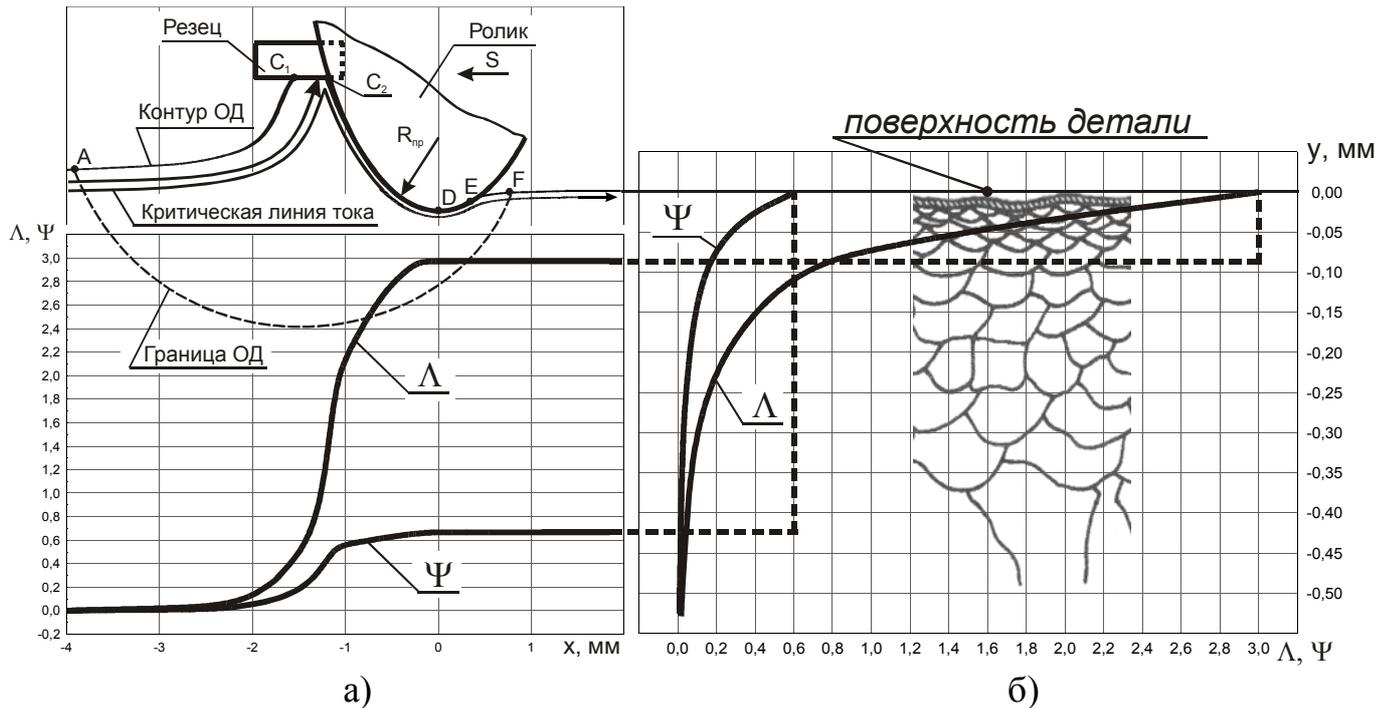


Рисунок 3 – Распределение накопленных параметров механического состояния:
а - вдоль критической линии, б - по глубине поверхностного слоя;

Анализ полученных результатов показал, что РСО позволяет накапливать большие, чем традиционное ППД, деформации без разрушения поверхностного слоя, а степень исчерпания запаса пластичности имеет аналогичные значения. Характерным также является то, что до 98% деформации накапливается в поверхностном слое глубиной 0,3 - 0,5 мм.

Теоретические исследования позволили разработать аналитическую модель формирования остаточных напряжений. Ее особенностью является представление напряжений в виде тензора, состоящего из нормальных и касательных компонент в декартовой системе координат. В основу модели положена теорема о разгрузке, в соответствии с которой остаточные напряжения формируются в результате действия тензоров напряжений, возникающих при приложении нагрузки $[T\sigma_{\text{деф}}]$, тензора упругой разгрузки при ее снятии $[T\sigma_{\text{раз}}]$, тензора тепловых напряжений разгрузки $[T\sigma_t]$, а также тензора напряжений разгрузки от раскрепления детали $[T\sigma_{\text{раскр.дет.}}]$ (рис. 4).

$$[T\sigma_{ост}]_{PCO} = [T\sigma_{деф}]_{PCO} - [T\sigma_{раз}]_{PCO} + [T\sigma_{t^0}]_{PCO} + [T\sigma_{раскр.дет.}]_{PCO}$$

