

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения имени А. А. Благонравова  
Российской академии наук (ИМАШ РАН)

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

**Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

Научный консультант:  
доктор технических наук,  
профессор  
Албагачиев Али Юсупович

Москва 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>6</b>
<b>Глава 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ</b>	
<b>1. Анализ технологических методов управления качеством поверхности и повышения износостойкости.....</b>	<b>27</b>
1.1. Упрочняющая обработка.....	27
1.1.1. Химико-термическая обработка .....	29
1.1.1.1. Диффузионное насыщение неметаллами.....	29
1.1.1.2. Многокомпонентное насыщение металлами и неметаллами.....	33
1.1.1.3. Диффузионное насыщение металлами.....	39
1.1.2. Обработка концентрированными потоками энергии.....	42
1.1.2.1. Электрофизические методы.....	44
1.1.2.2. Физические методы.....	46
1.1.3. Поверхностная термическая обработка.....	52
1.1.4. Поверхностная пластическая деформация.....	54
1.2. Отделочная обработка.....	58
1.3. Методы комбинированной обработки.....	67
<b>2. Анализ технологических методов получения модифицированных поверхностей и поверхностей с масляными карманами</b>	
2.1. Получение модифицированных поверхностей обработкой резанием.....	82
2.2. Получение модифицированных поверхностей методами ППД.....	85
2.3. Получение модифицированных поверхностей методами химического и электрофизического воздействия.....	88
2.4. Получение модифицированных поверхностей комбинированными методами.....	93



<b>3. Анализ влияния технологического наследования на повышение качества поверхностных слоев и свойств модифицированных поверхностей.....</b>	<b>97</b>
Выводы по 1 главе.....	100
<b>Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ</b>	
2.1. Теоретическое исследование влияния режимов комбинированной обработки на величину и характер остаточных напряжений в модифицированном поверхностном слое .....	103
2.2. Теоретическое исследование влияния режимов комбинированной обработки на шероховатость модифицированного поверхностного слоя .....	114
2.3. Теоретическое исследование влияния режимов комбинированной обработки на глубину масляного кармана .....	120
2.4. Теоретическое исследование влияния режимов комбинированной обработки на глубину упрочнения модифицированного поверхностного слоя .....	124
Выводы по 2 главе.....	127
<b>Глава 3. ОБЩИЕ И ЧАСТНЫЕ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ</b>	
3.1. Программа научного исследования. Методика проектирования процессов комбинированной обработки.....	129
3.2. Экспериментальные установки, технологии и инструменты.....	134
3.3. Методика проведения исследований твердости и глубины упрочнения модифицированного слоя после комбинированной обработки.....	144
3.4. Методика проведения исследований шероховатости модифицированного поверхностного слоя после процессов комбинированной обработки.....	145

3.5. Методика проведения исследований величины и характера остаточных напряжений и структуры в модифицированном поверхностном слое после комбинированной обработки.....	147
3.6. Методика проведения исследований зон концентрации напряжений в модифицированном поверхностном слое после комбинированной обработки.....	149
3.7. Методика проведения исследований износостойкости модифицированного поверхностного слоя.....	152
3.8. Методика проведения исследований параметров модифицированного слоя после низкотемпературного воздействия.....	155
3.9. Методики обработки полученных экспериментальных данных.....	156
Выводы по 3 главе.....	159

#### **Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

4.1. Экспериментальное исследование влияния режимов комбинированной обработки на глубину и твердость модифицированного слоя.....	160
4.2. Экспериментальное исследование влияния режимов комбинированной обработки на шероховатость модифицированного поверхностного слоя .....	174
4.3. Экспериментальное исследование влияния режимов комбинированной обработки на величину и характер остаточных напряжений в модифицированном поверхностном слое.....	181
4.4. Экспериментальное исследование влияния режимов комбинированной обработки на структуру модифицированного поверхностного слоя.....	191
4.5. Исследование влияния режимов комбинированной обработки на наличие зон концентрации напряжений в модифицированном поверхностном слое при влиянии фактора наследственности.....	194
Выводы по 4 главе.....	200

<b>Глава 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ.....</b>	<b>201</b>
Выводы по 5 главе.....	208
<b>Глава 6. РАСЧЕТ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ И ВЕКТОР РАЗВИТИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ</b>	
6.1. Расчет ожидаемого экономического эффекта.....	209
6.2. Определение дальнейшего вектора развития комбинированной обработки .....	215
Выводы по 6 главе.....	218
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>219</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....</b>	<b>222</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>223</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ.....</b>	<b>254</b>

## ВВЕДЕНИЕ

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, золотниковые и плунжерные пары, пары 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, 20Х3МНФ, 40Х и др. Технические требования: по точности – 6...7 квалитет, но для некоторых машин сельхозназначения допускается 8 квалитет; шероховатости –  $Ra\ 0,1...0,4\ \mu m$ ; 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, электрохимическая 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, оборудование для этих методов изготавливают на территории РФ – хорошее по качеству и цене.

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, В.П. Смоленцева, А.Г. Суслова, А.В. Киричека, А.Н. Михайлова, Б.П. Саушкина, Е.С. Киселева, О.Н. Кириллова, А.М. Кадырметова, Г.А. Сухочева, А.И. Болдырева и др. Существует несколько подходов к разработке процессов комбинированной обработки (КО), однако все подходы направлены на объединение различных технологических методов для достижения оптимальных результатов. Комбинированная обработка позволяет получить новые эффекты, недостижимые при использовании методов по отдельности. 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. Данная работа может быть полезна при реализации программы «Феникс» и может рассматриваться как научно-технический задел при создании новой ракеты-носителя для пилотируемой программы.

Представленная работа соответствует паспорту специальности 2.5.5. (п. 2, 3, 7).

Автор считает своим долгом отметить неоценимую помощь при выполнении диссертации д-ра техн. наук профессора А.В. Мухина, д-ра техн. наук профессора А.М. Кадырметова, д-ра техн. наук профессора И.Н. Кравченко,

д-ра техн. наук профессора В.А. Кузнецова, канд. техн. наук доцента А.А. Гончарова.

Автор глубоко признательна за помощь в проведении отдельных этапов исследований, ценные советы и консультации д-ру техн. наук профессору А.Г. Суслову, д-ру техн. наук профессору С.К. Федорову, д-ру техн. наук профессору М.Г. Исаенковой, а также студентам кафедры МТ-3, принимавшим активное участие в экспериментальных исследованиях.

**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 маслостойкость 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 износостойком 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, электрохимическая 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 – наличия 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.

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.

5. Разработаны инжиниринговые 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.

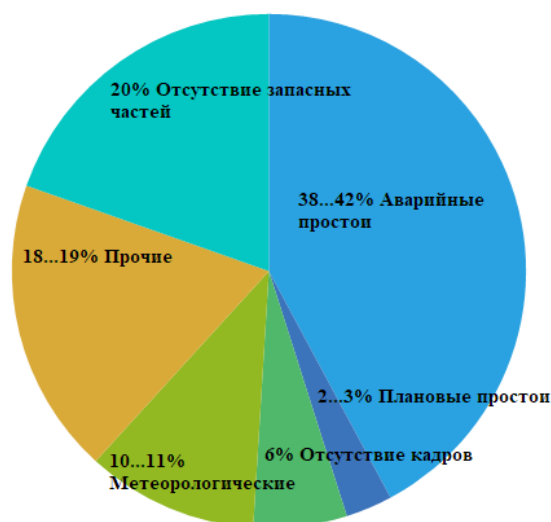
**Степень достоверности результатов исследований** подтверждается адекватностью математических моделей, построенных с использованием реальных результатов исследований, удовлетворительным совпадением теоретических положений с результатами моделирования исследуемых процессов и с практическими испытаниями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

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.

## **Глава 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАУЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Надежность и работоспособность машин зависит от сочетания конструктивных, эксплуатационных и технологических факторов. В современных условиях эксплуатации машин и механизмов необходимо применять эффективные методы продления их службы, что тесно связано с использованием наукоемких технологий.

Например, надежность и работоспособность дорожной, строительной, железнодорожной и сельскохозяйственной техники лимитируется, в том числе, топливной и гидравлической аппаратурой [3, 8, 49, 84 и др.]. По данным работ [3, 24, 182], на топливную аппаратуру приходится до 15...20 % отказов, на гидравлическую – до 25..35 % (рисунок 1.1, 1.2). Причем отказы носят внезапный характер.



*Рисунок 1.1 – Причины простоев дорожной, строительной и сельхозтехники*



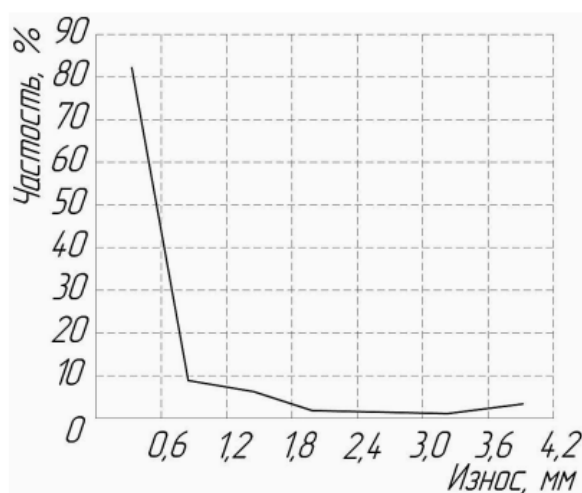
*Рисунок 1.2 – Анализ причин отказов техники, имеющей гидравлическую аппаратуру*

Ресурс топливной и гидравлической аппаратуры существенно зависит от долговечности деталей с контактными поверхностями трения– плунжерных и золотниковых пар. Надежность техники, в свою очередь, напрямую зависит от ресурса агрегатов топливной и гидравлической аппаратуры, которые являются причиной до 20 % и 35 % всех неисправностей и отказов соответственно (рисунок 1.2). Критически важные для долговечности топливной и гидравлической аппаратуры компоненты, такие как топливные насосы высокого давления и гидрораспределители, ограничены ресурсами плунжерных и золотниковых пар. Основным механизмом износа этих пар –гидроабразивное воздействие жидкости на рабочие поверхности, сопровождающееся гидравлическим и механическим износом. Для того чтобы снизить износ и предотвратить заедание в парах топливной и гидравлической аппаратуры, необходимо улучшить триботехнические характеристики сопрягаемых поверхностей и повысить их смазываемость [49, 84, 127, 227].

Неисправности сельскохозяйственной техники в период работы на поле могут привести к снижению урожайности на 20...30 %, задержке производства и невозможности проведения работ в оптимальные сроки [8, 182]. Поломки дорожной и строительной техники могут привести к простоям объектов и нанести

ущерб как частным, так и государственным компаниям [8, 182, 227]. В среднем по стране простои строительной, дорожной и сельскохозяйственной техники из-за ремонта составляют около 40 %, что приводит к значительным дополнительным расходам [3, 182, 248]. Поэтому повышение межремонтного ресурса техники и, следовательно, ее долговечности, имеет важное значение, поскольку высокая долговечность является основным условием для сохранения и повышения эффективности производства. Значительные экономические выгоды в виде сокращения расходов на металл и топливно-смазочные материалы могут быть достигнуты за счет увеличения износостойкости и, следовательно, ресурса деталей всех видов техники [24, 248].

В деталях рассматриваемых видов техники наиболее распространены износы величиной 0,01–0,6 мм (рисунок 1.3) [3, 49, 248].



*Рисунок 1.3 – Примерное распределение величин износа деталей строительной, дорожной, железнодорожной и сельскохозяйственной техники*

Распределение причин отказов агрегатов и систем тракторов марок К–700А, ДТ–75М и МТЗ–82 представлены в таблицах 1, 2 [24, 30, 127]. Эта техника применяется в сельском хозяйстве и дорожном и коммунальном строительстве. Анализ таблиц 1.1, 1.2 и данные литературы показывают, что в тракторах указанных марок более слабым местом является топливная аппаратура, однако гидравлические системы тоже имеют большое количество неисправностей. В

таблицах показаны неисправности только тракторов, однако такая тенденция имеется у большого количества техники, имеющей, в том числе, гидравлическое оборудование.

Таблица 1.1–Распределение количества отказов механизмов тракторов К–700А, ДТ–75М и МТЗ–82

Наименование механизмов	Количество отказов, %		
	К-700А	ДТ-75 М	МТЗ-82
Двигатель	41, 4	38,3	41,8
Топливная система	36,6	38,2	37,4
Система охлаждения	5,3	8,4	6,8

Таблица 1.2 –Распределение количества неисправностей механизмов тракторов К–700А, ДТ–75М и МТЗ–82

Наименование механизмов	Количество неисправностей, %		
	К-700А	ДТ-75М	МТЗ-82
Электрическое оборудование	10,2	11,2	8,6
Цилиндропоршневая группа	9,7	8,2	10,7
Тормозная система	8,7	4,2	10,4
Гидравлическая система	22,6	25,8	19,2
Плотность соединений	9,4	12,3	9,8
Ходовая часть	11,5	8,6	12,7

Из анализа неисправностей и отказов деталей гидравлической аппаратуры в строительной и сельскохозяйственной технике [26, 30] становится ясно, что



долговечность гидросистемы в значительной степени определяется ресурсом золотников и плунжеров.

Как было сказано, долговечность гидравлических систем в дорожном, строительном, коммунальном и сельскохозяйственном и др. оборудовании зависит от ресурса его деталей. Эффективная работа гидравлической аппаратуры имеет прямое отношение к основным экономическим и техническим показателям оборудования, таким как долговечность, производительность и др. [3, 8, 248]. При некачественной фильтрации масел твердые частицы могут проникать под высоким давлением и большой скоростью через малые зазоры, что приводит к износу пар трения и снижению эффективности гидравлической системы [8, 182, 227].

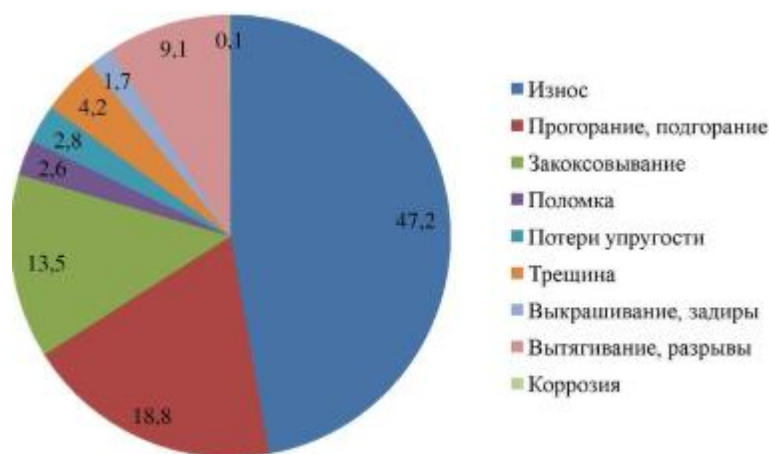
Большинство исследователей указывают, что ресурс гидравлической аппаратуры в целом зависит от ресурса деталей, таких как плунжеры и золотники [2, 49, 84 и др.]. Износ пар трения в процессе эксплуатации приводит к потере мощности, потере КПД, нарушению нормальной работы механизмов подъема и увеличению износа других деталей механизма.

Для снижения износа золотниковых и плунжерных пар используются высокоуглеродистые легированные и конструкционные стали, подвергаемые термической обработке. Такие стали, как 40X, 20X3МВФ, 38X2МЮА и др., обеспечивают способность деталей работать в условиях высокого давления и температуры, хорошую обрабатываемость резанием, стабильность геометрических параметров, высокую твердость, стойкость к износу и коррозии. В связи с минимальными зазорами и специфическими условиями эксплуатации требуется сохранение стабильности размеров, высокая износостойкость и прочность. Для достижения этих требований используют различные методы термической обработки, такие как цементация, азотирование, закалка (ТВЧ) и др. [3, 227, 248]. Все марки стали после термической обработки имеют твердость HRC 42...62. Зазоры в парах составляют 0,6...2 мкм, что делает детали чрезвычайно чувствительными к наличию абразивных частиц в масле,

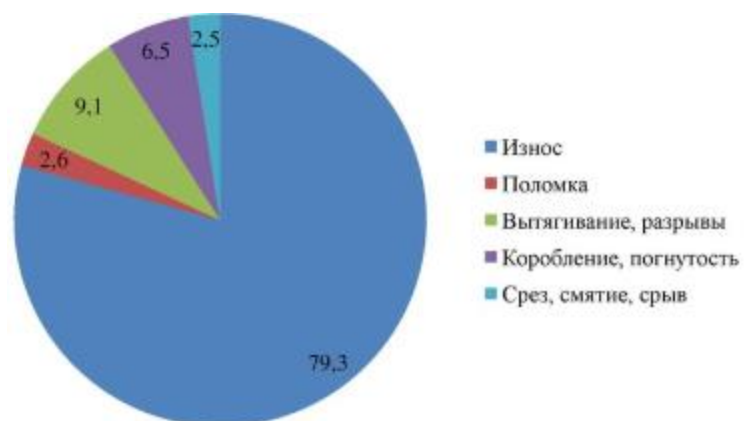
вызывающих интенсивный износ и приводящих к быстрому отказу [3, 24, 30] (рисунок 1.3).

Из этого можно сделать вывод о том, что надежность различных видов техники, таких как дорожная, строительная, железнодорожная и сельскохозяйственная, в значительной мере зависит от долговечности ключевых компонентов топливной и гидравлической систем – золотников и плунжеров.

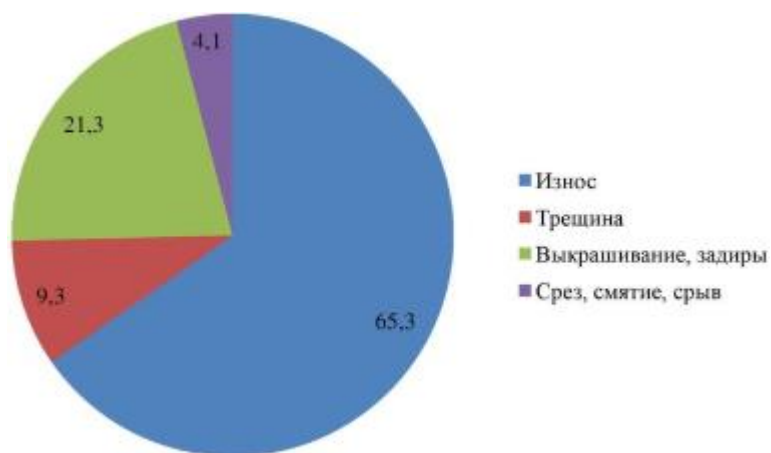
На основе исследований, проведенных авторами работ [30, 127, 227], установлено, что абразивный износ в парах золотников или плунжеров возникает вследствие зацепления абразивных частиц в зазоре. Если размер частиц превышает размер зазора, они могут привести к износу вследствие нанесения микроцарапин на поверхность или в результате деформации поверхностного слоя. Это наблюдается особенно четко в случае частиц, которые соизмеримы с радиальным зазором в паре трения, имеющих острые кромки. Частицы меньшего, чем радиальный зазор размера, вызывают в основном гидроабразивный износ, который является основной причиной отказа золотников и плунжеров (рисунок 1.4).



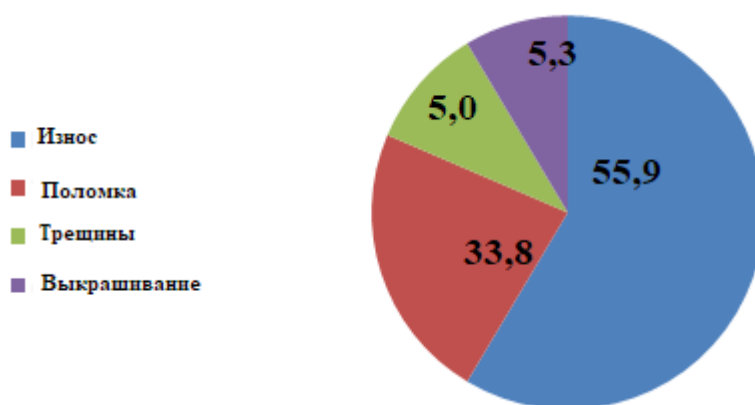
*a*



*а*



*б*



*в*

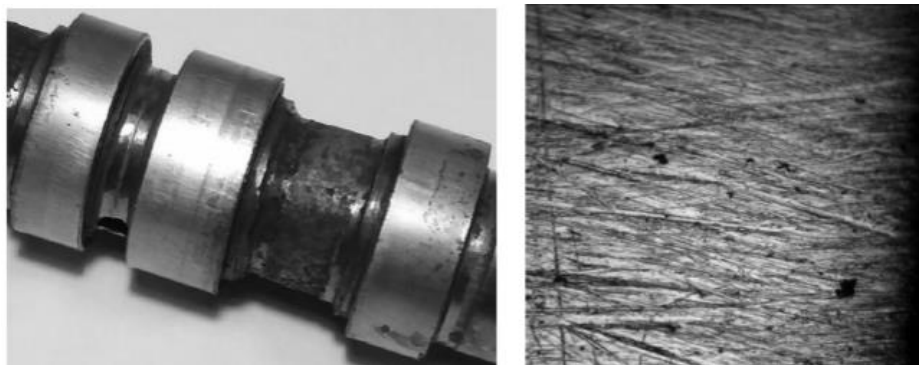
*Рисунок 1.4 – Распределение причин отказов:*

*а – основных деталей топливной и гидравлической аппаратуры сельхозтехники; б – золотников гидравлического оборудования строительной техники; в – плунжеров дорожной техники; г – золотников железнодорожной техники*

К плунжерам и золотникам предъявляют технические требования к допустимым монтажным и термическим деформациям деталей, стабильности размеров, высокой износостойкости и прочности (рисунки 1.5–1.7, Приложение).



*Рисунок 1.5 – Пример золотника гидравлической системы трактора*



*а*

*б*

*Рисунок 1.6 – Пример износа золотника:*

*а – после 2000 ч работы (заводской ресурс 5000 ч); б – изношенная поверхность золотника*

Износ деталей плунжерных пар характеризуется выраженной концентрацией на определенных участках поверхностей. Износ втулки и плунжера различается: исследования [30, 248] показывают, что наибольший износ обычно наблюдается на участке поверхности плунжера, соприкасающемся с впускным окном втулки. Глубина местного износа наиболее изношенного плунжера может достигать 30...35 мкм, а ширина изношенной области составляет около 7,5 мм протяженностью 9...10 мм от края верхнего торца [3, 84]. Втулка обычно подвергается менее интенсивному износу. Например, у края впускного окна глубина износа может составлять 20 мкм.

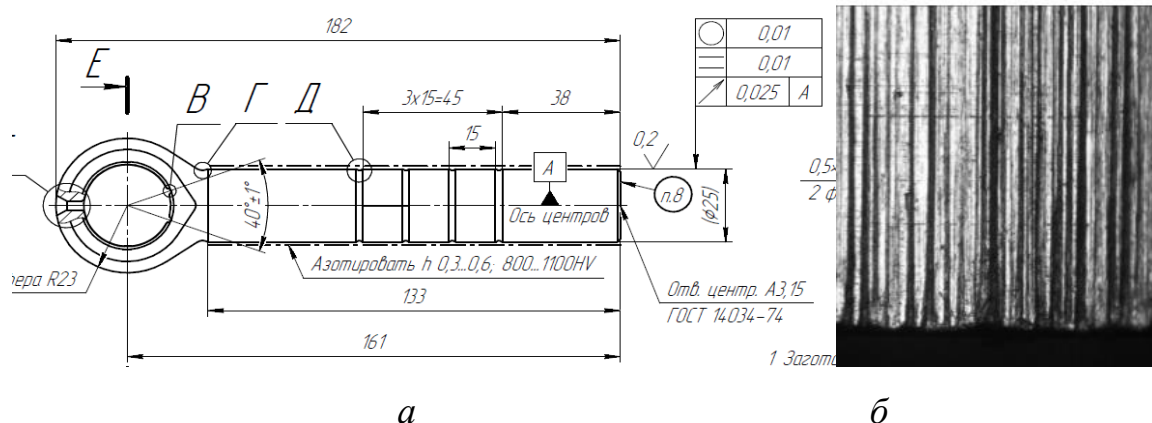


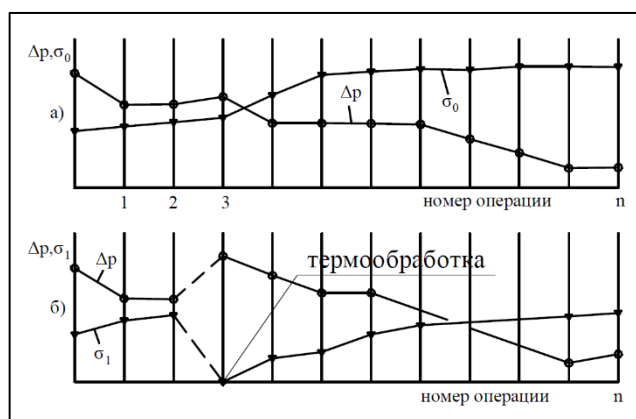
Рисунок 1.7 – Пример плунжера гидронасоса мототрактора:  
а–технические требования; б–износ поверхности

При наличии эмульсионной воды в масле металлические свойства значительно ухудшаются, включая противоизносные и противозадирные качества. Вода, проникая в зазоры плунжерных пар, нарушает масляную пленку, что приводит к прямому контакту между соприкасающимися деталями, увеличению износа и заеданию трущихся поверхностей. Эти механизмы и характер износа указывают на сложный гидроабразивный процесс (рисунок 1.7). В среднем износ втулки в 1,5...2,0 раза меньше, чем у плунжера. Максимальный износ плунжера обычно не превышает 40 мкм.

Золотниковые пары производят из следующих материалов: корпус– из серого чугуна СЧ 21 с твердостью HB 170...240 [3, 8, 30]; золотники–из стали марок 40X, 38X2МЮА и 15X с термической или химико-термической обработкой до твердости HRC 55...65. В процессе производства золотников осуществляется их цементация (нитроцементация) на глубину 700...1100 мкм с последующей закалкой и отпуском.

Интенсивность износа различных соединений зависит от геометрии материалов (включая шероховатость, твердость и прочих параметров), их физико-механических характеристик, структуры, а также условий эксплуатации (таких как наличие смазки, температуры, давления, воздействие абразивных частиц, скорость относительного движения трущихся поверхностей) и особенностей конструкции соединения. Для повышения долговечности золотников и плунжеров

необходимо повышать качество поверхностей деталей применением упрочняющих технологий. При выборе технологий изготовления и упрочнения необходимо учитывать возможность снижения трения за счет удерживания смазки на поверхностях контакта [60, 127].



*Рисунок 1.8 – Изменение размеров ( $\Delta p$ ) и напряжений ( $\sigma_0, \sigma_1$ ) заготовок:  
а – в процессе обработки резанием без термической обработки; б – в процессе обработки резанием с термической обработкой*

Термическая обработка оказывает влияние на параметры отклонений размеров и остаточных напряжений (рисунок 1.8). Введение в эксплуатацию высокопроизводительных металлорежущих станков, способных производить изделия с высокой точностью, ставит перед руководством предприятий задачу учета дефектов, возникающих при термической обработке. Поэтому необходимо применять методы упрочнения с минимальным негативным влиянием на параметры качества и точности обработки.

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.

### Степень разработанности темы в трудах ученых

Научное направление	Основные результаты исследования	Основоположники и исследователи
Технологическое повышение качества поверхностного слоя, повышение эксплуатационных показателей машин и механизмов	<p>Исследование методов термической и химико-термической обработки</p> <p>Исследование качества поверхности</p> <p>Влияние остаточных напряжений на свойства поверхностного слоя</p>	<p>Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н., Герасимов С.А., Кудрявцев Н.Т., Рыжов М.Н., Сидорин И.И. и др.</p> <p>Дьяченко П. Е., Елизаветин М. А., Исаев А. И., Сулима А. М., Рыжов Э. В., Маталин А. М., Крагельский И. В., Проников А. С., Сатель Э. А., Горленко О.А., Суслов А.Г., Безъязычный В.Ф., Ямников А.С., Буше Н.А., Михин Н.М., Чичинадзе А.В. и др.</p> <p>Биргер В.И., Колмагоров В.Л., Фадеев Л.Л., Албагачиев А.Ю., Няшин Ю.И., Поздеев А.А. и др.</p>
Исследование методов комбинированной обработки	Исследование сочетания различных методов для повышения качества поверхностных слоев	Подураев В.П., Хейфец М.Л., Саушкин Б.П., Михайлов А.Н., Горленко О.А., Суслов А.Г., Смоленцев В.П., Смоленцев Е.В., Кадырметов А.М., Болдырев А.И., Сухочев Г.А., Усов С.В., Киричек А.В., Тарельчик В.Б., Макаров В.М., Чудина О.В. и др.
Упрочнение поверхностных слоев концентрированными потоками энергии	Исследование плазменного упрочнения и напыления сталей в различных сочетаниях, лазерной закалки и напыления, детонационного упрочнения	Балановский А.Е., Андрияхин В.М., Головкин Л.Ф., Григорьянц А.Г., Губенко С.И., Коваленко В.С., Меркулов Г.В., Соколов А.А., Иванов В.В., Сафонов С.В., Гаврилов Г.Н., Матвеев Ю.И., Белашов И.С., Дьюли У., Мэйтленд А., Данн М., Хирд Г., Аскинази Б.М., Шиганов И.Н., Тарасова Т.В., Паршев С.Н., Захаров И.Н., Чичинев Н.А., Кадырметов А.М., Болдырев А.И., Сукочев Г.А., Иванов С.А., Горбатюк С.М., Пузряков А.Ф., Балдаев Л.Х., Черноиванов В.И. и др.

Технологические методы получения модифицированных поверхностей и поверхностей с регулярными микрорельефами	Исследование модифицированных поверхностей и поверхностей с регулярными микрорельефами и на износостойкость, способности разделять поверхности сопряжений слоем смазки	Шнейдер Ю.Г., Зубков Н.Н., Исупов М.Г., Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Дмитриева О.В., Полянчиков Ю.Н., Сафонов С.В., Барац Я.И. и др.
Воздействие на поверхностный слой методами ППД	Влияние ППД на качество поверхности и эксплуатационные показатели машин	Смелянский В.М., Балтер М.А., Блюминштейн В.Ю., Суслов А.Г., Одинцов Л.Г., Папшев Д.Д., Чепа П.А., Браславский В.М., Пшибыльский В. И др.
Влияние технологической наследственности на эксплуатационные показатели деталей машин	Проявление технологической наследственности на этапе изготовления детали и влияние на качество поверхности при обработке поверхностным пластическим деформированием	Дальский А.М., Васильев А.С., Кондаков А.И., Хейфец М.Л., Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Горленко О.А., Суслов А.Г. и др.

Проблемы износа в парах трения возникают не только в общем машиностроении. Такие проблемы имеются в парах трения в авиации, космической промышленности в приборостроении и др. Работы ученых Москвы, Воронежа, Брянска, Тулы, Новосибирска и др. в области авиации и космоса подтверждают это. Поэтому необходимо разрабатывать методы повышения износостойкости на основе имеющихся исследований большого количества ученых.



## **1. Анализ существующих методов повышения качества поверхностного слоя и износостойкости**

В процессе изнашивания при трении скольжения, когда возникают усталостные, эрозионные, коррозионные, адгезионные или другие виды поверхностных повреждений, физико-механические свойства и структура тонкого приповерхностного слоя материала играют важную роль. От этих свойств зависит кинетика изнашивания, характер формирующихся при трении динамических структур и механизмы разрушения. По данным работ [3, 30, 60, 61, 230-232 и др.], 85...90 % машин выходят из строя по причине износа деталей, хотя за последние годы использование эффекта безызносности значительно расширилось.

Было разработано и исследовано большое количество методов повышения износостойкости. Большой вклад в эту сферу внесли В.Б. Арзамасов, Б.М. Аскинази, С.А. Герасимов, А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, Ю.М. Лахтин, Н.Т. Кудрявцев, М.Н. Рыжов, И.И. Сидорин и др. Однако еще есть нерешенные проблемы.

В работе проведена классификация способов повышения износостойкости. Все способы были разделены на несколько больших групп — упрочняющая обработка, отделочная обработка, комбинированная обработка. В основу классификации методов положено различие физических, физико-технических и химических процессов (рисунок 1.9).

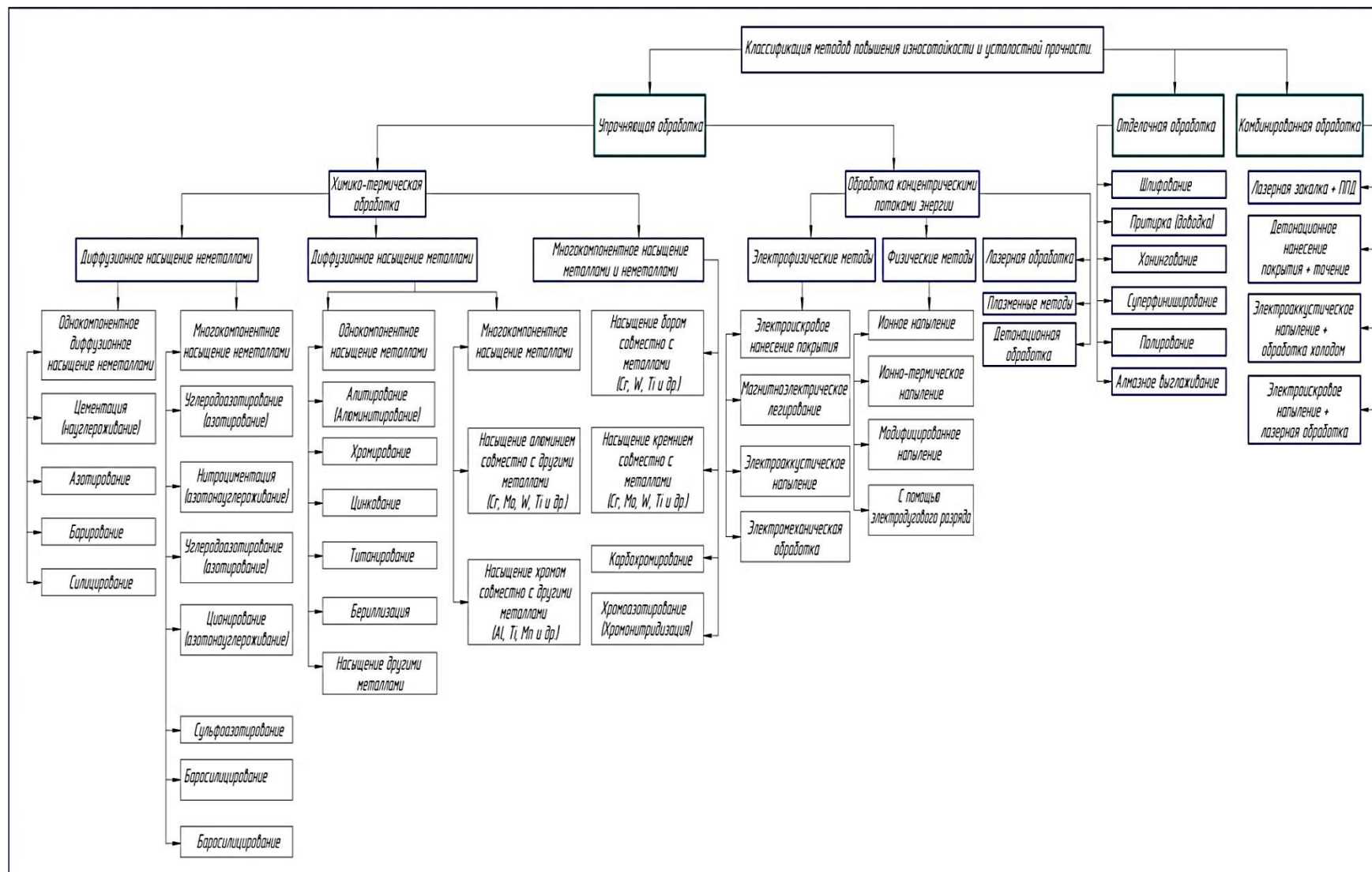


Рисунок 1.9 – Классификация способов обработки для повышения износостойкости

## **1.1. Упрочняющая обработка**

### **1.1.1. Химико-термическая обработка**

При эксплуатации различной техники, содержащих золотниковые и плунжерные пары, возникают их износ и снижение усталостной прочности. Вследствие этого у гидросистем низкий ресурс работы. Одним из решений повышения износостойкости является применение термической и химико-термической обработки [26, 229, 232, 304].

#### **1.1.1.1. Диффузионное насыщение неметаллами**

**Цементация.** По данным работ [3, 182, 227 и др.], как в отечественной, так и в зарубежной практике принята поверхностная твердость цементированного слоя в пределах HRC 59...64. Однако не всегда максимальной твердости соответствует наибольшая износостойкость [72, 84, 87, 94].

О.Р. Котов [132] показал, что износостойкость цементированных роликов увеличивается при снижении твердости с HRC 62 до HRC 50. Аналогичные результаты получены в работах [11, 149]. И. М Любарский [155], исследуя износ и контактную прочность роликов из стали марки 18X2H4BA установил снижение износостойкости при понижении твердости до HRC 54.

Обеспечивая наибольшую твердость поверхности, процесс цементации имеет ряд существенных недостатков, главными из которых являются нестабильность процесса, характеризующаяся большим разбросом численных значений показателей прочности, длительность химико-термической обработки, значительные деформации, требующие применения малопроизводительного процесса шлифования [8, 24, 39, 60, 84, 227, 248]. Структурные изменения, происходящие в процессе термообработки, высокотемпературный многократный нагрев и внутренние напряжения, возникающие в связи с этим, приводят к

значительным деформациям, т. е. к погрешностям, которые зависят от многих факторов как технологических, так и конструктивных. В результате исследований установлено, что погрешность формы деталей, изготовленных из цементуемой стали марки 12Х2Н4А, после термообработки (в результате коробления) составляет от 0,05 до 0,1 мм. [3, 11, 26, 36, 39]. При этом погрешности отдельных параметров увеличиваются по мере уменьшения конструктивной жесткости.

В работах [34, 39, 45, 50, 58, 248] отмечают, что при цементации наиболее износостойкий слой образуется на глубине 0,1 мм от поверхности детали, тогда как припуск на шлифование во многих случаях значительно превышает эту величину, достигая 0,3 мм, что снижает эффективность цементации. Применение шлифования после химико-термической обработки (ХТО) несет в себе недостатки, касающиеся производственной сферы. Увеличение толщины цементованного слоя увеличивает также затраты, связанные с организационно-техническим обслуживанием операции шлифования (затраты на инструмент, его правку, установку, наладку и др.). Таким образом, технологическая цепочка, в ходе которой формируется цементованная поверхность, должна обеспечивать структурное состояние, отвечающее наибольшей износостойкости и контактной выносливости, и исключать необходимость шлифования, или, по крайней мере, сводить к минимальному припуску под него.

Считается [12, 79, 83, 88], что основное повышение прочности деталей при цементации обеспечивают остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое, поскольку предел выносливости самого цементованного слоя очень низок и даже ниже предела выносливости сердцевины металла. По данным работ [59, 129], наибольшие сжимающие напряжения (36–40 кгс/мм) расположены непосредственно на поверхности в слое глубиной до 0,6 мм.

Результаты более точных измерений [33, 128, 238, 322] показывают, что в цементованной стали зона с максимальными значениями напряжений сжатия расположена не на поверхности, а на некоторой глубине (0,3–0,6 мм). По мере

приближения к поверхности наблюдается значительное уменьшение сжимающих остаточных напряжений и даже переход к напряжениям растяжений в зоне, примыкающей непосредственно к поверхности. Между тем непосредственно на поверхности (до 0,1 мм) в цементованных марках стали наблюдаются весьма существенные изменения в строении: резко уменьшается содержание остаточного аустенита, снижается концентрация углерода в твердом растворе после закалки. Это вызывает значительные изменения показателей прочности цементованной стали.

В работах [4, 229] отмечается образование остаточных сжимающих напряжений, однако применение шлифования после цементации изменяет знак напряжений на поверхности.

Таким образом, цементация позволяет повысить износостойкость, и в ряде случаев является единственно возможным способом обеспечения заданного ресурса и надежности работы золотников и плунжеров, однако не решает в полной мере проблему отказов гидравлического оборудования вследствие их износа [3, 8, 30, 91, 194, 334].

**Азотирование.** По сравнению с цементацией азотирование обеспечивает более высокую твердость при меньшей степени деформации в процессе химико-термической обработки [22, 64, 149, 152]. Повышение эксплуатационных свойств поверхностных слоев достигается благодаря изменению химического состава, значительной твердости (до HV 1200) и сжимающих остаточных напряжений (до 110 кгс/мм<sup>2</sup>). При этом азотированный слой характеризуется крайне низкими механическими свойствами (до 0,1 от прочности сердцевины). Вследствие относительно малой величины упрочненного слоя и низкой прочности сердцевины азотированные поверхности очень чувствительны к перегрузкам и неравномерности распределения нагрузки. Кратковременные перегрузки снижают долговечность азотированных деталей в 2–7 раз [248, 270].

Исследования М.А. Балтер [19] показали, что детали из стали марки

18Х2Н4ВА, упрочненные азотированием в условиях высоких удельных давлений и больших скоростей имели низкую износостойкость.

Азотирование поверхности обеспечивает повышение износостойкости при шероховатости поверхности не ниже Ra 1,25 мкм. При большей шероховатости возможно снижение некоторых эксплуатационных показателей [18, 70].

По данным работ [70, 71, 138, 142, 259], шлифование существенно снижает упрочняющий эффект, достигаемый в операциях химико-термической обработки и является причиной многих дефектов, приводящих при эксплуатации к повышенному износу. Применение азотирования позволяет исключить дефекты поверхностного слоя в виде прожогов, трещин, растягивающих напряжений, характерных для цементации. Этот вид химико-термической обработки выполняют после шлифования, и далее детали не подвергаются механической обработке, однако, несмотря на наибольшую величину поверхностной твердости (до HV 1200) и остаточных напряжений (до 110 кгс/мм<sup>2</sup>), азотирование не применяют для деталей, работающих в условиях интенсивного износа. Это связано с недостаточной глубиной упрочненного слоя (до 0,3...0,4 мм) [8, 46].

В работах [63, 64] исследовали износостойкость образцов из стали 13Х18Н10Г3С2М2 после скоростного низкотемпературного азотирования. Отмечено, что наличие небольшого азотированного слоя значительно повышает износостойкость. При дальнейшем увеличении упрочненного слоя износостойкость увеличивается незначительно.

Метод ионного азотирования, разработанный в МГТУ им Н.Э. Баумана, имеет ряд преимуществ и дополнительных технологических возможностей: продолжительность диффузионного насыщения азотом сплавов железа сокращается в 2–3 раза, а общее время технологического цикла обработки в 3–5 раз. Например, в работе [152] указано, что слой толщиной 0,55 мм при температуре 550 °С на стали марки 38Х2МЮА формируется за 14 ч, а при газовом процессе за 30...35 ч.

На рынке оборудования для азотирования представлены различные установки производителей из Англии, Японии, Германии. Время процесса насыщения сокращается до 2 ч, но это оборудование имеет высокую стоимость.

Для ионного азотирования выпускают установки НГВ-6,6/И1, ОКБ-1566, НШВ-9,18/6-И2, ИОН-30 и др.[64, 333].

Однако азотированные золотники и плунжеры имеют низкий ресурс работы. [3, 8, 24, 49].

#### **1.1.1.2. Многокомпонентное насыщение металлами и неметаллами**

**Нитроцементация. Цианирование.** Важное направление в промышленности – это комплексная химико-термическая обработка с использованием совместного насыщения углеродом и азотом. Получаемый поверхностный слой обладает улучшенной износостойкостью по сравнению с цементированным, более высокой твердостью и лучшим сопротивлением коррозии [125, 132]. Процесс механизирован, существуют различные установки, позволяющие сократить время обработки до 2...6 ч [9, 11]. В странах, таких как США, Япония, Германия и Франция, этот метод широко используют на автомобильных заводах [10, 227, 248].

Тем не менее, применение нитроцементации и цианирования возможно только в условиях крупносерийного и массового производства. Эти методы характеризуются повышенной токсичностью и сложностью управления процессом. Кроме того, они требуют высоких температур и не подходят для обработки плунжеров и золотников вследствие значительного искажения размеров [49, 50].

**Никотрирование.** Метод разработан фирмой «Айхелин» (Германия), применяется при более низких температурах и может быть использован для

деталей сложной формы [9, 318, 330]. На поверхности деталей образуется белая зона с глубиной упрочнения 0,05...0,3 мм, которая обладает высокими твердостью и износостойкостью. Метод используют для понижения структурных изменений, особенно для деталей сложной формы.

В работе [31] приведены исследования стали марки 40Х13 на примере вала-шестерни после нитрирования и отмечено повышение износостойкости в 1,7 раза, коррозионной стойкости – в 1,4 раза.

Однако метод не нашел широкого применения для плунжеров, толкателей и другого оборудования из-за возможной пористости упрочненного слоя и высоких требований к технике безопасности (взрывоопасности) [34, 49].

**Карбонитрация.** Коррозионностойкие стали обладают высокой устойчивостью к коррозии, но часто имеют недостаточную твердость и износостойкость. Предпринимаемые попытки улучшить их механические характеристики с помощью азотирования, как указано выше, часто приводили к одновременному снижению коррозионной устойчивости, особенно при протекании процесса при высоких температурах. Однако удалось добиться комплексного улучшения механических и химических свойств деталей из аустенитных коррозионностойких сталей с использованием процесса карбонизации.

Исследования, проведенные И.И. Сидориным, С.А. Герасимовым и др. [63, 64], показали возможность применения рассматриваемого метода для повышения износостойкости и усталостной прочности деталей, а также в сочетании с оксидированием для увеличения их коррозионной устойчивости. Во многих случаях эта технология оказывается более рациональной альтернативой таким процессам, как поверхностная закалка, гальваническое хромирование, цементация и нитроцементация.

В исследованиях, ссылки на которые даны в работах [217, 152, 259, 270], выделены следующие преимущества процесса:



- 1) высокая скорость и равномерность насыщения и нагрева;
- 2) повышение усталостной прочности деталей на 50...80 %;
- 3) существенное увеличение износостойкости деталей (в 2–11 раз по сравнению с другими методами, такими как газовое азотирование, цементация, нитроцементация), а также применимость данной технологии для упрочнения деталей из различных марок сталей и чугуна;
- 4) снижение термических напряжений, обеспечивающее минимальные деформации в пределах допустимых значений, что в свою очередь обеспечивает высокую точность;
- 5) экономичность процесса, сокращающего время насыщения до 0,5–4 ч вместо 10–60 ч при газовом азотировании;
- 6) повышение коррозионной стойкости перлитных сталей в 2 раза;
- 7) снижение коэффициента трения до 5 раз;
- 8) широкий диапазон регулирования скорости охлаждения после насыщения.

Результаты испытаний на износ некарбонизированных и карбонизированных образцов показали, что скорость износа снижается с ростом длительности карбонизации в газовых смесях [22, 32, 43, 50].

Упрочненные слои на поверхности образцов, снижают коррозионную стойкость.

Однако в ряде случаев поверхности деталей покрываются сажистым налетом, удаление которого представляет определенные трудности. Поэтому такие процессы не нашли широкого применения при изготовлении деталей гидравлических систем.

**Сульфитирование. Сульфозазотирование.** Для снижения коэффициента трения в машинах и механизмах, в том числе в машинах сельскохозяйственного назначения, применяют процессы сульфатирования или сульфозазотирования [3, 8, 11, 77].

В работе [176] представлены материалы, полученные в результате исследования обработки стали марки 08X18H10T. Сульфатированием получают слой твердой смазки. Таким способом уменьшают коэффициент трения и значительно увеличивают износостойкость.

Процесс сульфазотирования исследовали авторы работ [10, 47, 132, 183 и др.]. Образцы для экспериментов были изготовлены из стали марки AISI-1045. Они имели упрочненную зону толщиной до 225 мкм, коэффициент трения сульфазотированных образцов составлял 0,5...0,65.

Эти процессы применяют после окончательной механической обработки для поверхностей деталей. Износостойкость повышается не за счет увеличения твердости, а благодаря образованию пленок сульфидных химических соединений, предотвращающих прямой контакт трущихся поверхностей и выполняющих роль смазки. Наибольшей износостойкостью обладают сульфазотированные детали при средних нагрузках в условиях полусухого и полужидкостного трения. Сульфацирование предотвращает также схватывание и наволакивание металла и повышает предел выносливости поверхностей [11, 50].

**Борирование.                      Боросилицирование.                      Бортитанирование.**  
**Борохроммирование. Борофосфатирование. Бороалитирование. Боромеднение.**  
Эти процессы направлены на повышение износостойкости деталей, эксплуатируемых в условиях сильных нагрузок и подверженных абразивному износу. Борирование увеличивает срок службы таких деталей, как пальцы и втулки гусениц тракторов и других гусеничных машин в 5 – 17 раз, втулки буровых и грязевых насосов в 3 – 4 раза, диски труб турбобура – 4 – 5 раз, пальцы черпаковой цепи земснаряда в 6 – 7 раз, детали металлургического оборудования в 3–5 раз [9, 16, 28, 46].

Покрытия отличаются высокой износостойкостью, силицидные поверхности устойчивостью к кислотам. Хромирование придает жаропрочность поверхностному слою. Комбинированные покрытия часто объединяют в себе

характеристики исходных однокомпонентных покрытий и в некоторой степени уменьшают их недостатки [12].

Поверхности металлических деталей из стали марки 40Х, подвергаемых абразивному износу и трению без смазки, укрепляются путем диффузионного насыщения бором, алюминием и азотом [26, 28, 100, 101]. Это усиление обеспечивает повышение прочности, износостойкости и сопротивления сцеплению благодаря образованию нитридов алюминия с содержанием до 1,5 % алюминия и дополнительному легированию азотом твердого раствора бора и алюминия в железе.

Борохромирование уменьшает хрупкость поверхностных слоев и повышает их жаропрочность по сравнению с борированными слоями при примерно одинаковой твердости и износостойкости [102, 103]. Эффективность работы борохромированных слоев на 1,5–1,75 раза выше, чем у борированных. Однако известные методы получения таких покрытий несовершенны и требуют значительных усилий, их недостатки дают возможность перенасыщения поверхности и возникновение растягивающих остаточных напряжений [8, 12, 13, 104, 105].

Детали корпусов механизмов работающие в условиях изнашивания и ударных нагрузок при температурах 500–850 °С из стали марки 45Х, подвергаются борохромированию, что приводит к увеличению концентрации легирующего элемента в поверхностном слое на 15–20 %, увеличению толщины слоя в 1,5 раза и повышению износостойкости в 2,4 раза [61–64]. Исследование износостойкости покрытий в работах [89, 91] показало, что при боромеднении в 2 раза повышается износостойкость покрытий по сравнению с борированием. Это объясняется тем, что в структуре боридных слоев обнаружены отдельные вкрапления меди, которые выполняют роль твердой смазки.

Детали, подвергаемые поверхностному упрочнению, очищают от загрязнений путем химического травления в кислотных или щелочных растворах, пескоструйной или абразивно-жидкостной обработки, промывки в бензине или в

ацетоне, что экологически небезопасно и требует дополнительных затрат [91, 94, 95]. Глубина упрочнения при этом до 0,3 мм, поэтому невозможно применять этот метод для плунжеров и золотников, так как для этих деталей допустимая глубина упрочнения составляет 1,1 мм [61, 63, 67].

**Карбохромирование.** Карбохромированные покрытия обладают высокой износостойкостью, особенно в агрессивных средах [125, 227]. Этот вид обработки предотвращает образование обезуглероженной и разупрочненной зоны под карбидным слоем, который обычно имеет большую толщину по сравнению с хромированием [248]. При этом толщина карбидного слоя железа увеличивается, что обеспечивает высокую твердость—до HRC 65...67 [50, 230]. Однако некоторые исследователи указывают на возможное ухудшение шероховатости поверхности при глубине упрочнения от 0,2 до 0,02 мм [327].

Для ускорения газового насыщения требуется повышение температуры, что делает этот процесс неприменимым для мягких деталей [7]. Поверхностный слой имеет более высокую твердость, чем цементированный, однако при этом низкую ударную вязкость, что может привести к пористости и отслоению упрочненного слоя при значительном повышении температуры процесса, что неприемлемо для золотников и плунжеров [8, 49, 84]. Кроме того, этот процесс требует значительных затрат энергии и занимает много времени [50].

**Силицирование. Вольфрамосилицирование.** Этот метод обеспечивает высокую износостойкость при работе с высокоуглеродистыми сталями и смазкой (глубина упрочнения 0,3...1,0 мм), но является трудоемким (12 ч) и требует высоких температур (1200 °C) [8, 26, 34]. Он отлично подходит для массового производства.

Поверхностный слой характеризуется значительной пористостью, а твердость поверхностных слоев составляет 200–300 HV. После пропитки маслом при температуре 170...200 °C он обладает высокой износостойкостью [44, 66, 69].

Одним из недостатков силицирования стали является сложность получения однородной поверхности без пор. Также сложно добиться высокой концентрации кремния на поверхности при хорошем сцеплении с сердцевиной. При силицировании в ненасыщенной среде на поверхности материала и других сплавов может образовываться феррит. Слишком высокая насыщенность среды может привести к повышенной хрупкости стали, что увеличивает вероятность появления трещин и других дефектов при ударной нагрузке. Это особенно нежелательно для плунжеров и золотников [84, 87, 94, 125].

### **1.1.1.3. Диффузионное насыщение металлами**

**Хромирование.** Эти хромистые покрытия обеспечивают высокую износостойкость при работе в агрессивных средах, при высоких температурах и подвергающихся знакопеременным нагрузкам, однако их применение сопряжено с низкой производительностью, высокой трудоемкостью и необходимостью проведения дополнительной термической обработки [8, 129, 229]. Хромистые покрытия не обладают хорошей смачиваемостью маслами, поэтому рекомендуется их использовать для трущихся поверхностей, которые работают при достаточной смазке. При недостаточной смазке и высоких скоростях скольжения эти покрытия не рекомендуется применять [61]. Хромирование позволяет достичь твердости поверхности 1200...1300 HV [57].

Эффективность деталей после покрытия во многом зависит от состояния поверхностного слоя перед покрытием, поэтому требуется тщательная предварительная подготовка поверхности перед его нанесением [82]. При гальваническом покрытии параметр шероховатости Ra увеличивается в 1,5 – 2,0 раза [26, 30, 142, 182].

Покрытия на основе хрома являются вторыми по популярности упрочняющими покрытиями, тем не менее хром был отнесен к ядовитым веществам начиная с 2007 года [125, 227].

В работах [31, 124, 133, 138] приведены материалы исследований возможностей новых покрытий для защиты от коррозии и износа деталей из термообработанной низколегированной стали. Одним из таких методов является многослойное покрытие из градиентных слоев карбида хрома (CrC). Более мягкие науглероженные верхние слои работают как твердые смазки и улучшают трибологические свойства сопряжения. На предприятии АО «Ремпутьмаш» (Калуга) пытались внедрить хромирование для изготовления деталей ремонтной железнодорожной техники, но этот опыт не прижился по причине высоких требований к охране труда [7].

**Титанирование.** Титановые покрытия имеют высокую прочность и хорошее сцепление с подложкой, высокую износостойкость при глубине упрочнения 0,5 мм, твердость HRC до 68 единиц [333].

Применение покрытия на растровых валах для флексографической печати, работающего в условиях абразивного, адгезионного и коррозионного износа, увеличило износостойкость в 8–10 раз по сравнению с ранее применяемым покрытием из гальванического хрома [12, 81, 125].

Нанесение титанового покрытия на поршневые кольца двигателя внутреннего сгорания увеличило их срок службы в 1,7 раза по сравнению с покрытием гальваническим хромом [133, 140].

При электрофоретическом нанесении карбидохромового покрытия толщина слоя составляет 120...150 мкм, но ее можно довести до 400...500 мкм при многократном нанесении. При этом износостойкость повышается в 7 раз [152, 194].

Если подложка не имеет достаточной прочности для допустимой контактной нагрузки и поддержке покрытия, пластическая деформация подложки

приведет к разрушению такого покрытия. Поэтому перед нанесением твердого покрытия необходимо проводить химико-термическую обработку [204, 227].

Трибологические исследования, проведенные на образцах из стали марки 42ХФА в исходном состоянии, а также на азотированных образцах и образцах с покрытием TiN, показали, что наибольший износ отмечается у необработанных образцов с покрытием. Это свидетельствует о том, что наличие покрытия TiN не обеспечивает достаточной износостойкости.

С другой стороны, наибольшую устойчивость к износу проявили азотированные образцы с покрытием TiN. В полученной структуре отсутствует четкая граница между мягкой матрицей образца и твердым покрытием, что приводит к снижению градиента твердости между этими материалами [10, 248, 259]. Дополнительная (ХТО) подложки увеличивает время процесса и его себестоимость.

Для деталей, подверженных интенсивному износу, например, валков и шнеков камнедробилки, в работах [186, 227, 230] рекомендовано использование комплексного процесса диффузионного насыщения карбидами ванадия и титана. Этот процесс позволяет создать на поверхности стали марок X12M и 40XM глубокие (до 3 мм) диффузионные слои с повышенной твердостью (до 68 HRC) и долговечностью в эксплуатации.

Согласно данным работ [125, 268], с течением времени покрытия могут утратить свои свойства. Например, в работе [289] отмечается снижение микротвердости шнеков и валков до 50 % после хранения более 3 лет.

Учитывая высокие температуры процесса (до 1000 °C), возможно деформирование деталей, потери точности размера, формы и взаимного положения, поэтому необходимо проводить шлифование. Однако это может привести к прижогам и термическим трещинам [70, 138].

**Никелирование.** Это покрытие обладает рядом преимуществ, включая высокую твердость, стабильность свойств и устойчивость к износу и коррозии.

Метод прост в применении и не требует сложного электрооборудования. Возможно получение поверхностей с низким коэффициентом трения (до 0,04) и шероховатостью Ra от 0,1 до 0,5 мкм, что особенно важно для деталей сложной конфигурации. Для достижения оптимальных результатов необходимо предварительно провести термическую обработку, что может быть нежелательно для нежестких деталей [8, 9, 227, 230].

Следует отметить, что при никелировании могут возникать растягивающие остаточные напряжения, которые ведут к снижению пределов выносливости деталей на 5...20 % [4, 33, 248]. Для золотников и плунжеров это недопустимо, т.к. ведет к задирам.

### **1.1.2. Обработка концентрированными потоками энергии**

В целях повышения эксплуатационных свойств поверхностей деталей в настоящее время все шире применяют новые высокоэффективные способы поверхностного упрочнения концентрированными потоками энергии (КПЭ).

Применение методов наплавки и напыления износостойких и прочных металлических слоев на рабочие поверхности деталей машин и технологической оснастки не только способствует упрочнению этих деталей, но и решает ряд технических и экономических задач, направленных на оптимизацию использования ресурсов.

К числу таких задач относится снижение удельной металлоемкости изделий и их компонентов путем повышения прочности и снижения массы. Это достигается за счет использования поверхностно упрочняемых материалов и управления свойствами поверхностных слоев различных деталей, таких как шейки коленчатых валов, компоненты автомобилей, тракторов, сельскохозяйственной техники и подвижного железнодорожного состава.



### 1.1.2.1. Электрофизические методы

**Электроискровая обработка.** Данная технология разработана в Федеральном научном агроинженерном центре ВИМ [241, 242]. Метод применяют для повышения износостойкости и твердости поверхности деталей машин, работающих в условиях повышенных температур, жаростойкости, коррозионной стойкости, создания шероховатости под дальнейшее гальваническое покрытие. Упрочненный слой имеет твердость HV 1000...1400 и зависит от материала электрода [87, 94].



*Рисунок 1.10 – Пример электроискрового упрочнения  
на токарном станке мод. 16K20*

Электроискровое упрочнение осуществляется на станке (рисунок 1.10) или вручную. Этот метод имеет широкое применение в ремонтном производстве [34, 116].

Преимущества метода: сверхзвуковое истечение воздушного потока; малый вес ручного оборудования. Недостатки: неустойчивость процесса; зависимость результатов упрочнения от квалификации и навыков рабочего [241, 246].

**Магнитоэлектрическое легирование.** Этот метод обеспечивает высокую износостойкость, поскольку твердость поверхности достигает HRC 75, что в 4 раза превышает твердость, достигнутую в результате никелирования и хромирования. Кроме того, он обеспечивает быстрое сцепление с основой, исключая коробление и деформации [12, 194].

Развитие метода поверхностного упрочнения стало возможным благодаря точечному воздействию на очень малые площади, отсутствию необходимости защиты окружающей поверхности, надежному контакту нанесенной лигатуры с основной поверхностью обрабатываемой детали. Высокая степень адгезии объясняется частичной диффузией вглубь металла в процессе обработки. Также метод характеризуется низким тепловым фоном, что предотвращает нагрев поверхности и деформацию изделий. Процесс технологически прост и не требует специальной подготовки поверхности. Энергопотребление не превышает 2 кВт, оборудование компактно и легко транспортируется, даже в качестве ручной кладки. КПД высокий, с массовым переносом металла в диапазоне 60...80 %. Ножи-гильотины и пластины штампов легируют магнитоэлектрическим способом, материал легирующего порошка – ферробор [240]. После магнитоэлектрического легирования образуется легированный слой толщиной 0,5 мм, толщина общего упрочненного слоя с диффузией – 1,2 мм, шероховатость поверхности Ra – 10 мкм, производительность – 50...300 см<sup>2</sup>/мин, микротвердость –  $3,4 \cdot 10^4$  МПа [34, 57, 176, 205].

Однако у процесса плохая управляемость, возможна неравномерность получения слоя [7, 11, 23, 194].

**Электроакустическое напыление.** Сочетание энергии ультразвука и энергии электроискрового разряда приводит к формированию диффузионного покрытия, что способствует увеличению прочности деталей. Эти покрытия позволяют увеличить ресурс работы деталей машин в 6...8 раз. Толщина покрытия составляет не более 10...15 мкм, что может не соответствовать

техническим требованиям, предъявляемым к плунжерам и золотникам.

Микроструктура покрытий содержит области с неоднородностями, которые способствуют упрочнению материала существенно больше, чем, например, твёрдый раствор. Для исходного образца из стали марки 40Х размер этих областей составляет около 400 нм, в то время как в напыленном покрытии Р6М5 он значительно уменьшается—до 100...150 нм [139].

Однако, согласно литературным источникам [30, 49, 84], износ поверхностных слоев в парах трения деталей гидравлического оборудования составляет 0,4...0,6 мм, что данный метод не может достаточно обеспечить.

**Электрохимическая обработка.** Метод, разработанный Б.М. Аскинази и его учениками, представляет собой процесс, при котором ток большой силы и малого напряжения проходит между поверхностью детали и инструментом [169–174]. Основная идея этого метода заключается в одновременном тепловом и силовом воздействии на поверхностный слой с последующим быстрым охлаждением за счет отвода тепла внутрь детали. Этот метод подходит для обработки деталей любого класса.

