

На правах рукописи



ЯКОВЛЕВА АННА ПЕТРОВНА

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ
КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ И ПОВЕРХНОСТНОЙ
ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ
ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ**

Специальность 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Воронеж – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт машиноведения имени А.А. Благонравова (ИМАШ РАН)

Научный консультант:

Албагачиев Али Юсупович,
доктор технических наук,
профессор, заведующий отделом
«Износ, трение, смазка. Трибология»,
ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова

Официальные оппоненты:

Приходько Вячеслав Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технологии конструкционных материалов»,
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-
дорожный государственный технический университет (МАДИ)»

Киричек Андрей Викторович,
доктор технических наук,
профессор,
проректор по перспективному развитию
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Кадырметов Анвар Минирович
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Машиностроительные технологии»
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»

Защита состоится 30 октября 2025 г. в 12⁰⁰ часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета 24.2.286.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ), по адресу: 394026, Воронеж, Московский просп., 14.

Адрес для отправки отзыва на автореферат диссертации: 394006, Воронеж, ул. 20 -летия Октября, 84, ВГТУ, Отдел диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте <https://schgeu.ru/> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет».

Автореферат разослан «15» июня 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Мандрыкин Андрей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Продление срока службы машин и оборудования – одна из приоритетных задач. Снижение риска преждевременного износа деталей в парах трения имеет решающее значение для таких отраслей, как машиностроение, авиация и космическая промышленность. Надёжность и долговечность быстроизнашивающихся деталей напрямую определяют экономическую эффективность эксплуатации дорогостоящей техники. Проблемы износа деталей в парах трения имеются в авиационной промышленности, например, в золотниковых и плунжерных парах, парах трения редукторов авиационных двигателей в самолетах малой авиации или в беспилотных летательных аппаратах.

Кроме этого, строительные, сельскохозяйственные, железнодорожные и дорожные машины оснащены гидравлическими системами. Эти системы осуществляют подъем, опускание и привод рабочих органов прицепного, полуприцепного, навесного оборудования и сельхозорудий. Однако у этих механизмов низкий ресурс работы. Анализ показал, что отказы гидравлических систем (гидрораспределителей, гидронасосов, дозаторов и др.) составляют 40...50 % общего количества отказов, вследствие этого простои строительной техники составляют 35...40 %, а сельхозтехники – 42...45 %. Из-за простоев техники строительные организации, дорожные службы, фермерские хозяйства и др. несут миллионные убытки. Основные причины отказов – износ золотниковых и плунжерных пар. Износ плунжерной пары вызывает снижение КПД на 20 %, кроме того, попадание абразивных частиц вызывает износ, заклинивание и быстрый выход из строя. У золотниковой системы происходит износ золотников. При заводском ресурсе в 5000 ч, реальный ресурс работы составляет 2800...3200 ч. Попадание в топливо и жидкости абразивных частиц определяет низкий ресурс работы этих пар, механизмов и машин в целом. Причем выход из строя носит в основном внезапный характер. Основной вид износа – гидроабразивный. Ресурс работы также значительно снижают прижоги и термические трещины, которые образуются в процессе шлифования поверхностей, упрочненных до высокой твердости и задиры, которые возникают при растягивающих напряжениях в поверхностном слое.

Плунжеры, золотники, толкатели для гидравлического оборудования изготавливают из качественных углеродистых и легированных марок стали – 38ХМЮА, 40ХНМА, 20ХЗМНФ, 40Х и др. Технические требования: по точности – 6...7 квалитет, но для некоторых машин сельхозназначения допускается 8 квалитет; шероховатости – Ra 0,1...0,4 мкм; по износостойкости – HRC 48...62; по глубине упрочнения – до 1,1 мм. Износостойкость, как правило, обеспечивают цементацией, азотированием, закалкой ТВЧ, карбонитрированием. Однако эти методы не гарантируют отсутствие отказов и больших потерь при простоях техники, поэтому работы, направленные на повышение износостойкости, являются актуальными.

Наукой и практикой предложено большое количество методов обеспечения износостойкости, но изготовители машин по-прежнему используют азотирование, цементацию, закалку ТВЧ и карбонитрирование. Этому есть объяснение: у золотников и плунжеров большое разнообразие конструктивных и размерных элементов и для каждого типа и размера менять режимы, оснастку или инструмент затруднительно. И в закалочных печах можно упрочнять не только золотники и плунжеры, а валы, оси, кольца и др., что очень удобно. Поэтому задачей является найти универсальный метод, который бы создал резерв для повышения износостойкости золотников и плунжеров, но подходил для

различной номенклатуры деталей. И такими методами могут быть методы упрочнения концентрированными потоками энергии (КПЭ) – лазерная закалка, электромеханическая обработка или плазменная закалка. Эти методы универсальны, экологичны, экономичны, прекрасно встраиваются в техпроцесс и в технологические комплексы, упрочнение возможно на строго определенном участке поверхности и нет коробления. Кроме этого, хорошее по качеству и цене оборудование для этих методов, изготавливают на территории РФ.

Однако методы упрочнения КПЭ имеют особенность – наличие зон отпуска. В этих зонах наблюдается некоторое снижение твердости, и эти зоны могут быть зонами концентрации напряжений (ЗКН), что накладывает ограничения на применение методов. Поэтому необходимо устранить этот недостаток, и решением задачи может быть применение комбинированной обработки.

В настоящее время наметилась тенденция создания комбинированных способов воздействия на поверхности. Это позволяет исключить недостатки, повысить эксплуатационные показатели, в том числе за счет получения поверхностей с новыми свойствами – модифицированных поверхностей.

Эффективность комбинированной обработки подтверждена в работах В.Н. Подураева, М.Л. Хейфеца, Е.В. Смоленцева, А.Г. Сулова, А.В. Киричека, А.Н. Михайлова, Б.П. Саушкина, Е.С. Киселева, О.Н. Кириллова, А.М. Кадырметова и др. Существует несколько подходов к разработке процессов комбинированной обработки (КО), однако все подходы направлены на объединение различных технологических методов для достижения оптимальных результатов. Имеется большое количество работ, в которых доказана эффективность комбинированных методов для различных деталей, в том числе и для авиационно-космической отрасли. Это работы А.И. Болдырева, В.П. Смоленцева, Г.А. Сухочева, С.В. Усова и др. Вместе с тем, остались неизученными вопросы теоретического исследования процессов комбинированного воздействия на поверхностный слой концентрированными потоками энергии в сочетании с другими методами обработки и отсутствуют практические и экспериментальные материалы по этому направлению.

Научный подход заключается в выборе дополнительного способа обработки для исключения ЗКН после упрочнения концентрированными потоками энергии и получения поверхностей с новыми свойствами для повышения ресурса деталей.

Методы поверхностной пластической деформации (ППД) благоприятно воздействуют на поверхностный слой, в частности, после термической обработки. Поэтому можно сделать предположение, что методы ППД окажут положительное влияние на качество поверхности и износостойкость золотников и плунжеров гидравлического оборудования после упрочнения КПЭ. Разные по своей природе физические воздействия могут исключить недостатки и увеличить положительные качества поверхностного слоя под влиянием фактора наследственности.

Решаемая в работе научная проблема – создание теоретических и методических основ процессов комбинированной обработки (концентрированными потоками энергии с поверхностной пластической деформацией), обеспечивающих оптимальные технологические условия для получения заданного качества модифицированных износостойких поверхностных слоев у деталей с контактными поверхностями трения в жидких рабочих средах на примере золотниковых и плунжерных пар трения.

Настоящее диссертационное исследование посвящено разработке и исследованию процессов комбинированной обработки для исключения ЗКН и получению модифицированных износостойких поверхностей, обеспечивающих повышение ресурса

машин и механизмов на примере золотниковых и плунжерных пар трения гидравлического оборудования, используемого у различных видов техники (соответствует паспорту специальности 2.5.5. п. 2, 3, 7).

Данная работа может быть полезна при реализации программы «Феникс» и может рассматриваться как научно-технический задел при создании новой ракеты-носителя для пилотируемой программы.

Цель диссертационной работы: разработка теоретических основ и новых технологий комбинированной обработки деталей концентрированными потоками энергии с поверхностной пластической деформацией, обеспечивающих получение модифицированных износостойких поверхностных слоев с резервом увеличения ресурса деталей гидравлического оборудования на примере золотниковых и плунжерных пар.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать теоретические основы технологического обеспечения и принципы системы управления комбинированных процессов с КПЭ и ППД с формированием модифицированных износостойких поверхностных слоев детали.

2. Разработать математические модели комбинированных процессов упрочнения поверхностей деталей концентрированными потоками энергии с помощью лазерной закалки и ЭМО с поверхностным пластическим деформированием алмазным выглаживанием. Теоретически оценить изменение параметров масляных карманов и количества зон концентрации напряжений в зависимости от режимных факторов процессов.

3. Определить закономерности влияния технологических параметров (силы тока, мощности, напряжения, ширины ролика–электрода или диаметра луча лазерного источника, плотности мощности излучения, силы прижима инструмента к детали, геометрии алмазного выглаживателя и др.) на теплофизические (теплопроводность и плотность обрабатываемых материалов), физико-механические (твердость, глубину упрочнения, остаточные напряжения, шероховатость поверхности и глубину масляных карманов) критерии комбинированных процессов. На основе установленных закономерностей и моделей указать рациональные области экспериментов и сравнить их с известными результатами исследований.

4. На основе экспериментальных исследований определить закономерности влияния параметров процессов комбинированной обработки (силы тока, мощности, напряжения, ширины ролика–электрода или диаметра луча лазерного источника, плотности мощности излучения, силы прижима инструмента к детали, геометрии алмазного выглаживателя и др.) на физико-механические и триботехнические критерии качества модифицированных поверхностей (на маслоемкость поверхностей, отсутствие зон концентрации напряжения и износостойкость).

5. Создать методологию проектирования технологических процессов КО на основе использования упрочняющей обработки КПЭ лазерной закалкой или ЭМО с отделочной обработкой ППД (алмазным выглаживанием), обеспечивающих получение в обрабатываемых деталях модифицированных износостойких слоев заданного качества без зон концентрации напряжений на основе оптимизации теплофизических и механических процессов с учетом параметров детали и эксплуатационных нагрузок на его поверхности.

6. Разработать рекомендации по выбору и оптимизации комбинированных технологических процессов обработки деталей гидравлического оборудования на примере плунжерных и золотниковых пар трения с учетом технических и эксплуатационных требований к деталям.

7. Предложить новые научные направления, которые позволят разработать наукоемкие технологии и получить новые свойства поверхностного слоя. Для дальнейшего развития комбинированных методов обработки рассмотреть возможность эксплуатации пар трения в низких температурах и исследовать изменение свойств в износостойком модифицированном поверхностном слое при низкотемпературном воздействии.

Научная новизна диссертационного исследования и результатов, полученных лично автором, заключается в следующем:

1. Разработана научно обоснованная методика проектирования процессов КО с применением концентрированных потоков энергии и ППД, отличающиеся от существующих тем, что учтен тип производства при выборе оборудования, инструмента, оснастки и анализ результатов (параметров качества модифицированной износостойкой поверхности) проводят с учетом технологической наследственности. По данной методике разработаны процессы для получения модифицированных износостойких поверхностных слоев на примере деталей золотниковых и плунжерных пар гидравлического оборудования. Полученные параметры качества поверхностей: твердость (до 62 HRC), глубина упрочнения (до 1,3 мм), шероховатость (до Ra 0,4 мкм) и остаточные напряжения (до 1900 МПа) в сочетании с масляными карманами, – создают резерв для повышения износостойкости.

2. Впервые теоретически установлено и экспериментально подтверждено влияние методов и режимов КО на образование зон концентрации напряжений в модифицированном поверхностном слое при влиянии фактора наследственности. После КО в поверхностном слое не выявлены ЗКН. Установлено, что методы ППД (например, алмазное выглаживание) является технологическим барьером для поверхностных дефектов, а методы термического воздействия (лазерная закалка, электромеханическая обработка или плазменная закалка) не являются технологическим барьером для некоторых поверхностных дефектов.

3. Получены теоретические и эмпирические зависимости параметров качества поверхностного слоя модифицированных износостойких поверхностей от режимов КО, отличающиеся тем, что учтены особенности процессов – наличие зон отпуска. Параметры качества поверхностного слоя: остаточные напряжения, глубина масляного кармана и шероховатость поверхности были определены с учетом влияния технологической наследственности.

4. Установлена взаимосвязь содержания процессов КО, режимов обработки с параметрами качества модифицированных поверхностей и износостойкостью – сочетание твердости, глубины упрочнения, шероховатости, остаточных напряжений с масляными карманами, полученными при КО создают резерв для увеличения износостойкости.

5. Создана методология проектирования технологических процессов КО, отличающаяся возможностью решения обратной задачи по схеме: оптимальный уровень эксплуатационных свойств (износостойкость) – оптимальный диапазон режимов КО.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана научно обоснованная методика проектирования процессов КО с применением концентрированных потоков энергии и ППД с учетом технологических требований для повышения износостойкости деталей с контактными поверхностями трения в жидких рабочих средах и расширяющая технологические знания в области получения новых поверхностных свойств деталей и перспектив их дальнейшего развития.

2. Выведены теоретические зависимости параметров модифицированных поверхностей и режимов КО, которые позволяют управлять свойствами поверхностных слоев на этапе технологической подготовки производства.

3. Разработаны процессы комбинированных методов обработки для получения модифицированных поверхностей, повышения качества поверхностного слоя и износостойкости на примере золотниковых и плунжерных пар трения.

4. Доказана эффективность разработанных методов внедрением и испытаниями на ведущих предприятиях общего машиностроения (имеются акты о внедрении и испытаниях на более 10 ведущих предприятиях РФ) и авиационно-космической отрасли (имеется акт внедрения).

5. Разработаны инженеринговые решения для внедрения на предприятиях (рекомендации по выбору режимов обработки для различных сталей, руководство по эксплуатации установки по ЭМО и др.), изготавливающих детали с контактными поверхностями трения в жидких рабочих средах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика проектирования процессов КО с применением концентрированных потоков энергии и ППД, позволяющая получить модифицированные износостойкие поверхностные слои на примере золотниковых и плунжерных пар гидравлических систем.

2. Механизм формирования модифицированной поверхности при различных режимах КО с применением концентрированных потоков энергии и ППД, позволяющий получить поверхности с масляными карманами и создать резерв повышения износостойкости для деталей с контактными поверхностями трения в жидких средах.

3. Модель наследственного влияния режимов и методов обработки на механизм образования ЗКН.

4. Теоретические и экспериментальные зависимости, определяющие влияние технологических факторов и конструкционных особенностей устройств для КО на качество модифицированного поверхностного слоя и износостойкость.

5. Технологические рекомендации по обеспечению требуемых показателей качества поверхностного слоя и износостойкости деталей машин после КО.

Степень достоверности результатов исследований подтверждается адекватностью математических моделей, построенных с использованием реальных результатов исследований, удовлетворительным совпадением теоретических положений с результатами моделирования исследуемых процессов. Совпадение теоретических исследований с практическими испытаниями составляет 80 ± 10 %. Полученные результаты не противоречат исследованиям других авторов. Достоверность теоретических и экспериментальных результатов подтверждена практическим применением в промышленности.