**Тензор
упруго-пластических
напряжений**

$$[T\sigma_{деф}]_{xyz} = \begin{pmatrix} \sigma_x^{деф} & \sigma_{xy}^{деф} & 0 \\ \sigma_{xy}^{деф} & \sigma_y^{деф} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_x^{деф} + \sigma_y^{деф}}{2} \end{pmatrix}$$

**Тензор напряжений
упругой разгрузки**

$$[T\sigma_{раз}]_{xyz} = \begin{pmatrix} \sigma_x^{раз} & \sigma_{xy}^{раз} & 0 \\ \sigma_{xy}^{раз} & \sigma_y^{раз} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_x^{раз} + \sigma_y^{раз}}{2} \end{pmatrix}$$

**Тензор
тепловых
напряжений**

$$[T\sigma_{t^0}]_{xyz} = \begin{pmatrix} \sigma_x^{t^0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_x^{t^0}}{2} \end{pmatrix}$$

**Тензор
напряжений от
раскрепления
детали**

$$[T\sigma_{раскр.дет.}]_{xyz} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Тензор остаточных напряжений

$$[T\sigma_{ост}]_{xyz} = \begin{pmatrix} \sigma_x^{деф} - \sigma_x^{раз} - \sigma_x^{t^0} & \sigma_{xy}^{деф} - \sigma_{xy}^{раз} & 0 \\ \sigma_{xy}^{деф} - \sigma_{xy}^{раз} & \sigma_y^{деф} - \sigma_y^{раз} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(\sigma_x^{деф} + \sigma_y^{деф}) - (\sigma_x^{раз} + \sigma_y^{раз}) - \sigma_x^{t^0}}{2} \end{pmatrix}$$

Рисунок 4 – Формирование тензора остаточных напряжений

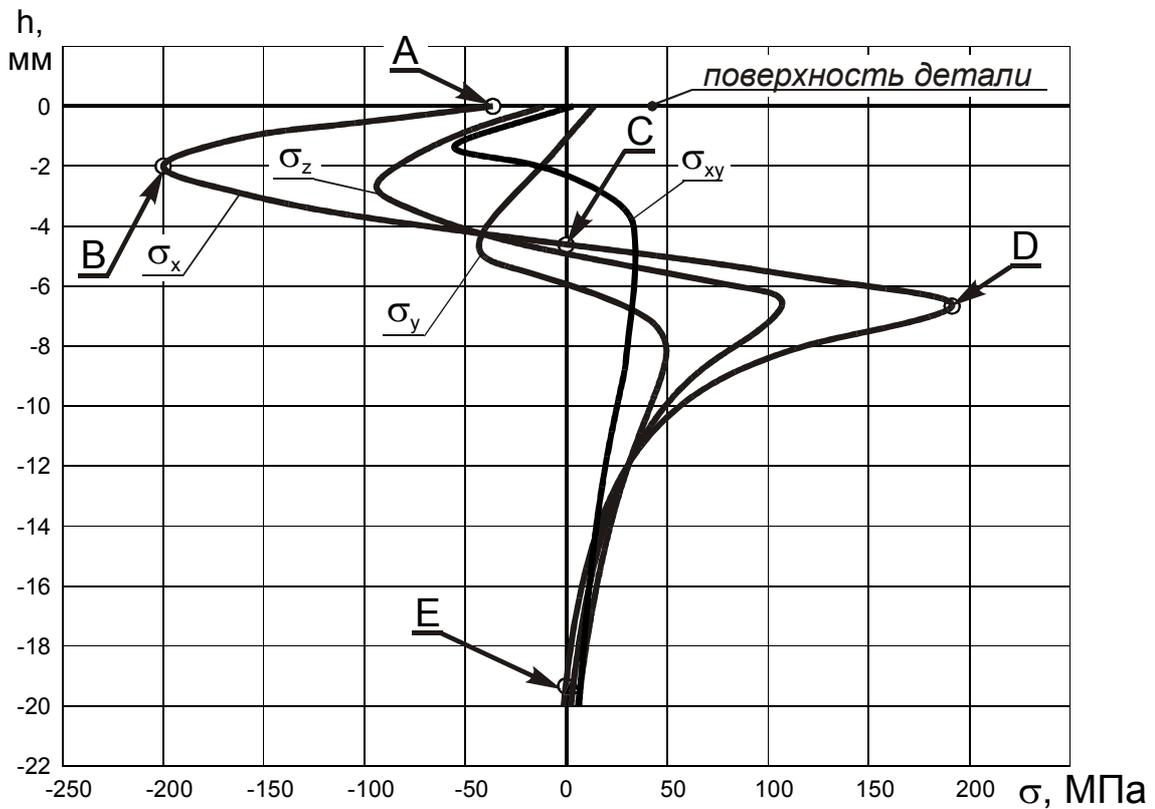


Рисунок 5 – Характерная эпюра распределения компонент остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя (A, B, C, D и E – расположение характерных точек)

В результате установлено, что (рис. 5):

1. Воздействие тепловой разгрузки значительно уменьшает значения экстремума остаточных напряжений и смещает его в глубину поверхностного слоя

2. Наибольшими сжимающими значениями напряжений характеризуется осевой компонент σ_x .

