

**Замота Т.Н., Аулин В.В.**

**УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПРИРАБОТКИ  
ОСНОВНЫХ СОПРЯЖЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И РЕМОНТЕ**

Монография

Кировоград

2015

УДК 621.891+631.3.02

**З - 264**

ББК 34.41

Печатается по решению ученого совета Кировоградского национального технического университета, протокол № от 2015 г.

*Рецензенты:*

**Сорокатый Р.В.** – д.т.н., проф., заведующий кафедрой информационных технологий проектирования Хмельницкого национального университета

**Савуляк В.И.** – д.т.н., проф., заведующий кафедрой технического повышения износостойкости Винницкого национального технического университета

**Казаченко А.В.** – д.т.н., проф., заведующий кафедрой технического сервиса ХНТУСХ им. П. Василенка

**Замота Т.Н., Аулин В.В.**

**З - 264** Управление процессами приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте: Монография // Т.Н. Замота, В.В. Аулин.- Кировоград: издатель Лысенко В.Ф.; 2015.- 302 с.

ISBN

В монографии с позиций основных положений теории электрохимических процессов, теории износоконтактного взаимодействия смазанных поверхностей, гидродинамической теории трения, особенностей электрохимико-механической приработки (ЭХМП) трущихся поверхностей деталей, проанализированы закономерности приработки основных сопряжений, от которых зависит ресурс машин. На основании комплекса теоретических и экспериментальных исследований усовершенствован метод ЭХМП поверхностей деталей основных трибосопряжений машин с макрогеометрическими отклонениями. Выявлены возможности управления процессом приработки и состояниями трущихся поверхностей деталей. Обосновано использование электрохимико-механического метода для макрогеометрической приработки основных сопряжений машин (цилиндрических с перекосом и несоосностью; плоских; сферических и зубчатых) и экспериментально доказана его эффективность при повышении эксплуатационной износостойкости трущихся поверхностей деталей, ограничивающих ресурс механизмов.

Издание предназначено научным и инженерно-техническим сотрудникам, которые исследуют вопросы проектирования, эксплуатации и управления триботехническими системами, будет полезно преподавателям, аспирантам, магистрам и студентам машиностроительных, агротехнических и транспортных ВУЗов.

ББК 34.41

ISBN

Замота Т.Н., Аулин В.В., 2015

Кировоградский национальный технический университет, 2015

ПП Лысенко В.Ф., друк, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ.....</b>	<b>8</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>9</b>
<b>ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ ПРИРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ОСНОВНЫХ СОПРЯЖЕНИЙ МАШИН С МАКРОГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ.....</b>	<b>11</b>
1.1 Анализ макрогеометрических отклонений от правильных геометрических форм деталей, затрудняющих приработку основных сопряжений машин при изготовлении и ремонте.....	11
1.2 Особенности процесса приработки трущихся поверхностей....	16
1.3 Проблемы макроприработки деталей основных сопряжений машин.....	18
1.3.1 Особенности приработки подшипников скольжения двигателей.....	18
1.3.2 Особенности приработки сопряжений гидроагрегатов.....	25
1.3.3 Особенности приработки зубчатых зацеплений .....	32
1.4 Методы устранения макрогеометрических отклонений при приработке.....	34
1.4.1 Существующие методы приработки.....	34
1.4.2 Применение электрохимической обработки для приработки трущихся поверхностей.....	40
1.4.3 Применение электрохимического полирования для приработки трущихся поверхностей.....	42
1.4.4 Электрохимико-механическая приработка трибосопряжений.....	45
1.5 Сравнительный анализ методов приработки поверхностей трения.....	50
1.6 Выводы по первой главе, цель и задачи исследований.....	57
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПРИРАБОТКИ ТРУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ С МАКРОГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ.....</b>	<b>60</b>
2.1 Методологический подход к решению проблемы приработки трущихся поверхностей.....	60
2.2 Структура и методы теоретических исследований.....	64
2.3 Общая характеристика методов и методик экспериментального решения проблемы приработки трущихся поверхностей.....	65
2.3.1 Методика исследования ЭХМП поверхностей деталей на граничном режиме трения.....	65
2.3.2 Методика исследования ЭХМП поверхностей деталей на гидродинамическом режиме трения.....	67
2.4 Методика экспериментальных исследований ЭХМП	

сопряжений цилиндро-поршневой группы.....	68
2.4.1 Модернизированная машина трения СМЦ-2 с приспособлением для изучения процесса ЭХМП пары трения ползун-гильза.....	68
2.4.2 Одноцилиндровая установка для изучения процессов ЭХМП цилиндро-поршневой группы.....	71
2.5 Методика исследования ЭХМП сопряжений кривошипно-шатунного механизма.....	73
2.5.1. Методика исследования изменения макрогеометрии цилиндрических поверхностей трения при ЭХМП.....	73
2.5.2 Модернизированная машина трения СМЦ-2 с моделью многоопорного вала, имитирующего приработку к коренным опорам с перекосами осей.....	75
2.5.3 Модернизированная машина трения СМЦ-2 с моделью многоопорного вала, имитирующей приработку к коренным опорам, имеющим несоосность.....	77
2.5.4 Общие условия опытов на моделях многоопорного вала.....	79
2.5.5 Установка и методика исследования прирабатываемости основных сопряжений модельного двигателя.....	80
2.6 Методика определения износа и анодного выхода металла по току при макроприработке.....	82
2.7 Методика определения площади пятна контакта образцов и сопряженных деталей.....	84
2.8 Методика определения момента трения.....	84
2.9 Методика определения шероховатости рабочих поверхностей.....	84
2.10 Методика микрометрирования подшипников скольжения.....	87
2.11 Методика проведения предремонтной электрохимико-механической доводки поршневых колец.....	89
2.12 Методика проведения исследования ЭХМП основных сопряжений турбокомпрессоров.....	91
2.12.1 Методика проведения исследования ЭХМП сопряжения уплотняющее кольцо-втулка.....	91
2.12.2 Методика проведения электрохимико-механической доводки боковой поверхности уплотняющих колец турбокомпрессоров..	93
2.13 Методика исследования процесса ЭХМП зубчатого зацепления.....	97
2.14 Методика проведения исследования ЭХМП основных сопряжений гидроагрегатов.....	99
2.15 Методика стендовых и эксплуатационных испытаний.....	101
2.16 Выводы по второй главе.....	106

### **ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ**

<b>Триботехнические характеристики поверхностей сопряженных деталей при электрохимико-механическом методе приработки.....</b>	<b>107</b>
3.1 Особенности электрохимико-механической приработки трущихся поверхностей с макрогеометрическими отклонениями.....	107
3.2 Электрохимико-механическая приработка сопряжений цилиндро-поршневой группы.....	111
3.2.1 Анализ влияния макрогеометрических отклонений в трибосопряжениях кривошипно-шатунного механизма на процесс приработки.....	111
3.2.2 Влияние макрогеометрических отклонений в сопряжениях двигателей на триботехнические характеристики их приработки.....	114
3.2.3 Влияние перекоса поршня на триботехнические характеристики их контакта.....	119
3.3 Постановка задачи макрогеометрической приработки при ЭХМП.....	124
3.4 Развитие площади пятна контакта при макроприработке поверхностей трения.....	128
3.4.1 Трибологические предпосылки приработки различных сопряжений.....	128
3.4.2 Развитие площади пятна контакта при макроприработке основных трибосопряжений машин.....	129
3.4.3 Результаты расчета площади пятна контакта $S_k$ и дуги взаимного пересечения $\alpha_0$ двух деталей сопряжения при макроприработке.....	133
3.5 Теоретическая зависимость скорости уменьшения макрогеометрического отклонения трущихся поверхностей деталей при ЭХМП.....	135
3.6 Электрохимические основы процесса макроприработки плоских поверхностей трения при ЭХМП.....	140
3.6.1 Определение скорости выравнивания макрогеометрической погрешности $V_{max}$ от электрохимико-механических параметров процесса.....	140
3.6.2 Теоретическая модель, описывающая уменьшение макрогеометрической погрешности при ЭХМП плоских поверхностей... ..	142
3.7 Физико-химические основы процесса макроприработки поверхностей трения при ЭХМП.....	145
3.7.1 Распределение тока между прирабатываемыми поверхностями.....	145
3.7.2 Применяемые электролиты и их характеристики.....	148
3.7.3 Практическая реализация математической модели, описывающей уменьшение макрогеометрической погрешности при ЭХМП плоских поверхностей.....	150
3.8 Теоретический анализ электрохимико-механической	

приработки подшипников скольжения.....	152
3.9 Компенсация неточностей многоопорного вала с помощью ЭХМП.....	160

**ГЛАВА 4. ИЗМЕНЕНИЕ МАКРОГЕОМЕТРИИ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПРИ ЭХМП.....** 166

4.1 Выбор состава электролита для совместной макроприработки пар трения поршень-гильза и поршневое кольцо-цилиндр.....	166
4.2 ЭХМП основных сопряжений двигателей.....	170
4.2.1 Влияние электрохимико-механических процессов на трение и износ поверхностей в механизме ползун-цилиндр.....	170
4.2.2 Влияние электрохимико-механических процессов на трение и износ поверхностей в сопряжениях многоопорный вал – вкладыши.....	173
4.2.3 Сравнительная оценка эффективности различных способов ЭХМП при приработке подшипников скольжения.....	181
4.2.4 Улучшение макрогеометрии цилиндрических поверхностей трения при электрохимико-механической доводке.....	187
4.2.5 Оценка радиальной шероховатости поршня при ЭХМП сопряжения ползун – цилиндр.....	190
4.3 Повышение износостойкости боковых поверхностей поршневых колец, подвергаемых электрохимико-механической доводке...	194
4.4 Результаты стендовых и эксплуатационных испытаний дизеля..	196
4.4.1 Стендовые испытания двигателей.....	196
4.4.2 Эксплуатационные испытания двигателей.....	200