Публикации:

Основное содержание диссертации отражено в 37 работах, в том числе: 2 монографии, 34 статьи в журналах, 20 из которых рекомендованы ВАК РФ для публикации основных результатов научных работ соискателей ученой степени кандидата и доктора наук, 1 патент РФ.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и результатов по диссертации, списка литературы из 339 источников, приложений. Основная часть работы изложена на 279 страницах, содержит 68 рисунков и 24 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решаемой научной проблемы, сформулированы цель, задачи работы, научная новизна, практическая ценность и реализация результатов работы, а также научные положения и результаты, выносимые на защиту.

Глава 1. Анализ состояния проблемы и определение научного направления исследования

Глава содержит аналитический обзор материалов, опубликованных в открытой печати и посвящена, прямо или косвенно, проблеме исследования по следующим направлениям:

а) *по отказам различных видов техники.* Анализ показал, что одна из основных причин простоев – выход из строя гидравлического оборудования, в том числе золотниковых и плунжерных пар трения. Установлено, что от 50 до 80 % деталей выходят из строя по причине износа рабочих поверхностей. Методы получения износостойких поверхностей, применяемых при производстве золотниковых и плунжерных пар трения, не решают в полной мере проблему простоев и отказов;

б) *по технологическим способам повышения износостойкости деталей* (упрочняющей обработки, отделочной обработки, комбинированной обработки). Проведена классификация всех технологических способов повышения износостойкости. В основу классификации положено различие физических, физико-технических и химических процессов. Анализ показал, что обработка поверхностей методами КПЭ является перспективной, управляемой, экологически безопасной. Сочетание различных способов обработки позволяет создать резерв для повышения износостойкости;

в) *по обеспечению эксплуатационных свойств деталей с учетом технологической наследственности,* наследственного влияния на формирование концентраторов напряжений, которые переходят в процессе эксплуатации в поверхностные трещины и ведут к усталостным изломам;

г) *по анализу эксплуатационных свойств деталей машин и механизмов с модифицированными поверхностями и поверхностями с масляными карманами.* Последнее время производители машин изготавливают реплики к зарубежным деталям. На территории РФ скопилось большое количество зарубежной техники, а поставка запчастей затруднена или невозможна. Анализ литературы показал, что на деталях гидравлического оборудования зарубежных производителей имеются масляные карманы. На заводах CAT, CASE их наносят травлением по трафарету методами КО, а на Volvo, JCB – механическим методом. Получение масляных карманов позволяет снизить износ за счет увеличения маслостойкости поверхности и увеличить ресурс оборудования;

д) *по анализу комбинированных методов обработки.* Комбинированные процессы обработки являются сочетанием технологических операций или приемов, с помощью которых можно усилить положительные качества или снизить недостатки, необходимые для технологического процесса изготовления детали или ее эксплуатации. При различных сочетаниях теплового, магнитного, химического и механических воздействий созданы комбинированные процессы, которые повышают эксплуатационные, технологические, экономические и другие показатели, однако некоторые проблемы остались нерешенными. Для эффективного применения КО на производстве необходимо четко представлять, за счет чего изменяется качество поверхности или происходит формообразование.

Эффективность КО подтверждена в работах многих научных школ Москвы, Воронежа, Тулы, Брянска и др. Существует несколько подходов к разработке процессов КО и их определений.

В.Н. Подураев выполнил классификацию комбинированных способов физико-технической обработки. В основу классификации были положены: тип энергии, способ подвода энергии, вид физико-химического механизма, схема формообразования. При этом

под КО понималось использование одновременно нескольких способов воздействия на заготовку.

А.Н. Михайлов разработал классификацию КО для упрочнения тонкостенных деталей с применением магнитного поля. Многие способы упрочнения исчерпали свои возможности и значительно не повышают или не изменяют свойства изделия при совершенствовании способа. Поэтому более рационально использовать комбинированные способы воздействия. А.Н. Михайлов дает следующее определение КО – это сочетание двух и более различных методов обработки для выполнения одной технологической операции. При этом характер энергетических воздействий будет различаться, он может быть распределенным, концентрированным, пульсирующим, постоянным и др. В работах А.Н. Михайлова и других доказано, что КО снижает энергетические затраты в 1,5...2 раза и повышает производительность.

В.П. Смоленцев и Е.В. Смоленцев предложили классификацию и методику проектирования КО прессованных материалов, немагнитных материалов и с наложением электрического поля. Они считают, что комбинированные методы обработки – это сочетание различных технологических приемов, при которых усиливаются положительные качества изготовления или эксплуатации деталей.

А.И. Марков разработал классификацию и методику проектирования комбинированных методов обработки с применением ультразвука.

А.Г. Суслов, А.В. Киричек и другие ученые разработали, исследовали и классифицировали методы комбинированной отделочно – упрочняющей обработки ППД. Авторы под КО понимают одновременное воздействие несколькими инструментами на поверхностный слой детали.

Однако наиболее точное определение КО дал М.Л. Хейфец. Он считает, что КО – это методы, в которых процессы удаления материала, преобразования или нанесения его на обрабатываемый материал происходят в результате протекания двух и более воздействий, осуществляемых по своему механизму. Воздействие при этом может быть параллельное, последовательное или со сдвигом во времени.

Но, несмотря на значительные достижения в области разработки комбинированных методов, некоторые проблемы остаются нерешенными. Кроме того, зная виды воздействия при том или ином способе, необходимо оценить целесообразность их использования в каждом конкретном случае, исходя из возможностей оборудования, технических требований к детали и др.

Методы обработки КПЭ и методы ППД, например, электромеханическая обработка и дорнование, плазменная закалка и трение абразивными частицами, электроискровая обработка и обкатка шариками и др., были разработаны на уровне изобретений или не нашли широкого применения на производстве. Таким образом, возникла необходимость разработки универсальной методики для проектирования процессов КО с наложением физических воздействий (например, методов обработки КПЭ и методов ППД). Методы обработки КПЭ имеют огромный потенциал для развития и совершенствования, а методы ППД отличаются простотой, универсальностью и экономичностью. Такие методы КО могут найти применение в промышленности и решить многие проблемы, например низкого ресурса деталей с контактными поверхностями трения в жидких средах, в том числе, применяемые в гидравлическом оборудовании.

На основе проведенного анализа сделаны выводы и сформулированы задачи.

Глава 2. Теоретическое исследование влияния режимов комбинированной обработки на параметры модифицированного поверхностного слоя

Особенностью методов упрочнения КПЭ является наличие зон отпуска, в которых отмечается снижение твердости поверхности. Это накладывает ограничения на применение методов упрочнения КПЭ из-за наличия ЗКН.

Анализ методов ППД показал, что применение пластической деформации оказывает положительное влияние на поверхностный слой после термического воздействия. Поэтому было выдвинуто предположение, что совмещение методов даст положительный эффект – можно получить поверхности с новыми свойствами (модифицированные износостойкие поверхности), исключить наличие ЗКН и создать резерв для повышения износостойкости деталей с контактными поверхностями трения в жидких средах, на примере золотников и плунжеров гидравлического оборудования.

В диссертационной работе теоретически были разработаны процессы КО, которые заключаются в последовательном применении одного из методов упрочнения КПЭ (лазерной закалки, электрохимической обработки, плазменной закалки) и метода ППД – алмазного выглаживания (рисунок 1).

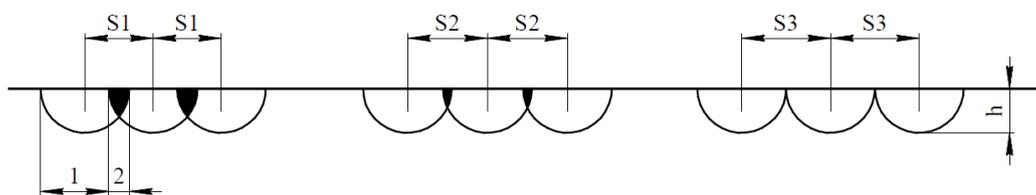


Рисунок 1 – Схема упрочнения цилиндрической поверхности лазерной закалкой или электрохимической обработкой: 1 – упрочненная область; 2 – область отпуска; S1, S2, S3 – шаг обработки; h – глубина упрочнения

Объединяя преимущества методов упрочняющей (упрочнения КПЭ) и отделочной (ППД) обработок можно предположить, что зоны отпуска после лазерной закалки или ЭМО или других методов, в сочетании с алмазным выглаживанием, образуют новый рельеф поверхности с новыми свойствами – модифицированные поверхности с масляными карманами, позволяющими исключить ЗКН.

Механизм формирования модифицированной поверхности будет заключаться в следующем: после воздействия КПЭ на поверхности образуется упрочненный слой с зонами отпуска. Алмазный выглаживатель проходя по этой поверхности будет сглаживать микронеровности, в поверхностном слое будут образовываться сжимающие остаточные напряжения. Попадая в зону отпуска, алмазный выглаживатель образует винтовую канавку (или масляный карман). В этой канавке будут удерживаться смазка и оседать твердые частицы, попавшие в масло (рисунок 2). Полученный рельеф поверхности будет изменяться с определенной закономерностью. Сочетание режимов, методов обработки и наложения разных по природе физических воздействий позволит получить на поверхности деталей модифицированный износостойкий слой.

Были рассмотрены процессы КО, которые заключаются в последовательном применении одного из методов упрочнения КПЭ (лазерная закалка или ЭМО) и алмазного выглаживания (рисунок 2, а, б). При КО зоны перекрытия полос закалки зависят от величины подачи ролика-электрода или смещения луча лазера (рисунок 2, а). Ставилась задача теоретически определить параметры качества поверхностного слоя в зависимости от

режимов обработки при влиянии технологической наследственности. Одним из существенных параметров, влияющих на износостойкость, являются остаточные напряжения в поверхностном слое. Для этого в исследовании были определены напряжения I рода, так как именно они являются наиболее значимыми с точки зрения практического применения, что доказано в работах отечественных и зарубежных ученых.

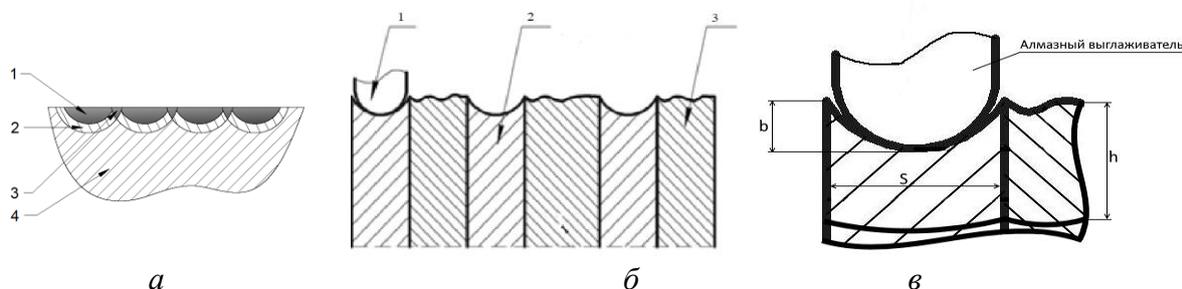


Рисунок 2 – Механизм формирования модифицированного слоя после комбинированной обработки: а – схема упрочнения с перекрытием: 1 – зона упрочнения, 2 – зона термического влияния, 3 – зоны отпуска, 4 – основной металл; б – получение масляных карманов: 1 – рабочая часть алмазного выглаживателя; 2 – зона отпуска; 3 – упрочненная область; в – схема для расчета параметров масляного кармана: b – глубина масляного кармана; S – ширина масляного кармана (ширина зоны отпуска); h – глубина модифицированного слоя

В работах И.А. Биргера, К.М. Гатовского и др. доказано, что при различных видах воздействий на поверхностный слой, остаточные напряжения будут складываться из нескольких составляющих. При КО это – температурная составляющая, на которую будут оказывать влияние режимы обработки КПЭ, структурно-фазовая составляющая, которая будет зависеть от физико-механических свойств материала на всех этапах обработки, и механическая составляющая, на которую будут оказывать влияние режимы алмазного выглаживания:

$$\sigma_{\text{ост}} = \sigma_{\text{темп}} + \sigma_{\text{ф}} + \sigma_{\text{мех}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{темп}}$ – температурные остаточные напряжения; $\sigma_{\text{ф}}$ – структурно-фазовые остаточные напряжения; $\sigma_{\text{мех}}$ – механические остаточные напряжения.

Для КО с применением в качестве упрочняющей обработки ЭМО:

$$\sigma_{\text{темп}}(z) = \alpha E \Delta\theta(z) \quad (2)$$

где z – текущая координата, определяющая глубину упрочненного поверхностного слоя, м; α – коэффициент линейного расширения материала детали K^{-1} ; $\Delta\theta(z)$ – максимальная температура на глубине z поверхностного слоя детали; E – модуль упругости, $\text{H}/\text{м}^2$.

В работах А. Д. Бондаренко, Л. Л. Фадеева, А. Ю. Албагачиева, Ю. И. Няшина доказано, что величина и знак остаточных напряжений будут зависеть от температуры в зоне обработки. Для расчета максимальной температуры в зоне нагрева можно воспользоваться зависимостью, выявленной в работе Албагачиева А. Ю. и Преображенской Е. В. Однако эта формула является сложной для инженерных расчетов и ее удалось существенно упростить. В финале получилась следующая зависимость:

$$\Delta\theta(z) = \frac{2\alpha_{\text{т}}(IU)}{\lambda_1 A\sqrt{\pi}} \left(\sqrt{at} e^{\left(\frac{-z^2}{4at}\right)} \right), \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{т}}$ – коэффициент распределения тепловых потоков (коэффициент теплопоглощения Шарона); I – сила тока, А; U – напряжение, В; λ_1 – теплопроводность материала детали, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $A = lB$; B – ширина упругого контакта инструмента по Герцу; l – длина касания

инструмента с обрабатываемой поверхностью, м; a – температуропроводность материала детали, м²/с; t – время контакта, с.

Результаты расчетов по формуле, представленной в работе А.Ю. Албагачиева и Е.В. Преображенской и по зависимости (3) отличается незначительно, поэтому в дальнейшем можно использовать более удобный вариант.

Структурно-фазовые остаточные напряжения σ_ϕ можно определить, учитывая рекомендации А. В. Кудрявцева, А. Г. Сулова и др.:

$$\sigma_\phi = -E \left(1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right), \quad (4)$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотность материала до и после обработки соответственно, кг/м³.

Механические остаточные напряжения возникают за счет действия на материал детали усилия со стороны инструмента при алмазном выглаживании:

$$\sigma_{\text{мех}}(z) = -\frac{P_g}{\pi} * \left[\frac{3}{2(r^2+z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln \left(\frac{z}{2r} \right) - \frac{3}{10r^2} \right], \quad (5)$$

$$P_g = \sum_{i=1}^n P_i,$$

P_i – сила прижима электрода-инструмента и алмазного выглаживателя, Н; r – длина касания инструмента с обрабатываемой поверхностью (радиус алмазного выглаживателя), мм.