3. В целом тензор остаточных напряжений имеет аналогичный ППД характер распределения, однако характеризуется большей глубиной распространения сжимающих напряжений, достигающей 10 мм, против 2 – 3 мм при традиционном ППД.

В соответствии с принятыми положениями, накопление деформации в процессе усталостного нагружения сопровождается ростом степени упрочнения и твердости (микротвердости) поверхностного слоя. По окончании стадии циклической долговечности происходит полное исчерпание запаса пластичности и релаксация тензора остаточных напряжений, в рабочем сечении действуют только напряжения от внешней нагрузки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Lambda_{\Sigma} = \Lambda_p = \Lambda_{рез} + \Lambda_{PCO} + \Lambda_{ЦД}; \\ \Psi_{\Sigma} = \Psi_{рез} + \Psi_{PCO} + \Psi_{ЦД} = 1; \\ \Lambda_p = \Lambda_p(\Pi); \\ \Psi_{ЦД} = \int_{\Lambda_{PCO}}^{\Lambda_{ЦД}} \left[n\varphi_0\Lambda_j^{n-1} + (1-\varphi_0\Lambda_p^n) \frac{1}{\Lambda_p} \right] d\Lambda; \\ [(T\sigma)_{ост}] = 0; \end{array} \right. \quad (3)$$

При решении задачи механики циклической долговечности было принято:

1. При эксплуатации деталь подвергается многоцикловоу усталостному симметричному знакопеременному нагружению по схеме консольного изгиба с вращением, тензоры усталостных (эксплуатационных) и остаточных напряжений заданы в декартовой системе координат, при этом уменьшение численных значений компонент остаточных напряжений происходит пропорционально числу циклов в соответствии с выбранным законом релаксации.

2. Накопление предельных деформаций, полное исчерпание запаса пластичности и зарождение усталостной трещины происходит в некоторой точке вероятного разрушения, которая может быть расположена как на поверхности, так и на некотором удалении от нее; при этом отсутствует дрейф точки в процессе усталостного нагружения.

3. Окончанию стадии циклической долговечности соответствует некоторая предельная степень упрочнения и твердость (микротвердость) поверхностного слоя в точке вероятного разрушения, характерная для данного материала, режимов обработки и условий нагружения.

В третьей главе изложена методика экспериментальных исследований параметров качества и циклической долговечности, методика моделирования механики и формирования остаточных напряжений при обработке PCO. Наряду со сталями 20, 40X, 18XГТ, 12X18Н10Т и ШХ15, в качестве основного материала для исследований была выбрана сталь 45 (160..180 НВ).

Экспериментальные исследования проводились на токарно-винторезном станке модели 1К62Б, оснащенной установкой для PCO, а также на токарном станке мо-

дели 16К20Ф3, оснащенном специальной установкой для обработки РСО усталостных образцов. Диапазоны варьирования параметров режима обработки составили: подача (S) – 0,07..0,7 мм/об, частота вращения детали (n) – 100..1200 об/мин, профильный радиус ролика ($R_{пр}$) – 2..15 мм, расчетный натяг ролика (h_p) – 0,1..1 мм, действительный зазор (a_d) – 0..0,2 мм, действительный натяг (h_d) – 0,05..0,9 мм.

Действительные геометрические параметры очага деформации определялись путем профилографирования и последующей обработки полученных профилограмм. Для повышения эффективности и автоматизации расчетов был разработан алгоритм и программа для обработки профилограмм ОД. Их задачей является перевод графического изображения профилограммы в численные значения точек, составляющих контур ОД. Программа прошла официальную регистрацию в Роспатенте РФ.

Усталостные испытания проводились на машине УКИ-10М, на базе Сибирского научно-исследовательского института авиации им. С.А. Чаплыгина (г. Новосибирск). Нагружение образцов проводилось по схеме консольного изгиба с вращением и постоянными амплитудными значениями напряжений. Экспериментальные образцы изготавливались из стали 45 одной поставки. С целью локализации точки зарождения усталостной трещины, рабочая поверхность выполнялась в виде сочетания цилиндрической части и галтели. Рабочая часть усталостных образцов, имеющая диаметр 15 мм, подвергалась обработке РСО на станке 16К20Ф3 с различными режимами. Для каждой серии изготавливался образец-свидетель, на котором осуществлялась фиксация очага деформации. По полученным очагам деформации производился расчет действительных параметров режима обработки, а также параметров механического состояния поверхностного слоя.