**ГЛАВА 5. ИЗМЕНЕНИЕ МАКРОГЕОМЕТРИИ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ ГИДРОАГРЕГАТОВ, ТУРБОКОМПРЕССОРОВ И ЗУБЧАТЫХ ЗАЦЕПЛЕНИЙ ПРИ ЭХМП.....** 204

5.1 Исследование изменения микрогеометрии поверхностей трения при ЭХМП на граничном режиме трения.....	204
5.1.1 Результаты исследований пары трения бронза-сталь.....	204
5.1.2 Влияние олеиновой кислоты на шероховатость контактирующих поверхностей при их электрохимико-механическом взаимодействии на граничном режиме трения.....	205
5.2 Исследование ЭХМП при гидродинамическом режиме трения..	211
5.2.1 Изменение микрогеометрии хромированной поверхности при электрохимическом травлении .....	211
5.3 Улучшение макрогеометрии цилиндрических поверхностей трения при электрохимико-механической доводке.....	216
5.4 ЭХМП пары трения бронза-сталь на электролите с добавлением олеиновой кислоты.....	219
5.5 Изучение возможности улучшения уплотнительных колец	

турбокомпрессоров, поступающих на ремонтное предприятие, электрохимико-механической доводкой.....	221
5.5.1 Результаты исследования ЭХМД рабочих поверхностей торцевого уплотнения турбокомпрессора.....	221
5.5.2.Методика проведения электрохимико-механической доводки боковой поверхности уплотняющих колец турбокомпрессоров.....	224
5.6.Изменение триботехнических характеристик контактных поверхностей зубчатого зацепления шестерен при электрохимико-механической приработке.....	233
5.7.ЭХМП основных сопряжений аксиально-поршневых насосов...	237
5.7.1 Приработка цилиндрических сопряжений.....	237
5.7.2. Приработка сферических сопряжений.....	239
5.8. Выводы по пятой главе.....	242
<b>ГЛАВА 6. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ПРИРАБОТКИ И РЕЖИМОВ ТРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОСНОВНЫХ СОПРЯЖЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....</b>	<b>244</b>
6.1. Определение скорости устранения макрогеометрического отклонения различных сопряжений при ЭХМП.....	244
6.2. Построение модели управления ЭХМП поверхностей трения...	249
6.2.1. Анализ факторов и откликов процесса.....	249
6.2.2. Построение алгоритма процесса ЭХМП.....	253
6.2.3.Управление режимом приработки пары трения за счет изменения скоростного и нагрузочного режима ( $v=f(U_p/U_{xx}), F=f(U_p/U_{xx})$ )...	264
6.2.4. Управление режимом приработки пары трения за счет изменения вязкости электролита с помощью газообразования ( $\mu =f(U_p)$ )...	267
6.2.5. Управление режимом приработки пары трения за счет контроля момента трения ( $M_{mp} =f(t)$ ).....	268
6.3. Факторный анализ математических моделей, описывающих уменьшение макрогеометрической погрешности при ЭХМП поверхностей различных сопряжений.....	269
6.4. Рекомендации производству и потребителю при внедрении предложенного способа электрохимико-механической приработки подшипников скольжения двигателя.....	273
6.5. Техничко-экономическая эффективность внедрения усовершенствованного способа ЭХМП.....	274
6.6 Выводы по шестой главе.....	274
<b>ОБОБЩЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....</b>	<b>276</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>279</b>

## **ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ**

ГОП – гидрообъемная передача;

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

КПД – коэффициент полезного действия;

КШМ – кривошипно-шатунный механизм;

ЛАТР – лабораторный трансформатор;

ЛНАУ – Луганский национальный аграрный университет;

МП – механическая передача;

МТА – машинно-тракторный агрегат;

ТУ – технические условия;

ЦПГ – цилиндро-поршневая группа;

ЭХМД – электрохимико-механическая доводка;

ЭХМП – электрохимико-механическая приработка;

ЭХО – электрохимическая обработка;

ЭХП – электрохимическое полирование;

ЭХРО – электрохимическая размерная обработка.

## ВВЕДЕНИЕ

Ресурс и надежность машин во многом обусловлены явлениями трения и изнашивания, которые происходят между поверхностями деталей основных трибосопряжений. При этом нарушается герметичность узлов, теряется точность взаимного расположения деталей и перемещений, возникают заклинивания, удары, вибрации. Трение приводит к снижению ресурса, потерям энергии, перегреву механизмов, снижению контактных усилий, повышенной затрате горюче-смазочных материалов.

Достичь повышения ресурса и надежности восстановленных агрегатов возможно путем улучшения процесса приработки поверхностей трения деталей его основных сопряжений. В процессе приработки сначала осуществляется макроприработка, а потом происходит микроприработка с окончательным формированием микрогеометрии поверхности. Чем большие первичные макрогеометрические отклонения, тем сложнее обеспечить высокое качество приработки сопряжений деталей. Компенсировать неточности взаимного расположения деталей основных трибосопряжений двигателей можно в процессе обкатки. Во время обкатки происходят приработка поверхностей трения и подготовка их к восприятию эксплуатационных нагрузок.

Приработка двигателя осуществляется за счет длительной стендовой обкатки с дальнейшей обкаткой в эксплуатационных условиях, что приводит к большим расходам времени и средств. Большинство технологических приемов, направленных на ускорение приработки, имеют свои недостатки и оказываются недостаточно эффективными при макроприработке основных сопряжений машин. Прежде всего, следует отметить их общий недостаток - то, что применение большинства из этих способов вызвано, прежде всего, стремлением ускорить приработку, а не перенести условия структурной приспособляемости на начальный период. Так как внешние факторы воздействия при приработке исключаются, действительная приработка достигается через сотни часов. Кроме того, применение всякого рода покрытий, в том числе и пленок, как, например, графита, меди изменяет внутреннюю структуру основного материала и отрицательно сказывается на дальнейшей эксплуатации. Использование присадок к топливу, содержащих металлоорганические соединения алюминия или хрома, способствует образованию абразивных продуктов износа. Как известно, электроэрозионное воздействие приводит к максимальному упрочнению поверхности, что особенно недопустимо для основных сопряжений двигателей. Вместе с тем, применение того или иного способа приработки приводит к сокращению процесса приработки.

В таких условиях актуальным является ускорение приработки трибосопряжений с использованием современных технологий. Применение метода электрохимико-механической приработки (ЭХМП) позволяет ускорить

период приработки, исправлять макрогеометрию деталей трибосопряжений, приспособлять поверхности трения.

ЭХМП основных сопряжений машин является высокоэффективным процессом макроприработки трущихся поверхностей: кроме механического воздействия, процесс приработки ускоряется за счет электрохимических процессов. Теоретически обосновано использование электрохимико-механического метода для макрогеометрической приработки основных сопряжений машин (цилиндрических с перекосом и несоосностью; плоских; сферических и зубчатых) и экспериментально доказана его эффективность при повышении эксплуатационной износостойкости трущихся поверхностей деталей, ограничивающих ресурс механизмов.

# ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ ПРИРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ОСНОВНЫХ СОПРЯЖЕНИЙ С МАКРОГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ОТКЛОНЕНИЯМИ

## 1.1 Анализ макрогеометрических отклонений от правильных геометрических форм деталей, затрудняющих приработку основных сопряжений машин при изготовлении и ремонте

В современных машинах и агрегатах детали изготавливаются из материалов с повышенной износостойкостью. Это позволяет значительно продлить срок службы машины. Однако при наличии макрогеометрических отклонений от правильных форм деталей значительно затрудняется приработка их сопряжений. Формирование макрогеометрии деталей и их взаимного расположения зависит от целого ряда технологических и физических процессов. Схематически процесс изменения макрогеометрии детали можно изобразить следующим образом (рис.1.1):



Рис.1.1 - Изменение макрогеометрии деталей в пределах жизненного цикла

Чтобы механизм (машина, узел, агрегат) начал нормально функционировать он должен пройти две основные стадии: сборку и обкатку (рис.1.1.). На качество сборки влияют точности формы деталей и точность выполнения самого процесса сборки. Такие свойства деталей, как качество поверхности и износостойкость оказывают меньшее влияние на сборку, но проявляют себя при приработке трущихся поверхностей. На изменение формы деталей в течение жизненного цикла также сильное влияние оказывает начальная макрогеометрия, ее изменение в процессе эксплуатации. Восстановление накопленных ис-

кажений происходит при ремонте. Однако, в силу целого ряда причин, качество ремонта не всегда соответствует предъявляемым требованиям, что заметно снижает ресурс механизмов, в сопряжения которых входят детали с искаженной макрогеометрией.

Эту схему, можно рассматривать только в первом приближении. Каждая связь в ней должна быть изучена отдельно и только тогда можно построить целостную картину создания и доведения механизма до рабочего состояния, процессов, происходящих при трении прирабатываемых поверхностей.

В технике трение является инициатором деформационных, динамических, тепловых, акустических, электрических, адгезионных и других процессов, определяющих ресурс работоспособности узлов трения машин, их энергетику и эффективность.

Первичной проблемой при изучении трения является контактирование соприкасающихся поверхностей. В понятие контактирования входит взаимодействие поверхностей, принадлежащих твердым телам, под действием относительного смещения и сжимающих сил с учетом их отклонения от идеальной формы и влияния среды (газы и смазочные материалы), присутствующей в зоне контакта. В основе представлений о фрикционном взаимодействии шероховатых поверхностей лежит понятие о площади соприкосновения трущихся тел.