Подставляя формулы (2), (4) и (5) в формулу (1) получаем теоретическую зависимость для расчета остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое детали после комбинированной обработки (ЭМО и алмазного выглаживания):

$$\sigma_{\text{ост}} = \alpha E \frac{2\alpha_T(IU)}{\lambda_1 l_{\text{инс}}^2 \sqrt{\pi}} \left(\sqrt{at} e^{\left(\frac{-z^2}{4at}\right)} \right) - \frac{P_g}{\pi} \cdot \left[\frac{3}{2(r^2+z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln \left(\frac{z}{2r} \right) - \frac{3}{10r^2} \right] - E \left(1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right) \quad (6)$$

Для КО с применением в качестве упрочняющей обработки лазерной заковки формула (1) будет иметь вид

$$\sigma_{\text{ост}} = \alpha E \frac{2(1-R)qz}{\lambda_1} - \frac{P_g}{\pi} \cdot \left[\frac{3}{2(r^2+z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln \left(\frac{z}{2r} \right) - \frac{3}{10r^2} \right] - E \left(1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right), \quad (7)$$

$\sigma_{\text{темп}}(z)$ находим по формуле (2).

$$\Delta\theta(z) = \frac{2(1-R)qz}{\lambda_1} (\sqrt{at} \operatorname{erfc} \left[\frac{z}{2\sqrt{at}} \right] - \sqrt{a(t-\tau)} \operatorname{erfc} \left[\frac{z}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right]), \quad (8)$$

где R – коэффициент отражения материала; q – плотность мощности лазерного излучения, кВт/м², $q = N/s$, N – мощность лазерного излучения, кВт; s – площадь воздействия, м², $\operatorname{erfc} \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right)$ – значение функции ошибок.

Для простоты расчета используем зависимость, более удобную в инженерных расчетах

$$\sigma_{\text{темп}}(z) = \alpha E \frac{2(1-R)qz}{\lambda_1}, \quad (9)$$

Структурно-фазовые остаточные напряжения рассчитаем по формуле (4). Механические остаточные напряжения будут зависеть от режимов алмазного выглаживания:

$$\sigma_{\text{мех}}(z) = -\frac{P}{\pi} \cdot \left[\frac{3}{2(r^2+z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln \left(\frac{z}{2r} \right) - \frac{3}{10r^2} \right], \quad (10)$$

где P – сила прижима алмазного выглаживателя, Н; r – радиус алмазного выглаживателя, мм.

Для удобства расчетов разработана компьютерная программа для вычисления параметра остаточных напряжений по формулам (6), (7) на языке Visual studio 2017 C#. Все данные заносят в таблицу и получают значение параметра остаточных напряжений в

поверхностном слое в зависимости от режимов КО. Глубина залегания остаточных напряжений (упрочнения) до 1,4 мм. (таблица 1).

В настоящем диссертационном исследовании выполнен теоретический анализ параметров масляного кармана (или винтовой канавки), полученного после КО.

Таблица 1 – Результаты расчетов остаточных напряжений по формулам (6), (7)

Методы комбинированной обработки	Режимы обработки	Остаточные напряжения, МПа
Электромеханическая обработка и алмазное выглаживание	$I = 2500 \text{ А}; V = 1,2 \text{ м/мин}; S = 2,5 \text{ мм/об.},$ сила прижима алмазного выглаживателя $P = 200 \text{ Н};$ подача алмазного выглаживателя $S = 0,04 \text{ мм/об.};$ радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 0,5 \text{ мм};$ скорость обработки $V = 45 \text{ м/мин}$	-1734
	$I = 2500 \text{ А}; V = 1,2 \text{ м/мин}; S = 1,5 \text{ мм/об.};$ сила прижима алмазного выглаживателя $P = 250 \text{ Н};$ подача алмазного выглаживателя $S = 0,03 \text{ мм/об.};$ радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1 \text{ мм};$ скорость обработки $V = 45 \text{ м/мин}$	- 1907
	$I = 2000 \text{ А}; S = 2 \text{ мм/об.}; V = 3,2 \text{ м/мин};$ сила прижима алмазного выглаживателя $P = 220 \text{ Н};$ подача алмазного выглаживателя $S = 0,02 \text{ мм/об.};$ радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 0,5 \text{ мм};$ скорость обработки $V = 45 \text{ м/мин}$	- 1650
	$I = 3000 \text{ А}; S = 3,2 \text{ мм/об.}; V = 2,1 \text{ м/мин};$ сила прижима алмазного выглаживателя $P = 230 \text{ Н};$ подача алмазного выглаживателя $S = 0,03 \text{ мм/об.};$ радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1 \text{ мм};$ скорость обработки $V = 45 \text{ м/мин}$	- 1971
Лазерная закалка и алмазное выглаживание	$N = 1,4 \text{ кВт}; V = 25 \text{ мм/с}; d = 2 \text{ мм};$ сила прижима алмазного выглаживателя $P = 230 \text{ Н};$ подача $S = 0,04 \text{ мм/об.};$ скорость обработки $V = 45 \text{ м/мин};$ $r = 1 \text{ мм}$	- 1260
	$N = 1,2 \text{ кВт}; V = 20 \text{ мм/с}; d = 4 \text{ мм}; P = 200 \text{ Н};$ $S = 0,02 \text{ мм/об.}; r = 0,5 \text{ мм}$	- 1103
	$N = 1,2 \text{ кВт}; V = 10 \text{ мм/с}; d = 5 \text{ мм}; P = 220 \text{ Н};$ $S = 0,025 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}$	- 1120
	$N = 1,3 \text{ кВт}; V = 15 \text{ мм/с}; d = 4 \text{ мм}; P = 200 \text{ Н};$ $S = 0,02 \text{ мм/об.}; r = 0,5 \text{ мм}$	- 1210

Теоретическими предпосылками для получения зависимости является анализ работ Я.Д. Вишнякова, В. Д. Пискарева, С. А. Зайдеса и др. В работе С. Г. Хейфеца доказано, что глубина упрочнения при ППД связана с величиной вдавливания индентора в поверхностный слой:

$$h = \sqrt{\frac{P \mu}{2\pi R H V}},$$

где P – сила деформирования, Н; HV – твердость поверхностного слоя, кгс/мм²; μ – коэффициент Пуассона; R – радиус поверхности, мм.

В этой и др. зависимостях, представленных ранее, не учтено влияние упругих деформаций и радиуса индентора (алмазного выглаживателя), однако эти величины являются определяющими. При вдавливании выглаживателя в упрочненный поверхностный слой с зонами отпуска влияние упругих деформаций может быть существенным и не позволит с высокой степенью точности определить глубину вдавливания. В работе было экспериментально установлено, что при одной и той же силе вдавливания, но при разных

значениях радиуса вершины индентора глубина отпечатка будет различной. Учитывая эти дополнения и проведя преобразования, получаем теоретическое выражение для расчета глубины масляного кармана:

$$b = 1,3 r \left(P \frac{(1-\mu^2)HV}{E\sigma_T S^2} \right)^{2/3}, \quad (11)$$

где HV – твердость по Виккерсу; E – модуль упругости материала; μ – коэффициент Пуассона; r – радиус алмазного выглаживателя, σ_T – предел текучести материала, S – ширина зоны отпуска, мм (рисунок 2, в).

Исследование показало, что на глубину масляного кармана основное влияние будет оказывать твердость поверхности, полученная при упрочнении КПЭ, сила прижима алмазного выглаживателя к детали и его геометрия. Второстепенное влияние – физико-механические свойства материалов деталей. Однако нельзя их не учитывать т.к. разработанные процессы КО возможно применять для различных деталей с контактными поверхностями трения в условиях жидких сред и эти свойства могут иметь значительные отличия у различных материалов, что важно при прогнозировании параметров качества поверхностных слоев на этапе технологической подготовки производства.

В главе представлено исследование влияния режимов КО на микрорельеф поверхностного слоя. Для разработки эмпирической зависимости шероховатости поверхности от режимов КО были выбраны наиболее значимые факторы, влияющие на величину шероховатости. А.Г. Суслов доказал, что при воздействии на поверхность КПЭ шероховатость поверхности является функцией следующих параметров: $Ra = f(Ra_{исх}, I, P_1, V, S, S_{кон}, \sin \varphi)$, где $Ra_{исх}$ – исходная шероховатость, мкм; $S_{кон}$ – площадь контакта теплового источника с поверхностью детали, мм²; $\sin \varphi$ – угол наклона теплового источника к обрабатываемой поверхности; I – сила тока, А; P_1 – сила прижима источника тепла, Н; V – скорость вращения детали или перемещения источника тепла, м/мин; S – подача, мм/об.

Используя обобщенные значения исследуемых факторов в действительных значениях, полный план матрицы планирования эксперимента, которые выбирали на основании расчетов и возможностей используемого оборудования, предварительных опытов и опубликованных данных о проведенных ранее исследованиях, получили экспериментальную зависимость шероховатости от режимов КО.

Для КО с применением в качестве упрочняющей обработки ЭМО:

$$Ra = 0,006 Ra_{исх}^{1,03} I^{0,03} P_1^{-0,4} V^{0,37} S^{0,35} l^{0,3} P_2^{-0,7} r^{0,12}, \quad (12)$$

где $Ra_{исх}$ – шероховатость поверхности до КО (после точения), мкм; I – сила тока, А; P_1 – сила прижима ролика-электрода, Н; V – скорость вращения детали, м/мин; S – подача, мм/об; l – ширина ролика-электрода, мм; P_2 – сила прижима алмазного выглаживателя, Н; r – радиус алмазного выглаживателя, мм.

Для КО с применением в качестве упрочняющей обработки лазерной закалки шероховатость поверхности рассчитываем по формуле

$$Ra = 0,0027 Ra_{исх}^{1,3} N^{1,03} V^{0,7} V_l^{0,4} d^{0,3} P_2^{-0,54} r^{0,1}, \quad (13)$$

где N – мощность источника лазерного излучения, кВт; V – скорость перемещения источника лазерного излучения мм/с; V_l – скорость обработки, м/мин; d – диаметр лазерного луча, мм; P_2 – сила прижима алмазного выглаживателя, Н; r – радиус алмазного выглаживателя, мм.

Для удобства расчетов была разработана компьютерная программа для вычисления параметра шероховатости по формулам (12), (13) на языке Visual studio 2017 C#. Все данные

заносят в таблицу и получают значение шероховатости в зависимости от режимов КО (таблица 2).

Таким образом, установлена взаимосвязь режимов КО и качества поверхности модифицированного слоя. Установлено, что последовательное применение разных по природе физических воздействий создает на поверхности модифицированный слой глубиной до 1,4 мм при влиянии фактора наследственности: сочетание методов усиливает положительные свойства - на поверхности образуются сжимающие остаточные напряжения.

Таблица 2 – Результаты расчетов шероховатости по формулам (12), (13)

Методы комбинированной обработки	Режимы обработки	Шероховатость Ra, мкм
Электромеханическая обработка и алмазное выглаживание	$I = 2500 \text{ А}; V = 1,2 \text{ м/мин}; S = 1,5 \text{ мм/об.}; P = 250 \text{ Н}; S = 0,02 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	0,524372
	$I = 2300 \text{ А}; V = 1,2 \text{ м/мин}; S = 1,5 \text{ мм/об.}; P = 200 \text{ Н}; S = 0,04 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	0,470017
	$I = 2000 \text{ А}; S = 2 \text{ мм/об.}; V = 2,1 \text{ м/мин}; P = 220 \text{ Н}; S = 0,02 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	0,700327
	$I = 2800 \text{ А}; V = 1,1 \text{ м/мин}; S = 1 \text{ мм/об.}; P = 200 \text{ Н}; S = 0,03 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	0,60183
Лазерная закалка и алмазное выглаживание	$N = 1,2 \text{ кВт}; V = 15 \text{ мм/с}; d = 4 \text{ мм.}; P = 250 \text{ Н}; S = 0,02 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	1,402555
	$N = 1,3 \text{ кВт}; V = 10 \text{ мм/с}; d = 2 \text{ мм}; P = 200 \text{ Н}; S = 0,04 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	1,0001
	$N = 1,4 \text{ кВт}; V = 25 \text{ мм/с}; d = 5 \text{ мм}; P = 220 \text{ Н}; S = 0,02 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	0,9433
	$N = 1,2 \text{ кВт}; V = 20 \text{ мм/с}; d = 5 \text{ мм}; P = 200 \text{ Н}; S = 0,03 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	0,983333

Полученные зависимости позволяют прогнозировать и управлять режимами обработки на этапе технологической подготовки производства, получить модифицированные поверхности для изготовления деталей с контактными поверхностями трения в жидких средах, например золотниковых и плунжерных пар и создать резерв для повышения их износостойкости.

Значение шероховатости поверхности после КО позволяет исключить операцию шлифования из общего технологического процесса для некоторых деталей. Это позволит снизить количество термических прижогов и трещин, снижающих износостойкость в процессе эксплуатации пар трения.

Глава 3. Общие и частные методы экспериментальных исследований

Глава посвящена методам и средствам исследования. Разработана методика научного исследования, рассмотрен математический аппарат, применяемый для статистической обработки экспериментальных данных, дан обзор базовых понятий современных разделов математики, примененных в исследовании: теории множеств, теории имитационного моделирования, метода ЛП-тау для эффективного поиска зависимостей критериев оптимизации от выбранных параметров. Приведен перечень использованного программного обеспечения и дано подтверждение законности использования программных средств на различных этапах выполнения исследований.

В соответствии с поставленными в главе 1 задачами были разработаны методика и аналитическая схема проектирования процессов КО с применением КПЭ и ППД.

Методику проектирования можно представить как исходную информацию, необходимую для моделирования процессов КО. Основные этапы методики заключаются в следующем:

1. Проведен анализ эксплуатационных требований к обрабатываемой поверхности. Осуществлен выбор эксплуатационного показателя для улучшения, при этом необходимо учитывать, что улучшение основного показателя может происходить за счет снижения других (например, увеличение производительности может повысить себестоимость). Рассмотрение возможности улучшения нескольких эксплуатационных показателей.

2. Проведен анализ параметров качества поверхности (твердости, остаточных напряжений, шероховатости и др.) или точности поверхности (размеров, формы, взаимного положения и др.), которые влияют на изменение эксплуатационного показателя.

3. Формирование структуры и последовательности операций.

4. Определение содержания процесса КО. Выбор оборудования, инструмента и оснастки. При выборе оборудования необходимо учитывать возможности предприятия и серийность выпускаемых деталей.

5. Экспериментальное определение параметров качества поверхностного слоя или точности поверхностей в зависимости от режимов обработки и технологических факторов при влиянии технологической наследственности. Определение оптимальных режимов обработки, – при совместном воздействии диапазон допустимых значений будет отличаться от такового при использовании методов по отдельности.

6. Определение места КО в общем технологическом процессе изготовления деталей.

7. Расчет технико-экономической эффективности.

Аналитическую схему проектирования процессов комбинированной обработки можно представить в виде:



Данная методика отличается от имеющихся тем, что в ней учтены типы производства, а это очень важно при выпуске большой номенклатуры деталей и учтено влияние технологической наследственности на качество поверхности и образование ЗКН.

Для оценки представленной методики были разработаны процессы КО для повышения износостойкости на примере золотников и плунжеров гидравлического оборудования.

Согласно разработанной методике выбран параметр улучшения – износостойкость. Износостойкость зависит от качества поверхности детали, что неоднократно доказано в работах отечественных и зарубежных ученых. Поэтому выбрали следующие параметры

качества поверхностного слоя: твердость, глубину упрочнения, шероховатость и остаточные напряжения. По техническим требованиям, предъявляемым к золотникам и плунжерам, необходимо обеспечить твердость на менее HRC 62, глубину упрочнения до 1,1 мм, шероховатость до Ra 0,1. Затем провели анализ достоинств и недостатков методов упрочнения КЭ и ППД. Согласно представленной методике, необходимо сформировать структуру и последовательность операций и определить содержание КО, выбрать оборудование, инструмент и оснастку. При выборе оборудования следует учитывать технические возможности предприятия и серийность выпускаемых деталей.