Когда электрохимическую обработку (ЭМО) применяют в качестве чистовой обработки, опорная поверхность увеличивается на 40 % по сравнению со шлифованием при равной высоте микронеровностей [227, 276]. Это приводит к уменьшению контактных давлений в сопряжении, улучшению теплоотвода, повышению ресурса работы сопряжения и уменьшению потерь на трение.

По сравнению с другими видами термомеханической обработки, при ЭМО теплота, выделяемая при прохождении электрического тока, проходит сразу по всей структуре поверхностного слоя, контактирующей с деформирующим инструментом. Скорости нагрева и охлаждения велики, выдержка кратковременна, а удельные давления значительны вследствие малых площадей контакта.

Недостатком ЭМО является то, что установки созданы на базе универсальных станков.

Исследования влияния режимов ЭМО на поверхности различной формы на эксплуатационные свойства деталей рассмотрены в работах [15-18, 250-258 и др.].

**Электроискровое легирование.** В промышленности широко используют метод локального электроискрового нанесения покрытий, который включает в себя черновую, получистовую и чистовую обработку с использованием вибрирующего электрода. Этот метод обеспечивает формирование плотных покрытий, повторяющих рельеф поверхности, на которую они наносятся.

Для осуществления этого процесса применяют установки, такие как ЭЛФА-512 и ЭЛФА-541. С их помощью наносят порошки из различных материалов – титана, кобальта, вольфрама, молибдена и других. Метод обладает гибкостью в изменении структуры и состава покрытия, позволяет получать тонкие слои толщиной до 0,5 мм, а твердость покрытий достигает 1000...2000 МПа. При этом отсутствуют деформации деталей, что дает возможность для локального упрочнения. Однако следует отметить, что этот метод также приводит к высокой шероховатости поверхности и имеет низкую производительность [5, 85, 259].

Электроискровое легирование, применяемое для упрочнения, дополнительно насыщает поверхностный слой азотом и углеродом. Твердость и глубина слоя достигают соответственно HV 650 и 5 мм [87, 96, 260], что приводит к увеличению износостойкости трущихся поверхностей в 2–3 раза. К недостаткам процесса следует отнести очень низкую производительность и высокую шероховатость поверхности [96].

#### **1.1.2.2. Физические методы**

**Ионно-термическое напыление.** Способ имеет свои особенности: возможность замены дорогостоящих материалов на более дешевые; процесс

напыления легко поддается автоматизации и встраивается в поточную линию, не требуя больших капитальных затрат и производственных помещений; высокие температуры в сочетании с большими скоростями позволяют наносить любые металлические и керамические покрытия на любые контурные детали и локально на отдельные участки; скорость нанесения покрытия в 100 раз больше, чем при методах электроосаждения [161].

Согласно исследованиям, представленным в работах [66, 238, 317 - 319], трение стали марки X18H10T при значениях скорости скольжения поверхностей до 50 м/с происходит в режиме схватывания и сопровождается быстрым износом. После нанесения покрытия вакуумно-плазменным методом из TiN износостойкость образцов увеличилась в 10 раз. Исследование износостойкости и фрикционных характеристик образцов с покрытием NiN показали, что характер изнашивания и коэффициент трения зависят от толщины покрытия и ее исходной шероховатости. Для образцов из исследуемой стали характерно равномерное изнашивание и достаточно длинный период приработки (более 60 мин.).

Проведено исследование износостойкости и фрикционных характеристик образцов из стали марки 12X18H10T с различными покрытиями: TiN, Cu-TiN, алмазоподобной пленки при трении со смазочным материалом (масло ВМ-1) [105, 214, 215]. Режимы испытаний: скорость относительного скольжения 1,5 м/с, давление 1,2 МПа. Контртелом служил разрезной образец из закаленной стали марки ШХ15. Интенсивность изнашивания покрытия Cu-TiN близко к алмазоподобной пленке. Кроме того, несколько больший износ полос меди приводит к образованию масляных карманов, удерживающих смазку в зоне трения и повышающих износостойкость покрытия Cu-TiN.

В работе [50] образцы из стали марки 13X14H3B2ФР напыляли согласно ТУ 14-1-1790-91. Исследование микротвердости показало, что напыленная поверхность имеет твердость 4800...6000 МПа, что в 1,5 раза больше микротвердости основы.

По данным работ [35, 131, 141], покрытия обладают высокой плотностью и хорошим сцеплением с основой.

**Ионное напыление.** Метод напыления, позволяющий наносить на поверхность различные материалы, обладает глубиной напыления  $h=2\ldots 3$  мм. В работе [110] приведены материалы испытания на износостойкость образцов с использованием машины трения МИ-1. Эталон износостойкости служил образец из стали марки 45, закаленный до HRC 55 ТВЧ. Износостойкость образцов оценивалась по химическому составу напыляемого материала и зависела от режимов напыления. В условиях полусухого трения с абразивом была выявлена зависимость износостойкости исключительно от химического состава напыляемого материала.

Однако работоспособность деталей после покрытия сильно зависит от состояния поверхностного слоя перед нанесением покрытия. Поэтому необходима дополнительная тщательная подготовка поверхности перед нанесением покрытия, а также требуются специализированные вакуумные установки или установки с инертными газами. При этом у процесса напыления низкий КПД [132]. Даже при очень плотном контакте между покрытием и основой могут возникать участки с ослабленными связями, что может привести к образованию микротрещин. Такие микротрещины могут растрескиваться под воздействием внешних нагрузок, особенно при увеличении толщины покрытия [247].

**Напыление с помощью электродугового разряда.** Метод обеспечивает высокую износостойкость, превышающую в 2,5 раза износостойкость гальванических покрытий. Возможно применение многослойных покрытий, таких как нитрид-нитрид (например, TiN-TaN, TaN-CrN, CrN-MoN и др.), карбид-карбид (например, ZrC-TaC, TaC-MoC, VC-MoC и др.), карбид-нитрид (например, VC-NbN, ZrC-ZrN, ZrC-NbN и др.). Оптимальная толщина слоев покрытия обычно находится в пределах: присоединительное покрытие—1...4 мкм, промежуточное—

1...3 мкм, рабочее – 5...8 мкм [50, 247]. Для золотников и плунжеров рекомендуют толщину слоя до 1,1 мм (согласно техническим требованиям).

Результаты испытания образцов, покрытых карбид– карбидом и карбид– нитридом, приведены в работах [37, 175, 176]. Они показали, что при увеличении удельной нагрузки происходило продавливание покрытий, в особенности из нитрида титана. К особенностям процесса относится отсутствие вредных отходов, но для реализации процесса необходимо иметь дорогостоящее оборудование.

**Плазменное упрочнение.** Метод напыления позволяет получить на поверхности деталей металлические и неорганические покрытия из оксидов, карбидов, нитридов. Это обеспечивает высокую износостойкость, коррозионную стойкость, а также прочность сцепления с основой, достигающую 20...25 МПа. Твердость покрытия может достигать HRC 60, а толщина слоя составлять 1,5 мм. Шероховатость Ra варьирует в пределах от 40 до 500 мкм [50].

Преимущества метода включают в себя высокую производительность, широкий выбор наносимых материалов и возможность создания композиционных покрытий. По данным работ [204, 227, 247], износостойкость напыленных деталей штамповочного оборудования увеличивается в 5–10 раз.

Однако у метода есть и существенные недостатки: потенциальная взрывоопасность и токсичность процесса, высокая температура нагрева– до 1700°C [165, 235]. Требуется дополнительная подготовка поверхности, такая как электрохимическая или механическая обработка, электроэрозионная обработка, дробеструйная или пескоструйная обработка. Кроме того, для реализации метода необходимо специальное дорогостоящее оборудование, а также металлические порошки, и может возникнуть остаточная пористость [166, 248, 261]. Такие методы нельзя применять для изготовления золотников и плунжеров.

**Лазерное упрочнение и напыление.** Стендовые испытания гильз цилиндров тракторных двигателей СМД-18, подверженных упрочнению CO<sub>2</sub>–

лазером мощностью 500...800 Вт, показали увеличение износостойкости гильз цилиндров в 1,8–2 раза без повышения износа поршневых колец. Глубина закаленного слоя этих гильз составляет 0,8...1,0 мм, твердость–56...60 HRC [11, 32, 44, 78].

Закалка углеродистых сталей по сравнению с обычной увеличивает сопротивление усталости на 70...80 %, однако ударная вязкость при этом снижается, особенно у высокоуглеродистых сталей. На поверхности наблюдается рост микротвердости и предела выносливости [101, 110, 131].

Преимущества этих методов: методы производительные, управляемые; возможно нанесение покрытия (упрочнения) на строго определенном участке поверхности, обеспечение высокой твердости, износостойкости, теплостойкости и усталостной прочности; получение физико-механических и химических свойств поверхности путем их легирования различными элементами; возможность применения для тонкостенных деталей; возможность применения в качестве финишных операций; создание «пятнистого поверхностного упрочнения [11, 148, 215]; глубина упрочнения 0,5...2,5 мм.

Кроме того, в работе [90] выявлено снижение размеров зерна аустенита и при анализе напряженного состояния по методу  $\sin^2\psi$  в поверхности образца из стали марки 40X вдоль направления перемещения лазерного пучка формируются остаточные сжимающие напряжения (200...300 МПа), а напряжения поперек дорожки в 2,5–3 раза меньше [261, 267];.

Лазерное упрочнение стало важной технологией для повышения износостойкости и прочности деталей, работающих в условиях циклических нагрузок. Например, лазерное легирование бором способно значительно увеличить микротвердость и износостойкость металла [293]. Эксперименты на износостойкость образцов стали также подтверждают превосходство лазерной закалки перед традиционной термообработкой в печи [303].



Применение поверхностной лазерной заправки в производстве рабочих валков для ленточных прокатных станов существенно повысило эксплуатационные характеристики таких валков [175].

Однако у данной технологии есть недостатки, включая высокую стоимость оборудования, эксплуатационные расходы (например, на газ и зеркала) и трудоемкость предварительной подготовки. Также наблюдаются снижение точности при лазерном напылении и увеличение шероховатости поверхности [78, 330]. Неравномерность активного слоя также может негативно сказываться на усталостной прочности деталей [50, 327].

**Детонационные методы.** Характеристики износостойкости детонационных покрытий значительно превосходят плазменные и газоплазменные [50, 227, 223], позволяют получить поверхности с высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью, жаростойкостью и сопротивлением эрозии. В процессе обработки детали нагреваются незначительно (до 200...250 °С). Целесообразно применять этот метод при работе деталей в условиях высоких температур (до 900 °С) и ударных нагрузок. Глубина упрочнения 0,25...0,3 мм, HRC до 60 единиц, прочность сцепления с основой 200...300 МПа, пористость 3...10 %, параметр шероховатости Ra 2,5...7 мкм. Эффект усиливается тем, что процесс не изменяет конфигурацию детали и не оказывает воздействие на ее микроструктуру.

В работе [211] представлены результаты исследований нанесения покрытия из порошка BK15 на образцы из материала X12M и отмечается увеличение твердости до HRC 60, износостойкости – в 1,8 раз, способности воспринимать ударные нагрузки.

При использовании детонационных покрытий для упрочнения рычагов муфты сцепления автомобилей долговечность повысилась до 300 циклов [194].

По данным работ [50, 259, 261], износостойкость зависит от содержания кобальта в покрытии. При получении покрытия необходимо строго соблюдать соотношение ацетилена и кислорода. Даже при незначительном избытке

кислорода наблюдается резкое снижение твердости и износостойкости покрытия вследствие процессов окисления.

Также требуются трудоемкая подготовка поверхности (применение шлифования, пескоструйной обработки, ультразвуковой очистки), обязательная обработка после нанесения покрытия (шлифование и термическая обработка), применение аммиака. Работа сопровождается сильным шумом [272]. Существенными недостатками метода является высокая стоимость покрытия, низкая производительность, необходимость в специальном помещении и плохая управляемость процессом [269, 278]. Кроме того, упрочненный слой не соответствует техническим требованиям, предъявляемым к золотникам и плунжерам.

### **1.1.3. Поверхностная термическая обработка**

**Объемная закалка с нагревом газовым пламенем.** Закалка и последующий отпуск широко используются для изменения свойств стали в различных промышленных областях. Однако объемная закалка, особенно после лезвийной обработки, может вызывать значительные деформации, что обуславливает необходимость больших припусков на механическую обработку. Газопламенная закалка предоставляет возможность получения упрочненного слоя толщиной от 2 до 4,5 мм, и твердость этого слоя зависит от содержания углерода в стали. Преимущества газопламенной закалки включают в себя её применимость для изготовления крупногабаритных изделий, эффективность в мелкосерийном производстве и возможность применения при производстве деталей, к которым не предъявляются высокие требования по качеству [45, 50, 268].

Однако следует отметить, что у этого процесса есть недостатки, такие как нестабильное качество изделий (в части твердости и глубины слоя) и сравнительная менее высокая эффективность по сравнению с другими методами, такими как закалка ТВЧ и лазерная закалка [45, 247, 248].

**Закалка токами высокой частоты.** Индукционная закалка с нагревом ТВЧ является современным методом поверхностного упрочнения с рядом преимуществ перед традиционной закалкой. Закалка ТВЧ включает в себя следующие преимущества [7, 11, 156]:

- экономически большую выгоду, так как не требуется нагрева всей детали в печи, что снижает расход энергии;
- значительно меньший брак, связанный с короблением и образованием закалочных трещин;
- отсутствие формирования окалины при невыгорании углерода, что способствует сохранению химического состава материала;
- более высокие механические свойства по сравнению с традиционной закалкой;
- легкое регулирование толщины закаленного слоя, что дает большую гибкость в производстве;
- возможность в некоторых случаях замены легированных марок стали более дешевыми углеродистыми марками;
- высокую производительность, легкую интегрируемость установок в поточные линии механических цехов.

Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое после закалки ТВЧ играет важную роль в обеспечении высокой усталостной прочности деталей. Но при более сложной конфигурации деталей и влиянии различных факторов, таких как радиус кривизны галтели зуба, марка стали и глубина слоя, может происходить изменение усталостной прочности [50].

Повышенное содержание углерода может создать неблагоприятное распределение остаточных напряжений и повысить чувствительность к образованию трещин. Распределение остаточных напряжений по толщине поверхности зависит от толщины слоя. Например, толщина слоя в 2 мм может вызвать появление в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений.

Экспериментально установлено, что поверхностная закалка с выходом закаленного слоя у галтелей может снизить усталостную прочность на 50 % по сравнению с объемной закалкой поверхностей. Наличие растягивающих напряжений в галтелях от обрыва закаленного ТВЧ слоя стало причиной разрушения деталей тепловоза ТЭ-2.

Эти результаты подчеркивают важность учета различных параметров и условий при процессе закалки ТВЧ, особенно при работе с более сложными формами деталей и различными стальными составами. Недостатком закалки ТВЧ является необходимость в специализированном оборудовании (генераторах ТВЧ) и в приспособлениях (индукторах). Последние являются индивидуальными для каждого вида закаляемой детали, поэтому внедрение ТВЧ перспективно и особенно экономично на предприятиях серийного и массового производства [175, 185]. Закалка ТВЧ – один из основных способов упрочнения поверхностей золотников и плунжеров при изготовлении дорожной и строительной техники [8, 30]. Однако преимущества и достоинства метода не исключают отказов по вине низкого ресурса этих деталей [3, 194].

#### **1.1.4. Поверхностная пластическая деформация**

Методами упрочнения, и финишной обработки является поверхностное пластическое деформирование (ППД). При этом процессе структурные компоненты разрушаются на более мелкие блоки, что приводит к уменьшению размеров зерен [13, 25, 65, 230 и др.]. В результате наклепа затрудняется образование и распространение усталостных трещин, а также образуются остаточные сжимающие напряжения, повышающие износостойкость в 1,5 раза. Это особенно важно для деталей, работающих в условиях трения и подвергающихся циклическим нагрузкам [11, 46, 67].

В некоторых исследованиях [163, 165, 177] было изучено воздействие поверхностного пластического деформирования на показатели эксплуатации.

Показано, что у бандажей и роликов шаровых мельниц долговечность увеличивается в 2,4–8,5 раза.

При обработке сталей с мартенситной структурой с использованием шаров диаметром 4...10 мм и подачей 0,06...0,12 мм/об. происходит снижение шероховатости и формирование деформированного слоя глубиной  $h=0,3...0,8$  мм. Это приводит к повышению поверхностной твердости на 8...15 %, а остаточные сжимающие напряжения достигают 400...750 Н/мм<sup>2</sup> [5, 11, 184].

При упрочнении ударным накатыванием шарами [62, 202, 216, 277] дорожек качения подшипников лап буровых долот из цементованной стали марки 14Х2Н3МА с мартенситной структурой (HRC 57...60) наблюдается прирост поверхностной твердости на 100..120 HV при глубине упрочненного слоя 0,7...1,0мм, а максимальные значения остаточных напряжений составляют 700...900 Н/мм<sup>2</sup>.

Основным фактором, влияющим на структурное состояние поверхностного слоя при ППД, является пластическая деформация, которая происходит за счет сдвигов по плоскостям отдельных частей кристаллов и дробления крупных кристаллитов. В результате структура поверхностного слоя становится более мелкозернистой и приобретает ориентированную текстуру [67, 77, 98].

Несколько исследователей [115, 117, 122 и др.] отмечают, что качество поверхности зависит от свойств, полученных на предыдущих этапах обработки. Исследования структурных изменений в закаленной стали марки ШХ15 при упрочнении показывают, что помимо разрушения блоков происходит снижение количества остаточного аустенита. Это связано с увеличением микронапряжений в зернах аустенита, что приводит к превращению неустойчивой фазы аустенита в мартенсит [138, 201, 230]. Интенсивная пластическая деформация поверхностных слоев вызывает аустенитно-мартенситное превращение, что приводит к уменьшению количества остаточного аустенита в структуре. Например, при обкатывании образцов из стали марки 14Х2Н3М количество остаточного аустенита уменьшилось с 40 до 6 % [241, 262]. При изучении микроструктуры

поверхностного слоя обкатанных деталей из стали марки 14Х2НЗМА было обнаружено изменение природы мартенсита, включая его измельчение и разориентацию пластин.

В работах [5, 138, 194] приведены результаты исследования влияния поверхностного пластического деформирования на последующее азотирование или карбонизацию стальных образцов. Образцы были изготовлены из двух марок аустенитной стали: AISI-304 и AISI-316. После изготовления они были подвергнуты термической обработке и холодному прокату в валках до усадки 31 и 62 %, поверхность всех образцов полировали. Измерения распределения азота по глубине азотированных образцов показали, что наибольшее количество поглощенного азота именно в деформированном материале. Глубина слоя в деформированном материале достигает 3...4 мкм, что превышает глубину слоя в недеформированном образце, составляющую 1...2 мкм.

В работе [50] представлены результаты исследования, проведенного на образцах коррозионностойкой стали марки 08Х18Н10. Образцы, упрочненные дробеструйной обработкой, имели поверхностную твердость в 2 раза большую, чем твердость исходного материала и равную 400...450 HV на глубине 100 мкм. В то же время величина твердости неупрочненных образцов почти такая же, как у исходного материала на той же глубине.

Пластическое деформирование поверхностного слоя влечет за собой изменения в его фазовом составе. После шлифования закаленных сталей содержание остаточного аустенита может достигать 30...40 %. Наличие остаточного аустенита в поверхностном слое после шлифования нежелательно, так как оно негативно влияет на контактную выносливость, усталостную прочность и износостойкость. Рентгеноструктурные исследования показывают, что в процессе алмазного выглаживания происходит интенсивный распад остаточного аустенита, причем с увеличением силы выглаживания количество распавшегося аустенита также увеличивается. Например, при исходных 30 %

содержания остаточного аустенита при выглаживании с силой 32 кгс вызывает его практически полный распад.

На сегодняшний день опубликованы работы, в которых отмечается, что даже при небольших степенях пластической деформации после закалки структура и свойства сталей существенно изменяются. Содержание углерода, а также характер и количество легирующих элементов в стали играют ключевую роль в эффекте деформационного упрочнения мартенсита. Например, в работах [55, 67 и др.] приведены данные о том, что поверхностное упрочнение создает различия в структурном состоянии в зависимости от режимов обработки. Поверхностный слой после ППД и холодной термической обработки (ХТО) имеет более равномерную структуру скрытоигольчатого мартенсита, чем после ХТО без ППД. Отмечено также меньшее содержание остаточного аустенита в поверхностных слоях образцов, обработанных по схеме ППД+ХТО, по сравнению с образцами, подвергнутыми только ХТО. Результаты исследования износостойкости подтвердили наибольший эффект упрочнения и максимальное сопротивление износу упрочненных образцов.

При упрочнении деталей методом ППД могут возникать различные дефекты на поверхности, такие как прижоги, схватывание материала инструмента с поверхностью детали, поверхностный отпуск и др. Предварительное нанесение твердой смазки может способствовать повышению износостойкости и контактной выносливости путем формирования модифицированного слоя, который уменьшает коэффициент трения и создает благоприятные условия для пластической деформации в поверхностном слое.

Таким образом, сочетание методов ХТО и ППД способствует улучшению эксплуатационных показателей различных деталей, а сочетание ППД с другими упрочняющими методами может дать положительный эффект и создать резерв для повышения эксплуатационных показателей золотников и плунжеров.

## 1.2. Отделочная обработка

**Шлифование.** По данным работ [1, 70, 72, 89, 154 и др.], шлифование является самым распространенным методом окончательной обработки, в частности, закаленных поверхностей.

Преимущества шлифования:

- высокая производительность;
- Ra 0,32 мкм;
- обеспечивает точность формы, размера, взаимного положения поверхностей.

Из анализа работ [154, 195, 196] следует, что при шлифовании с достаточной надежностью можно контролировать высотные и шаговые параметры шероховатости поверхности, относительные опорные длины профиля, глубину и степень упрочнения, а также высоту волнистости поверхности. Однако есть риск появления шлифовочных трещин, сопровождающихся прижогами. Чувствительность сталей к прижогам увеличивается с повышением твердости ( $HRC \geq 55$ ) и наличием легирующих добавок [198, 227].

Согласно данным работ [229, 232], структура шлифовочных прижогов может иметь различные формы, в частности:

1. Отпущенный слой металла, постепенно переходящий в исходную структуру.
2. Слой металла, принявший вторичную закалку, расположенный на мягкой основе отпущенного слоя и постепенно переходящий в нормальную структуру.
3. Отпущенный слой на слое вторичной закалки, лежащем на размягченном слое, переходящем в структуру исходной стали.

Для зоны вторичной закалки характерно увеличение твердости и содержания остаточного аустенита по сравнению с исходной структурой. Отпущенные слои характеризуются структурами троостита, тростомартенсита и



уменьшением твердости. Глубокие слои вторичного отпуска приводят к снижению твердости с HRC 61...64 до HRC 44–45.

Глубина структурно-измененного слоя, согласно данным авторов [1, 50, 62, 71], может варьировать в следующих вариантах:

- около 0,5 мкм для слоя вторичной закалки;
- примерно 1–2 мкм для закаленного слоя;
- до 5 мкм для отпущенного слоя.

Различия в оценках глубины прижога объясняются различными условиями шлифования и выбором метода определения глубины структурно-измененного слоя.

В исследованиях, представленных в работах [98, 129], приведены сравнительные данные по коэффициенту трения/скольжения после различных методов окончательной обработки. Для стали марок 45 и 40Х коэффициент трения после шлифования оказался в 2 раза выше, чем после ППД шариком, и в 2,7 раза выше, чем после виброобкатывания алмазным инструментом.

Из материалов исследований, представленных в работах [4, 87, 90], следует, что в поверхностных слоях деталей машин после шлифования возникают растягивающие остаточные напряжения, иногда достигающие 60...80 Н/мм<sup>2</sup>. Эти напряжения расположены на небольшой глубине от поверхности, но опыт эксплуатации свидетельствует о том, что именно эти напряжения оказывают влияние на прочность и износостойкость. Для их снижения применяют специальную термическую обработку, но ее использование ограничено потерей точности.

Согласно дополнительным исследованиям, упомянутым в работах [8, 30], при обработке деталей гидравлического оборудования методом шлифования возникают прижоги, трещины и скрытые дефекты, которые снижают ресурс работы отдельных деталей и оборудования в целом.

**Притирка (доводка).** При обработке поверхностей доводкой получают размеры с точностью до 0,01 мкм и зеркальную поверхность. После этой процедуры возможно увеличение износостойкости до 40 %, однако эти операции трудоемкие и малопроизводительные и на зеркальных поверхностях плохо удерживается смазка [19, 50, 42 и др.]. Для прецизионных пар трения доводка – обязательная операция, которая обеспечивает необходимый зазор.

**Хонингование. Суперфиниширование.** В работах [89, 90, 144] представлены материалы исследований микронеровностей, образующихся при хонинговании. Увеличение окружной скорости абразивной головки в некоторой степени улучшает шероховатость обрабатываемой поверхности, в то время как увеличение скорости возвратно-поступательного движения и удельного давления, скорее, ухудшают ее качество. Для достижения необходимой шероховатости поверхности в состав смазочно-охлаждающей жидкости часто добавляют различные активизирующие добавки. После обработки шероховатость поверхности может достигать значения  $R_a$  0,02 мкм, что обеспечивает хорошую смазочную способность и высокую износостойкость, хотя процессы хонингования часто оказываются длительными, низкопроизводительными и не всегда способны устранить погрешности размеров, формы и взаимного расположения, возникающие после термических операций.

**Полирование.** При использовании электролитно-плазменного метода полировки поверхностей достигаемая шероховатость обычно составляет  $R_a$  0,05...0,12 мкм. Этот метод считается экологически чистым и соответствует санитарным нормам. Для очистки отработанного электролита не требуются специальные очистные сооружения, однако низкая производительность и сложность автоматизации ограничивают его применимость [14, 19, 26, 34].

Одним из наиболее эффективных методов снижения шероховатости поверхности, уменьшения коэффициента трения и предотвращения прижогов

является электрохимическое полирование. В процессе обработки этим методом происходит анодное растворение металла в электролите. Часто при шлифовании на поверхности деталей образуются прижоги и микротрещины, вызывающие местные напряжения и снижающие долговечность. Эти дефекты могут быть устранены электрохимическим полированием, которое удаляет поверхностный дефектный слой.

Преимущества электрохимического полирования заключаются в его высокой производительности, не зависящей от физико-механических свойств материала и формы изделия, в сохранении статических характеристик металла, в частности предела текучести, относительного удлинения и относительного сужения. Поверхность, обработанная электрохимическим путем, отличается отсутствием следов деформации, прижогов и структурных изменений. Сопряжение электрополированных поверхностей приводит к увеличению фактической опорной поверхности, что положительно влияет на работу деталей в условиях трения. Этот процесс способствует стабилизации коэффициента трения, уменьшает время приработки трущихся поверхностей, увеличивает стойкость к коррозии и продлевает срок службы деталей.

**Финишная антифрикционная безабразивная обработка.** Способ финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО), разработанный в МГТУ им Н. Э. Баумана и предложенный Д. Н. Гаркуновым и В. Н. Лозовским основан на покрытии поверхности трения деталей тонким слоем латуни, бронзы или меди с использованием явления переноса металла при трении. Этот метод рекомендуется для стальных и чугунных деталей узлов трения, таких как шарнирно-болтовые соединения самолетов, детали топливной аппаратуры турбореактивных двигателей, подшипники качения и др. [60-62]

Преимущества ФАБО – это его простота, отсутствие необходимости в сложном оборудовании и высокие антифрикционные свойства, которые придаются с его помощью поверхностям стали или чугуна. Этот метод также

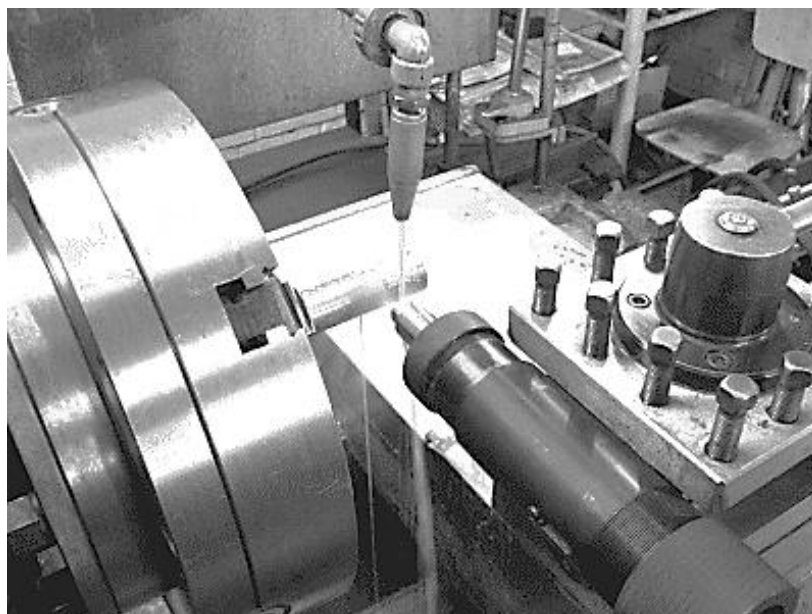
позволяет снизить время приработки деталей, исключить задиры поверхностей трения, увеличить несущую способность сопряжений и продлить период работы узла трения.

У ФАБО есть и недостатки—малая толщина упрочненного слоя, что создает определенные проблемы при интенсивных износах деталей, и негативное влияние на длительную эксплуатацию. Тем не менее, этот метод может значительно снизить коэффициент трения поверхности, что особенно важно для цилиндров двигателей внутреннего сгорания, где он может превратить стальной или чугунный цилиндр в бронзовый, уменьшив коэффициент трения до 1,5 раза.

**Безабразивная ультразвуковая отделочная обработка.** Комплект ультразвукового оборудования ИЛ-4, разработанный и изготовленный на основе работ И. И. Муханова и ООО «Ультразвуковая техника–ИНЛАБ», предназначен для проведения ультразвуковой импульсной упрочняюще-чистовой обработки [177, 178]. После безабразивной ультразвуковой отделочной обработки (БУОО) износостойкость деталей из различных марок стали и чугуна увеличивается в 2 раза по сравнению со шлифованными поверхностями и на 80 % по сравнению с деталями, упрочненными обкатыванием шаром (рисунок 1.11). Долговечность стальных деталей при циклическом нагружении после ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработки возрастает на 90...100 % по сравнению с деталями, обработанными обкатыванием шаром.

Преимущества метода:

- возрастание твердости поверхностного слоя в 3 раза;
- повышение износостойкости, усталостной прочности до 2,5 раза;
- уменьшение опорной поверхности в 2 раза.



*Рисунок 1.11 – Применение БУОО внешней поверхности тел вращения на токарном станке*

Недостатки метода: сложность применяемой оснастки, сложность управления процессом [50, 177, 178].

**Статико-импульсная обработка.** Статико-импульсная обработка (СИО) представляет собой технологию с широким диапазоном возможностей. Эта методика позволяет достигать очень низких значений параметров шероховатости поверхности, а также обеспечивает значительную степень и глубину упрочнения обработанных поверхностей. Применение СИО рекомендуется для упрочнения различных деталей, таких как сердечники крестовины стрелочных переводов, галтели крупных валов, валки прокатных станов, ножи и зубья исполнительных органов строительно-дорожных машин, крупная резьба, шлицы, зубчатые колеса, а также для снятия внутренних напряжений в сварных конструкциях и литых заготовках [202, 207].

Преимущества СИО:

- увеличение твердости поверхностного слоя в 5 раз;
- глубина упрочнения до 10 мм;
- возможность упрочнения разнообразных форм поверхностей деталей машин.

Однако следует отметить, что СИО может иметь некоторые недостатки, такие как сложность оборудования, оснастки и инструмента. Тем не менее применение этой технологии предполагает значительные преимущества по сравнению с другими технологиями, особенно для тяжело нагруженных деталей, работающих в условиях усталостного износа.

**Алмазное выглаживание.** Влияние предшествующих операций на качество поверхности при механических обработках действительно огромно, особенно в контексте финишных операций, которые формируют конечное качество поверхности [13, 19, 24, 42, 50, 62, 87, 184 и др.] (рисунок 1.12). Метод финишной обработки – алмазное выглаживание – применяют для поверхностей трения, изготовленных из закаленных сталей и чугунов, а также для деталей, покрытых электролитическим хромом и никелем.

Алмазное выглаживание повышает твердость на 30...40 %, обеспечивает низкую шероховатость поверхности ( $Ra \leq 0,16$  мкм) предел выносливости на 17–26 %. Детали, обработанные этим методом, обладают более высоким сопротивлением усталости по сравнению с деталями, обработанными суперфинишированием – в 3,6 раза.

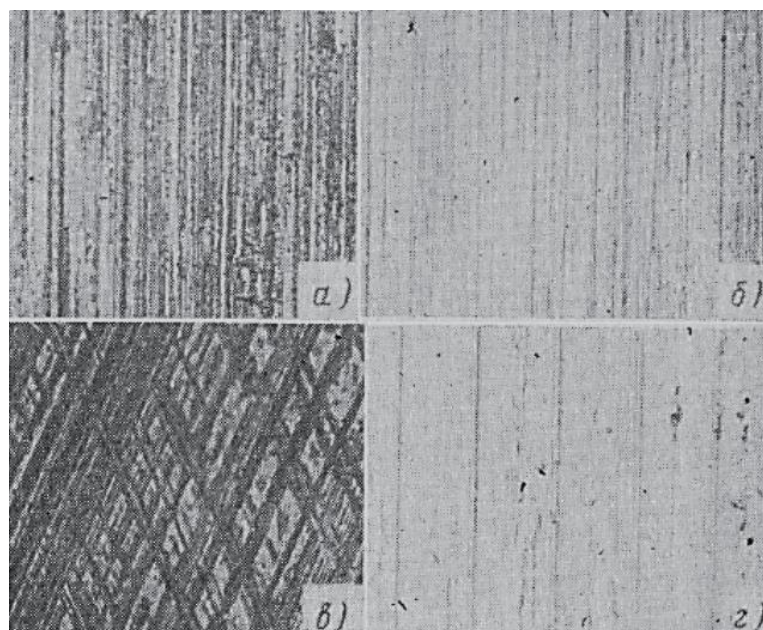
При выглаживании закаленных сталей происходит интенсивный распад остаточного аустенита с переходом его в мартенсит. Также наблюдается формирование остаточных напряжений сжатия, достигающих значений 500...750 МПа. Пластические деформации сдвига способствуют образованию мелкокристаллической структуры с ориентированием зерен вдоль направления деформации, а толщина упрочненного слоя может достигать 0,01...0,3 мм.

Трудоемкость алмазного выглаживания деталей из закаленных сталей меньше трудоемкости абразивных методов обработки. После такой обработки поверхность остается чистой, не содержит продуктов износа абразивных зерен [24, 62, 207, 227, 262].

Если контактная температура не превышает 600 С, стойкость выглаживателя достаточно велика. Например, при выглаживании закаленной стали марки ШХ15 стойкость сферического выглаживателя составляет 100...150 км [13, 184, 248, 262]. Алмазное выглаживание проводится на универсальных и специальных станках, а в качестве смазочно-охлаждающей жидкости используется масло индустриальное, например И-20А. Во время процесса стружка с детали не удаляется, а происходит сглаживание микронеровностей, оставшихся от предыдущей механической обработки. Металл с микровыступов оттесняется во впадины, имеющиеся на поверхности детали, при этом размер детали немного изменяется вследствие пластической деформации поверхностных слоев.

Исследования показали, что алмазное выглаживание приводит к повышению износостойкости стальных деталей до 1,5 раза. Инструмент обладает низким коэффициентом трения по металлу и высокой теплопроводностью. Этот метод также уменьшает волнистость поверхности, однако не оказывает влияния на изменение отклонений формы деталей.

Исследования структурных превращений в стали марки ШХ15 показывают, что в процессе алмазного выглаживания происходит распад остаточного аустенита, который превращается в стабильную мартенситную фазу. Рентгеноструктурные исследования фазового состава поверхностного слоя подтверждают интенсивный распад остаточного аустенита в процессе алмазного выглаживания, и с увеличением силы выглаживания количество распавшегося аустенита также увеличивается.



*Рисунок 1.12 – Виды поверхности после различных способов обработки:  
а – шлифование; б – полирование; в – суперфиниширование; г – алмазное  
выглаживание [266]*

Этот метод часто используют в целях окончательной обработки различных покрытий для уменьшения пористости [50, 87, 201, 227, 262 и др.].

Преимущества алмазного выглаживания:

- универсальность (применение на любом оборудовании);
- возможность обрабатывать детали после ХТО и ТО с твердостью HRC 64;
- снижение количества остаточного аустенита;
- отсутствие прижогов, рисков, микротрещин;
- повышение износостойкости до 40 %, сопротивление усталости 30...70 %, контактная прочность—до 40 %;
- возможность разработки большого количества приспособлений и устройств для обработки различных поверхностей.

Кроме того, алмазное выглаживание оказывает положительное влияние на контактную жесткость, герметичность соединения, коррозионную стойкость [50, 184, 262, 271].



При изготовлении выглаживателей важна правильная ориентация алмаза в сочетании с формой заточки [262]. Установлено, что износ алмаза, имеющего форму ромбодекаэдра, на 25...30 % меньше формы октаэдра. Алмаз имеет низкий коэффициент трения по металлам [13, 19, 262].

Известно, что существенным фактором, повышающим износостойкость, является наличие масляной пленки на поверхности трения. Вибровыглаживание как вариант алмазного выглаживания обеспечивает распределение и удержание масляной пленки и повышает износостойкость более чем в 2 раза [248, 271]. Поверхность имеет плавные очертания с Ra 0,02...0,16 мкм, микротвердость выше на 20 %, чем после выглаживания, и остаточные напряжения сжатия в 1,3...1,7 раза больше на тех же режимах. Однако есть недостаток – трудность определения режимов экспериментальным методом.

Из сопоставления стоимости основных (традиционных) методов чистовой обработки следует, что стоимость алмазного выглаживания примерно в 4 раза ниже стоимости чистовой обработки шлифованием [56, 163, 167, 204, 207, 208].

Недостатки: низкая производительность, возможен перенаклеп при неправильно подобранных режимах [19, 42, 87, 262].

Метод применяют в различных отраслях машиностроения и приборостроения вследствие высокой технико-экономической эффективности, высокой стойкости синтетических и натуральных алмазов ( $T = 30...40$  ч), исключения из технологических процессов операций шлифования и полирования, а также возможности автоматизации процесса.

### **1.3. Методы комбинированной обработки**

Комбинированное упрочнение как метод обработки поверхности предполагает последовательное применение различных технологий в целях получения необходимых механических свойств в определенных слоях материала. Этот метод обладает рядом преимуществ, таких как повышение поверхностной

твердости, увеличение износостойкости, а также формирование остаточных напряжений, способствующих улучшению эксплуатационных характеристик деталей.

В контексте закаленных сталей с HRC 58...62, комбинированное упрочнение может привести к увеличению поверхностной твердости на 3...5 % при сохранении общей глубины упрочнения. Одновременно в тонком поверхностном слое остаточные сжимающие напряжения могут возрастать до 800...1000 Н/мм<sup>2</sup>. Эти изменения могут значительно улучшить прочностные характеристики и усталостную стойкость материала. Как показал анализ работ В.П. Подураева, М.Л. Хейфеца, О.А. Горленко, А.Г. Суслова, А.И. Болдырева, Г.А. Сухочева, О.Н. Кириллова, А.В. Киричека, В.Б. Тарельчика, В.М. Макарова, Б.П. Саушкина, А.М. Кадырметова, В.П. Смоленцева, А.Н. Михайлова и др., наибольший эффект в повышении эксплуатационных показателей можно достичь методом комбинированной обработки.

Исследования, проведенные различными авторами, подтверждают эффективность комбинированного упрочнения, и этот метод может быть рекомендован для применения в случаях, когда требуется добиться определенных свойств в различных слоях поверхности деталей машин.

### **Совмещение процессов азотирования и карбонизации.**

Комбинированные процессы азотирования и карбонизации, предложенные в указанных работах [7, 124, 125], представляют собой последовательное воздействие газовых смесей в одном реакторе в целях модификации свойств поверхности материала. По данным исследований [124] после комбинированной обработки наблюдается увеличение толщины слоя по сравнению с обработкой только азотированием. Толщина слоя достигает максимума, превышая толщину нитридного слоя, полученного без совмещения процессов.

Кроме того, комбинированная обработка приводит к увеличению твердости поверхности по сравнению с применением только азотирования. Твердость растет

с ростом концентрации ацетилена до 20 %, после чего наблюдается резкое снижение твердости при дальнейшем увеличении концентрации ацетилена до 70 % [213, 214].

Метод создает два слоя под поверхностью образцов: азотный слой с богатым азотом внешним слоем и углеродный слой с обогащением углеродом внутренним слоем. Лучшие результаты достигаются в двухстадийных процессах, включающих в себя карбонизацию и последующее азотирование [7, 125, 213].

**Комбинированная электромеханическая обработка с динамическим силовым воздействием.** Метод разработан в Омском бронетанковом инженерном институте. Применение электромеханической обработки с динамическим силовым воздействием (ЭМО с ДСВ) и импульсными ударными нагрузками (ЭМИО) [23, 39, 55, 194 и др.] позволяет получить наибольшую интенсивность температурно-силового воздействия на материал в процессе обработки. При ЭМО одновременно с пропусканием электрического тока через место контакта рабочего инструмента с обрабатываемой поверхностью создаются ударные силовые импульсы, синхронные с импульсами электрического тока, при этом длительность и частота этих импульсов равны таковым электрических импульсов. Изменение традиционной технологии электромеханического обработки со статическим воздействием контактной нагрузки значительно ускоряет процессы деформации и теплообразования, а также создает условия для увеличения динамической энергии, израсходованной на пластическое деформирование поверхности [23, 81].

Преимущества метода:

- HRC до 65;
- повышение теплостойкости, износостойкости, коррозионной стойкости;
- повышение усталостной прочности на 30 % [23, 50, 85].

В работах [129, 168] приведены результаты исследований влияния дополнительного ударного воздействия в процессе электромеханического

упрочнения. Для образцов изготавливали цилиндрические детали диаметром 50 мм из стали марок 45 и 38ХС в нормализованном исходном состоянии. Образцы подвергали комбинированной электромеханической обработке с динамическим силовым воздействием. Выбор в качестве объекта исследования указанных марок стали объясняется их широким использованием в машиностроении, и в частности, в узлах многоцелевых гусеничных машин, к которым предъявляются высокие требования по надежности, прочности и износостойкости.

Твердость образцов, обработанных ЭМО и ЭМО с ДСВ увеличилась на 15...30 %. При этом высокие температуры и скорости протекающих процессов фиксируют упрочненные структуры на большей глубине от поверхностного слоя. Это невозможно достичь при обработке традиционной ЭМО со статическим прижатием инструмента к обрабатываемой поверхности.

**Комбинированное лазерное и ударно-волновое упрочнение.** Обработка стали с использованием комбинированного метода, который включает в себя лазерное, ударное и волновое воздействие, значительно превосходит по техническим параметрам традиционную лазерную термическую обработку. Важно отметить, что разработанный комбинированный подход сохраняет все преимущества лазерной закалки: возможность обработки поверхностей изделий сложной геометрической формы, высокую гибкость в управлении параметрами воздействия на поверхность обрабатываемой детали, а также способность модифицировать только поверхностные слои с сохранением пластических свойств основного материала изделия [23, 85, 161].

Преимущества метода:

- повышение теплостойкости, износостойкости, коррозионной стойкости;
- снижение шероховатости поверхности;
- повышение усталостной прочности в 1,7 раза по сравнению с лазерной закалкой. [125, 131, 156, 157, 235].

Исследования [131, 147, 117, 215] посвящены изучению воздействия наносекундных лазерных ударов на структуру коррозионностойкой аустенитной стали марки 18Х32НМФ. Лазерная ударная обработка способствовала повышению твёрдости и модуля упругости. В поверхностном слое происходило измельчение размера зерен в 2–4 раза, при этом значительную роль играли двойники деформации.

В работе [35] представлены результаты исследований изменения микроструктуры аустенитной стали марки 08Х18Н10 после многократного воздействия наносекундным лазером. После однократного ударного лазерного воздействия формировались механические двойники только в одном направлении. При повторном воздействии образовывались двойники деформации уже в другом направлении и т. д. Эта технология позволяла значительно уменьшить размер зерен в стали марки 08Х18Н10. Лазерная ударная обработка также повышала прочностные характеристики при растяжении образцов.

**Лазерная закалка и трение абразивными частицами.** В Институте физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН разработан метод КО– лазерная закалка и ППД (трение абразивными частицами). После применения КО существенно повысились микротвердость, теплостойкость, коррозионная стойкость. Метод применяли для стали марок ШХ15 и У8 [35, 50, 138,].

Преимущества метода:

- HRC 65;
- повышение теплостойкости, износостойкости, коррозионной стойкости.

Недостатки метода: метод не нашел применения в промышленности из-за сложности управления процессом, разработка находится на уровне изобретения [50].

**Упрочняюще-чистовая лазерная и ультразвуковая обработка.** Исследования, проведенные В.И. Синдеевым, Г.А. Исхаковой и коллегами [99], направлены на

упрочнение образцов и деталей машин из стали марки 45 путем комбинирования лазерной закалки и ультразвукового упрочнения. Результаты исследования показали, что сочетание этих методов привело к увеличению усталостной прочности в 1,7 раза.

В других работах [202, 227] указано, что применение ультразвукового инструмента после лазерной закалки способствует повышению твердости и износостойкости в большей степени, чем только лазерное упрочнение. В результате обработки стали марки 45 были получены мелкодисперсные структуры с повышенной твердостью, а глубина упрочнения достигала 0,3 мм.

Исследованиями [203, 270] также было выявлено, что шероховатость поверхности, формируемая ультразвуковым инструментом, зависит от исходной шероховатости, полученной на предыдущих этапах обработки. Это явление проявляется в явной зависимости, причем характер наследования по параметру Ra имеет линейную природу.

В исследованиях [65, 201] также изучалось влияние низких температур на твердость и прочность поверхности металлов при ультразвуковом воздействии. Ультразвуковые колебания передавались изделию контактно или через тонкий слой жидкости, что приводило к заметному увеличению твердости и износостойкости. Однако, несмотря на такие преимущества, эти комбинированные методы обработки не удовлетворяют заданным техническим требованиям для плунжеров и золотников, поскольку глубина упрочнения не достигала 1,1 мм.

**Электроискровое легирование и последующая упрочняющая обработка.** Разработан метод исследования влияния электроискрового легирования (ЭИЛ) и процесса полировки под давлением (ППД) на качество поверхностных слоев деталей [96]. Исследование проводилось в целях улучшения характеристик слоев с различной твердостью и составом. Эксперименты показали, что нанесение электроэрозионных покрытий на сталь марки 45

вызывает образование нежелательных растягивающих напряжений в поверхностном слое. В дальнейшем процесс ППД приводит к формированию благоприятных сжимающих напряжений, которые полностью компенсируют растягивающие напряжения, обусловленные ЭИЛ [141].

Эксперименты на натурных моделях валов показали, что после процесса ЭИЛ усталостная прочность уменьшилась в 1,5 раза по сравнению с валами без покрытия, однако она оказалась в 1,5 раза выше, чем у валов, легированных только хромом. Применение ППД (обработка шариками) приводит к увеличению усталостной прочности на 16...20 % по сравнению с образцами без покрытия. Поскольку место разрушения перемещается за пределы покрытия, можно сделать вывод, что предел выносливости еще выше [243].

Преимущества:

- повышение теплостойкости в 2 раза;
- повышение износостойкости в 4 раза;
- увеличение глубины упрочнения до 0,8 мм.

При изготовлении роторов турбин возникают трудности с упрочнением несущих поверхностей подшипников. В процессе ремонта роторов (отделочной обработки шлифованием) опорных подшипниковых шеек часто происходит удаление упрочненного слоя. Существует несколько стандартных методов упрочнения поверхностей валов, таких как термическая обработка в чистом углероде (ТВЧ), азотирование и цементация. Однако выдвинуто предложение [243] использовать комбинированные технологии, такие как электроискровое легирование (ЭИЛ) с последующей полировкой под давлением (ППД) или ЭИЛ с борированием ультразвуком (БУФО). Предлагаемая комбинированная технология обеспечивает высококачественное упрочнение поверхности, сравнимое с характеристиками упрочнения, достигаемыми указанными методами, при этом затраты снижаются в 5–10 раз [50, 241, 243].

**Электроискровое легирование и лазерная обработка.** Электроискровая и лазерная обработки поверхности увеличивают износостойкость [11, 18, 31 и др.].

Известно, что электроискровую обработку используют для изучения новых высокотемпературных сплавов, которые ранее не применялись для упрочнения. Экспериментально определяют их механические, прочностные и физические характеристики на различных видах стали и сплавов. [11, 243].

Основным недостатком электроискрового упрочнения является увеличение шероховатости при увеличении толщины нанесенного покрытия, что неблагоприятно сказывается на его эксплуатационных свойствах. Исключить это явление можно при сочетании электроискровой и лазерной обработок. При совместном воздействии на поверхностный слой повышается качество поверхности электроискрового покрытия, а также на его характеристики, такие как микротвердость, износостойкость, шероховатость и толщина упрочненного слоя [50, 241, 242].

Преимущества метода:

- возможность замены высоколегированных сталей на углеродистые;
- повышение износостойкости в 2 раза [18].

**Детонационное нанесение покрытия и алмазное выглаживание.** Покрытия, полученные методом детонационного напыления, обладают рядом особенностей. Они характеризуются незначительным отличием свойств от исходного материала, высокой плотностью с пористостью менее 2 %, что критически важно для материалов, подверженных износу, а также обеспечивают хорошее сцепление с основным материалом подложки. Свойства таких покрытий мало отличаются от аналогичных материалов, полученных методом спекания. Более того, процесс нанесения может быть полностью автоматизирован, поскольку он представляет собой взрыв, распространяющийся с постоянной скоростью для заданной взрывчатой смеси. Дополнительное алмазное выглаживание создает запас для улучшения эксплуатационных характеристик.



Преимущества метода:

- HRC 50;
- повышение износостойкости в 1,3 раза по сравнению с закалкой ТВЧ.

В работе [67] приведены результаты исследования воздействия комбинированного упрочнения, включающего в себя детонационное напыление и алмазное выглаживание, на износостойкость и усталостную прочность образцов из стали марки 40ХН2МАШ. Проведенные эксперименты показали, что шероховатость поверхности образцов ( $R_a$  1,7 мкм после шлифования) снизилась до  $R_a$  0,8 мкм после алмазного выглаживания. Это привело к более равномерному покрытию, что имеет большое значение при абразивном износе. Исследованием также было выявлено, что алмазное выглаживание увеличивает предел выносливости напыленных образцов из стали марки 40ХН2МАШ с 476 МПа до 540 МПа (на 13 %) и образцов с напрессованными втулками с 342 МПа до 431 МПа (на 12 %).

Этот рост пределов выносливости можно объяснить формированием благоприятного микрорельефа поверхности, увеличением степени наклепа, созданием текстуры и формированием высоких уровней сжимающих остаточных напряжений [234, 227].

**Электроакустическое напыление и обработка холодом.** Этот метод обеспечивает значительное снижение температуры расплава при электроискровых разрядах и создает интенсивные пластические микродеформации, которые могут интерпретироваться как удары со сдвигами. Широкое применение этого метода связано с его способностью создавать покрытия с предсказуемыми свойствами и получать новые материалы [6, 12, 248]. Обработка холодом проводится с целью снижения остаточного аустенита, что представляет собой потенциал для снижения износостойкости и увеличения твердости. Повышение твердости после обработки холодом обычно составляет от 4 до 6 единиц HRC [68]. В работе [205]

рассмотрено проведение комбинированной обработки на образцах из стали марки 1X18H10T.

Преимущества метода:

- повышение износостойкости в 1,2 раза;
- воздействие на микроструктуру в целях увеличения плотности и полигонизации дислокаций;
- стабилизация дислокационной структуры и создание условий для торможения микротрещин.

Недостатки данного метода включают в себя сложность процесса образования искр, который зависит от множества факторов, таких как атмосферное давление, температура окружающей среды, уровень загрязнения помещения, размер электродов, а также ограниченный диапазон марок стали, подходящих для обработки холодом [6, 12, 205]. Этот процесс требует значительных затрат и может увеличить себестоимость производства деталей для сельскохозяйственной, дорожной и строительной техники.

**Лазерное легирование с последующим азотированием.** В Московском энергетическом институте (МЭИ) предложена инновационная комбинированная технология поверхностного упрочнения высокоуглеродистых марок стали. Эта методика включает в себя лазерное легирование с последующим азотированием, что позволяет получать упрочненные слои толщиной до 700 мкм с микротвердостью до 10 000 МПа [268].

Проведенные исследования [269] касались упрочненных слоев после лазерного легирования стали марок У8 и У10 с использованием прибора МЭИ – Т7 [270]. Эксперименты продемонстрировали, что при лазерном легировании в непрерывном режиме излучения формируется упрочненный слой толщиной 600 мкм с однородной мелкозернистой структурой и равномерно распределенным легирующим элементом.

Применение азотирования после лазерного легирования приводит к значительному увеличению микротвердости малоуглеродистых сталей—до 20 000 МПа и повышению износостойкости на 1,5–3 раза по сравнению с традиционно азотируемыми слоями [302, 314, 316].

Преимущества метода:

- возможность замены высоколегированных марок стали на углеродистые;
- улучшение антифрикционных характеристик при контактных нагрузках;
- твердость HRC 55.

**Комплексное лазерное и ультразвуковое упрочнение.** Применение данного метода включает локальный нагрев зоны обработки с использованием лазерного луча, за которым следует последующее или совмещенное ультразвуковое упрочнение. Воздействие температуры, давления и скоростного охлаждения одновременно приводит к формированию мелкодисперсной структуры, известной как «белый слой», в поверхностном слое металла, который характеризуется высокой микротвердостью [87, 128, 156].

Исследования микротвердости поверхности [133] демонстрируют следующие результаты: после ультразвуковой обработки— $HV_{100}$  400...500, после лазерной закалки— $HV_{100}$  700...800, после лазерной закалки с последующей ультразвуковой обработкой— $HV_{100}$  800...950. Совмещение этих методов позволяет достичь микротвердость  $HV_{100}$  1200...1300 при исходной микротвердости  $HV_{100}$  250.

Комбинация высокой энергии в импульсе и высокоскоростной деформации приводит к снижению шероховатости поверхности. Например, при начальной шероховатости Ra 3,2 мкм после лазерной обработки она уменьшается до Ra 2,5 мкм, после последовательной ультразвуковой и лазерной обработок—до Ra 1 мкм, а при совмещенном применении методов — до Ra 0,25 мкм [139, 163].

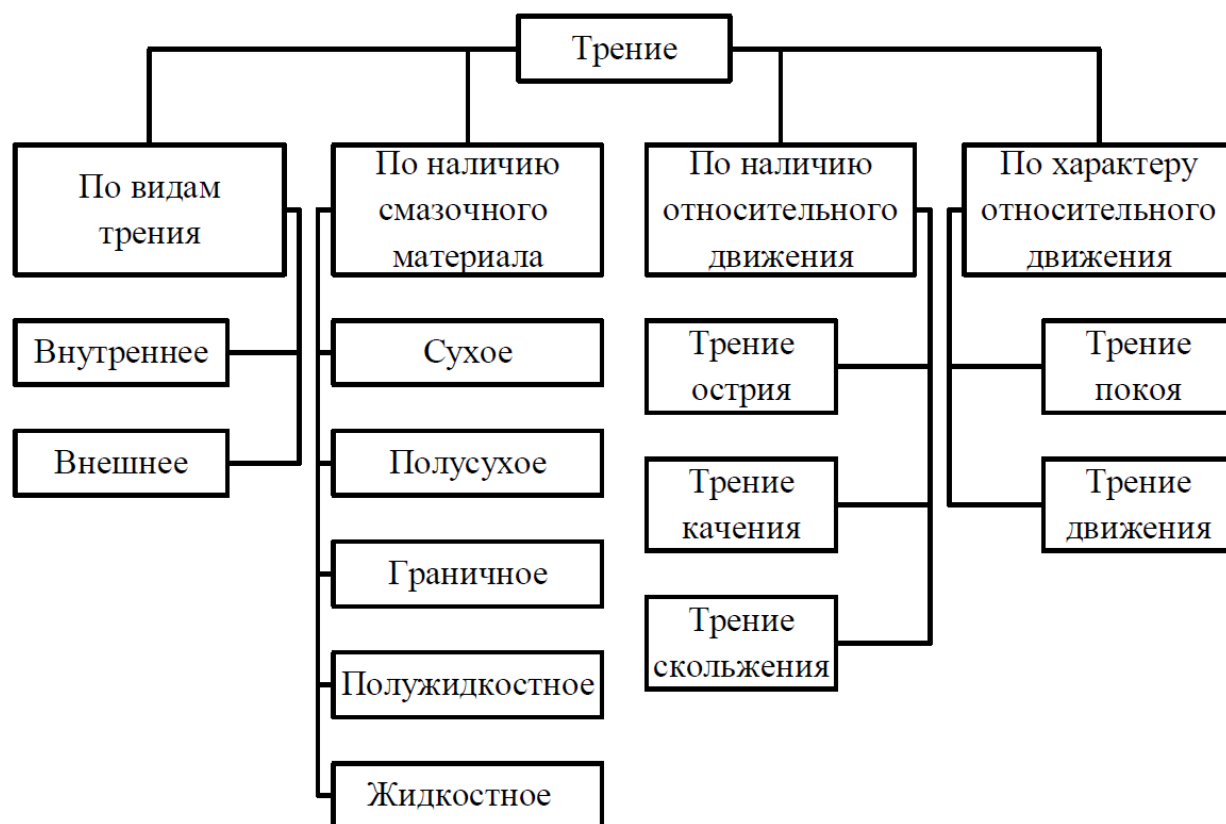
**Комплексное лазерное и криогенное упрочнение.** Процесс включает в себя последовательное применение лазерного нагрева (закалки) упрочняемой поверхности, за которым следует охлаждение деталей в среде жидкого азота или другого криоагента, способного охладить сталь до температуры ниже точки мартенситного превращения. Криогенная обработка уменьшает содержание аустенита в поверхностном слое, что приводит к увеличению микротвердости поверхностного слоя и снижению износа по сравнению с лазерной закалкой. При совместном применении лазерной закалки и криогенной обработки не наблюдается растрескивания образцов после извлечения из жидкого азота и в процессе испытаний [50, 68]. Применение криогенной обработки после лазерной закалки дополнительно повышает твердость поверхностного слоя. Результаты измерения твердости для стали марок У8 и ХВГ имеют вид: исходная (закалка и отпуск)  $HV_{100}$  734, после лазерной закалки— $HV_{100}$  - 976, после лазерной закалки и криогенной обработки— $HV_{100}$  1070...1119 [194, 205].

Таким образом, объединение известных и исследованных методов позволяет создать на поверхностях новые свойства, недоступные методам по отдельности, и создать резерв для увеличения износостойкости для золотников, плунжеров и толкателей.

## **2. Анализ методов получения модифицированных поверхностей и поверхностей с масляными карманами**

Большинство пар трения работает в условиях трения со смазкой или полусухого трения (рисунок 1.13). Прочность граничной пленки смазки часто оказывается недостаточной вследствие высоких напряжений (удельных давлений) и температур. Разрыв смазочной пленки приводит к местному привариванию металла к поверхности в точках контакта и увеличению сил трения [5, 8, 34, 35 и др.]. В последнее время было выполнено много работ по различным видам смазки

[5, 88, 100, 109, 127, 129 и др.], однако во всех случаях лучшая смазка приводит к снижению сил трения лишь на несколько десятков процентов [100, 182, 266].



*Рисунок 1.13 – Классификация трения по основным критериям*

Большой вклад в развитие учения о трении, износе и смазках внесли И.В. Крагельский, Б.В. Дерягин, П.А. Ребиндер, М.М. Хрущев, Ф.П. Боуден, Н.Б. Демкин, Н.А. Буше, Н.М. Михин, А.В. Чичинадзе, А.С. Ахматов и др. Заслуживают внимания труды И.В. Крагельского и соавторов, Н.Б. Демкина, Н.А. Буше, А.В. Чичинадзе, Д.Н. Гаркунова, Б.И. Костецкого, Э.Д. Брауна и соавторов и др., многие из которых уже сейчас, к сожалению, библиографическая редкость.

Затраты на ремонт и обслуживание машин в несколько раз превышают их первоначальную стоимость: для автомобилей – в 6 раз, самолетов – в 5 раз, станков – до 8 раз.

Работы по ремонту и обслуживанию многих строительных машин требуют в 15 раз больше времени, чем изготовление новых. За период службы

автомобильных, тракторных и комбайновых двигателей их приходится ремонтировать до 5 раз. После ремонта ресурс двигателя составляет лишь 30–50 % относительно первоначального. Отремонтированные двигатели потребляют на 10 % или более топлива и смазочных материалов, чем новые [155, 182, 246].

Из анализа работ И.В. Крагельского, Н.М. Михина, Д.Н. Гаркунова, М.И. Браславского, А.А. Санникова [42, 59– 62, 135, 168, 209] и др. следует, что одной из основных причин повышенного износа является отсутствие смазки на поверхности контакта (рисунок 1.14). Например, при трении алюминиевых сплавов о закаленный стальной вал формируются хрупкие и очень твердые частицы оксида алюминия, которые царапают и разрушают (изнашивают) стальной вал. Если эти абразивные частицы попадают в смазку, их агрессивность увеличивается в десятки и даже сотни раз [3, 34, 266]. Однако можно достичь оптимального распределения микроканавок и выступов на поверхности, что улучшит ее эксплуатационные характеристики [108, 144, 271]. Следовательно, актуальной задачей является создание условий, при которых поверхности будут разделены смазочной пленкой. Одним из решений является создание модифицированных слоев с масляными карманами на поверхности деталей. Повысить долговечность пар трения можно нанесением регулярных (RMP) или частично-регулярных микрорельефов (ЧРМР) [14, 92, 93, 108, 144, 231 и др.]. Такие поверхности обладают лучшими эксплуатационными характеристиками по сравнению с обычными поверхностями.

Разработано большое количество методов нанесения модифицированного слоя с RMP. В настоящей работе разработана классификация методов. В основу классификации положены различия воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность. Методы можно разделить на четыре группы: 1) обработка поверхности резанием; 2) обработка пластической деформацией; 3) обработка электрофизическими методами; 4) обработка КО (рисунок 1.15).