Основными сопряжениями машин принято считать цилиндрические, которые очень широко используются для передачи возвратно-поступательного и вращательного движения. Многие исследователи отмечают [72,81,91], что в двигателях основными сопряжениями, которые отвечают за ресурс, являются коренные подшипники скольжения и сопряжения гильза - верхние поршневые кольца. Для первого из них характерно вращательное движение, а для второго - возвратно-поступательное.

Кроме этого, большое применение нашли сопряжения с контактированием деталей по плоскости. Это различные направляющие, обеспечивающие взаимное перемещение деталей друг относительно друга.

Свои особенности имеют сферические сопряжения, и на характер контактирования влияет взаимное перемещение деталей. Эти сопряжения нашли широкое применение в гидроагрегатах и от их надежности, например, напрямую зависит ресурс гидромоторов и гидронасосов в системах гидропривода.

Особую сложность при приработке вызывают зубчатые зацепления. Они требуют повышенной твердости поверхности, что сопряжено с малыми площадями контакта (в большинстве случаев - в линию) и большими удельными нагрузками. Даже небольшие перекосы приводят к значительному усложнению процесса приработки. Для изучения методов устранения макрогеометрических отклонений при приработке необходимо изучение развития площади пятна контакта  $S_k$  на прирабатываемой детали от первоначального контакта до максимально возможного с учетом вида трибосопряжения деталей и величины макрогеометрического отклонения.

В настоящее время многие исследователи связывают вопросы приработки с дальнейшим познанием процессов характерных для сопряжений, указан-

ных в табл.1.1. При изготовлении за счет цементации, закалки, азотирования и др. процессов повышают твердость деталей, но это создает определенные трудности при приработке неэквидистантных поверхностей. Особенно недопустимы отклонения от правильных геометрических форм в сопряжениях с зазорами в несколько микрон, т.е. для прецизионных пар [150,153]. Наиболее часто такие пары трения встречаются в гидравлических агрегатах, без которых современную машину невозможно представить.

Таблица 1.1 - Анализ основных сопряжений, от качества приработки которых напрямую зависит ресурс машин

Наименование	Разновидности агрегатов		
	ДВС и турбокомпрессоры	гидроагрегаты	трансмиссии
Основные сопряжения машины	ДВС: кольцо-гильза, поршень-гильза, коленчатый вал - вкладыши турбокомпрессоров: уплотнения турбокомпрессоров	сопряжения плунжер - гильза, сферическое сопряжение – плунжер -подпятник, плоское сопряжение ротор - шайба	сопряжения главных передач и зубчатых передач трансмиссий
Вид сопряжений	цилиндрическое (ДВС), цилиндрическое и плоское (турбокомпрессоры)	цилиндрическое, сферическое, плоское	зубчатые
Характер взаимного перемещения	возвратно-поступательное и вращательное	возвратно-поступательное и вращательное	периодическое контактирование со скольжением
Материалы пар трения:	хром-чугун, чугун-чугун, алюминиевый сплав-чугун, сплав АО-20(или АСМ) - сталь	бронза-сталь	сталь-сталь
Процент отказов по причине выхода из строя сопряжений	50...70	70...95	75...96

Наиболее сложными и распространенными агрегатами гидравлических объемных приводов и топливных систем являются гидрораспределители, позиционные регуляторы, гидроувеличители сцепного веса, силовые гидравлические цилиндры, гидронасосы (гидромоторы), топливные насосы с аппаратурой автоматического регулирования. Несмотря на многообразие конструкций и специфические особенности функционирования, гидравлические агрегаты

имеют общие элементы, работоспособностью которых определяется их надежность.

Статистика свидетельствует, что наибольшее число неисправностей агрегатов топливных систем и гидрообъемных приводов связано с нарушением работоспособности прецизионных пар. Большинство отказов, включая выход из строя гидроагрегатов, происходит вследствие регулирующих, распределительных устройств; плунжерных, поршневых пар. Поэтому, анализ условий функционирования и установление причин нарушения работоспособности прецизионных пар заслуживают особого внимания при разработке мероприятий по повышению надежности гидравлических агрегатов.

В местах фактического контакта прецизионных пар возникают высокие контактные напряжения. При неблагоприятных условиях, достижения контактного напряжения критических значений, происходит интенсивная деформация поверхностных объемов металла, это ведет к разрушению масляной пленки. Появившиеся, в результате этого ювенильные участки поверхностей, сближаются до действия межатомных сил, в местах фактического контакта происходит схватывание. Образовавшиеся адгезионные связи разрушаются. В этих местах наблюдается разрушение поверхностного слоя. Частицы отделившегося металла являются абразивом, который попадая в другие узлы и сопряжения гидронасоса (гидромотора), вызывает их повышенный износ.

При восстановлении плунжерных пар используется абразивная притирка. При многих положительных моментах, абразивная притирка имеет существенные недостатки, связанные с абразивной доводкой прецизионных деталей гидроагрегатов. Абразивная притирка не позволяет сформировать необходимую микро- и макрогеометрию, физико-механические свойства, что позволило бы сократить время приработки и повысить качество восстановленных поверхностей. Кроме того, наличие технологических загрязнений является причиной повышенного износа сопряжений и снижение технико-экономических показателей гидроагрегатов.

Поэтому детали сопряжений гидроагрегатов не должны подвергаться абразивной обработке. Одним из возможных видов обработки, является электрохимическое полирование (ЭХП). ЭХП нашло широкое применение как способ чистовой (окончательной) обработки деталей, работающих в условиях трения, механических нагрузок, коррозии, так как данный процесс связан с изменением микро профиля и физико-химического состояния поверхности. Электрохимическое полирование обеспечивает лучшие фрикционные свойства трущейся пары, в сравнении с механическим полированием, это подтверждено рядом исследований.

ЭХП требует применения специального оборудования (приспособления, инструмента), необходимость точного поддержания режима электролиза, контроля и корректировки раствора, строгого соблюдения температурного режима работы ванны, необходимость тщательной очистки поверхностей деталей перед обработкой (химическая обработка в органических растворителях, электрохимическое обезжиривание). Для интенсификации процесса электрохимическое

полирование необходимо проводить в проточном электролите, а это требует более сложного оборудования, изготовление и эксплуатация которого обходится дороже, чем стационарных ванн. Кроме того, данный способ не позволяет исправлять макрогеометрические отклонения.

Одним из направлений в доводке и сокращении времени обкатки является пропускание электрического тока непосредственно через сопряженные детали, разделенные слоем электролита, которым придается рабочее движение. Этот способ применяется для приработки основных сопряжений ДВС и является одним из перспективных направлений в исследовании.

При макрогеометрической приработке необходимо удалить часть материала с детали для обеспечения эквидистантности трущихся поверхностей. Так как в сопряжения входят детали из разных материалов, то необходимо обеспечить равномерность объемного съема с деталей из различных материалов. Наибольшее распространение получили детали на основе железа, алюминия, меди, никеля и хрома. Они образуют пары трения, в которых износостойкость деталей из различных материалов сильно отличается. По данным исследователей [165,166,173], при механическом изнашивании наименьшее сопротивление объемному съему материала имеют детали из алюминия (рис.1.2).

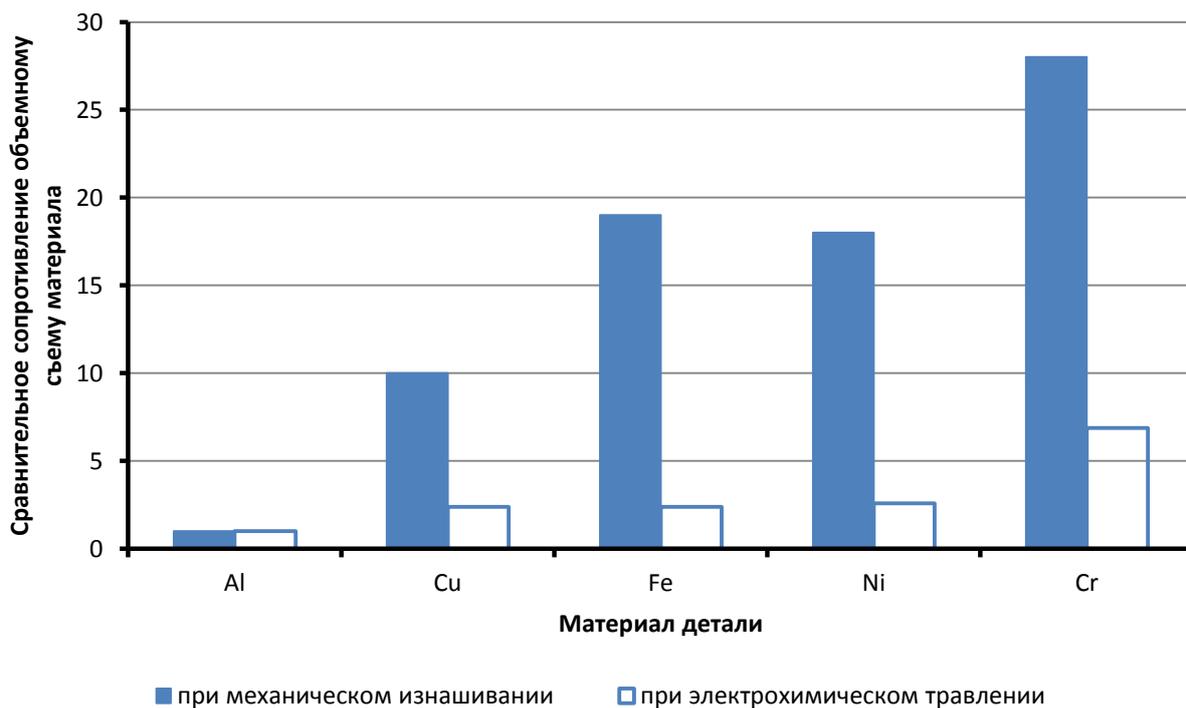


Рис.1.2 - Сравнительное сопротивление объемному съему материала детали при приработке

Износостойкость таких деталей значительно ниже, чем у деталей из меди, стали, с покрытием никеля или хрома. Как видно из рис.1.2. при механическом изнашивании износостойкость хрома в двадцать восемь раз выше, чем алюминия. При электрохимическом травлении разница в сопротивлении объ-

емному съему материала значительно ниже, чем при обычных способах приработки, основанных на интенсификации механического изнашивания прирабатываемых поверхностей (сопротивление объемному съему хрома всего в семь раз выше, чем у алюминия). Исходя из этого, более предпочтительными являются способы приработки с электрохимическим травлением трущихся поверхностей, что обеспечивает равномерную приработку деталей из указанных материалов с различной износостойкостью.