В настоящем диссертационном исследовании представлены несколько установок, на которых обрабатывались режимы КО: на базе универсального токарно-винторезного станка 16К20 (рисунок 3), на базе станка с ЧПУ 16К20Ф3 и на базе настольного токарного станка модели «Старт» (рисунок 4).



Рисунок 3 – Промышленная установка на базе токарно-винторезного станка модели 16К20: а – электромеханическая обработка; б – алмазное выглаживание

На всех установках операции упрочняющей (ЭМО) и отделочной (алмазное выглаживание) обработки выполняются последовательно на одном оборудовании за одну операцию после механической обработки резанием.

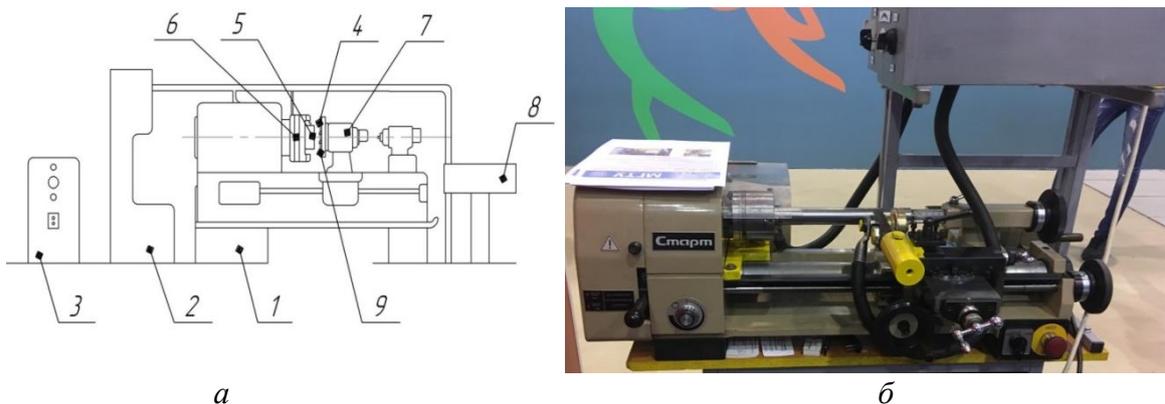


Рисунок 4 – Экспериментальные установки: а – на базе станка модели 16К20Ф3: 1 – станок модели 16К20Ф3; 2 – источник питания; 3 – пульт управления; 4 – ролик-электрод; 5 – деталь; 6 – планишайба; 7 – револьверная головка; 8 – стойка станка; 9 – алмазный выглаживатель; б – на базе настольного токарного станка модели «Старт»

В соответствии с методикой разработки процессов КО, диапазоны режимов при совместном применении методов могут отличаться от режимов, применяемых для каждого

метода в отдельности. Это связано с получением новых свойств поверхностных слоев или изменением заданных параметров. Корректировка диапазонов режимов обработки исключает появление негативных явлений при КО. Например, при последовательном воздействии на поверхность методами упрочнения КПЭ и алмазным выглаживанием возможны появления на поверхности дефектов в виде термических трещин, шелушения, перенаклепа. Для исключения этих явлений режимы КО выбраны в соответствии с рекомендациями и проверены в процессе теоретических и экспериментальных исследований. В работе представлены рациональные режимы обработки.

Режимы ЭМО: сила тока $I = 1000...3200$ А; скорость обработки $V = 1,1...3,2$ м/мин (скорость перемещения инструмента относительно обрабатываемой поверхности при вращении); подача ролика-электрода $S = 0,6...3,5$ мм/об., напряжение в цепи $U = 4...6$ В; ширина ролика-электрода $h = 2..4$ мм; сила прижима ролика-электрода $P = 200...350$ Н.

Лазерную закалку проводили на мобильном комплексе лазерной наплавки Rofin FL040 или Квант – 16.

Режимы лазерной закалки: мощность лазерного излучения $P = 1,2...1,6$ кВт; скорость перемещения источника лазерного излучения $V = 10...30$ мм/с; скорость вращения образца $V_1 = 35...50$ мм/с; фокусное расстояние $f = 50...100$ мм; диаметр лазерного луча $d = 2...7$ мм.

Поглощающее покрытие – МЦС-510 (используется при лазерной обработке металлов для увеличения поглощения излучения).

Режимы лазерной закалки подбирали в соответствии с рекомендациями и методиками, разработанными на кафедре «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, и корректировали в процессе теоретических и экспериментальных исследований. При выборе режимов ЭМО использовались работы Брянской, Ульяновской и др. научных школ.

Алмазное выглаживание после ЭМО или лазерной закалки проводили на следующих режимах: сила прижима алмазного выглаживателя $P = 200...250$ Н; подача алмазного выглаживателя $S = 0,02...0,04$ мм/об.; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 0,5...1$ мм; скорость обработки $V = 45$ м/мин.

Для крупносерийного и серийных типов производств рекомендуется применять КО: лазерная закалка и алмазное выглаживание; плазменная закалка и алмазное выглаживание. Для единичного и мелкосерийного производства – ЭМО и алмазное выглаживание.

Для исследования были изготовлены образцы из стали марок 45, 40Х, 40ХН2МА, 20Х3МВФ, 38ХМЮА. Эти марки стали применяют для изготовления золотников и плунжеров гидравлического оборудования в различных видах техники.

В настоящем диссертационном исследовании использованы методики определения твердости и глубины упрочнения, структуры и шероховатости, износостойкости модифицированного поверхностного слоя, а также разработанные методики для определения величины и характера остаточных напряжений, зон концентрации напряжений в модифицированном слое и влияния низкотемпературных сред на изменение полученных свойств после применения процессов КО.

Глава 4. Экспериментальное исследование влияния режимов комбинированной обработки на качество модифицированного поверхностного слоя

Экспериментальные исследования поверхности после упрочнения КПЭ показали, что зоны перекрытия полос закалки (или зоны отпуска, в которых наблюдается некоторое снижение твердости) могут представлять собой зоны концентрации напряжений. При этом на поверхности модифицированного слоя возможно образование перенаклепа. Наличие зон концентрации напряжений снижает усталостную прочность и способствует разрушению деталей и остановке всего механизма. Это доказано в работах А.А. Дубова, В.Т. Власова и др. Поэтому задача по диагностике скрытых зон концентрации напряжений и очагов развития трещин отнесена к актуальным.

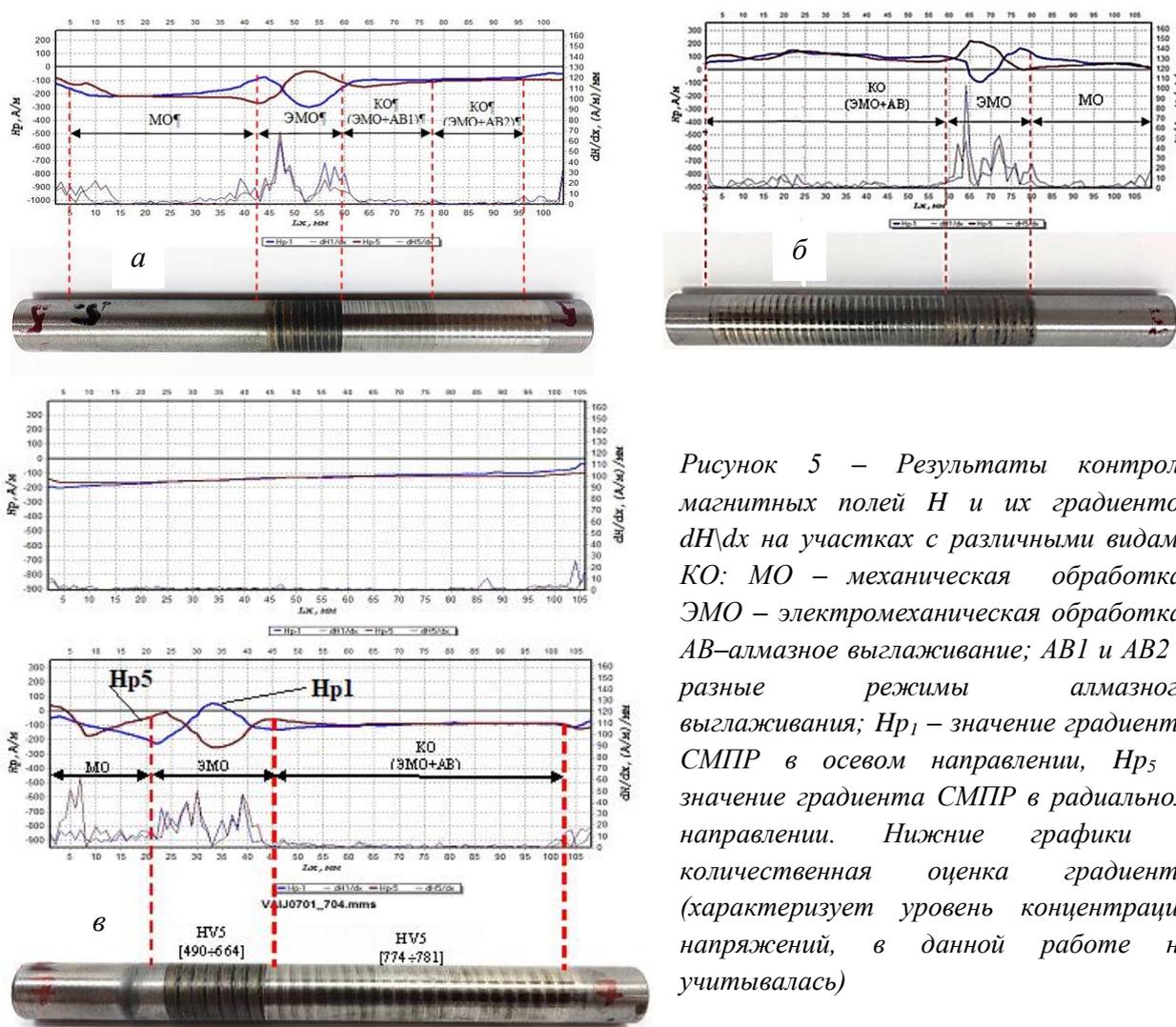


Рисунок 5 – Результаты контроля магнитных полей H и их градиентов dH/dx на участках с различными видами КО: МО – механическая обработка; ЭМО – электромеханическая обработка; АВ–алмазное выглаживание; АВ1 и АВ2 – разные режимы алмазного выглаживания; Hr_1 – значение градиента СМПР в осевом направлении, Hr_5 – значение градиента СМПР в радиальном направлении. Нижние графики – количественная оценка градиента (характеризует уровень концентрации напряжений, в данной работе не учитывалась)

В работе проведены исследования наличия ЗКН методом магнитной памяти металла (МПМ). Выявление ЗКН проводили с учетом технологической наследственности (после каждой операции): механической обработки, ЭМО или лазерной закалки, алмазного выглаживания.

По результатам контроля методом МПМ, представленным в виде магнитограмм, видно, что применение различных режимов ЭМО и лазерной закалки практически на всех образцах вызывает появление ЗКН, которые характеризуются значительным изменением собственных магнитных полей рассеяния (СМПР) и их градиентов (dH/dx).

Магнитограммы, полученные до и после применения различных обработок, представлены на рисунках 5, 6.

После ЭМО, независимо от режимов обработки, наблюдается изменение магнитных полей (рисунок 5). А после лазерной заковки наблюдается снижение ЗКН. Это отмечено в образцах, обработанных без оплавления (рисунок 6). Зоны после алмазного выглаживания как заключительного этапа КО характеризуются равномерным распределением СМПР и низкими значениями их градиентов, что показывает однородность структурного состояния металла образца после КО. Это подтверждается в работах А. А. Дубова, Ал. А. Дубова, С. М. Колокольникова и др. Исследования изменения твердости металла вдоль образующих образцов показали, что после КО твердость находится вблизи середины диапазона значений твердости микрорельефа профиля и имеет несущественный их разброс – не более 2 %. После КО изменение твердости металла вдоль образующих образцов имеет значительный разброс – более 26 %, что подтверждает неоднородность структурного состояния упрочненного слоя (зоны отпуска имеют различия по значению твердости по сравнению с упрочненной поверхностью).

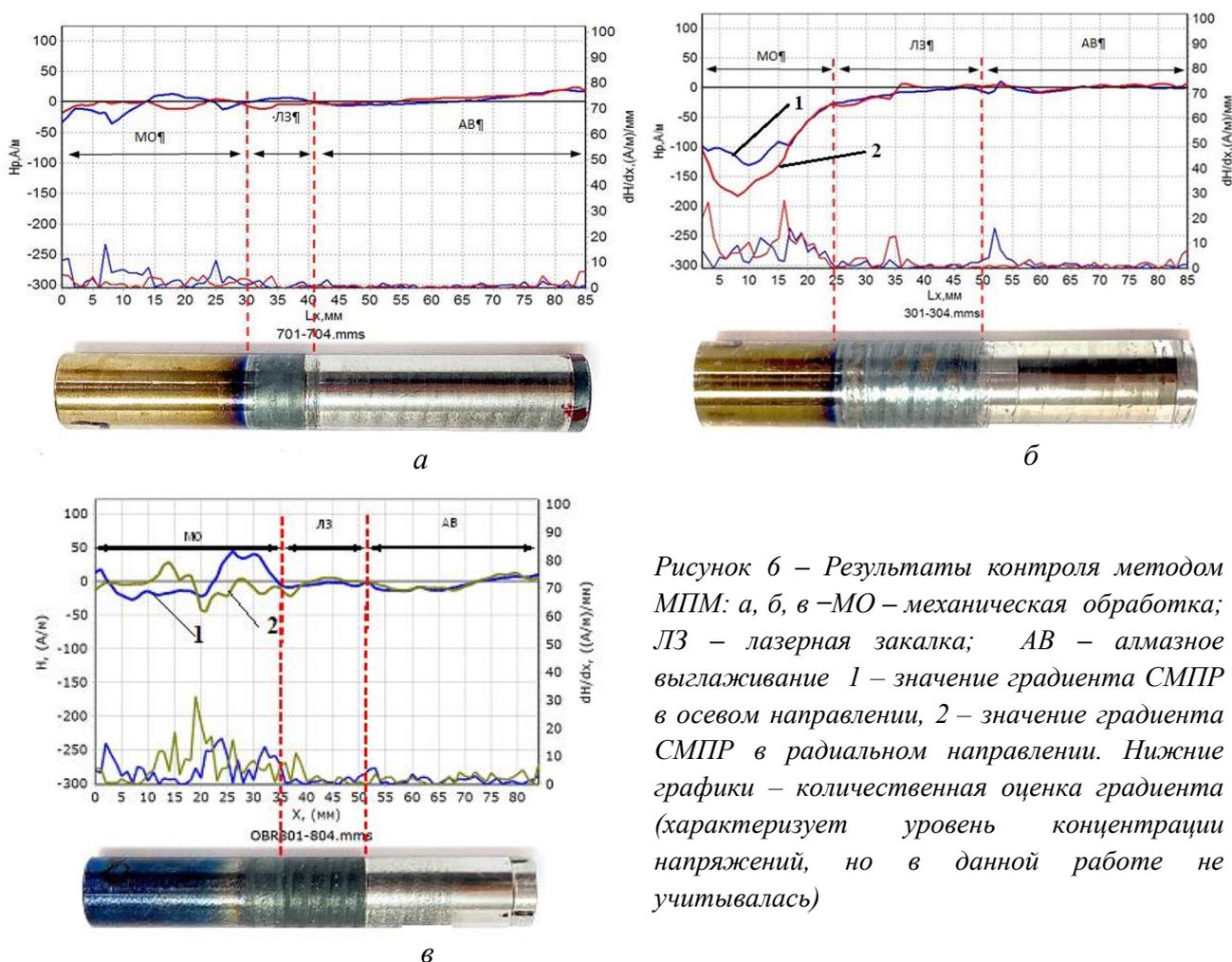


Рисунок 6 – Результаты контроля методом МПМ: а, б, в –МО – механическая обработка; ЛЗ – лазерная заковка; АВ – алмазное выглаживание 1 – значение градиента СМПР в осевом направлении, 2 – значение градиента СМПР в радиальном направлении. Нижние графики – количественная оценка градиента напряжений, но в данной работе не учитывалась)

В зонах механической обработки на всех образцах зафиксировано заметное изменение СМПР и их градиентов. Аналогичные результаты контроля методом МПМ получены и на других исследованных образцах.