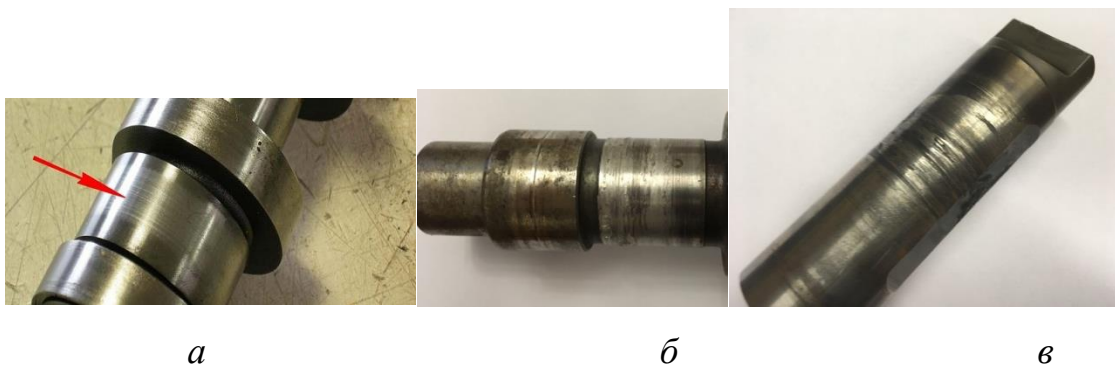


Рисунок 1.14 – Следы абразивного износа, образовавшиеся из-за разрыва масляной пленки:

а – шейка привода насос-форсунки; б – промежуточный вал; в – фиксатор

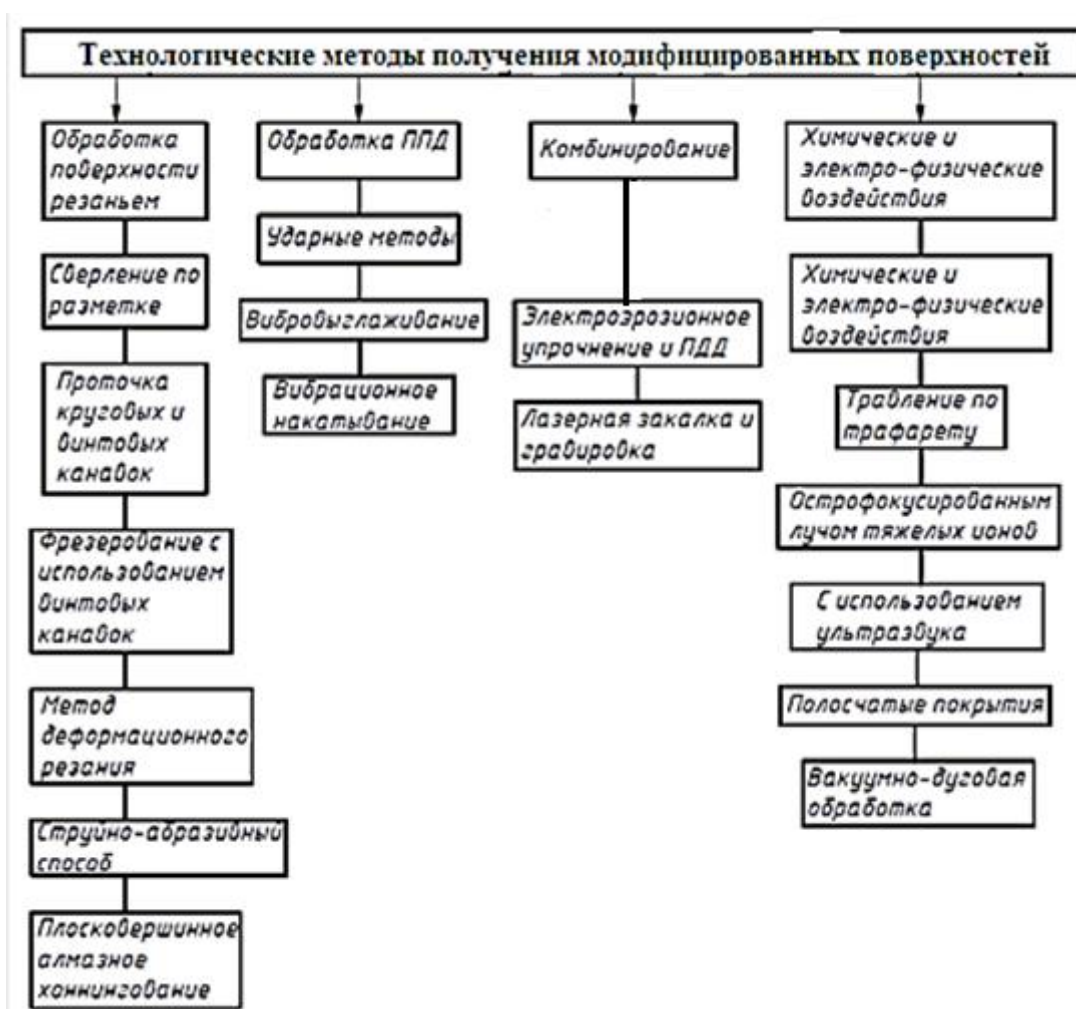


Рисунок 1.15 – Классификация методов получения модифицированных поверхностей

## **2.1. Получение модифицированных поверхностей обработкой поверхности резанием**

**Сверление по разметке.** В мелкосерийном и единичном производстве лунки конусообразной формы получают по разметке, в крупносерийном и массовом—по трафарету.

Преимущества метода: использование имеющегося оборудования.

Недостатки метода: высокая трудоемкость; низкая производительность процесса, возникновение углублений конусообразной формы, затрудняющих подачу масла на поверхность контакта [74, 108].

**Фрезерование с использованием копирных устройств.** Используется на ряде предприятий Англии, Франции, Германии [50]. Изготавливают специальные станки со встроенными копирами. Этот метод применяют для изготовления деталей гидравлического оборудования на заводах Volvo, JCB [50, 227].

Преимущества: высокая производительность; управляемость процессами.

Недостатки: высокая стоимость; возможно применение только в крупносерийном производстве [14, 92, 93].

**Проточка круговых и винтовых канавок.** Способ образования дискретно расположенных углублений на цилиндрических и плоских поверхностях основаны на прерывистом контактировании вращающегося инструмента с вращающейся или поступательно перемещающейся заготовкой. Параметры таких частично регулярных микрорельефов (ЧРМР) легко варьируются изменением скоростей относительного перемещения заготовки и инструмента [50, 74, 271].

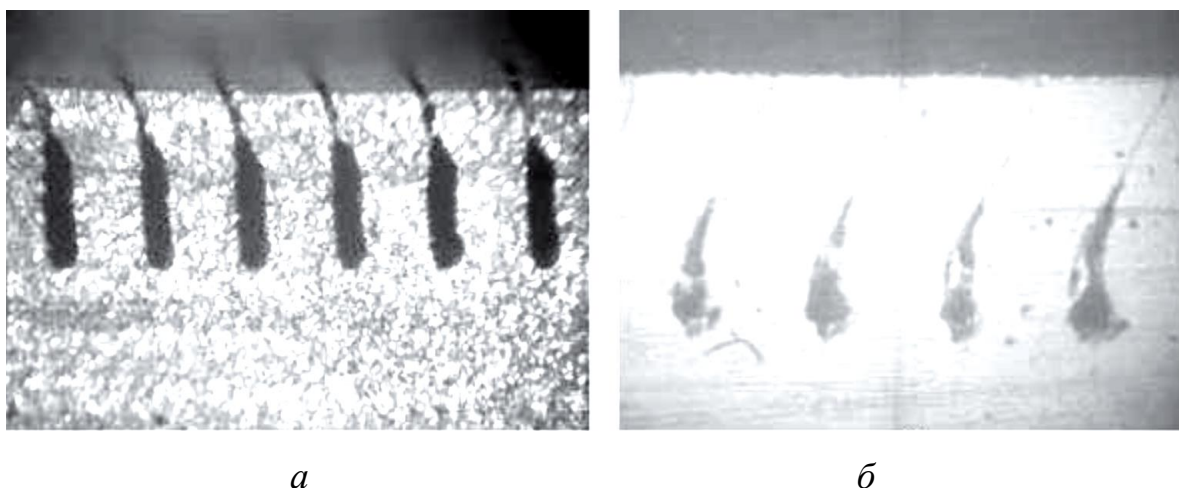
Преимущества:

- возможность использования универсального оборудования, инструмента и оснастки;
- высокая производительность процесса.



Недостатками метода являются: нерегулярный, хаотичный микрорельеф углублений на поверхности, ударный характер резания, а также с учетом микронных размеров микрокарманов – необходимость в точном оборудовании. Поэтому данный метод технологически сложен и не всегда эффективен [50, 231, 271].

**Метод деформационного резания.** В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан метод деформационного резания (ДР) [92, 93], который применяется для получения беспористого оребрения с нулевым межреберным зазором путем «перелистывания» тонких поверхностных слоев детали (рисунок 15). Этот процесс формирует упрочненный слой толщиной до 1,5 мм [48]. Под действием высокой скорости и деформации стружки, характерных для процесса резания, подрезанный слой также подвергается нагартовке, аналогичной алмазному выглаживанию или накатке роликами. Важным преимуществом метода ДР являются возможность создания более толстого упрочненного слоя и отсутствие экспоненциального уменьшения твердости по глубине. Для стали марки 10Х16Н25М6 после ДР твердость поверхности увеличилась в 2 раза (рисунок 1.16).



*Рисунок 1.16 – Поверхностный слой после ДР:*

*а – сталь марки 30ХГСА; б – сталь марки 38Х2МЮА*

Преимущества метода:

- формирование упрочненного слоя на обрабатываемой поверхности;
- перспективность для деталей трения;
- использование в ремонтном производстве;
- повышение прочности и твердости поверхности;
- отсутствие дороговизны;
- эквивалентность по производительности операции чернового точения.

Недостатки метода:

- необходимость проектирования специального инструмента;
- низкое качество обработки поверхности;
- необходимость отделочных операций.

**Струйно-абразивный способ.** М.Г. Исуповым [98] был предложен струйно-абразивный метод формообразования смазочных микрокарманов на поверхности трения, за которым последует заполнение впадин регулярного и частично-регулярного микрорельефа антифрикционным твердым материалом.

Этот метод отличается простотой и высокой производительностью. Скорость создания маслосъемного микрорельефа составляет  $100...120 \text{ мм}^2/\text{с}$ , что почти в 2 раза превышает скорость вибронакатки. Экспериментально было показано, что маслосъемность поверхностей после струйно-абразивной обработки увеличивается до 2,6 раза.

Преимущества метода:

- возможность управления плотностью заполнения микровпадинами поверхности трения [50];
- повышение долговечности работы прецизионных деталей трения, в зависимости от условий эксплуатации, на 30.. 80 %.

**Плосковершинное алмазное хонингование.** Метод заключается в создании микрогеометрии обработанной поверхности с определенными характеристиками, такими как повышенная опорная поверхность, улучшенная износостойкость

деталей и необходимая маслосъемкость за счет нанесения на поверхность относительно глубоких рисок в виде сетки. Основное применение этого метода – обработка гильз и цилиндров двигателей внутреннего сгорания для улучшения их технических характеристик.

Для достижения необходимой микрогеометрии при плосковершинном хонинговании используют комбинацию предварительного хонингования алмазными брусками повышенной зернистости на металлических связках с последующим вершинным хонингованием брусками на эластичных связках, содержащих более мелкие алмазные порошки. Ученые, такие как В.П. Кузнецов, В.Г. Горгоц и О.В. Дмитриева, доработали этот метод, добавив последующее выглаживание обработанной поверхности алмазным наконечником. В результате выглаживания создается поверхность с выровненными по высоте микронеровностями, сохраняя созданный на предыдущем этапе микрорельеф масляных карманов. Таким образом, поверхность обработанной детали представляет собой совокупность выровненных площадок и канавок частично-регулярного микрорельефа.

Преимущества метода:

- увеличение долговечности прецизионных пар трения на 60 %;
- снижение силы трения в 1,5 раза.

Недостатки данного метода: недостаточная стойкость инструмента и значительные усилия, возникающие в зоне резания. Данный метод является значительно трудоемким [67, 144].

## **2.2. Получение модифицированных поверхностей с применением методов ППД**

**Ударные методы.** В работе [232] описывается метод дробеструйного наклепа стальных образцов, применяемый для обработки поверхностей небольших деталей сложных форм и деталей малой жесткости, таких как

пружины, рессоры, мембраны и др. В процессе применения этого метода используется стальная дробь диаметром 0,8...2 мм, которая создает заданную шероховатость на поверхности обрабатываемой детали. Глубина наклепа не превышает 0,8 мм, и поверхность детали не требует последующей обработки. Режим обработки определяется скоростью подачи дроби (до 90 м/с), расходом дроби в единицу времени и экспозицией, т. е. временем, в течение которого обрабатываемая поверхность подвергается ударам дроби. Экспозиция обычно составляет затрату 0,5...2 мин на обрабатываемую поверхность.

В работе [246] представлена технология ударного лазерного упрочнения, известная так же, как технология лазерного наклепа. Этот метод используется для повышения сопротивления усталости, длительной прочности и коррозионной стойкости деталей машин и конструкций, работающих в условиях повышенных температур и циклических нагрузок. Процесс упрочнения поверхности осуществляется за счет ударной волны большой амплитуды, генерируемой в лазерной плазме с помощью лазерных импульсов высокой энергии. В результате механической деформации в холодном состоянии, вызванной ударной волной, достигается упрочнение материала на глубину до 1 мм. Этот метод также позволяет получить частично-регулярный микрорельеф на поверхности деталей, что способствует снижению вероятности образования микротрещин.

Преимущества ударных методов:

- улучшение эксплуатационных характеристик (износостойкости и контактной прочности);
- исключение из технологических процессов таких операций, как доводка, хонингование, полирование, для некоторых деталей–ТО и покрытие;
- возможность осуществления процесса после ХТО;
- создание РМР на любой поверхности, для любых деталей машин;
- повышение износостойкости до 50 %.

Недостатки методов: сложность изготовления оснастки; низкая управляемость процессами; низкая стойкость дроби [108, 50].

**Вибровыглаживание.** Процесс представляет собой метод создания синусоидального канала на поверхности детали при перемещении инструмента. Этот процесс может использоваться для создания синусоидальных каналов на поверхности деталей.

Подобные методы обработки поверхностей могут быть применены, например, для создания маслосъемных микрорельефов или улучшения трибологических свойств деталей. Кроме того, синусоидальные каналы могут улучшать смазывающие свойства поверхности, что важно в условиях трения и износа.

Преимущества:

- повышение износостойкости в 2 раза;
- повышение твердости на 20 %;
- Ra 0,02...0,16 мкм;
- возможность изготовления любого микрорельефа для контактирующих тел;
- возможность удержания масляной пленки в каналах при трении.

Недостатки: необходимость применения специального оборудования для перемещения инструмента по сложному контуру [14, 74, 92, 108, 271 и др.].

**Вибрационное накатывание.** Метод разработан и исследован Ю.Г. Шнейдером и его учениками [50, 271].

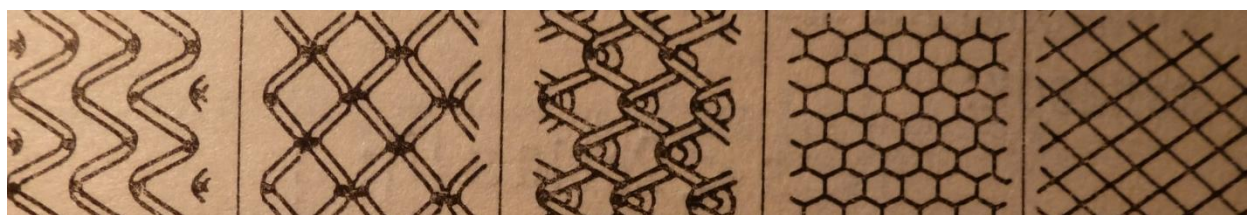
Для вибронакатывания созданы специальные станки полуавтоматического и автоматического действия.

На Ярославском моторном заводе были спроектированы и изготовлены специальные четырехшпиндельные полуавтоматы для вибронакатывания внутренней цилиндрической поверхности термически обработанных гильз дизелей [271].

Преимущества:

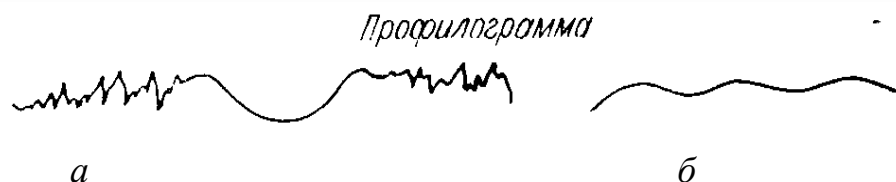
- улучшение эксплуатационных характеристик (износостойкости и контактной прочности);

- исключение из технологических процессов таких операций, как доводка, хонингование, полирование, для некоторых деталей–ТО и покрытия;
- возможность применения после ХТО;
- создание РМР на любой поверхности, для любых деталей;
- однородность микрорельефа по размерам и расположению микронеровностей (рисунки 1.17, 1.18);
- улучшение плавности хода и бесшумности работы пар трения;



*а    б    в    г    д*

*Рисунок 1.17 – Виды поверхностей с системами масляных карманов (регулярные микрорельефы): а – д – различные виды регулярных микрорельефов*



*Рисунок 1.18 – Профилограмма поверхности: а – до обработки, б – после обработки*

Недостатки метода: сложность изготовления оснастки (рисунок 1.18); возможность применения только в крупносерийном и массовом производстве [ 87, 138, 239].

### **2.3. Получение модифицированных поверхностей методами химического и электрофизического воздействия**

**Травление по трафарету.** Химическое травление через трафарет происходит по принципу образования дискретно расположенных углублений

травлением обрабатываемого материала: все углубления обрабатываются одновременно в ванне. Достоинством травления является неограниченная возможность обработки материалов любой твердости [50, 74, 231, 248 и др.]. Данный метод применяют на заводах CAT, CASE и ресурс зарубежной техники выше, чем отечественной [4, 50, 248]

Преимущества: высокая производительность; скопление в масляных карманах продуктов абразивного износа, снижающее интенсивность абразивного изнашивания [8, 34, 43, 182].

Недостатки: необходимость в значительном количестве дорогостоящих трафаретов, наличие специальных ванн для травления, в исследовании скорости травления в зависимости от состава металла и ванны [248]. Данный метод очень трудоемок, поэтому применяется крайне редко.

**С помощью остросфокусированного пучка тяжелых ионов.** Обработка поверхности пучком ионов происходит в вакууме, где форма микрорельефа в поперечном сечении зависит от распределения плотности тока пучка ионов в зоне обработки. Пучок ионов может быть сформирован и сканирован по поверхности заготовки в импульсном или постоянном режиме, при этом сама заготовка может перемещаться в зависимости от типа желаемого микрорельефа. Использование различных типов ионов с различной массой, а также возможность модуляции тока и распределения плотности тока пучка ионов позволяют создавать новые типы регулярных микрорельефов, которые невозможно получить другими методами обработки поверхностей. Этот метод может быть полезен для создания микрорельефов с определенными трибологическими свойствами или для улучшения адгезионной способности поверхности.

Преимущества:

-улучшение эксплуатационных характеристик (износостойкости и контактной прочности);

Недостатки: сложность оборудования, инструмента, оснастки; низкая производительность и управляемость процессом [50, 74, 182, 248].

**Методы на основе рационального использования энергии модулированного ультразвукового поля.** Использование ультразвуковых колебаний, модулированных по частоте и амплитуде, предоставляет возможность формировать модифицированные поверхности, изменяя при этом параметры колебаний и режимы обработки в широком диапазоне без увеличения сложности кинематики процесса. Однако для достижения желаемого микрорельефа требуется регламентация режимов обработки, которая зависит от назначения детали и видов необходимого микрорельефа.

Для поверхностей, подвергающихся высоким нагрузкам, например шарниров или направляющих, которые смазываются консистентными смазками, рекомендуется создание сетки каналов. Это способствует лучшей подвижности смазки и ее обогащению кислородом, что помогает предотвратить схватывание. При формировании такого микрорельефа существует риск повторной обработки уже упрочненных участков, что может привести к ухудшению их качества. Регулировка режимов ультразвукового алмазного выглаживания с использованием модулированных ультразвуковых колебаний, соответствующая параметрам микрорельефа, позволяет избежать этого негативного эффекта.

Преимущества методов:

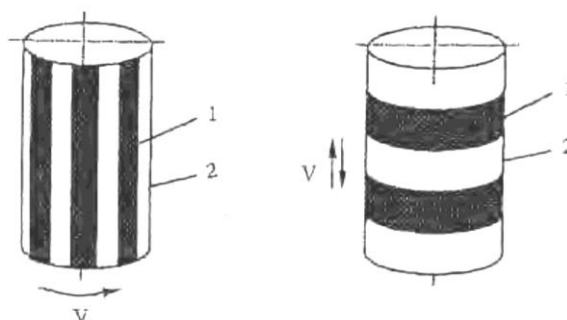
- улучшение эксплуатационных характеристик (износостойкости и контактной прочности);
- Ra 0,05...0,1 мкм.

Недостатки данных методов: высокая трудоемкость; сложность изготовления оснастки; низкая управляемость процессами; низкая стойкость инструмента [235, 238, 240, 246].



**Полосчатые покрытия.** Тип покрытий, который был разработан для газотермического напыления, представляет собой чередование полос из различных материалов [6, 50, 227, 248 и др.]. Антифрикционные материалы, такие как медь, бронза и другие пластичные металлы, используются в этом случае для создания антифрикционного слоя. Расположение полос антифрикционного материала зависит от формы поверхности, типа движения в паре трения и направления вектора скорости скольжения.

В случае вращательного движения деталей, таких как тела вращения, рекомендуется размещать полосы антифрикционного материала в виде колец или полос, перпендикулярно направлению скорости скольжения (рисунок 1.19). Это позволяет обеспечить более эффективную работу антифрикционного слоя и снизить трение между поверхностями, что в конечном итоге способствует повышению эффективности и долговечности механизмов [31, 34, 38, 40 и др].



*Рисунок 1.19 – Схемы расположения полос антифрикционного материала в полосчатом покрытии:*

*1 – антифрикционный материал; 2 – износостойкий материал*

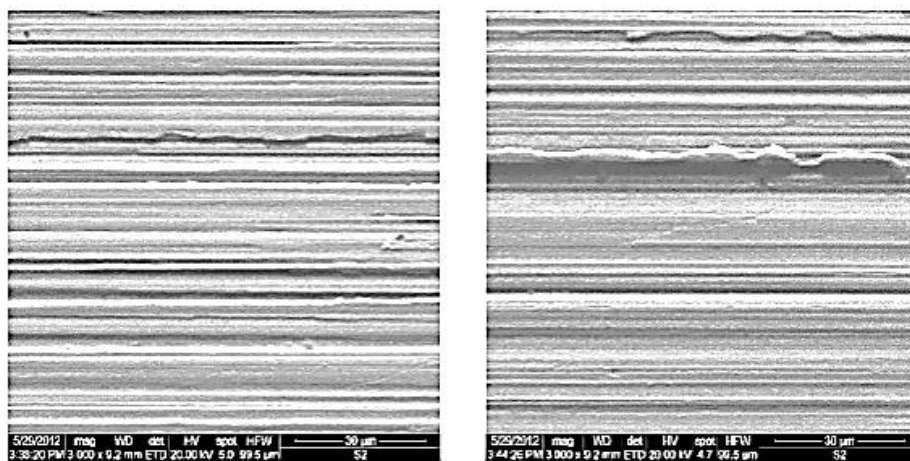
Преимущества метода:

- повышенная износостойкость благодаря поступлению твердой смазки [50, 275].

**Вакуумно-дуговая обработка.** Технология вакуумно-дуговой обработки поверхности металлов и сплавов имеет следующие преимущества [50, 77, 111, 114]:

- высокоэффективная, ресурсосберегающая;

- удельные затраты электроэнергии 0,3...0,6 кВт·ч/м<sup>2</sup>;
- стоимость вакуумно-дуговой очистки в 5–7 раз ниже химической и в 2–3 раза ниже дробеструйной;
- полная экологическая безопасность— отсутствие вредных веществ, загрязняющих окружающую среду, безопасность для человека;
- легкость в обслуживании, размещение на небольшом пространстве, возможность автоматизации и соответствие требованиям техники безопасности;
- образование на поверхности металла пассивирующей пленки, способствующей повышению коррозионной стойкости;
- улучшение условий для дефектоскопии металла: возможность вскрытия приповерхностных раковин, обнаружения сквозных трещин;
- сглаживание микронеровностей поверхности, микровыступов, задира, залечивание поверхностных микротрещин [55, 248];
- образование на поверхности частично регулярного микрорельефа (рисунок 1.20).



*Рисунок 1.20 – Рельеф поверхности с частично регулярным микрорельефом после вакуумно-дуговой обработки поверхности*

Недостатки: высокая трудоемкость; сложность изготовления оснастки; низкая управляемость процессами.

Описанные и запатентованные методы формирования модифицированных поверхностей с регулярным и частично регулярным микрорельефом требуют специализированного оборудования и сложной настройки. Это включает в себя не

только процесс создания микрорельефа, но и настройку параметров обработки для достижения оптимальных результатов.

Проблемой также является необходимость использования большого количества дорогостоящего специализированного оборудования, такого как трафареты, копировальные системы, управляющие системы и специализированный инструмент. Все это делает эти методы менее привлекательными для широкого использования в промышленности, особенно в условиях массового производства.

Тем не менее, в условиях крупносерийного и массового производства указанные методы могут найти применение, особенно если они позволяют значительно улучшить технические характеристики и качество поверхностей изделий. В таких случаях инвестиции в специализированное оборудование и настройку процессов обработки могут быть оправданы экономическим эффектом от улучшения качества и долговечности продукции.

#### **2.4. Получение модифицированных поверхностей комбинированными методами**

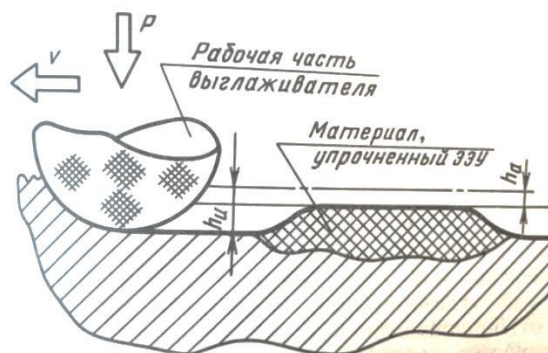
**Электроэрозионная обработка и ППД.** Описанный метод обработки, предполагающий высокотемпературное воздействие и химические реакции с целью формирования закалочных структур и сложных химических соединений на поверхностях деталей, действительно может привести к формированию износостойких и упрочненных слоев [50, 163, 248]. Процесс происходит при диффузии легирующего металла, атомарного азота и углерода в поверхностные слои материала, что приводит к формированию различных нитридов, карбонитридов, карбидов и других соединений.

Основные характеристики упрочненного слоя, такие как высокая микротвердость и износостойкость, делают его эффективным для повышения долговечности деталей, работающих в агрессивных условиях трения, абразивного

износа или высоких температур. Этот слой имеет высокую микротвердость и износостойкость. Твердость слоя составляет 1000...1400 НV. Важным преимуществом является возможность использования различных токопроводящих материалов.

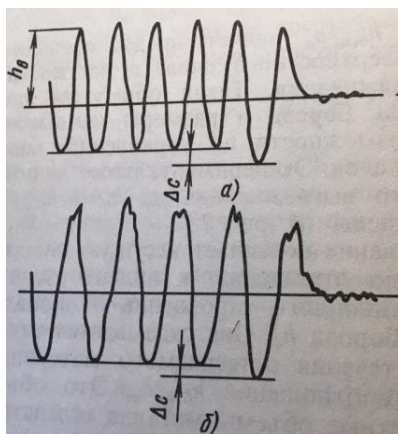
Этот метод обработки может быть применен для получения сложных поверхностей с различными уровнями упрочнения и структурой в зависимости от материала электрода, условий обработки и требований к конечному продукту [227, 248].

Для пар трения, которые работают в условиях смазки рекомендуется применять электроэрозионную обработку и алмазное выглаживание. В этом случае получают армированные регулярные микрорельефы: поверхности с выступами из легированного или закаленного материала (рисунок 1.21).



*Рисунок 1.21 – Схема получения армированной поверхности после электроэрозионной обработки и алмазного выглаживания*

В работах [50, 248] описаны испытания на износ образцов, изготовленных из стали марки 12X18H10T и обработанных по технологии электроэрозионной обработки и алмазного выглаживания для получения регулярного микрорельефа (рисунок 1.22). Результаты испытаний показали, что износостойкость образцов увеличилась в 10 раз, по сравнению с образцами, упрочненными закалкой ТВЧ и шлифованными. Испытания проводили при давлении 25 МПа, при меньших значениях давления результаты будут выше.



*Рисунок 1.22 – Получение различных вариантов регулярных микрорельефов после электроэрозионной обработки и алмазного выглаживания [248]*

К основным недостаткам электроискрового наращивания и упрочнения легированием, проводимым совместно с алмазным выглаживанием, необходимо отнести низкую производительность (до 4 см<sup>2</sup>/мин) и ограниченную толщину слоя.

**Лазерная закалка и гравировка.** Исследования, проведенные авторами работ [194, 247], направлены на анализ влияния лазерного упрочнения и последующего нанесения рельефа с помощью лазерного гравера на поверхность деталей для повышения их износостойкости. В исследованиях использовались стали различных марок, таких как 40Х13, 38ХМЮА, 40Х.

Сравнительный анализ результатов показал, что лазерное упрочнение в сочетании с последующей гравировкой позволяет значительно повысить твердость поверхностного слоя стали. По сравнению с объемной закалкой, улучшением и лазерной закалкой использование лазерного упрочнения с последующей гравировкой дает увеличение твердости в 1,3–1,35 раза и 1,7–2,32 раза соответственно.

Локальное упрочнение поверхностного слоя сталей проводилось с использованием технологического комплекса на базе мощного СО<sub>2</sub>-лазера «Латус 31». Этот подход позволяет достичь эффективного увеличения износостойкости

деталей за счет формирования упрочненного слоя на поверхности с использованием лазерных технологий.

Локальное упрочнение поверхности с использованием лазерной закалки и гравировки представляет собой эффективный метод для повышения эксплуатационных свойств деталей из сталей марок 40, 40Х и 38Х2МЮА. Этот метод особенно полезен для упрочнения труднодоступных участков деталей и локальных контактных областей. Путем лазерного упрочнения на поверхности формируется твердый слой, при этом сердцевина детали остается более мягкой, что обеспечивает баланс между прочностью и деформируемостью. Такая комбинация свойств способствует повышению долговечности деталей.

Нанесение рисунка на поверхность с помощью гравировки создает резерв для дополнительного повышения износостойкости за счет образования масляных карманов. Таким образом, этот метод не только улучшает прочностные характеристики деталей, но и обеспечивает более эффективное смазывание и снижение трения в контактных зонах.

Анализ существующих технологий создания модифицированных поверхностей и регулярных микрорельефов подтверждает их значимость для повышения стойкости к износу и продления эксплуатационного ресурса машин и агрегатов. Обеспечение дополнительного запаса прочности для трущихся поверхностей играет ключевую роль, учитывая высокие нагрузки, которым подвергаются пары трения в процессе работы.

Используемые подходы позволяют целенаправленно изменять свойства поверхностных слоев деталей, что дает возможность конструкторам разрабатывать более долговечные и продуктивные инженерные решения. Формирование регулярных микрорельефов и модифицированных структур способствует улучшению смазочных характеристик, снижению трения, а также предотвращает износ и повреждения, тем самым повышая надежность и эффективность оборудования.

Таким образом, применение данных методов существенно улучшает эксплуатационные показатели деталей с контактными поверхностями трения в жидких средах, способствует рациональному использованию ресурсов за счет увеличения срока службы и уменьшения потребности в их замене.

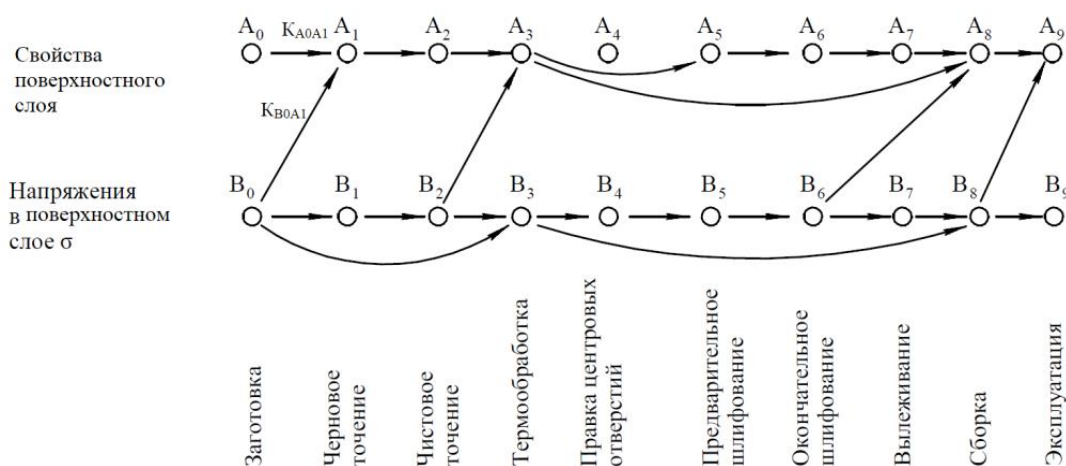
### **3. Анализ влияния технологического наследования на повышение качества поверхностных слоев и свойств модифицированных поверхностей**

Эффективной научной основой для управления свойствами поверхностных слоев является концепция технологической наследственности. Явления, связанные с этой концепцией, были наиболее полно и глубоко исследованы научными школами А.М. Дальского, Н.Д. Кузнецова, П.И. Ящерицына, В.И. Никитина, Ю.Н. Работнова, А.С. Васильева, А.И. Кандакова, М.Л. Хейфеца В.И. Аверченкова и другими учеными [2, 83, 201, 263, 291, 315, 335]. Основные положения теории технологической наследственности заключаются в том, что ключевые свойства изделия формируются не только на завершающей стадии технологического процесса, но и на всех этапах, начиная с заготовки и заканчивая готовым продуктом. Следовательно, важно изучить взаимосвязь параметров, возникающих на предыдущих и последующих операциях.

Особое внимание заслуживают исследования А.М. Дальского [83] и работы А.С. Васильева [335], проведенные в лаборатории технологической наследственности МГТУ им. Н.Э. Баумана. В одной из работ [335] предложено использовать понятие «ген» для обозначения химико-структурированных единиц, которые несут наследственную информацию – от шихтового материала через жидкую фазу до литого изделия и далее через все технологические операции до готового продукта.

Фундаментальные исследования в области технологической наследственности, проведенные под руководством А.М. Дальского [83], значительно расширили понимание процессов передачи свойств изделий в ходе

их производства. Для аналитического и математического моделирования процесса технологического наследования в одной из работ [335] была использована теория графов.



*Рисунок 1.23 – Граф для аналитического и математического описания процесса технологического наследования [271]*

Пример изменения свойств поверхностного слоя деталей показан на рисунке 1.23. Существенным отличием указанного подхода от других является попытка количественной оценки наследственных связей с помощью введенных коэффициентов технологического наследования  $K$ .

В работах [83, 335] исследованы факторы, влияющие на технологическую наследственность (таблица 1.3).

Интерес к исследованиям, связанным с технологической наследственностью, в последнее время значительно возрос. Однако вопросы, связанные с наследственным влиянием на формирование концентраторов напряжений в поверхностных слоях деталей, изучены недостаточно. Это включает в себя анализ наследственного влияния на формирование поверхностных трещин, которые могут привести к усталостным изломам в процессе эксплуатации.



Таблица 1.3 – Факторы, влияющие на технологическую наследственность

Способ обработки	Геометрическая форма	Макро- и микрорельефы	Структура фазового состава	Химический состав	Наклеп	Остаточные напряжения	Несплошности	Включения
Механическая обработка	Н	Н	-		+ -	+ -	-	-
Шлифование	Н	Н	-	-	+	-	-	-
Доводка	Н	Н			+	-	-	-
Методы ППД	-	+ -	+		Н	Н		-
Нанесение покрытий		-		+		-	-	-
Полирование	-	Н		+				
Пайка	-	-	Н	-		-	-	-
Литье	Н	Н	Н	-		-	-	-
Термическая обработка	-		Н	-		-		
Химико-термическая обработка	-	-	Н	Н		-	-	-
Горячее деформирование	Н	-	-	-		-	-	-
Холодное деформирование	Н	Н	+		+ -	+ -		
Штамповка	Н	-			+ -	+ -		

Это включает в себя анализ наследственного влияния на формирование поверхностных трещин, которые могут привести к усталостным изломам в процессе эксплуатации.

## Выводы по главе 1

1. Для производителей различных видов техники повышение износостойкости деталей с контактными поверхностями в трения в жидких средах является актуальным. Основные возможности увеличения износостойкости деталей лежит в области технологий. Предложенные технологические методы должны быть универсальны.

2. Существующие методы увеличения износостойкости имеют достоинства и область применения, однако они не обеспечивают отсутствие отказов гидравлического оборудования. В условиях высоких требований к качеству продукции, при возрастающих нагрузках и скоростях необходимо разрабатывать новые методы или сочетать уже известные и проверенные. При выборе метода важно учитывать его технологическую, экономическую и экологическую оценки.

3. Анализ литературы показал, что перспективными и универсальными методами, повышающими износостойкость деталей машин, являются методы упрочнения концентрированными потоками энергии, а комбинированная обработка позволяет создать резерв для увеличения эксплуатационных показателей деталей машин, исключить недостатки и получить новые свойства поверхностных слоев.

4. Получение модифицированных поверхностей и поверхностей с масляными карманами дает возможность повысить износостойкость в парах трения. Зарубежный опыт применения таких поверхностей доказал их эффективность.

5. Выбор способов повышения триботехнических свойств необходимо проводить с учетом наследственного влияния режимов обработки на образование зон концентрации напряжений в поверхностном слое деталей с контактными поверхностями трения в жидких средах.

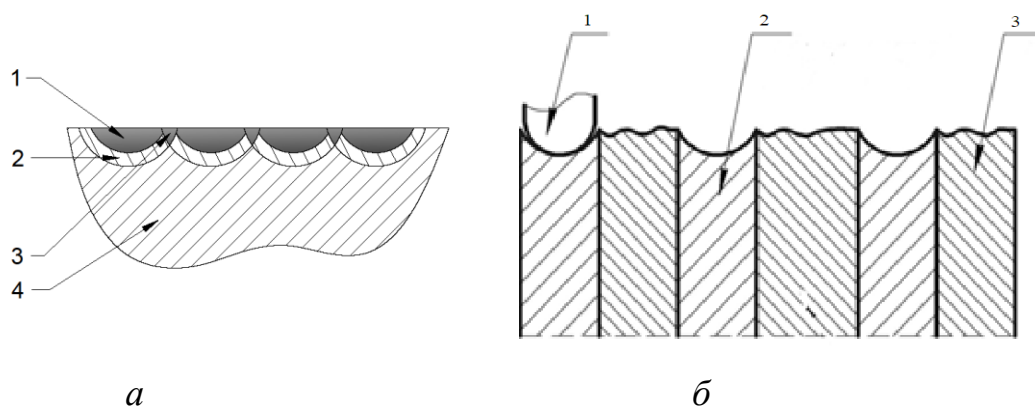
## **Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ НА ПАРАМЕТРЫ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

Согласно проведенному анализу, методы упрочнения концентрированными потоками энергии имеют преимущества и недостатки. Одной из особенностей этих методов является наличие зон отпуска, где наблюдается снижение твердости поверхности.

Анализ методов ППД показал, что их сочетание с химико-термическими и термическими обработками оказывает положительное воздействие на поверхностный слой в различных комбинациях. Поэтому предполагается, что совмещение этих методов может привести к положительному эффекту. Это позволит создать модифицированные поверхности с новыми свойствами и обеспечить резерв для повышения износостойкости пар трения на примере золотников и плунжеров гидравлических систем.

Объединение преимуществ методов упрочняющей и отделочной обработки позволяет сформировать модифицированный поверхностный слой. Например, зоны отпуска после лазерной закалки или электромеханической обработки, сочетаемые с алмазным выглаживанием, могут создавать сжимающие остаточные напряжения, снижать шероховатость поверхности и в некоторых случаях даже устранять необходимость в дополнительном шлифовании.

Для реализации поставленных задач проведено моделирование формирования модифицированного слоя при КО, которое заключается в последовательном применении одного из методов обработки концентрированными потоками энергии (лазерная закалка или электромеханическая обработка) и алмазного выглаживания (рисунок 2.1).



*Рисунок 2.1 – Механизм формирования модифицированного поверхностного слоя при применении процесса 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*

Объединяя преимущества методов упрочняющей (упрочнения КПЭ) и отделочной (ППД) обработок можно предположить, что зоны отпуска после лазерной заковки или ЭМО и других методов, в сочетании с алмазным выглаживанием, образуют новый рельеф поверхности с новыми свойствами – модифицированные поверхности с масляными карманами и можно 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. А попадая в зону отпуска, алмазный выглаживатель образует винтовую канавку (или масляный карман). В этой канавке будут удерживаться смазка, оседать твердые частицы, попавшие в масло (рисунок 2.1. б). 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.

Таким образом, были разработаны процессы КО, которые заключаются в последовательном применении одного из методов упрочнения КПЭ (лазерная закалка или ЭМО) и алмазного выглаживания [279-282].

## **2.1. Теоретическое исследование влияния режимов комбинированной обработки на величину и характер остаточных напряжений в модифицированном поверхностном слое**

Уровень остаточных напряжений представляет собой существенный параметр, оказывающий влияние на качество изделий в различных областях. Следует подчеркнуть, что остаточные напряжения могут и положительно, и отрицательно воздействовать на механические свойства изделий, такие как прочность, жесткость, устойчивость и износостойкость, определяя их производительность при разнообразных условиях и видах нагрузок в процессе эксплуатации.

Характерной особенностью напряжений, возникающих после механической обработки, является их действие преимущественно в поверхностном слое на глубину в несколько десятых долей миллиметра. Опыт эксплуатации подтверждает, что именно эти напряжения могут существенно влиять на износостойкость и прочность детали, особенно при воздействии переменных напряжений [33, 129].

Примером таких напряжений является формирование сжимающих температурных напряжений в поверхностном слое в результате процесса шлифования. Указанные напряжения превышают предел текучести материала, вызывая пластическую деформацию сжатия. После завершения процесса и возврата к нормальной температуре эта деформация сохраняется, приводя к

растяжению поверхностного слоя относительно внутренних слоев, что обуславливает образование в нем растягивающих остаточных напряжений.

Результаты экспериментальных исследований указывают на формирование растягивающих напряжений в поверхностном слое после шлифования. Эти напряжения имеют значение примерно от 40 до 80 кг/мм<sup>2</sup> и охватывают глубину от 20 до 50 мкм.

Растягивающие напряжения могут оказать положительное воздействие на поверхность материала, увеличив его устойчивость к трещинам и улучшая общую прочность. Однако эффекты напряжений могут варьировать в зависимости от материала и конкретных условий обработки.

Технологические остаточные напряжения оказывают существенное влияние на качество и эксплуатационные характеристики металлопродукции [4, 33, 234 и др.]. Существующие методики определения остаточных напряжений в основном имеют экспериментальный характер, часто лишены универсальности, и их применение часто затруднено, что может приводить к значительным погрешностям [33, 128, 168, 234].

Согласно разработанной методике, необходимо теоретически и экспериментально определить параметры качества поверхностного слоя в зависимости от режимов обработки и технологических факторов с учетом влияния технологической наследственности.

Анализ напряжений I рода является ключевым аспектом данного исследования, поскольку их влияние на работоспособность деталей в промышленности является более существенным. Предыдущие исследования в области воздействия остаточных напряжений на детали машин и механизмов внесли значительный вклад в понимание этого явления. Работы таких ученых, как А.Г. Суслов, П.А. Чепа, И.А. Биргер, Л.Г. Колмогоров, А.А. Поздеев, Н.Н. Давиденков, М.М. Кобрин и другие, стали основой для понимания механизмов воздействия остаточных напряжений и их влияния на долговечность и надежность деталей.

В поверхностном слое металла всегда присутствуют различные дефекты, которые могут служить источниками зарождения трещин. Следовательно, надежность деталей в значительной степени зависит от работы распространения трещины. Сжимающие остаточные напряжения, формируемые на поверхностях деталей различными технологическими методами, эффективно препятствуют зарождению и распространению усталостных микротрещин, тем самым повышая их работоспособность. В случае деталей, подвергающихся трению скольжения и сталкивающимся с усталостным и абразивным износом в процессе эксплуатации, крайне важно создать поверхностный слой с сжимающими остаточными напряжениями [5, 8, 100, 234].

Остаточные напряжения сжатия приводят к смещению критических напряжений в область более высоких значений и замедляют процесс инициирования и развития микроповреждений.

Преимуществом комбинированной обработки является независимость величины и характера остаточных напряжений, полученных на предыдущих этапах, от формирования остаточных напряжений при последующей обработке. Это означает, что результаты предыдущих операций не влияют на характеристики остаточных напряжений, получаемых на последующих этапах комбинированной обработки. Такая независимость может быть важной особенностью, поскольку позволяет эффективно комбинировать различные методы обработки с целью достижения определенных свойств поверхности материала. Кроме того, это также может облегчить процесс управления и контроля за производственными операциями, так как изменения в одном этапе не будут существенно влиять на результаты последующих этапов. Независимость остаточных напряжений может быть важным фактором при проектировании и оптимизации технологических процессов, направленных на улучшение свойств материалов и поверхностей деталей. Методы упрочнения концентрированными потоками энергии и ППД независимы друг от друга, однако может наблюдаться технологическое наследство.

Учитывая сложность и трудоемкость экспериментального определения остаточных напряжений, к актуальным задачам можно отнести разработку аналитических методов, способных подтвердить или опровергнуть результаты, полученные экспериментально. Формирование остаточных напряжений при КО подвержено влиянию различных факторов, таких как температура, силовой фактор, а также характер структурных и фазовых превращений.

Фактически остаточные напряжения представляют собой алгебраическую сумму различных компонентов, в частности температурные напряжения, силовые напряжения и структурные напряжения, которые возникают в результате деформаций и превращений структуры материала в процессе обработки. Эти напряжения остаются в материале после завершения обработки и могут влиять на его механические свойства и долговечность [4]:

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

где  $\sigma_{\text{мех}}$  – остаточные напряжения, зависящие от режимов упрочнения концентрированными потоками энергии;  $\sigma_{\text{ф}}$  – остаточные напряжения, зависящие от физико-механических свойств упрочняемых материалов;  $\sigma_{\text{тем}}$  – остаточные напряжения, зависящие от режимов алмазного выглаживания.

Температурные остаточные напряжения формируются при быстром нагреве и быстром охлаждении обрабатываемой поверхности. Этот процесс может вызвать неоднородное расширение и сжатие материала, что приводит к возникновению внутренних напряжений в поверхностном слое детали. В процессе КО внешний слой металла, подвергаемый нагреву, стремится к удлинению, однако этому препятствует более холодный внутренний слой. В результате внешний слой подвергается сжатию, а внутренний – растяжению.

При интенсивном нагреве сила тока может быть достаточной для превышения предела текучести материала. В таких условиях происходит пластическая деформация и сжатие наружного слоя металла. После закалки, внешний слой охлаждается быстрее и стремится сжаться, вызывая напряжения в



материале. Однако этому сокращению будет препятствовать упругонапряженный внутренний слой.

В результате КО во внешнем слое материала могут возникнуть остаточные напряжения. Для определения этих остаточных напряжений используется соответствующая формула [4]

$$\sigma_{\text{тем}}(z) = \alpha E \Delta\theta(z),$$

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

Кроме того, необходимо учитывать наследственное влияние свойств материалов и режимов обработки.

Для расчета максимальной температуры в зоне нагрева можно воспользоваться зависимостью, сделанной в работе А.Ю. Албагачиева и Е.В. Преображенской [4]. Однако эта формула является сложной для инженерных расчетов и ее удалось существенно упростить. В финале получилась следующая зависимость:

$$\Delta\theta(z) = \frac{2\alpha_T(IU)}{\lambda_1 A \sqrt{\pi}} \left\{ \sqrt{at} * e^{\left(\frac{z^2}{4at}\right)} - z \left[ 1 - \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \right] \right\} \quad (2)$$

Большое влияние на формирование температуры будет оказывать мощность, которая возникает при прохождении электрического тока при электромеханической обработке, которую можно записать в виде

$$N = I U.$$

Формула (2) является сложной для расчетов, и можно воспользоваться вариантом для приближенных расчетов:

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

Поскольку величина  $z \left[ 1 - \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right) \right]$  является бесконечно малой и не оказывает существенного влияния на значение температуры на поверхности при КО, ею можно пренебречь.

$\lambda_1, \lambda_2$  – теплопроводность материала детали и инструмента соответственно Вт/мК;  $l_{\text{инс}}$  – длина касания инструмента с обрабатываемой поверхностью (ширина ролика-электрода), мм;  $a$  – температуропроводимость материала детали, м<sup>2</sup>/с;  $t$  – время контакта, с;  $I$  – сила тока, А;  $\alpha_T$  – коэффициент распределения тепловых потоков (коэффициент теплопоглощения Шарона);  $U$  – напряжение, В;  $z$  – текущая координата, м;  $A = l_{\text{инс}} \cdot B$ ;  $B$  – ширина упругого контакта ролика по Герцу [234];  $\operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right)$  – значение функции ошибок.

В процессе комбинированной обработки ширину упругого контакта ролика по Герцу  $B$  можно условно принять равной ширине ролика-электрода.

Поэтому

$$\Delta\Theta(z) = \frac{2\alpha_T(IU)}{\lambda_1 l_{\text{инс}}^2 \sqrt{\pi}} \left( \sqrt{at} e^{\left(\frac{-z^2}{4at}\right)} \right). \quad (4)$$

Рассчитать значение интеграла дополнительной функции ошибок можно по формуле

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-x^2} dx.$$

Для нахождения коэффициента распределения тепловых потоков  $\alpha_T$  можно воспользоваться [148, 149, 289]

$$\alpha_T = \frac{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1 + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}}}.$$

Используя формулу из работы [8] определяем  $\sigma_\Phi$ :

$$\sigma_\Phi = -E \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right), \quad (5)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность материала до и после обработки, кг/м<sup>3</sup>.

Формула (5) указывает на влияние объема и плотности вновь образовавшейся фазы на характер остаточных напряжений. Если эта фаза имеет

большой объем и меньшую плотность по сравнению с исходной фазой, то на поверхности возникают остаточные напряжения сжатия. В противном случае, когда новообразованная фаза имеет большую плотность, остаточные напряжения будут растягивающими.

Это важно при анализе структурно-фазовых превращений, так как остаточные напряжения могут существенно влиять на свойства и работоспособность материала.

В ситуации, когда плотность материала после обработки неизвестна, для расчета остаточных напряжений, вызванных  $\gamma \rightarrow \alpha$  переходом в поверхностном слое аустенитных сталей после КО, можно воспользоваться формулой

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{3(1-\mu)} \frac{(P_{2\alpha} - P_{1\alpha})(\rho_{\gamma} - \rho_{\alpha})}{\rho_{\gamma} - P_{2\alpha}(\rho_{\gamma} - \rho_{\alpha})}, \quad (6)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $P_{1\alpha}$  – относительное содержание  $\alpha$ -фазы в поверхностном слое детали до обработки, %;  $\rho_{\gamma}$  и  $\rho_{\alpha}$  – плотность  $\gamma$ - и  $\alpha$ -фаз соответственно;  $P_{2\alpha}$  – относительное содержание  $\alpha$ -фазы в поверхностном слое детали после обработки, %.

В целях упрощения вычислений используем формулу (5) – это допустимо, согласно [8].

Механические остаточные напряжения образуются под воздействием усилий со стороны инструмента при ЭМО и алмазном выглаживании. Сжатие слоев металла вызывает упругопластическую деформацию, что приводит к увеличению плотности дислокаций и объема деформированного слоя. Нижние слои материала сопротивляются упругопластической деформации, вызванной сжатием в поверхностном слое. В результате такого взаимодействия в поверхностном слое формируются остаточные напряжения, которые могут быть определены по формуле

$$\sigma_{\text{мех}}(z) = -\frac{P_g}{\pi} * \left[ \frac{3}{2(l_{\text{инс}}^2 + z^2)} - \frac{1,2}{l_{\text{инс}}^2} \ln \left( \frac{z}{2l_{\text{инс}}} \right) - \frac{3}{10l_{\text{инс}}^2} \right], \quad (7)$$

где  $z$  – текущая координата, м;  $P_g$  – приведенная сила, Н;

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

здесь  $P_i$  – сила прижима ролика – электрода и алмазного выглаживателя, Н;  $l_{\text{инс}}$  – длина касания инструмента с обрабатываемой поверхностью (ширина ролика – электрода), мм.

Учитывая, что площадь контакта алмазного выглаживателя и детали значительно меньше, чем площадь контакта электрода – инструмента и детали, все расчеты будут проводиться с учетом большего значения.

Вследствие структурных и фазовых превращений в металле идет образование структурно-фазовых остаточных напряжений в поверхностном слое детали [306-308, 325, 326]. Пластическая деформация увеличивает внутреннюю энергию материала, которая влияет на различные процессы, такие как фазовые превращения, и может существенно изменить структуру и свойства материала. Протекание фазовых превращений под воздействием внутренней энергии может привести к изменению микроструктуры материала и, следовательно, к формированию остаточных напряжений. Это явление имеет значение при рассмотрении воздействия пластической деформации на свойства и поведение материалов.

Подставляя формулы (3), (5) и (7) в формулу (1), получаем формулу для расчета остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое детали после комбинированной обработки:

$$\sigma_{\text{ост}} = \alpha E \frac{2\alpha_T (IU)}{\lambda_2 l_{\text{инс}}^2 \sqrt{\pi}} \left( \sqrt{at} e^{\left(\frac{-z^2}{4at}\right)} \right) - \frac{P_g}{\pi} * \left[ \frac{3}{2(l_{\text{инс}}^2 + z^2)} - \frac{1,2}{l_{\text{инс}}^2} \ln\left(\frac{z}{2l_{\text{инс}}}\right) - \frac{3}{10l_{\text{инс}}^2} \right] - E \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right). \quad (8)$$

Для случая применения лазерной закалки для упрочняющей обработки остаточные напряжения будут рассчитываться с использованием зависимости (1). Тем не менее температурные, структурно-фазовые и механические остаточные напряжения будут иметь свои особенности проявления.

В соответствии с рекомендациями [293, 267] максимальная температура в зоне упрочнения будет зависеть от свойств материала (коэффициента отражения) и от мощности лазерного излучения. Уравнение теплопроводности приобретает следующий вид:

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + V \text{grad} T \right) - \text{div}(\lambda \text{grad} T) = q(r, t),$$

где  $\rho$  – плотность;  $c$  – удельная теплоёмкость;  $\lambda$  – теплопроводность;  $V$  – скорость перемещения среды относительно источника тепла;  $q(x, y)$  – плотность мощности поверхностного источника тепла,  $\text{grad} T$  – градиент температуры (вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры и численно равный изменению температуры на единицу длины);  $-\text{div}$  – дифференциальный оператор (дивергенция).

Граничные условия для данной задачи записываются в следующем виде [291]:

$$\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q;$$

$$(T)_{z \rightarrow \infty} = T_0;$$

$$T(z, t) = \frac{q}{\lambda} 2(at)^{\frac{1}{2}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp \left( -\frac{z^2}{4at} \right) - \frac{z^2}{(2at)^{\frac{1}{2}}} \left[ 1 - \text{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{at}} \right) \right] \right\}.$$

Преобразовав зависимость, получаем:

$$\Delta \theta(z) = \frac{2(1-R)qz}{\lambda} \left( \sqrt{at} \text{erfc} \left[ \frac{z}{2\sqrt{at}} \right] - \sqrt{a(t-\tau)} \text{erfc} \left[ \frac{z}{2\sqrt{a(t-\tau)}} \right] \right), \quad (9)$$

где:  $R$  – коэффициент отражения материала;  $q$  – плотность мощности лазерного излучения, кВт/м<sup>2</sup>,  $q = P_{\text{л}}/s$ ,  $P_{\text{л}}$  – мощность лазерного излучения, кВт;  $s$  – площадь воздействия, м<sup>2</sup>,  $z$  – текущая координата.

Для простоты расчета используем зависимость:

$$\sigma_{\text{темн}}(z) = \alpha E \frac{2(1-R)qz}{\lambda}. \quad (10)$$

Структурно-фазовые остаточные напряжения рассчитаем по формуле (5).

Режимы алмазного выглаживания определяют значение  $\sigma_{\text{мех}}(z)$ :

$$\sigma_{\text{мех}}(z) = -\frac{P}{\pi} \cdot \left[ \frac{3}{2(r^2+z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln \left( \frac{z}{2r} \right) - \frac{3}{10r^2} \right], \quad (11)$$

где  $r$  – радиус алмазного выглаживателя;  $P$  – сила прижима инструмента.

Подставив все составляющие в формулу (1), получаем:

$$\sigma_{\text{ост}} = \alpha E \frac{2(1-R)qz}{\lambda} - \frac{P_g}{\pi} * \left[ \frac{3}{2(r^2+z^2)} - \frac{1,2}{r^2} \ln\left(\frac{z}{2r}\right) - \frac{3}{10r^2} \right] - E \left( 1 - \sqrt[3]{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \right), \quad (12)$$

где  $z$  – текущая координата, м;  $P_g$  – сила прижима алмазного выглаживателя, Н;  $r$  – длина касания инструмента с обрабатываемой поверхностью (радиус алмазного выглаживателя), мм.

Использование компьютерной программы для вычисления параметров остаточных напряжений на основе формул (8) и (12) с использованием программы Visual Studio 2017 C# обеспечивает удобство и эффективность в проведении расчетов. Работающая на основе таблицы программа предоставляет значения параметра остаточных напряжений в зависимости от различных режимов КО, что представляет собой важный инструмент для анализа и оптимизации процесса (рисунок 2.2).

$\alpha t$	1.3
$P_g, \text{ Н}$	450
$V_r, \text{ м/с}$	0.4
$I, \text{ А}$	2700
$U, \text{ В}$	3
$\rho_1$	8150
$\rho_2$	7760
$l_{\text{инс}}, \text{ м}$	0.003
$a, \text{ м}^2/\text{с}$	10
$t, \text{ с}$	0.1
$z, \text{ м}$	0.0005
$\lambda, \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$	32
<b>Рассчитать</b>	
$\sigma_{\text{ост}}, \text{ МПа}$	-1907.12
<b>Назад</b>	

*Рисунок 2.2 – Таблица для расчета значений остаточных напряжений в поверхностном слое образцов (пример расчета при заданных режимах комбинированной обработки)*

В таблице 2.1 представлены значения остаточных напряжений в зависимости от режимов обработки. Глубина залегания остаточных напряжений (упрочнения) до 1,4 мм.

Таким образом, следует учитывать температурные составляющие в процессе расчета остаточных напряжений в поверхностном слое, особенно при

наличии неравномерных по сечению фазовых превращений. Алмазное выглаживание оказывает положительное влияние на величину и знак остаточных напряжений.

Таблица 2.1 – Результаты расчетов остаточных напряжений по формулам (8, 12 )

Методы КО	Режим обработки	Остаточные напряжения, МПа
ЭМО 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
	$I=2000 \text{ А}; S=2 \text{ мм/об.}; I - V=3,2 \text{ м/мин};$ 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
	$I=3000 \text{ А}; S=3,2 \text{ мм/об.}; I - V= 2,1 \text{ м/мин};$ 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
	$N = 1,2 \text{ кВт}; V = 20 \text{ мм/с}; d = 4 \text{ мм};$ сила прижима $P = 200 \text{ Н}; S = 0,02 \text{ мм/об.}, r = 0,5 \text{ мм}$	- 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

Теоретические зависимости (8) и (12) позволяют с высокой степенью точности определить величину и знак остаточных напряжений после КО. Это важный инструмент для предварительной оценки и оптимизации процессов

обработки, а также для понимания влияния различных факторов на формирование остаточных напряжений в материале.

## **2.2. Теоретическое исследование влияния режимов комбинированной обработки на шероховатость модифицированного поверхностного слоя**

Эмпирические оценки, основанные на связях между параметрами качества поверхностного слоя, режимами обработки и параметрами инструмента, играют важную роль в технологических исследованиях. Эмпирические формулы позволяют предсказывать характеристики процесса обработки, учитывая конкретные технологические условия и требования к качеству деталей.

Одним из способов увеличения ресурса работы деталей является снижение шероховатости поверхности. Параметры шероховатости зависят от различных факторов, а уменьшение их значений может быть достигнуто путем оптимизации режимов обработки, выбора подходящего инструмента и с помощью других технологических решений, например:

- использования физико-механических свойств материалов, из которых изготовлены детали;
- применения геометрических параметров инструмента;
- повышения прочности и жесткости системы СПИД;
- изменения режимов обработки [230, 232].

Исследования воздействия шероховатости рабочих поверхностей на их износостойкость показали, что минимальная шероховатость не всегда гарантирует высокую стойкость к износу [168]. При сближении твердых поверхностей происходит молекулярное взаимодействие, которое приводит к увеличению сцепления между ними. Это усиливает износ поверхностей. В работе [182] приведены рекомендуемые значения шероховатости опорные шейки и колеса для



различных условий функционирования поверхности оборудования сельхозтехники:

- Ra 0,32 мкм для опорных шеек валов под подшипники скольжения;
- Ra 0,8 мкм для опорных шеек валов под подшипники качения;
- Ra 1,6 мкм для зубчатых колес.

Во многих случаях изнашивание носит усталостный характер, в частности, авторами работ [26, 70, 141, 142, 182, 230] установлено, что наибольшее влияние на изнашивание оказывает не значение шероховатости Ra или Rz, а угол наклона боковых поверхностей неровностей, их шаг и радиус закругления высот неровностей.

Создание модифицированного слоя на поверхности деталей снизит потери на трение и уменьшит надирь, задиры и схватывание, снизит материалоемкость, повысит надёжность и долговечность, сократит длительность приработки, а также позволит применить расчётные методы нормирования и технологического обеспечения микрогеометрии [72, 230, 231 и др.] (рисунок 2.3).