## 1.2 Особенности процесса приработки трущихся поверхностей

Приработка трущихся поверхностей является примером трибологических переходов, характеризующих изменения в характере трения и износа в зависимости от времени, количества циклов или пути трения. Трибологические изменения могут происходить при смазке или непосредственном контакте [101]. Физические основы процессов самоорганизации в трибологических системах детально разработаны Аулиным В.В. [45,323]. Проследить за протеканием процесса приработки можно тремя основными способами. Во-первых, изменения в процессе трения хорошо фиксируются по графику потенциометра машины трения, который позволяет измерить момент трения. Во-вторых, по времени, которое требуется трибосистеме для перехода в стабильное состояние. И, в-третьих, по характеристикам краткосрочных изменений силы трения [53,58,290].

Когда наступает гидродинамический режим смазки, то непосредственный контакт трущихся тел минимальный, а коэффициент трения уменьшается и стабилизируется. Однако существует огромное количество случаев в инженерной практике, когда не происходит стабилизации момента трения. Это зависит от характера происходящих моментальных изменений в зоне непосредственного контакта. Очевидно, что трущиеся поверхности находятся в постоянно изменяющихся условиях. Процесс приработки будет зависеть от целого ряда начальных условий: изменения сил в непосредственном контакте, скорости и направления взаимного перемещения, возрастания температуры трения, взаимодействия поверхностей с различными смазками и т.д. Другие изменения происходят при старении смазок и поверхностей, участвующих в трении.

Наибольшее значение имеют условия контакта твердых тел, чистота поверхностей, шероховатость, электрохимическое взаимодействие трущихся поверхностей между собой в смазочной среде и разрушение подповерхностных слоев материала трущейся пары (рис.1.3). Одним из следствий вышесказанного является процесс трибологического изменения свойств трибоконтакта в результате старения. Работы по изучению процессов приработки поверхностей трения имеют разносторонний характер, и многие ученые внесли значительный вклад в раскрытие механизма прирабочного процесса [56,197,237,267,168].

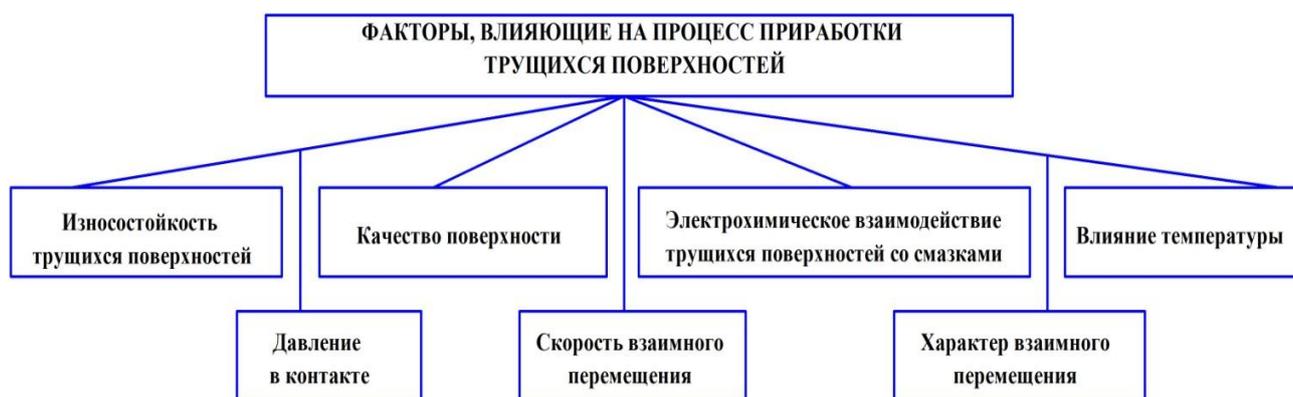


Рис.1.3 - Факторы, влияющие на процесс приработки

Один из ранних примеров влияния процесса подготовки поверхностей на коэффициент трения описан Боуденом Ф. и Тейбором Д. в работе «Трение и смазка твердых тел, том 2: Контакт металлов» [57]. В этой работе описывается приработка поверхностей с отсутствием поверхностных пленок и в качестве исследуемого материала взято золото. Как видно, способ окончательной подготовки трущейся поверхности в значительной степени влияет на характер протекающих при приработке процессов. Более грубые поверхности прирабатываются сложнее и коэффициент трения после приработки значительно выше, чем у более качественно подготовленных поверхностей. Наилучшие результаты были получены у электрохимически выровненных поверхностей.

Поверхностные пленки также оказывают значительное влияние на изменение коэффициента трения при приработке [293,294]. Характер протекающих процессов может меняться кардинально и это легко объясняется тем, что процессы трения оказывают максимальное воздействие непосредственно на поверхность детали [312,313,317].

Приработочные процессы сильно зависят от размера площади пятна контакта, который определяется размерами контактирующих деталей, их взаимным геометрическим положением и нормальными нагрузками в контакте. Поэтому, изучение процессов приработки возможно в контексте изучения всего комплекса процессов, происходящих при трении, и только внутри трибосистем, с учетом присущих им особенностей [309,315,305].

Приработка - это процесс изменения геометрии поверхности трения и физико-механических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания [210]. Понятие "геометрия поверхности трения" включают в себя микрошероховатость поверхности и форму (макрогеометрию) детали [196].

Наиболее полно изучены закономерности процесса приработки трущихся сопряжений в зависимости от шероховатости поверхности [106,107,62,161,251]. Общим выводом является положение об оптимальной микрогеометрии приработанных поверхностей. Во время приработки происходят коренные изменения характеристик микрорельефа поверхности и структур-

но-фазового состояния поверхностного слоя (идет процесс структурного приспособления). После окончания приработки возникает "равновесная шероховатость поверхности". Как отмечает Крагельский И. В., она не зависит от величины и характера шероховатости поверхности в исходном состоянии [174]. Шероховатость поверхности детали (высота, форма и направление микронеровностей) оказывает влияние на износостойкость только в период приработки. От шероховатости зависит также длительность этого периода. Оптимальной следует считать шероховатость, близкую к "равновесной" [60,70,324]. Но Валетов В. А. указывает на то, что говорить о реальной оптимизации микрогеометрии поверхности можно только в том случае, если заданному значению критериев (критерия) ее оценки может соответствовать только один микрорельеф поверхности с возможными несущественными отклонениями [92]. Для достаточно полного параметрического описания микрогеометрии реальных поверхностей может потребоваться от 3 до 25 критериев [108]. Стандартизованные же параметры шероховатости такого описания не дают, и предлагается непараметрической подход к оценке и контролю микрогеометрии поверхности [324].

Из сформулированной гипотезы формирования шероховатости в процессе приработки вытекает, что "равновесная" шероховатость может быть достижима, когда поверхности трения будут представлять собой семейство эквидистантных поверхностей, т. е. окончательная приработка на микроуровне возможна только после макроприработки сопряжений [64,85].

К сожалению, макрогеометрия узлов трения значительно отличается от правильной. Во многих случаях нарушена эквидистантность поверхностей. Шероховатость после механической обработки зачастую не соответствует оптимальным значениям. Это приводит к повышенным удельным давлениям в зоне контакта, непосредственному контактированию металлических поверхностей и, как следствие этого, к задирам, схватываниям и повышенному изнашиванию прирабатываемых поверхностей. Перекосы имеют эффект увеличения контактного давления на небольшой площади и способствуют более быстрым трибологическим процессам по сравнению с контактом без перекоса. Например, результатом несмазанного контакта плоскости по кольцу, в котором перекашивали образцы из стали и бронзы, было отмечено уменьшение времени приработки с увеличением перекоса. Это говорит о сложности протекающих процессов и необходимости дальнейшего изучения влияния перекосов на приработку трущихся поверхностей.

### **1.3 Проблемы макроприработки деталей основных сопряжений машин**

#### **1.3.1 Особенности приработки подшипников скольжения двигателей**

В процессе эксплуатации до ремонта изменение технического состояния основных сопряжений двигателей происходит менее интенсивно, чем после ремонта, что обусловлено действием многих факторов. Одним из основных фак-

торов, снижающих ресурс двигателей после ремонта, относится увеличение отклонения деталей от правильной геометрической формы – овальности, перекосов, несоосностей и др. [47,48,98,255].