В работе изучена зависимость твердости и глубины модифицированного поверхностного слоя от режимов КО. Основными параметрами, определяющими твердость поверхности, распределение твердости по глубине модифицированного слоя, являются следующие: мощность лазерного излучения; диаметр лазерного пучка; скорость перемещения источника лазерного излучения при лазерной заковке и сила тока при ЭМО; скорость обработки.

На рисунке 7 представлена зависимость глубины упрочнения от силы тока и подачи при обработке стали марок 45, 20Х3МВФ и 40Х после КО.

В настоящей работе представлены исследования распределения твердости после КО для различных марок стали (рисунки 7-11).

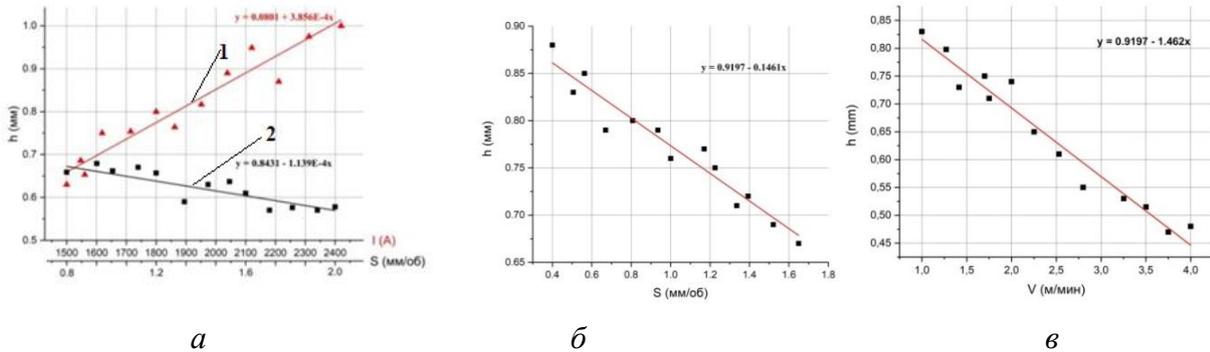


Рисунок 7 – Зависимость глубины упрочненного слоя: а – от силы тока (1) и подачи (2) для стали марки 45, сила тока 2000 А, подача 1мм/об; б – от подачи для стали марки 40Х; в – от скорости обработки образца для стали марки 20Х3МВФ

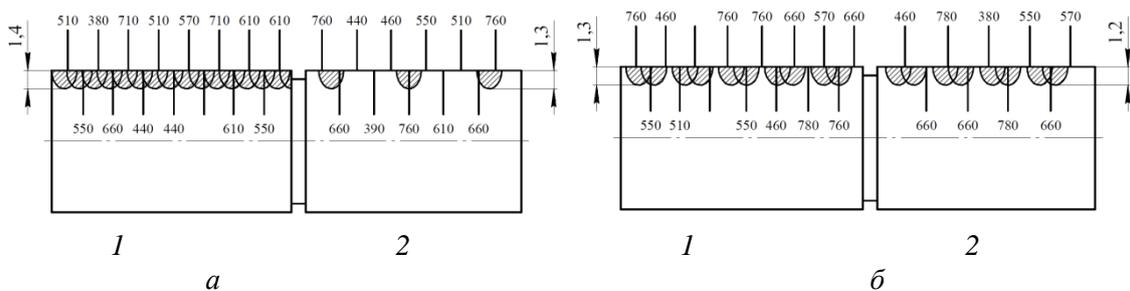


Рисунок 8 – Распределение твердости (HV) после комбинированной обработки для различных материалов: а – сталь марки 45: режимы комбинированной обработки: 1 – $I = 2500$ А; $V = 1,2$ м/мин; $S = 1,5$ мм/об.; 2 – единичные зоны термического влияния (полосы): $I = 3200$ А; $V = 1,2$ м/мин; сила прижима алмазного выглаживателя $P = 250$ Н; подача алмазного выглаживателя $S = 0,02$ мм/об.; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1$ мм; скорость обработки $V = 45$ м/мин; б – сталь марки 40Х: 1 – $I = 2500$ А; $V = 1,2$ м/мин; $S = 2,5$ мм/об.; 2 – $I = 2500$ А; $V = 1,2$ м/мин; $S = 1,5$ мм/об.; сила прижима алмазного выглаживателя $P = 200$ Н; подача алмазного выглаживателя $S = 0,04$ мм/об.; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1$ мм; скорость обработки $V = 45$ м/мин)

Глубина закаленного слоя зависит от мощности источников нагрева поверхностного слоя (силы тока, мощности лазерного излучателя), подачи и скорости обработки или перемещения источника лазерного излучения. Изменение этих режимов по-разному влияет на глубину упрочнения: увеличение мощности источников нагрева поверхностного слоя увеличивает глубину упрочнения, а увеличение подачи и скорости вращения детали вызывает уменьшение упрочненного слоя (рисунок 7, а, б).

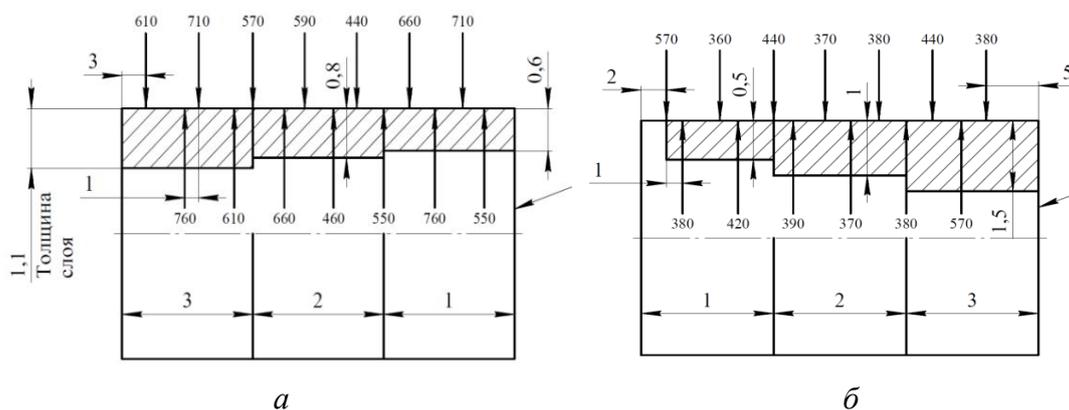


Рисунок 9 – Результаты измерения твердости (HV) различных материалов:

a – сталь марки 40ХН2МА: $I = 2000A$; $S = 2\text{ мм/об.}$; 1 – $V = 3,2\text{ м/мин}$; 2 – $V = 2,1\text{ м/мин}$; 3 – $V = 1,1\text{ м/мин}$; сила прижима алмазного выглаживателя $P = 220\text{ Н}$; подача алмазного выглаживателя $S = 0,02\text{ мм/об.}$; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1\text{ мм}$; скорость обработки $V = 45\text{ м/мин}$; *б* – сталь марки 20Х3МВФ: 1 – $I = 1300\text{ А}$; $V = 2,2\text{ м/мин}$; $S = 1\text{ мм/об.}$; 2 – $I = 1200\text{ А}$; $V = 1,2\text{ м/мин}$; $S = 1\text{ мм/об.}$; 3 – $I = 1300\text{ А}$; $V = 1,1\text{ м/мин}$; $S = 1\text{ мм/об.}$; сила прижима алмазного выглаживателя $P = 200\text{ Н}$; подача алмазного выглаживателя $S = 0,03\text{ мм/об.}$; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1\text{ мм}$; скорость обработки $V = 45\text{ м/мин}$

Величина продольной подачи формирует волнистый рельеф модифицированного поверхностного слоя на границе с основным металлом. Учитывая, что изотермы в полубесконечном теле представляют собой полуокружности (рисунок 2, *a*), то для получения равномерного по глубине слоя рекомендуется применять продольную подачу менее половины толщины рабочей части ролика-электрода. При подачах, равных толщине ролика-электрода возможно появление незакаленных полос. Величина подачи больше толщины ролика способствует неравномерной глубине упрочнения в модифицированном слое. Это согласуется с работами других ученых.

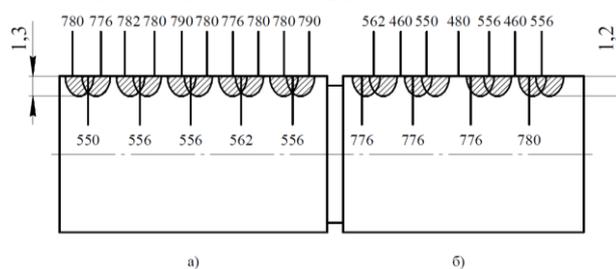


Рисунок 10 – Результаты измерения твердости (HV) различных материалов: *a* – сталь марки 40ХН2МА: мощность лазерного излучателя $N = 1,4\text{ кВт}$; скорость перемещения лазерного излучателя $V = 10\text{ мм/с}$; диаметр лазерного луча $d = 2\text{ мм}$; сила прижима алмазного выглаживателя $P = 220\text{ Н}$; подача алмазного выглаживателя $S = 0,02\text{ мм/об.}$; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1\text{ мм}$; скорость обработки $V = 45\text{ м/мин}$; *б* – сталь марки 20Х3МВФ: мощность лазерного излучателя $N = 1,2\text{ кВт}$; скорость перемещения лазерного излучателя $V = 15\text{ мм/с}$; диаметр лазерного луча $d = 4\text{ мм}$; сила прижима алмазного выглаживателя $P = 200\text{ Н}$; подача алмазного выглаживателя $S = 0,03\text{ мм/об.}$; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1\text{ мм}$; скорость обработки $V = 45\text{ м/мин}$

Для стабильного протекания процесса обработки необходимо обеспечить прилегание ролика-электрода к образцу при ЭМО. Это обеспечивается прижатием ролика-электрода с определенным усилием. В конструкции державки в экспериментальных и промышленных установках предусмотрен упругий элемент, позволяющий поддерживать заданное усилие. Стабильность и управляемость процессом КО позволяет получить модифицированный поверхностный слой с заданными твердостью и глубиной.

Результаты проведенного анализа показывают, что КО приводит к повышению твердости (HRC до 64 единиц) и глубине упрочнения до 1,3 мм и может быть рекомендована для изготовления золотников и плунжеров. Значение твердости полученного модифицированного слоя и глубина упрочнения не противоречат техническим требованиям, предъявляемым к золотникам и плунжерам: HRC до 62 единиц, глубина упрочнения до 1,1 мм. Подобные результаты можно получить на других деталях с контактными поверхностями трения.

Режимы алмазного выглаживания не оказывают существенного влияния на глубину упрочненного слоя, однако влияют на твердость поверхностного слоя.

Для проверки адекватности построенных теоретических зависимостей в работе проводили экспериментальное исследование влияния режимов комбинированных методов на шероховатость модифицированного поверхностного слоя. Меняя режимы КО, можно управлять микрорельефом.

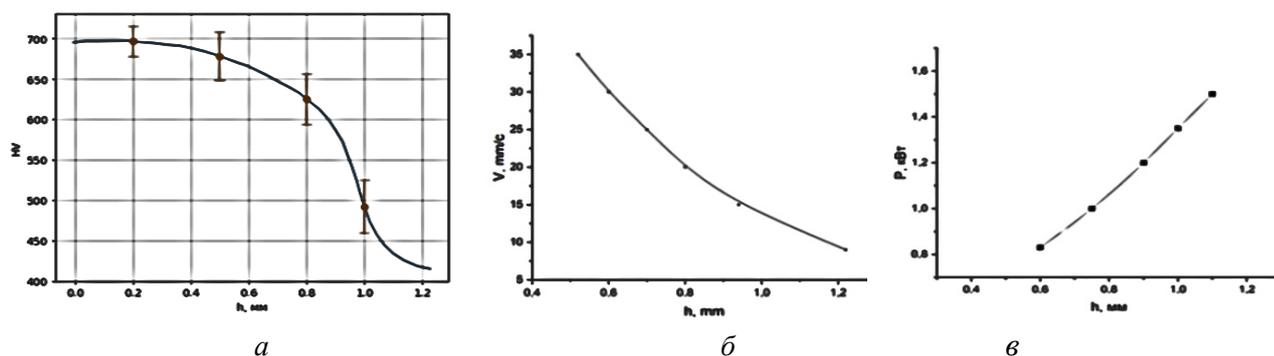


Рисунок 11 – Распределение твердости в поверхностном слое образцов (взятому по среднему значению) для стали марки 40X после комбинированной обработки (лазерная закалка и алмазное выглаживание): а – в зависимости от глубины упрочнения (мощность лазерного излучателя $N = 1,2$ кВт; скорость перемещения лазерного излучателя $V = 10$ мм/с; диаметр луча лазера $d = 4$ мм; скорость вращения образца $V_1 = 50$ мм/с; сила прижима алмазного выглаживателя $P = 200$ Н; подача алмазного выглаживателя $S = 0,02$ мм/об.; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1$ мм; скорость обработки $V = 45$ м/мин); б – от скорости перемещения источника лазерного излучения; в – от мощности источника лазерного излучения

Анализ профилограмм, полученных с поверхности образцов подтверждает выдвинутое ранее предположение, что на поверхности образцов форма, расположение и размер каждого элемента поверхности обусловлены определенными закономерностями, и полученный рельеф поверхности будет однородный по форме, размерам и взаиморасположению выступов и впадин (рисунки 12, 13).

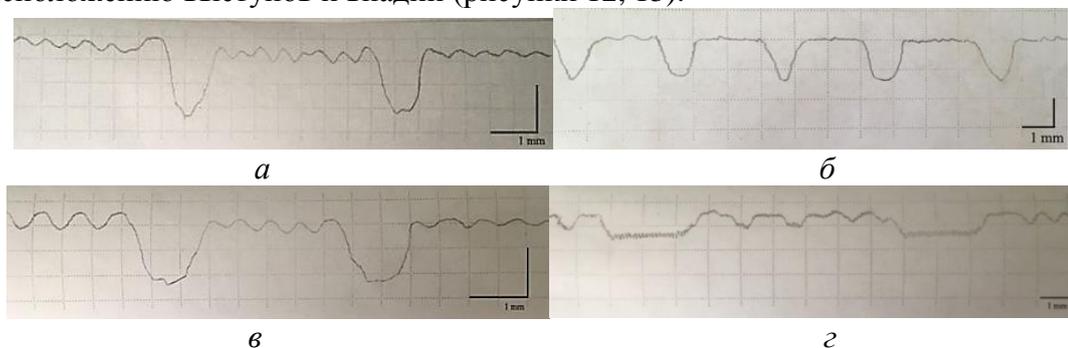


Рисунок 12 – Профилограммы поверхности образцов из разных материалов, обработанных с различными режимами комбинированной обработки: а – сталь марки 40X (электрохимическая обработка и алмазное выглаживание); б – сталь марки 40XH2MA (электрохимическая обработка и алмазное выглаживание); в – сталь марки 45 (лазерная закалка и алмазное выглаживание); г – сталь марки 40X (лазерная закалка и алмазное выглаживание)

Глубина масляного кармана зависит от твердости поверхности, полученной при упрочнении концентрированными потоками энергии и режимов алмазного выглаживания. Сходимость теоретических расчетов по зависимости (11) и экспериментальных исследований составляет 80 ± 10 %.