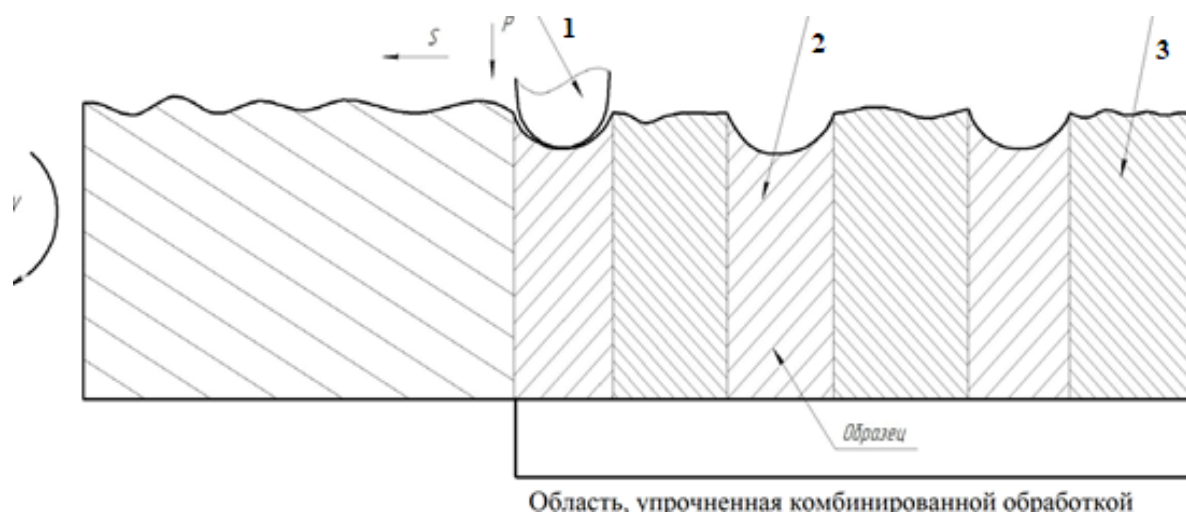


Рисунок 2.3 – Получение поверхности с регулярным микрорельефом при комбинированной обработке: 1 – алмазный выглаживатель; 2 – масляные карманы; 3 – область с оптимальной геометрией микронеровностей (модифицированная поверхность)

В целях разработки математической модели зависимости шероховатости поверхности от режимов КО (силы тока  $I$ , силы прижима ролика-электрода  $P_1$ , скорости вращения детали или перемещения источника лазерного излучения  $V$ , подачи  $S$ , мощности источника лазерного излучения  $Q$ , диаметра источника лазерного излучения  $d$ , ширины ролика-электрода  $h$ , давления алмазного выглаживателя  $P_2$ , радиуса сферы алмазного выглаживателя  $r$  и др.) был поставлен многофакторный эксперимент.

Обобщенные значения исследуемых факторов в действительных значениях, полный план матрицы планирования эксперимента выбирались на основании расчетов, возможностей используемого оборудования, предварительных опытов и опубликованных данных о проведенных ранее исследованиях. Обработка экспериментальных данных дала возможность оценить зависимость среднеарифметического отклонения профиля от режимов комбинированной обработки в виде регрессионной модели:

$$Ra = f(Ra_{исх}, I, P_1, V, S, l, P_2, r, d, Q). \quad (13)$$

В работе [34] шероховатость поверхности после теплового воздействия рекомендовано рассматривать как функцию:

$$Ra = f(Ra_{исх}, I, P_1, V, S, S_{кон}, \sin \varphi),$$

где  $S_{кон}$  – площадь контакта теплового источника с поверхностью детали, мм;  $\sin \varphi$  – угол наклона теплового источника к обрабатываемой поверхности;  $f$  – коэффициент трения.

Используя рекомендации [230, 232], можно записать

$$Ra = Ra_{исх1}(P_2^x r^y), \quad (14)$$

где  $Ra_{исх1}$  – шероховатость после обработки концентрированными потоками энергии, мкм;  $P_2$  – сила прижима алмазного выглаживателя к поверхности образца, Н;  $r$  – радиус алмазного выглаживателя, мм;  $x, y$  – значения степеней.

$$Ra = 0,006 Ra_{исх}^{1,03} I^{-1,03} P_1^{-0,4} V^{0,37} S^{0,35} h^{0,35} (tg \varphi)^{-0,68}. \quad (15)$$

Для удобства расчетов обозначим (15) как С.

При КО на поверхность будут действовать последовательно два инструмента: при упрочняющей и при отделочной технологиях. Поэтому, используя выражение (13), шероховатость после КО можно представить в виде

$$Ra = K Ra_{исх}^a I^b P^c_l V^d, S^e, S^k_{кон}, \sin \varphi^i, \quad (16)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от материала детали и способов упрочнения поверхностного слоя;  $a, b, c, d, e$  – степени параметров КО.

Задача сводится к нахождению степеней  $a, b, c, d, e$  и др. Для решения этой задачи запишем:

$$\begin{aligned} \ln Ra &= \ln C + x \ln P_2 + x \ln P_2^2 + y \ln r + y \ln r^2 \\ \ln Ra &= \ln C + x \ln P_i + y \ln r_j \\ \sum_{i_k=1}^k \sum_{n=1}^{n_{ij}} (\ln Ra_{ik} - \ln C - x \ln P_i - y \ln r_j)^2 &\rightarrow \min. \end{aligned}$$

Или упростим:

$$\sum_{m=1}^n (C_m - x a_m - y b_m)^2 \rightarrow \min.$$

Найдя производную, получаем:

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^n 2(C_m - x a_m - y b_m)(-a_m) = 0 \\ \sum_{m=1}^n 2(C_m - x a_m - y b_m)(-b_m) = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^n a_m^2 + a_m b_m y - C_m a_m = 0 \\ \sum_{m=1}^n a_m b_m x + b_m^2 y - C_m b_m = 0 \end{cases}$$

Проведем замену:

$$\begin{cases} Ax + Ly = U \\ Lx + By = V \end{cases} \quad (17)$$

Выразим  $A, B$  и  $L$  из выражения (14)

$$A = \sum a_m^2; B = \sum b_m^2; L = \sum a_m b_m.$$

Подставив полученные сокращения, получим значения  $x$  и  $y$ :

$$y(L^2 - AB) = LU - VA$$

$$y = \frac{LU - VA}{L^2 - AB},$$

$$x = \frac{LV - BU}{L^2 - AB}.$$

Проведя обратную замену, получим искомые значения степеней для выражения (16).

Окончательная формула расчета шероховатости поверхности после КО для случая применения ЭМО имеет вид

$$Ra = 0,006 Ra_{исх}^{1,03} I^{0,03} P_1^{-0,4} V^{0,37} S^{0,35} l^{0,3} P_2^{-0,7} r^{0,12}, \quad (18)$$

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

Шероховатость при лазерной закалке зависит от плотности мощности лазерного излучения, скорости перемещения источника лазерного излучения и частоты вращения детали. Уменьшение шероховатости поверхности с увеличением частоты вращения образцов при постоянной скорости перемещения источника лазерного излучения объясняется уменьшением шага спиральной лазерной обработки, что, соответственно, приводит к уменьшению шага неровностей профиля. Микрогеометрия поверхности упрочненного образца формируется при выходе поверхностных оплавленных слоев металла из зоны взаимодействия с лазерным излучением и фиксируется при снижении их температуры ниже температуры кристаллизации.

Для КО с применением в качестве упрочняющей обработки лазерной закалки шероховатость поверхности рассчитываем так же, как для КО с применением ЭМО:

$$Ra = 0,0027 Ra_{исх}^{1,3} P_1^{1,03} V^{0,7} V_1^{0,4} d^{0,3} P_2^{-0,54} r^{0,1}, \quad (19)$$

где  $Ra_{исх}$  – шероховатость поверхности после механической обработки резанием, мкм;  $P_2$  – сила прижима алмазного выглаживателя, Н;  $r$  – радиус сферы алмазного выглаживателя, мм;  $N$  – мощность источника лазерного излучения, кВт;  $V$  –

скорость перемещения источника лазерного излучения, мм/с;  $V_1$  – скорость обработки, м/мин;  $d$  – диаметр лазерного луча, мм.

Увеличение плотности мощности излучения при постоянном времени взаимодействия с металлом приводит к повышению температуры поверхности. Под воздействием сил поверхностного натяжения выступы расплавленного металла успевают сгладиться до завершения процесса кристаллизации. Однако при повышении частоты вращения детали центробежные силы начинают превышать силы поверхностного натяжения, что приводит к разбрызгиванию металла оплавленного слоя. Это отрицательно сказывается на качестве упрочняемой поверхности.

Для упрощения расчетов была представлена компьютерная программа. Путем внесения данных в таблицу, программа выдаст значение шероховатости в зависимости от режимов комбинированной обработки (рисунок 2.4).

Программа для расчета

**Расчет шероховатости поверхности после комбинированной обработки**

<b>Ra исх, мкм</b>	3,168
<b>L, мкм</b>	2000
<b>P1, Н</b>	300
<b>V, м/мин</b>	2
<b>S, мм/об</b>	2
<b>h, мм</b>	3
<b>P2, Н</b>	250
<b>g, м</b>	1
	<b>Рассчитать</b>
<b>Ra</b>	1,610446
	<b>Назад</b>

*Рисунок 2.4 – Пример расчета шероховатости по разработанной программе*

В таблице 2.2 представлены результаты расчетов шероховатости.

Таблица 2.2 – Результаты расчетов шероховатости по формулам (18), (19)

Методы КО	Режимы обработки	Шероховатость $R_a$ , мкм
ЭМО 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	$N = 1,2 \text{ кВт}; V = 15 \text{ мм/с}; d = 4; P = 250 \text{ Н}; S = 0,02$ $\text{мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	1,402555
	$N = 1,3 \text{ кВт}; V = 10 \text{ мм/с}; d = 2; P = 200 \text{ Н}; S = 0,04$ $\text{мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	1,0001
	$N = 1,4 \text{ кВт}; V = 25 \text{ мм/с}; d = 5; P = 220 \text{ Н}; S = 0,02$ $\text{мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	0,9433
	$N = 1,2 \text{ кВт}; V = 20 \text{ мм/с}; d = 5; P = 200 \text{ Н}; S =$ $0,03 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	0,983333

Таким образом, установлена взаимосвязь режимов КО с качеством поверхности модифицированного слоя. Полученные зависимости позволяют прогнозировать и управлять режимами обработки на этапе технологической подготовки производства, получить модифицированные поверхности для изготовления детали с контактными поверхностями трения в жидких рабочих средах на примере золотниковых и плунжерных пар для различных машин и механизмов.

### 2.3. Теоретическое исследование влияния режимов комбинированной обработки на глубину масляного кармана

Зоны отпуска после лазерной закалки или электромеханической обработки в сочетании с алмазным выглаживанием создают на поверхности детали модифицированный слой с винтовыми канавками для удержания смазки на поверхностях трения или удержания продуктов износа в процессе эксплуатации золотниковых и плунжерных пар [282, 287].

В работе выполнен теоретический расчет параметров винтовой канавки в зависимости от режимов КО.

Обозначим глубину вдавливания алмазного наконечника в зонах отпуска  $b$ . Тогда, (рисунок 2. 5), глубину масляного кармана можно представить как функцию независимых параметров: твердости, модуля упругости и коэффициента Пуассона материала, радиуса сферы алмазного выглаживателя и силы прижима индентора алмазного выглаживателя:

$$b = f(HV, E, \mu, r, P)$$

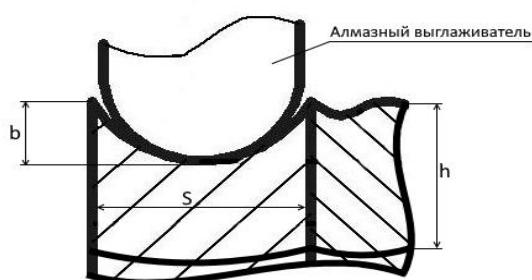


Рисунок 2.5 – Схема для расчета параметров масляного кармана:

$b$ –глубина масляного кармана;  $S$ –ширина масляного кармана (ширина зоны отпуска);  $h$ –глубина упрочнения после комбинированной обработки

Одной из первых зависимостей для расчета глубины упрочнения является формула, полученная С.Г. Хейфецем [265], на основе задачи с ограничением: сила деформирования рассматривается как приложенная к точке, но при этом не рассматриваются особенности распределения контактных напряжений между деформирующим инструментом и обрабатываемой поверхностью:

$$h_y = \sqrt{\frac{P_y}{2 \cdot \sigma_T}}, \quad (20)$$

где  $h_y$ –глубина упрочнения, мм;  $P_y$ –сила деформирования, приложенная в центре площади контакта Н;  $\sigma_T$ –предел текучести материала детали.

Однако зависимость (20) справедлива не для всех случаев, например, при диаметрах деталей свыше 10 мм результаты теоретических расчетов и практических измерений не совпадают на 30...50 %.

Более точная зависимость представлена в работе [42]:

$$h_y = \frac{1}{1+0,07R_{\text{пр}}} \sqrt{\frac{P}{2*\sigma_T}}, \quad (21)$$

где  $R_{\text{пр}}$  – приведенный радиус.

$$R_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{r_p}},$$

где  $R$  – радиус детали, мм;  $r_p$  – радиус упрочняющего инструмента, мм, 0,07 коэффициент, 1/м [210].

Для снижения расхождений в формуле (20) расчет глубины упрочнения можно вести по формуле

$$h_y = \sqrt{\frac{3P}{2\pi*\sigma_T}}.$$

При известном значении давления  $P$ , можно записать [207]

$$h = \sqrt{\frac{P \mu}{2\pi HV}} \quad (22)$$

где  $P$  – сила деформирования, Н;  $HV$  – твердость поверхностного слоя;  $\mu$  – коэффициент Пуассона.

В работе [206] описаны процессы, которые протекают при пластической деформации. Сделаем допущение: среднее давление сопротивления внедрению или среднее давление течения (предел текучести  $\sigma_T$ ) на поверхности контакта остается постоянным. Тогда процесс взаимодействия алмазного выглаживателя с закаленной металлической поверхностью можно описать аналитически:

$$P = \pi\sigma_T(2rh - h^2), \quad (23)$$

где,  $\sigma_T$  – предел текучести материала заготовки;  $r$  – радиус индентора, мм;  $h$  – глубина отпечатка, мм.

Глубину отпечатка выразим из формулы (23):

$$h^2 - 2rh - \frac{P}{\pi\sigma_T} = 0.$$



Решая квадратное уравнение, получаем:

$$h = r + \sqrt{r^2 - \frac{P}{\pi \sigma_T}}.$$

Поскольку поверхность предварительно закалена до высокой твердости с зонами отпуска, необходимо учитывать физические свойства материалов, геометрию упрочняющего инструмента

Используя рекомендации, изложенные в работе [19] и полученные уравнения, можно рассчитать глубину масляного кармана:

$$b = 1,3 r \left( P \frac{(1-\mu^2)HV}{E \sigma_T S^2} \right)^{2/3}, \quad (24)$$

где  $HV$ —твердость поверхностного слоя по Виккерсу, кгс/мм<sup>2</sup>;  $E$ —модуль упругости материала;  $\mu$ —коэффициент Пуассона;  $r$ —радиус сферы алмазного выглаживателя,  $S$  - шаг спирали, мм. (рисунок. 2. 5).

Шаг спирали можно определить по рекомендациям из работы [267]:

$$S = \frac{60V}{n},$$

где  $V$ —скорость перемещения источника при обработке концентрированными потоками энергии, мм/с;  $n$  — частота вращения детали, об/мин .

Смазывающая способность поверхности определяется не только количеством масла, находящимся в масляном кармане, но и условиями смазывания, которые зависят от плотности рельефа. Чем она выше, тем меньше размеры контурных площадок контакта и лучше подача масла к элементарным контактам. Комбинированием схем упрочнения и выглаживания можно в широком диапазоне регулировать характеристики микрогеометрии поверхностей, улучшая смазываемость, и создать резерв для повышения эксплуатационного показателя — износостойкости.

## 2.4. Теоретическое исследование влияния режимов комбинированной обработки на глубину упрочнения модифицированного поверхностного слоя

Для выводов зависимости глубины упрочнения от режимов КО воспользуемся известными выражениями [298, 337, 338].

В предлагаемом варианте КО на глубину упрочнения будут оказывать влияние только режимы обработки концентрированными потоками энергии, режимы алмазного выглаживания не будут оказывать существенного влияния, поэтому для расчета глубины упрочнения режимы алмазного выглаживания не учитываем.

При этом необходимо указать, что некоторые вопросы, связанные с расчетом глубины упрочнения после лазерной закалки в полной мере решены в работах А.Г. Григорьянца, И.Н. Шиганова, Н.А. Смирновой, Н.А. Чичинева, С.М. Горбатюка, Т.В. Тарасовой и др. [17, 18, 78, 170, 267, 279 и др.]. Поэтому для составления зависимости будут учтены эти результаты. Для случая КО при выводе теоретической зависимости необходимо принять допущения.

При варианте КО, когда в качестве упрочняющей обработки применяли ЭМО, глубина упрочнения  $h$  является функцией параметров:

$$h = f(\eta, I, U, P, V, l_{\text{инс}}, \rho, T_{\text{ф}}, c, \lambda, C, f),$$

где  $T_{\text{ф}}$  – температура фазового превращения металла (точка  $A_{c3}$ );  $\lambda$  – теплопроводность материала детали;  $V$  – скорость вращения детали, м/мин;  $f$  – коэффициент трения;  $C$  – комплексный коэффициент, зависящий от трения скольжения, качества взаимодействующих поверхностей, формы взаимодействующих поверхностей;  $U$  – напряжение, В;  $P$  – сила прижатия инструмента при обработке, Н;  $I$  – сила тока, А;  $c$  – удельная теплоемкость упрочняемого металла,  $l_{\text{инс}}$  – ширина контакта, мм,  $\eta$  – коэффициент, учитывающий потери во вторичной цепи трансформатора;  $\eta = 0,12 \dots 0,43$ ;  $\rho$  – плотность материала детали.

Методом планирования эксперимента установлены наиболее значимые факторы и менее значимые факторы, которые не будут оказывать существенного влияния на глубину упрочнения.

При расчете глубины упрочнения можно воспользоваться методом Рэлея [28]:

$$h = C_l \lambda^e a^f t^h q^g T_{\text{пл}}^m T_{\text{зак}}^n, \quad (25)$$

где  $C_l, e, f, h, g, n, m$  — константы, устанавливаемые экспериментально.

Зависимость глубины упрочнения от режимов КО носит нелинейный характер, поэтому функцию отклика можно представить в виде полинома третьей степени. Для определения коэффициентов уравнения регрессии использовался ортогональный композиционный план третьего порядка, содержащий 15 точек. После КО из образцов изготавливались микрошлифы и с помощью твердомера TUKON 2500 с перекрытием при вдавливании пирамидой микрорельефа профиля определялась глубина упрочнения. Для повышения достоверности экспериментальных данных в каждой точке плана проводили три повторных измерения. Таким образом, было исследовано 45 образцов.

Обобщенные значения исследуемых факторов в действительных значениях приведены в таблице 2.3, полный план матрицы планирования эксперимента представлен в таблице 2.4.

В результате обработки данных матрицы  $2^3$  получена математическая модель процесса КО.

Отсюда получим:

$$h = 77,8 + 18x_1 + 13x_1x_2 + 6,8x_1x_3 + 6,4x_1x_2x_3. \quad (26)$$

Однако по зависимости (3) можно определить глубину упрочнения с невысокой точностью.

Таблица 2.3 –Исследуемые факторы в действительных значениях

Уровень	Фактор процесса		
	Сила тока $I$ , А	Сила прижатия инструмента при обработке $P$ , Н	Скорость вращения детали $V$ , м/мин
Верхний	3200	350	3,2
Нижний	1000	200	1,1
Основной	2500	250	2,5
Интервал варьирования	100	25	0,5
Кодовые обозначения.	$X_1$	$X_2$	$X_3$

Таблица 2.4 – Полный план планирования эксперимента по глубине упрочнения

Значение факторов в кодовых обозначениях	Комбинация произведений факторов в кодовых обозначениях				Действительное значение параметра оптимизации по реализации эксперимента			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$
1	+	-	-	-	+	+	+	-
2	+	+	-	-	-	-	+	+
3	+	-	+	-	-	-	-	+
4	+	+	+	-	+	-	-	-
5	+	-	-	+	+	-	-	+
6	+	+	-	+	-	+	-	-
7	+	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+	+

Представленные результаты теоретических и эмпирических исследований влияния режимов КО на параметры модифицированного поверхностного слоя открывают принципиально новые возможности при управлении свойствами поверхностных слоев, в том числе:

- подбор режимов для оптимальной глубины упрочнения на этапе технологической подготовки производства;

- снижение потерь на трение, уменьшение числа надиров, задиров и схватываний, повышение надёжности и долговечности, сокращение длительности приработки благодаря полученному микрорельефу поверхности;
- применение расчётных методов нормирования и технологического обеспечения микрогеометрии поверхностных слоев;
- регулирование характеристик микрогеометрии поверхностей комбинированием режимов упрочнения и выглаживания в широком диапазоне, в целях улучшения смазываемости и повышения эксплуатационного показателя — износостойкости золотников и плунжеров.

После завершения вычислений, связанных с получением оценок коэффициентов регрессии, проверяем адекватность полученного уравнения. Для того, чтобы уравнение регрессии адекватно описывало результаты экспериментов с определенной доверительной вероятностью требуется выполнение следующего условия:

$$F < F_{таб}. \quad (27)$$

Результаты проверки показали адекватность представленной модели.

## Выводы по 2 главе

1. 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 усиливают положительные свойства - на поверхности образуются сжимающие остаточные напряжения.

2. Полученные зависимости позволяют прогнозировать и управлять режимами обработки на этапе технологической подготовки производства,

получить модифицированные износостойкие поверхности для изготовления деталей с контактными поверхностями трения в жидких средах на примере золотниковых и плунжерных пар и создать резерв для повышения их износостойкости.

3. Значение шероховатости поверхности после КО позволяет исключить операцию шлифования из общего технологического процесса и можно и снизить количество термических прижогов и трещин, снижающих износостойкость в процессе эксплуатации деталей.

## Глава 3. ОБЩИЕ И ЧАСТНЫЕ МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 3.1. Программа научного исследования. Методика проектирования процессов КО

В диссертационной работе была разработана программа научного исследования. Последовательность решения задач научного исследования представлена на рисунке 3.1.

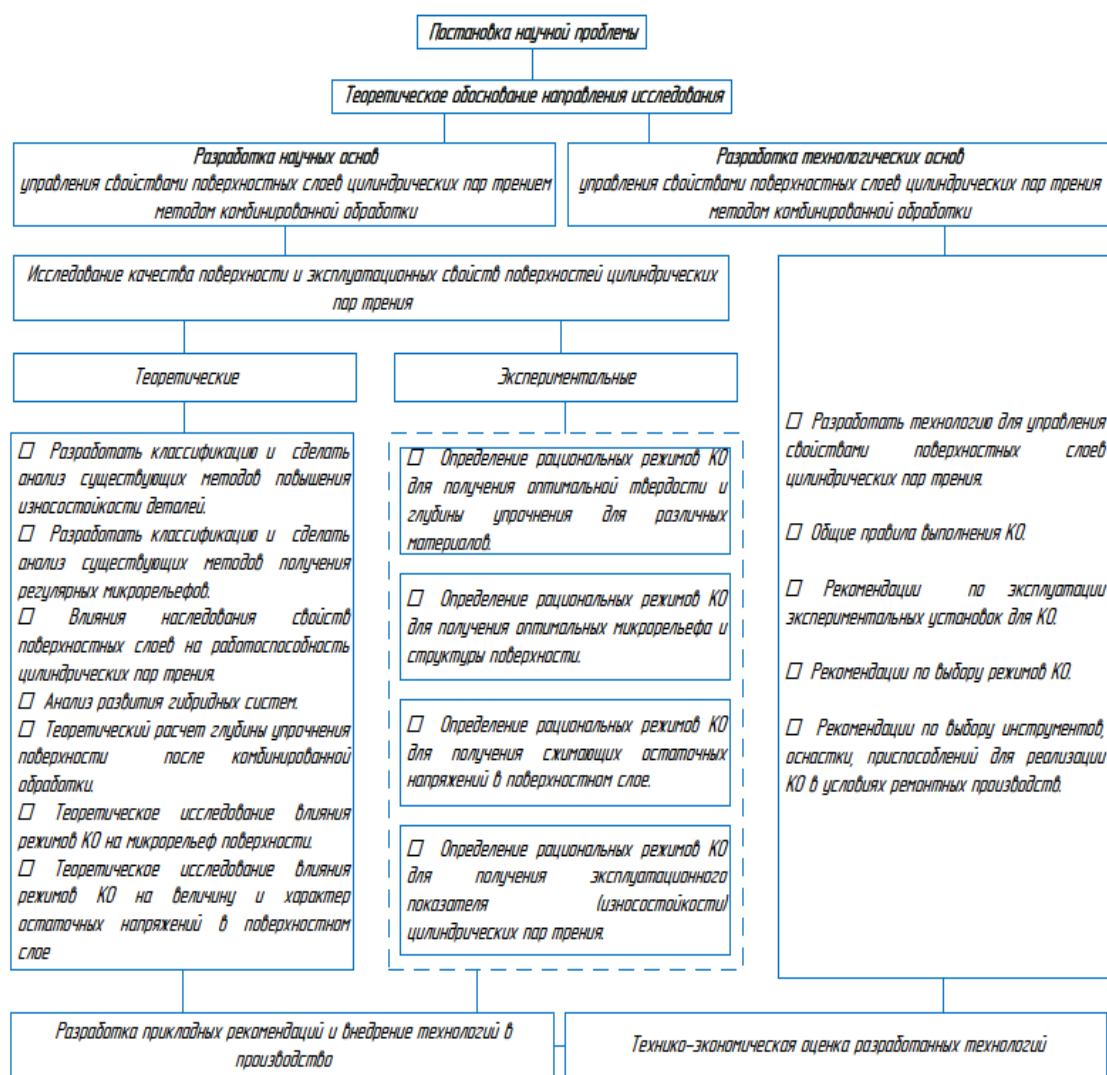


Рисунок 3.1. — Программа научного исследования

В соответствии с задачами, поставленными в 1 главе, необходимо разработать методику проектирования процессов КО с применением методов упрочнения КПЭ и ППД.

Комбинированные процессы обработки представляют собой сочетание различных технологических операций или приемов, направленных на усиление положительных качеств или снижение негативных аспектов, необходимых для изготовления детали или ее последующей эксплуатации. Путем комбинирования тепловых, магнитных, химических и механических воздействий были разработаны процессы обработки, способствующие улучшению эксплуатационных, технологических, экономических и других характеристик поверхностных слоев.

Эффективность комбинированной обработки подтверждена в работах В.Н. Подураева, М.Л. Хейфеца, Е.В. Смоленцева, В.П. Смоленцева, А.М. Кадырметова, А.И. Болдырева, Г.А. Сухочева, С.В. Усова, А.Г. Суслова, А.Н. Михайлова, Б.П. Саушкина, А.В. Киричика и др. Существует несколько подходов к разработке процессов комбинированной обработки (КО) и несколько определений.

В.Н. Подураев [192] выполнил классификацию способов КО деталей резанием. В основу классификации были положены характеристики:

- тип энергии;
- способ подвода энергии;
- вид физико-химического механизма;
- схема формообразования.

При этом под КО подразумевалось использование одновременно нескольких способов воздействия на заготовку.

А.Н. Михайлов [167] 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 несмотря на совершенствование. Поэтому



рациональнее использовать комбинированные способы воздействия. А.Н. Михайлов приводит следующее определение: КО – сочетание двух и более различных методов обработки для выполнения одной технологической операции. При этом энергетические воздействия будут следующего различного характера:

- распределенные;
- концентрированные;
- пульсирующие;
- постоянные и др.

В работах А.Н. Михайлова и др. [167, 215, 223, 235, 240] доказано, что КО снижают энергетические затраты в 1,5–2 раза и повышают производительность.

В.П. Смоленцев и Е.В. Смоленцев [218-224] предложили классификацию и методику проектирования КО с наложением электрического поля. В.П. Смоленцев и Е.В. Смоленцев считают, что комбинированные методы обработки (КМО) – это сочетание различных технологических приемов, при которых происходит усиление положительных качеств при изготовлении или эксплуатации деталей.

А.И. Марков [162] разработал классификацию и методику проектирования КМО с применением ультразвука.

А.Г. Суслов, А.В. Киричек и др. [115-120, 231, 232] разработали, исследовали и классифицировали методы комбинированной отделочно-упрочняющей обработки ППД. В работах [117, 231] КО принимали как одновременное воздействие на поверхностный слой несколькими инструментами.

Наиболее точное определение КО дал М.Л. Хейфец [263, 264]. Он считает, что КО – это методы, в которых процесс нанесения, преобразования или удаления обрабатываемого материала происходит в результате протекания двух воздействий и более, осуществляемых по своему механизму. Воздействие при этом может быть параллельное, последовательное или со сдвигом во времени.

Однако, несмотря на значительные достижения в рассматриваемой области, некоторые проблемы остаются нерешенными.

Для успешного внедрения комбинированных процессов на производстве важно иметь четкое представление о том, какие качественные изменения происходят в поверхности или в форме изделия в результате сочетания различных воздействий. Необходимо учитывать влияние каждого компонента комбинированного процесса на конечные свойства изделия и тщательно оптимизировать параметры процесса для достижения желаемого результата. Структуру любого КМО можно представить в виде

$$\text{КМО} = \{П, С, О\},$$

где П – множество процессов физической, химической или иной природы; С – множество свойств этих процессов; О – множество отношений между ними.

Кроме того, зная виды воздействия при том или ином способе обработки, необходимо оценить целесообразность их использования в каждом конкретном случае, исходя из возможностей оборудования, технических требований к детали и др.

Методы обработки концентрированными потоками энергии и методы ППД, например электрохимическая обработка и дорнование, плазменная закалка и трение абразивными частицами, электроискровая обработка и обкатка шариками и другие, были разработаны на уровне изобретений или не нашли широкого применения на производстве. Таким образом, возникла необходимость разработки универсальной методики для проектирования процессов комбинированной обработки с наложением физических воздействий (например, методов обработки концентрированными потоками энергии) и методов ППД. Методы обработки концентрированными потоками энергии 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, в том числе и низкого ресурса гидравлического оборудования.

В соответствии с поставленными в главе 1 задачами были разработаны методика проектирования и аналитическая схема основных этапов

проектирования процессов комбинированной обработки с применением методов обработки концентрированными потоками энергии и ППД.

Методику проектирования процессов КО можно представить как исходную информацию, необходимую для моделирования процессов КО:

1. Провести анализ эксплуатационных требований на обрабатываемую поверхность. 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. Провести анализ параметров качества поверхности (твердости, остаточных напряжений, шероховатости и др.) или точности (размеров, формы, взаимного положения и др.), которые влияют на изменение эксплуатационного показателя.

3. Формирование структуры и последовательности операций.

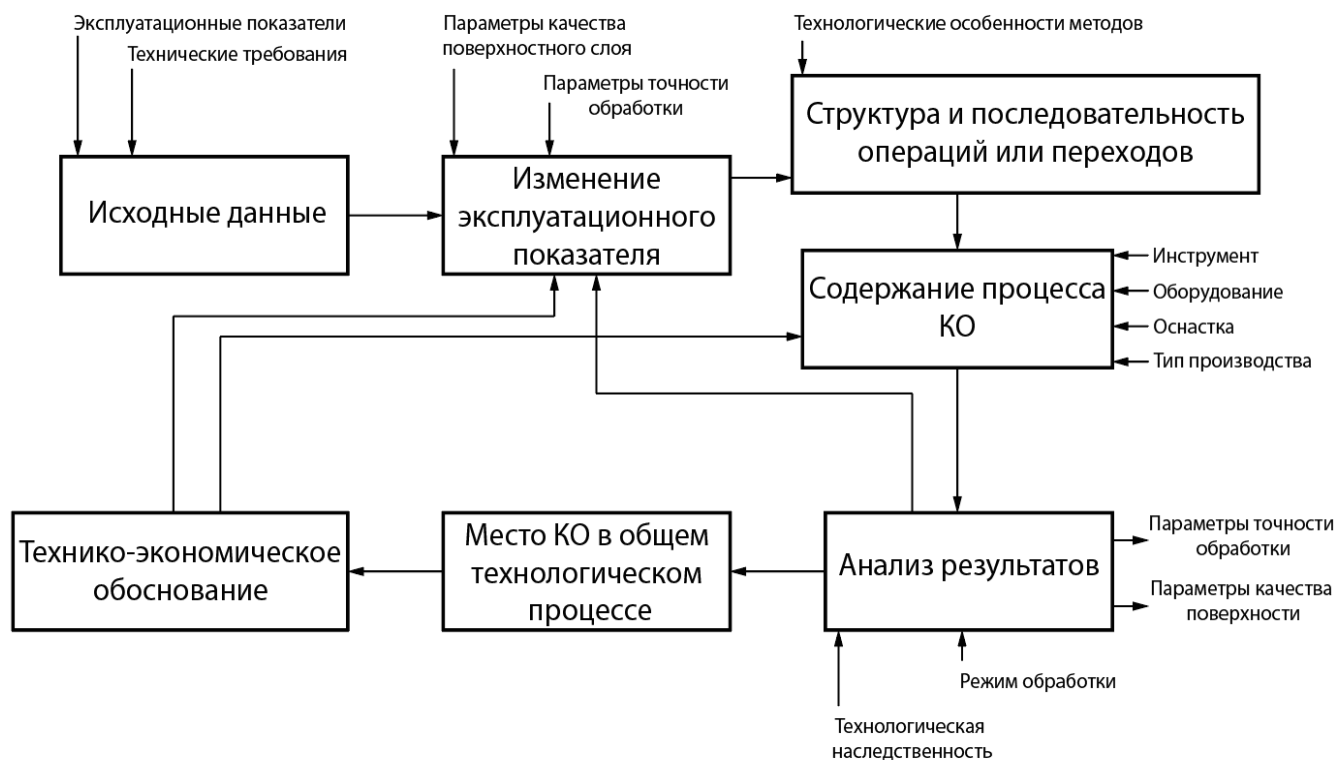
4. Определение содержания комбинированной обработки. Выбор оборудования, инструмента и оснастки. При выборе оборудования необходимо учитывать возможности предприятия и серийность выпускаемых деталей.

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.

В работе представлена аналитическая схема основных этапов проектирования процессов комбинированной обработки:



Для апробации разработанной методики и проверки аналитической схемы были выбраны методы упрочнения концентрированными потоками энергии: лазерная закалка, ЭМО, плазменная закалка.

Согласно методике выбран параметр улучшения– износостойкость. Износостойкость зависит от качества поверхности, поэтому выбраны параметры качества поверхностного слоя: твердость, глубина упрочнения, шероховатость и остаточные напряжения. В соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к золотникам и плунжерам, необходимо обеспечить твердость на менее HRC 62, глубину упрочнения до 1,1 мм, шероховатость Ra 0,04...0,07.

### 3.2. Экспериментальные установки, технологии и инструменты

Для реализации поставленных в главе 1 задач и согласно разработанной методике проектирования методов КО была разработана технология получения

модифицированного износостойкого поверхностного слоя—посредством КО [279, 280, 282].

Эта технология предоставляет возможность осуществить технологическое управление как физико – механическими свойствами, так и геометрическими характеристиками рабочих поверхностей деталей с контактными поверхностями трения в жидких средах на примере золотников и плунжеров путем создания модифицированного слоя на их поверхности [281].

Технология получения модифицированного поверхностного слоя отрабатывалась на упрочняющих технологиях (ЭМО, лазерная закалка) и отделочной технологии— алмазное выглаживание [283, 299]. Комбинированную обработку проводили после механической обработки резанием ( точением).

Было создано несколько промышленных установок.

Промышленная установка (I) (рисунок 3.1) состоит из базового универсального токарно-винторезного станка 1, источника питания 2, ток от которого по медным шинам подводится к планшайбе патрона 3 и приспособлению 4. Охлаждение источника питания проводится гидростанцией 5.

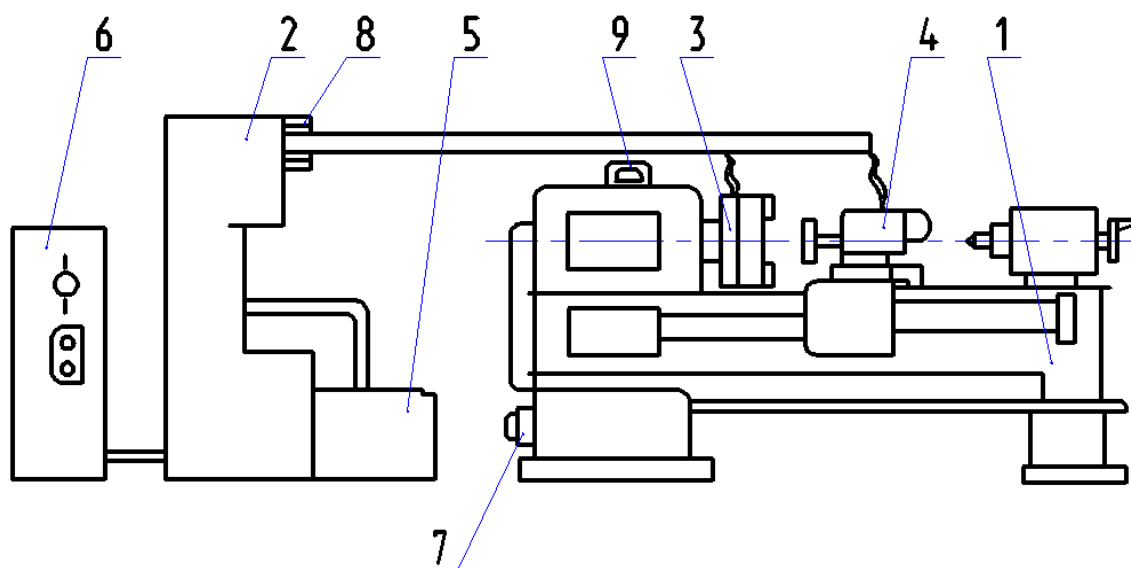


Рисунок 3.1 – Общий вид промышленной установки (I)

Управление трансформатором проводится тиристором, установленным в электрошкафу 6. Для уменьшения скорости вращения шпинделя служит мотор-редуктор 7, который установлен вместо электродвигателя главного движения. Контроль значения силы тока выполняется амперметром 9, включенным через трансформатор тока 8.

Деталь устанавливают в специальных бронзовых кулачках трехкулачкового патрона токарного станка, на планшайбе которого установлен токосъемник для подвода тока к обрабатываемой детали. Упрощенная схема установки (I) представлена на рисунке 3.2. Комбинированную обработку проводят за одну операцию и на одном и том же оборудовании за несколько технологических переходов [284].

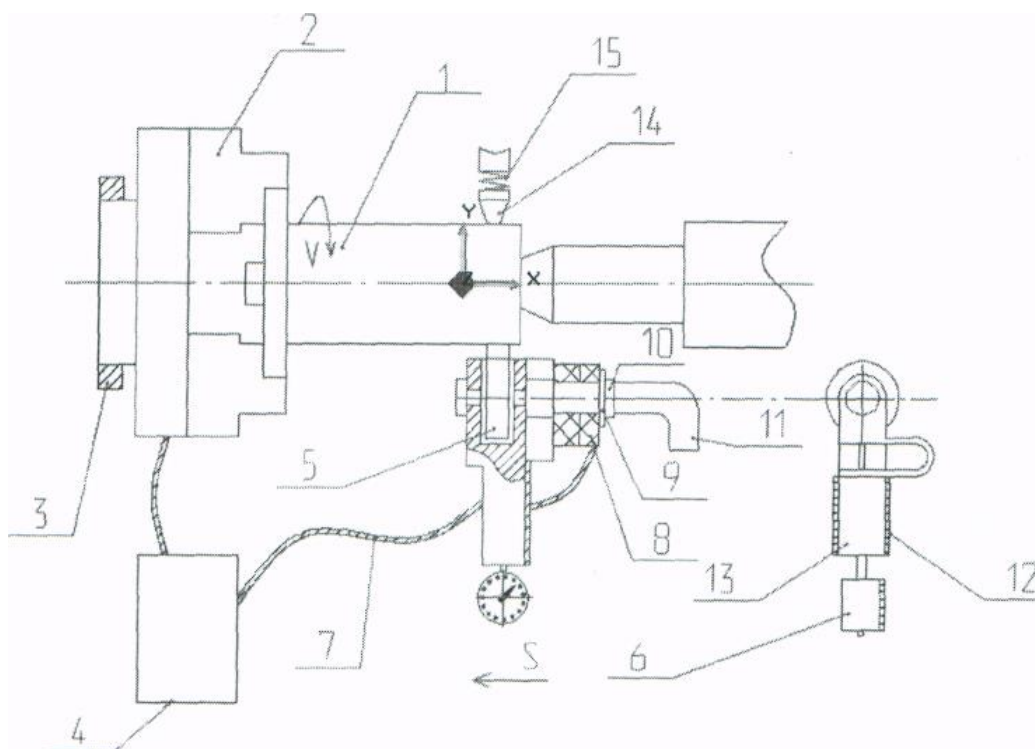
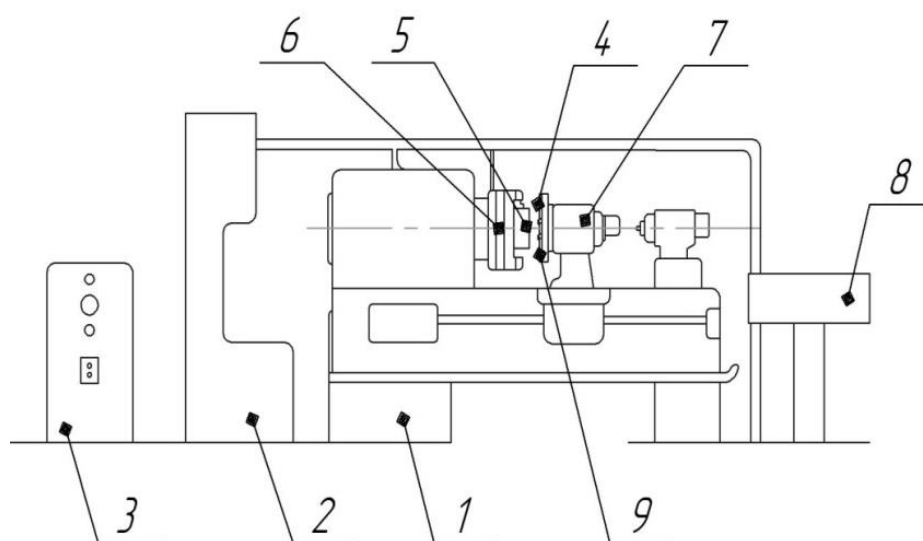


Рисунок 3.2 – Упрощенная схема установок (I) и (II):

1–деталь; 2 –патрон токарного станка; 3 –токоприемник; 4 –источник питания; 5 –ролик-электрод; 6 –индикатор; 7 –медные провода; 8 –медно-графитовые щетки; 9– бронзовый валик; 10– штангенциркуль; 11– трубопровод; 12 – прокладки; 13 – корпус державки; 14 – алмазный выглаживатель; 15 – пружина

Промышленная установка (п) (рисунок 3.3) создана на базе токарного станка с ЧПУ модели 16K20Ф3.



*Рисунок 3.3–Промышленная установка (п):*

*1–станок модели 16K20Ф3; 2 –источник питания; 3 – пульт управления; 4 – ролик-электрод; 5 –деталь; 6 –планишайба; 7 –револьверная головка; 8 –стойка станка; 9 – алмазный выглаживатель*

В экспериментальной установке (п) также совмещены упрочняющий и отделочный технологические переходы. Все переходы осуществляются последовательно: после механической обработки и получения заданной геометрии детали не надо ее снимать со станка. Комбинированная обработка осуществляется на установке, находящейся на токарном станке, что имеет свои преимущества – сокращается машинное время.

Процесс обработки представляет собой комбинированный метод, включающий в себя электромеханическую обработку и отделочную обработку алмазным выглаживанием:

1. Механическая обработка резанием: деталь устанавливается и закрепляется в трехкулачковом патроне токарного станка. С использованием четырех токарных резцов осуществляется механическая обработка определенного участка наружной

цилиндрической поверхности детали по заданной программе.

2. Электромеханическая обработка: для упрочнения определенного участка наружной цилиндрической поверхности детали применяют электромеханическую обработку. Электрический ток (переменный) от источника питания через меднографитовые щетки и полый бронзовый валик подается на ролик-электрод. Корпус державки ролика-электрода выполнен с упругой перемычкой для поддержания непрерывного контакта и создания требуемого усилия во время обработки.

3. Отделочная обработка алмазным выглаживанием: после электромеханической обработки деталь подвергается отделочной обработке алмазным выглаживанием с использованием алмазного выглаживателя.

Такой подход позволяет контролировать и управлять как геометрическими характеристиками, так и физико-механическими свойствами поверхностного слоя детали, повысить качество поверхности и создать резерв для повышения износостойкости.

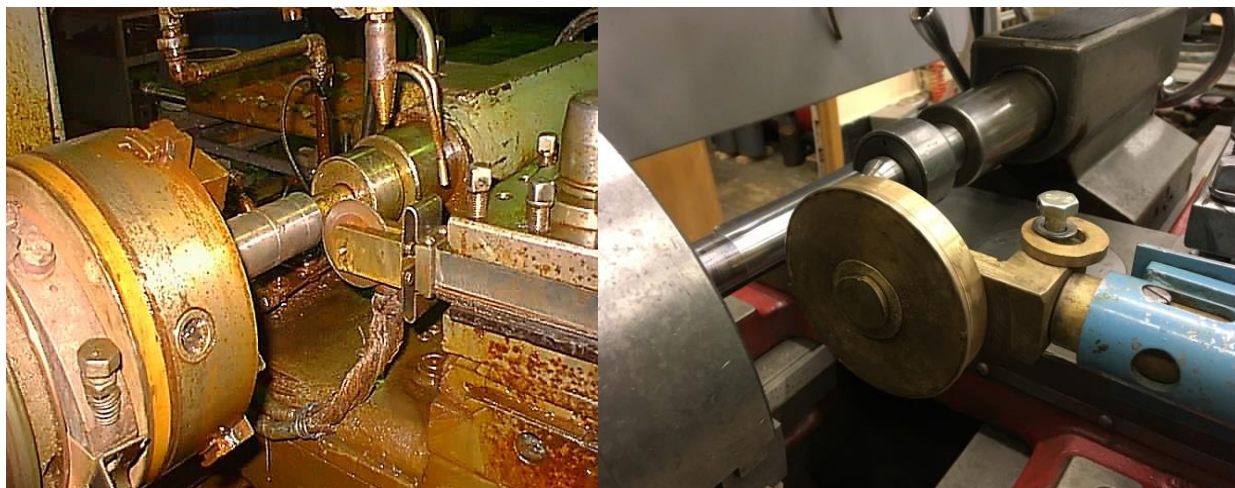
Державка ролика-электрода изолируется от корпуса станка с помощью прокладок 12 (см. рисунок 3.2). Усилие деформирования контролируется с помощью индикатора 6, который регистрирует упругие перемещения ролика-электрода. СОЖ подают в зону обработки через штуцер 10 к трубопроводу 11.

Для того чтобы медные провода 7 не препятствовали работе револьверной головки во время механической обработки, они сделаны съемными. После механической обработки провода закрепляются на державке 13, а затем снова снимаются. Алмазный выглаживатель 14 используется для упрочняющей технологии, а силу его прижима контролируют по степени сжатия пружины 15. В процессе обработки образцов методом КО на установках (I) и (II) использовали следующий набор инструментов:

- резцы токарные проходные с твердосплавными пластинами производства компании Iscar для механической обработки резанием;



- ролики-электроды, изготовленные из различных материалов: твердосплавные и бронзовые (рисунок 3.4) с шириной  $h=2...4$  мм для ЭМО;



*a*

*б*

*Рисунок 3.4 – Положение детали (образца) и ролика-электрода на универсальном токарно-винторезном станке модели 16K20 (промышленная установка (1)):*

*a – ролик-электрод, изготовленный из твердого сплава; б – ролик-электрод, изготовленный из бронзового сплава*

- алмазный выглаживатель с параметрами:  $r = 0,5$  и  $1$  мм;  $D = 12$  мм;  $d = 8$  мм;  $L = 32$  мм (рисунок 3.5) для алмазного выглаживания (КО).



*a*

*б*

*в*

*Рисунок 3.5 – Алмазный выглаживатель:*

*a, б – эскиз и фото соответственно; в – на станке с оправкой; 1 – алмазный выглаживатель; 2 – оправка*



*Рисунок 3.6 – Применение комбинированной обработки на настольном токарном станке модели «Старт»(экспериментальная установка)*

В промышленных установках (i) и (ii) на единой станочной платформе универсального токарно-винторезного станка модели 16K20 или токарного станка с ЧПУ модели 16K20Ф3 объединили механическую обработку резанием, электромеханическую обработку (ЭМО) и отделочную обработку (алмазное выглаживание). Подобную модернизацию успешно провели на настольном токарном станке модели «Старт» (рисунок 3.6). Интеграция механической обработки резанием, электромеханической обработки и отделочной обработки, такой как алмазное выглаживание, на единой станочной платформе универсального токарно-винторезного станка или токарного станка с ЧПУ, представляет собой значительный технологический прогресс. Это позволяет обеспечить комбинированную обработку деталей на одном станке, что улучшает эффективность производства и сокращает время обработки. Применение подобной модернизации даже на настольном токарном станке, как на модели «Старт», свидетельствует о широких возможностях такого подхода в различных условиях производства [158-160].

В соответствии с представленной 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 концентрированными потоками энергии 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 экспериментальных и теоретических исследований. В работе представлены рациональные режимы обработки.

#### Режимы ЭМО:

- сила тока  $I$  1000...3200 А;
- напряжение  $U$  2...6 В;
- скорость обработки  $V$  1,1...3,2 м/мин;
- подача ролика-электрода  $S$  0,6...3,5 мм/об.;
- ширина ролика-электрода  $l$  2...4 мм;
- сила прижима ролика-электрода  $P$  200...350 Н.

#### Режимы алмазного выглаживания:

- сила прижима алмазного выглаживателя  $P$  200...250 Н;
- подача алмазного выглаживателя  $S$  0,02...0,04 мм/об.;
- радиус сферы алмазного выглаживателя  $r$  1; 0,5 мм;
- скорость вращения детали  $V$  45 м/мин.

Режимы выбраны в соответствии с рекомендациями, изложенными в работах [19, 67, 207, 162] и проверены в процессе экспериментальных исследований.

В работе Л.Г. Одинцова и др. [184] даны следующие рекомендации по режимам алмазного выглаживания: сила выглаживания 150...450 Н; радиус сферы 0,5...3,5 мм; подача инструмента 0,02...0,05 мм/об – при такой подаче шероховатость имеет минимальное значение, число проходов инструмента равно 1, поскольку после первого прохода максимально снижается шероховатость и получается благоприятный микрорельеф.

На качество выглаживания влияет процесс охлаждения. Действие СОЖ проявляется в создании местных легко деформируемых зон охлаждений контактной поверхности, создании на поверхности алмаза пленки, предохраняющей от износа и уменьшения коэффициента трения (рисунок 3.7). Поэтому в работе использовали индустриальное масло И-20.



*Рисунок 3.7 – Применение СОЖ при алмазном выглаживании*

После выглаживания размер детали может измениться на 3...5 мкм, но это, как правило, в пределах допуска на размер [184, 207].

Комбинированная обработка, которая заключается в лазерной закалке и алмазном выглаживании, проводилась на мобильном комплексе лазерной наплавки Rofin FL040, оптика Precitec YC52 (рисунок 3.8) или Квант-16.

Режимы лазерной закалки выбирались по рекомендациям и методикам, разработанным на кафедре «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана [78, 295, 303] и корректировались в процессе экспериментов: 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.



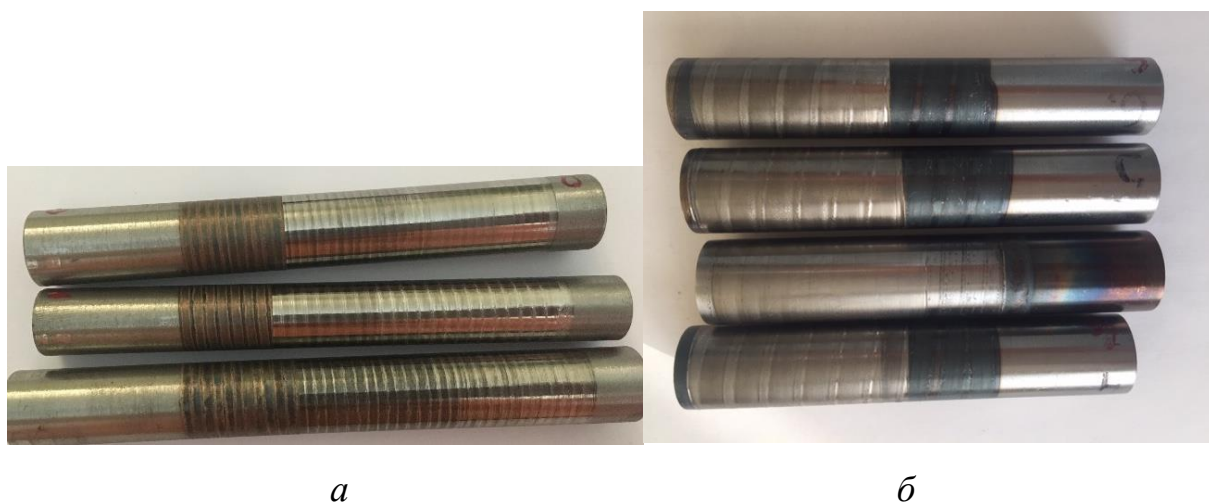
*Рисунок 3.8 – Оборудование для лазерной закалки Rofin FL040*

Лазерную закалку и алмазное выглаживание проводить на одной установке, как для ЭМО и алмазного выглаживания, не представляется возможным. Поэтому лазерную закалку проводили на оборудовании (рисунок 3.8), а для алмазного выглаживания использовали токарно-винторезный станок модели 16K20 (рисунок 3.7).



### 3.3. Методика проведения исследований твердости и глубины упрочнения модифицированного поверхностного слоя после комбинированной обработки

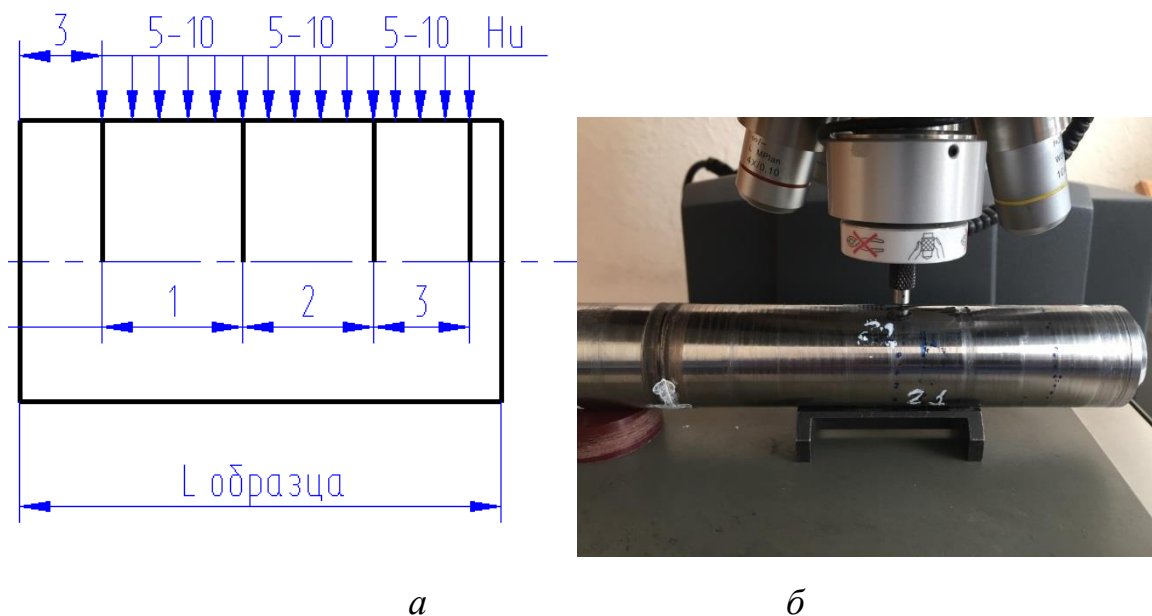
В данной работе проводилось измерение микротвердости по Виккерсу (ГОСТ 2999–75) и по Роквеллу (ГОСТ 9013–59). Для исследования были изготовлены образцы из стали марок 45, 40Х, 20Х3МВФ, 40ХН2МА, 38ХМЮА диаметром  $12 \pm 1$  мм, длиной  $120 \pm 10$  мм и обработаны согласно разработанной технологии: механическая обработка (точение), ЭМО или лазерная закалка, алмазное выглаживание. Образцы для исследования представлены на рисунке 3.8.



*Рисунок 3.8 – Образцы для исследования изменения твердости поверхности после комбинированной обработки:*

*а–после электромеханической обработки и алмазного выглаживания; б–после лазерной закалки и алмазного выглаживания*

Твердость на поверхности замеряли в пяти точках по длине образца (рисунок 3.9, *а*) [46, 85].



*Рисунок 3.9 – Методика замера твердости:*

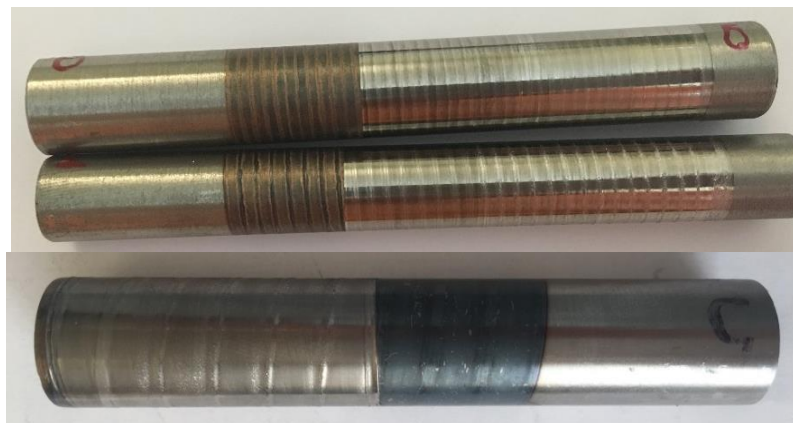
*а–схема измерения(1, 2, 3–режимы комбинированной обработки); б–замеры на твердомере Instron Wilson Hardness TUKON 2500*

Глубина упрочненного слоя замерялась по длине образцов в продольном и поперечном сечении. Измерение глубины упрочненного слоя проводили на поперечных шлифах, вырезанных из образцов на станке электроискровой резки, с помощью твердомера Instron Wilson Hardness TUKON 2500 с перекрытием при вдавливании пирамидой микрорельефа профиля, погрешность измерения  $\pm 10$  мкм (рисунок 3.9, б) и твердомера модели PCE Instruments PCE 2500.

### **3.4. Методика исследований шероховатости модифицированного поверхностного слоя после комбинированной обработки**

Одним из параметров, определяющих качество поверхностного слоя, является шероховатость поверхности. Контроль шероховатости поверхности должен обеспечивать высокую точность, локальность и воспроизводимость измерений.

Образцы для исследования были изготовлены точно так же, как для измерения твердости и глубины упрочнения (п. 3.3) (рисунок 3.10). Режимы разработанной технологии (КО) указаны в п. 3.2.



*Рисунок 3.10 – Образцы для исследования шероховатости поверхности после комбинированной обработки*

В соответствии с требованиями к шероховатости поверхности и точности размеров образцов применяли современные методы контроля шероховатости поверхности. Наибольшее распространение среди контактных методов контроля шероховатости поверхности деталей получили щуповые приборы, работающие по методу ощупывания контролируемой поверхности алмазным стилусом.

Измерение шероховатости проводили с помощью профилограф-профилометров различных моделей (рисунок 3.11).



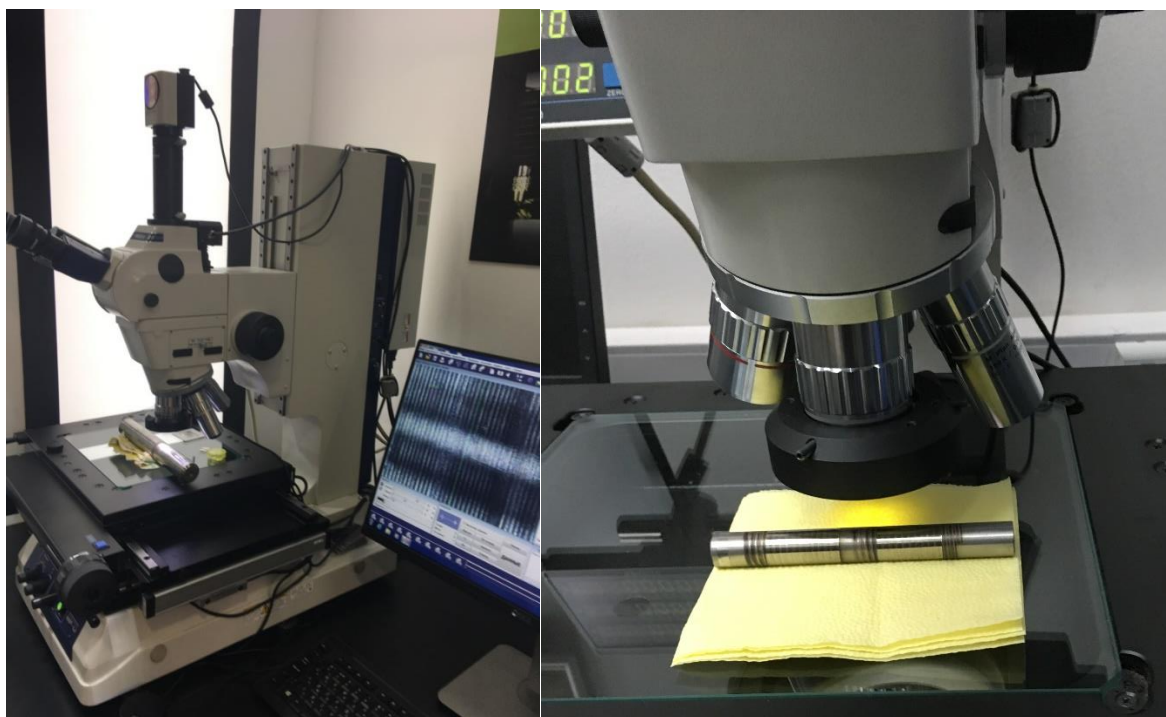
*а*

*б*

*Рисунок 3.11 – Измерение шероховатости поверхности:*

*а – прибор Tesa Rugosurf 90G; б – контурограф-профилометр Formtracer Avant D-3000 / D-4000*





*а*

*б*

*Рисунок 3.12 – Исследование микрорельефа поверхности электронными микроскопами:*

*а – измерительный микроскоп BF Hyper MF-B2515B, б – измерительный микроскоп MF-U 1010D*

Исследование микрорельефа проводили с помощью электронных микроскопов моделей BF Hyper MF-B2515B, MF-U 1010D (рисунок 3.12).

### **3.5. Методика исследования остаточных напряжений и структуры в модифицированном поверхностном слое после комбинированной обработки**

Рентгеновский метод определения остаточных напряжений I рода основан на взаимосвязи упругой деформации кристаллической решетки и изменением ее межплоскостных расстояний. Это приводит к угловому сдвигу рентгеновских линий [234, 306-308, 325, 326].

При измерении углового положения рентгеновских линий сохраняется целостность объекта исследования, что позволяет проводить измерения в каждой точке его поверхности. Это достигается благодаря тому, что базу измерений можно сделать достаточно малой. Рентгеновский метод определения макронапряжений имеет свои специфические недостатки. Основной из них – ограничение исследования поверхностным слоем образца.

Спорным является вопрос о том, насколько результаты рентгеновского анализа отражают состояние внутренних слоев материала.