Износы и изменение параметров рабочих поверхностей деталей в процессе эксплуатации машин в течение определённой наработки или календарного времени не одинаковы. Их рассеяние характеризуется определенным законом распределения ресурса или наработки (нормальным, Вейбулла-Гнеденко, экспоненциальными и др.) со значительным коэффициентом вариации – 0,25 - 0,50 [59]. Приработке сопряжений ЦПГ посвящено много работ [142,148,175,235,247]. Они раскрыли сложность происходящих процессов и наметили пути их решения [273,274].

Приработка КШМ тоже имеет свои особенности [146,188,231,193]. В процессе эксплуатации овальность шеек коленчатого вала и гильз цилиндров значительно возрастает (при первом капитальном ремонте овальность шеек превышает исходную в 2,8-3,2 раза, а гильз цилиндров – в 3,6 - 4,5 раз). Макрогеометрические изменения происходят и в блоке цилиндров, поэтому даже при высоком качестве капитального ремонта очень сложно обеспечить высокую точность сопрягаемых поверхностей [2,49].

С учетом того, что значительное повышение мощности современных тракторных двигателей приводит к увеличению нагруженности деталей кривошипно-шатунного механизма, необходимо повышать эффективность процессов приработки основных сопряжений двигателей. В последнее время особое внимание уделяется приработке наиболее нагруженных трибосопряжений в двигателе. По мнению Л. М. Гаенко [72] и И. Б. Гурвича [93], это сопряжение «шатунная шейка-вкладыш» (расчет по удельной нагрузке), а, по мнению В. Г. Заренбина, А. Х. Касунова [143], – кольцо-гильза (рассматривался критерий заедания по температуре).

Снижению работоспособности подшипников скольжения способствуют высокие удельные нагрузки. Они приводят к ускоренному износу подшипниковых материалов, усталостному разрушению антифрикционного материала вкладышей, заеданию подшипников и поломкам коленчатого вала. Поэтому необходимо изыскать способы продления срока службы подшипниковых узлов коленчатого вала.

При эксплуатации двигателя в результате действия процесса старения и неравномерного распределения температуры в период его запуска и разогрева, возникает деформация блок-картера, вызывающая нарушение требуемой точности взаимного расположения деталей ЦПГ. Основной причиной деформации блок-картера, по мнению Е. И. Вернигоры [62], является перераспределение остаточных внутренних напряжений и изменение размера зерна чугуна в отливке. Появление такого дефекта вызывает интенсивный износ деталей ЦПГ со значимыми различиями у одного и того же двигателя.

Проблемы сохранения геометрии сопрягаемых поверхностей нашли отражение в работах И. Б. Погорелого, И. Е. Дюмина, Е. И. Вернигоры, Н.Т. Голубничего и других авторов [219,109,62,80]. Исследователями установлено, что

при капитальном ремонте на линию сборки двигателей поступает от 95 до 98 % блоков с превышающей в 6 - 10 раз по техническим требованиям несоосностью коренных опор и от 38 до 98 % блоков с превышающей в 2 - 6 раз неперпендикулярностью осей к общей оси отверстий коренных опор. Было выяснено, что в большинстве случаев наличие таких дефектов приводит к ресурсным отказам. Это значит, что блок-картеры к дальнейшей эксплуатации непригодны и требуют восстановления или выбраковки.

Однако проведенные исследования основывались на наличии недопустимых погрешностей во взаимном расположении деталей какого-либо одного из сопряжений, без учета соответствующих погрешностей других. В них не рассматривались механизмы как сложные технические системы, в которых наблюдается влияние отдельных звеньев на механизм в целом. В процессе же сборки двигателей в производственных условиях недопустимые отклонения взаимного расположения могут иметь детали не одного, а всех сопряжений рассматриваемого механизма.

В. П. Иванов отмечает, что нормативную послеремонтную наработку выдерживают только 40-60% двигателей легковых и 30-40% грузовых автомобилей [147]. Это связано с неточностью обработки деталей (по этой причине выходят из строя 15,1% ремонтируемых двигателей), изломами и разрушениями деталей (45,1%) и интенсивным износом сопряженных поверхностей – 12,4%.

Требование к надежности отремонтированной техники заключается в обеспечении 80% послеремонтной наработки по сравнению с новой [103]. В свою очередь, надежность отремонтированного агрегата, в значительной мере, зависит от долговечности составляющих сборочных единиц и деталей, способа их приработки и соблюдения всех технических требований на сборку, обкатку и эксплуатацию. Многими авторами отмечается значительное старение ремонтного фонда, так только 3 - 4% двигателей поступает в ремонт в первый раз, а около 80% – не менее чем в третий, и, как правило, в подсобранном виде, т. е. в состоянии металлолома. Детали при восстановлении могут обладать пониженной точностью. Практика ремонта показывает, что менее половины восстанавливаемых деталей соответствует всем нормативным требованиям на форму, размеры, взаимное расположение плоскостей, осей, волнистость и шероховатость, распределение масс относительно оси вращения, физико-механические свойства и др.

По данным В. П. Иванова, только 54% блоков цилиндров и 31% коленчатых валов, поступающих на сборку, при ремонте соответствуют всем предъявляемым требованиям [147].

А. Д. Назаровым установлено, что двигатели, поступившие в первый и повторный капитальный ремонт, имеют следы натирания и задира, а также натирание и задир, кольцевые риски на шатунных шейках и обоих шатунных вкладышах, перегрев и выкрашивание их антифрикционного слоя, подплавление верхних вкладышей и перенос их материала на шатунные шейки. Частотность появления перечисленных повреждений у двигателей, поступивших в повторный капитальный ремонт, в 1,3-2,1 раза выше, чем у направленных в первый. Выше-

перечисленные повреждения в основном встречаются только у двигателей с макрогеометрическими отклонениями деталей КШМ выше допустимых значений [200].

Техническое состояние прошедших капитальный ремонт дизелей напрямую зависит от формы и взаимного расположения коренных шеек и постелей в блоке под них, а также наличия макроотклонений шатунных шеек и нижних головок шатунов, суммарной неуравновешенной массы деталей КШМ.

С увеличением суммарной неуравновешенной массы деталей КШМ, макроотклонений шатунных шеек и нижних головок шатунов возрастают действующие нагрузки и неравномерность их распределения, повышается температура шатунных вкладышей, наблюдается изгиб, прогиб и колебания коленчатого вала, появляется действующая на него осевая сила. Перечисленные факторы в сочетании с недостаточными действительными зазорами в шатунных подшипниках уменьшают до недопустимых значений толщину смазочного слоя и нарушают условия смазывания в них. Это повышает вероятность непосредственного контакта рабочих поверхностей шатунных шеек и вкладышей, что приводит к возникновению различных повреждений. Неравномерное распределение внешней и дополнительных нагрузок по шатунным подшипникам является причиной различных значений температуры отдельных их вкладышей и смазочного масла, а также минимальной толщины смазочного слоя в них, неодинаковых условий смазывания.

Часть геометрических параметров восстановленных деталей, влияющих на послеремонтную наработку агрегата, вообще осталась вне поля зрения разработчиков нормативной документации, например, отклонение от перпендикулярности и пересечение осей коренных опор блоков цилиндров и отверстий под гильзы [201].

Надежность и вероятность безотказной работы автотракторных дизелей во многом зависит от технического состояния, показателей изнашивания подшипников коленчатого вала, которые, в свою очередь, определяются отклонениями их формы и взаимного расположения. Так, при исследовании технологического процесса капитального ремонта дизелей с рабочим объемом 2,445 л отмечено, что встречаются различные сочетания овальности и конусности шатунных шеек и отверстий нижних головок шатунов. При одинаковом значении овальности – 20-22 мкм – следы натирания на шатунных вкладышах в случае капитально отремонтированных двигателей, в сравнении с новыми, встречаются в 1,14-1,22 раза чаще [200].

При капитальном ремонте дизелей макроотклонение диаметра шатунных шеек и отверстий нижних головок шатунов изменяется в пределах 5-30 и 5-25 мкм, их математические ожидания равны 15,8 и 14,2 мкм, соответственно, а допустимые по ТУ – составляют 0-10 и 0-8 мкм. Следовательно, наибольшее и среднее значения макроотклонений диаметра шатунных шеек у отремонтированных коленчатых валов в 3,0 и 3,16 раза превышают допустимые ТУ, а отверстий нижних головок шатунов – в 3,13 и 3,55 раза [201].

Расчеты показали, что при отклонении формы названных деталей, близкой к максимальным значениям при ремонте, вышеупомянутые условия не соблюдаются. Это является основной причиной низких послеремонтного ресурса и вероятности безотказной работы. Около половины дизелей направляют в повторный капитальный ремонт из-за достижения предельного износа верхних и нижних шатунных вкладышей и его неравномерности (часть составляет 0,62 и 0,44). Из них, 27,5 и 17,5% имеют задиры и кольцевые риски на шатунных вкладышах, у 72,5 и 27,5%, соответственно, наблюдается перегрев и выкрашивание антифрикционного слоя. При этом у 9% дизелей обнаружены продукты изнашивания и абразивные частицы на шатунных вкладышах, у такого же количества дизелей – подплавление и перенос их антифрикционного слоя на шейки. Задир верхних шатунных вкладышей встречается в 2,61 раза чаще, чем нижних, а шатунных шеек у дизелей, поступивших в повторный капитальный ремонт, – в 1,4-1,9 раза, чем у подобных деталей, направленных в первый раз [200].

Большие проблемы находятся и при контроле усилий затяжки резьбовых соединений. Так, только у 37% сопряжений усилия затяжки находятся в пределах нормы. Физико-механические свойства рабочих поверхностей формируются составом и структурой восстановительного покрытия, его термической и заключительной обработками. Практически не решена проблема восстановления плоских торцов коренных опор в блоке цилиндров, шатунах и др.