Циклическая долговечность образцов определялась на основе предложенной расчетно-аналитической модели и фиксации изменения микротвердости поверхностного слоя в процессе циклического нагружения. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя определялось в опасном сечении образцов после нагружения фиксированным числом циклов, в то время как образцы-свидетели позволили определить исходное распределение микротвердости перед усталостным нагружением.

Выявленные в результате экспериментально-аналитических исследований взаимосвязи объясняют более 90% всей дисперсии экспериментальных данных, относительная погрешность определения не превышает 15%.

В четвертой главе приведены результаты экспериментально-аналитических исследований взаимосвязей параметров режима обработки с параметрами механического состояния поверхностного слоя и циклической долговечностью деталей.

Анализ показал, что преобладающее влияние на деформационные параметры оказывает действительный зазор резца (рис. 6, а, б). При относительно небольшом его увеличении Λ и Ψ значительно возрастают, поскольку в этом случае более деформированный металл формирует обработанную поверхность.

Значительное влияние на параметры механического состояния оказывают также профильный радиус $R_{пр}$ и действительный натяг ролика h_d . Выявлено, что Λ и Ψ при изменении $R_{пр}$ имеют экстремумы, положение которых определяется величи-

ной действительного зазора (рис. 6, а). При увеличении действительного натяга значения деформационных параметров непрерывно возрастают (рис. 6, б).

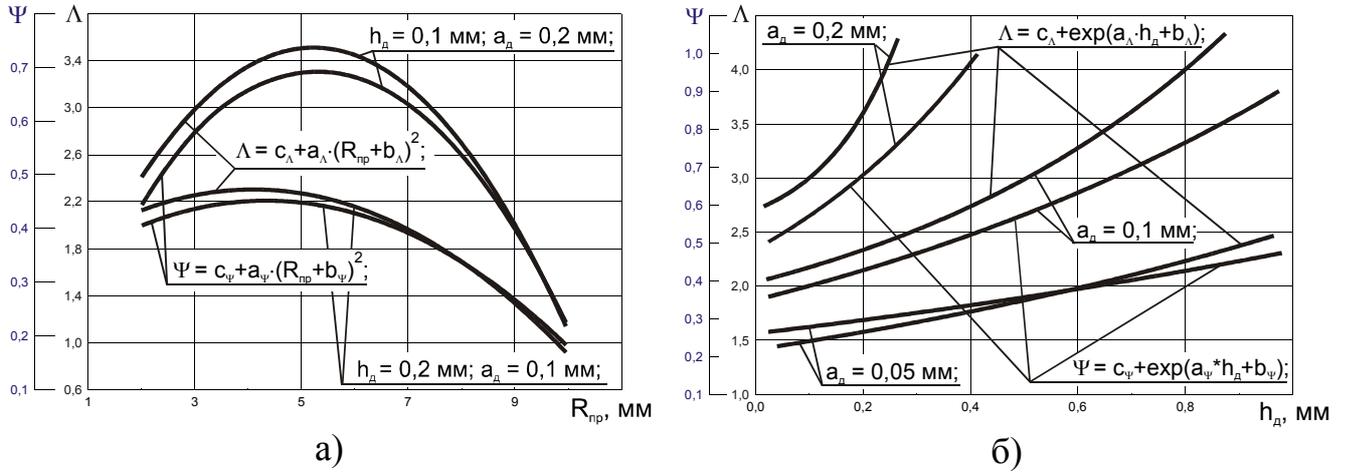


Рисунок 6 – Взаимосвязи накопленных параметров механического состояния: а - с профильным радиусом ролика, б – с действительным натягом;