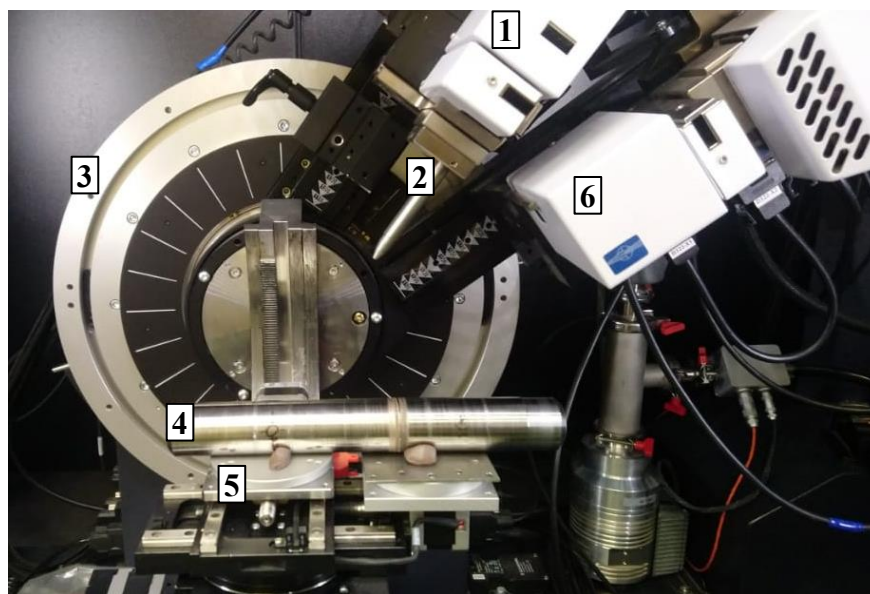
Серьезные трудности возникают при чрезмерно больших размерах зерен, приводящих к усилению флуктуаций интенсивности при регистрации профиля рентгеновской линии, что снижает точность определения ее углового положения.

В данной работе измерение остаточных макронапряжений проводилось на рентгеновском дифрактометре BRUKER D8 Discover (рисунок 3.13) с использованием фильтрованного  $K\alpha$ -излучения хрома. Полученные данные обрабатывались с помощью программного обеспечения DIFRAC.EVA и DIFRAC.LEPTOS.

Образцы для исследования изготавливали так же, как для исследования шероховатости и микрорельефа поверхностного слоя (п. 3.4).

В работе остаточные напряжения определяли методом « $\sin^2\psi$ ». Этим методом можно определять остаточные напряжения на поверхности образцов или деталей, которые возникают после термообработки.

Рентгеноструктурный анализ является одним из самых распространенных методов исследования кристаллических твердых тел. С его помощью исследуют структуру кристаллов, т. е. определяют тип кристаллической решетки и ее параметры, изучают несовершенства кристаллической решетки в результате термообработки образцов.



*Рисунок 3.13 – Рентгеновский дифрактометр BRUKER D8 Discover с исследованным образцом:*

*1 – рентгеновская трубка; 2 – коллиматор рентгеновского пучка; 3 – гониометр; 4 – исследуемый образец; 5 – предметный столик; 6 – детектор*

Межатомное расстояние  $d$  зависит от ориентации кристалла и описано индексами Миллера [306, 307].

### **3.6. Методика исследования зон концентрации напряжений в модифицированном поверхностном слое после комбинированной обработки**

Наличие концентраторов напряжений снижает усталостную прочность деталей и может вызвать их разрушение и остановку всего механизма. Поэтому задача по диагностике скрытых концентраторов напряжений и очагов развития трещин является актуальной [33, 129, 194, 232, 289 и др.].

Цель исследования – экспериментально доказать, что КО не влияет на образование очагов зарождения трещин и не снижает усталостную прочность, является технологическим барьером, препятствующим, при определенных

режимах, наследованию негативных факторов: структурной неоднородности и очагов зарождения трещин.

Наличие зон концентрации напряжений на поверхности определяли методом магнитной памяти металла (МПМ).

Метод магнитной памяти металла (МПМ) представляет собой неразрушающий способ диагностики, основанный на анализе распределения магнитных полей, возникающих при рассеянии на поверхности изделия. Этот метод применяется для выявления зон с повышенными напряжениями, обнаружения дефектов и неоднородностей в структуре материала.

Магнитная память металла проявляется через остаточную намагниченность, которая формируется в процессе производства и охлаждения изделий в слабом магнитном поле, а также в результате воздействия рабочих нагрузок. Изменения в намагниченности могут указывать на области концентрации напряжений или повреждений [51, 54].

Ключевым геометрическим признаком магнитных аномалий, свидетельствующих о концентрации напряжений, является расстояние между экстремальными значениями магнитного поля, которое пропорционально основным размерам изделия (толщине, ширине, диаметру). Это расстояние соответствует минимальному интервалу между соседними скользящими площадками или критическому размеру оболочки.

Таким образом, метод контроля эффективно позволяет выявлять структурные и технологические особенности металла, связанные с его естественной намагниченностью, что делает его ценным инструментом для контроля качества изделий и обнаружения возможных дефектных зон.

Наличие зон концентрации напряжений (ЗКН) определяли с помощью прибора модели ИНК-3М-12 (рисунок 3.14, а) с четырехканальным сканирующим устройством, двумя двухкомпонентными датчиками для измерения одновременно нормальных и тангенциальных составляющих магнитного поля и счетчик общей длины с колесиком (рисунок 3.14, б). Приборы прошли аттестацию и

сертификацию и имеют соответствующие документы (приложение). Все измерения проводили согласно ГОСТ Р ИСО 24497–1–2009, ГОСТ Р ИСО 24497–3–2009, ГОСТ Р ИСО 24497–3–2009 [51, -54, 75, 86, 295-297, 309, 310].



*а*

*б*

*Рисунок 3.14 – Определение зон концентрации напряжений:*

*а – прибор модели ИНК-3М-12; б – четырехканальное сканирующее устройство с двумя двухкомпонентными датчиками*

Исследования проводили на образцах диаметром  $13\pm 1$  мм, длиной  $120\pm 10$  мм. из стали марок 45, 40Х, 40ХНМА, 20Х3МВФ, 38ХМЮА.

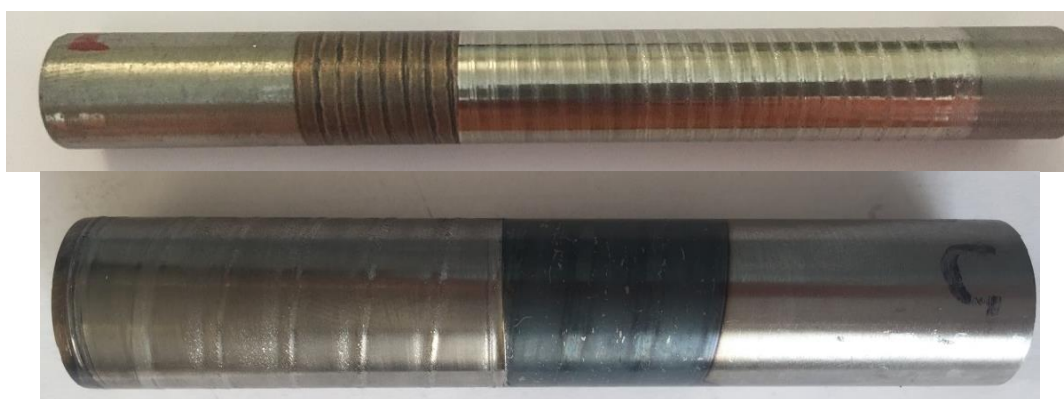
Для определения влияния технологической наследственности проверку на наличие ЗКН проводили на всех этапах изготовления образцов:

- перед механической обработкой (точение) (рисунок 3.15, а);
- после механической обработки (рисунок 3.5, б);
- после комбинированной обработки (рисунок 3.15, в).



*a*

*б*



*в*

*Рисунок 3.15 – Образцы для исследования зон концентрации напряжений:  
а–перед механической обработкой; б–после механической обработки; в–после  
комбинированной обработки*

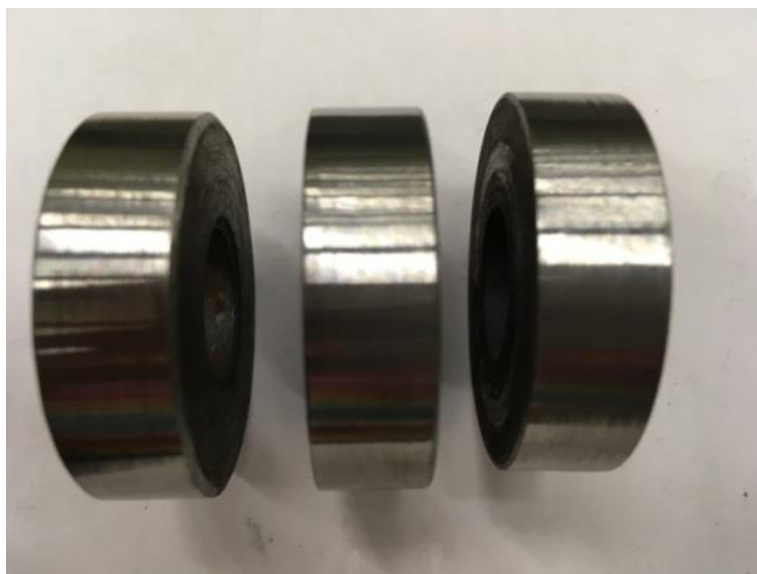
Наличие ЗКН определяли по магнитограммам, снятым с экрана прибора.

### **3.7. Методика исследований износостойкости модифицированного поверхностного слоя**

Поверхностный износ при испытаниях должен совпадать с эксплуатационным. Для этого необходимо обеспечить одинаковые параметры поверхностей в реальном узле и у испытываемых образцов [105].



Для испытания использовали образцы из стали марок 45, 40Х, 40ХНМА, 20Х3МВФ, 38ХМЮА, диаметром 38 мм и длиной 20 мм (рисунок 3.16).



*Рисунок 3.16 – Образцы для испытания на износ*

Для оценки эффективности применения КО проводили сравнительные испытания. Для этого образцы (см. рисунок 45) изготавливали по различным технологиям, применяемым на предприятиях для изготовления золотников и плунжеров:

- механическая обработка (точение), ХТО (цементация, закалка, отпуск), шлифование по технологии ПАО «КАДВИ» (Калуга);
- механическая обработка (точение), шлифование, ХТО (азотирование) по этой же технологии;
- механическая обработка (точение), ТО (закалка ТВЧ, отпуск), шлифование по этой же технологии;
- механическая обработка (точение), шлифование, лазерная закалка по технологии ОАО «НИАТ», АО «Плакарт» (Москва);
- механическая обработка (точение), комбинированная обработка: лазерная закалка, алмазное выглаживание;
- механическая обработка (точение), комбинированная обработка: ЭМО, алмазное выглаживание;

Твердость поверхности всех образцов HRC 55...62, глубина упрочнения 0,6...1,1 мм.

В работе применяли несколько методов измерения износа:

- весовой метод: образцы взвешиваются до и после испытания.

При этом данный метод не дает возможность определить закон распределения износа по поверхности;

- путем облучения материала образца радиоактивными изотопами.

По мере изнашивания в слой смазочного материала будет попадать пропорциональное износу количество атомов этого изотопа. По интенсивности излучения изотопа в пробе масла оценивали объемный износ за определенное время [145].

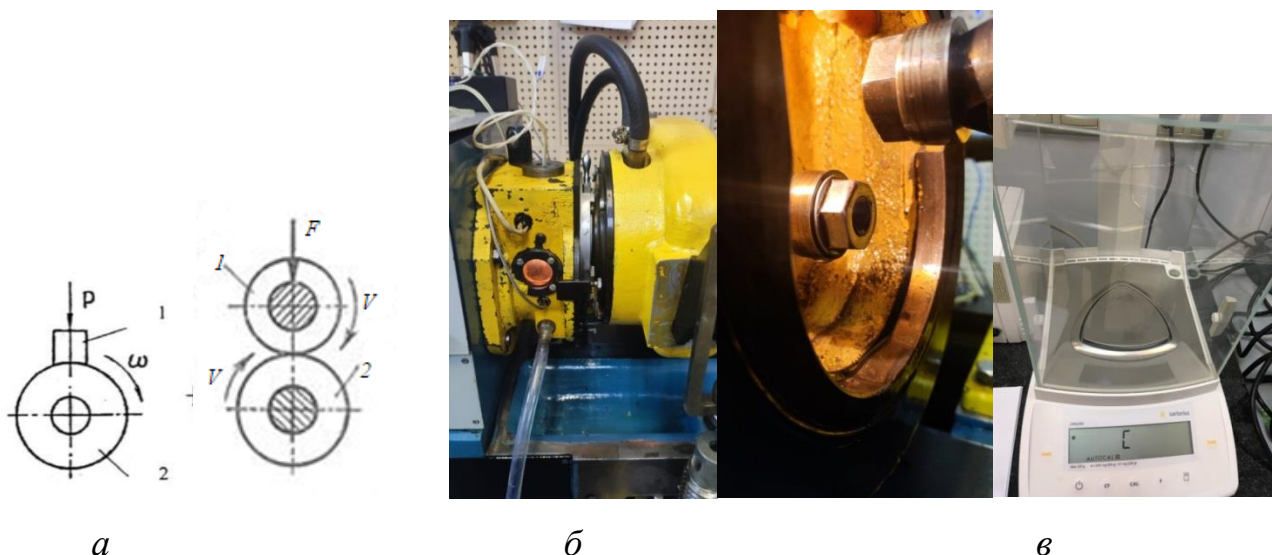


Рисунок 3.17 – Методика исследования износостойкости:

*а – схема: 1 – образец; 2 – ролик;  $F$  – заданная сила прижима; б – машина трения; в – аналитические весы*

Схема испытаний обеспечивает одинаковый коэффициент взаимного перекрытия (отношение площадей трения контактирующей пары).

Испытания образцов, обработанных различными методами, на износостойкость проводились на машине трения модели ИИ 5018 (рисунок 3.17, б). Испытания образцов проводили при следующих режимах:  $V_{\Sigma} = 8,56$  м/с – суммарная скорость качения;  $\Pi = 1,47$  – удельное скольжение;  $V_{\alpha} = 1,76$  м/с –



скорость скольжения;  $q = 35$  кгс/см – удельная нагрузка; смазка – масло промышленное И 20.

### 3.8. Методика исследований параметров модифицированного слоя после низкотемпературного воздействия

В данной работе проводили исследования по влиянию низких температур на изменение полученных свойств поверхностного слоя после КО. Эти исследования осуществляли путем выдержки образцов после КО, при  $T = -46 \dots -50$  °С в течение 2 ч в смеси воды и спирта в кипящем азоте [68] (рисунок 3.18, а, б).



а

б

*Рисунок 3.18 – Исследования по влиянию низких температур на изменение полученных свойств поверхностного слоя после комбинированной обработки:*

*а – проведение эксперимента; б – образцы после обработки в смеси воды и спирта в кипящем азоте*

Для контроля температуры использовали термометр (рисунок 3.18 а).

### 3.9. Методики обработки полученных данных

В процессе экспериментирования при обработке полученных данных использовались математико-статистические методы: метод наименьших квадратов и метод ЛП-Тау [225].

Важнейшим этапом в постановке любого эксперимента является обработка полученных данных. При повторяемости численных значений вероятностей количества опытов  $n \geq 10$ . Для адекватности оценки результатов экспериментов приняли  $n = 12$  [266].

За результат измерений принимали среднее арифметическое значение наблюдений с указанием доверительных границ погрешности этого результата:

$$L = \bar{X} \pm \Delta,$$

где  $\bar{X}$  – средняя арифметическая величина;  $\Delta$  – случайная погрешность измерения, которая оценивается доверительным интервалом для математического ожидания и определяется по формуле

$$\Delta = \pm t \frac{s}{\sqrt{n}}$$

где  $t$  – коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности  $P$  и числа степеней свободы  $(n-1)$  принимали согласно работе [146].

Ошибка методов исследования определялась в виде среднего квадратичного отклонения:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\bar{X} - X_i)^2}{(n-1)}},$$

где  $n$  – число дублирований опыта;  $X_i$  – величина параметра в  $i$ -м опыте;  $\bar{X}$  – средняя арифметическая величина.

Для построения зависимостей при экспериментальном исследовании износостойкости, микротвердости, глубины упрочнения от режимов КО образцов, обработанных различными методами, численные значения на графиках принимались как среднее арифметическое значение от общего количества показаний в данной точке.

Адекватность теоретических расчетов подтверждалась экспериментальной проверкой, при этом точность полученных результатов определяли по формуле

$$\bar{\Delta} = \frac{T_{\text{экс}} - T_{\text{теор}}}{T_{\text{экс}}} 100 \%,$$

где  $T_{\text{экс}}$  – значение, полученное при проведении эксперимента;  $T_{\text{теор}}$  – значение, полученное при расчете.

Планирование и оценка результатов экспериментальных исследований осуществлялись с применением регрессионного моделирования. При исследовании технологических объектов регрессионная модель должна удовлетворять следующим требованиям [146]: точность прогноза характеристик качества должна быть наибольшей, чтобы сделать модель полезной для решения задач оптимизации и управления технологическим параметром модели и чтобы можно было оценить закономерности измерения выходных характеристик от факторов.

Состояние любого технологического объекта определяется рядом параметров, которые можно разделить на две группы: выходные параметры, называемые факторами, и зависящие от них выходные характеристики.

В качестве факторов использовались следующие технологические характеристики процесса: сила тока  $I$ , напряжение  $U$ , скорость обработки  $V$ , подача ролика-электрода  $S_1$ , ширина ролика –электрода  $l$ , сила прижима ролика-электрода  $P_1$ , сила прижима алмазного выравнивателя  $P_2$ , подача алмазного выравнивателя  $S_2$ , радиус сферы алмазного выравнивателя  $r$ .

Математическую модель процесса можно представить в виде [146]:

$$y = F(\bar{x}),$$

где  $\bar{x} = \{x_1, x_2 \dots x_n\}$  – вектор технологических факторов;  $y$  – выходной показатель;  $n$  – число рассматриваемых факторов.

Поскольку вид такой модели и ее структура неизвестны из-за сложности процессов, то для оценки функциональной связи между технологическими факторами и выходными показателями необходимо использовать регрессионное моделирование. Согласно второй теореме Вейерштрасса об аппроксимации

непрерывной в замкнутой области функции ее можно представить в виде линейной по параметрам функции:

$$\hat{y} = \bar{\theta} \cdot f(\bar{x}),$$

где  $\hat{y}$ – оценка выходного показателя;  $\bar{\theta}$ – вектор неизвестных параметров;  $f(\bar{x})$ – вектор аргументов модели известных функций от технологических факторов  $\bar{x}$ .

Приняв, что аргументами модели являются аргументы многомерного полинома, получаем:

$$\bar{y} = \theta_0 + \theta_{1x_1} + \theta_{2x_2} + \theta_{ix_1x_2} + \dots + \theta_{1+1x^2} + \dots$$

Результаты технологических экспериментов представлены в виде матриц планирования экспериментов. В настоящей работе был использован план, близкий к  $D$ -оптимальному–2<sup>3</sup>.

Метод сконструирован на основе планирования ЛП-Тау последовательностей и принадлежит семейству методов Монте-Карло [225]. Метод используют для анализа математических моделей функционирования проектируемых объектов.

Метод ЛП-Тау поиска генерирует точки квазислучайным образом в указанном интервале для нескольких параметров. Для КО рациональные режимы отработаны и представлены в главе 3.

Для большего удобства полученные данные сведены в таблицы 3.1 – 3.3

Таблица 3.1– Режимы электромеханической обработки

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P, Н$	250	350	220	325	215	275	225	315	320
$V, м/с$	1,35	2,44	2,69	3,19	2,26	3,13	1,27	1,10	1,95
$I, А$	2300	1850	2750	2975	2075	2525	1050	3150	1100
$S, мм/об$	0,65	1,25	2,75	0,850	1,500	2,250	3,250	1,175	3,450

Таблица 3.2 – Режимы алмазного выглаживания

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P, Н$	250	220	225	215	250	235	210	215	220
$S, мм/об.$	0,026	0,025	0,0275	0,0350	0,0215	0,0325	0,032	0,075	0,040

Таблица 3.3 – Режимы лазерной закалки

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P, \text{кВт}$	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6
$V, \text{мм/с}$	35	40	40	45	40	35	50	35	35
$V, \text{мм/с}$	10	15	15	30	10	15	20	25	30
$d, \text{мм}$	2	7	6	4	2	7	4	6	4
$f, \text{мм}$	50	50	70	50	60	80	50	100	50

Последовательное планирование многофакторных экспериментов с использованием планов экспериментов на основе ЛП-Тау равномерно распределенных последовательностей –необходимое условие получения искомой структуры многофакторной статистической модели.

### Выводы по 3 главе

1. С единых теоретических позиций разработана методика проектирования процессов комбинированной обработки с применением концентрированных потоков энергии и поверхностного пластического деформирования.

2. Разработанная 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.

3. Экспериментальные и промышленные установки, представленные в работе, позволяют использовать принцип комплексирования (объединение различных способов воздействия на поверхность заготовок на одной станочной платформе).

## **Глава 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ НА ПАРАМЕТРЫ МОДИФИЦИРОВАННОГО ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

### **4.1. Экспериментальное исследование влияния режимов комбинированной обработки на глубину и твердость модифицированного износостойкого слоя**

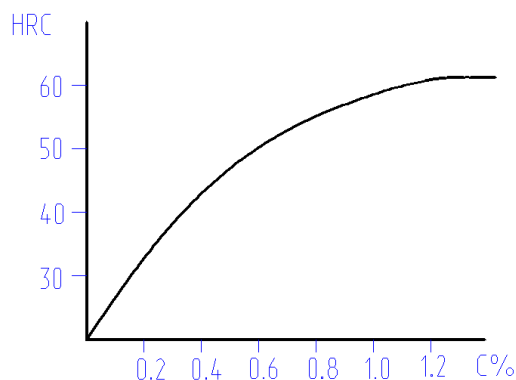
Эффективными методами упрочнения поверхностного слоя деталей являются методы обработки концентрированными потоками энергии, например электромеханическое упрочнение, заключающееся в пропускании через пятно контакта инструмента и детали тока большой силы и малого напряжения или лазерная закалка. Создаваемый при этом локальный нагрев облегчает деформирование металла поверхностного слоя и способствует его упрочнению совместно с быстрым охлаждением.

Обработка, осуществляется на универсальных токарно-винторезных станках, подвергнутых модернизации или на специальных установках, хорошо встраивается в технологический процесс и не требует высокой квалификации исполнителя [15, 170, 172, 251, 254 и др.].

Способы обработки концентрированными потоками энергии имеют определенное преимущество по сравнению с другими способами поверхностного упрочнения.

При прохождении энергии через пятно контакта происходит нагрев со скоростью сотен градусов в секунду, температура может достигать 1500 °С. Зона обработки постоянно охлаждается струей жидкости, и скорость охлаждения нагретого объема металла составляет тысячи градусов в секунду. В результате кратковременности процесса не происходит выгорания легирующих элементов, а поверхностный слой приобретает специфическую ориентированную структуру, высокую твердость, благоприятные остаточные напряжения. На рисунке 4.1 показана зависимость твердости от содержания

углерода в стали. Значения взяты по средним, вычисленным в процессе эксперимента. Данная зависимость не противоречит работам [15, 16, 261 и др.].



*Рисунок 4.1 – Зависимость твердости от содержания углерода в стали, взятое по средним значениям*

Такая обработка поверхностного слоя не требует последующего отпуска. Разработанный метод КО более производительный, по сравнению с химико-термическими видами обработки, в особенности для единичных и небольших партий деталей.

Исследование свойств поверхностного слоя проводили на образцах, изготовленных из различных материалов и подверженных КО, как указано в главе 3.

В процессе исследования определяли твердость на поверхности, распределение твердости по глубине упрочненного слоя.

Глубина упрочненного слоя замерялась по длине образцов в продольном и поперечном сечении. При КО на глубину упрочненного слоя будут влиять только режимы обработки концентрированными потоками энергии, а режимы алмазного выглаживания не оказывают влияния.

Режимы ЭМО и результаты замеров сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Зависимость глубины упрочненного слоя от режимов электромеханической обработки для различных марок стали

Номер опыта	$I$ , А	$S$ , мм/об.	$V$ , м/мин	Число проходов	Глубина упрочнения $h$ , мм	Марка стали
1	1500	1,5	1,1	1	0,5	40X
2	1900	1,5	1,1	1	0,7	40X
3	1900	1,5	1,4	1	0,7	40X
4	1900	2,0	1,4	2	0,65	40X
5	2800	1,5	3,0	1	0,95	40X
6	2800	2,0	3,0	1	0,65	40X
7	2800	2,0	3,0	2	0,75	40XH2MA
8	2800	2,0	2,1	1	0,8	40XH2MA
9	2800	2,0	1,1	1	1,1	40XH2MA
10	2300	1,0	3,0	1	0,7	40XH2MA
11	2800	1,0	1,1	3	1,5	40XH2MA
12	3000	1,0	3,0	1	1,0	40XH2MA
13	2500	1,5	2,1	1	1,2	сталь 45
14	2500	2,0	1,1	2	1,0	сталь 45
15	2500	1,5	1,1	1	1,3	сталь 45

Как видно из таблицы 4.1 глубина упрочненного слоя может изменяться от  $h = 0,5 \dots 1,2$  мм. Основными параметрами, определяющими распределение твердости по глубине и глубину упрочненного слоя при ЭМО, являются сила тока, скорость вращения детали и подача.

Основными параметрами, определяющими распределение твердости по глубине и глубину упрочненного слоя после лазерной закалки, являются мощность лазерного излучения  $N$ , диаметр лазерного луча  $d$ , скорость перемещения источника лазерного излучения  $V$  и скорость вращения образца  $V_1$  (таблица 4.2).



Таблица 4.2 – Зависимость глубины упрочнения от параметров лазерной закалки для стали марки 40Х

Номер опыта	Параметры лазерной обработки			Глубина закалки $h$ , мм
	Мощность лазерного излучения $N$ , кВт	Скорость вращения образца $V_1$ , мм/с	Скорость перемещения источника лазерного излучения $V$ , мм/с	
1	1,5	35	30	0,2
2			25	0,25
3			15	0,95
4		40	10	1,1
5			8	1,3
6	1,25	50	30	0,1
7			25	0,15
8			15	0,5
9			10	0,8
10.			8	1
11	1	40	30	0,05
12			25	0,1
13		35	15	0,2
14			10	0,35
15			8	0,5
16	0,75	35	30	0,07
17			25	0,07
18			15	0,1
19		50	10	0,2
20		35	8	0,5
21	0,65	35	30	-
22			25	-
23			15	0,05
24		40	10	0,1
25			8	0,2
26	0,5	50	30	-
27			25	-

Для исследуемых материалов максимальная глубина упрочнения после лазерной закалки  $h = 0,8 \dots 1,0$  мм без оплавления поверхности. При оплавлении поверхностного слоя детали  $h = 1,1 \dots 1,3$  мм.

Результаты исследования показали, что для эффективного использования лазерной закалки применять маломощные лазеры не эффективно, так как при  $N = 0,5 \dots 1$  кВт глубина упрочнения менее 0,5 мм. Для золотников, толкателей и плунжеров рекомендуемая глубина упрочнения 0,6...1,1 мм.

Увеличение плотности тока или мощности в пятне контакта при ЭМО приводит к повышению температуры как на поверхности, так и по глубине, что способствует росту глубины закаленного слоя. Однако при этом развивается электроэрозионный процесс, ухудшается шероховатость поверхности. Работа с силой тока 3500 А и более вызывает оплавление стали и перенос металла с детали на ролик-электрод. Продолжать использовать такой ролик-электрод нельзя, требуется восстановление рабочей поверхности путем зачистки или переточки. При плотности мощности лазерного излучения больше 3,5 кВт/см<sup>2</sup> поверхностный слой сильно оплавляется и деформируется. Это значительно снижает точность размеров поверхности.

Явление оплавления возможно при малых скоростях обкатывания роликом-электродом детали— менее 0,5...1,1 м/мин. Увеличение скорости до 4,5 м/мин снижает толщину слоя почти в 2 раза, при этом твердость на поверхности несколько увеличивается. Рациональными скоростями для получения толщины слоя  $h = 0,6 \dots 1,1$  мм являются скорости 1,5...2,8 м/мин.

Величина продольной подачи формирует волнистый рельеф закаленного слоя на границе с основным металлом. Учитывая, что изотермы на поверхности представляют собой полуокружности, то для получения равномерного по глубине модифицированного слоя рекомендуется применять продольную подачу менее половины толщины рабочей части ролика-электрода при ЭМО. При подачах, равных толщине ролика возможно появление незакаленных полос. Величина подачи больше толщины ролика способствует неравномерной глубине

упрочненного слоя. Для протекания стабильного процесса нагрева металла необходимо плотное прилегание ролика-электрода к заготовке, что обеспечивается прижатием ролика с определенным усилием. В конструкции державки предусмотрен упругий элемент, позволяющий поддерживать заданное усилие. Сила прижатия ролика-электрода, обеспечивающая эффективность процесса упрочнения, составила 200...350 Н. При меньшем усилии возможно искрообразование, исключающее обработку. Усилия свыше 350 Н приводят к выдавливанию металла из зоны нагрева в стороны. На поверхности появляется волнистость, значительно ухудшающая качество поверхности. Эффективная сила, обеспечивающая плотный контакт и деформацию поверхностного слоя, находится в указанном диапазоне ( $P = 200...350$  Н).

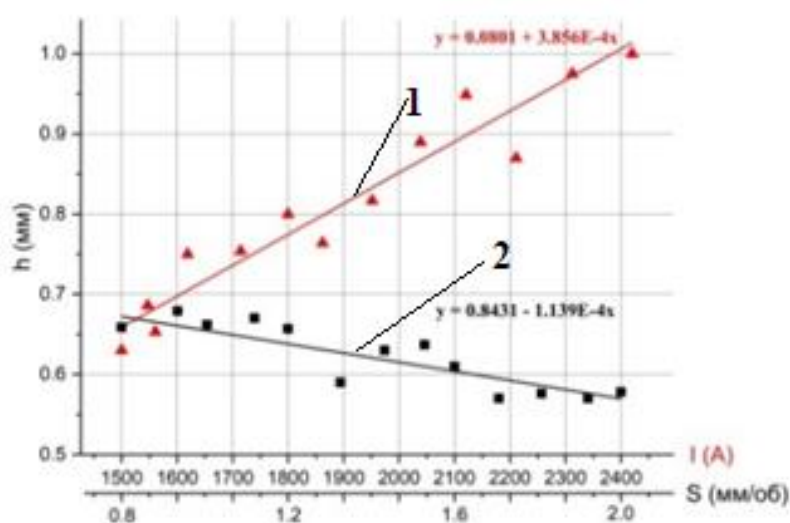
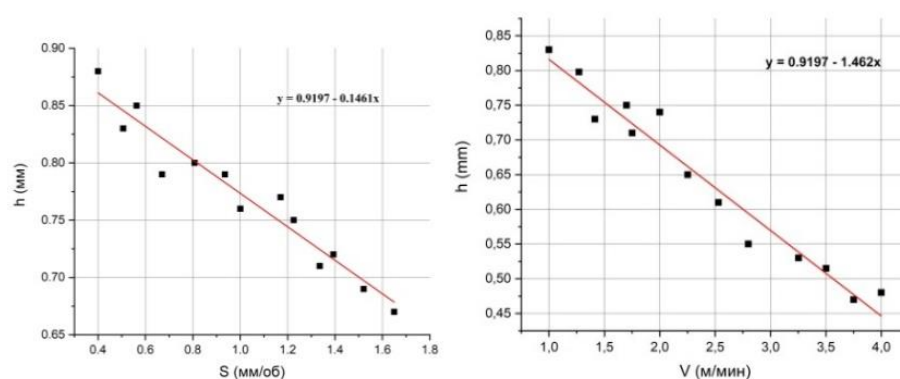


Рисунок 4.2 – Зависимость глубины упрочненного слоя от силы тока (1) и подачи (2) для стали марки 45, сила тока 2000 А, подача 1 мм/об



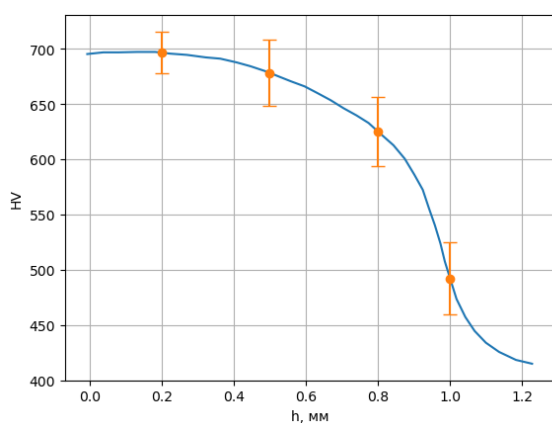
а

б

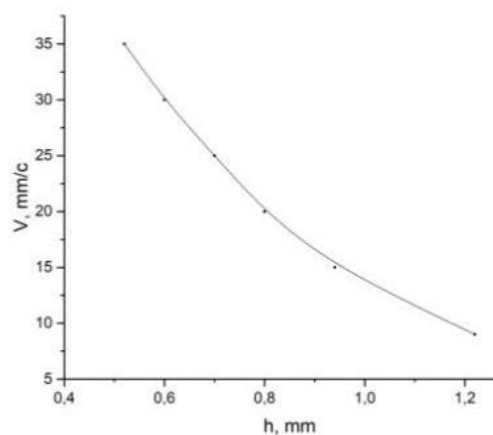
Рисунок 4.3 – Зависимость глубины упрочненного слоя от: (а) подачи для стали марки 40Х; (б) скорости вращения детали (образца) для стали марки 20Х3МВФ

Рассматривая полученные результаты замеров твердости можно отметить, что при ЭМО деталей токами от 1500 до 2400 А разброс плотности токов обеспечивает разогрев поверхностного слоя до одних значений температуры. При этом растет глубина прогрева металла и, соответственно, толщина закаленного слоя, что следует из данных, приведенных в таблице 8 и рисунках 4.2–4.4.

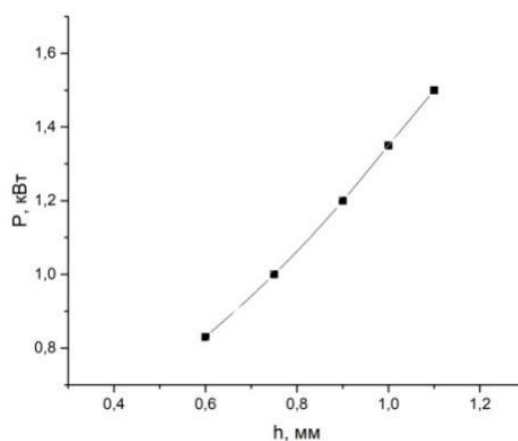
На твердость поверхности оказывает влияние количество проходов (рисунок 4.5, а, б), что можно отнести на счет деформационного упрочнения и оптимальных режимов обработки. Увеличение количества проходов более 3 не приводит к повышению твердости (рисунок 4.5, а).



а

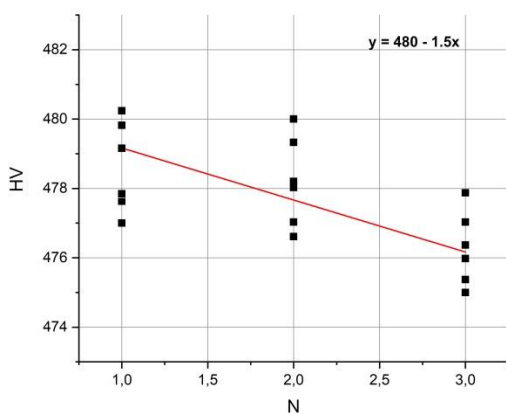


б

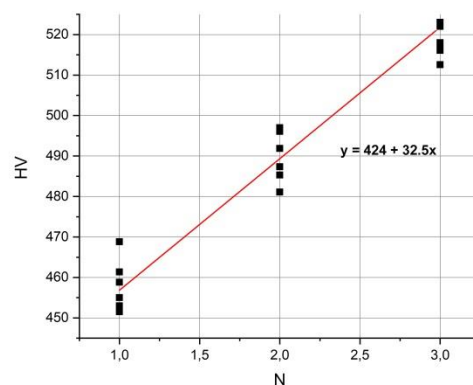


В

Рисунок 4.4 – Распределение твердости (взятое по среднему значению) в поверхностном слое образцов (сталь марки 40Х) после комбинированной обработки (лазерная закалка и алмазное выглаживание): а – в зависимости от глубины упрочнения; б – от скорости перемещения источника лазерного излучения; в – от мощности источника лазерного излучения. Режимы обработки представлены в 3 главе



а



б

Рисунок 4.5 – Зависимость твердости от числа проходов (глубина замера 0,2 мм):

а – ЭМО и алмазное выглаживание; б – лазерная закалка и алмазное выглаживание

При анализе результатов зависимости твердости поверхности от числа проходов при лазерной закалке было установлено, что при увеличении числа проходов твердость увеличивается, но при этом на поверхности появляются следы оплавления и прижогов (рисунок 4.5, б).

Результаты проведенного анализа показывают, что КО приводит к значительному повышению твердости на глубине до 1,3 мм и может быть рекомендована для получения модифицированного слоя и применения ее в качестве упрочняющей технологии для изготовления золотников, плунжеров, толкателей.

В настоящей работе были проведены исследования влияния режимов КО на твердость модифицированного поверхностного слоя. Если при исследовании глубины упрочнения режимы алмазного выглаживания не оказывали влияния на глубину, то на значение твердости будут оказывать влияние.

Результаты замеров твердости и зависимость твердости поверхности от режимов КО представлены в таблицах 4.3, 4.4 и на рисунках 4.6–4.10.

Радиус сферы алмазного выглаживателя  $r$  составляет 1 мм, скорость обработки  $V=45$  м/мин.

Таблица 4.3 – Распределение твердости по глубине для стали марки 40X2МА после комбинированной обработки

Номер измерения	Расстояние от поверхности, мм	Микротвердость HRC	Микротвердость HV
1	0	60	771
2	0,1		
3	0,2	58	740
4	0,3		
5	0,4		
6	0,5	54	580
7	0,6	50	500
8	0,7	45,1	460
9	0,8	44,6	453
10	0,9	44,1	450

Таблица 4.4. – Зависимость твердости упрочненного слоя от режимов комбинированной обработки

Номер опыта	Марка стали	Режим электромеханической обработки	Режим алмазного выглаживания	Твердость HV
1	40X	$I = 1500 \text{ A}; S = 1,5 \text{ мм/об.}; V = 1,1 \text{ м/мин}$	$P = 220 \text{ Н}; S = 0,02 \text{ мм/об.}$	660
2		$I = 1900 \text{ A}; S = 1,5 \text{ мм/об.}; V = 1,1 \text{ м/мин}$		680
3		$I = 1900 \text{ A}; S = 1,5 \text{ мм/об.}; V = 1,4 \text{ м/мин}$		650
4		$I = 1900 \text{ A}; S = 2 \text{ мм/об.}; V = 1,4 \text{ м/мин}$	$P = 200 \text{ Н}; S = 0,02 \text{ мм/об.}$	610
5		$I = 2800 \text{ A}; S = 1,5 \text{ мм/об.}, V = 3,0 \text{ м/мин}$		750
6		$I = 2800 \text{ A}; S = 2,0 \text{ мм/об.}, V = 3,0 \text{ м/мин}$		774
7	40XH2MA	$I = 2800 \text{ A}; S = 2,5 \text{ мм/об.}; V = 3,0 \text{ м/мин}$	$P = 240 \text{ Н}; S = 0,02 \text{ мм/об.}$	730
8		$I = 2800 \text{ A}; S = 2,0 \text{ мм/об.}, V = 2,1 \text{ м/мин}$		740
9		$I = 2800 \text{ A}; S = 2,0 \text{ мм/об.}; V = 1,1 \text{ м/мин}$		750
10		$I = 2300 \text{ A}; S = 1,0 \text{ мм/об.}, V = 3,0 \text{ м/мин}$	$P = 210 \text{ Н}; S = 0,02 \text{ мм/об.}$	698
11		$I = 3000 \text{ A}; S = 1,0 \text{ мм/об.}, V = 1,1 \text{ м/мин}$		776
12		$I = 3000 \text{ A}; S = 1,5 \text{ мм/об.}, V = 3,0 \text{ м/мин}$		775
13	45	$I = 2500 \text{ A}; S = 1,5 \text{ мм/об.}; V = 2,1 \text{ м/мин}$	$P = 200 \text{ Н}; S = 0,04 \text{ мм/об.}$	710
14		$I = 2500 \text{ A}; S = 2,2 \text{ мм/об.}, V = 1,5 \text{ м/мин}$	$P = 250 \text{ Н}; S = 0,02 \text{ мм/об.}$	730
15		$I = 2500 \text{ A}; S = 1,5 \text{ мм/об.}; V = 1,1 \text{ м/мин}$		760

Режимы обработки: мощность лазерного излучателя  $N = 1,2 \text{ кВт}$ ; скорость перемещения лазерного излучателя  $V = 30 \text{ мм/с}$ ; скорость вращения образца  $V_1 = 35...40 \text{ мм/с}$ ; диаметр луча  $d = 7 \text{ мм}$ ; 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 вращения детали  $V = 45 \text{ м/мин}$ .

Режимы лазерной закалки подбирались по рекомендациям и методикам, разработанными на кафедре «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана и АО «НИАТ», Москва [267, 293, 303].

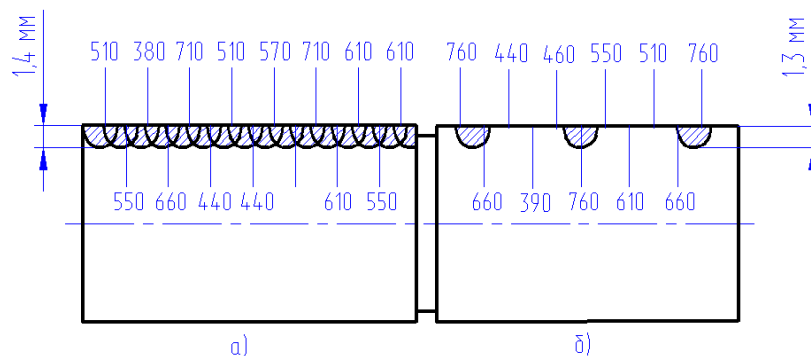


Рисунок 4.6 – Распределение твердости (HV) после комбинированной обработки образца стали марки 45, режимы:

а –  $I = 2500$  А;  $V = 1,2$  м/мин;  $S = 1,5$  мм/об.; б – 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)

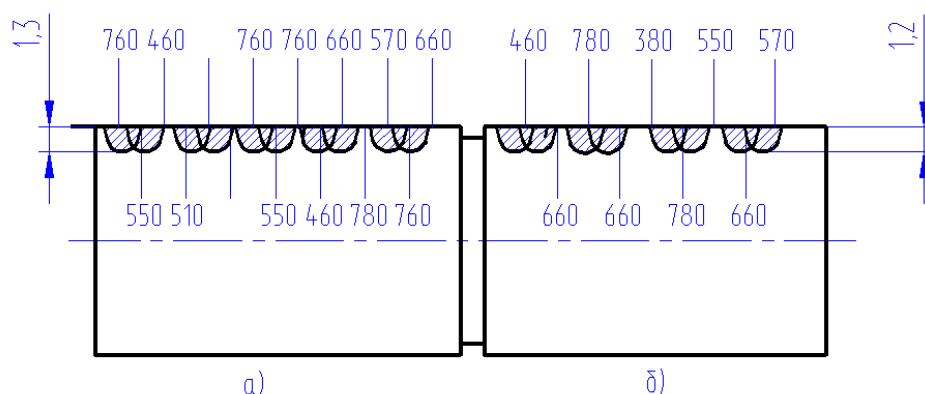


Рисунок 4.7 – Распределение твердости (HV) после комбинированной обработки образца стали марки 40Х:

а –  $I = 2500$  А;  $V = 1,2$  м/мин;  $S = 2,5$  мм/об.; б –  $I = 2500$  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)



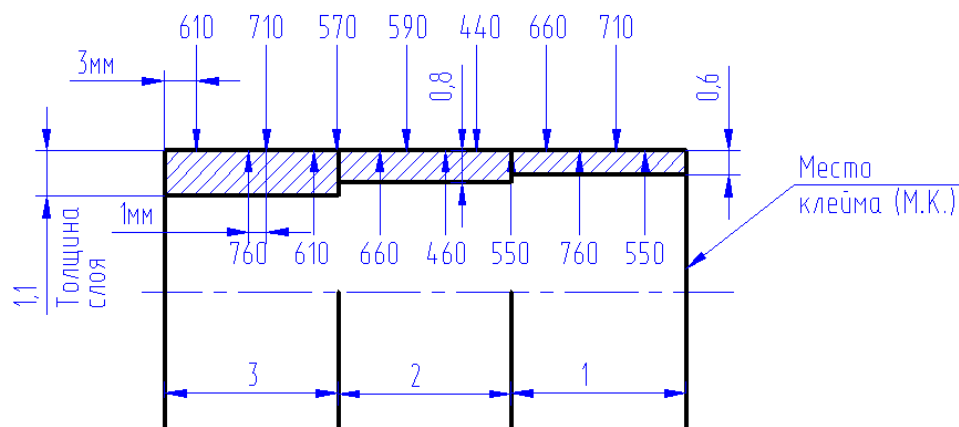


Рисунок 4.8 – Результаты измерения твердости (HV) образца стали марки 40XH2MA:

$I = 2000 \text{ A}$ ;  $S = 2 \text{ мм/об.}$ ;  $1 - V = 3,2 \text{ м/мин}$ ;  $2 - V = 2,1 \text{ м/мин}$ ;  $3 - V = 1,1 \text{ м/мин}$  (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  $V = 45 \text{ м/мин}$ )

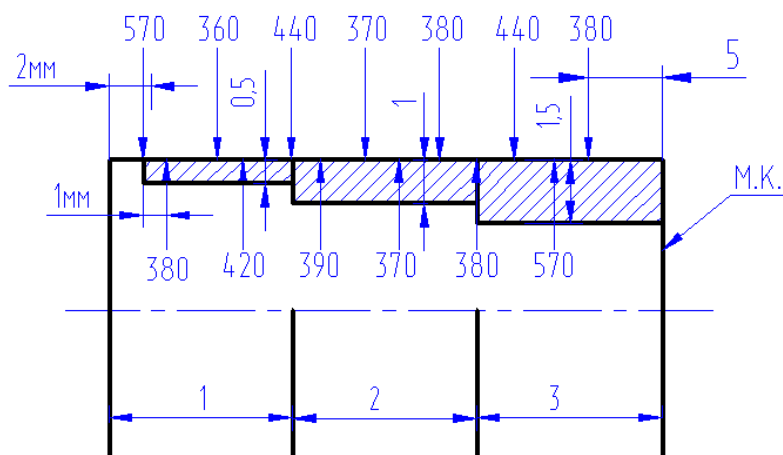


Рисунок 4.9 – Результаты измерения твердости (HV) образца стали марки 20X3MBФ:

режимы комбинированной обработки:  $1 - I = 1300 \text{ A}$ ;  $V = 2,2 \text{ м/мин}$ ;  $S = 1 \text{ мм/об.}$ ;  $2 - I = 1200 \text{ A}$ ;  $V = 1,2 \text{ м/мин}$ ;  $S = 1 \text{ мм/об.}$ ;  $3 - I = 1300 \text{ A}$ ;  $V = 1,1 \text{ м/мин}$ ;  $S = 1 \text{ мм/об.}$  (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 вращения детали  $V = 45 \text{ м/мин}$ )

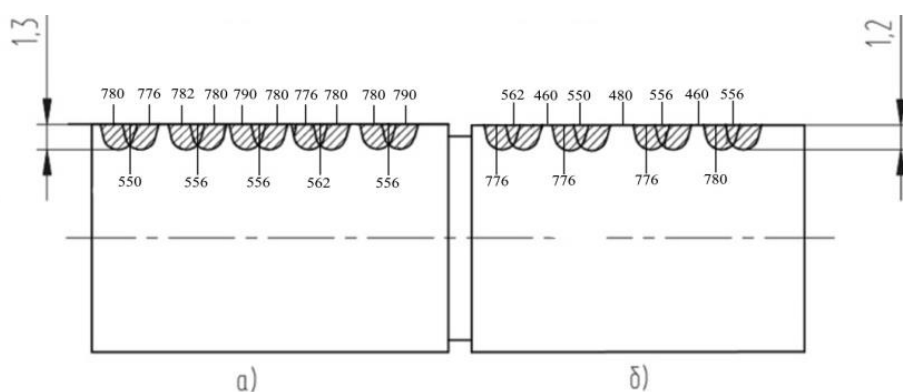


Рисунок 4.10 – Результаты измерения твердости (HV) различных материалов:

*а – сталь марки 40ХН2МА: мощность лазерного излучателя  $N = 1,4$  кВт; скорость перемещения лазерного излучателя  $V = 10$  мм/с; диаметр луча лазера  $d = 2$  мм; скорость вращения образца  $V_1$  35...55 мм/с; сила прижима алмазного выглаживателя  $P = 220$  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 20Х3МВФ: мощность лазерного излучателя  $N = 1,2$  кВт; скорость перемещения лазерного излучателя  $V = 15$  мм/с; диаметр луча лазера  $d = 4$  мм; сила прижима алмазного выглаживателя  $P = 200$  Н; подача алмазного выглаживателя  $S = 0,03$  мм/об.; радиус сферы алмазного выглаживателя  $r = 1$  мм; скорость обработки  $V = 45$  м/мин*

Результаты измерения твердости образцов показали, что сила тока более 3200 А, плотность мощности более 3,5 Вт/мм<sup>2</sup> и подача более 3 мм/об. снижают твердость поверхностного слоя.

Регулируя режимы КО можно получать модифицированный слой различной твердости. Изменяя значение подачи или длительность воздействия концентрированными потоками энергии, можно получить различные соотношения упрочненной и неупрочненной поверхности детали, т. е. создать управляемые рельеф и твердость поверхности.

Поверхности деталей с модифицированным слоем имеют лучшие эксплуатационные свойства за счет уменьшения трения, т. к. канавки повышают маслосъемность и несущую способность поверхности [37, 400, 94, 144, 213, 215, 232, 240 и др.].

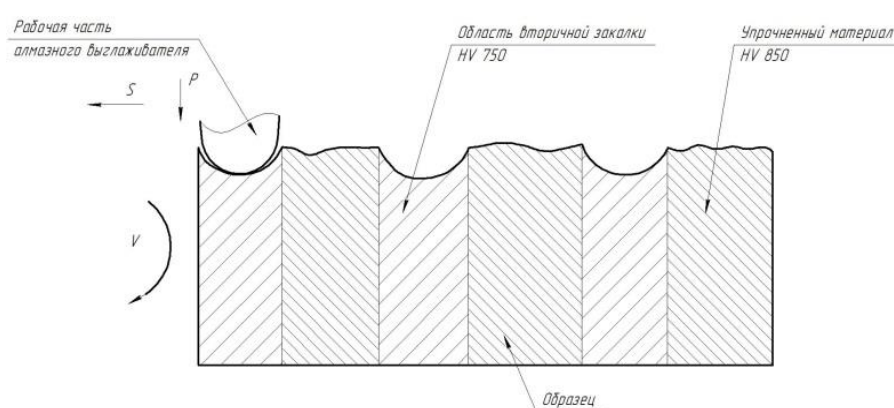
Глубина модифицированного слоя зависит главным образом от длительности воздействия концентрированными потоками энергии и скорости

вращения детали или скорости перемещения источника лазерного излучения. С уменьшением скорости в 3 раза глубина слоя увеличивается в 2 раза, с увеличением силы тока или мощности лазерного излучения глубина модифицированного слоя также увеличивается. С увеличением подачи глубина слоя уменьшается. В то же время слишком малая подача и сила тока выше оптимальной отрицательно влияют на глубину модифицированной поверхности. При больших значениях силы тока и мощности лазерного излучения, при малых подачах, если зона термического влияния превышает ширину ролика-электрода или диаметр лазерного излучения происходит отпуск ранее упрочненной поверхности.

Упрочненная поверхность создается путем нанесения полос закалки с определенным перекрытием зон термического воздействия. Вследствие наличия зон отпуска в областях перекрытия твердость и структура вдоль обрабатываемой детали неоднородны. В местах перекрытия зон термического влияния наблюдаются темные полосы в виде дуг с выходом на поверхность. Это объясняется тем, что при воздействии каждого последующего прохода часть упрочненной зоны подвергается новому нагреву. В области, где температура превышает критическую точку  $A_{C1}$ , происходит повторное закаливание поверхности. В области зоны термического воздействия, где температура повторного нагрева не достигает критической точки  $A_{C1}$ , происходит отпуск предварительно образовавшейся структуры с образованием полосы троостосорбита.

## 4.2. Экспериментальное исследование влияния режимов комбинированной обработки на шероховатость модифицированного поверхностного слоя

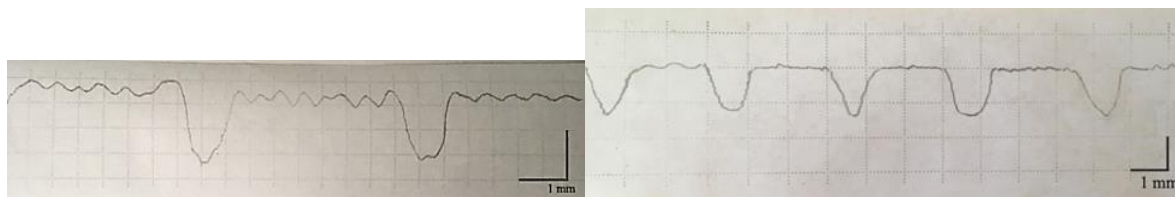
Экспериментальные исследования проводили для подтверждения теоретических расчетов и проверки правильности построенных эмпирических зависимостей.



*Рисунок 4.11 – Схема образования модифицированной поверхности после комбинированной обработки*

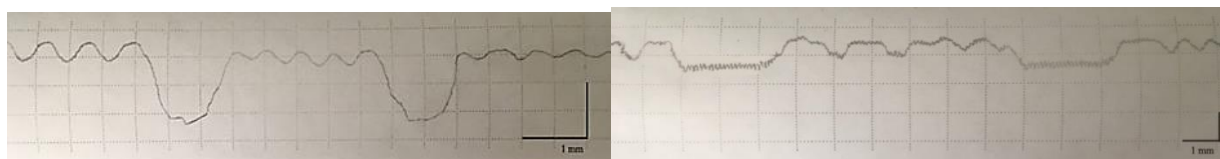
В представленной работе проводили экспериментальное исследование влияния режимов КО на микрорельеф модифицированных слоев. Меняя режимы КО, можно управлять микрорельефом модифицированного слоя (рисунок 4.11).

Анализ профилограмм, полученных с поверхности образцов позволяет сделать вывод о получении модифицированного слоя с благоприятным микрорельефом на поверхности образцов, т. к. форма, расположение и размер каждого элемента поверхности обусловлены определенными закономерностями (рисунки 4.12 – 4.18) [225].



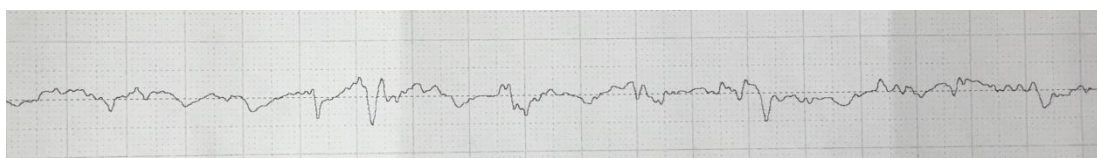
*а*

*б*



*в*

*г*



*д*

*Рисунок 4.12 – Профилограммы поверхности образцов из разных материалов, обработанных в различных режимах комбинированной обработки:*

*а – сталь марки 40Х (электрохимическая обработка и алмазное  
выглаживание); б – сталь марки 40ХН2МА (электрохимическая обработка и  
алмазное выглаживание); в – сталь марки 45 (лазерная закалка и алмазное  
выглаживание); г, д – сталь марки 40Х (лазерная закалка и алмазное  
выглаживание)*

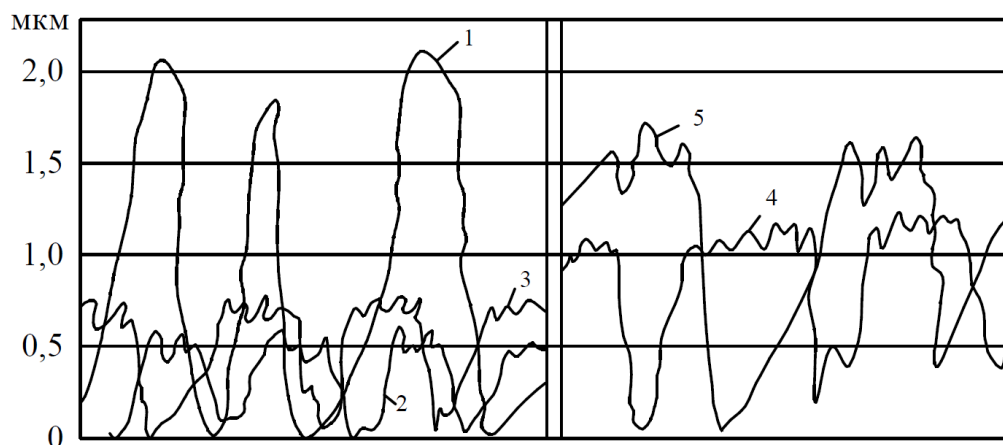


Рисунок 4.16 – Профилограммы образцов, обработанных различными методами:

1 – механическая обработка резанием (точение); 2, 3 – комбинированная обработка при различных режимах; 4 – электромеханическая обработка; 5 – лазерная закалка

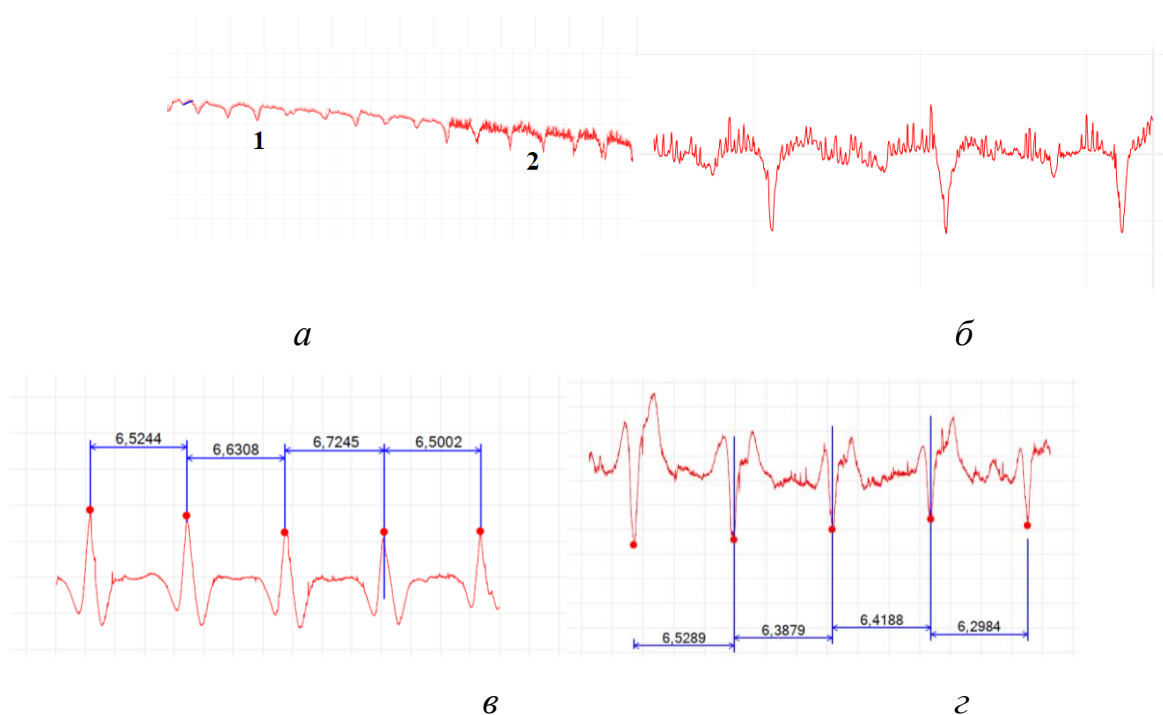
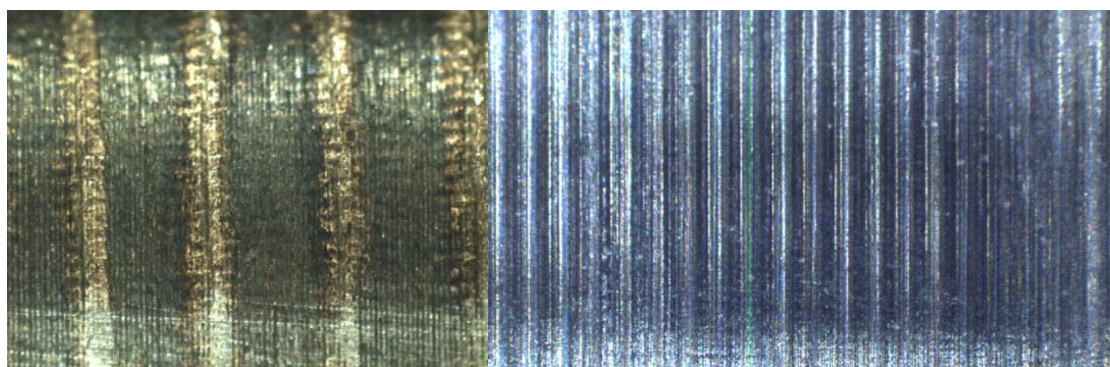


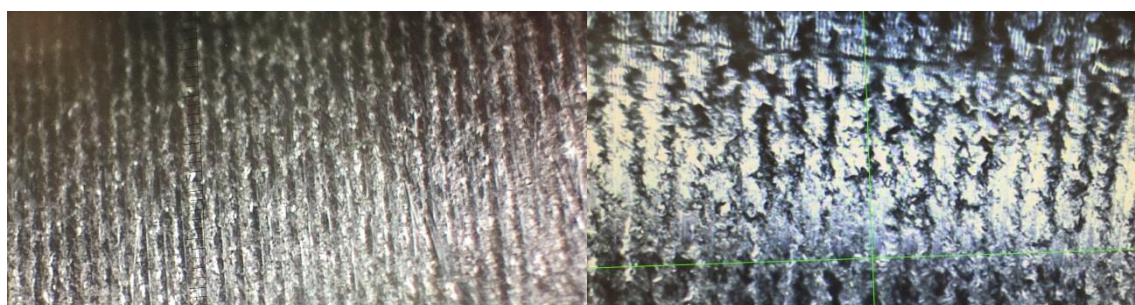
Рисунок 4.17 – Профилограммы, полученные на контурограф-профилометре модели Formtracer Extreme SV-C4500CNC HYBRID:

а – 1 – после комбинированной обработки; 2 – после обработки концентрированными потоками энергии; б, в, г – профилограмма после комбинированной обработки



*a*

*б*



*в*

*г*

*Рисунок 4.18 – Рельеф модифицированного поверхностного слоя после комбинированной обработки:*

*a–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)*

В работах А. Г. Сулова и коллег [229, 230, 232 и др.] подчеркивается, что для расчетов контактной жесткости достаточно использовать следующую систему параметров шероховатости:  $R_a$ ,  $R_{max}$ ,  $R_p$ ,  $t_m$ ,  $S_m$  и  $S$ . В указанных работах также представлены данные о расчете параметров контактного взаимодействия как аналитическими, так и аналитико-экспериментальными методами.