Ряд апробированных в производстве способов восстановления деталей до номинальных размеров в настоящее время не применяется из-за дороговизны используемых материалов. Низкое качество наносимых покрытий объясняется отклонениями от режимов технологических процессов их нанесения на детали, что обусловлено большой погрешностью приборов и несовершенством применяемого оборудования.

К сожалению, взаимное расположение поверхностей различных деталей, которое определяет величину линейных и угловых замыкающих размеров, не соответствует требованиям технических условий. Это приводит к нерасчетным режимам смазки, резкому повышению контактных давлений в трущихся парах, повышению износа и выходу из строя сопряжений.

Для ремонтного производства характерно применение использования большей части деталей, бывших в эксплуатации с расширенными полями допусков, что неминуемо приводит к сокращению ресурса двигателей. Возможным путём решения задачи повышения ресурса при фактических показателях точности является использование электрохимико-механической приработки (ЭХМП) основных сопряжений двигателя, наиболее ответственных за его ресурс. Большой вклад в разработку метода ЭХМП, развитие его основ и раскрытие сложных процессов электрохимико-механического взаимодействия трущихся поверхностей, внес Алексеев В.П. [12].

Одним из таких сопряжений являются коренная шейка коленчатого вала – вкладыши. Исследование процесса приработки подшипников скольжения проведены либо на развёрнутых двигателях, либо на отдельных реальных вклады-

шах, или по схеме ролик-колодочка, когда исследовалась только одна пара трения [55]. Этими исследованиями не раскрыты особенности процесса электрохимико-механической приработки (доводки) подшипников скольжения и шеек многоопорного вала.

Практика ремонта двигателей в хозяйствах показала, что не уделяется должного внимания контролю соосности коренных опор блока [237, 225, 226]. Поэтому зачастую имеет место эксплуатация двигателей с блоками, не соответствующими требованиям технических условий.

Относительно небольшое отклонение от допустимых по ТУ значений этого показателя приводит к повышенному износу вкладышей вала, что значительно сокращает ресурс двигателя в целом, а значительная несоосность коренных опор может вызывать аварийное разрушение коленчатого вала, испытывающего знакопеременные нагрузки.

Задачу повышения ресурса при фактических показателях точности можно решить с помощью ЭХМП основных сопряжений двигателя, наиболее ответственных за его ресурс [12, 127, 149].

Ранее в лабораторных условиях было проведено моделирование процесса ЭХМП сопряжений шейки многоопорного вала - подшипники [145]. Установлено положительное влияние наложения тока на приработку сопряжений, имеющих различные перекосы подшипников на соосном валу. При относительно небольших перекосах использование ЭХМП позволяет нивелировать отрицательное влияние этого дефекта на процесс приработки сопряжений.

Представляет интерес изучение прирабатываемости сопряжений при несоосных шейках. В этом случае давления на шейку, расположенную не соосно с остальными, будет выше, чем на остальные.

Внутренние потери мощности на трение в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) в значительной мере определяются точностью деталей шатунно-поршневой группы [205, 206, 203]. Пониженные точности деталей, взаимного расположения поверхностей, характерные для ремонтного производства [202, 204], усугубляют внутренние потери мощности.

Одним из подходов к оценке точности шатунно-поршневой группы является величина перекоса оси поршня по отношению к оси цилиндра, как замыкающего звена размерной цепи [82, 156, 253]. Совершенно не случайно техническими условиями на ремонт жестко регламентируется величина отклонения от перпендикулярности оси поршня к оси отверстия нижней головки шатуна [102, 112]. Следствием превышения отклонения от допустимых значений являются натирки на боковой поверхности поршня, интенсивное изнашивание гильзы цилиндра и поршня, высокие механические потери [81, 88].

Вполне естественной задачей ремонтного производства является использование таких технологий, которые позволяют минимизировать отрицательное влияние точностных показателей на потери на трение, что возможно при использовании ЭХМП трущихся поверхностей [1, 3, 216].

Применение электрохимико-механической приработки многоопорных валов позволяет обеспечить их быструю приспособляемость к коренным опорам, имеющим небольшие макрогеометрические отклонения при малом износе за 5...7 минут [15].

Существующая технология ЭХМП увязывает режимы приработки с наличием макрогеометрических отклонений коленчатых валов. Согласно этой технологии, необходимо контролировать силу тока, проходящую через сопряжения коренных шеек коленчатого вала и вкладышей. О выходе на гидродинамический режим трения в опорах судили по времени падения силы тока до значений близких к нулю. Это свидетельствовало о наличии гарантированной разделительной пленки электролита между трущимися поверхностями и об эффективном протекании процесса макрогеометрической приработки при ЭХМП.

Согласно разработанной технологии, уложенный в постели блока коленчатый вал приводился во вращение с частотой  $600 \text{ мин}^{-1}$ , а проходящий через сопряжения ток должен был снизиться до нуля, и этот момент можно было бы считать окончанием ЭХМП сопряжений вал - вкладыши. Если этого не происходило, то делался вывод о том, что вал или блок имеет такие макрогеометрические отклонения, которые не позволяют качественно приработать коленчатый вал к вкладышам. Поэтому требовалось проведение разборочной операции, дополнительной дефектации вала, блока и вкладышей с целью выявления имеющихся дефектов [55].

Однако отсутствие гидродинамического режима в исследуемых сопряжениях не может являться достаточным основанием для проведения дополнительных разборочно-сборочных операций и требует дополнительного изучения.

Вероятно, подбор определенного электролита или режимов ЭХМП сопряжений вкладыши – шейки многоопорного вала, смогут расширить область применения данного процесса для валов с относительно небольшими макрогеометрическими отклонениями. Кроме этого, предлагаемые режимы приработки сопряжений многоопорного вала и вкладышей ранее не подвергались оптимизации. Поэтому выполнение таких исследований - задача актуальная, решение которой определит оптимальный режим ЭХМП, обеспечивающий наилучшее развитие площади пятна контакта при минимальном износе.

Проблема повышения эффективности качества приработки основных трибосистем агрегатов и машин до сих пор является актуальной. В результате анализа причин потери работоспособности узлов и механизмов машин установлено, что около 75 % отказов вызвано износом их узлов трения. Одним из широко применяемых, но недостаточно надежных по критерию износостойкости узлов трения являются подшипники скольжения [225].

Для приработки основных трибосистем двигателей применяют различные методы. Они хорошо описаны в работе Н.В. Храмцова [270]. По мнению автора, современные методы приработки подшипников скольжения имеют целый ряд недостатков. Стремление понизить коэффициент трения в начальный период приработки затрудняет макрогеометрическую приспособляемость поверхностей. Добавление различного рода абразивных частиц в зону трения хоть и

решает вопросы макрогеометрической приработки, но приводит к шаржированию поверхности с повышенными эксплуатационными износами. Снижение вязкости смазочных материалов могут привести к сближению трущихся поверхностей, появлению зон непосредственного металлического контакта, что, в свою очередь, приводит к задиру.

Наиболее прогрессивными являются совмещенные способы приработки, позволяющие повысить эффективность процесса механического взаимодействия трущихся поверхностей за счет электрических, химических и других воздействий. Одним из таких способов является ЭХМП [12]. Разработанная технология ЭХМП показала высокую эффективность при приработке авто-тракторных двигателей.

Преимущества электрохимико-механического воздействия для выравнивания трущихся поверхностей широко используется в США и Китае [288, 306, 326, 327]. Применение совмещённых процессов позволяет получать высокоточные профили поверхностей на твердосплавных деталях или там, где требуется высокая точность геометрической формы (например, при выравнивании жестких дисков ЭВМ).

### **1.3.2 Особенности приработки сопряжений гидроагрегатов**

В настоящее время в интенсификации процессов производства большую роль играет гидромеханизация. В современном машиностроении внедряются гидрообъемные передачи. Опыт эксплуатации показал, что применение гидрообъемных приводов вместо механических передач позволяет повысить производительность машин на 20-45%.

Основными преимуществами гидрообъемной передачи (ГОП) перед механической передачей (МП) является возможность осуществлять бесступенчатое изменение скорости, момента тяги, что позволяет повысить производительность комбайна или МТА. ГОП свободно комплектуется в пространстве, позволяет осуществлять передачу энергии на большие расстояния, проще в эксплуатации, позволяет надежно предохранять узлы трансмиссии от перегрузок, автоматизировать управление машиной. Недостатками ГОП перед МП является понижение КПД на 5...10%, уменьшение моторесурса до 3-5 тыс. вместо 7...10 тыс. мото-часов; изменение параметров ГОП в процессе эксплуатации за счет износа деталей гидромашин, что приводит к увеличению утечек рабочей жидкости и снижению объемного КПД гидромашин.

Для решения практических задач, связанных с повышением надежности соответствующих узлов и сопряжений, необходимо иметь классификацию их деталей, построенную по принципу общности таких признаков каждого из типов деталей, которые и определяют причины возможных неисправностей и пути предотвращения.

При всем многообразии конструкций прецизионные пары гидравлических агрегатов имеют характерные признаки, позволяющие их разделить на

пять типов по условиям нагружения и, как следствие, по типичным причинам повышения трения и повреждения деталей. Поэтому для прецизионных пар каждого типа имеются вполне определенные наиболее вероятные пути повышения надежности.

К первому типу, относятся золотниковые пары регулирующих устройств с возвратно-поступательными перемещениями золотника, воспринимающего осевую нагрузку от пружин и давления рабочей жидкости (редукционные, переливные клапаны, клапаны постоянного давления и других регулирующих устройств топливных и гидравлических агрегатов).