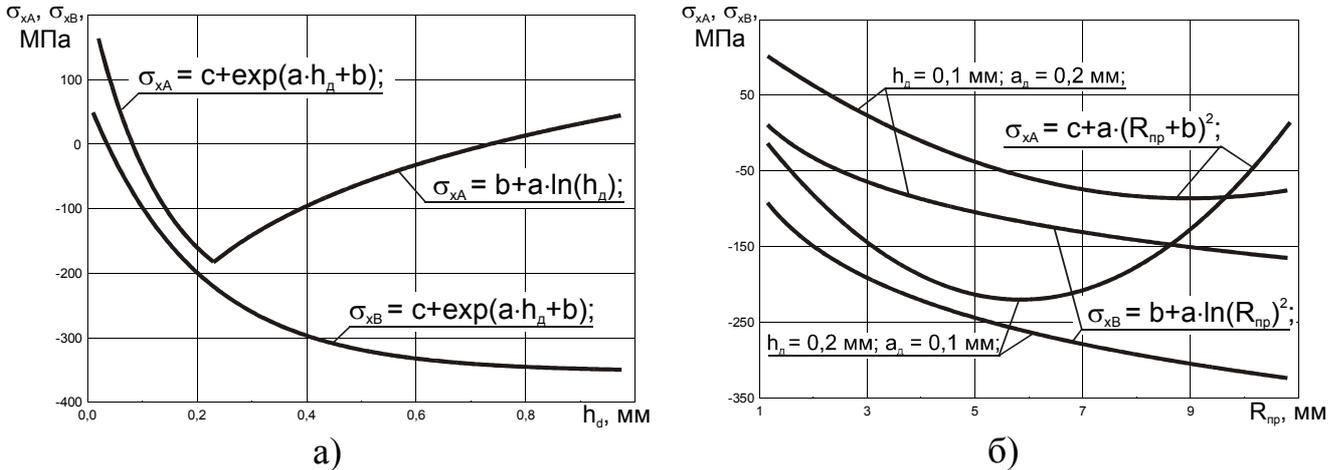


Рисунок 7 – Взаимосвязи осевых остаточных напряжений на поверхности и в первом экстремуме: а - с действительным натягом, б – с профильным радиусом ролика;

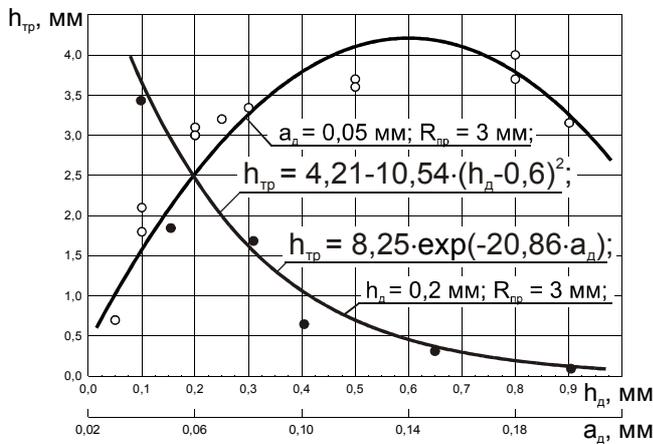


Рисунок 8 – Взаимосвязь глубины зарождения усталостной трещины с действительным натягом и зазором

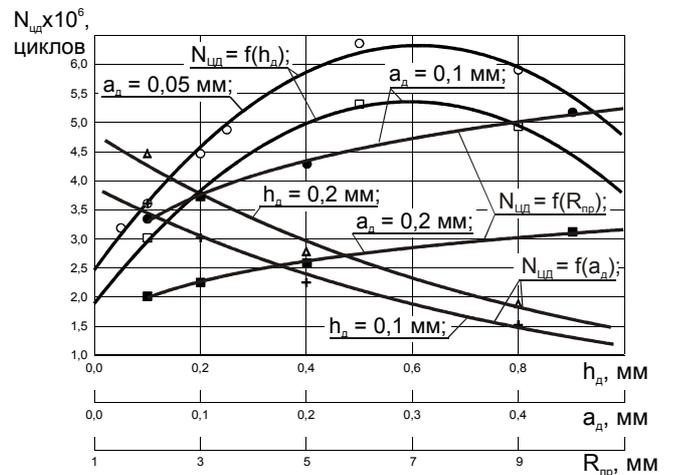


Рисунок 9 – Зависимость циклической долговечности от основных параметров режима обработки

Для выявления взаимосвязей остаточных напряжений с параметрами режима проведено описание эпюр компонент ОН в категориях координат характерных точек (рис. 5). В качестве примера ниже рассмотрены графические зависимости для осевого компонента остаточных напряжений (рис. 7, а, б). Установлено, что наибольшие осевые сжимающие напряжения на поверхности наблюдаются при значениях действительного натяга около 0,25 мм. Их дальнейшее уменьшение при возрастании натяга вызвано значительно возрастающей тепловой разгрузкой, в то время как осевые сжимающие напряжения в первом экстремуме продолжают возрастать (рис 7, а).