Аналитические расчеты включают в себя более 20 параметров качества двух контактирующих поверхностей. Многие из этих параметров являются



вероятностными и требуют сложного метрологического обеспечения, что затрудняет их использование для производственных целей.

Таблица 4.5 – Зависимость шероховатости поверхности от режимов комбинированной обработки

Материал образца	Режим упрочняющей обработки		Режим алмазного выглаживания	Шероховатость поверхности, Ra, мкм
	ЭМО	Лазерная закалка		
Сталь марки 45	$I = 2500 \text{ А}; V = 1,2 \text{ м/мин}; S = 1,5 \text{ мм/об.}$		$P = 250 \text{ Н}; S = 0,02 \text{ мм/об.}; r = 1 \text{ мм}; V = 45 \text{ м/мин}$	0,402
		$N = 1,2 \text{ кВт}; V = 15 \text{ мм/с}; d = 4 \text{ мм}$		0,5
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
		$N = 1,4 \text{ кВт}; V = 25 \text{ мм/с}; d = 5$		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

На рисунке 4.19 представлены скриншоты с профилографов при измерении шероховатости поверхности после КО.





Рисунок 4.19 – Результаты измерения образцов после комбинированной обработки

В работе В. Ф. Безъязычного [26, 27] отмечается, что на сегодняшний день нет единого мнения относительно степени влияния параметров поверхностного слоя на различные эксплуатационные свойства.

В таблицах 4.5, 4.6 приведены геометрические параметры шероховатости образцов, обработанных различными методами. Согласно работам [59-62, 135, 232, 194, 209 и др.], наиболее полно микрорельеф поверхности можно охарактеризовать комплексным показателем Крагельского– Комбалова. Этот показатель оказывает влияние на износостойкость узла трения.

Таблица 4.6 – Параметры шероховатости образцов после различных методов обработки

Метод обработки	Ra, мкм	R <sub>max</sub>	S <sub>m</sub>	ρ	t <sub>m</sub>	v	b	Δ
Механическая обработка (точение), химико-термическая обработка (цементация, закалка, отпуск), шлифование – по технологии ПАО «КАДВИ», Калуга	0,63	1,94	37,1	24,6	55,8	2,3	1,33	0,083
Механическая обработка (точение), комбинированная обработка: электрохимическая 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	1,8 3	0,467	0,022

$b$  и  $v$  – параметры начального участка кривой опорной поверхности,  $\rho$  – средний радиус кривизны выступов профиля шероховатости,  $t_m$  – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии,  $\Delta$  – комплексный параметр Крагельского – Камбалова.

$$\Delta = \frac{R_{\max}}{(\rho b)^{\frac{1}{v}}}. \quad (34)$$

Чем меньше комплекс  $\Delta$ , тем выше несущая способность профиля шероховатости поверхности [49, 142, 230, 232].

Таким образом, КО обеспечивает благоприятный рельеф модифицированной поверхности. Кроме того, значение шероховатости после КО позволяет исключить из технологического процесса операцию шлифования, количество шлифовочных прижогов и термических трещин. Это создаст резерв для повышения износостойкости поверхностей золотников, плунжеров и др. Но КО является не окончательной операцией механической обработки

технологического процесса изготовления золотников и плунжеров. После КО проводят полирование или доводку в соответствии с техпроцессом, чтобы обеспечить заданные технические требования.

#### **4.3. Экспериментальное исследование влияния режимов комбинированной обработки на величину и характер остаточных напряжений в модифицированном поверхностном слое**

Остаточные напряжения обуславливают качество и эксплуатационные характеристики машин и механизмов [5, 33, 50, 182, 190, 227, 234]. Уровень остаточных напряжений является во многих случаях важным параметром, определяющим срок службы. Остаточные напряжения могут играть как положительную, так и отрицательную роль в изменении износостойкости изделий, определяя тем самым их работоспособность при эксплуатации.

Значительные остаточные напряжения могут возникать после механической обработки, действовать только в поверхностном слое глубиной в несколько десятых долей миллиметра. Эти напряжения влияют на износостойкость и прочность деталей.

Сжимающие остаточные напряжения, формирующиеся на поверхностях с использованием различных технологических операций, предотвращают начало и распространение усталостных микротрещин. Создание поверхностного слоя с сжимающими остаточными напряжениями имеет важное значение для деталей, подвергающихся условиям трения и износа. Сжимающие остаточные напряжения могут оказывать положительное воздействие на износостойкость и прочность материала, в частности:

- 1) предотвращать зарождение и распространение трещин, что увеличивает срок службы детали;

2) уменьшать чувствительность поверхности к локализации напряжений от внешних усилий вблизи конструктивных и технологических концентраторов, что может снизить риск разрушения;

3) улучшать сопротивление усталости материала, что важно при переменных напряжениях;

4) снижать трение и износ, что повышает износостойкость.

Таким образом, создание сжимающих остаточных напряжений становится важной технологической задачей при обработке деталей, которые подвергаются воздействию трения и износа в процессе эксплуатации [8, 50, 19, 33, 187, 232, 336, 337].

Эксплуатационные свойства деталей зависят от состояния поверхностного слоя. Установлено, что изготовление деталей из одного и того же материала, но по различной технологии и с разными режимами обработки приводит к резкому изменению свойств поверхностного слоя, при этом срок службы таких деталей различен [33, 84, 128].

При применении различных технологий обычно ограничиваются исследованиями в рамках отдельных операций. Тем не менее применение высокоинтенсивных потоков энергии, в данной работе, обеспечивало учет физико-механических характеристик и воздействие фактора наследственности.

Особенно ярко наследственность проявляется при комбинированных методах обработки, когда технологические факторы последовательно друг за другом или совместно параллельно воздействуют на обрабатываемую деталь. Влияние наследственности проявляется не только после завершения финишных операций технологического процесса, но и в процессе эксплуатации под воздействием различных параметров качества поверхности, формируемых в поверхностном слое детали в ходе предшествующей обработки [2, 8, 263, 290, 291]. С точки зрения технологической и эксплуатационной наследственности есть возможность определить взаимосвязь между технологическими операциями и переходами, в том числе случаями применения комбинированных методов

обработки деталей машин [263, 291]. В данной работе приведены материалы выполненных исследований напряжения I рода после механической обработки резанием и на всех переходах КО и наследственного влияния режимов КО на величину и знак остаточных напряжений. Напряжения I рода являются более значимыми для практического применения [227, 248].

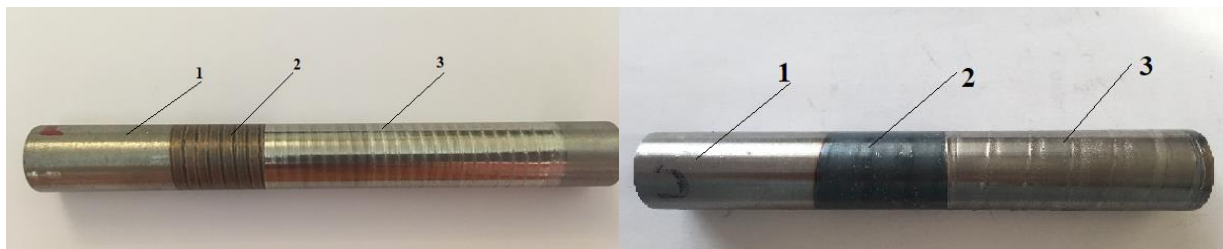
В представленной работе была установлена взаимосвязь режимов КО с величиной и знаком остаточных напряжений. Для проверки теоретических результатов были выбраны образцы стали марок 45, 40Х, 20Х3МВФ диаметром  $12\pm 1$  мм, длиной  $120\pm 10$  мм, обработанные в различных режимах КО (рисунок 4.20).

В ходе обработки концентрированными потоками энергии поверхностный слой детали мгновенно поглощает значительное количество энергии, что приводит к формированию неравновесных структур с избытком энергии. Экспериментальное определение остаточных напряжений трудоемко и требует полного разрушения образцов или реальных деталей. Перспективным методом определения остаточных напряжений является метод неразрушающего контроля.

Рентгеновский метод дает возможность непосредственно измерять деформацию кристаллической решетки. Основное его преимущество состоит в том, что величину и знак напряжений можно определить без разрушения деталей или образцов.

В диссертационной работе проведен рентгеноструктурный анализ различных областей поверхностных слоев образцов: исходного состояния материала, состояния после токарной обработки (МО), после обработки концентрированными потоками энергии и после алмазного выравнивания (АВ), который заключается в съемке рентгеновского спектра для проведения фазового анализа материала, оценки структурного состояния материала после разных типов обработок по профилю рентгеновской линии (310), а также в измерении остаточных макронапряжений. Во всех обработанных участках измерялись

макронапряжения. Измерения проводились как в осевом  $L$ , так и в тангенциальном  $T$  направлениях.



*Рисунок 4.20 – Образцы для исследования:*

*1 – область после механической обработки; 2 – область после обработки концентрированными потоками энергии; 3 – область после алмазного выглаживания*

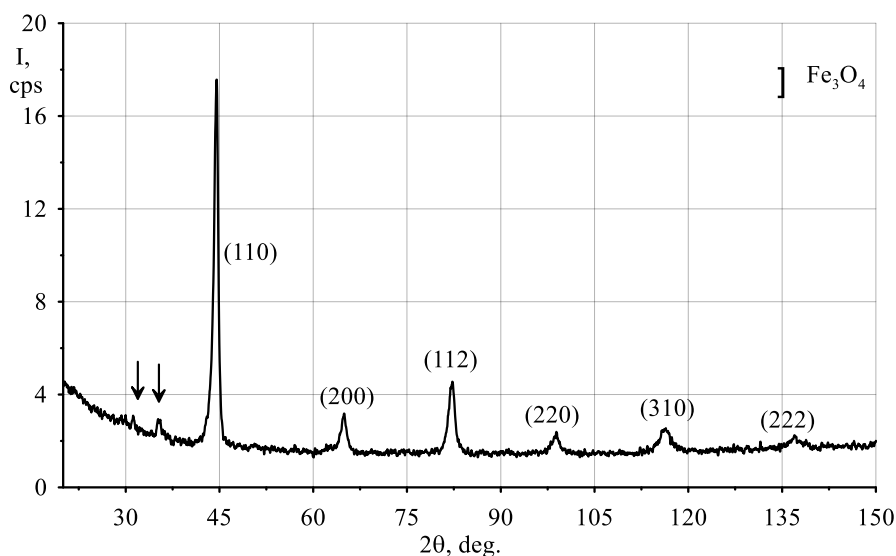
Измерения макронапряжений проводили методом поворота образца [306-308, 325, 326]. Измеряли деформацию межплоскостных расстояний кристаллической структуры поверхностных слоев образца по смещению рентгеновского отражения (310). При расчете макронапряжений использовано значение модуля Юнга, равное 181 ГПа, а также коэффициент Пуассона, равный 0,320.

Запись дифракционных спектров для определения фазового состава образцов и оценки их структурного состояния проводилась на дифрактометре Bruker D8 Discover при использовании излучения  $\text{CuK}\alpha$  и позиционно-чувствительного детектора LynxEye. Съемка осуществлялась с шагом в  $0,01^\circ$  по брэгговскому углу  $2\theta$  град. и накоплением в 1 на каждую полосу детектора, что в сумме дает порядка 170 град. на каждую точку по углу. Для идентификации фаз использовалось программное обеспечение Bruker AXS DIFFRAC.EVA v.4.2 и международная база данных ICDD PDF-2, для определения структурных характеристик – TOPAS, коррективировка профиля рентгеновских отражений проводилась по данным для эталонного образца  $\text{LaB}_6$  (NIST SRM 660b).

Измерения макронапряжений осуществляли с использованием программного обеспечения LEPTOS [307, 308].

На рисунке 4.21 представлен дифракционный спектр участка образца после КО. Согласно полученным результатам, только на участках, где была проведена КО, наряду с основной фазой  $\alpha$ -железа присутствует дополнительная фаза оксида железа, линии которой представлены в приведенном на рисунке 4.21 спектре.

В работе выполнена проверка достоверности теоретических расчетов остаточных макронапряжений на модифицированной поверхности образцов и влияния технологической наследственности на величину и знак остаточных напряжений (таблицы 4.7–4.10).



*Рисунок 4.21 – Дифракционный спектр поверхностных слоев образцов после комбинированной обработки (указаны индексы рентгеновских отражений от плоскостей основной фазы ( $\alpha$ -Fe); стрелками показаны линии дополнительной фазы (оксида железа  $Fe_3O_4$ ))*

Большая ошибка измерения макронапряжений объясняется неровностью исследованной поверхности обработанных участков образцов. Тем не менее удастся получить закономерные изменения макронапряжений в зависимости от типа обработки.

На рисунке 4.22 приведены графики зависимости осевых (*a*) и окружных (*b*) остаточных макронапряжений, действующих на различных участках

исследованных образцов. Согласно полученным результатам на большинстве исследованных участков действуют сжимающие остаточные макронапряжения

Таблица 4.7 – Результаты замеров для стали марки 45

Номер точки на образце	Обработка	Напряжения, МПа		Деформация кристаллической решетки $a$ , А	FWHM, град.
		Осевые	Окружные(тангенциальные)		
1	МО	-504±54	-524±138	2,8717	1,2322
2	ЭМО	-554±15	-579±406	2,8684	2,3448
3	АВ	-1235±119	-1237±293	2,8802	2,2039
4	МО	-214±19	-214±74	2,8721	1,2063
5	ЭМО	-567±128	-436±23	2,8694	1,6070
6	АВ	-1258±96	-1410±31	2,8785	2,2343
Примечание: МО–механическая обработка; ЭМО–электромеханическая обработка; АВ–алмазное выглаживание.					

Таблица 4.8 – Результаты замеров для стали марки 20Х3МВФ

Обработка	Напряжения, МПа		$a$ , А	FWHM, град.
	Осевые	Окружные(тангенциальные)		
Механическая обработка	-125±53	-147±44	2,8682	0,4110
Электромеханическая обработка	-554±15	-479±406	2,8684	2,3448
Алмазное выглаживание	-1235±119	-1237±293	2,8802	2,2039
Алмазное выглаживание	-1142±72	-1568±354	2,8771	2,9638
Электромеханическая обработка	-180±89	-191±131	2,8689	1,6080



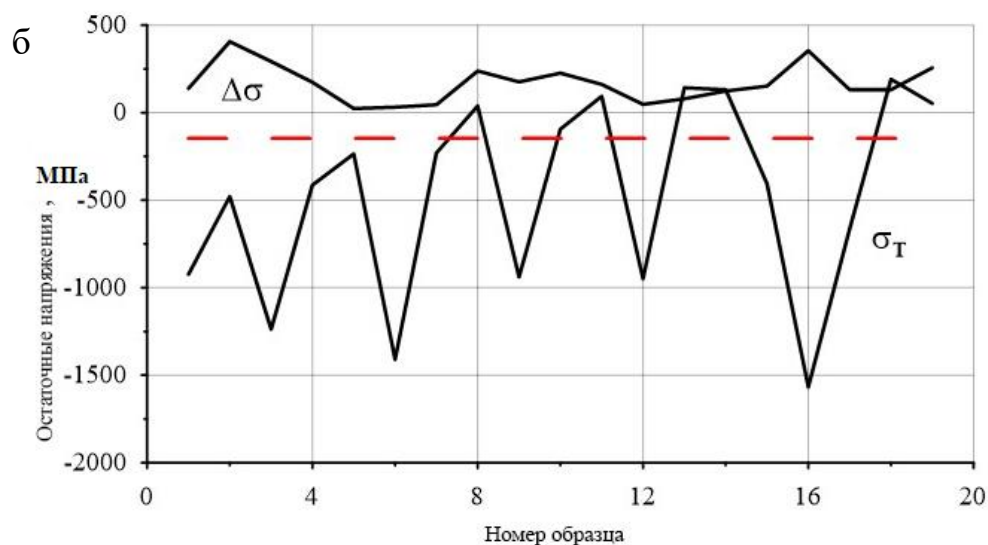
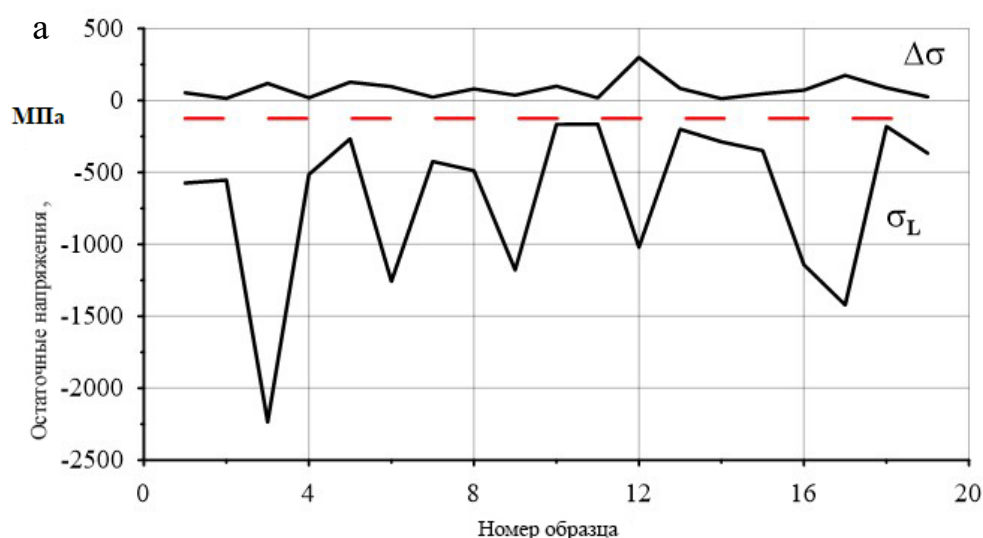
Таблица 4.9 – Результаты замеров для стали марки 40X

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 40X2МА	-1760,5±14,6	-1975,6±41,3
5	Сталь марки 20X3МВФ	-1738,7±129,1	-1420,0±186,3
7	Сталь марки	-1806,1±43,4	-1455,7±17,8
9	Сталь марки 40X	-2019,8±172,5	-1127,5±114,9

Таблица 4.10 – Остаточные напряжения на поверхности образцов после комбинированной обработки

Обработка	Напряжения, МПа		a, А	FWHM, град.
	Осевые	Окружные		
Механическая обработка	-145±33	-52±48	1,9682	0,4220
Электрохимическая обработка	-572±25	-521±426	2,8672	2,3548
Комбинированная обработка (электрохимическая обработка и алмазное выглаживание)	-1355±121	-1251±203	2,8892	2,4039
Комбинированная обработка (лазерная закалка и алмазное выглаживание)	-1156±52	-1488±314	2,8671	2,9634
Лазерная закалка	-480±89	-691±131	2,8579	2,6080

Максимальные значения макронапряжений наблюдаются для участков, на которых проводилось алмазное выглаживание. Для этих же участков зарегистрирована максимальная ширина рентгеновских отражений, свидетельствующая о максимальной искаженности кристаллической структуры материала (рисунок 4.23 г, 4.24). При этом период кристаллической решетки также оказывается наибольшим для участков после алмазного выглаживания (рисунок 4.22в, 4.23).



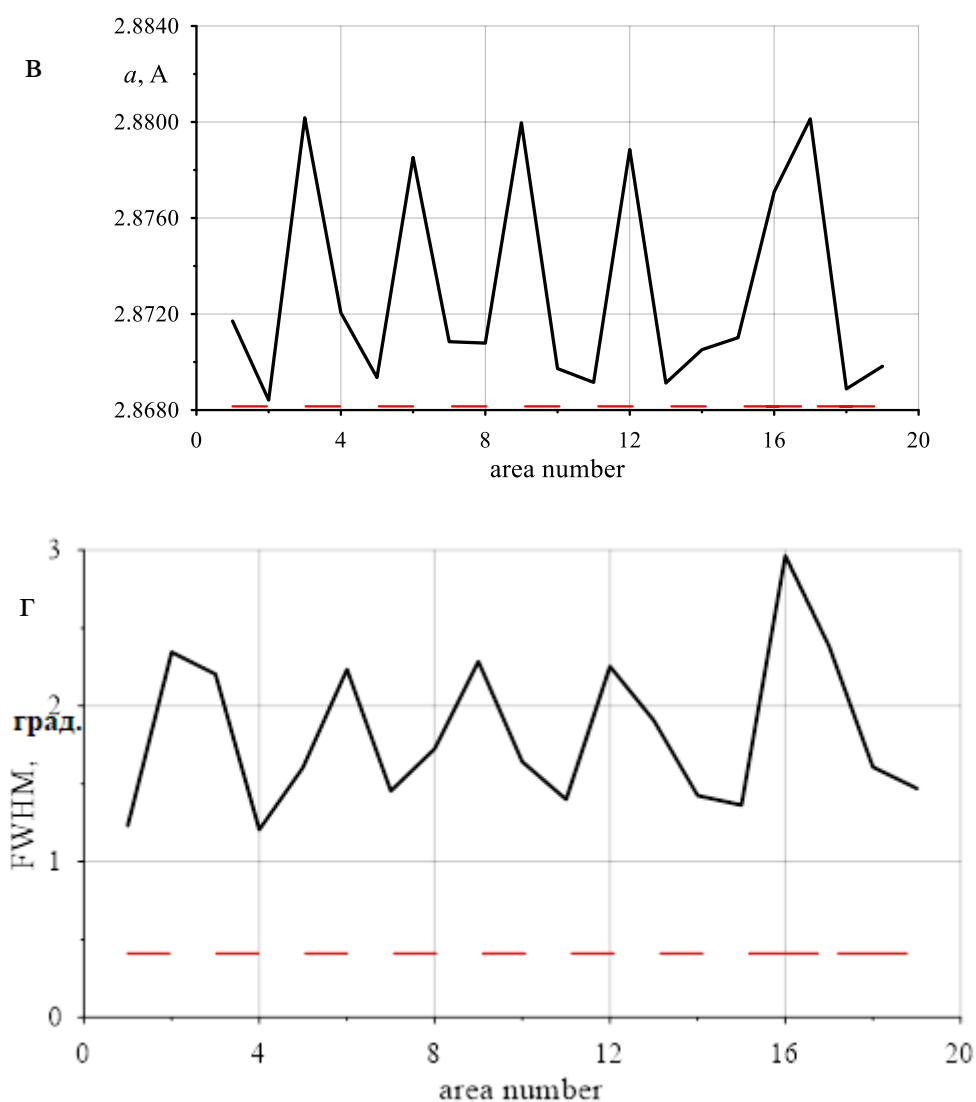


Рисунок 4.22 – Зависимость величины макронапряжений : а – в осевом; б – в окружном (б) направлениях, а также величины ошибки при определении макронапряжений ( $\Delta\sigma$ ). Штриховой линией показана величина макронапряжений в исходном состоянии; в – зависимость параметра решетки; г – полуширины рентгеновской линии. Штриховой линией показана величина макронапряжений в исходном состоянии

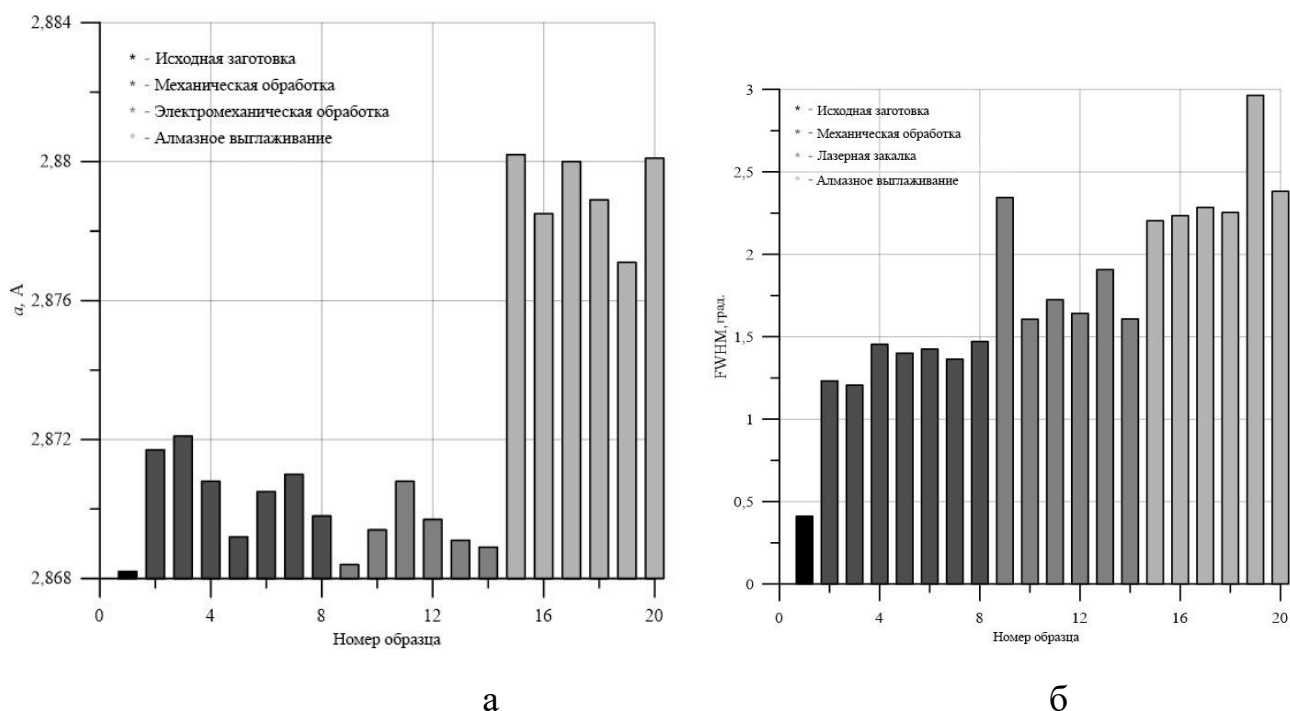


Рисунок 4.23 – Изменение параметров кристаллической решетки: а – деформация; б – полуширина рентгеновской линии

Все измеренные параметры кристаллической структуры  $\alpha$ - фазы превосходят эталонное значение, что свидетельствует о расширении кристаллической решетки в радиальном направлении образцов. Тогда в тангенциальном и осевом направлениях должны действовать сжимающие остаточные напряжения. Чем выше значение параметра решетки, тем большие сжимающие напряжения действуют в осевом и тангенциальном направлениях.

Полуширина рентгеновской линии характеризует мелкодисперсность структуры материала и величину остаточных макронапряжений. Максимальные значения этих величин также коррелируют с максимальными по величине сжимающими напряжениями (рисунки 4.22, 4.23).

Анализ технологической наследственности позволил установить причины отклонений и условия регулирования параметров КО, в ходе которых формируются свойства поверхности образцов. Дефекты и искажения кристаллической решетки заметны после механической обработки и после обработки концентрированными потоками энергии, но особенно сильно заметны изменения после алмазного выплаивания. В поверхностном слое происходят

процессы, которые обеспечивают улучшение эксплуатационных свойств деталей и способствуют повышению надежности их работы.

#### 4.4. Экспериментальное исследование влияния режимов комбинированной обработки на структуру модифицированного поверхностного слоя

К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал по исследованию влияния структуры металла на механические свойства [17, 18, 172, 253, 311]. Получен ряд соотношений, описывающих взаимосвязь между механическими свойствами и параметрами структуры. Наиболее часто измеряемый параметр микроструктуры — размер зерна поликристаллических материалов. Для изменения механических свойств зерно измельчают, что обычно приводит к одновременному повышению прочности и вязкости металла, т. е. к увеличению сопротивления хрупкому разрушению [124, 235].

На пропорциональную зависимость между износом и твердостью стали при обычной термообработке указывали многие исследователи [11, 26, 34, 43 и др.].

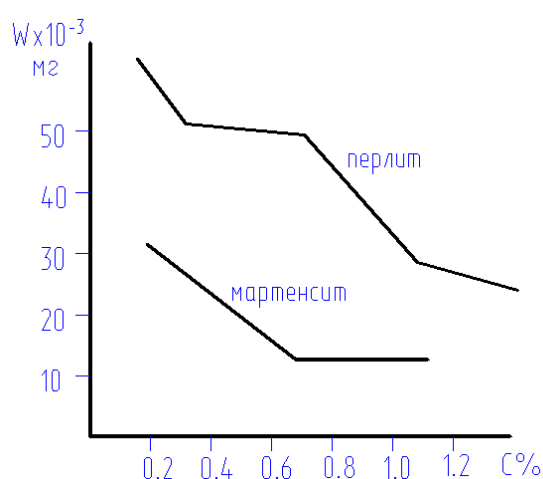


Рисунок 4.24 – Зависимость величины износа от структуры и процентного содержания углерода в стали [11, 266]

Приведенный график (рисунок 4.24) показывает зависимость износа от структуры и процентного содержания углерода в стали, взятое по средним значениям [266]. Данный анализ литературы проведен для сравнения полученных результатов в диссертационном исследовании с результатами других ученых.

В данной работе исследовали влияние КО на структуру поверхностного слоя. При КО одновременно происходят нагрев и деформация поверхностного слоя. Это позволяет создать в поверхностном слое неравновесные структуры, которые благоприятно влияют на эксплуатационные показатели пар трения.

Процесс изнашивания зависит от многих факторов, к которым в первую очередь следует отнести сочетание физико-механических свойств материалов, шероховатость и точность контактных поверхностей, скорость и характер трения, удельную нагрузку, смазку. Определяющим фактором при работе в равных условиях является твердость.

Методы поверхностного пластического деформирования незначительно повышают твердость, порядка 3...4 единиц по HRC. Однако их можно использовать при окончательной обработке после всех видов применения сочетаний термической обработки, что способствует созданию благоприятного рельефа на высокотвердых поверхностях.

Наибольшее распространение в машиностроении для получения износостойких поверхностей получили такие процедуры, как цементация и азотирование, которые обеспечивают твердость HRC 53...64.

Процесс образования мартенситной фазы в аустенитных сталях в результате охлаждения или холодной пластической деформации действительно является важным аспектом, особенно при рассмотрении изменений структуры и свойств материала. Процесс образования мартенсита в таких сталях может сопровождаться изменением механических свойств, включая увеличение твердости и прочности. Однако при неудовлетворительных условиях обработки мартенситный тип превращения может вызвать внутренние напряжения и другие нежелательные эффекты. Тщательное контролирование условий обработки важно

для достижения нужных механических свойств и предотвращения негативных последствий мартенситного превращения. [11, 19, 23, 227, 248].

Превращение аустенита в мартенсит может происходить при наличии двух основных факторов: деформации и изменения температуры. Обычно этот процесс известен как мартенситное превращение и является одним из способов упрочнения металлов.

Количество образующегося мартенсита зависит от степени деформации и температуры. При увеличении степени деформации или уменьшении температуры количество образующегося мартенсита может увеличиваться. Однако при повышении температуры интенсивность мартенситного превращения может снижаться. Этот процесс широко используется в термической обработке металлов для получения желаемых механических свойств, таких как повышенные твердость и прочность [17, 23, 32, 38 и др.].

Запись дифракционных спектров для определения фазового состава образцов и оценки их структурного состояния проводилась на дифрактометре Bruker D8 Discover при использовании излучения  $\text{CuK}_\alpha$  и позиционно-чувствительного детектора LynxEye. Для идентификации фаз использовалось программное обеспечение BrukerAXS DIFFRAC.EVA v.4.2 и международная база данных ICDD PDF-2, для определения структурных характеристик – TOPAS. Для исследования были изготовлены образцы, представленные на рисунке 4.20.

Согласно данным работ [307, 308, 325, 326] параметр кристаллической структуры  $\alpha$ -железа составляет 2,8665 Å. Легирование углеродом в соответствии с равновесной фазовой диаграммой приводит к образованию в стали дополнительной фазы – цементита. Учитывая отсутствие растворимости углерода в  $\alpha$ -железе, можно считать указанный выше параметр характерным для ОЦК-Fe исследованных образцов стали. Микроструктура основного металла – сорбит, микроструктура упроченного слоя – троостит.

Пластическая деформация может влиять на мартенситное превращение в коррозионностойких аустенитных сталях. Пластическая деформация вносит

изменения в структуру и свойства металла, в том числе может изменять термодинамические условия для превращения мартенсита.

Пластическая деформация может вызывать изменения в кристаллической решетке и структуре, что в свою очередь может сказываться на термических превращениях, таких как мартенситное превращение. Эти изменения могут оказывать влияние на механические свойства и химическую стойкость материала.

При нагреве фазовые превращения происходят с уменьшением удельного объема при переходе перлита и феррита в аустенит. При охлаждении происходит превращение аустенита в мартенсит, сопровождающееся значительным увеличением удельного объема. Наружные слои, охлаждаясь быстрее, претерпевают фазовые превращения раньше и поэтому в процессе охлаждения сжаты, а сердцевина растянута.

Совмещение деформации и фазовых превращений в одном цикле обработки является эффективным способом повышения механических свойств. В этом случае происходит горячая деформация аустенита, и последующая закалка на мартенсит (при регламентированных условиях деформации) приводит к одновременному росту прочности и пластичности стали в высокопрочном мартенситном состоянии по сравнению с другими методами ТО и ХТО.

#### **4.5. Исследование влияния режимов комбинированной обработки на наличие зон концентрации напряжений в модифицированном поверхностном слое при влиянии фактора наследственности**

При комбинированной обработке формируются зоны перекрытия полос закалки, размер которых зависит от подачи ролика-электрода или смещения луча лазера. В указанных зонах наблюдается некоторое снижение твердости. После упрочняющей обработки алмазный шлифовальный круг окончательно сглаживает



микронеровности профиля, при этом образуется слой с маслоудерживающими карманами в области перекрытия.

Однако чередование зон отпуска может привести к образованию на поверхности трещин, зон концентрации напряжений или других скрытых дефектов. Присутствие концентраторов напряжений может снизить усталостную прочность деталей и служить причиной их разрушения, что может привести к остановке всего механизма. После алмазного выравнивания также возможно образование перенаклепа поверхности. Поэтому вопрос о диагностике скрытых зон концентраций напряжений и зон развития трещин остается актуальным.

В диссертационной работе выявление зон концентрации напряжений (ЗКН) и их наследственное влияние на качество модифицированного слоя проводили после всех этапов КО: до КО – после механической обработки, ЭМО, лазерной закалки, алмазного выравнивания.

По результатам контроля методом МПМ, представленным в виде магнитограмм, видно, что применение различных режимов электрохимической обработки (ЭМО) и лазерной закалки практически на всех образцах вызывает появление ЗКН, которые характеризуются значительным изменением собственных магнитных полей рассеяния (СМРР) и его градиента ( $dH/dx$ ). Магнитограммы, полученные до и после применения различных режимов и видов обработки представлены на рисунке 4.25, а, б, в. Магнитограмма образцов до механической обработки представлена на рисунке 4.25, г.

Зоны алмазного выравнивания как заключительного этапа КО характеризуются равномерным распределением СМРР и низкими значениями его градиента, что показывает однородность структурного состояния металла образцов после КО. Исследования изменения твердости металла вдоль образующих образцов показали, что после КО значения твердости находятся вблизи середины диапазона значений твердости микрорельефа профиля (см. рисунок 4.25, а) и имеют незначительный разброс значений — не более 2 %. После КО изменения твердости металла вдоль образующих образцов имеют

значительный разброс значений – более 26 %, что подтверждает неоднородность структурного состояния модифицированного слоя (зоны отпуска имеют различия по значению твердости) (рисунок 4.25, з).

В зонах механической обработки практически на всех образцах зафиксировано заметное изменение СМПР и его градиента, но значительно меньше по сравнению с ЭМО. Аналогичные результаты контроля методом МПМ были получены и на других исследованных образцах (рисунок 4.26).

В технологической цепочке при изготовлении деталей и на стадии эксплуатации существуют своего рода барьеры. Некоторые технологические факторы не могут их преодолеть, в таком случае барьеры не оказывают существенного влияния на конечные свойства объекта. Другие факторы проходят эти барьеры, но значительно ослабевает их влияние на конечные свойства объекта. Существенным препятствием (технологическим барьером) являются термические или химико-термические процессы, а также операции, сопровождающиеся поверхностным деформированием. Следовательно, комбинируя методы термической или химико-термической обработки и различные упрочняющие или деформирующие операции, можно управлять процессом технологического и эксплуатационного наследования. При этом свойства, положительно влияющие на качество поверхностных слоев сохранялись в течение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно, ликвидировались в его начале [8, 5, 227, 248 и др.].

Перед обработкой на поверхности некоторых заготовок имелись множественные риски, царапины, изменения структуры и другие несовершенства, которые могут быть ЗКН. При механической обработке резанием все дефекты на поверхности остались. На магнитограммах у большинства образцов имеются пики возмущения. При снятии припуска некоторые дефекты сохранились (рисунок 4.25, 4.26).

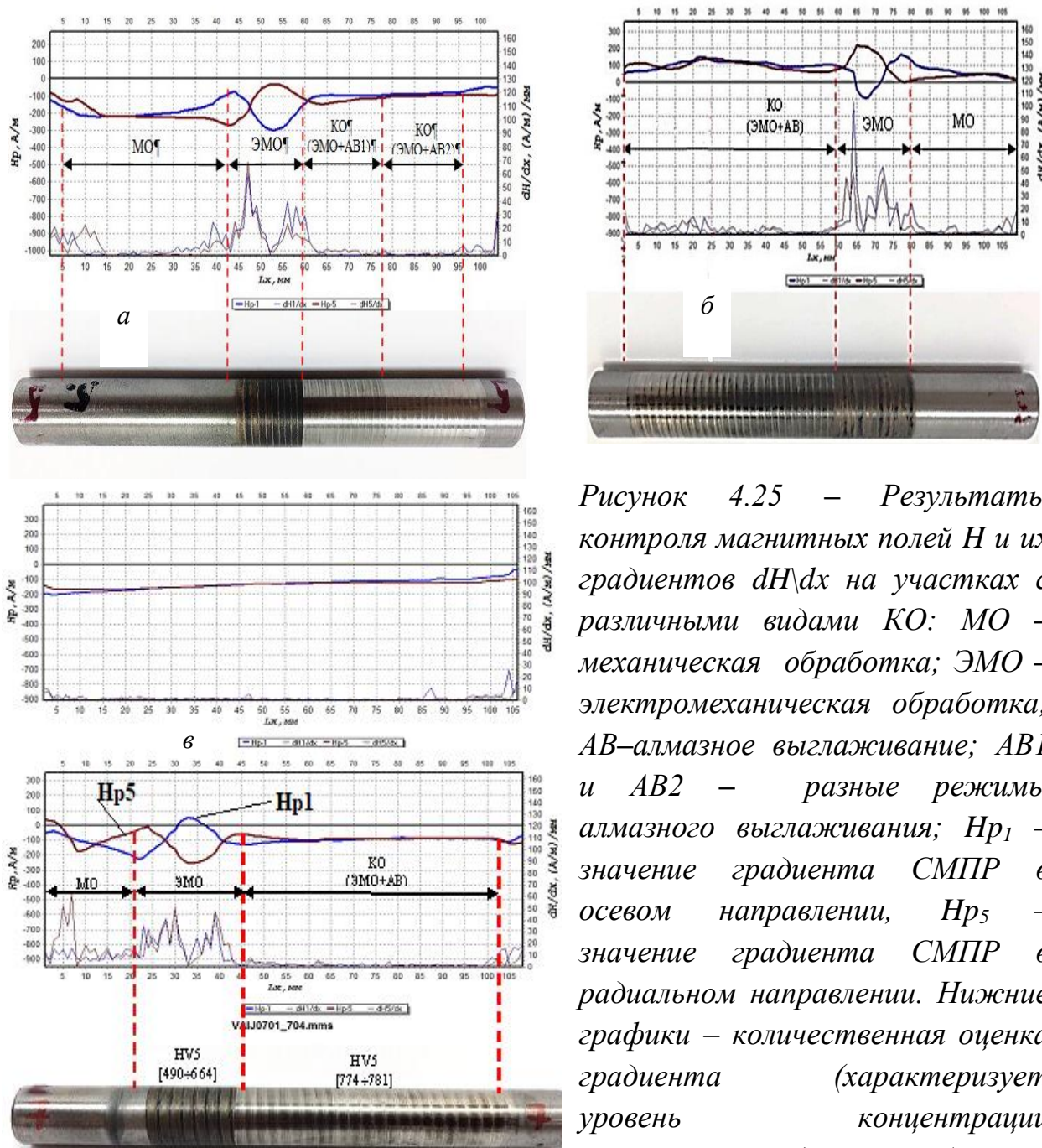


Рисунок 4.25 – Результаты контроля магнитных полей  $H$  и их градиентов  $dH/dx$  на участках с различными видами КО: МО – механическая обработка; ЭМО – электромеханическая обработка; АВ–алмазное выглаживание; АВ1 и АВ2 – разные режимы алмазного выглаживания;  $H_{p1}$  – значение градиента СМР в осевом направлении,  $H_{p5}$  – значение градиента СМР в радиальном направлении. Нижние графики – количественная оценка градиента (характеризует уровень концентрации напряжений, в данной работе не учитывалась)

После лазерной заковки у большинства образцов наблюдается сглаживание пиков напряженности, происходит увеличение однородности металла, изменяется знак остаточных напряжений (растягивающие переходят в сжимающие). Причем

такие результаты были у образцов, обработанных с оплавлением и без оплавления.

После алмазного выглаживания магнитограммы имеют участки без возмущения. Можно обозначить, что структура на поверхности образцов становится однородной без ЗКН. Это будет благоприятно влиять на работоспособность золотниковых и плунжерных пар трения. В некоторых образцах имелись ЗКН после лазерной закалки, однако после алмазного выглаживания они не обнаружены.

Таким образом, при получении модифицированного слоя при обработке концентрированными потоками энергии и алмазном выглаживании ЗКН не образуются на поверхности. По результатам исследований можно сделать следующие выводы. Сочетанием режимов КО (ЭМО или лазерной закалки и алмазного выглаживания) можно получить модифицированные поверхности с заданными свойствами без ЗКН. Все дефекты на поверхности после механической обработки были частично сглажены после лазерной закалки или ЭМО и окончательно исключены после алмазного выглаживания. В этих образцах нет ЗКН (рисунок 4.25, 4.26).

В некоторых образцах имеются следы дефектов поверхностного слоя (не удачно выбраны режимы КО). Эти дефекты могут снизить ресурс работы у деталей с контактными поверхностями в жидких рабочих средах.

Однако имеются образцы, которые имеют плохие результаты: множественные поверхностные дефекты, которые остались после механической обработки, не сгладились после КО. Причина – выход значений режимов КО за рамки оптимальных диапазонов.

Отличительная особенность представленной в данной работе КО сводится к определению и прогнозированию показателей качества поверхностного слоя – использованию принципа суперпозиции, согласно которому каждый из действующих технологических факторов не зависит от других, а результат совместного действия представляет качественные изменения поверхностного

слоя. Выбранный способ диагностики – МПМ доказал равномерное намагничивание образцов, что свидетельствует об отсутствии скрытых дефектов, ЗКН, таких как структурная неоднородность, металлургические дефекты, очаги зарождения трещин на поверхности, очаги зарождения трещин внутри образцов.

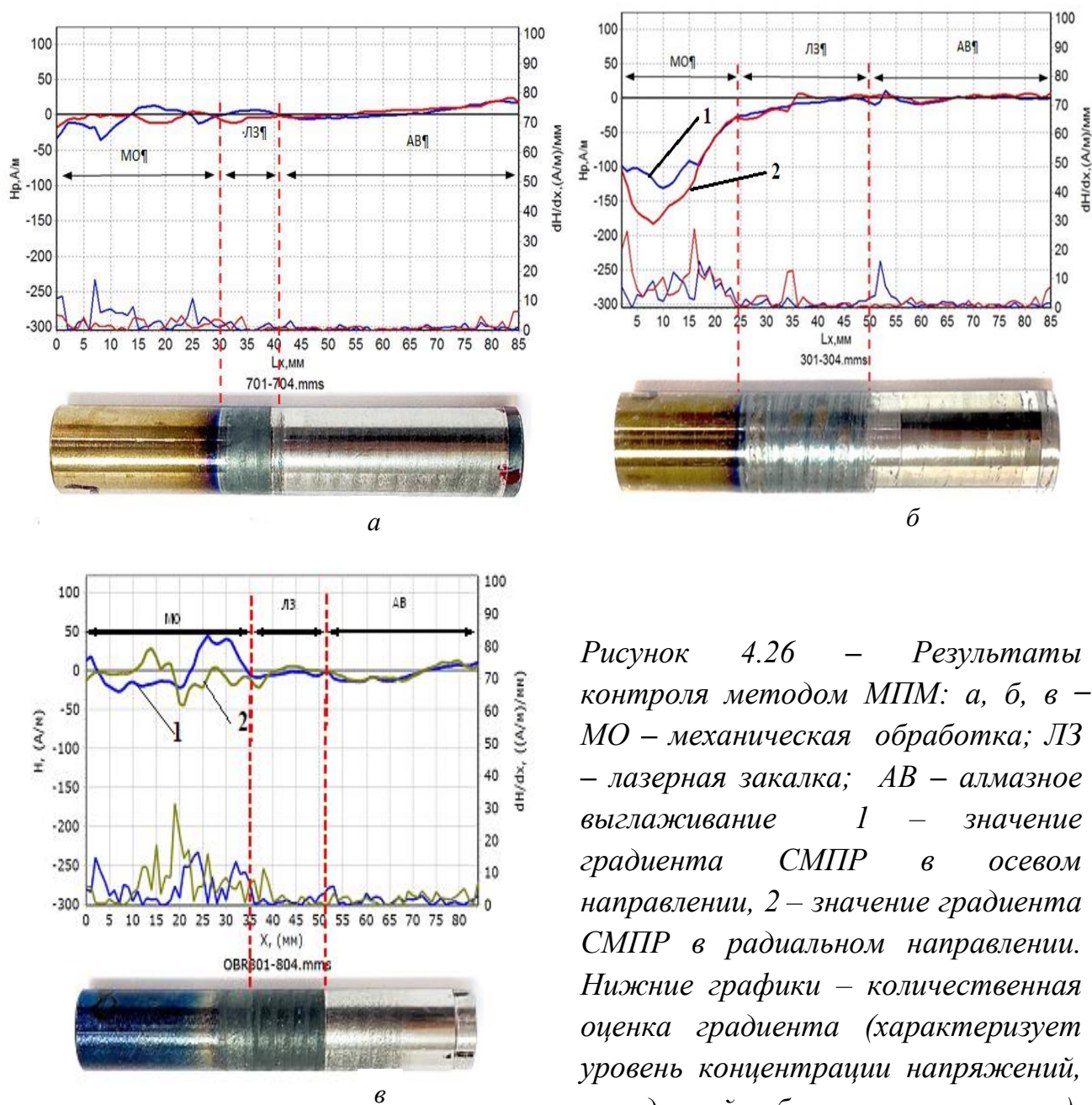


Рисунок 4.26 – Результаты контроля методом МПМ: а, б, в – МО – механическая обработка; ЛЗ – лазерная закалка; АВ – алмазное выглаживание 1 – значение градиента СМРР в осевом направлении, 2 – значение градиента СМРР в радиальном направлении. Нижние графики – количественная оценка градиента (характеризует уровень концентрации напряжений, но в данной работе не учитывалась)

Таким образом, выполненные исследования показали, что можно управлять процессом технологического и эксплуатационного наследования так, чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали, сохранялись в течение всего технологического процесса (твердость, глубина упрочнения, шероховатость, остаточные напряжения), а свойства, влияющие отрицательно (ЗКН), ликвидировались после изготовления. После КО в модифицированном поверхностном слое образцов не образуются зоны концентрации напряжений, а алмазное выглаживание является технологическим барьером для скрытых дефектов и ЗКН.

### **Выводы по 4 главе**

1. После КО в модифицированном поверхностном слое образцов не образуются ЗКН, и алмазное выглаживание является технологическим барьером для скрытых дефектов.

2. Отсутствие ЗКН особенно важно при работе пар трения в условиях смазки, поскольку может снизиться риск возникновения эффекта Ребиндера (расклинивающее действие смазки при эксплуатации деталей с контактными поверхностями трения в жидких средах при наличии дефектов на поверхности).

3. Процессы КО обеспечивают благоприятный рельеф. Это может оказать положительное влияние на износостойкость контактирующих поверхностей.



## **Глава 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

Важный эксплуатационный показатель — износостойкость определяется качеством поверхностного слоя [5, 8, 34, 35, 43, 59-62, 87, 100 и др.]. В последнее время широко применяют комплексные параметры оценки качества поверхностного слоя, объединяющие несколько отдельных характеристик. К ним относятся: параметр равновесной шероховатости Крагельского – Комбалова; параметр пластичности, предложенный Гринвудом; параметр качества поверхностей деталей, работающих в условиях усталости; комплексные параметры, учитывающие кроме характеристик шероховатости, волнистости и макроотклонений степень упрочнения поверхностного слоя и поверхностные остаточные напряжения I рода. Известны также комплексные параметры для оценки качества поверхности деталей в конкретных условиях эксплуатации (например, цилиндрические поверхности, кулачковые пары, герметичные соединения, эксплуатация в коррозионной среде и др.) [135].

При граничной смазке поверхности соприкасающихся тел разделены тонким слоем смазочного материала [35, 109, 127, 129, 135]. Механизм трения при граничной смазке описывается на основе молекулярно-механической теории трения, согласно которой внешнее трение имеет двойственную природу и обусловлено как преодолением сил молекулярного взаимодействия между поверхностями, так и преодолением сопротивления, связанного с формоизменением поверхностного слоя. Под нагрузкой происходит упругая и пластическая деформация на пятнах контакта, покрытых граничной пленкой смазочного материала. На пятнах контакта, которые были подвержены наиболее значительной пластической деформации, и в местах с высокими местными

температурами может произойти разрушение смазочной пленки с реализацией адгезионного взаимодействия обнажившихся поверхностей и схватыванием металлов на микроучастках.

Свойственным для жидкостной смазки является наличие масляного слоя, разделяющего поверхности трения и находящегося под давлением. При увеличении толщины масляного слоя сверх граничной пленки степень воздействия твердой поверхности на молекулы масла, находящиеся на значительном удалении от нее, уменьшается. При жидкостной смазке слои, находящиеся на расстоянии более 0,5 мкм от поверхности, могут свободно сдвигаться друг относительно друга. Сопротивление движению в этом случае обусловлено внутренним трением (вязкостью) масла и формируется за счет сопротивления скольжению его слоев внутри смазочного слоя. Этот режим трения является оптимальным для элементов трения с точки зрения долговечности, износостойкости, энергопотерь и устойчивости и характеризуется низкими коэффициентами трения. При жидкостной смазке сила трения практически не зависит от природы сопрягаемых поверхностей [246].

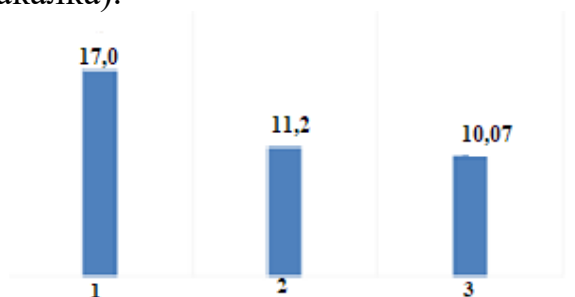
В представленной работе проведены исследования износостойкости образцов после КО. Результаты исследований образцов, обработанных с помощью разнообразных методов и в разных режимах из различных материалов, представлены на рисунке 5.1. Испытания проводили на машине трения, оценка износа выполнялась весовым методом согласно ГОСТ 23.224–86 на аналитических весах и методом поверхностной активации (ГОСТ 27860–88) [105]. Методика проведения испытания представлена в главе 3.

Результаты исследований представлены ниже (на диаграмме показаны значения износа и мг):



### Сталь марки 38ХМЮА (а)

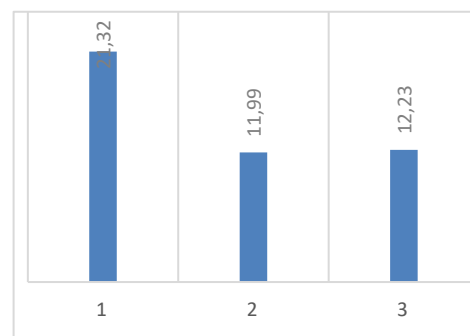
1 – МО, шлифование, химико-термическая обработка (ХТО) (азотирование);  
2 – КО (ЭМО); 3 – КО (лазерная закалка).



а

### Сталь марки 40ХН2МА (б)

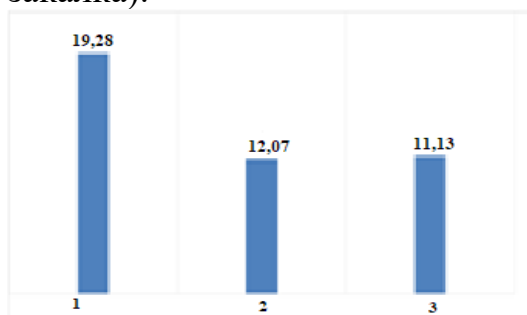
1 – МО, ХТО (цементация, закалка и отпуск), шлифование;  
2 – КО (ЭМО); 3 – КО (лазерная закалка)



б

### Сталь марки 40Х (в)

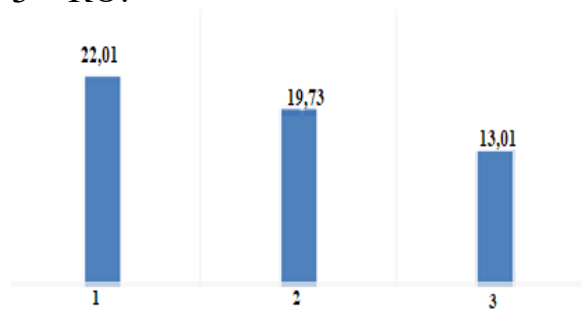
1 – Механическая обработка, шлифование, ХТО (азотирование);  
2 – КО (ЭМО); 3 – КО (лазерная закалка).



в

### Сталь марки 40Х (г)

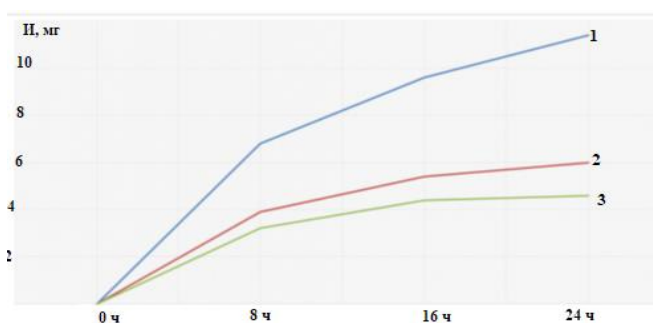
1 – МО, закалка ТВЧ, шлифование;  
2 – МО, шлифование, ХТО (азотирование);  
3 – КО.



г

### Сталь марки 45 (д)

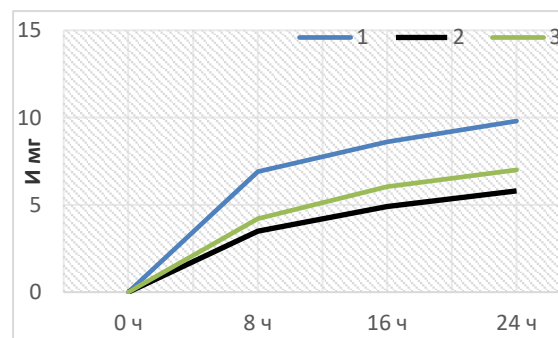
1 – МО, цементация, закалка и отпуск, шлифование;  
2 – КО (лазерная закалка);  
3 – КО (ЭМО).



д

### Сталь марки 20ХЗМВФ (е)

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



е

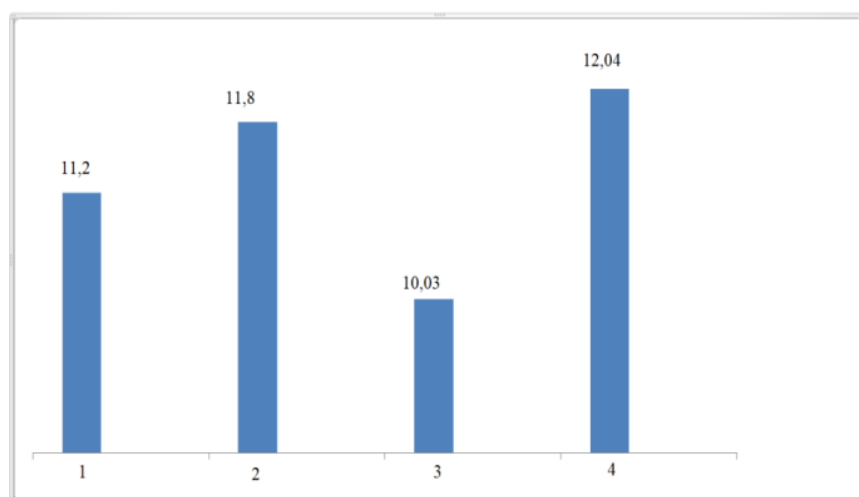
### Сталь марки 40X (ж)

1 – ЭМО:  $I = 1400$  А;  $U = 4$  В;  $P = 300$  Н;  $V = 1,2$  м/мин;  $S = 3$  мм/об.; алмазное выглаживание:  $P = 200$  Н;  $S = 0,02$  мм/об.;  $i = 2$ .

2 – ЭМО:  $I = 1600$  А;  $U = 4$  В;  $P = 300$  Н;  $V = 1,8$  м/мин; подача  $S = 3,5$  мм/об.; алмазное выглаживание:  $P = 200$  Н;  $S = 0,02$  мм/об.;  $i = 1$ .

3 – ЭМО:  $I = 1400$  А;  $U = 4$  В;  $P = 300$  Н;  $V = 2$  м/мин;  $S = 2,8$  мм/об.; алмазное выглаживание: давление  $P = 200$  Н; подача  $S = 0,02$  мм/об.; число проходов алмазного инструмента  $i = 1$ .

4 – ЭМО:  $I = 1000$  А;  $U = 4$  В;  $P = 300$  Н;  $V = 3,2$  м/мин;  $S = 2,8$  мм/об.; алмазное выглаживание:  $P = 100$  Н;  $S = 0,02$  мм/об.;  $i = 1$ .



ЖС

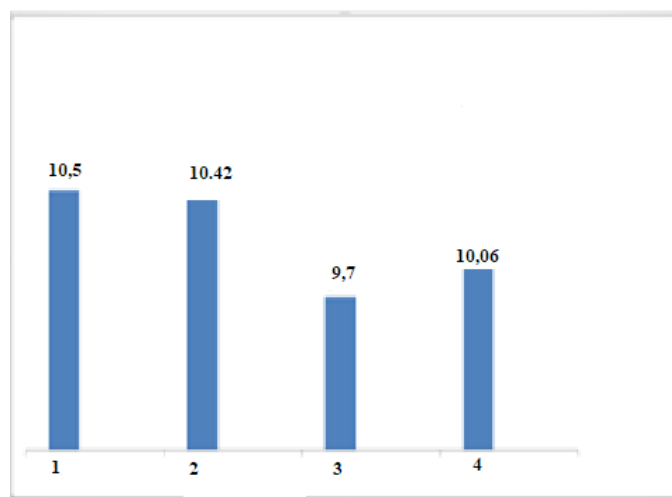
### Сталь марки 40X (з)

1 – лазерная закалка:  $P = 1,2$  кВт;  $V = 20$  мм/с;  $d = 4$  мм; алмазное выглаживание:  $P = 200$  Н;  $S = 0,02$  мм/об.,  $i = 2$ .

2 – лазерная закалка:  $P = 1,2$  кВт;  $V = 10$  мм/с;  $d = 5$  мм; алмазное выглаживание:  $P = 200$  Н;  $S = 0,02$  мм/об.; число проходов алмазного инструмента  $= 2$ .

3 – лазерная закалка:  $P = 1,4$  кВт;  $V = 25$  мм/с;  $d = 2$  мм; алмазное выглаживание: давление –  $200$  Н; подача  $S = 0,02$  мм/об.; число проходов алмазного инструмента  $i = 1$ .

4 — лазерная закалка:  $P = 1,4$  кВт;  $V = 30$  мм/с;  $d = 5$  мм; алмазное выглаживание:  $P = 100$  Н;  $S = 0,02$  мм/об.; число проходов алмазного инструмента  $i = 1$ .



3

*Рисунок 5.1 – Зависимость износостойкости от методов и режимов различных видов обработок для различных марок стали ((а – з) – на диаграммах показаны значения износа в мг; (е, д) замеры проводили через определенные промежутки времени)*

Исследования износостойкости показали, что наилучшие результаты можно получить при определенных режимах КО.

Исследования подтвердили правильность сделанных предположений, что КО создает на поверхности образца поверхностный слой с новыми свойствами – модифицированный износостойкий слой, и благодаря сочетанию шероховатости, твердости, глубины упрочнения и остаточных напряжений т наличию масляных карманов создается резерв для повышения износостойкости. Сравнение значений износа проводили 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.

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, получать модифицированные поверхности с новыми свойствами, улучшая смазываемость поверхностей контакта и повысить эксплуатационный показатель — износостойкость.

В представленной работе было установлено, что при комбинированной обработке в зависимости от теплопроводности обрабатываемых материалов в порядке значимости следуют факторы, влияющие на эксплуатационный показатель — износостойкость:

- $I \rightarrow V \rightarrow P_1 \rightarrow S$  — при определении глубины упрочнения;
- $I \rightarrow V \rightarrow P_1 \rightarrow S \rightarrow h \rightarrow P_2 \rightarrow r$  — при определении шероховатости поверхности;
- $I \rightarrow V \rightarrow P_1 \rightarrow S \rightarrow h \rightarrow P_2$  — при определении остаточных напряжений.

Исследования показали сходимость результатов износостойкости образцов ( $80 \pm 10 \%$ ) при измерении износа различными методами.

В результате экспериментальных исследований были установлены оптимальные режимы обработки, введены ограничения их значений рациональными диапазонами и установлены закономерности управления технологическими факторами.

В работе даны рекомендации по выбору режимов для разных материалов деталей (таблица 5.1).

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.