Теоретически установлено и экспериментально доказано, что после КО образуется рельеф, который может удерживать смазку на поверхности. Этот рельеф зависит от режимов обработки. Анализ полученных значений шероховатости модифицированных износостойких поверхностей показал, что в некоторых случаях из технологического процесса обработки можно исключить шлифование (таблица 3). При шлифовании закаленных поверхностей могут образовываться термические прижоги и трещины. Для пар трения (например, золотников и плунжеров) такие дефекты недопустимы. Кроме того, исключение операции шлифования снизит себестоимость изготовления деталей. Однако, согласно техническим требованиям, шероховатость на рабочих поверхностях должна быть до Ra 0,1 мкм. Поэтому после КО золотники, плунжеры и др. детали с контактными поверхностями трения в жидких средах будут обрабатывать согласно заводскому техпроцессу (полирование, притирка и др.).

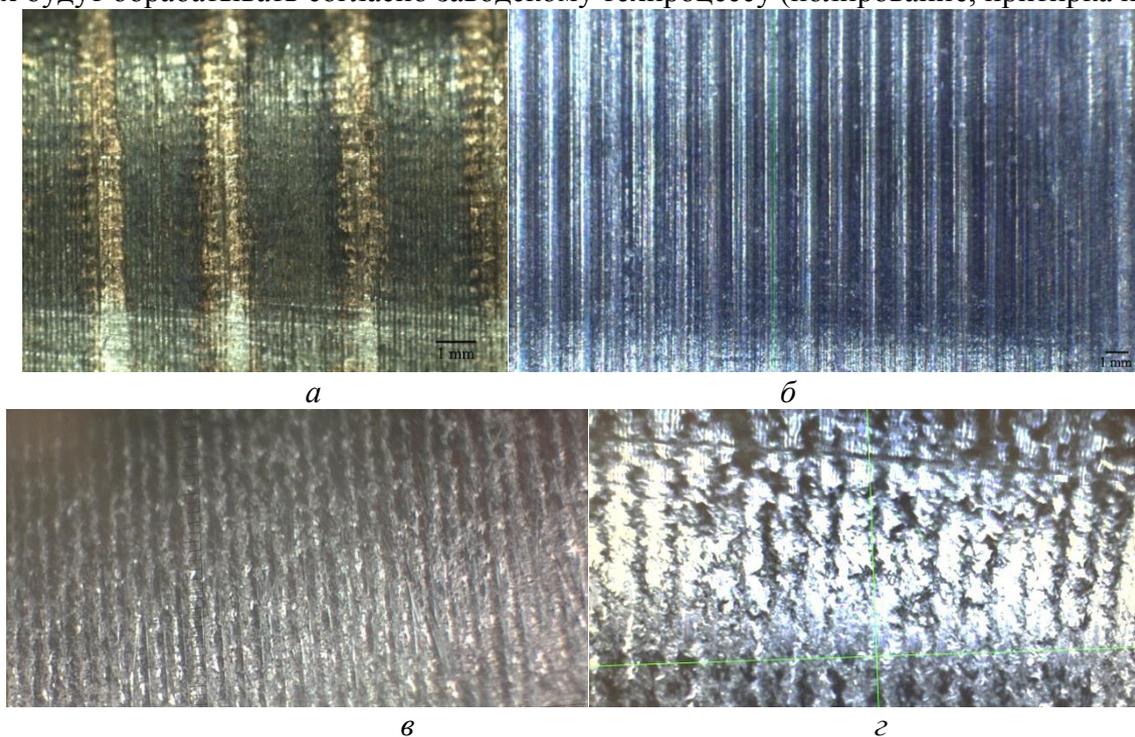


Рисунок 13 – Рельеф поверхностного слоя после комбинированной обработки: а – сталь марки 45 (электрохимическая обработка и алмазное выглаживание); б – сталь марки 40Х (электрохимическая обработка и алмазное выглаживание); в – сталь марки 45 (лазерная закалка и алмазное выглаживание); г – сталь марки 40ХН2МА (лазерная закалка и алмазное выглаживание)

Таблица 3 – Зависимость шероховатости поверхности от режимов комбинированной обработки

Материал образца	Режимы упрочняющей обработки		Режимы алмазного выглаживания	Значение шероховатости поверхности, Ra, мкм
	Электрохимическая обработка	Лазерная закалка		
1	2	3	4	5
Сталь марки 45	$I = 2500$ А; $V = 1,2$ м/мин; $S = 1,5$ мм/об.		$P = 250$ Н; $S = 0,02$ мм/об.; $r = 1$ мм; $V = 45$ м/мин	0,402
		$N = 1,2$ кВт; $V = 15$ мм/с; $d = 4$ мм		0,5

1	2	3	4	5
Сталь марки 40Х	$I = 2500 \text{ А}; V = 1,2 \text{ м/мин}; S = 1,5 \text{ мм/об.}$		$P = 200 \text{ Н}; S = 0,04 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	0,793
		$N = 1,3 \text{ кВт}; V = 10 \text{ мм/с}; d = 2 \text{ мм}$		0,634
Сталь марки 40ХН2МА	$I = 2000 \text{ А}; S = 2 \text{ мм/об.}; V = 2,1 \text{ м/мин}$		$P = 220 \text{ Н}; S = 0,02 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	1,602
		$N = 1,4 \text{ кВт}; V = 25 \text{ мм/с}; d = 5 \text{ мм}$		1,01
Сталь марки 20Х3МВФ	$I = 2800 \text{ А}; V = 1,1 \text{ м/мин}; S = 1 \text{ мм/об.}$		$P = 200 \text{ Н}; S = 0,03 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	0,804
		$N = 1,2 \text{ кВт}; V = 20 \text{ мм/с}; d = 5 \text{ мм}$		1,02

Таблица 4 – Параметры шероховатости образцов

Метод обработки	Ra, мкм	R_{\max}	S_m	Средний радиус кривизны выступов профиля шероховатости ρ	Относительная опорная длина профиля на уровне средней линии t_m	Параметры начального участка кривой опорной поверхности		Комплексный параметр Крагельского - Камбалова Δ
						ν	b	
Механическая обработка (точение), ХТО (цементация, закалка, отпуск), шлифование – по технологии ОАО КАДВИ, Калуга	0,63	1,94	37,1	24,6	55,8	2,3	1,33	0,083
Механическая обработка (точение), комбинированная обработка: электромеханическая обработка, алмазное выглаживание	1,0	1,67	36,8	134,6	54,5	1,78	0,95	0,031
Механическая обработка (точение), комбинированная обработка: лазерная закалка, алмазное выглаживание	0,95	1,76	49,2	129	53,5	1,83	0,467	0,022

В диссертационном исследовании выполнена проверка достоверности теоретических расчетов остаточных напряжений на модифицированной износостойкой поверхности образцов. Для этого использован рентгеновский метод оценки. Измерение остаточных напряжений и изучение фазового состава материала образцов проводилось на дифрактометре

BRUKER D8 Discover с использованием фильтрованного $K\alpha$ -излучения хрома. Полученные данные обрабатывались с помощью программного обеспечения DIFRAC.EVA и DIFRAC.LEPTOS в соответствии с ГОСТ 16865-79 и стандартом ASTM E2860-12. Наиболее точно остаточные напряжения измеряются в прецизионной области рентгеновского спектра (линии, расположенные на больших углах 2θ), которые позволяют также использовать большие углы поворота образцов. Для определения величины остаточных напряжений использовался стандартный рентгеновский метод $\sin^2\psi$. Расположение исследованных участков поверхности образцов, в которых измерялись тангенциальные и осевые напряжения выбраны произвольно. Размер исследованной области определялся размерами коллиматора и составил $\sim 5 \text{ мм}^2$. Рентгеновский метод оценки позволяет определить численное значение осевых и тангенциальных остаточных напряжений. В настоящей работе исследованы напряжения I рода, так как именно они являются наиболее значимыми с точки зрения практического применения.

Исследования проводили с учетом технологической наследственности (после каждой операции): после механической обработки, после КО, что показало закономерные изменения макронапряжений в зависимости от типа обработки – механической, электромеханической, лазерной закалки, алмазного выглаживания.

Поскольку метод высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии является интегральным методом идентификации структурных дефектов кристаллической решетки, то качественно оценивать совершенство структуры различных кристаллов можно, сравнивая значения величины FWHM (полуширина рентгеновской линии) (таблица 5) – чем меньше величина FWHM, тем более совершенной является кристаллическая структура исследуемого материала, так как наличие дефектов кристаллической решетки приводит к уширению дифракционных кривых. По результатам сравнения значений FWHM приведена оценка влияния технологических факторов обработки монокристаллов на их структурное совершенство: после применения КО в структуре образцов выявлены структурные несовершенства – плотности дислокаций.

Все измеренные параметры кристаллической структуры α -фазы превосходят эталонное значение, что свидетельствует о расширении кристаллической решетки в радиальном направлении. В тангенциальном и осевом направлениях действуют сжимающие остаточные напряжения. Чем выше значение параметра решетки a , тем большие сжимающие напряжения действуют в осевом и тангенциальном направлениях. Кроме того, по полуширине рентгеновской линии можно определить мелкодисперсность структуры материала и величину остаточных макронапряжений. Максимальные значения этих величин также коррелируют с максимальными по величине сжимающими напряжениями (рисунок 14, а, б).

В работе межплоскостные расстояния и величину деформаций определяли по угловым положениям рентгеновских линий, затем был построен график зависимости величины деформации (ϵ) от $\sin^2\psi$, где ψ – угол поворота образца (рисунок 15). В общем случае график зависимости имеет линейный характер ($\epsilon = a \cdot \sin^2\psi + b$), величина остаточных напряжений рассчитывается по коэффициенту наклона. Погрешность определения макронапряжений определена как отклонение полученных значений от линейной зависимости.

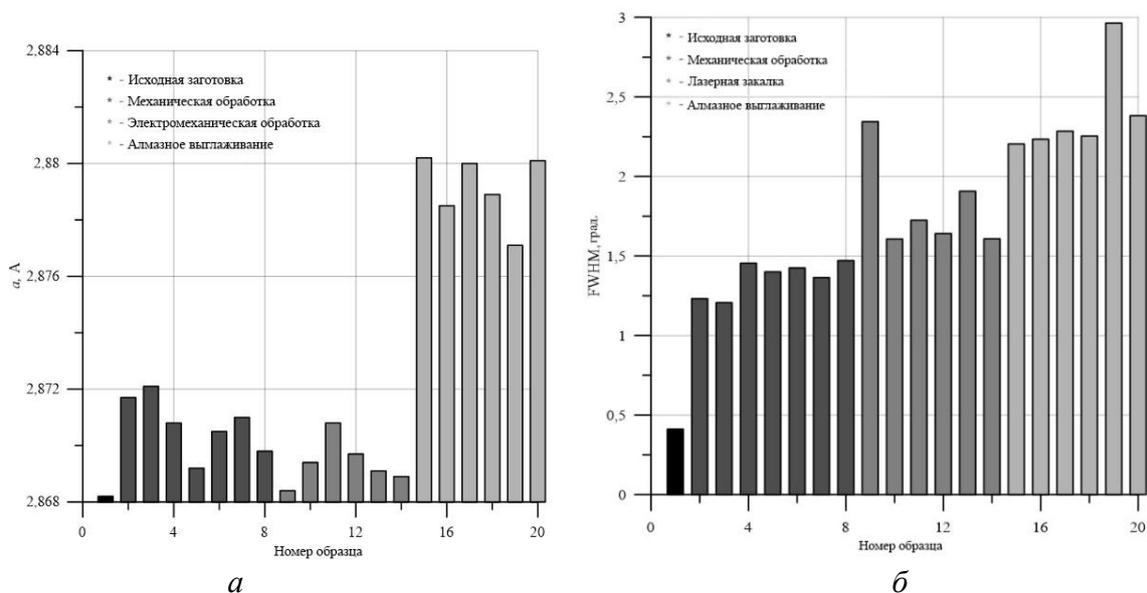


Рисунок 14 – Изменение параметров кристаллической решетки: а – деформация, б – полуширина рентгеновской линии

В ходе исследования получены значения остаточных напряжений на поверхности образцов из стали марки 40X после каждого этапа КО (таблицы 5, 6). Для остальных образцов получены схожие значения (таблица 7).

Таблица 5 – Значения остаточных напряжений, межплоскостных расстояний и полуширины после каждого этапа КО

№ образца	Номер точки на образце	Тип обработки	Напряжения, МПа		Деформация кристаллической решетки a , Å	Полуширина рентгеновской линии FWHM, град.
			Осевые	Окружные(тангенциальные)		
1	1	МО	-574±54	-924±138	2,8717	1,2322
	2	ЭМО	-654±15	-479±406	2,8684	2,3448
	3	АВ	-1235±119	-1237±293	2,8802	2,2039
	4	МО	-514±19	-414±174	2,8721	1,2063
	5	ЭМО	-667±128	-236±23	2,8694	1,6070
	6	АВ	-1258±96	-1410±31	2,8785	2,2343
2	1	МО	-424±23	-230±45	2,8708	1,4541
	2	ЭМО	-588±81	-139±28	2,8708	1,7255
	3	АВ	-1178±37	-939±176	2,8800	2,2848
	4	ЭМО	-267±100	-94±226	2,8697	1,6419
	5	МО	-164±18	96±161	2,8692	1,4004
	6	АВ	-1020±300	-949±47	2,8789	2,2539
	7	ЭМО	-300±84	-142±79	2,8691	1,9071
	8	МО	-287±13	131±123	2,8705	1,4248
3	1	МО	-348±46	-405±152	2,8710	1,3638
	2	АВ	-1142±72	-1568±354	2,8771	2,9638
	3	АВ	-1370±20	-940±173	2,8801	2,3827
	4	ЭМО	-480±89	-191±131	2,8689	1,6080
	5	МО	-367±26	52±256	2,8698	1,4710

Примечание: АВ–алмазное выглаживание, МО – механическая обработка, ЭМО – электромеханическая обработка.