Установлено, что для каждой величины действительного натяга, существует значение профильного радиуса ролика, при котором сжимающие напряжения на поверхности детали максимальны (рис 7, б). Максимальные значения осевых сжимающих напряжений в точке первого экстремума возрастают с увеличением обоих факторов и достигают значений -400 МПа. Рост указанных факторов увеличивает и собственно глубину расположения экстремума от поверхности детали. При максимальных значениях действительного натяга и профильного радиуса ролика она достигает значений 6-8 мм.

Проведенные экспериментальные исследования позволили выявить взаимосвязи циклической долговечности $N_{ЦД}$ и глубины зарождения усталостной трещины $h_{тр}$ с параметрами механического состояния металла ПС и технологическими факторами при обработке РСО. Установлено, что основные параметры режима РСО оказывают наследственное влияние на степень деформации сдвига, накапливаемую на стадии циклической долговечности $\Delta\Lambda_{ЦД}$, наибольшее значение которой наблюдается при $h_d = 0,6$ мм. С увеличением действительного зазора значение $\Delta\Lambda_{ЦД}$ снижается, что вызвано значительным увеличением степени деформации сдвига, накапливаемой при РСО.

Увеличение действительного зазора приводит к уменьшению глубины зарождения усталостной трещины и выходу точки вероятного разрушения на поверхность. Это соответствует известным представлениям о том, что при дальнейшем увеличении a_d происходит накопление предельных деформаций и разрушение поверхности металла в вершине пластической волны уже при механической обработке. Увеличение $R_{пр}$, приводит к увеличению глубины зарождения трещины, при этом наибольшее значение $h_{тр}$ наблюдается при $h_d = 0,6$ мм (рис. 8, а). При увеличении $\Delta\Lambda_{ЦД}$ глубина зарождения трещины увеличивается.

Установлено, что наибольшая циклическая долговечность упроченной РСО детали наблюдается при наибольших значениях профильного радиуса ролика, наименьших значениях действительного зазора резца и $h_d = 0,6$ мм (рис. 9). Выявленное значение действительного натяга также соответствует наибольшей глубине зарождения усталостной трещины, что позволяет установить взаимосвязь последней с $N_{ЦД}$ (рис. 10). Указанное сочетание факторов позволяет повысить циклическую долговечность до 8-9 млн. циклов, в то время как долговечность неупроченных деталей составляет 0,5-1 млн. циклов. Результаты исследований позволили установить, что при значениях $\Psi_{РСО} \approx 0,65$ наблюдается наибольшая циклическая долговечность деталей (рис. 11).

Анализ показал, что максимальная циклическая долговечность получена при таких режимах РСО, когда остаточные напряжения, глубина и степень упрочнения не достигли своих максимальных значений. В табл. 1 представлены рекомендации по выбору режимов обработки, обеспечивающих высокие значения требуемого параметра качества детали. Как видно из таблицы, уменьшение действительного зазора резца в составе h_p значительно увеличивает циклическую долговечность детали, практически не изменяя при этом значения остальных параметров качества.

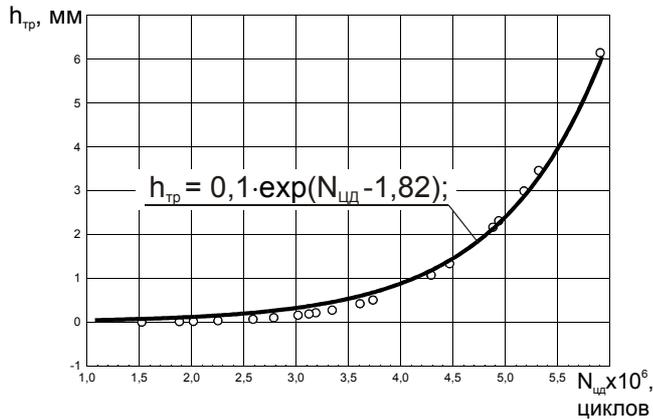


Рисунок 10 – Взаимосвязь глубины зарождения трещины с циклической долговечностью

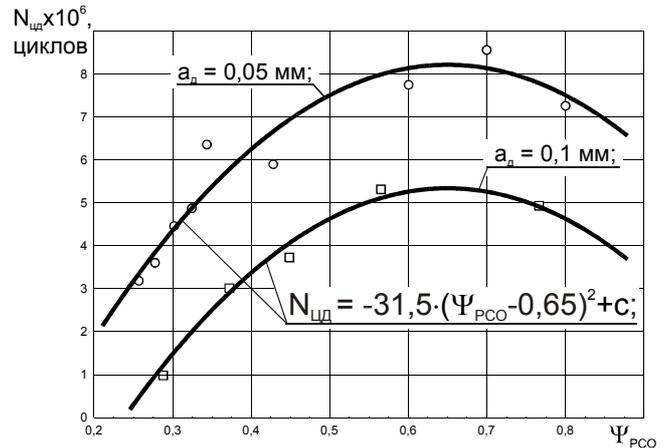


Рисунок 11 – Зависимость циклической долговечности от накопленной при РСО степени исчерпания запаса пластичности металла