Таблица 5.1– Рекомендации для выбора режимов комбинированной обработки  
для различных марок стали

Марка стали	Режим комбинированной обработки	
	Обработка концентрированными потоками энергии	Обработка алмазным выглаживанием
1	2	3
45	Сила тока $I = 2000...2500$ А; напряжение $U = 2...6$ В; скорость вращения детали $V = 1,6...2,8$ м/мин; подача ролика-электрода $S = 2...2,5$ мм/об.; ширина ролика-электрода $l = 2...4$ мм; сила прижима ролика-электрода $P = 200...300$ Н	Сила прижима алмазного выглаживателя $P = 200$ Н; подача алмазного выглаживателя $S = 0,02$ мм/об.; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1$ мм; скорость вращения детали $V = 45$ м/мин
	Мощность лазерного излучения $N = 1,2...1,4$ кВт; скорость перемещения источника лазерного излучения $V = 15...30$ мм/с; фокусное расстояние $f = 70...100$ мм; диаметр лазерного луча $d = 3...6$ мм	
40Х	Сила тока $I = 2000...2200$ А; напряжение $U = 2...6$ В; скорость вращения детали $V = 1,5...2,7$ м/мин; подача ролика-электрода $S = 2...2,5$ мм/об.; ширина ролика-электрода $l = 2...4$ мм; сила прижима ролика-электрода $P = 200...250$ Н	Сила прижима алмазного выглаживателя $P = 200...250$ Н; подача алмазного выглаживателя $S = 0,02...0,04$ мм/об.; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1$ мм; скорость вращения детали $V = 45$ м/мин
	Мощность лазерного излучения $N = 1,2...1,4$ кВт; скорость перемещения источника лазерного излучения $V = 20...30$ мм/с; фокусное расстояние $f = 50...100$ мм; диаметр лазерного луча $d = 2...5$ мм	
20Х3МВФ	Сила тока $I = 2200...3200$ А; напряжение $U = 2...6$ В; скорость вращения детали $V = 1,5...2,5$ м/мин; подача ролика-электрода $S = 2...3,5$ мм/об.; ширина ролика-электрода $l = 3...4$ мм; сила прижима ролика-электрода $P = 200...300$ Н	Сила прижима алмазного выглаживателя $P = 250$ Н; подача алмазного выглаживателя $S = 0,02...0,04$ мм/об.; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1$ мм; скорость вращения детали $V = 45$ м/мин
	Мощность лазерного излучения $N = 1,2...1,4$ кВт; скорость перемещения источника лазерного излучения $V = 10...20$ мм/с; фокусное расстояние $f = 50...100$ мм; диаметр лазерного луча $d = 3...5$ мм	
38ХМЮА	Сила тока $I = 1500...3200$ А; напряжение $U = 2...6$ В; скорость вращения детали $V = 1,5...2,8$ м/мин; подача ролика-электрода $S = 0,8...3,5$ мм/об.; ширина ролика-электрода $l = 3...4$ мм; сила прижима ролика-электрода $P = 200...300$ Н	Сила прижима алмазного выглаживателя $P = 200...220$ Н; подача алмазного выглаживателя $S = 0,02...0,04$ мм/об.; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1$ мм; скорость вращения детали $V = 45$ м/мин
	Мощность лазерного излучения $N = 1,2...1,4$ кВт; скорость перемещения источника лазерного излучения $V = 15...30$ мм/с; фокусное расстояние $f = 50...100$ мм; диаметр лазерного луча $d = 2...7$ мм	

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3
40ХН2МА	Сила тока $I = 1500...3000$ А; напряжение $U = 2...6$ В; скорость вращения детали $V = 1,5...2,8$ м/мин; подача ролика-электрода $S = 2,6...3,5$ мм/об.; ширина ролика-электрода $l = 3...4$ мм; сила прижима ролика-электрода $P = 200...300$ Н	Сила прижима алмазного выглаживателя $P = 200$ Н; подача алмазного выглаживателя $S = 0,02...0,04$ мм/об.; радиус сферы алмазного выглаживателя $r = 1$ мм; скорость вращения детали $V = 45$ м/мин
	Мощность лазерного излучения $N = 1,2...1,4$ кВт; скорость перемещения источника лазерного излучения $V = 10...20$ мм/с; фокусное расстояние $f = 50...70$ мм; диаметр лазерного луча $d = 2...5$ мм	

### Выводы по 5 главе

1. 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 %.

2. Исследования показали сходимость результатов износостойкости образцов ( $80 \pm 10$  %) при измерении износа различными методами.

3. 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

### 6.1. Расчет ожидаемого экономического эффекта

Эффективным средством в процессе принятия решения о внедрении новых технологий в производство является комплексный подход к сравнительной оценке экономического эффекта.

Согласно представленной в главе 3 методике необходимо выполнить технико-экономическое обоснование. В представленной работе предложена концепция сравнительного анализа и рассмотрены варианты для принятия решения.

В качестве примера приведен расчет затрат от внедрения разработанного метода КО (ЭМО и алмазное выглаживание) и применяемого на предприятии (ПАО «КАДВИ», Калуга) метода ХТО (азотирования).

Для расчета экономического эффекта используем формулу [134]

$$\mathcal{E} = (C_1 + E_H * K_1) - (C_2 + E_H * K_2), \quad (35)$$

где  $C_1, C_2$  – стоимость продукции, изготовленной по применяемой технологии и предлагаемой технологии, руб.;  $E_H$  – нормативный коэффициент ( $E_H = 0,15$ );  $K_n$  – капитальные затраты на проектирование и внедрение.

Экономическая эффективность КО, применяемой взамен ХТО, состоит из следующих показателей [208, 244]:

- 1) экономия электроэнергии и производственных площадей;
- 2) уменьшение трудоемкости в механических цехах за счет концентрации операций и ликвидации промежуточных контрольных операций;
- 3) экономия материалов, заработной платы и капитальных затрат при ликвидации гальванических (для защиты поверхностей, не нуждающихся в упрочнении) и термических операций.

## ***1. Экономия электроэнергии и производственных площадей.***

Длительность ХТО составляет  $T = 26$  ч (включая время подготовки печи).

Мощность печи  $N = 80$  кВт.

Садка  $h = 50$  шт.

Расход энергии на одну деталь при ХТО [322]:

$$\mathcal{E}_1 = \frac{T_1 N_1}{n} = \frac{20 - 80}{50} = 4,16 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Длительность комбинированной обработки  $T_2 = 0,1$  ч.

Потребляемая мощность  $N_2 = 8,8$  кВт.

Расход электроэнергии на одну деталь при ЭМО:

$$\mathcal{E}_2 = T_2 \cdot N_2 = 0,1 \cdot 8,8 = 0,88 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Экономия электроэнергии на одну деталь:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = 4,16 - 0,88 = 3,28 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

## ***2. Уменьшение трудоемкости в механических цехах за счет концентрации операций и ликвидации промежуточных контрольных операций***

Снижение трудоемкости при внедрении ЭМО и алмазного выглаживания достигается за счет исключения следующих операций технологического процесса.

### **2.1. Гальванические и термические операции:**

- лужение – 0,25 н/ч;
- азотирование – 0,1 н/ч (на одну деталь);
- пескоструйная обработка – 0,02 н/ч.

Всего 0,37 н/ч.

### **2.2. Контрольные операции в гальваническом цехе:**

- контроль после лужения;
- контроль на коррозионную стойкость;
- контроль внешнего вида.

Всего 0,1 н/ч.

### **2.3. Контрольные операции в термическом цехе:**

- входной контроль – 0,007 н/ч;
- контроль твердости – 0,01 н/ч;



- контроль размеров (биения) – 0,021 н/ч.

#### 2.4. Контрольные и токарные операции в механическом цехе:

- входной и выходной контроль –  $0,007 \cdot 4 = 0,028$  (всего четыре операции);

- зачистка и правка базовых поверхностей – 0,33 н/ч.

Всего 0,866 н/ч.

### 3. Экономия материалов, заработной платы и капитальных затрат при ликвидации гальванических и термических операций

#### 3.1. Расчет требуемого количества оборудования [321–323]:

$$Q = \frac{T}{\Gamma_d K_B K_{вр}},$$

где  $T = A - t$  – годовой объем работы в н/ч;  $K_B$  – коэффициент выполнения нормы,  $K_B = 11,2$ ;  $K_{вр}$  – коэффициент загрузки оборудования,  $K_{вр} = 0,8$ ;  $\Gamma_d$  – фонд рабочего времени.

До внедрения:

$$Q_1 = \frac{20000 \cdot 0,866}{3935 \cdot 1,2 \cdot 0,8} = 3,77.$$

С учетом гальванических операций принимаем  $Q_1 = 6$ .

После внедрения:

$$Q_2 = \frac{2000 \cdot 0,366}{4015 \cdot 1,2 \cdot 0,8} = 1,85.$$

Принимаем  $Q_2 = 2$ .

Затраты на алмазные выглаживатели не учитываются, так как стоимость за 20 шт. составляет 10 000 руб., а расход – один выглаживатель в среднем на 50 деталей.

#### 3.2. Расчет изменяющихся статей затрат

##### 3.2.1. Затраты на заработную плату [134]

$$C_3 = C_4 X_c K K_g K_n A \cdot K_{кр},$$

где  $C_4$  – тарифная ставка,  $C_4 = 0,717$ ;  $X_c$  – коэффициент переработки,  $X_c = 1,2$ ;  $K_g$  – дополнительная зарплата,  $K_g = 1,21$ ;  $K_n$  – коэффициент отчисления в соцстрах,  $K_n = 1,14$ ;  $K_{кр}$  – премия,  $K_{кр} = 1,3$ .

До внедрения:

$$C_3 = 0,627 \cdot 1,2 \cdot 1,2 \cdot 1,14 \cdot 0,366 \cdot 1,3 \cdot 20\,000 = 30\,500 \text{ руб.}$$

3.1. Затраты на амортизацию и ремонт оборудования [208]:

$$C_a = K_{об} Q A,$$

где  $K_{об}$  – стоимость оборудования;  $Q$  – количество оборудования;  $A$  – норма отчислений на амортизацию и ремонт оборудования,  $A = 0,15$ .

До внедрения:

$$C_{a1} = 80\,000 \cdot 6 \cdot 0,15 = 72\,000 \text{ руб.}$$

С учетом стоимости оборудования для закалки и отпуска 16 165 руб.

$$C_{a1} = 16\,165 + 72\,000 = 88\,165 \text{ руб.}$$

После внедрения:

$$C_{a2} = 30\,000 \cdot 2 \cdot 0,15 = 9\,000 \text{ руб.}$$

3.2. Затраты на электроэнергию

$$C_{эА} = C^1 Q^1 A K^1,$$

где  $C^1$  – стоимость 1 кВт·ч = 157,26 руб.;  $Q^1$  – потребляемая энергия на одну деталь для ХТО – 4,16 кВт·ч; для КО – 0,3 кВт·ч;  $K^1$  – коэффициент, по рекомендации [134]  $K^1 = 2$  (для ХТО).

До внедрения

$$C_{эл1} = 157,26 \cdot 4,16 \cdot 2000 \cdot 2 = 2\,004\,436 \text{ руб.}$$

После внедрения

$$C_{эл2} = 157,26 \cdot 0,3 \cdot 2000 \cdot 2 = 188\,72 \text{ руб.}$$

#### 4. Расчет капитальных вложений

$$K = K_{об} Q + K_{эд} + C_{пр},$$

где  $K_{об}$  – стоимость единицы оборудования;  $Q$  – количество оборудования;  $K_{эд}$  – капитальные вложения в здание;  $C_{пр}$  – стоимость проектных работ [134];  $C_{пр} = 10\,000$  руб.

$$K_{эд} = g \cdot Q \cdot K \cdot \Pi_{эд},$$

где  $g$  – производственная площадь, занимаемая единицей оборудования ( $g_1 = 18 \text{ м}^2$ ,  $g_2 = 8,5 \text{ м}^2$ );  $K$  – коэффициент дополнительной площади ( $K_1 = 3,5$ ;  $K_2 = 3,5$ );  $\Pi_{эд}$  – стоимость одного квадратного метра производственных площадей (2000 руб.).

До внедрения

$$K_{\text{ед1}} = 18 \cdot 6 \cdot 3,5 \cdot 200 + 40 \cdot 1 \cdot 3,5 \cdot 2000 = 1\,560\,000 \text{ руб.}$$

$$K = 2\,040\,000 \text{ руб.}$$

После внедрения

$$K_{\text{ед2}} = 8,5 \cdot 2 \cdot 3,5 \cdot 2000 = 119\,000 \text{ руб.}$$

$$K = 3000 \cdot 2 + 11\,900 + 10\,000 = 279\,000 \text{ руб.}$$

## 5. Полная стоимость продукции

$$\text{До внедрения } C_1 = 258000 + 233609 + 19300 = 5\,510\,090 \text{ руб.}$$

$$\text{После внедрения } C_2 = 105000 + 90090 + 2000 = 1\,110\,600 \text{ руб.}$$

### Экономический эффект

$$\Xi = (C_1 + E_H \cdot K_1) - (C_2 + E_H \cdot K_2)$$

$$\Xi = 5\,510\,090 + 0,15 \cdot 2\,040\,000 - 1\,110\,600 + 0,15 \cdot 279\,000 = 4\,425\,905 \text{ руб.}$$

Исходные данные для расчетов представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Расчетные показатели для определения экономической эффективности

Номер	Наименование необходимых данных	Обозначение	Единица измерения	До внедрения	После внедрения	Примечание
1	Годовая программа	A	шт.	2000	2000	Данные заказа.
2	Штучно- калькуляционное время	T	ч	0,866	0,366	
3	Разряд работы			У	1У	
4	Среднечасовая тариф. ставка	C	руб.	717	627	
5	Балансовая стоимость одной единицы оборудования			8000	3000	
6	Действительный годовой фонд времени работы оборудования	Гд	ч	4015	4015	
7	Потребляемая мощность единицы оборудования		кВт	80	8,8	

На современном этапе развития общества научно-техническая деятельность играет ключевую роль в повышении эффективности и интенсификации производства, особенно в экономическом аспекте. Отраслевые науки, опытно-конструкторские работы и научно-исследовательские разработки направлены на создание новых средств и предметов труда, усовершенствование технологий промышленности и организацию производства. Эти усилия имеют важное значение в развитии индустрии и обеспечивают устойчивость и конкурентоспособность экономики.

Результаты исследований, представленные в работе, использовали для изготовления деталей малой жесткости. Благодаря использованию патентов [188, 189] и исследованиям по влиянию силы тока на качество обрабатываемых материалов был получен экономический эффект 787,3 тыс. руб. при изготовлении деталей для авиационных двигателей (подтверждено актами внедрения во вложении).

Комплексный анализ экономической эффективности при внедрении новой техники и технологии позволяет оценить соотношение результатов и затрат. В самом общем случае эффективный результат включает в себя технический, организационный, социальный, научный и экономический эффекты. Кроме того, результат может также включать специфические эффекты. Это удовлетворение качественно новых потребностей населения и бизнеса, укрепление конкурентоспособности страны на мировом рынке, уменьшение дефицита ресурсов, охрана природы и т.д. При комплексном анализе необходимо учитывать многообразные аспекты, определяемые организационной, социальной, технической и экономической важностью создания новой техники или внедрения инновационных решений.

## 6.2. Определение дальнейшего вектора развития комбинированной обработки

Правительством РФ поставлена задача в кратчайшие сроки изготовить машины и механизмы, которые будут бесперебойно работать в условиях Арктики. Эту стратегическую задачу следует решить в кратчайшие сроки [107, 245].

Для эксплуатации золотниковых и плунжерных пар трения полученные параметры поверхностного слоя, после КО должны сохранять свои свойства при низких температурах [68, 181]. Для подтверждения этого предположения были проведены серии испытаний образцов после КО в низкотемпературных средах (при  $T = -50^{\circ}\text{C}$ ). Результаты испытаний показали, что твердость и остаточные напряжения остаются без изменения при  $T = -50^{\circ}\text{C}$  (таблицы 6.2, 6.3). Методика проведения экспериментов показана в 3 главе.

Таблица 6.2 – Изменение твердости упрочненного слоя ( $T = -50^{\circ}\text{C}$ )

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

Таблица 6.3 – Изменения 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

Таким образом, обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин и механизмов в условиях низкотемпературных сред возможно при применении КО. При низких отрицательных температурах воздуха подъем и опускание подвесного, прицепного и другого оборудования будет без заедания, пуск двигателей внутреннего сгорания, особенно дизельных, будет плавным, улучшатся условия смазки трущихся поверхностей, а следовательно, могут увеличиться тяговые качества, снизится расход топлива. В этом направлении можно продолжить исследования, разработанные методы КО имеют большие перспективы для развития [107, 245].

Еще одно научное направление связано с дальнейшей разработкой методов КО с наложением физических воздействий. Интересно рассмотреть другие сочетания методов УКПЭ и ППД, например вместо алмазного выглаживания можно применять методы ППД с ультразвуком и получить новые свойства поверхностных слоев. Для разработки методов КО использовать разработанную методику, представленную в 3 главе.

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 узлах 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. Для зубчатых колес крупного модуля были проведены исследования по влиянию ППД на твердость и глубину упрочнения. КО заключалась в фрезеровании зубчатых колес исследуемой группы модифицированной фрезой с протуберанцем и последующем ППД рабочего профиля и выкружки зубьев [286].

В результате исследований было установлено, что комбинированная обработка положительно влияет на поверхностную твердость азотируемых и цементируемых 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.

Применение ЭМО в качестве упрочняющей технологии в ремонтном производстве показало положительные результаты. Кроме этого, 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.

Методы обработки КПЭ и ППД являются экономичными, экологичными, прекрасно встраиваются в технологический процесс, автоматическую линию, гибкую производственную систему и технологический комплекс [224]. Это особенно актуально при реконструкции и перевооружении предприятий различных отраслей промышленности. В современных условиях промышленные предприятия вынуждены адаптироваться к технологическим изменениям, повышать эффективность и снижать затраты. Устаревшее оборудование, высокое энергопотребление и ужесточение экологических норм требуют модернизации производства. В этом контексте наукоемкие технологии становятся ключевым инструментом реконструкции и перевооружения предприятий, способствующим их устойчивому развитию и конкурентоспособности [58, 179]. Наукоемкие технологии – это технологии, которые базируются на больших количествах различных исследований. Разработанные методы КО обеспечивают стабильность свойств поверхностных слоев деталей с контактными поверхностями трения в жидких средах и относятся к наукоемким технологиям. Поэтому их можно рекомендовать при реконструкции и перевооружении различных производств [58, 159, 224].

## **Выводы по 6 главе**

1. Разработанные процессы КО позволяют получить экономический эффект при производстве золотников, плунжеров, толкателей для гидравлического оборудования. Внедрение представленной технологии внесет значительный вклад в развитие экономики страны.

2. Положительные результаты, полученные при применении КО в различных сочетаниях, позволяет продолжить исследования для применения методов КО для изготовления деталей для легкомоторных самолетов и беспилотных летательных аппаратов.

3. Полученный модифицированный 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 с контактными поверхностями трения в жидких средах, которые будут работать в экстремальных условиях, например условий Арктики.

5. Перспективным направлением использования методов КО является применения разработанной технологии, оборудования и инструментов при проектировании технологических комплексов и при реконструкции и перевооружении предприятий.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной диссертационной 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 электрохимическая 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 цементируемых 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 СОКРАЩЕНИЙ

АВ — алмазное выглаживание

ЗКН — зоны концентрации напряжений

КМО — комбинированный метод обработки

КО — комбинированная обработка

КПД — коэффициент полезного действия

КПЭ — концентрированные потоки энергии

ЛЗ — лазерная закалка

ММПМ — метод магнитной памяти металла

МО — механическая обработка

ППД — поверхностная пластическая деформации

СМНР — собственные магнитные поля рассеяния

ТВЧ — токи высокой частоты

ХТО — химико-термическая обработка

ЭМО — электромеханическая обработка

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / под ред. Н.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Аверченков, В.И. Технологическая наследственность при формировании качества изготавливаемых деталей / В.И. Аверченков, А.С. Васильев, М.Л. Хейфец // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 10. – С. 27–32.
3. Агрегаты гидроприводов сельскохозяйственной техники. Технические требования на капитальный ремонт ТК 70.0001.018–85. – М.: ГОСНИТИ, 1989. – 19 с.
4. Албагачиев, А.Ю. Исследование остаточных напряжений при совместной отделочно-упрочняющей обработке деталей машин / А.Ю. Албагачиев, Е.В. Преображенская // Мат. науч.-тех. конф. МГАПИ “Новые материалы и технологии”. – М.: МГАПИ, 2001. – С. 19.
5. Алехин, В.П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов / В.П. Алехин. – М.: Наука, 1983. – 400 с.
6. Аль-Тибби, В.Х. Получение наноструктурных материалов методом электроакустического напыления / В.Х. Аль-Тибби, В.С. Минаков, Д.Д. Дымочкин // СТН. – 2007. – № 4. – С. 28–32.
7. Андреев, А.А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.
8. Антипов, В.В. Износ прецизионных деталей и нарушение характеристик топливной аппаратуры дизелей / В.В. Антипов. – М.: Машиностроение, 1972. – 177 с.
9. Арзамасов, Б.Н. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 400 с.
10. Арзамасов, Б.Н. Исследование состава катодной области тлеющего разряда при ионном азотировании / Б.Н. Арзамасов, Н.М. Рыжов, А.Е. Смирнов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 1991. – № 4. – С. 99–105.
11. Артемьев, Б.П. Анализ методов упрочнения деталей машин // Совершенствование механосборочного производства и пути развития технологии: сб. ст. / Б.П. Артемьев. – М.: Оргстанкинпром, 1991. – С. 64–67.

12. Архипов, В.Е. Газодинамическое напыление. Структура и свойства покрытий / В.Е. Архипов, А.Ф. Лондарский, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачев. – М.: Красанд, 2018. – 240 с.
13. Бабичев, А.П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко [и др.] – Ростов на Дону: ДГТУ, 2003. – 192 с.
14. Бабичев, И.А. Создание регуляризованных микрорельефов при обработке ШСУ и интенсификация технологических процессов механической обработки / И.А. Бабичев // Тез. док. всесоюз. конф. – Л.: ЛМЦ, 1986. – С. 16–17.
15. Багмутов, В.П. Моделирование механического поведения образца, поверхностно упрочненного обработкой концентрированными потоками энергии / В.П. Багмутов, И.Н. Захаров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2000. – № 7. – С. 52–58.
16. Багмутов, В.П. Моделирование структурных превращений при электромеханической обработке стали / В.П. Багмутов, И.Н. Захаров // Физика и химия обработки материалов. – 2002. – № 4. – С. 29–32.
17. Байков, Б.П. Турбокомпрессоры для наддува дизелей. / Б.П. Байков, В.Г. Бордуков, П.В. Иванов и др. - Л.: Машиностроение, 1975. - 199 с.
18. Багмутов, В.П. Моделирование тепловых процессов при воздействии на материал концентрированных потоков энергии / В.П. Багамутов, // Mechanika, Kaunas. 1999. - № 5 (20). - С. 45 - 50.
19. Балтер, М.А. Упрочнение деталей машин / М.А. Балтер. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.
20. 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.
21. 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.
22. Бараз, В.Р. Структура и свойства диффузионного слоя деформированной аустенитной стали, азотированной в ВКС / В.Р. Бараз, А.С. Заваров, А.М. Штремт // Межвузовский сб. науч. тр. «Термическая, химико-термическая и лазерная обработка сталей и титановых». – Пермь, ППИ, 1989. – С. 87–90.
23. Бартенев, С.С. Детонационные покрытия в машиностроении / С.С. Бартенев, Ю.П. Федько, А.И. Григоров. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1982. – 215 с.

24. Барышев, В.И. Повышение надежности и долговечности гидросистем тракторов и дорожно-строительных машин в эксплуатации / В.И. Барышев. – Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1973. – 111 с.
25. Безнедельный, А.И. Влияние технологической наследственности на формирование качества поверхностного слоя закаленных сталей при упрочняюще-чистовой обработке ультразвуковым инструментом / А.И. Безнедельный, В.Б. Асанов, В.П. Гилета // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 4. – С. 19–22.
26. Безъязычный, В.Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин / В.Ф. Безъязычный // Справочник. Инженерный журнал. – 2001. – № 4. – С. 9–16.
27. Безъязычный, В.Ф. Обеспечение качества деталей при механической обработке / В.Ф. Безъязычный // Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении (ТМ-2010): Сб. тр. межд. науч.-техн. конф. – Воронеж: ВГТУ, 2010. – С. 27–34.
28. Белашова, И.С. Обработка металлов с использованием лазерного и ультразвукового воздействия / И.С. Белашова, В.М. Приходько, О.В. Чудина. – М.: МАДИ, 2012. – 111 с.
29. Белинин, Д.С. Особенности структурообразования при плазменной поверхностной закалке на большую глубину изделий из стали 40Х13 / Д.С. Белинин, Ю.Д. Щицын // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14. – № 4-5. – С. 8 – 17.
30. Белявцев, А.В. Топливная аппаратура автотракторных дизелей / А.В. Белявцев, А.С. Процеров. – М.: Росагропромиздат, 1988. – 223 с.
31. Берлин, Е.Б. Плазменная химико-термическая обработка поверхности стальных деталей / Е.Б. Берлин, Н.Н. Коваль, Л.А. Сейдман. – М.: Техносфера, 2012. – 464 с.
32. Берштейн, М.Л. Структурообразование при лазерной закалке стали / М.Л. Берштейн, Ю.В. Калнер // Межвузовский сборник научных трудов «Термическая, химико-термическая и лазерная обработка сталей и титановых сплавов». – Пермь: 1989. – С. 3–15.
33. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – 2-е изд. – М.: Ленанд, 2015. – 234 с.
34. Богодухов, С.И. Обработка упрочненных поверхностей в машиностроении и ремонтном производстве: Учебное пособие / С.И. Богодухов, В.Ф. Гребенюк, А.Д. Проскурин. – М.: Машиностроение, 2005. – 256 с.

35. Бойцов, А.Г. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А.Г. Бойцов, В.Н. Машков, В.П. Смоленцев, Л.А. Хворостухин. – М.: Машиностроение, 1991. – 144 с.
36. Болдырев, А.И. Методика расчета режимов комбинированной обработки / А.И. Болдырев // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2011 Вып. 5 С. 8-10.
37. Болдырев, А.И. Механизм формирования поверхностного слоя с требуемыми свойствами / А.И. Болдырев // Нетрадиционные методы обработки: межвуз. сб. науч. тр. М.: Машиностроение, 2009. - Вып. 9. - Ч. 3. - С. 53-86
38. Болдырев, А.И. Обеспечение точности и эксплуатационных показателей наукоемких изделий электрохимикомеханической обработкой /А.И. Болдырев // Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении (ТМ-2010): сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГТУ, 2010, - С.55-56.
39. Болдырев, А.И. Опыт промышленного применения комбинированных методов обработки / А.И. Болдырев // Нетрадиционные методы обработки: Межвуз. сб. науч. тр. – М.: Машиностроение, 2010. – Вып. 9. – Ч. 3. – С. 17–24.
40. Болдырев, А.И. Опыт промышленного применения комбинированных методов обработки / А.И. Болдырев // Нетрадиционные методы обработки: межвуз. сб. науч. тр. М.: Машиностроение, 2009. - Вып. 9. - Ч. 3. - С.17-24.
41. Болдырев, А.И. Технологические приемы обработки точных каналов с упрочнением поверхностным наклепом / А.И. Болдырев // Нетрадиционные методы обработки: межвуз. сб. науч. тр. М.: Машиностроение, 2009. - Вып. 9. - Ч. 2. - С. 151-159.
42. Браславский, В.М. Поверхностное пластическое деформирование деталей машин накатыванием роликами: Учеб. пособие / В.М. Браславский. – Свердловск: Урал. лесотех. ин-т, 1990. – 56 с.
43. Браун, Э.Д. Моделирование трения изнашивания в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1984. – 192 с.
44. Бураков, В.А. К вопросу о теплостойкости стали Р6М5 после лазерной обработки / В.А. Бураков, Г.И. Бровер, Н.М. Буракова // МиТОМ. – 1982. – № 9. – С. 33–36.
45. Бусалаева, Е.Н. Исследование упрочнения напыленных слоев термической обработкой / Е.Н. Бусалаева, С.А. Голованова, М.И. Шишкина, М.Я. Захарова // Межвузовский сб. науч. тр. «Термическая, химико-



- термическая и лазерная обработка сталей и титановых сплавов». – Пермь, ППИ, 1989. – С. 84–86.
46. Бушенин, Д.В. Сравнение твердости резьбовых профилей, полученных пластическим деформированием различными методами / Д.В. Бушенин, А.В. Киричек, А.Н. Афонин, И.Б. Кульков // Вестник машиностроения. – 1999. – № 10. – С. 40–43.
47. Васильев, С.Г. Изменение твердости поверхности детали методом механической обработки / С.Г. Васильев, Я.И. Шуляк // Известия вузов. Сер. Машиностроение. – 2011. – № 11. – С. 77–82.
48. Васильев, С.Г. Повышение твердости поверхности детали термическим воздействием методом деформирующего резания / С.Г. Васильев, В.В. Попцов // Известия вузов. Сер. Машиностроение. – 2011. – № 12. – С. 37–43.
49. Величко, С.А. Точечная оценка параметров распределения доремонтного ресурса импортных гидрораспределителей сельхозтехники / С.А. Величко, А.В. Мартынов // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 3. – С. 47–49.
50. Власов, В.М. Работоспособность высокопрочных термодиффузионных покрытий в узлах трения машин / В.М. Власов, Л.М. Нечаев. – Тула: Приокск. кн. изд-во, 1994. – 235 с.
51. Власов, В.Т. Физическая теория процесса «деформация-разрушение». Ч. I. Физические критерии предельных состояний / В.Т. Власов, А.А. Дубов. – М.: ЗАО «Тиссо», 2007. – 517 с.
52. Власов, В.Т. Физическая теория процесса «деформация-разрушение». Часть I. Физические критерии предельных состояний металлов / В.Т. Власов, А.А. Дубов. – М.: Спектр, 2013. – 488 с.
53. Власов, В.Т. Физические основы метода магнитной памяти металла / В.Т. Власов, А.А. Дубов. – М.: ЗАО «Тиссо», 2004. – 424 с.
54. Власов, В.Т. Физические основы метода металломагнитной памяти / В.Т. Власов, А.А. Дубов. – М.: Спектр, 2019. – 394 с.
55. Волков, М. Лазерная очистка и Лазерный наклеп – технологии улучшения свойств поверхности / М. Волков, А. Кишалов, Н. Орлов [и др.] // Фотоника. – 2014. – № 3. – С. 34–44.
56. Гаврилов, В.Б. Лазерная обработка штампового инструмента / В.Б. Гаврилов, В.С. Томсинский, М.Б. Кожевников // Межвузовский сб. науч. тр. «Термическая, химико-термическая и лазерная обработка сталей и титановых сплавов». – Пермь, ППИ, 1989. – С. 21–25.
57. Гамбург, Ю.Д. Гальванопокрытия: Справочник по применению / Ю.Д. Гамбург. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с.

58. Ганина, Г.Э., Островский, Ю.А., Яковлева, А.П. Теоретические основы реконструкции и технического перевооружения промышленных предприятий, - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023, - 250 с.
59. Гаркунов, Д.Н. О механизме взаимного атомарного переноса меди при трении бронзы по стали / В.Н. Лозовский, А.А. Поляков, ДАН СССР. – 1960. – Т. 13. – № 5. – С. 1128–1129.
60. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (износ и безопасность): Учебник / Д.Н. Гаркунов. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
61. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин): Учебник / Д.Н. Гаркунов. – М.: Изд-во МСХА, 2002. – 632 с.
62. Гаркунов, Д.Н. Финишная антифрикционная обработка при восстановлении цилиндров двигателей / Д.Н. Гаркунов, Ф.Х. Бурумкулов // Металловедение и термическая обработка металлов. –1982. – № 3. – С. 57–58.
63. Герасимов, С.А. Исследование износостойкости азотируемых сталей / С.А. Герасимов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1973. – № 5. – С. 127–129.
64. Герасимов, С.А. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов / С.А. Герасимов, Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 518 с.
65. Гилета, В.П. Опыт промышленного внедрения импульсной упрочняюще-чистовой обработки ультразвуковым инструментом / В.П. Гилета, К.Л. Панченко, Ю.Ф. Огородников // Новые разработки в области ультразвуковой техники и технологии и опыт их применения в машиностроении. – М.: 1989. – С. 113–114.
66. Горбач, А.Ф. Исследование износа растровых валов для флексографической печати с вакуумными покрытиями TiN, TiN-Ti / А.Ф. Горбач, Е.Б. Кульбацкий, С.Г. Покровский // Межотр. науч. конф. «Покрытия, упрочнение, очистка, экологически безопасные технологии и оборудование». – М.: ВИМИ, 1995. – С. 21–22.
67. Горгоц, В.Г. Технологический анализ динамики процесса алмазного выглаживания / В.Г. Горгоц, В.П. Кузнецов // Технология машиностроения. – 2006. – № 11. – С. 18–21.
68. Горелик, Я.Б. Простейшие физические модели криогенных явлений / Я.Б. Горелик, В.С. Колунин, А.К. Решетников // Криосфера Земли. – 1997. – Т. 1. – № 3. – С. 34 – 41.

69. Горкунов, Э.С. Контроль качества цементации изделий из стали 12Х2Н4А электромагнитными методами / Э.С. Горкунов, Л.Х. Коган, Э.М. Бараз, А.Л. Королев // Дефектоскопия. – 1993. – № 12. – С. 3–12.
70. Горленко, О.А. Методология аналитического исследования процесса формирования функциональных параметров качества поверхностей деталей машин при шлифовании / О.А. Горленко, С.Г. Бишутин // Славянтрибо-4: Мат. межд. науч.-практич. симпозиума. – Рыбинск, 1997. – Ч. 3. – С. 43–46.
71. Горленко, О.А. Методология проведения теоретико-экспериментальных исследований процессов абразивной обработки / / О.А. Горленко, С.Г. Бишутин // Проблемы технологии машиностроения 2000 года: Мат. всерос. науч.-техн. конф. – Нижний Новгород, 2000. – Ч. 1. – С. 4–7.
72. Горленко, О.А. Перспективные технологии, обеспечивающие повышение качества машин / О.А. Горленко, А.Г. Суслов, В.С. Харченков / Перспективные технологии, машины и аппараты в машиностроении: Матер. Выездного заседания головного совета «Машиностроение». – Орел: 1995. – С. 89–92.
73. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 480 с.
74. ГОСТ 24773-81. Поверхности с регулярным микрорельефом. Введ. 30.06.1982. – М.: Изд-во Стандартов, 1988. – 15 с.
75. ГОСТ Р 56663-2015. Неразрушающий контроль. Контроль качества машиностроительной продукции по остаточной намагниченности, образующейся при ее изготовлении. Общие требования. – М.: Стандартиформ, 2019. – 9 с.
76. Гречнева, М.В. Краткий анализ состояния технологий плазменного поверхностного упрочнения сталей и сплавов в РФ / М.В. Гречнева // Int. Conf. on Modern Researches in Science and Technology. Conf. Proc. – Berlin, Professional science, 2017. – P. 14–34.
77. Гречнева, М.В. Повышение износостойкости деталей горных машин / М.В. Гречнева, С.А. Толкачев, И.К. Владимирцев // Вестник ИрГТУ. – 2011. – № 12. – С. 26–29.
78. Григорьянц, А.Г. Распределение остаточных напряжений на поверхностях сталей, упрочненных непрерывным СО<sub>2</sub>-лазером / А.Н. Сафонов, В.С. Майоров, А.Ф. Басков [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1987. – № 9. – С. 45–49.
79. Груздев, А.А. Комбинированные методы и технологии обработки деталей машин / А.А. Груздев, Б.П. Саушкин // Ритм. – 2014. – № 4. – С. 36–40.

80. Гунин, В.И. Развитие основных видов пространственного моделирования изделий и технологий машиностроения / В.И. Гунин, О.Н. Кириллов, А.А. Никитин // Проектирование механизмов и машин. ПММ-2007: труды Всерос. науч.-практ. конф. Воронеж: ВГТУ, 2007 С. 38-44.
81. Гурьев, А.М. Новые методы диффузионного термоциклического упрочнения поверхности стальных изделий бором совместно с титаном и хромом / А.М. Гурьев, Б.Д. Лыгденов, С.Г. Иванов [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2007. – № 10. – С. 89–91.
82. Гурьев, А.М. Физические основы термоциклического борирования / А.М. Гурьев, Э.В. Козлов, Л.Н. Игнатенко, Н.А. Попова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 216 с.
83. Дальский, А.М. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский, Б.М. Базров, А.С. Васильев [и др.]; ред. Дальский А.М. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 360 с.
84. Дидур, В.А. Диагностика и обеспечение надежности гидроприводов сельскохозяйственных машин / В.А. Дидур, В.Я. Ефремов. – Киев: Техніка, 1986. – 128 с.
85. Долотов, Г.П. Оборудование термических цехов и лабораторий испытания металлов / Г.П. Долотов, Е.А. Кондаков. – М.: Машиностроение, 2001. – 97 с.
86. Дубов, А.А. Метрологические аспекты в методе магнитной памяти металла / А.А. Дубов // Мир измерений. – 2018. – № 3. – С. 42–45; – № 4. – С. 16–18
87. Евдокимов, В.Д. Технология упрочнения машиностроительных материалов / В.Д. Евдокимов, Л.П. Клименко, А.Н. Евдокимова // – Одесса; Николаев: Изд-во НГГУ, 2005. – 352 с.
88. Ермаков, Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога / Ю.М. Ермаков. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.
89. Захаров, О.В. Минимизация погрешностей формообразования при бесцентровой абразивной обработке / О.В. Захаров. – Саратов: СГТУ, 2006. – 152 с.
90. Захаров, О.В. Проектирование формообразующих систем бесцентровых суперфинишных станков / О.В. Захаров, В.В. Погораздов, Б.М. Бржозовский. – Саратов: СГТУ, 2004. – 140 с.
91. Зинченко, В.М. Новые способы газовой цементации и нитроцементации / В.М. Зинченко, Б.В. Георгиевская, В.А. Оловянишников, В.В. Кузнецов. //

- Металловедение и термическая обработка металлов. – 1984. – № 10. – С. 51–57.
92. Зубков, Н.Н. Патент 2015202 РФ. Способ упрочнения поверхности детали / Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников, С.Г. Васильев [и др.] // Изобретения. – 1994. – № 12.
93. Зубков, Н.Н. Ремонт, восстановление и модернизация на основе метода деформирующего резания / Н.Н. Зубков // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2003. – № 10. – С. 7.
94. Иванов В.В. Процессы и методология создания поверхностных слоев высокоресурсных изделий путем вибрационного формирования покрытий комбинированным химико-механическим воздействием. Дисс. д-ра техн. наук: 05.02.07, 05.02.08. / В.В. Иванов. Воронеж: 2017.
95. Иванов, А.С. Упрочнение зубчатых колес концентрированными потоками энергии / А.С. Иванов, Ю.К. Перепелкин, А.П. Яковлева // Будущее машиностроения России. Сб. док. Двенадцатой Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (с международным участием). – 2019. – С. 477–480.
96. Иванов, В.И., Бурумкулов Ф.Х. Состояние и развитие электроискровых технологий и оборудования в России и за рубежом / В.И. Иванов, Ф.Х. Бурумкулов // Труды ГОСНИТИ. – 2012. – Т. 109. Ч. 2. – С. 127–139.
97. Ионная имплантация / Под ред. Дж.К. Хирвонена. Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1985. – 392 с.
98. Исупов, М.Г. Повышение эксплуатационных свойств прецизионных пар трения струйно-абразивной обработкой / М.Г. Исупов, Л.Т. Крекнин // Вестник машиностроения. – 2001. – № 7. – С. 68–69.
99. Исхакова, Г.А. Исследование микроструктуры и механических свойств стали 45 после плазменного термоупрочнения / Г.А. Исхакова // Электронная обработка материалов. – 1987. – № 5. – С. 24–27.
100. Ишлинский, А.Ю. Механика. Идеи, задачи, приложения / А.Ю. Ишлинский. – М.: Наука, 1985. – 624 с.
101. Кадырметов, А. М. Математическая модель тепловых процессов плазменного напыления с электромеханической обработкой покрытий / А. М. Кадырметов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – № 04(88). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/04/pdf/24.pdf>.
102. Кадырметов, А. М. Моделирование качества покрытий, полученных плазменным напылением с одновременной электромеханической

- обработкой [Текст] / А. М. Кадырметов, Г. А. Сухочев, А. Ф. Мальцев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 8. – С. 39-43.
103. Кадырметов, А. М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров [Текст] : монография / А. М. Кадырметов. – Воронеж: Научная книга, 2013. – 260 с.
104. Кадырметов, А.М. Компьютерное моделирование распространения тепла в детали в комбинированном процессе плазменного напыления и упрочнения покрытия / А. М. Кадырметов, В. О. Никонов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – № 04(88). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2013/04/pdf/23.pdf>.
105. Карасик, И.И. Методы трибологических испытаний в национальных стандартах стран мира / И.И. Карасик; под ред. В.С. Кершинбаума. – М.: Центр «Наука и техника», 1993. – 327 с.
106. Кармалита, В.А. Точность результатов автоматизированного эксперимента / В.А. Кармалита, В.Э Лобанов. – М.: Машиностроение, 1992. – 208 с.
107. Карнаухов, Н.Н. Техника и технология строительства и содержания транспортных сетей Тюменского региона: Отчет о НИР / ГОУ ВПО ТюмГНГУ. № ГР 01.200711006. / Карнаухов Н.Н, Мерданов Ш.М., Закирзаков Г.Г. [и др.]. – Тюмень, 2007. – 156 с.
108. Карпов, Л.И. Регуляризация микрорельефов поверхностей деталей машин с помощью ультразвуковых колебаний / Л.И. Карпов, В.М. Приходько, А.И. Каттос, Ю.М. Погосбемян. Обзор НИИНавтопром. – 1987. – № 10. – С. 9.
109. Кикин, Е.Ю. Абразивное изнашивание сталей после комбинированной ударно-волновой и лазерной обработки / Е.Ю. Кикин, А.И. Пчелинцев, Е.Е. Русин // Трение и износ. – 1990. – № 4. – С. 656–659.
110. Кикин, Е.Ю. Механические свойства стали 30ХГСА после комбинированной лазерной обработки / Е.Ю. Кикин, А.И. Пчелинцев, Е.Е. Русин // МИТОМ. – 1992. – № 11. – С. 35–36.
111. Кириллов, О.Н. Вопросы зачистной обработки комбинированными методами / О.Н. Кириллов // Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении (ТМ-2010): сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: ВГТУ, 2010 С. 130-133.

112. Кириллов, О.Н. Оценка применимости метода конечных элементов при математическом моделировании процесса обработки непрофилированным электродом-щеткой / О.Н. Кириллов, А.А. Никитин // Совершенствование производства поршневых двигателей для малой авиации: труды отрасл. науч.-техн. конф. М.: Машиностроение. 2008 С. 128-131.
113. Кириллов, О.Н. Совершенствование технологии изготовления втулки ведущего валика / О.Н. Кириллов, Э.А. Азаренков // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2007 Вып.2. С. 46-49.
114. Кириллов, О.Н. Создание твердотельной модели непрофилированного электрода-щеточки для комбинированной обработки / О.Н. Кириллов, В.И. Гунин, А.А. Никитин // Проектирование механизмов и машин. ПММ-2007: труды Всерос. науч.-практ. конф. Воронеж: ВГТУ, 2007 С. 74-81.
115. Киричек, А.В. Исследование контактного взаимодействия при накатывании резьб и профилей с динамическим нагружением инструмента / А.В. Киричек, А.Н. Афонин // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – № 2-2/274. – С. 72–77.
116. Киричек, А.В. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, С.А. Силантьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 7. – С. 5–8.
117. Киричек, А.В. Упрочнение тяжелонагруженных деталей методом статикоимпульсного ППД / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин, С.А. Силантьев // СТИН. – 2002. – № 5. – С. 13–15.
118. Киричек, А.В. Упрочнение тяжелонагруженных поверхностей крестовин стрелочных переводов / А.В. Киричек, О.Г. Кокорева // Состояние перспективы развития дорожного комплекса: Сб. научных статей. – Вып. 3. – Брянск: БГИТА, 2001. – С. 39–41.
119. Киричек, А.В., Афонин, А.Н. Исследование контактного взаимодействия при накатывании резьб и профилей с динамическим нагружением инструмента // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – № 2-2/274. – С. 72–77.
120. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Лазуткин, А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим

деформированием. Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

121. Киричек, Г.В. Управление качеством поверхностных слоев валов роторов комбинированными технологиями электроэрозионного легирования и поверхностной пластической деформацией / Г.В. Киричек, В.Б. Тарельчик, П.Е. Жарков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 22–27.
122. Киселев, Е.С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля / Е.С. Киселев. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с.
123. Клименко, Ю.В. Электроконтактная наплавка / Ю.В. Клименко. – М.: Металлургия, 1998. – 127 с.
124. Коган, Я.Д. Комбинированное упрочнение мало- и среднеуглеродистых сталей / Я.Д. Коган, О.В. Чудина // Лазерная технология: Сб. тр. Вып. 3. – Вильнюс, ИФ, 1987. – С. 49–51.
125. Коган, Я.Д. Комплексная химико-термическая обработка мало- и среднеуглеродистых сталей / Я.Д. Коган, О.В. Чудина // Прогрессивные технологические процессы термической и химико-термической обработки деталей машин и инструмента: Тез. докл. науч.-техн. конф. – Ижевск, 1987. – С. 23–24.
126. Кокорева, О.Г. Технологические возможности статико-импульсной обработки / О.Г. Кокорева // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 2. – С. 48–50.
127. Колмогоров, В.Л. Гидродинамическая подача смазки / В.Л. Колмогоров, С.И. Орлов, Г.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1975. – 255 с.
128. Колмогоров, В.Л. Разрушение металла от остаточных напряжений после обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров, А.А. Богатов, А.В. Тропотов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 12. – С. 45–49.
129. Колмогоров, Г.Л. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий / Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова, В.В. Тиунов. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012. – 226 с.
130. Костромин, С.В. Влияние скорости лазерной закалки на структуру и свойства стали 30ХГСА / С.В. Костромин, И.Р. Шатилов // Научные труды SWorld. – 2013. – Т. 7. – № 3С. – С. 44–47.
131. Костюк, Г.И. Лазерное упрочнение легированных сталей / Г.И. Костюк, Н.В. Руденко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 2. – С. 23–27.



132. Котов, О.К. Поверхностное упрочнение деталей машин химико-термическими методами / О.К. Котов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машгиз, 1961. – 279 с.
133. Кочетов, А.Н. Барьерно-дислокационный механизм упрочнения деталей машин методом электроакустического напыления: Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / А.Н. Кочетов. – Ростов на Дону, 1998. – 241 с.
134. Кочетов, В.В. Экономическая эффективность - расчет и анализ / В.В. Кочетов, А.А. Колобов, И.Н. Омельченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 350 с.
135. Крагельский, И.В. Узлы трения машин: справочник / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
136. Крапошин, В.С. Обработка поверхности металлических материалов лазерным излучением / В.С. Крапошин // Поверхность. – 1982. – № 3. – С. 3–12.
137. Крейнина, М.Н. Финансовое состояние предприятия. Методы оценки: учебник / М.Н. Крейнина. – Москва: ИКЦ «ДНС», 2012. – 224 с.
138. Кряжков, В.М. Научные основы восстановления работоспособности сопряжений деталей сельскохозяйственных тракторов применением металлопокрытий и упрочняющей технологии: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / В.М. Кряжков. – Л.: ЛСХИ, 1973. – 50 с.
139. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белащенко [и др.] – М.: Наука, 1990. – 480 с.
140. Кудряшев, С.Б. Влияние ультразвука на процессы формирования и развития электрической искры при электроакустическом напылении / С.Б. Кудряшев, А.А. Закалюжный // Вестник Донского государственного технического университета. – 2018. – Т. 18. – № 3. – С. 306–310.
141. Кузнецов, В.А. Синтез и исследование технологических структур методов механической обработки поверхностей деталей машин: Дисс. ... д-ра техн. наук: 05.02.08, 05.03.01 / В.А. Кузнецов. – М.: 2000. – 421 с.
142. Кузнецов, В.А. Системный анализ и моделирование технологических методов изготовления детали / В.А. Кузнецов, А.А. Черепашин, А.В. Смирнов. – М.: Русайнс, 2019. – 248 с.
143. Кузнецов, В.Г. Вакуумно-дуговая обработка поверхности металлических деталей, как способ получения регулярного микрорельефа / В.Г. Кузнецов, В.П. Пониматкин, Р.Н. Ризаханов, Т.А. Курбанов. URL: <https://docviewer.yandex.ru/view> (дата обращения: 13.03.2019).
144. Кузнецов, В.П. Инженерия плосковершинного регулярного микрорельефа, поверхности при многоцелевой обработке деталей / В.П.

- Кузнецов, В.Г. Горгоц, О.В. Дмитриева // Вестник УГАТУ. –2009. – № 4. – С. 113–115.
145. Куксенова, А.А. Методы испытаний на трение и износ / А.А. Куксенова, Л.И. Лаптева, Л.М. Рыбакова, А.Г. Колмаков. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 152 с.
146. Лаборатория экспериментально-статистических методов исследований (ЛЭСМИ). URL: <http://www.n-t.org/sp/lesmi> (дата обращения: 15.05.2019).
147. Лазаренко, Н.И. Современный уровень и перспективы развития электроискро-легирования металлических поверхностей / Н.И. Лазаренко // Электронная обработка материалов. – 1967. – 500 с.
148. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. / Под ред. В.Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – 664 с.
149. Лахтин, Ю.М. Газовое азотирование деталей машин и инструмента / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган. – М.: Машиностроение, 1982. – 60 с.
150. Лахтин, Ю.М. Комплексная лазерная химико-термическая обработка малоуглеродистых сталей / Ю.М. Лахтин, О.В. Чудина, В.С. Крапошин // Методы повышения конструктивной прочности металлических материалов: Мат. семинара. – М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1988. – С. 116 - 125.
151. Лахтин, Ю.М. Лазерное легирование стали и титановых сплавов / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, О.В. Чудина // Межвузовский сб. науч. тр. «Термическая, химико-термическая и лазерная обработка сталей и титановых сплавов». – Пермь, ППИ, 1989. – С. 16–20.
152. Лахтин, Ю.М. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Г.И. Шпис, З. Бемер. – М.: Металлургия, 1991. – 320 с.
153. Лужков, Ю.М. Сцепление колес с рельсами. Природа и закономерности / Ю.М. Лужков. М.: ВНИИБ, 2003. – 144 с.
154. Лурье, Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1991. – 75 с.
155. Любарский, И.М. Металлофизика трения / И.М. Любарский, Л.С. Палатник. – М.: Металлургия, 1976. – 176 с.
156. Магин, Д.Ю. Исследование структуры и свойств высокопрочной теплостойкой стали после объемной термической обработки и лазерного поверхностного упрочнения / Д.Ю. Магин, С.В. Костромин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4. – С. 256–261.
157. Макаров, А.В. Влияние отпуска и фрикционного нагрева на износостойкость стали У8, закаленной лазером / А.В. Макаров, Л.Г.

- Коршунов, А.Л. Осинцева // Трение и износ. – 1991. – Т. 12. – № 5. – С. 870–878.
158. Макаров, В.М. Комплексированные обрабатывающие системы / В.М. Макаров // Ритм. – 2011. – № 6. – С. 22–25.
159. Макаров, В.М. Комплексированные обрабатывающие системы / В.М. Макаров // Ритм. – 2011. – № 8. – С. 20–23.
160. Макаров, В.М. Уникальная синергия гибридных станков / В.М. Макаров, С.В. Лукина. URL: <http://www.ritm-magazine.ru/en/node/1651> (дата обращения: 10.01.2018).
161. Малеев, Д.Н. Электроакустическое напыление упрочняющих покрытий / Д.Н. Малеев, В.С. Минаков, Д.Д. Дымочкин. – Lambert, 2015. – 136 с.
162. Марков А.И. Ультразвуковая обработка металлов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
163. Матлин, М.М. Особенности формирования упрочненного слоя при электромеханической обработке с динамическим силовым воздействием / М.М. Матлин, Н.Г. Дудкина, А.Д. Дудкин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 6. – С. 38–41.
164. Микаэлян, Ю.А. Влияние процессов борирования на структуру и свойства низко- и среднеуглеродистых сталей / Ю.А. Микаэлян, Т.С. Хохлова, И.М. Спиридонова, С.А. Божко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – 2008. – № 6. – Ч. 1. – С. 55–58.
165. Минаков, В.С. Разработка комплексных механических и электрофизических процессов обработки на основе использования энергии трансформируемых ультразвуковых колебаний: Дисс. ... д-ра техн. наук: 05.03.01 / В.С. Минаков. – Ростов на Дону, 1989. – 516 с.
166. Минаков, В.С. Электроакустическое напыление / В.С. Минаков, А.Н. Кочетов // СТИН. – 2003. – № 4. – С. 32–35.
167. Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 346 с.
168. Михин, Н.М. Влияние нормальных напряжений на реализацию режима избирательного переноса при трении / Н.М. Михин, В.Н. Литвинов, И.В. Крагельский // Докл. АН СССР. – 1978. – Т. 24. – № 4. – С. 781–784.
169. Морозов, А.В. Исследование влияния режимов сегментной электромеханической закалки на сдвигоустойчивость прессового соединения типа «втулка-корпус» / А.В. Морозов, Л.В. Федорова, Н.Н.

- Горев // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 4. – С. 183–190.
170. Морозов, А.В. Исследование влияния режимов сегментной электромеханической закалки на формирование участков регулярной микротвердости / А.В. Морозов, Л.В. Федорова, Н.Н. Горев, Н.И. Шамуков // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2016. – № 2. – С. 24–26.
171. Морозов, А.В. Повышение износостойкости отверстий деталей, подверженных двустороннему износу применением избирательной электро-механической закалки / А.В. Морозов, В.А. Фрилинг, Н.И. Шамуков // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 4. – С. 113–119.
172. Морозов, А.В. Повышение нагрузочной способности соединений с натягом типа «втулка - корпус» объемным электромеханическим дорнованием / А.В. Морозов, Г.Д. Федотов, А.Е. Абрамов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 3. – С. 125–133.
173. Морозов, А.В. Разработка классификации процессов электромеханической обработки отверстий движущимся высокотемпературным полосовым источником / А.В. Морозов, Г.Д. Федотов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 3. – С. 44–50.
174. Морозов, А.В. Электромеханическая закалка рабочих поверхностей шлицевых втулок техники сельскохозяйственного назначения / А.В. Морозов, Л.В. Федорова, Г.Д. Федотов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 2. – С. 169–175.
175. Мрочек, Ж.А. Плазменно-вакуумные покрытия: Монография / Ж.А. Мрочек, А.К. Вершина, С.А. Иващенко [и др]. – Минск: Технопринт, 2004. – 369 с.
176. Мубояджян, С.А. Защитные покрытия для лопаток компрессора ГТД / С.А. Мубояджян, Я.А. Помелов // В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. Высокожаропрочные материалы для современных и перспективных газотурбинных двигателей и прогрессивные технологии их производства. – М.: ВИАМ, 2003. – С. 116–131.
177. Муханов, И.И. Импульсная упрочняюще-чистовая обработка деталей машин ультразвуковым инструментом / И.И. Муханов. – М.: Машиностроение, 1978. – 44 с.

178. Муханов, И.И. Ультразвуковая упрочняюще-чистовая обработка чугуна и стали / И.И. Муханов // Вестник Машиностроения. – 1968. – № 36. – С. 51–54.
179. Мухин, А.В., Ганина, Г.Э., Островский, Ю.А., Яковлева, А.П. Управление проектами реформирования промышленности, - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, - 200 с.
180. Надольский, В.О. Электромеханическое упрочнение деталей из серого чугуна в условиях ремонтного производства. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук / В.О. Надольский. Ульяновск: 1974. – 16 с.
181. Недорезов, И.А. Анализ вероятных условий эксплуатации землеройных машин в районах Сибири и Крайнего Севера / И.А. Недорезов, В.Г. Журбин // Строительные и дорожные машины. – 1987. – № 2. – С. 24–26.
182. Новичков, А.В. Исследование изнашивания прецизионных деталей дизельной топливной аппаратуры / А.В. Новичков, Е.В. Новиков, Е.Г. Рылякин [и др.] // Международный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 108–111.
183. Овсиенко, А.Н. Комплексная технология повышения долговечности высоконагруженных деталей турбин / А.Н. Овсиенко, А.В. Савлина, М.В. Синицин // Автоматизация и современные технологии. – 2006. – № 4. – С. 25–32.
184. Одинцов, Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
185. Палатник, Л.С. Фазовые превращения при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий / Л.С. Палатник. – М.: Электроискровая обработка металлов, 1985. – 433 с.
186. Паршев, С.Н. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стальных изделий электромеханической обработкой: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / С.Н. Паршев. – Волгоград: 1995. – 20 с.
187. Паршиков, О.Н. Обработка стальных деталей электромеханическим методом / О.Н. Паршиков, А.П. Яковлева // Главный механик. – 2014. – № 7. – С. 62–64.
188. Патент 2796389 РФ. Инструмент и способ комбинированной анодно-механической чистовой обработки теплозащитных многокомпонентных покрытий / М.В. Кондратьев, В.П. Смоленцев, А.А. Извеков, Т.В. Цымбал // Бюл.изобр. №15, 2022.

189. Патент 2829178 РФ. Способ изготовления гибкого металлического корпуса детали /А.А. Извеков, В.П. Смоленцев, А.Е. Малявин, И.Г. Стародубцев. Заявка 2023136218 от 29.12.2023. Оpubл. 25.10.24. Бюл. № 30.
190. Пашолок, И.Л. Применение рентгеновской тензометрии для неразрушающего контроля остаточных напряжений цельнокатаных колес / И.Л. Пашолок, А.В. Романов, А.В. Сухов, С.Л. Шиткин // Вестник ВНИИЖТ. – 2005. – № 4. – С. 23–28.
191. Платов, С.И. Волочение катанки и проволоки с регламентируемым микрорельефом поверхности / С.И. Платов, Д.В. Терентьев // Производство проката. – 2002. – № 4. – С. 27–28.
192. Подураев, В.Н. Физико-химические методы обработки / В.Н. Подураев, В.С. Камалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 340 с.
193. Поздеев, А.А. Остаточные напряжения: теория и приложение / А.А. Поздеев, Ю.И. Няшин, П.В. Трусов. – М.: Наука, 1982. – 112 с.
194. Полевой, С.Н. Упрочнение металлов: Справочник / С.Н. Полевой, В.Д. Евдокимов. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.
195. Полянчиков, Ю.Н. Распределение размеров зерен в теле однокомпонентного абразивного инструмента / Ю.Н. Полянчиков, С.А. Секачев, А.И. Курченко, Ю.Н. Поступаев // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2002. Сб. ст. межд. науч.-тех. конф. – Волжский: ВолгГАСА, 2002. – С. 52–54.
196. Полянчиков, Ю.Н. Комбинированный абразивный инструмент без связки / Ю.Н. Полянчиков, С.А. Секачев, А.А. Емельяненко // Инструмент и технологии. – 2002. – № 7-8. – С. 216–219.
197. Полянчиков, Ю.Н. Многокритериальная оптимизация процесса хонингования / Ю.Н. Полянчиков, С.А. Секачев, В.В. Усов, Ю.Н. Поступаев // Инструмент и технологии. – 2002. – № 7-8. – С. 157–159.
198. Полянчиков, Ю.Н. Повышение качества однокомпонентного абразивного инструмента, формируемого импульсным прессованием и высокотемпературным спеканием / Ю.Н. Полянчиков, С.А. Секачев, А.И. Курченко, Ю.Н. Поступаев // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2002. Сб. ст. межд. науч.-тех. конф. – Волжский: ВолгГАСА, 2002. – С. 49–52.
199. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин - М.: - Металлургия, - 1976. - 487 с.
200. Попилов, Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка металлов. Справочник / Л.Я. Попилов. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.

201. Приходько В.М. Исследование путей управления технологической наследственностью при дозированном ультразвуковом воздействии на поверхность: Отчет о НИР (промежуточ.). Тема № Б-360193/МАДИ(ТУ). № ГР 1940000972. Инв. № 2970000141. – М.: 1996. – 88 с.
202. Приходько, В.М. Научноёмкие технологии в машиностроении с применением ультразвука / В.М. Приходько, В.Ф. Казанцев, Р.И. Нигметзянов, Д.С. Фатюхин // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2011. – № 1. – С. 29–37.
203. Приходько, В.М. Повышение надежности и долговечности автотракторных деталей ультразвуковыми методами: Отчет о НИР. Тема № Б-360295/МАДИ(ТУ). № ГР1980003390. – М.: 1996. – 88 с.
204. Прокошкин, Д.А. Химико-термическая обработка металлов – карбонитрация / Д.А. Прокошкин. – М.: Машиностроение; Металлургия, 1984. – 240 с.
205. Пузряков, А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления / А.Ф. Пузряков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.
206. Пшибыльский, В. О влиянии поверхностной обработки на антифрикционные свойства пары вал-вкладыш / В. Пшибыльский, В.А. Нечипоренко // Труды ленинградского кораблестроительного института. – 1973. – Вып. 33.
207. Пшибыльский, В. Технология поверхностной пластической обработки / В. Пшибыльский. – М.: Металлургия, 1991. – 477 с.
208. Расчеты экономической эффективности новой техники: справочник / под ред. К.М. Великанова. – 2-изд. перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1990. – 445 с.
209. Санников, А.А. Трибология и триботехника: методические рекомендации по курсу «Трибология и триботехника» / А.А. Санников, А.М. Витвинин, Н.В. Куцубина. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. академия, 1997. – 76 с.
210. Смелянский, В. М. Назначение и классификация методов упрочнения / В. М. Смелянский // Машиностроение: энциклопедия. В 40 т./отв. ред. К. Ф. Фролов. - М. : Машиностроение, 2000. - Т. 3 кн. 3. Технология изготовления деталей машин. / Под общ. ред. А. Г. Суслова. - С. 365-366.
211. Сафонов, А.Н. Изучение структуры и твердости поверхности железоуглеродистых сплавов после их оплавления лазерным излучением / А.Н. Сафонов. Металловедение и термическая обработка металлов. – 1999. – № 1. – С. 7–10.