Особенностью нагружения прецизионных пар данного типа является то, что в результате неизбежного эксцентриситета в приложении осевых нагрузок золотник находится относительно гильзы в перекошенном состоянии. Поэтому на участках фактического контакта деталей могут возникать значительные давления. Основным видом изнашивания, вызывающий отказ, является локальное схватывание.

Второй тип – золотниковые пары регулирующих устройств, у которых золотник помимо возвратно-поступательных движений, совершает еще и вращательное с частотой, достигающей несколько тысяч оборотов в минуту (датчики регуляторов оборотов и т.д.). Данные условия нагружения обуславливают лавинное схватывание, характерное для этого типа, которое является основной причиной отказа.

Третий тип – золотниковые пары распределительных устройств, детали которых под действием ручного или электромагнитного привода периодически получают взаимные возвратно - поступательные перемещения. К третьему типу относятся золотниковые пары гидрораспределителей и гидроусилителей. Основными причинами отказа для данного типа, является заклинивание твердыми частицами, превышающими по размерам диаметральный зазор; неуравновешенной гидростатической силой при облитерации зазора асфальто-смолистыми и твердыми частицами.

К четвертому типу относятся плоские золотниковые пары распределительных устройств, у которых возвратно-поступательные или поворотные перемещения золотника относительно корпуса, к которому они обычно прижимаются под действием усилия пружины и давления рабочей жидкости, производится ручным или электромагнитным приводом. Основными причинами отказа является заклинивание твердыми частицами; локальное схватывание.

Пятый тип - плунжерные и поршневые пары насосов или гидромоторов. Характерными особенностями работы этих плунжерных пар являются непрерывное возвратно-поступательное движение плунжеров относительно гильзы с ходом от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров и частотой, соответствующей частоте вращения ротора или кратной ему. А также, наличие радиальных давлений между плунжером и поверхностью гильзы и контактной нагрузки сферического сопряжения плунжера и опорной пяты (шатуна и буксы с поршнем). Нагружение этих сопряжений взаимосвязано. Повышенный износ и, как следствие, сокращение срока службы обусловлен наличием схватывания

и контактной усталостью, сопровождающийся нередко заклиниванием качающегося узла и повышением трения в сопряжении плунжер – гильза, так как обе трущиеся пары связаны между собой по принципу положительной обратной связи.

Детали прецизионных пар обычно изготавливают с точностью не ниже 2 класса и шероховатостью поверхности не ниже 8 класса чистоты (ГОСТ 2789-73). Диаметральный зазор прецизионной пары, в зависимости от размера деталей и назначения, может быть от 2 мкм до нескольких десятков микрометров.

Основными требованиями, предъявляемыми к прецизионным парам, является высокая стабильность малых сил трения и хорошая герметичность. Как отмечает Лозовской В.Н., что “практически все отказы и неисправности прецизионных пар гидроприводов и агрегатов топливной аппаратуры двигателей вызываются повышенными, по сравнению с установленными техническими требованиями, трением или утечками рабочей жидкости, что, как правило, сопровождается повреждением или разрушением их поверхностей. При этом под повреждениями понимаются образующиеся в процессе работы прецизионной пары любые изменения микрогеометрии, повышающие шероховатость поверхности, и структурные изменения материала деталей” [183].

В настоящее время накоплен огромный материал по определению взаимосвязи трения и изнашивания деталей машин с микрогеометрией и физико-механическими свойствами поверхности. Фундаментальные исследования, в этой области выполнены Крагельским И.В. с учениками [171,172].

Важное место при исследовании изнашивания деталей в процессе эксплуатации машин занимают работы по изучению структурных изменений в металлах, влияние на них нагрузки и среды, выполненные под руководством Костецкого Б.И. и Сулимы А.М. [198, 166, 165, 239].

Особый интерес при изучении механизма и причин повреждаемости деталей машин представляют работы по исследованию условий схватывания металлов, проведенных под руководством Айбиндера С.Б. [5], Голего Н.Л. [78], Бакли Д. [50] и др. ученых. Изучению своеобразного процесса переноса металлов при трении без повреждения поверхности и без существенного повышения трения посвящены работы Гаркунова Д. Н. и Полякова А. А. [73,74].

Необходимым условием для понимания роли внешней среды в процессах трения, изнашивания и связанной с ними повреждаемости деталей являются результаты, достигнутые в изучении формирования на поверхностях металлов смазывающих пленок и их несущей способности. В этом вопросе большая заслуга принадлежит Ахматову А.С. [46], Дерягину Б.В. [100].

Особое направление в изучении влияния поверхностно-активных сред на состояние материалов в условиях механического нагружения - физико-химическая механика материалов - было создано под руководством акад. Ребиндера П.А. Это работы Лихтмана В.И., Щукина Е.Д. [182].

Важнейшим условием успешного исследования механизма повреждаемости деталей при трении являются достижения в области решения контактных задач. Исследования влияния шероховатости, механических свойств и нагру-

жения на формирование площадей контакта и контактных давлений выполнены Дьяченко П. Е. [108], Деминым Н.Б. [96], Рыжовым Э.В. [96, 236], Хрущевым М.М. [272].

Значительный вклад в изучение процессов трения и состояния поверхностного слоя при фрикционном контакте внесли Боуден Ф.П. и Тейбор Д. [57], Польцер [220], Шпеньков Г.П. [283], Горюнов Ю.В. [84], Тененбаум М.М. [256], Белый А.В., Карпенко Г.Д. [51].

Таким образом, фундаментальные исследования в области машиностроительной гидравлики, трения и изнашивания деталей машин создали необходимые предпосылки для изучения физической сущности причин отказов и неисправностей, роли и влияния конструктивно-технологических и эксплуатационных факторов на работоспособность, для выбора критериев и методов оценки и средств повышения надежности прецизионных пар гидравлических агрегатов.

Главным условием, обеспечивающим надежность гидроагрегатов, как указывалось выше, является высокая стабильность малых сил трения и малых зазоров, не увеличивающихся в процессе эксплуатации. Поэтому необходимо сформировать такие фрикционные свойства деталей, при которых выполнялись указанные условия. Одним из способов обеспечения требуемых фрикционных свойств является приработка сопряженных поверхностей. Во время приработки происходит формирование необходимой микрогеометрии и физико-механических свойств поверхностей трения.

“Анализ режимов приработки, и ее длительности, проведенных на ряде гидроагрегатных заводах, показал, что даже для однотипных деталей и узлов гидропривода время приработки изменяется от нескольких часов до нескольких десятков часов [199]. Следовательно, необходимо обеспечить микро- и макро-приработку, а также физико-механические свойства поверхностей, при которых бы сократилось время приработки и приработочный износ. Необходимые свойства должны обеспечивало во время операции окончательной обработки – притирки

В гидравлических объемных передачах используются гидронасосы и гидромоторы аксиально-плунжерного типа. Одним из основных сопряжений, лимитирующих надежность этих гидроагрегатов, является сферическое сопряжение стальной плунжер - бронзовый подпятник. Во время работы аксиально-плунжерный насос создает высокое давление, до 300 МПа, основная часть которого, воспринимается сферической парой. В связи с этим, в местах фактического контакта возникают высокие контактные напряжения. При неблагоприятных условиях, достижения контактного напряжения критических значений, происходит интенсивная деформация поверхностных объемов металла, это ведет к разрушению масляной пленки. Появившиеся, в результате этого ювелирные участки поверхностей, сближаются до действия межатомных сил, в местах фактического контакта происходит схватывание. Образовавшиеся адгезионные связи разрушаются. В этих местах наблюдается разрушение поверхностного слоя. А частицы отделившегося металла являются абразивом, который

попадая в другие узлы и сопряжения гидронасоса (гидромотора), вызывает их повышенный износ. Кроме того, сферическая поверхность плунжера интенсивно изнашивается, что может привести к уменьшению длины плунжера выше допустимого предела.

В настоящее время для восстановления данного вида сопряжения используется метод ремонтных размеров. Состоит он в следующем. Перед ремонтом плунжеры на специальном приспособлении выпрессовывают из подпятников. После этого детали промывают, просушивают и производят их дефектовку. В процессе дефектации микрометрируют сферические головки плунжеров, шаблоном или кругломером (пассаметром) определяют эллипсность, осмотром поверхности выявляют наличие рисок, натиров, задиров, разрушенные, в результате схватывания или контактной усталости, участки.

После дефектации плунжеры, подлежащие ремонту, восстанавливают путем обработки до следующего ремонтного размера и выведения следов износа. При этом подпятники автоматически выбраковывают и изготавливают новые, со сферическими поверхностями ремонтного размера. Для выведения следов износа и повреждений сферы плунжера, также как способ ее окончательной обработки используют метод абразивной притирки.

Технология ремонта сферического сопряжения с применением абразивной притирки состоит в следующем: в качестве абразивных материалов используется паста ГОИ и микропорошки различной зернистости, т.к. абразивная притирка происходит, как правило, в два-три этапа (черновая, чистовая, окончательная). Инструментом является чугунный притир различного размера, в зависимости от диаметра обрабатываемой сферы. Притирку производят на доводочном станке.

Плунжер закрепляется в патроне доводочного станка, на ремонтируемую сферу устанавливается притир с шарнирным соединением, который крепится в шпинделе электродвигателя. Обрабатываемой детали и притиру придаются различные угловые скорости. Во время притирки электродвигатель вместе с притиром поворачивают вокруг вертикальной оси каретки станка, благодаря чему осуществляется обработка всей площади сферы.

В изготовленных подпятниках рассверливают сферу, растачивают ее фасонным резцом, затем при помощи специального притира и добавлением пасты ГОИ производят притирку (доводку).