Таблица 6 – Значения остаточных напряжений, межплоскостных расстояний и полуширина после каждого этапа обработки

Тип обработки	Напряжения, МПа		Деформация кристаллической решетки a , Å	Полуширина рентгеновской линии FWHM, град.
	Осевые	Окружные (тангенциальные)		
Механическая	-125±53	-147±44	1,9682	0,4110
Комбинированная (электромеханическая и алмазное выглаживание)	-1235±119	-1237±293	2,8892	2,4039
Комбинированная обработка (лазерная закалка и алмазное выглаживание)	-1142±72	-1568±354	2,8771	2,9638

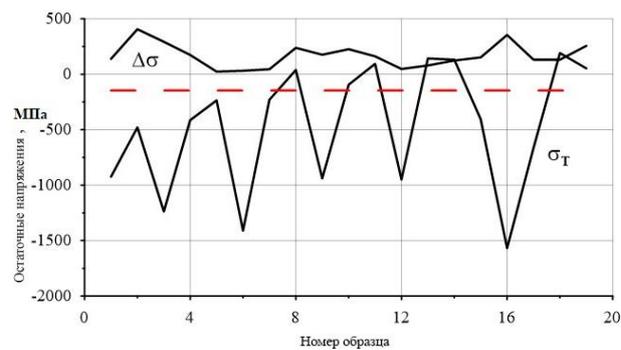
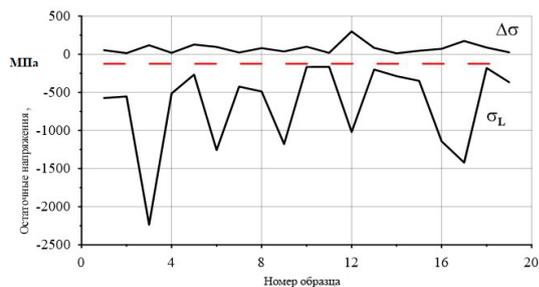
Сравнивая полученные результаты теоретических и практических исследований, можно сделать вывод, что КО создает на поверхности исследуемых образцов благоприятные сжимающие остаточные напряжения. Сходимость результатов составляет 80±5%.

Таблица 7 – Значения остаточных напряжений на поверхности образцов

Номер образца	Материал	Напряжения, МПа	
		Осевые	Окружные (тангенциальные)
1	Сталь марки 40X	-1901,2±87,7	-866,9±21,5
2	Сталь марки 45	-1774,2±91,5	-1409,1±44,1
3	Сталь марки 40X3MA	-1760,5±14,6	-1975,6±41,3
5	Сталь марки 20X3МВФ	-1738,7±129,1	-1420,0±186,3
9	Сталь марки 40X	-2019,8±172,5	-1127,5±114,9
7	Сталь марки 45	-1806,1±43,4	-1455,7±17,8

На рис. 15 приведены графики зависимости осевых (*a*) и окружных (*b*) остаточных макронапряжений от зоны обработки, действующих на различных участках исследованных образцов (сталь марки 40X). Согласно полученным результатам, на большинстве исследованных участков действуют сжимающие остаточные напряжения. Максимальные значения напряжений наблюдаются для участков, на которых проводилось алмазное выглаживание. Для этих же участков зарегистрирована максимальная ширина рентгеновских отражений, свидетельствующая о максимальной искаженности кристаллической структуры материала (рис. 14, *b*). При этом период кристаллической решетки оказывается наибольшим для участков, обработанных КО (рис. 14, *a*).

Таким образом, после КО в модифицированном износостойком поверхностном слое образцов не образуются ЗКН, и алмазное выглаживание является технологическим барьером для скрытых дефектов. Отсутствие ЗКН особенно важно при работе деталей с контактными парами трения в жидких средах, поскольку может снизиться риск возникновения эффекта Ребиндера (расклинивающее действие смазки при попадании в зону зарождения трещины).



а

б

Рисунок 15 – Зависимость величины макронапряжений: а – в осевом, б – в окружном направлениях, а также величины ошибки при их определении ($\Delta\sigma$) от зоны обработки. Штриховой линией на рисунке показаны макронапряжения на поверхности образца, находящегося в исходном состоянии

Процессы КО обеспечивают рельеф поверхности с заданными параметрами качества. Это может оказать положительное влияние на износостойкость пар трения, например золотниковых и плунжерных.

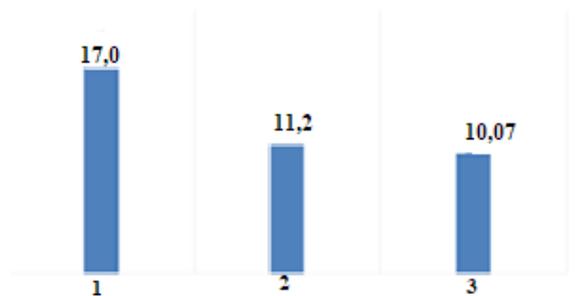
Глава 5. Экспериментальное исследование влияния режимов комбинированной обработки на триботехнические свойства модифицированного поверхностного слоя.

В работе сделано предположение, что КО создаст резерв для повышения износостойкости. Для проверки этого предположения в работе проведено исследование износостойкости образцов с полученным модифицированным слоем. Результаты исследований образцов, обработанных различными методами и в разных режимах из материалов, применяемых на предприятиях для изготовления золотников и плунжеров, и после КО, представлены на рисунке 16. Сравнительные испытания были проведены на машине трения ИИ5018. Оценка износа проведена весовым методом согласно ГОСТ 23.224-86 на аналитических весах и методом поверхностной активации (ГОСТ 27860-88).

Исследования подтвердили правильность сделанных предположений о том, что КО создает поверхностный слой с новыми свойствами – модифицированный износостойкий слой, и благодаря сочетанию шероховатости, твердости, глубины упрочнения, остаточных напряжений в совокупности с масляными карманами создается резерв для повышения износостойкости для различных пар трения, например золотников и плунжеров (методика проведения исследований представлена в главе 3).

Сталь марки 38ХМЮА (а)

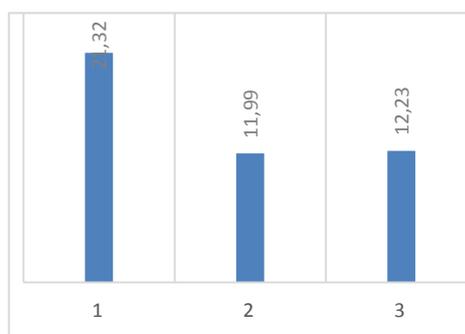
- 1 – МО, шлифование, химико-термическая обработка (ХТО) (азотирование);
- 2 – КО (ЭМО); 3 – КО (лазерная закалка).



а

Сталь марки 40ХН2МА (б)

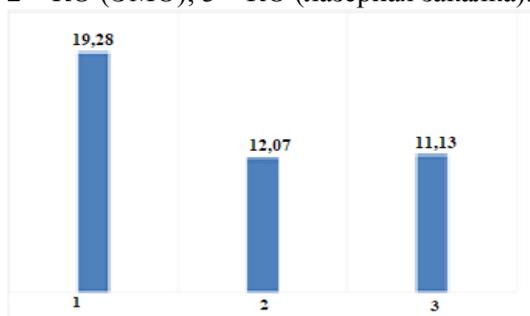
- 1 – МО, ХТО (цементация, закалка и отпуск), шлифование;
- 2 – КО (ЭМО); 3 – КО (лазерная закалка)



б

Сталь марки 40X (в)

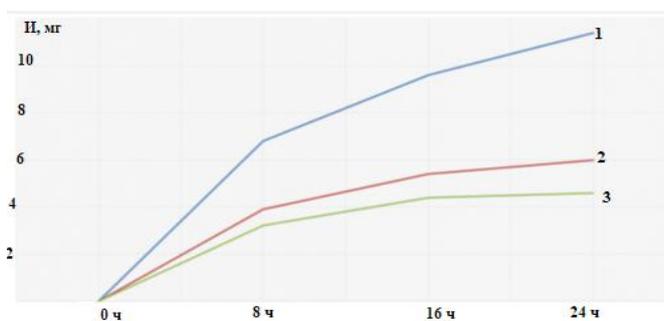
1 – Механическая обработка, шлифование, ХТО (азотирование);
2 – КО (ЭМО); 3 – КО (лазерная закалка).



в

Сталь марки 45 (д)

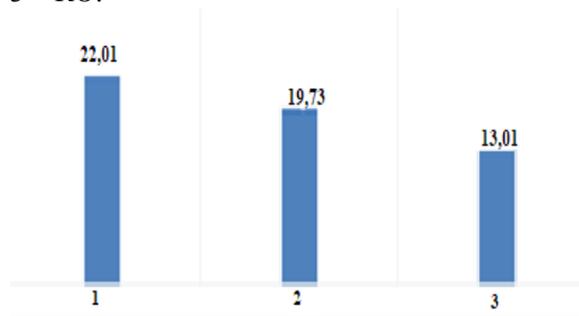
1 – МО, цементация, закалка и отпуск, шлифование;
2 – КО (лазерная закалка);
3 – КО (ЭМО).



д

Сталь марки 40X (з)

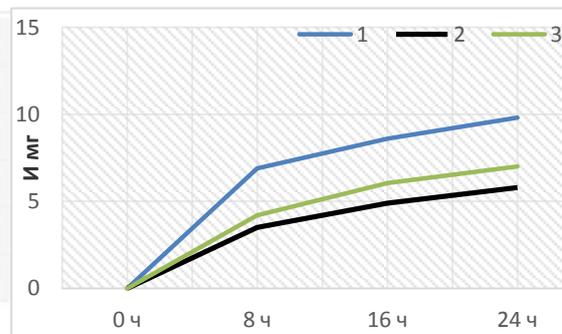
1 – МО, закалка ТВЧ, шлифование;
2 – МО, шлифование, ХТО (азотирование);
3 – КО.



з

Сталь марки 20Х3МВФ (е)

1 – МО, цементация, закалка и отпуск, шлифование;
2 – КО (лазерная закалка);
3 – КО (ЭМО).



е

Рисунок 16 – Зависимость износа образцов от методов и режимов различных видов обработок для различных сталей (режимы обработки представлены в 3 главе); д, е – износ образцов измеряли через определенные промежутки времени

Сравнение значений износа проведено с образцами, обработанными по технологиям, применяемым на предприятиях, изготавливающих золотники, плунжеры, толкатели для гидравлического оборудования для различных видов техники. Образцы, обработанные КО, имеют наилучшие результаты (рисунок 16, на диаграммах показаны значения износа в мг).

При исследовании влияния режимов комбинированных методов обработки на износостойкость было установлено, что комбинированием режимов упрочнения и выглаживания можно в широком диапазоне регулировать характеристики микрогеометрии поверхностей, получить модифицированные поверхности с новыми свойствами, улучшая смазываемость поверхностей контакта, и повысить эксплуатационный показатель – износостойкость.

Таким образом, результаты исследований показали, что комбинированная обработка повышает износостойкость по сравнению с закалкой токами высокой частоты на 45 %, по сравнению с цементацией – на 46 %, с азотированием – на 39 %, с электромеханической обработкой – на 45 %, по сравнению с лазерной закалкой – на 52 %. Исследования показали сходимость результатов износостойкости образцов (80 ± 10 %) при измерении износа различными методами. В работе даны рекомендации по выбору режимов для разных

материалов деталей. Решена обратная задача по схеме: рациональный уровень износостойкости → рациональный диапазон режимов КО.

Глава 6. Расчет технико-экономической эффективности и вектор развития комбинированных методов обработки

Согласно представленной в главе 3 методике, необходимо провести технико-экономическое обоснование, разработать концепцию сравнительного анализа и рассмотреть варианты для принятия решения.

В работе определен экономический эффект при замене операции ХТО (азотирование) для партии деталей на разработанный процесс КО.

Расчет экономической эффективности КО, применяемой взамен ХТО, состоит из следующих показателей:

- экономия электроэнергии и производственных площадей;
- уменьшение трудоемкости в механических цехах за счет концентрации операций и ликвидации вспомогательных и контрольных операций;
- экономия материалов, заработной платы и капитальных затрат при ликвидации гальванических (для защиты поверхностей, не требующих увеличения твердости) и термических операций и др.

Основные показатели экономической эффективности применения КО представлены в табл. 8.

Экономический эффект:

$$\mathcal{E} = (C_1 + E_n \cdot K_1) - (C_2 + E_n \cdot K_2), \quad (14)$$

где C_1, C_2 – стоимость продукции по применяемой и предлагаемой технологиям соответственно; E_n – нормативный коэффициент ($E_n = 0,15$), K_1, K_2 – капитальные затраты.

$$\mathcal{E} = 510\,090 + 0,15 \cdot 204\,000 - 110\,600 + 0,15 \cdot 279\,000 = 4\,425\,905 \text{ руб.}$$

Также результаты исследований, представленные в работе, использовали для изготовления деталей малой жесткости для авиационных двигателей, при этом экономический эффект составил 787,3 тыс. руб. (подтверждено актами внедрения).

Таким образом, разработанные процессы КО позволяют получить экономический эффект при производстве деталей с контактными поверхностями трения в жидких средах (например, золотников, плунжеров, толкателей для гидравлического оборудования и др.) и внедрение представленной технологии внесет значительный вклад в развитие экономики страны.

Новым направлением развития разработанных процессов КО является экспериментальное исследование параметров модифицированного поверхностного слоя в низкотемпературных средах. Направление совпадает с задачей, поставленной Правительством РФ, – в кратчайшие сроки изготовить машины и механизмы, которые будут бесперебойно работать в условиях Арктики. Это стратегическая задача, которую предстоит решить в ближайшее время. В работах Я.Б. Горелика, В. С. Колунина, А. К. Решетникова имеются данные, что при низких температурах меняются свойства поверхностных слоев – твердость, остаточные напряжения и др.

Полученные после КО свойства модифицированного износостойкого поверхностного слоя необходимо сохранить для применения пар трения в экстремальных условиях эксплуатации. В этих целях проведена серия испытаний образцов после КО в низкотемпературных средах (при $T = -50^\circ\text{C}$). Методика и оборудование представлены в 3 главе. Результаты испытаний показали, что твердость и остаточные напряжения остаются без изменения при $T = -50^\circ\text{C}$ (таблицы 9, 10).

Таблица 8 – Показатели экономической эффективности

Наименование необходимых данных	Единица измерения	До внедрения	После внедрения
Годовая программа	Шт.	2000	2000
Штучно-калькуляционное время	ч	0,866	0,366
Разряд работы: среднечасовая тарифная ставка		V	IV
	руб.	717	627
Балансовая стоимость одной единицы оборудования		8000	3000
Действительный годовой фонд времени работы	час	4015	4015
Потребляемая мощность единицы оборудования	кВт	80	8,8

Перспективным направлением развития комбинированных технологий является использование в процессах ППД ультразвука. Для разработки таких методов целесообразно использовать разработанную методику.

В качестве научного направления развития разработанных процессов КО рассматривается их применение в авиационной промышленности, например для изготовления деталей легкомоторных самолетов и беспилотных летательных аппаратов, т.к. снижение износа в парах трения – актуальная задача.

Многочисленные исследования и результаты испытаний и эксплуатации машин, показывают, что применение методов, основанных на пластической деформации, применяемых как для формообразования, так и для упрочнения поверхностного слоя зубчатых колес позволяет существенно повысить их нагрузочную способность. КО, для данной группы деталей, заключалась в фрезеровании зубчатых колес модифицированной фрезой с протуберанцем и последующем ППД рабочего профиля и выкружки зубьев.

Таблица 9 – Измерение твердости упрочненного слоя после комбинированной обработки ($T = -50^{\circ}\text{C}$)

Номер опыта	Марка стали	Твердость HV	Номер опыта	Марка стали	Твердость HV
1	40X	660	7	40XH2MA	740
2		680	8		750
3		650	9		698
4		610	10	45	776
5		750	11		775
6		774	12		710

В результате исследований было установлено, что комбинированная обработка положительно влияет на поверхностную твердость азотируемых и цементированных зубчатых колес. Для азотируемой стали 40XHMA относительный прирост твердости составляет 10%, для цементруемых сталей 12X2H4A и 20X3MBФ на 12...15%, глубина упрочнения составляет более 1, 2 мм.