212. Сафонов, Е.Н. Структура и твердость чугуна после поверхностной закалки / Е.Н. Сафонов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2005. – № 9. – С. 38–43.
213. Сафонов, С.В. Модификация поверхностного слоя металлических изделий/ С.В. Сафонов, С.Н. Григорьев, В.П. Смоленцев // *Вестник Воронежского государственного технического университета*, Воронеж: ВГТУ, том 2, 2015 С. 19-26.
214. Сафонов, С.В. Повышение эксплуатационных свойств изделий путем нанесения и удаления покрытий/ С.В. Сафонов, С.Н. Григорьев, В.П. Смоленцев // *Вестник Воронежского государственного технического университета*, Воронеж: ВГТУ, том 11, №3, 2015 С. 15-23.
215. Сафонов, С.В. Повышение эксплуатационных характеристик деталей путем модификации поверхностного слоя/ С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев, А.И. Портных. В «Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты». В 5 т. Т.3/Под ред. А.В. Киричека. М: Изд. дом «Спектр», 2014 С. 365-406.
216. Семенченко, И.Ю. Достоинства хонингования при капитальном ремонте двигателя внутреннего сгорания / И.Ю. Семенченко, М.С. Медведева // *Молодой ученый.* – 2017. – № 24. – С. 197–199.
217. Смирнов, А.Е. Массоперенос при ионной цементации / А.Е. Смирнов, Н.М. Рыжов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1993. – № 9. – С. 2–7.
218. Смоленцев, В. П. Средства технологического оснащения для нетрадиционных методов обработки машиностроительных производств: лабораторный практикум : учебное пособие / В. П. Смоленцев, О. Н. Кириллов, Е. В. Смоленцев; ФГБОУ ВПО "Воронежский гос. технический ун-т". — Воронеж : Воронежский гос. технический ун-т, 2015. — 123 с. ил., табл.
219. Смоленцев, В.П. Изготовление фильтров многоэлектродным инструментом/ С.В. Сафонов, В.П. Смоленцев, Ю.В. Шаров. *Авиационная техника.* 2016, № 2 - С. 70-74.
220. Смоленцев, В.П. Физические основы и технологическое применение электроконтактного процесса / В.П. Смоленцев, Н.В. Сухоруков. Воронеж: ВГТУ, 1998. -148 с.
221. Смоленцев, В.П. Электрохимическое маркирование деталей / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, З.Б. Садыков. М: Машиностроение, 1983. -72 с.
222. Смоленцев, В.П., Белокуров, В.П., Климова, Г.Н. Технология и инструмент для комбинированной обработки немагнитных материалов //



Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2010, №4 (282), с. 77-80.

223. Смоленцев, В.П., Болдырев, А.И., Смоленцев, Е.В., Смоленцев, Г.П., Коптев И.Т. Теория электрических и физико-химических методов обработки. Часть 1: Обработка материалов с применением инструмента (Теория электрических и физико-химических методов обработки. Ч I: Обработка материалов с применением инструмента), Воронеж, Воронежский государственный технический университет, 2008, 248 с.
224. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки / Е.В. Смоленцев. – М.: Машиностроение, 2005. – 250 с.
225. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / Соболев, И.М., Р.Б. Статников. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.
226. Староконь, И.В. Кинетика усталостного трещинообразования основных конструктивных элементов и сварных соединений опорных блоков морских стационарных платформ / И.В. Староконь // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-1. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=20561> (дата обращения: 29.04.2019).
227. Сулима, А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шудов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 237 с.
228. Супов, А.В. Создание процесса карбонитрации // Металловедение. Термическая и химико-термическая обработка сплавов: Сб. науч. тр. / А.В. Супов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – С. 17 – 21.
229. Суслов, А.Г. Исследование процесса обработки плоских поверхностей абразивными брусками / А.Г. Суслов, С.Г. Бишутин, Л.А. Захаров // Проблемы определения технологических условий по заданным показателям качества изделий: Матер. Российской науч.-техн. конф. – Рыбинск, 2003. – С. 222–225.
230. Суслов, А.Г. Комплексные исследования качества поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов // Технологическое управление качеством поверхности деталей: Сб. науч. тр. – Киев: АТМ Украины, 1998. – С. 21–27.
231. Суслов, А.Г. Оценка качества поверхности с масляными карманами / А.Г. Суслов [и др.]; ред. кол.: Э.В. Рыжов (отв. ред.) [и др.] // Технология машиностроения: Сб. ст. – М.: 1975. – С. 30–35.
232. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

233. Сухов, А.В. Перспективы применения рентгеновского метода контроля остаточных напряжений в цельнокатаных колесах / А.В. Сухов, С.Л. Шиткин // Перспективные задачи развития железнодорожного транспорта. – М.: Интекст, 2010. – С. 244–253.
234. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
235. Сухочев, Г. А. Комбинированные процессы повышения качества деталей / Г. А. Сухочев, В. П. Смоленцев // Вибрационные машины и технологии: Сб. науч. тр. Курск: КПИ, 1993. – Вып. 2. – С. 111-117.
236. Сухочев, Г. А. Моделирование комбинированной отделочно-упрочняющей обработки защитных покрытий / Г. А. Сухочев, А. М. Кадырметов, А. В. Бондарь // Труды 10-й МНТК: Тез. докл. регион, конф., поев. 25-л. каф. сварки ВГТУ. Воронеж, 1999. – С. 95-97.
237. Сухочев, Г. А. Особенности кинематики и динамики процесса виброэкструдирования / Г. А. Сухочев // Нетрадиционные методы обработки: Сб. науч. тр. межд. конф. – Воронеж: ВГУ, 2002. – Ч. I. – С. 66-74.
238. Сухочев, Г. А. Упрочнение деталей автомобилей / Г. А. Сухочев, А. В. Бондарь // 100 лет русскому автомобилю: Тезисы докл. Междунар. науч.-техн. конф. – М.: МАМИ, 1996. – С. 44-45.
239. Сухочев, Г.А. Технология и оборудование для отделочно-упрочняющей обработки поверхностей межлопаточных каналов деталей транспортных систем / Г. А. Сухочев // Производство специальной техники. Сб. науч. трудов, – Воронеж: ВГУ. 2003. – С. 32-38.
240. Сухочев, Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях / Г. А. Сухочев. М.: «Машиностроение», 2004. – 287 с.
241. Тарельник, В.Б. Исследование влияния режимов электроискрового упрочнения на качественные параметры покрытий / В.Б. Тарельник // Конструирование и производство транспортных машин. – Киев: 1994. – Вып. 24. – С. 103–107.
242. Тарельник, В.Б. Повышение износостойкости колец торцовых уплотнений ЭЭЛ трущихся поверхностей / В.Б. Тарельник, В.С. Марцинковский // Тр. 9-й Межд. конф. “Герметичность, вибробезопасность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования”. – Сумы: 1999. – Т. 1. – С. 254–265.
243. Тарельник, В.Б. Управление качеством поверхностных слоев деталей комбинированным электроэрозионным легированием / В.Б. Тарельник. – Сумы: МакДен, 2002. – 324 с.

244. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / под общей редакцией А.М.Русецкого. - Минск:Беларус.наука,2012.-239 с.
245. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года. Центр парламентских коммуникаций «Парлком». URL: [www.parlcom.ru/Documents/Doc/Raznoe/TransportStrateg.htm](http://www.parlcom.ru/Documents/Doc/Raznoe/TransportStrateg.htm) (дата обращения: 12.01.2020).
246. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
247. Туманов, Ю.Н. Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах / Ю.Н. Туманов. – М.: Физматлит, 2010. – 968 с.
248. Фадеев, Л.Л. Повышение надежности деталей машин / Л.Л. Фадеев, А.Ю. Албагачиев. – М.: Машиностроение, 1993. – 95 с.
249. Федоров С.К. Патент 186927 РФ. 11.02.2019. Инструментальный узел для электромеханической обработки резьбы / С.К. Федоров, Л.В. Федорова, Ю.С. Иванова [и др.] Заявка № 2018106130 от 19.02.2018.
250. Федоров, С.К. Исследование температурных полей в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью в процессе избирательной электромеханической закалки / С.К. Федоров, А.В. Морозов, В.А. Фрилинг // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 9. – С. 117–125.
251. Федоров, С.К. Поверхностное упрочнение электромеханической обработкой деталей текстильных машин / С.К. Федоров, А.П. Яковлева, М.А. Лашуков // Будущее машиностроения России. Сб. док. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – С. 65–68.
252. Федоров, С.К. Электромеханическая поверхностная закалка втулок трака бульдозера «KOMATSU» / С.К. Федоров, А.В. Морозов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2013. – № 3. – С. 102–107.
253. Федорова, Л.В. Исследование влияния содержания углерода на микротвердость при избирательной электромеханической закалке трибонагруженного участка отверстия / Л.В. Федорова, А.В. Морозов, В.А. Фрилинг // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 3. – С. 9–14.
254. Федорова, Л.В. Повышение износостойкости втулки балансира трактора МТЗ-80.1 избирательной электромеханической закалкой / Л.В. Федорова, А.В. Морозов, В.А. Фрилинг // Известия Тульского

- государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 9. – С. 132–140.
255. Федорова, Л.В. Повышение износостойкости гладких цилиндрических подвижных соединений избирательной электромеханической закалкой отверстий / Л.В. Федорова, А.В. Морозов, В.А. Фрилинг // Вестник МГАУ. – 2012. – № 9. – С. 25–29.
256. Федорова, Л.В. Повышение эффективности электромеханической закалки отверстий гладких цилиндрических подвижных соединений, испытывающих одностороннюю радиальную нагрузку / Л.В. Федорова, А.В. Морозов, В.А. Фрилинг // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2012. – № 8. – С. 49–53.
257. Федотов, Г.Д. Повышение долговечности подвижных герметичных соединений сельскохозяйственной техники применением отделочно-упрочняющей электромеханической обработки / Г.Д. Федотов, А.В. Морозов, О.М. Каняева // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 2. – С. 149–156.
258. Федотов, Г.Д. Повышение эффективности отделочно-упрочняющей электромеханической обработки применением инструментальных материалов из безвольфрамовых твердых сплавов / Г.Д. Федотов, А.В. Морозов, В.П. Табаков, А.И. Аникеев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 3. – С. 24–30.
259. Фролов, К.В. Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения / К.В. Фролов. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
260. Фролов, К.В. Основные задачи машиноведения на современном этапе / К.В. Фролов // Машиностроитель. – 1982. – № 7. – С. 11–13.
261. Хаюров, С.С. Термическая и химико-термическая обработка металлов и сплавов с использованием лазерных пучков. Металловедение и термическая обработка металлов. Т. 14. Итоги науки и техники / С.С. Хаюров. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1980. – С. 142–185.
262. Хворостухин, Л.А. Обработка металлопокрытий выглаживанием / Л.А. Хворостухин, В.Н. Машков, В.А. Торпачев, Н.Н. Ильин. – М.: Машиностроение, 1980. – 63 с.
263. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
264. Хейфец, М.Л. Синергетический анализ структурообразования в металлах при термических, деформационных и комбинированных

- воздействиях / М.Л. Хейфец // ДАН Беларуси. – 2014. – Т. 58. – № 3. – С. 106–111.
265. Хейфец, С.Г. Аналитическое определение глубины напряженного слоя при обработке роликами стальных деталей / С.Г. Хейфец // Труды ЦНИИТМАШ. – Кн. 49. – М.: Машгиз, 1952. – С. 7–17.
266. Чихос, Х. Системный анализ в триботехнике / Х. Чихос. – М.: Мир, 1982. – 234 с.
267. Чичинев, Н.А. Лазерное упрочнение технологического инструмента обработки металлов давлением / Н.А. Чичинев, С.А. Иванов, С.М. Горбатюк, А.Н. Веремеевич. – М.: МИМиС, 2013. – 166 с.
268. Чудина, О.В. Комбинированное упрочнение мало- и среднеуглеродистых сталей / О.В. Чудина // Ресурсосберегающие технологии поверхностного упрочнения деталей машин: Сб. тр. МАДИ. – М.: МАДИ, 1988. – С. 121–124.
269. Чудина, О.В. Комбинированные методы поверхностного упрочнения сталей с применением лазерного нагрева / О.В. Чудина. – М.: МАДИ, 2003. – 248 с.
270. Чудина, О.В. Особенности формирования упрочненного слоя при лазерном легировании стали с последующим азотированием / О.В. Чудина // Повышение надежности и долговечности материалов и деталей машин на основе новых методов термической и химико-термической обработки: Тез. док. Всесоюзной науч.-тех. конф. –Хмельницкий, 1988. – С. 132–133.
271. Шнейдер, Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г. Шнейдер. – Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.
272. Шур, Е.А. Повышение конструктивной прочности сталей при лазерной обработке / Е.А. Шур, С.С. Войнов, И.И. Клещева // МиТОМ. – 1982. – № 5. – С. 36–38.
273. Щедрин, А.В. Повышение эффективности методов комбинированного прошивания отверстий / А.В. Щедрин, А.М. Кузнецов, З.И. Егорова // Машиностроитель. – 1999. – № 12. – С. 36–40.
274. Щедрин, А.В. Совершенствование комбинированных методов редуцирования и прошивания / А.В. Щедрин, В.В. Ульянов, В.М. Скоромнов [и др.] // Машиностроитель. – 2002. – № 4. – С. 29–32.
275. Щедрин, А.В. Совершенствование характеристик инструмента для деформирующе-выглаживающего прошивания отверстий / А.В. Щедрин, А.Б. Таненгольц // Машиностроитель. – 2002. – № 11. – С. 20–23.
276. Эдгаров, В.Р. Повышение износостойкости поверхностного слоя деталей комбинированной электромеханической обработкой с отпуском /

- В.Р. Эдгаров, Б.Ш. Алимбаева, С.Ю. Анохин // Омский научный вестник. – 2020. – № 2. – С. 10–14.
277. Эдигаров, В.Р. Классификация комбинированных методов обработки на основе электромеханического упрочнения / В.Р. Эдигаров, И.Ю. Килунин, В.В. Дегтярь // Современные наукоемкие технологии. – 2012. – № 3. – С. 32–35; URL: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=30792> (дата обращения: 26.03.2019).
278. Элькин, С.Ю. Совершенствование технологий восстановления упругих элементов сельскохозяйственной техники электромеханической обработкой. Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. / С.Ю. Элькин. – Саратов: 2003. – 42 с.
279. 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 Межд. науч.-практ. конф. – Курск: ЮЗГУ, 2019. – С. 179–182.
280. 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 Межд. науч.-тех. конф. – 2019. – С. 198–201.
281. Яковлева, А.П. Повышение нагрузочной способности деталей типа тел вращения методом комбинированной обработки / А.П. Яковлева // Главный механик. – 2015. – № 1. – С. 46–48.
282. Яковлева, А.П. Повышение нагрузочной способности деталей типа тел вращения методом комбинированной обработки / А.П. Яковлева // Главный механик. – 2015. – № 1. – С. 46–48.
283. Яковлева, А.П. Повышение ресурса работы пар трения металлорежущего оборудования / А.П. Яковлева // Машиностроение: инновационные аспекты развития. Мат. I межд. науч.-практ. конф. – 2018. – С. 102–105.
284. Яковлева, А.П. Создание гибридных станков для производства деталей сельхозназначения / А.П. Яковлева // Главный механик. – 2021. – № 8. – С. 36–43.
285. 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.

286. Яковлева, А.П. Упрочнение зубчатых колес концентрированными потоками энергии // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2019. № 7 (268). С. 3-7.
287. Яковлева, А.П. Физико-механические свойства поверхностного слоя деталей после упрочнения электромеханической обработкой / А.П. Яковлева, В.Н. Зарипов, Т.Р. Хуснетдинов, В.Т. Нго // Главный механик. – 2019. – № 2. – С. 26–31.
288. Яковлева, А.П., Беспояско, А.Ю., Лизунов, И.В. Повышение износостойкости деталей летательных аппаратов методом комбинированной обработки / А.П. Яковлева, А.Ю. Беспояско, И.В. Лизунов // XLIII Академические чтения по космонавтике. Сб. тез. –2019. – С. 317–319.
289. Ярков, Д.В. Формирование многослойных покрытий методом электроискрового легирования / Д.В. Ярков, Ю.И. Мулин // Исследования материаловедения в области создания материалов и покрытий. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – С. 223–228.
290. Ящерицын, П.И. Основы проектирования технологических комплексов в машиностроении / П.И. Ящерицын, Л.М. Акулович, М.Л. Хейфец. – Минск, Технопринт, 2006. – 248 с.
291. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Минск: Наука и техника, 1977. – 255 с.
292. Bagherifard, S. Fatigue behaviour of a low allow steel with nanostructured surface obtained by severe shot peening / S. Bagherifard, M. Guagliano // Engineering Fracture Mechanics. – 2012. – Vol. 81. – P. 56–68.
293. Bogdanov, A.V. Selecting optimal configurations of optical schemes for solving the problem of railway wheels laser thermal treatment / A.V. Bogdanov, V.I. Sokolov, S.A. Shmelev // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2171. – Art. 120011.
294. Chen, P.W. Spherical diamond for hardening technologies / P.W. Chen, Y.S. Ding, Q. Chen [et al.] Diamond and Related Materials. – 2000. – Vol. 9. – No. 9-10. – P. 1722–1725.
295. Dubov, A. Detection of local stress concentration zones in engineering products—the lacking link in the non-destructive testing system / A. Dubov, A. Marchenkov, S. Kolokolnikov // Weld World. – 2018. – Vol. 62. – No. 2. – P. 301–309.
296. Dubov, A. Determination of mechanical properties of metal in stress concentration zones using the metal magnetic memory method / A. Dubov, A.

- Marchenkov, S. Kolokolnikov // *Materials Testing*. – 2019. – Vol. 61. – No. 1. – P. 19–22.
297. Dubov, A.A. Investigation of metal properties using the effect of the magnetic memory of metal / A.A. Dubov // *Physical metallurgy and heat treatment of metals*. – 1997. – Vol. 3. – P. 18 – 30
298. Fedorov, S. 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 [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – Vol. 589. – 2019. – Art. 012032.
299. 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.
300. Figueroa, C.A. The hydrogen etching mechanism in plasma nitriding of metals / C.A. Figueroa, F. Alvarez // *Applied Surface Science*. – 2006. – Vol. 253. – P. 1806–1809.
301. Flis, J. Effect of low-temperature plasma nitriding on corrosion of 304L stainless steel in sulfate and chloride solutions / J. Flis, M. Kuczynska // *J. Electrochem. Soc.* – 2004. – Vol. 151. – P. 573–580.
302. Goritsky, V.M. Investigation of structural damageability of steel samples using the metal magnetic memory method / V.M. Goritsky, A.A. Dubov, E.A. Demin // *Control Diagnostics*. – 2000. – Vol. 7. – P. 35–39.
303. Grigor'yants, A.G. Application of lasers for processing metals and alloys / A.G. Grigor'yants, I.N. Shiganov // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2020. – No. 6. – P. 649–653.
304. Hosseini, S.R., Ashrafizadeh, F. Accurate measurement and evaluation of the nitrogen depth profile in plasma nitrided iron / S.R. Hosseini, F. Ashrafizadeh // *Vacuum*. – 2009. – Vol. 83. – P. 1174–1178.
305. Huebner, C. Improving wear resistance and corrosion resistance of machine parts / C. Hübner, A. // *Technologies*. – 2000. – Vol. 159 – P. 238 – 249.
306. Isaenkova, M. Plastic deformation of Zr-based alloys at temperatures of phase transformations / Isaenkova, M., Perlovich, Yu., Fesenko, V. [et al.] // *Mat. Sci. Forum*. – 2007. Vol. 550. – P. 637–642.
307. Isaenkova, M. Reconstruction of high-temperature deformation process by texture of the low-temperature phase as applied to Zbased alloys / M. Isaenkova, Yu. Perlovich, V. Fesenko, M. Grekhov // *Kristallographie*. – 2007. – Suppl. 26. – P. 333–338.

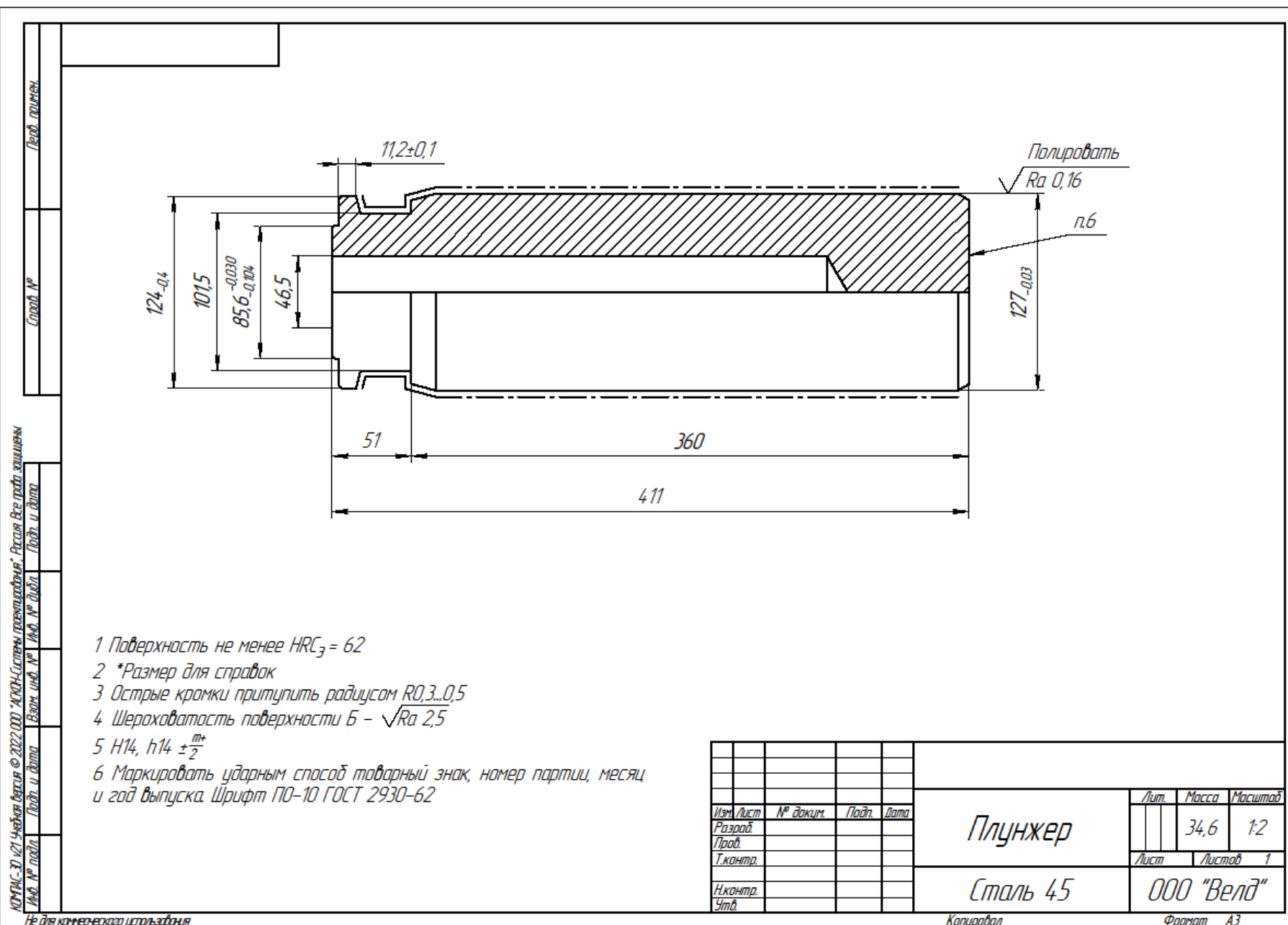


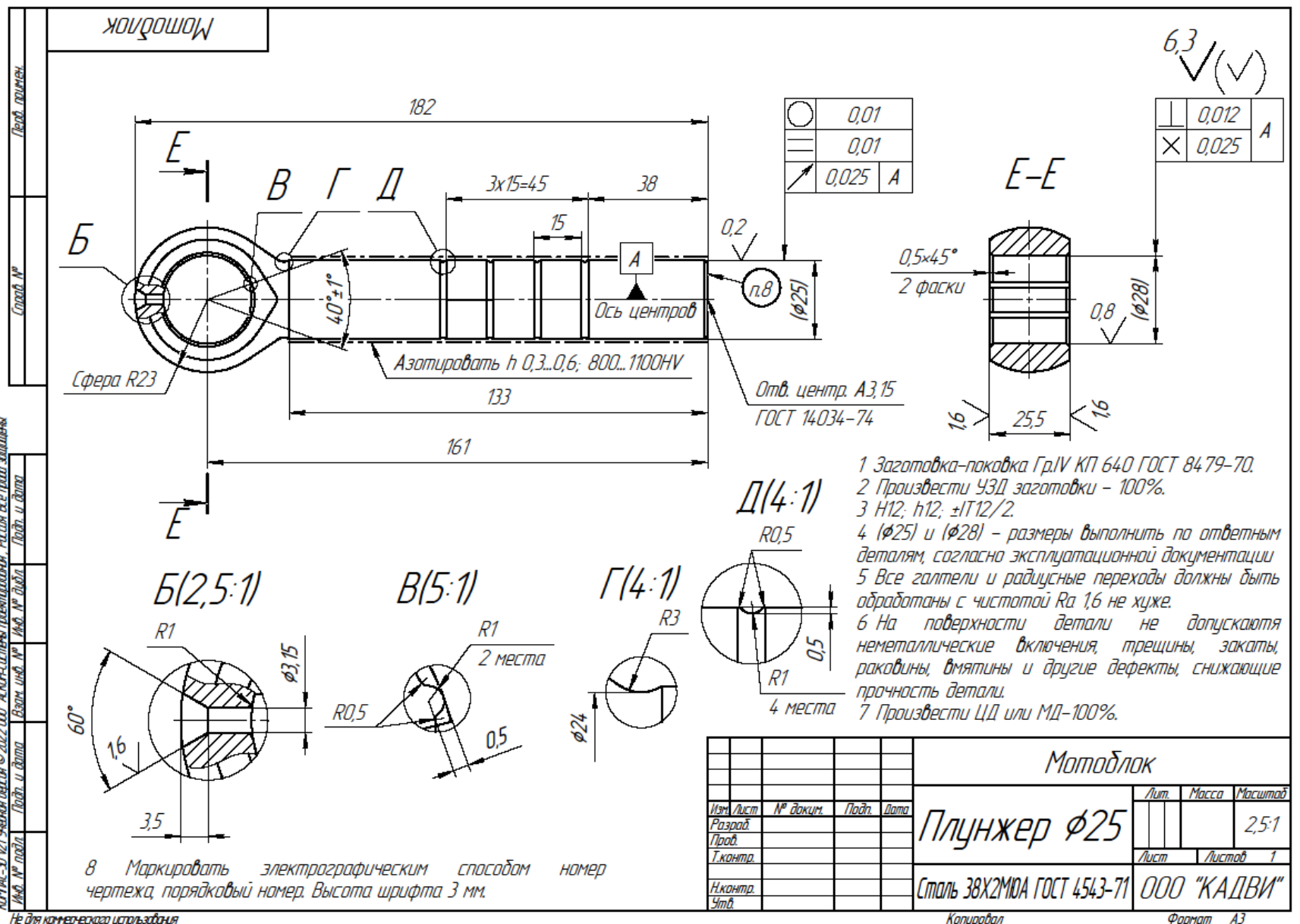
308. Isaenkova, M. Use of generalized pole figures in the X-ray study of textured metal materials / M. Isaenkova, Yu. Perlovich, V. Fesenko // *Kristallographie*. – 2007. – Suppl. 26. P. 327–332.
309. ISO 24497–1:2020. Nondestructive testing — metal magnetic memory — Part 1: Vocabulary and general requirements. – 15 p.
310. ISO 24497–2:2020. Nondestructive testing — metal magnetic memory — Part 2: Inspection of welded joints. – 13 p.
311. Kadyrmetov, A.M., Popov, D.A., Snyatkov, E.V., Plakhotin, A.A. Prerequisites for obtaining wear-resistant metal coatings with a high-entropy structure by atmospheric plasma spraying, reflow, and hardening // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 939(1), 012030.
312. Kaestner, P. Plasma nitrided austenitic stainless steels for automotive hydrogen applications / P. Kaestner, T. Michler, H. Weidner // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 203. – P. 897–900.
313. Katalog firmy Hegenscheidt. RFN. Эл. ресурс. URL: <https://www.hegenscheidt-mfd.com> (дата обращения: 12.04.2018).
314. Klimenov, V.A. Increasing the life-time of wheels, rails, shafts and axes using ultrasonic processing of surfaces / V.A. Klimenov, Zh.G. Kovalevskaya, O.N. Nekhoroshkov // *Proc. 14th Int. Conf. on Metallurgy and Materials METAL*. – 2005. – P. 214–221.
315. Kondakov, A.I. Productivity as measure of multiproduct metal processing production efficiency / A.I. Kondakov // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150. – P. 987–991.
316. Kravchenko, I.N., Kadyrmetov, A.M., Kuznetsov, Y.A., Zhachkin, S.Y., Baranova, N.S. A Method for Separating Powder Materials into Fractions of a Certain Granulometric Composition // *Polymer Science - Series D*, 2024, 17(3), Pp 766–770.
317. Krishna, K. Improving service life of steel the use of ultrasonic impact treatment (UIT) / K. Krishna, P.E. Verma, E.S. Statnikov, L. Theini // *Proc. Second Int. Conf. "Bridge Maintenance, Safety, Management and Costs"*. – London, Taylor & Francis Group, 2004
318. Lu, J.Z. Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel / J.Z. Lu, K.Y. Luo, Y.K. Zhang [et. al.] // *Acta Materialia*. – 2010. – Vol. 58. – No. 16. – P. 5354–5362.
319. Lyabin, N.A. Characteristics of copper vapor laser output with radiation power 30-100 W / N.A. Lyabin, M.A. Kazaryan, A.G. Grigoriant [et al.] // *Proceedings of SPIE*. – 2019. – Vol. 11322. – Art. 13220K.

320. Lyabin, N.A. Fiber optic laser cutting of steel shafts and rings / N.A. Lyabin, M.A. Kazaryan, A.G. Grigoryants // *Proceedings of SPIE*. – 2019. – Vol. 11322. – Art. 113221H.
321. Lyubikov, V.V. Development and testing of multilayer physically vapour deposited coatings for piston rings / V.V. Lyubikov, A.A. Voevodin, A.L. Yerokhin [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 1992. – Vol. 52. – P. 145–151.
322. Moskalioviene, T. Modeling of nitrogen penetration in polycrystalline AISI-316L austenitic stainless steel during plasma nitriding / T. Moskalioviene, A. Galdikas, J.P. Riviere, L. Pichon // *Surface and Coatings Technology*. – 2011. – Vol. 205. – P. 3301–3306.
323. Nikulin, S.A. Effect of volume-surface hardening on cyclic strength / S.A. Nikulin, V.M. Fedin, A.B. Rozhnov [et al.] // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2016. – Vol. 57. – No. 11-12. – P. 678–683.
324. Nikulin, S.A. Strength of the side frame of a cargo truck after volume-surface hardening / S.A. Nikulin, V.N. Oguenko, A.B. Rozhnov [et al.] // *Russian Metallurgy (Metally)*. – 2016. – Vol. 2016. – No. 10. – P. 996–1001.
325. Perlovich, Yu. Features of texture and structure development in zirconium under equal channel angular pressing / M. Isaenkova, V. Fesenko, M. Grekhov [et al.] // *Mat. Sci. Forum*. – 2006. – Vol. 503-504. – P. 859–864.
326. Perlovich, Yu. General principles of substructure inhomogeneity, arising in metal materials under plastic deformation / Yu. Perlovich, M. Isaenkova, V. Fesenko // *Mat. Sci. Forum*. – 2007. – Vol. 550. – P. 253–258.
327. Rakhimyanov, Kh.M. Modeling of deformation processes for conditions of ultrasonic frequency impulse impact on the surface layer of metals and alloys / Kh.M. Rakhimyanov, K.Kh. Rakhimyanov, A.S. Eremina // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 63–68.
328. Rakhimyanov, Kh.M. Technological peculiarities providing the surface quality parameters at ultrasonic surface hardening / Kh.M. Rakhimyanov, Yu.S. Semenova, A.F. Eremina // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 698. – P. 482–486.
329. Riviere, J.P. Chemical bonding of nitrogen in low energy high flux implanted austenitic stainless steel / J.P. Riviere, M. Cahoreau, P. Meheust // *Appl. Phys.* – 2002. – Vol. 91. – No. 10. – P. 6361–6366.
330. Sand, A. Surface state of Inconel 718 ultrasonic shot peened: Effect of processing time, material and quantity of shot balls and distance from radiating surface to sample / A. Sand, V. Garca Navas V., O. Gonzalo // *Materials and Design*. – 2011. – Vol. 32. – P. 2213–2220.

331. Sindg, N.B. Fatigue resistance of laser heat-treated 1054 carbon steel / N.B. Sindg, S.M. Copley, M. Bass // *Metal. Trans. A.* – 1981. – Vol. 12A. – P. 138–140.
332. Statnikov, E.Sh. Study of comparative characteristics of ultrasonic impact and optimization of deformation treatment processes / E.Sh. Statnikov, V.N. Vityazev, O.V. Korolkov // *The Fourth Int. Conf. on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies, MMT.* – 2006. – P. 110–119.
333. Tillmann, W. Mechanical and tribological properties of Ti /TiAlN duplex coatings on high and low alloy tool steels / W. Tillmann, E. Vogli, S. Momeni // *Vacuum.* – 2009. – Vol. 84. – P. 387–392.
334. Tsikh, S.G. Regularity research of the combined strength of the surface coating structure in steel 25X1MF / S.G. Tsikh, M.E. Tscheglov, V.I. Grishin [et al.] // *The environment protection in the oil-producing complex.* – 2002. – No. 3. – P. 14–17.
335. Vasilev, A.S. Controlled forming of machine components operating characteristics / A.S. Vasilev // *Procedia Engineering.* – 2016. – Vol. 150. – P. 975–979.
336. Yakovleva, A. Technological heredity effect on fatigue strength of hydropower plant parts after combined processing / A. Yakovleva, A. Dubov, A. Sobranin [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2020. – Vol. 779. – Art. 012029.
337. Yakovleva, A.P. Improving the durability of machine parts using a combined method / A.P. Yakovleva // *Materials Science Forum.* – 2019. – Vol. 946. – P. 37–41.
338. 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. – Vol. 49. – No. 3. – P. 237–242.
339. Zubkov, N.N. Steel case hardening using deformational cutting / N.N. Zubkov, V. Poptsov, S. Vasiliev., A. Batako // *Journal of Manufacturing Science and Engineering.* – 2018. – Vol. 140. – No. 6. – Art. 061013.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**





КОМПАС-3D v21 Чейер деген © 2022 ООО "УЧМ-Системы проектирования". Архив Все права защищены  
 №д. № подл. Подп. и дата Взам инд. № №д. № подл. Подп. и дата

HB-200/3.04

✓(✓)

1 Неуказанные предельные отклонения размеров диаметров A, B.  
 2 \*Размеры для справок.  
 3 Неперпендикулярность оси поверхности A к поверхности B не больше 0,02 мм.  
 4 HRC<sub>3</sub> 54...56

Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата
Разраб.				
Проб.				
Т.контр.				
Н.контр.				
Умб.				

HB-200/3.04

**Плунжер**

Сталь 45 ГОСТ 1050-88

Лит.	Масса	Масштаб
		1:2
Лист	Листов	1
000 "УПМ"		

Не для коммерческого использования

Копировал

Формат А3



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 186927

**Инструментальный узел для электромеханической  
обработки резьбы**

Патентообладатели: *Федоров Сергей Константинович (RU),  
Федорова Лилия Владимировна (RU), Иванова Юлия  
Сергеевна (RU), Яковлева Анна Петровна (RU), Зарипов  
Вадим Назиуллович (RU), Власов Максим Валерьевич (RU),  
Лашуков Михаил Андреевич (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2018106130

Приоритет полезной модели 19 февраля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных

моделей Российской Федерации 11 февраля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 19 февраля 2028 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев





**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова  
Российской академии наук  
(ИМАШ РАН)**

*Малый Харитоньевский пер., дом 4, Москва, 101000  
телефон/факс: (495) 624-98-00, (495) 624-98-63, e-mail: info@imash.ru, www.imash.ru  
ОКПО 00224588, ОГРН 1037700067492, ИНН 7701018175, КПП 770101001*

23.05.22 № 1624/18  
На № 1624/18 от 25.05.22

**Свидетельство**

**о проведении исследований износостойкости**

Были получены образцы (20 шт), изготовленные из стали 40Х:

10 образцов изготавливали по технологии – механическая обработка (точение), ТО (электрохимическая обработка), алмазное выглаживание.

10 образцов изготавливали по технологии – механическая обработка (точение), ТО (электрохимическая обработка), шлифование.

Исследование проводили на модернизированной машине трения ИИ-5018 по схеме «ролик-ролик». Массовый износ оценивали с использованием аналитических весов модели ВЛР-200.

Результаты испытаний представлены в таблице:

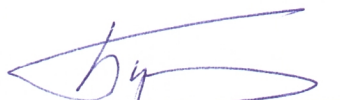
Износ образцов, обработанных по 1 варианту	Износ образцов, обработанных по 2 варианту
Режимы обработки: ЭМО: I – 1400 А; U – 4 В; P – 300 Н; V – 1,2 м/мин; S – 3 мм/об., алмазное выглаживание: давление – 200 Н, подача – 0,05 мм/об, число проходов алмазного выглаживателя – 1.  <b>Среднее значение износа 22,3 мг.</b>	Режимы обработки: I – 1400 А; U – 4 В; P – 300 Н; V – 1,2 м/мин; S – 3 мм/об.  <b>Среднее значение износа 28,8 мг.</b>

Режимы обработки:

ЭМО: I – 2600 А; U – 4 В; P– 300 Н; V – 1,8 м/мин; подача – 3,5 мм/об.; алмазное выглаживание: P – 200 Н, S – 0,05 мм/об, число проходов алмазного выглаживателя – 1.

**Среднее значение износа 16,75 мг.**

Зам. зав. отделом,  
д-р. техн. наук, проф.

  
подпись, дата

И.А. Буяновский

Отв. исполнитель, научн. сотр.

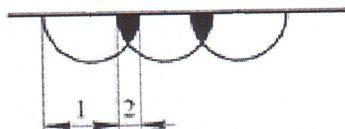


О.И. Кулаков

## Свидетельство №5591

## о проведении исследований

Поступили образцы (10 шт.), изготовленные из стали 40Х. Химический состав: Fe – 96,3%, Si – 0,27%, Mn – от 0,7 %, Ni– 0,25%, S,P – 0,065%, Cr – 1,1%, Cu – 0,2%. Образцы изготовлены по техпроцессу: точение наружной цилиндрической поверхности, лазерная закалка, алмазное выглаживание. При исследовании были выявлены 2 области: упрочненная зона и зона вторичной закалки.



1- упрочненная зона, 2 – зона вторичной закалки.

На каждом образце проводили не менее 10 замеров в области 1 и 2.


Микротвердость измеряли на приборе DuraScan-20. Результаты измерений представлены в таблице.


№образца	Твердость, HV	
	1 зона	2 зона
1	750	620
	740	620
	720	625
	750	630
	755	625
2	780	650
	776	660
	790	655
	782	655
	780	650
3	750	625
	755	630
	750	645
	760	630
	760	635
4	770	650
	750	655
	755	650
	760	660
	770	655
5	750	620
	740	655
	720	640
	755	655
	740	660
6	780	600
	776	650
	790	645
	782	620
	785	650

7	760	620
	770	645
	755	630
	760	630
	775	625
8	755	640
	740	665
	730	655
	750	655
	755	660
9	760	630
	755	655
	755	630
	770	655
	770	660
10	770	625
	775	645
	780	640
	782	655
	795	650

Начальник лаборатории механических испытаний

Инженер

 Ярикова Т.С.  
28.08.2019

 Барков М.Г.  
28.08.2019

АО «ОДК»  
Производственный комплекс  
«Салют»  
УГМет (66)





А К Ц И О Н Е Р Н О Е О Б Щ Е С Т В О  
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«КАЛУЖСКИЙ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД «ТАЙФУН»

248035, г. Калуга, Грабцевское шоссе, д. 174  
Тел.: +7 (4842) 71-85-85 Факс: +7 (4842) 52-22-66

ИН 4026005699  
ПП 402901001

КПО 07511057  
ГРН 1024001425513

Электронная почта: info@typhoon-jsc.ru  
Интернет-сайт: www.typhoon-jsc.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Главный инженер, председатель  
секции «Техпереворужение»  
научно-технического Совета  
АО «Тайфун»

В.В. Семес  
« 7 » \_\_\_\_\_ 2023г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

по апробации и внедрению разработанных доцентом кафедры  
«Технологии машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана Яковлевой  
Анной Петровной процессов комбинированной обработки с наложением  
физических воздействий для получения модифицированных  
поверхностных слоёв в производственных условиях

В результате экспериментальной апробации разработанных доцентом кафедры  
«Технологии машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана Яковлевой А.П. процессов  
комбинированной обработки с наложением физических воздействий для получения  
модифицированных поверхностных слоёв в производственных условиях установлено,  
что комплексная обработка, включающая электромеханическую обработку и алмазное  
выглаживание наружных цилиндрических поверхностей заготовок из стали 40Х  
обеспечивает шероховатость обработанных поверхностей до Ra 1,0 мкм и твердость  
выше HRC 48...50, что обеспечивает требуемые характеристики и эксплуатационные  
свойства поверхностей для деталей, работающих в условиях трения со смазкой, и  
позволяют исключить выполнение операций шлифования этих поверхностей при  
изготовлении.

Разработанные Яковлевой А.П. научно обоснованные рекомендации и процессы  
комбинированной обработки поверхностей деталей, работающих в условиях  
интенсивного износа и трения со смазкой, позволяют сократить длительность  
производственного цикла и рекомендованы для внедрения в механообрабатывающем  
производстве предприятия.

Настоящее заключение рассмотрено на заседании секции «Техпереворужение»  
научно-технического Совета АО «Тайфун», протокол №23-03 от 14.07.2023г.

Ученый секретарь  
научно-технического Совета, к.т.н.

О.А. Короткий

Начальник бюро управления  
опытным производством, к.т.н.

Т.А. Журавлева

**СВИДЕТЕЛЬСТВО №3848****о проведении исследований**

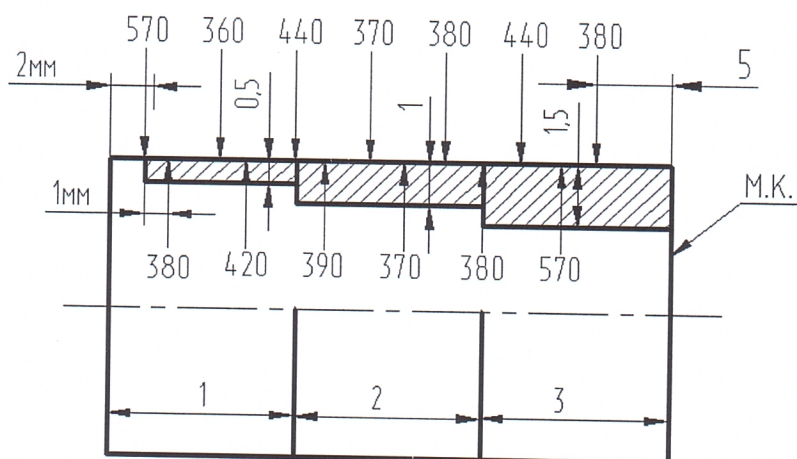
Были получены образцы, изготовленных из стали 40 X; стали 20Х3МВФ, стали 45.

По 10 образцов изготавливали по технологии – механическая обработка (точение), ТО (электрохимическая обработка), алмазное выглаживание.

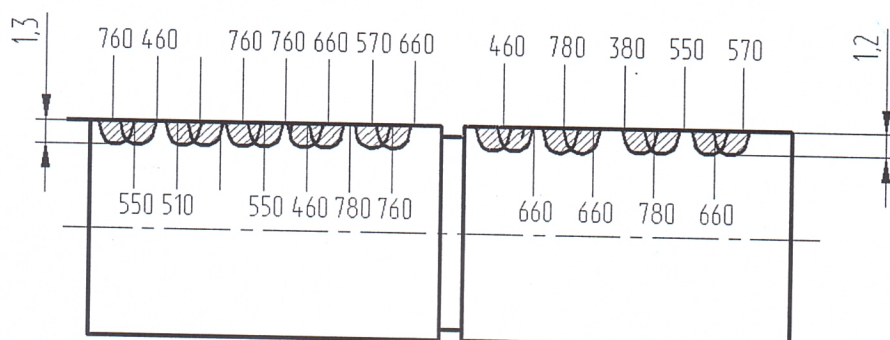
Проведено исследование микротвердости поверхностного слоя (HV) и глубины упрочнения. Микротвердость измеряли на приборе DuraScan-20.

Глубину упрочнения определяли путем изготовления косых шлифов.

- **Среднее значение твердости и глубины упрочнения для образцов, изготовленных из стали 20Х3МВФ**

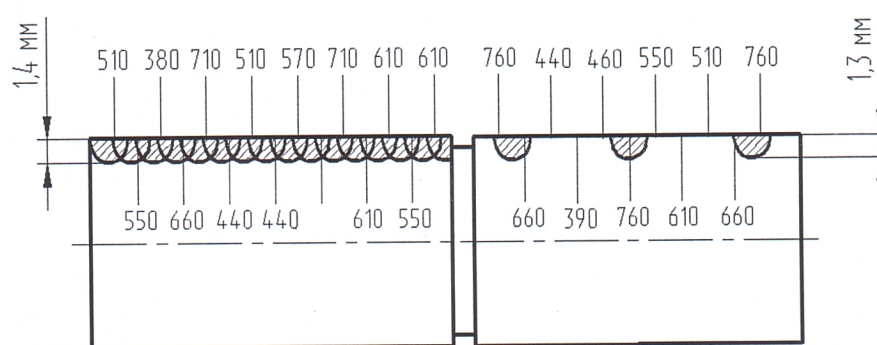


- **Среднее значение твердости и глубины упрочнения для образцов, изготовленных из стали 40Х**





- Среднее значение твердости и глубины упрочнения для образцов, изготовленных из стали 45



Начальник лаборатории механических испытаний

*Ярикова Т.С.*  
01.06.23

Инженер

*Караванова А.Г.*  
АО КОДЖ  
Производственный комплекс  
«Салют»  
УГМет (66)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### об эксплуатационных испытаниях оси ведомой шестерни масляного насоса 11-6606Б ДВС УМЗ - 421

Настоящий документ составлен между представителем МГТУ им. Н.Э. Баумана, в лице доцента кафедры «Технологии машиностроения» к.т.н. Яковлевой Анны Петровны и представителем АО УМЗ главным инженером Турковым Михаилом Александровичем.

В соответствии с договором о намерениях внедрения результатов докторской диссертации были изготовлены опытные образцы оси ведомой шестерни масляного насоса 11-6606Б ДВС УМЗ – 421 с применением комбинированной обработки.

Опытно-экспериментальные испытания подтвердили высокую износостойкость поверхности оси ведомой шестерни из стали 45, при этом были исключены операции шлифования, что снизило себестоимость изготовления.

Представитель АО УМЗ  
Главный инженер



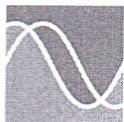
Турков М.А.

Представитель МГТУ им Н.Э. Баумана

23.05.2022г

Яковлева А. П.





**ДИАТЕХ**  
диагностические технологии

**ООО НПО «Диагностические технологии»**

- ▶ Производство виброизмерительной аппаратуры
- ▶ Разработка и внедрение экспертных систем
- ▶ Диагностика промышленного оборудования

107061, г. Москва, Преображенская пл., д. 8

Тел./факс: (495) 788-16-25

www.diatechnic.ru info@diatechnic.ru

ИНН 7716703342 ОГРН 1117746966369

КПП 771801001 ОКПО 37273787 ОКВЭД 62.01

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### об эксплуатационных испытаниях клапана золотниковой пары гидравлического распределителя

Настоящий документ составлен между представителем МГТУ им. Н.Э. Баумана, в лице доцента кафедры «Технологии машиностроения» к.т.н. Яковлевой Анны Петровны и представителем ООО НПО «ДИАТЕХ» (Москва), в лице генерального директора, к.т.н. Сушко Андрея Евгеньевича.

В соответствии с договором о намерениях внедрения результатов докторской диссертации были изготовлены опытные образцы золотникового клапана гидравлического распределителя.

Пояски золотника были обработаны по технологии комбинированной обработки с использованием электрохимической обработки и алмазного выглаживания.

Опытно-экспериментальные испытания показали высокую износостойкость поясков клапана, изготовленных из стали 18ХГТ.

Представитель Генеральный директор  
ООО НПО «Диагностические технологии»

*10.09.2019 г.*

А.Е. Сушко



Представитель МГТУ им Н.Э. Баумана

*10.09.2019 г.*

А. П. Яковлева

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### об эксплуатационных испытаниях клапана золотниковой пары гидравлического распределителя

Настоящий документ составлен между представителем МГТУ им. Н.Э. Баумана, в лице доцента кафедры «Технологии машиностроения» к.т.н. Яковлевой Анны Петровны и представителем АО НПП КПЗ «Тайфун» начальником цеха №48 Гавриловым Д. В.

В соответствии с договором о намерениях внедрения результатов докторской диссертации были изготовлены опытные образцы золотникового клапана гидравлического распределителя.

Пояски золотника были обработаны по технологии комбинированной обработки с использованием электромеханической обработки и алмазного выглаживания.

Опытно-экспериментальные испытания показали высокую износостойкость поясков клапана, изготовленных из стали 40Х.

Представитель АО НПП КПЗ «Тайфун»:

Начальник цеха № 48

16.11.2020г



Д. В. Гаврилов

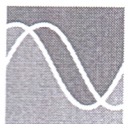
Представитель МГТУ им Н.Э. Баумана

16.11.2020г



А. П. Яковлева





**ДИАТЕХ**  
диагностические технологии

**ООО НПО «Диагностические технологии»**

- ▶ Производство виброизмерительной аппаратуры
- ▶ Разработка и внедрение экспертных систем
- ▶ Диагностика промышленного оборудования

107061, г. Москва, Преображенская пл., д. 8

Тел./факс: (495) 788-16-25

www.diatechnic.ru info@diatechnic.ru

ИНН 7716703342 ОГРН 1117746966369

КПП 771801001 ОКПО 37273787 ОКВЭД 62.01

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### об эксплуатационных испытаниях золотниковой пары гидравлического распределителя подъемного механизма

Настоящий документ составлен между представителем МГТУ им. Н.Э. Баумана, в лице доцента кафедры «Технологии машиностроения» к.т.н. Яковлевой Анны Петровны и представителем ООО НПО «ДИАТЕХ» (Москва), в лице генерального директора, к.т.н. Сушко Андрея Евгеньевича.

В соответствии с договором о намерениях внедрения результатов докторской диссертации были изготовлены опытные образцы золотниковой пары гидравлического распределителя подъемного механизма из стали 18ХГТ по технологии комбинированной обработки с использованием электромеханической обработки и алмазного выглаживания. Золотники гидравлического распределителя подъемного механизма изготовили в условиях ремонтного производства.

Опытно-экспериментальные испытания показали, что ресурс работы золотников, изготовленных по предлагаемой технологии, составил 3400 – 3600 часов, а по заводской технологии 3000 – 3200 часов.

Замена операции ХТО (цементации) на комбинированную обработку сократило время операции в 5 раз.

Представитель Генеральный директор  
ООО НПО «Диагностические технологии»

*10.05.2021г.*

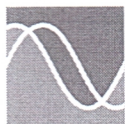
А.Е. Сушко



Представитель МГТУ им Н.Э. Баумана

*10.05.2021г.*

А. П. Яковлева



**ДИАТЕХ**  
диагностические технологии

**НПО «Диагностические технологии»**

- Производство виброизмерительной аппаратуры
- Разработка и внедрение экспертных систем
- Диагностика и наладка промышленного оборудования

129327, г. Москва, ул. Ленская, д. 2/21

Тел./факс: (495) 788-16-25

www.diatechnic.ru

info@diatechnic.ru

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ** **о внедрении результатов докторской диссертации**

Настоящее заключение составлено между представителем МГТУ им Н.Э. Баумана, в лице кандидата технических наук, доцента Яковлевой Анны Петровны и генерального директора ООО НПО «Диагностические технологии» Сушко Андрея Евгеньевича, в том, что представитель МГТУ им. Н.Э. Баумана разработал технологию комбинированной обработки цилиндрических пар трения, работающих в условиях интенсивного износа и трения со смазкой или граничного трения. Эта технология позволяет сократить время изготовления деталей типа тел вращения, сократить затраты на ремонт и восстановление диагностического оборудования.

Комбинированная обработка является перспективным методом повышения износостойкости и усталостной прочности и рекомендована для применения в ремонтном цехе на предприятии ООО НПО «Диагностические технологии».

Представитель  
ООО НПО «Диагностические технологии»  
Генеральный директор

*А.Е. Сушко*

Представитель МГТУ им Н.Э. Баумана  
К.т.н., доцент

*А.П. Яковлева*



*А.П. Яковлева*



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Настоящее заключение составлено представителем МГТУ им. Н.Э.Баумана, в лице кандидата технических наук, доцента Яковлевой Анны Петровны и ООО «НПП» Велд» о том, что представитель МГТУ им. Н.Э.Баумана разработал технологию комбинированной обработки цилиндрических пар трения (для деталей типа «вал», «ось», «фиксатор», работающих в условиях интенсивного износа и трения смазкой. Эта технология позволяет сократить время изготовления деталей, повысить износостойкость и ресурс работы данных деталей.

Разработанный метод представителем МГТУ им. Н.Э. Баумана Яковлевой А.П. является перспективным методом повышения износостойкости деталей и ресурса работы изделий фланец вала привода и рекомендована для применения в цехе опытного производства предприятия ООО «НПП» Велд», г. Калуга

Представитель

ООО «НПП» Велд»

Д.т.н. профессор

16.01.2022г.



/В.А. Дубровский/

Представитель МГТУ им. Н.Э. Баумана

к.т.н. доцент

16.01.2022г.

/А.П. Яковлева/



ООО «Центр промышленной механики»  
ИНН: 4027142803  
КПП: 402901001  
ОГРН: 1204000002216  
Тел: 8-920-613-42-34  
e-mail: info@cpm40.ru  
248016, город Калуга, улица Карла Либкнехта,  
дом 29, строение 13, офис 306

Исх. №

От



Генеральный директор

ООО «Центр промышленной механики»

Б.М. Шанауров

16 июля 2023 г.

## АКТ

### о внедрении процесса комбинированной обработки с наложением физических воздействий для получения модифицированных поверхностных слоев

Настоящим Актом подтверждается, что метод обработки поверхностей заготовок с наложением физических воздействий для получения модифицированных поверхностных слоев, разработанный доцентом кафедры «Технологии машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана Яковлевой Анной Петровной, принят для внедрения на ООО «Центр промышленной механики» (г. Калуга) для изготовления деталей пневмо- и гидроавтоматики, работающих в условиях интенсивного трения и трения со смазкой.

Внедрение данного метода позволяет сократить длительность производственного цикла изготовления указанных деталей в условиях ООО «Центр промышленной механики» на 12...20 % путем исключения операций окончательного шлифования исполнительных поверхностей с обеспечением эксплуатационных требований к ним по твердости и шероховатости.

Заместитель генерального директора  
ООО «Центр промышленной механики», к.т.н.

 А.Н. Малышев

Доцент кафедры «Технологии машиностроения»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.

 А.П. Яковлева





МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
(МИНОБОРОНЫ РОССИИ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
18 ЦЕНТРАЛЬНЫЙ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ

г. Москва, 111123

«03» сентября 2018 г. № 22/ 3876

На № \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ  
кандидат технических наук



«03» сентября 2018 г.

О.Швыдя

### АКТ

о внедрении результатов докторской диссертации доцента кафедры  
«Технологии машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана  
кандидата технических наук, доцента ЯКОВЛЕВОЙ Анны Петровны

Комиссия в составе:

председатель кандидат технических наук, доцент Солопов А.И.,  
члены комиссии: кандидат технических наук Гурари А.В.,  
кандидат технических наук Цуранов В.А.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Яковлевой А.П., представленной на соискание учёной степени доктора технических наук, использованы в научно-исследовательской деятельности ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ. Предложенная технология комбинированной обработки цилиндрических пар трения, работающих в условиях интенсивного износа и трения со смазкой или граничного трения внедрена в виде:

- технических предложений по выполнению специальных конструктивных схем;
- получения экспериментальных данных, разработке методик и моделирования процессов интенсивного износа и трения;
- практических рекомендаций по применению перспективного метода повышения износостойкости и усталостной прочности.

Использование указанных результатов позволяет:

- снизить время и повысить эффективность проводимых исследований в рамках моделирования процессов интенсивного износа и трения со смазкой или граничного трения;

- сократить затраты на проведение опытно-конструкторских работ и натурных испытаний;
- повысить объективность проведения планирования мероприятий, направленных на повышение результативности метода повышения износостойкости и усталостной прочности.

Результаты выполненной Яковлевой А.П. диссертационной работы внедрялись при выполнении НИОКР на специальную тему.

Председатель комиссии:  
кандидат технических наук, доцент



А.И.Солопов

члены комиссии:

кандидат технических наук



А.В.Гурари

кандидат технических наук



В.А.Цуранов



## АКТ о внедрении результатов докторской диссертации

Представители АО УМЗ:

рассмотрели предложения доцента кафедры «Технологии машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана по внедрению результатов докторской диссертации на тему «Разработка процессов комбинированной обработки с наложением физических воздействий для получения модифицированных поверхностных слоев» на производственных участках АО УМЗ.

Разработанная технология комбинированной обработки позволяет повысить износостойкость и ресурс работы некоторых деталей типа тел вращения – валов и осей.

Данная технология рекомендована для изготовления опытной партии деталей - валов распределительных, штанг толкателей, осей масляных насосов, а так же результаты докторской диссертации внедрены в виде:

- методик для проведения испытаний на износостойкость;
- практических рекомендаций при изготовлении деталей, работающих в условиях интенсивного износа.

Представитель АО УМЗ  
Главный инженер



Турков М.А.

Доцент МГТУ им Н.Э. Баумана

Яковлева А.П.

23.05.2022г.

## АКТ

### О внедрении результатов докторской диссертации

Представители предприятия:

- рассмотрели предложения доцента кафедры «Технологии машиностроения» МГТУ им. Н.Э.Баумана по внедрению результатов докторской диссертации на тему «Разработка процессов комбинированной обработки с наложением физических воздействий для получения модифицированных поверхностных слоев» на производственных участках ООО «НПП «Велд» г. Калуга;

- решили, что разработанная технология комбинированной обработки позволяет повысить износостойкость и ресурс работы деталей типа тел вращения.

Данная технология рекомендована для изготовления опытной партии деталей фланец вала привода, а также результаты докторской диссертации предполагается внедрить в виде:

- технологических предложений по разработке специальных конструкторских схем;
- методик для проведения испытаний;
- практических рекомендаций при изготовлении деталей, работающих в условиях интенсивного износа.

Представитель предприятия:

Директор, д.т.н. профессор

5.03.2021



/В.А. Дубровский/

Доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.

5.03.2021

/А.П.Яковлева/



УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер АО КБХА, к.т.н.

С.С. Юхневич

« 31 »

01

2025 г.

М. П.



## АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результатов использования патента №2829178 (Бюллетень №30, 2024 год) «Способ изготовления и разделения сборочных элементов детали с гибким металлическим корпусом» (Авторы: Е.А. Малявин, В.П. Смоленцев, А.А. Извеков, И.Г. Стародубцев)».

Комиссия в составе: научного руководителя аспиранта, д.т.н., профессора ВГТУ Смоленцева В.П., специалиста ЦЗЛ АО КБХА (г. Воронеж), аспиранта ВГТУ Извекова А.А., заместителя директора АО КБХА по стратегическому развитию и управлению программами ракетных двигателей, к.т.н. Стародубцева И.Г., аспиранта ВГТУ Малявина Е.А., заместителя начальника цеха №732, к.т.н. Сокольникова В.Н. рассмотрела представленный материал по патенту №2829178 и результаты его применения на участке электрофизических методов обработки (участок №6) цеха механосборочного №732 АО КБХА.

При изготовлении деталей малой жесткости использовался станок типа 4Л721Ф1-02 для электрических методов обработки (электроэрозионный копировально-прошивочный станок), работающий с жидкой рабочей средой при переменной вязкости с изменяющимся агрегатным состоянием.

Комиссия приняла решение:

1. Считать срок начала использования материалов патента на участке №6 цеха №732 – 2022 год.

2. Отметить, что при подготовке предложенного способа к обработке на электроэрозионном станке с комбинированной системой формообразования деталей использовалась опубликованная информация о

применении твердых покрытий, позволяющих ускорить сборку элементов деталей малой жесткости и их разделение при использовании рабочих сред по патенту №2829178 на деталях типа штоков запорной арматуры, мембран переменного сечения.

3. Патент №2829178 включает предложенный авторами способ изготовления, сборки и переборки элементов деталей, имеющих ограниченную жесткость, комбинированными способами с наложением электрических и магнитных полей и с управлением агрегатным состоянием рабочих сред на станках для электрических методов обработки, обеспечивающих сборку и разборку агрегатов без нарушения качества продукции наукоемких изделий.

4. По сведениям, полученным от Заказчиков продукции (ПАО «Газпром», АО «Арктикгаз») с использованием способа по патенту, удалось повысить жесткость технологической оснастки, производительность операций сборки-разборки конструкций при обработке комбинированными методами на оборудовании для операций с наложением тока и полей, обеспечить высокое качество продукции всей партии выпускаемых изделий, получить годовой экономический эффект на программу 787,3 тысячи рублей.

По состоянию на 2025 год акт внедрения подтверждает эффективность полученного патента и полезность выполненной авторами работы.

Подписи:

Научный руководитель,  
д.т.н., профессор ВГТУ

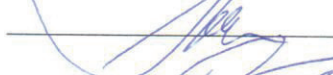


В.П. Смоленцев

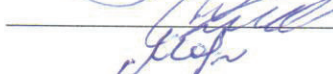
От АО КБХА:



А.А. Извеков



И.Г. Стародубцев



В.Н. Сокольников

Аспирант ВГТУ



Е.А. Малявин

## **Технологические рекомендации по обеспечению требуемых показателей качества поверхностного слоя после КО**

### **Рациональные режимы обработки**

#### **Режимы ЭМО:**

Сила тока  $I - 1000 \dots 3200$  А, Напряжение  $U - 2 \dots 6$  В, Скорость обработки  $V - 1,1 \dots 3,2$  м/мин, Подача ролика-электрода  $S - 0,6 \dots 3,5$  мм/об,

Ширина ролика-электрода  $l - 2 \dots 4$  мм,

Сила прижима ролика-электрода  $P - 200 \dots 350$  Н.

#### **Режимы лазерной закалки**

Мощность лазерного излучения  $P - 1,2 \dots 1,4$  кВт, скорость перемещения источника лазерного излучения  $V - 10 \dots 30$  мм/сек, фокусное расстояние  $f - 50 \dots 100$  мм, диаметр лазерного луча  $d - 2 \dots 7$  мм, Поглощающее покрытие – МЦС-510.

#### **Режимы алмазного выравнивания:**

Сила прижима алмазного выравнивателя  $P - 200 \dots 250$  Н,

Подача алмазного выравнивателя  $S - 0,02 \dots 0,04$  мм/об,

Радиус сферы алмазного выравнивателя  $r - 1$  мм,

Скорость вращения детали  $V - 45$  м/мин.