Таблица 1

Пути обеспечения параметров качества при упрочнении деталей РСО

Параметр качества	Значение фактора в пределах заданного диапазона, мм			
	$h_{д2}$ (0,05..0,9)	$a_{д2}$ (0..0,2)	h_{p2} (0,1..1,0)	$R_{пр2}$ (2..15)
Ra	-	-	Уменьшить	Увеличить
h	-	-	Увеличить	Увеличить
δ	-	-	Увеличить	Уменьшить
$\sigma_{ост}$	0,25 мм	-	-	4,5 – 5 мм
$N_{цд}$	0,6 мм	Уменьшить	-	Увеличить

Пятая глава посвящена разработке методик, алгоритмов и программных систем проектирования упрочняющих технологических процессов, позволяющих управлять параметрами механического состояния с целью обеспечения требуемого качества поверхностного слоя и циклической долговечности деталей машин.

Для практического использования и реализации полученных в работе результатов разработан алгоритм расчета параметров обработки РСО, который позволяет:

1. По заданным значениям параметров режима определить параметры качества, интегральные параметры механического состояния (Λ , Ψ , $[T\sigma_{ост}]$) и циклическую долговечность детали с учетом явления технологического наследования.

2. По заданным значениям параметров качества и долговечности детали в условиях приложения усталостных нагрузок назначить оптимальные режимы обработки.

Процедуры выполнения этапов разработанного алгоритма автоматизированы в виде программных систем, прошедших официальную регистрацию и включенных в реестр программ для ЭВМ Российского агентства по патентам и товарным знакам.

Программа «Расчет наследуемых параметров процесса размерного совмещенного обкатывания» предназначена для автоматизированного расчета накопления деформации, исчерпания запаса пластичности и тензора остаточных напряжений и назначения рациональных режимов обработки, обеспечивающих наилучшие поверхностные свойства. Она позволяет производить расчет параметров РСО тремя способами:

1-й способ - практический: расчет по экспериментально полученному геометрическому профилю очага деформации, который может быть получен с помощью программы «Обработка профилограмм очагов деформации при размерном совмещенном обкатывании и поверхностном пластическом деформировании».

2-й способ - аналитический: исходными являются технологические параметры, устанавливаемые на станке при обработке детали способом РСО.

3-й способ - обратный аналитический: исходными данными являются значения параметров качества поверхностного слоя, которые требуется получить при обработке РСО, а также значения технологических факторов, выступающих в качестве ограничений.

Результаты научных исследований апробированы и приняты к внедрению в виде методик, программных систем расчета и технологических процессов с суммарным годовым экономическим эффектом около 330 000 рублей. Результаты работы используются в курсах лекций «Научные основы технологии машиностроения» и методических указаниях к лабораторным работам для студентов направления «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» и специальности «Технология машиностроения».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Определены пути управления качеством поверхностного слоя и долговечностью деталей при использовании совмещенных процессов поверхностного пластического деформирования. Ключевой научной задачей является раскрытие физических закономерностей формирования свойств поверхностного слоя и определения их влияния на циклическую долговечность упрочненной детали.

2. Разработана структурная и расчетно-аналитическая модели и раскрыты физические закономерности формирования качества поверхностного слоя с учетом явления технологического наследования. Установлено, что, по сравнению с традиционным поверхностным пластическим деформированием, размерное совмещенное обкатывание обеспечивает более высокое качество и позволяет накапливать большие деформации без разрушения поверхностного слоя.

3. Разработана аналитическая модель формирования остаточных напряжений, которые представляются в виде тензора, являющегося суммой тензора упруго-пластических напряжений, а также тензоров упругих и тепловых напряжений разгрузки. Установлен характер распределения компонент остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя. Расчеты показали, что наибольшими значениями на-

пряжений характеризуется осевой компонент остаточных напряжений, который достигает -400 МПа и глубины распространения сжимающих напряжений до 10 мм.

4. Выполнены экспериментальные исследования и получены статистические модели влияния режимов обработки на качество поверхностного слоя и циклическую долговечность упрочненных деталей машин. Установлено, что основное влияние на упрочняющий эффект, исчерпание запаса пластичности металла и формирование остаточных напряжений оказывают действительный зазор резца, действительный натяг и профильный радиус ролика.