Таблица 10 – Измерение остаточных напряжений после низкотемпературного воздействия

Номер опыта	Марка стали	Остаточные напряжения (осевые)	Номер опыта	Марка стали	Остаточные напряжения (осевые)
1	40X	-1140±102	7	40XH2MA	-1340±221
2		-950±79	8		-1142±101
3		-1242±114	9		-805±76
4		-1104±72	10	45	-1064±86
5		-1142±37	11		-790±40
6		-794±28	12		-1142±72

Кроме этого, в авиационной и космической промышленности много уникальных деталей и разработанные процессы КО можно предложить для их изготовления, причем в работе было доказано, что данная технология подходит для большой номенклатуры и типов размеров деталей.

Применение ЭМО в качестве упрочняющей технологии в ремонтном производстве показало положительные результаты. К тому же, применение КО для деталей коленчатого вала двигателя АШ-8М – шатунной шейки, оси ведомой шестерни и др. могут дать положительный эффект по снижению износа при эксплуатации двигателей для малой авиации.

Данная технология подходит для применения при реконструкции и перевооружении предприятий общего машиностроения, авиационной и космической промышленности. При перевооружении и реконструкции предприятий одной из основных задач является внедрение наукоемких технологий, оборудования, средств оснащения. Данная технология может встраиваться в различные технологические комплексы, автоматические линии и гибкие производственные системы.

Таким образом, положительные результаты, полученные при применении КО в различных сочетаниях, позволяют продолжить исследования для применения методов КО для изготовления деталей для легкомоторных самолетов и беспилотных летательных аппаратов. Полученный модифицированный износостойкий слой сохраняет свои свойства в низких температурах за счет положительного наследственного влияния на поверхность детали концентрированными потоками энергии и алмазного выглаживания. Можно продолжить исследования в этом направлении для деталей, которые будут работать в условиях Арктики, а разработанную методику применить для решения других задач. Перспективным направлением использования методов КО является применение разработанной технологии, оборудования и инструментов при проектировании технологических комплексов или при реконструкции и перевооружении предприятий.

Заключение

В представленной работе изложены научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых имеет существенное значение для развития экономики страны:

1. С единых теоретических позиций разработана методика проектирования процессов комбинированной обработки с применением концентрированных потоков энергии и поверхностного пластического деформирования. По этой методике разработаны процессы комбинированной обработки для получения модифицированных поверхностей последовательным воздействием на поверхностный слой концентрированными потоками энергии (лазерная закалка или электромеханическая обработка либо плазменная закалка) и поверхностного пластического деформирования (алмазное выглаживание). Представленная

методика является инструментарием для решения проблемы повышения износостойкости гидравлического оборудования для различных видов техники. Данная методика отличается от имеющихся тем, что учтен тип производства при выборе оборудования, инструмента, оснастки и анализ результатов (параметров качества модифицированной поверхности) проводят с учетом технологической наследственности.

2. Выдвинута и доказана результатами выполненных экспериментов научная гипотеза, объясняющая механизм формирования модифицированного слоя при комбинированной обработке: разные по своей природе физические воздействия ликвидируют ЗКН, образуя благоприятный рельеф поверхности; на основе проведения многофакторного эксперимента выведены экспериментальные зависимости шероховатости полученного модифицированного слоя от режимов комбинированной обработки; для инженерных расчетов разработана компьютерная программа. Разработаны теоретические зависимости остаточных напряжений и глубины масляного кармана от режимов комбинированной обработки. Установлено влияние режимов комбинированной обработки на твердость и глубину упрочнения.

3. В результате проведения теоретических и практических исследований установлено, что при комбинированной обработке количественные изменения (методы и режимы обработки) переходят в качественные (свойства поверхностных слоев); установлены рациональные режимы обработки, введены ограничения их значений рациональными диапазонами и установлены закономерности управления технологическими факторами.

4. Теоретические расчеты и экспериментальные данные подтвердили, что полученный рельеф модифицированной поверхности изменяется с определенной закономерностью. Параметры слоя функционально связаны с параметрами режима обработки, что дает возможность аналитически их рассчитывать при технологическом проектировании.

5. Экспериментальные исследования показали, что значение шероховатости поверхности после комбинированной обработки позволяет исключить из технологического процесса изготовления золотников и плунжеров операцию шлифования, и тем самым, снизить количество прижогов, термических трещин и скрытых поверхностных дефектов (R_a до 0,4 мкм). На поверхности образуются благоприятные сжимающие остаточные напряжения (до 1900 МПа) и их величина больше в 2,5...3 раза, чем после электромеханической обработки и лазерной закалки.

6. Результаты исследований показали, что комбинированная обработка повышает износостойкость по сравнению с закалкой токами высокой частоты на 45 %, по сравнению с цементацией – на 46 %, с азотированием – на 39 %, с электромеханической обработкой – на 45 %, по сравнению с лазерной закалкой – на 52 %. Комбинируя методы и режимы обработки концентрированными потоками энергии и алмазным выглаживанием, можно в широком диапазоне регулировать характеристики шероховатости полученных модифицированных поверхностей, улучшить смазываемость поверхностей контакта и повысить износостойкость золотников и плунжеров гидравлического оборудования различных видов техники.

7. Установлено, что в процессе комбинированной обработки можно управлять процессом технологического и эксплуатационного наследования так, чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали (твердость, глубина упрочнения, шероховатость поверхности, наличие масляных карманов, остаточные напряжения), сохранялись в течение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно (поверхностные дефекты), ликвидировались в начале изготовления. После комбинированной обработки в поверхностном слое не образуются зоны концентрации напряжений, и алмазное

выглаживание является технологическим барьером для скрытых дефектов. Это создаст резерв для увеличения износостойкости золотников и плунжеров и снизит количество отказов различных видов техники.

8. Разработанный метод КО является универсальным и применяется для повышения износостойкости различной номенклатуры деталей: золотники, плунжеры, валы, оси, шпильки и др. Эффективность метода подтверждается актами внедрения на различных предприятиях РФ.

9. Параметры качества поверхностных слоев модифицированной поверхности сохраняют свои свойства после низкотемпературного воздействия. Это можно рассматривать как развитие нового научного направления для деталей машин и механизмов используемых при освоении Арктики.

10. Установлено, что КО в различных сочетаниях с ППД благоприятно влияет на поверхностный слой зубчатых колес, применяемых в легкомоторной авиации и производстве беспилотных летательных аппаратов. В результате исследований было установлено, что КО положительно влияет на поверхностную твердость азотируемых и цементированных зубчатых колес. Для азотируемой стали 40ХНМА относительный прирост твердости составляет 10%, для цементируемых сталей 12Х2Н4А и 20Х3МВФ на 12...15 %, глубина упрочнения составляет более 1, 2 мм.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации:

Монографии:

1. Ганина, Г. Э. Теоретические основы реконструкции и технического перевооружения промышленных предприятий / Г. Э. Ганина, Ю. А. Островский, А. П. Яковлева. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – 250 с.

2. Управление проектами реформирования промышленности / А. В. Мухин, Г. Э. Ганина, Ю. А. Островский, А. П. Яковлева. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 200 с.

Статьи в журналах, входящих в базы Web of Science и Scopus, ВАК РФ:

3. Yakovleva, A. P. Theoretical Investigation of the Influence of Combined Machining Modes on the Value and Character of Residual Stresses in the Surface Layer of Cylindrical Friction Pairs / A. P. Yakovleva, A. Y. Albagachiev // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2020. – №49(3). – P. 237–242.

4. Yakovleva, A. P. Improving the durability of machine parts using a combined method / A. P. Yakovleva // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 946. – С. 37-41.

5. Yakovleva, A. The Effect of Combined Processing on Residual Stresses in the Surface Layer of Power Plant Parts / A. Yakovleva, M. Isaenkova, R. Minushkin // Materials. – 2022. – №15(2). – P. 420

6. The effect of combined processing schedules on the value and nature of residual stresses in the surface layer of cylindrical friction pairs / S. Fedorov, A. Albagachiev, M. Isaenkova, A. Yakovleva, V. Zaripov, R. Minushkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (electronic edition), 2019. – P. 012032.

7. Technological heredity effect on fatigue strength of hydropower plant parts after combined processing / A. Yakovleva, A. Dubov, A. Sobranin, E. Karpovich, A. Marchenkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. The conference "Hydraulics". – Bauman Moscow State Technical University, 2020. – P. 012029.

8. Fedorov, S. K. Controlling the properties of the surface layers of parts by forming regular micro-reliefs / S. K. Fedorov, A. P. Yakovleva, Yu. K. Perepelkin // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 989. – P. 182-186.

9. Improving wear resistance of drill pipe sub thread by using final electromechanical surface hardening / S. Fedorov, V. Zaripov, Y. Ivanova, A. Yakovleva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – №963(1). – P. 012008.

10. The Effect of Low-Temperature Media on Surface Quality after Combined Processing / A. P. Yakovleva, A. Yu. Albagachiev, V. A. Voronov, A. V. Borisenko, and Yu. S. Ivanova // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2023. – № 2. – P. 28–33. – DOI: 10.3103/S1052618823020115.

11. Yakovleva, A. P. Obtaining regular microreliefs using laser irradiance / A. P. Yakovleva, A. V. Bogdanov // AIP Conference Proceedings. – 2023. – №2833(1). – P. 070004. doi.org/10.1063/5.0152448.

12. Яковлева, А. П. Теоретическое исследование влияния режимов комбинированной обработки на величину и характер остаточных напряжений в поверхностном слое цилиндрических пар трения / А. П. Яковлева, А. Ю. Албагачиев // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2020. – № 3. – С. 72–78.

13. Яковлева, А. П. Исследование свойств поверхностного слоя стальных деталей, упрочненных электрохимической обработкой / А. П. Яковлева // Авиационная промышленность. – 2012. – № 2. – С. 33-35.

14. Яковлева, А.П., Омельченко, И.С. Повышение нагрузочной способности стальных деталей методом комбинированной обработки / А. П. Яковлева, И. С. Омельченко // Авиационная промышленность. – 2013. – № 2. – С. 62-64.

15. Яковлева, А. П. Поверхностное упрочнение электрохимической обработкой стальных деталей машин / А. П. Яковлева // Авиационная промышленность. – 2014. – № 1. – С. 32-33.

16. Яковлева, А. П. К вопросу о способе снижения износа в узлах трения / А. П. Яковлева // Авиационная промышленность. – 2017. – № 4. – С. 35-37.

17. Яковлева, А. П. Эффективность применения комплексирования на токарных станках с ЧПУ / А. П. Яковлева // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2018. – № 11 (260). – С. 36-40.

18. Яковлева, А. П. Упрочнение зубчатых колес концентрированными потоками энергии / А. П. Яковлева // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2019. – № 7 (268). – С. 3-7.

19. Яковлева, А. П. Управление свойствами поверхностных слоев деталей методом комбинированной обработки / А. П. Яковлева, Л. В. Савельева // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2020. – № 4 (277). – С. 27-30.

20. Яковлева, А. П. Упрочняющая обработка зубчатых колес крупного модуля / А. П. Яковлева // Авиационная промышленность. – 2014. – № 2. – С. 31-33.

21. Яковлева, А. П. Повышение износостойкости цилиндрических пар трения методом комбинированной обработки / А. П. Яковлева, А. Ю. Албагачиев, О. И. Кулаков // Научные технологии в машиностроении. – 2023. – №1 (139). – С. 31–38.

22. Албагачиев, А. Ю. Применение методов комбинированного воздействия на поверхностный слой деталей машин в наукоёмких технологиях / А. Ю. Албагачиев, А. П. Яковлева // Научные технологии в машиностроении. – 2023. – № 3 (141). – С. 12–18.

Патенты и изобретения

23. Патент на полезную модель RU 186927 U1, 11.02.2019, МПК В24В 39/04. Инструментальный узел для электрохимической обработки резьбы: заявка № 2018106130; заявл. 19.02.2018; опубл. 11.02.2019 / С. К. Федоров, Л. В. Федорова, Ю. С. Иванова, А. П. Яковлева, В. Н. Зарипов, М. В. Власов, М. А. Лашуков; заявители и патентообладатели: С. К. Федоров, Л. В. Федорова, Ю. С. Иванова, А. П. Яковлева, В. Н. Зарипов, М. В. Власов, М. А. Лашуков.

Статьи в журналах, входящих в базу РИНЦ

24. Физико-механические свойства поверхностного слоя деталей после упрочнения электрохимической обработкой / А. П. Яковлева, В. Н. Зарипов, Т. Р. Хуснетдинов, В. Т. Нго // Главный механик. – 2019. – №2. – С. 26-31.

25. Паршиков, О. Н. Обработка стальных деталей электрохимическим методом / О. Н. Паршиков, А. П. Яковлева // Главный механик. – 2014. – № 7. – С. 62-64.

26. Яковлева, А. П. Повышение нагрузочной способности деталей типа тел вращения методом комбинированной обработки / А. П. Яковлева // Главный механик. – 2015. – № 1. – С. 46-48.

27. Балтин, Б. А. Анализ гибридных и комбинированных технологий для повышения износостойкости деталей машин / Б. А. Балтин, А. П. Яковлева // Главный механик. – 2020. – № 3. – С. 26-36.
28. Балтин, Б. А. Анализ методов химико-термической и термической обработки для повышения износостойкости деталей машин / Б. А. Балтин, А. П. Яковлева // Главный механик. – 2020. – № 5. – С. 40-53.
29. Яковлева, А. П. Определение параметров поверхностного слоя деталей после комбинированной обработки / А. П. Яковлева, В. С. Беляев // Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. науч. тр. 8-й Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2019. – С. 179-182.
30. Иванов, А. С. Упрочнение зубчатых колес концентрированными потоками энергии / А. С. Иванов, Ю. К. Перепелкин, А. П. Яковлева // Будущее машиностроения России: сб. докл. 12-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (с международным участием). – М., 2019. – С. 477-480.
31. Федоров, С. К. Поверхностное упрочнение электромеханической обработкой деталей текстильных машин / С. К. Федоров, А. П. Яковлева, М. А. Лашуков // Будущее машиностроения России: сб. докл. 11-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (с международным участием). – М., 2018. – С. 65-68.
32. Яковлева, А. П. Повышение износостойкости деталей летательных аппаратов методом комбинированной обработки / А. П. Яковлева, А. Ю. Беспояско, И. В. Лизунов // XLIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства: сб. тез. – М., 2019. – С. 317-319.
33. Яковлева, А. П. Повышение износостойкости деталей методом комбинированной обработки / А. П. Яковлева, Р. Б. Михея, В. С. Беляев // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. науч. тр. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. – Курск, 2019. – С. 198-201.
34. Яковлева, А. П. Создание гибридных станков для производства деталей сельхозназначения / А. П. Яковлева // Главный механик. – 2021. – №8. – С. 36-43.
35. Яковлева, А. П. Повышение нагрузочной способности деталей типа тел вращения методом комбинированной обработки / А. П. Яковлева // Главный механик. – 2015. – № 1. – С. 46-48.
36. Яковлева, А. П. Повышение ресурса работы пар трения металлорежущего оборудования / А. П. Яковлева // Машиностроение: инновационные аспекты развития: материалы I междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2018. – С. 102-105.
37. Яковлева, А. П. Получение модифицированных поверхностей с использованием концентрированных потоков энергии / А. П. Яковлева, А. Ю. Албагачиев, О. И. Кулаков // Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли: сб. тр. XIV Междунар. науч.-техн. конф. – Брянск, 2022. – С. 189–194.

Подписано в печать 05.06.2025

Формат 60x84x16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 2,25. Тираж 100 экз. Заказ № 127.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84.