5. Результаты показали, что размерное совмещенное обкатывание обеспечивает высокую циклическую долговечность упрочненных деталей в условиях многоциклового усталостного нагружения, достигающую 8 млн. циклов, что в 3,5 раза превышает долговечность не упрочненной детали и в 1,5 раза – долговечность детали, упрочненной поверхностным пластическим деформированием. Исследования показали, что наибольшая циклическая долговечность детали обеспечивается при минимальных значениях действительного зазора резца, максимальных значениях профильного радиуса и значении действительного натяга ролика 0,6 мм, что соответствует степени исчерпания запаса пластичности обработкой РСО $\Psi \approx 0,65$.

6. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана методика и алгоритм проектирования технологии обработки размерным совмещенным обкатыванием. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая расчетным путем определять качество поверхностного слоя и циклическую долговечность детали, исходя из заданных режимов, а также назначать рациональные режимы обработки, обеспечивающие заданное качество поверхностного слоя и циклической долговечность.

7. Результаты исследований апробированы и приняты к внедрению на машиностроительных предприятиях в виде методик, программных систем расчета и технологических процессов с суммарным годовым экономическим эффектом около 330 000 рублей.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Блюменштейн В. Ю., Махалов М. С., Сусленков С. В. Обработка профилограмм очагов деформации при размерном совмещенном обкатывании и поверхностном пластическом деформировании. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2002611071 от 27 июня 2002 г.
2. Блюменштейн В. Ю., Махалов М. С. Расчет параметров процесса размерного совмещенного обкатывания. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002611072 от 27 июня 2002 г.
3. Махалов М. С. Исследования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя при обработке методом размерного совмещенного обкатывания / М. С. Махалов // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: тр. Всероссийской науч.-практ. конф. - Томск: Изд-во ТПУ, 2003. - 374 с. - С. 100.
4. Махалов М. С. Формирование поверхностного слоя деталей машин при обработке способом размерного совмещенного обкатывания / М. С. Махалов // Прогрес-

- сивные технологии и экономика в машиностроении : тр. II Всероссийской науч.-практ. конф. В 2 т. / Филиал ТПУ. - Юрга: Изд. ТПУ, 2004. - Т.1. - 200 с. - С. 155.
5. Блюменштейн В. Ю. Очаг деформации при размерном совмещенном обкатывании как основа физических представлений и решения задач механики технологического наследования / В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов // Вестник КузГТУ. - 2004. - № 4. - С. 83-89.
 6. Блюменштейн В. Ю. Управление качеством поверхностного слоя деталей машин на основе применения размерного совмещенного обкатывания / В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов // Известия ОрелГТУ. - 2004. - № 2. - С. 24-28.
 7. Блюменштейн В. Ю., Махалов М. С. Расчет наследуемых параметров процесса размерного совмещенного обкатывания. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005611281 от 31 мая 2005г.
 8. Махалов М. С. Алгоритм расчета параметров размерного совмещенного обкатывания / М. С. Махалов // Информационный листок / Кем ЦНТИ. - Кемерово, 2005. - 3 с.
 9. Махалов М. С. Экспериментальная установка для размерного совмещенного обкатывания усталостных образцов / М. С. Махалов // Информационный листок / Кем ЦНТИ. - Кемерово, 2005. - 3 с.
 10. Блюменштейн В. Ю. Механика поверхностного слоя при обработке размерным совмещенным обкатыванием / В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов // Упрочняющие технологии и покрытия. - М.: Машиностроение, 2006. - №2(14). - С. 18-27.
 11. Махалов М. С. Структурно-аналитическая модель управления качеством поверхностного слоя и долговечностью деталей машин на основе применения способа размерного совмещенного обкатывания / М. С. Махалов // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: тр. IV Всероссийской науч.-практ. конф. с международным участием. В 2 т. / ЮТИ ТПУ. - Юрга: Изд. ТПУ, 2006. - Т.1. - 154 с. - С. 42-45.
 12. Блюменштейн В. Ю. Влияние режимов размерного совмещенного обкатывания на механическое состояние поверхностного слоя / В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов // Упрочняющие технологии и покрытия. - М.: Машиностроение, 2006. - № 5(17). - С. 21-29.
 13. Махалов М. С. Автоматизация проектирования технологии размерного совмещенного обкатывания / М. С. Махалов // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. В 2-х т. Т.2. - 2006. - № 3(529) - С. 31-36.

Махалов Максим Сергеевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
РАЗМЕРНЫМ СОВМЕЩЕННЫМ ОБКАТЫВАНИЕМ

05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати Формат

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе

Уч. изд. л. _____. Тираж _____. Заказ

ГУ Кузбасский государственный технический университет

650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28

Типография ГУ Кузбасский государственный технический университет

650099, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 А