После операций абразивной обработки, детали тщательно промывают и выполняют взаимную притирку сферической головки плунжера со сферами подпятника без применения абразива. Затем по краске контролируют площадь пятна контакта восстановленных сферических поверхностей. Если площадь пятна контакта не менее 70-80% [282,258,153], то качество притирки соответствует техническим условиям.

Абразивная притирка нашла широкое применение при ремонте и изготовлении не только рассматриваемого сопряжения, но и других типов прецизионных пар гидроагрегатов так как “технология восстановления, зачастую аналогична технологии изготовления” [276].

Современные доводочные процессы строятся на двух различных принципах использования абразивных зерен: доводка связанным абразивом в брусках (суперфиниширование, хонингование, и их разновидности) и доводка свободным абразивом (порошками и пастами различной зернистости, нанесенными на поверхность инструмента – притира или обрабатываемой заготовки). В обоих указанных случаях процесс доводки, в сущности, сводится к осуществлению двух разновидностей деформирования металла: микрорезанию со снятием тончайших стружек и пластическому деформированию – полированию металла. Эти два процесса осуществляются, как правило, в два - три этапа (операции).

В процессе микрорезания происходит снятие припуска металла, необходимого для устранения погрешностей и размеров обрабатываемой заготовки, а также дефектного слоя, созданного предыдущими операциями.

При пластическом деформировании происходит сглаживание неровностей поверхности и заполировывание их впадин. Этот процесс завершает формирование шероховатости доведенной поверхности. Высота микронеровностей при этом равняется сотым долям микрометра [189].

При всех доводочных процессах происходят пластическая деформация и наклеп поверхностного слоя металла, которые значительны при переводе доводки из режима микрорезания в режим полирования. В связи с этим, при доводке в тонком поверхностном слое возникают остаточные напряжения сжатия, которые способствуют повышению износостойкости детали [189]. Это обусловлено тем, что при наклепе происходит уменьшение смятия и истирания поверхностей при их фрикционном контакте и взаимное внедрение поверхностных слоев, увеличивается диффузия кислорода воздуха в металл, что способствует образованию химических соединений  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$ , характерные для окислительного, т.е. нормального вида износа.

Но при многих положительных моментах, абразивная притирка имеет существенные недостатки [159,254,277]. Проведенный анализ литературных источников [282,258,153,189], позволяет выявить следующие недостатки, связанные с этим способом окончательной обработки прецизионных деталей гидроагрегатов:

- наличие технологических загрязнений;
- опасность шаржирования абразивных частиц в мягкие материалы;
- несоответствие шероховатости условиям работы;
- неполное формирование фактической площади пятна контакта;
- отрицательный градиент механических свойств по глубине.

Рассмотрим их влияние на работу гидроагрегатов.

Опыт эксплуатации гидроприводов, показывает, что технологические загрязнения, часто являются причиной преждевременного износа и частого заклинивания трущихся поверхностей, особенно в парах с малыми зазорами (только отремонтированные или изготовленные). Наиболее интенсивный износ происходит в начальный период работы. Основными видами технологических загрязнений при обработке прецизионных пар являются мельчайшие металли-

ческие частицы в виде продуктов износа и выкрашивания абразивных зерен, остатков доводочных паст [51, 53]. Применяемые способы очистки и мойки деталей, в том числе и ультразвуковой, не обеспечивают полную очистку обработанных поверхностей. Так по данным Кабакова М.Г., Стесина С.П. [153] даже после промывки в проточной воде, протирки ветошью и продувки сжатым воздухом на поверхностях обработанных деталей, как правило, остается от 0,402 до 1,07 мг/см<sup>2</sup> технологических загрязнений.

Твердые абразивные частицы вызывают опасность шаржирования в мягкие материалы. Так как подпятники аксиально-плунжерного насоса изготавливаются из бронзы марки БрАЖ 10-4-4, то в процессе абразивной притирки возникает опасность шаржирования абразивных частиц в поверхность обрабатываемых деталей. Эти частицы не вымываются даже при использовании ультразвуковой очистки. Они остаются в деталях и во время работы, попадая в рабочую жидкость и вызывая повышенный износ насоса и всех узлов гидропривода. Поэтому детали, изготовленные из мягких материалов (бронза, алюминий), должны подвергаться безабразивной обработке [282, 276].

Большие сложности возникают при несоответствии шероховатости условиям работы. Абразивная притирка в режиме полирования обеспечивает снижение высоты шероховатостей до сотых долей микрометра, что соответствует 12, 14 классу чистоты [277]. Но в результате испытаний, ранее проведенных Лозовским В.Н. установлено, "...с уменьшением шероховатости поверхности образцов, уменьшается нагрузка, необходимая для схватывания. Стальные образцы при шероховатости поверхности, соответствующей 8 классу чистоты, значительно лучше сопротивляются схватыванию, чем имеющие поверхность 12 класса чистоты. С уменьшением шероховатости поверхности увеличивается площадь контакта и одновременно ухудшаются условия смазки, так как затрудняется проникновение жидкости к трущимся участкам сопряженных поверхностей" [183].

Наличие на поверхности пор, играющих роль масляных карманов, эффективным образом обеспечивает сохранность в зоне контакта масляного слоя, разделяющего сопряженные поверхности. Это особенно важно для деталей, работающих в тяжелых условиях (большие контактные нагрузки, граничная смазка) [183].

Снижение ресурса сопряжения вызывается неполным формированием фактической площади пятна контакта. "Многочисленными исследованиями было установлено, что фактическая опорная поверхность деталей после их механической обработки чрезвычайно мала" [189]. Приложение эксплуатационных нагрузок при контактировании неизбежно приводит к значительной концентрации напряжений, большим силам трения и возникновению высоких температур на поверхностях деталей, их схватыванию и разрушению. Поэтому для устранения этих явлений проводится технологическая операция – приработка [199]. Как известно, окончательная приработка на микроуровне возможна только после макроприработки сопряжений, в связи с этим длительность приработ-

ки занимает большой период, что в свою очередь увеличивает стоимость ремонта гидроагрегатов.

Очень важно при приработке обеспечить отрицательный градиент механических свойств по глубине прирабатываемой поверхности детали. "Анализ отказов гидроприводов в процессе проведения приработки показывает, что основное число отказов обусловлено повреждениями и разрушениями трущихся пар вследствие схватывания сопряженных поверхностей" [199]. После абразивной притирки, особенно в режиме полирования, имеет место наклеп. Твердость поверхностного слоя увеличивается в 1,5-3 раза, глубина наклепаного, в зависимости от материала детали, слоя составляет 15-20 мкм. Чем мягче материал, тем большая степень наклепа. Поэтому имеет место отрицательный градиент механических свойств, т.е. прочность адгезионной связи поверхностных слоев выше чем прочности нижележащих, что и является причиной глубинного схватывания. В этом случае разрушение происходит в более слабом месте, на значительной глубине [199].

Проанализировав этот способ доводки, широко используемый при восстановлении сферического сопряжения можно прийти к выводу, что абразивная притирка не позволяет сформировать необходимую микро- и макрогеометрию, физико-механические свойства, что позволило бы сократить время приработки и повысить качество восстановленных поверхностей. Кроме того, наличие технологических загрязнений является причиной повышенного износа сферического сопряжения и снижение технико-экономических показателей насоса, а, следовательно, и гидропривода.

Поэтому детали сопряжений гидроагрегатов должны подвергаться безабразивной обработке [282]. Одним из таких видов обработки, является электрохимическое полирование.

### **1.3.3 Особенности приработки зубчатых зацеплений**

В настоящее время послеремонтный ресурс агрегатов и узлов с зубчатыми передачами значительно отличается от планируемого, оговоренного в технических условиях. Это связано с отсутствием требований технических процессов, низким качеством обкатки и запасных частей поступающих в ремонтное производство. В машинах и приборах применяют различные зубчатые передачи (цилиндрические, конические и винтовые), а, следовательно, и различные зубчатые колеса.

Причинами поломок зубьев могут оказаться возникшие в процессе эксплуатации перегрузки отдельных участков зубьев. Это происходит из-за неравномерности распределения нагрузки отдельных участков зубьев, вследствие неравномерности распределения нагрузки по ширине зубчатого венца, низкого качества приработки трущихся поверхностей, из-за перекоса осей зубчатых колес, вызванного увеличением люфтов в подшипниках и шлицевых соединени-

ях, а также различного рода производственных дефектов (раковины при отливке, трещины при термообработке и т.п.) [75].

Одним из способов повышения изгибной прочности является увеличение точности изготовления и монтажа передачи, проведения качественного процесса приработки трущихся поверхностей, что существенно уменьшает динамические нагрузки. По мере сглаживания рабочих поверхностей зубьев износ уменьшается и может стабилизироваться. Продолжительность приработочного износа по времени зависит от твёрдости рабочих поверхностей зубьев. Для передач с высокой твёрдостью этот процесс может быть весьма длительным. Очевидно, что наличие приработочного износа ещё не характеризует выход из строя передачи [77].

Значительные погрешности зубьев исправить притиркой нельзя, а при их погрешностях более 0,03 мм шлифование экономичнее притирки. Увеличение продолжительности притирки, сверх оптимальной, приводит к искажению профиля зубьев. Специального припуска на притирку обычно не оставляют и лишь при очень малых допусках на толщину зубьев его предусматривают размером не более 0,03 мм. С увеличением размера абразивных зерен чистота обработанных притиркой поверхностей ухудшается [90].

Режим трения, характер контактного взаимодействия, фактические контактные напряжения, вид изнашивания и контактная прочность поверхностей зубчатых передач в значительной степени определяются толщиной смазочного слоя в контакте. Преобладающим видом износа рабочих поверхностей шестерен следует считать абразивное изнашивание. Об этом свидетельствуют характерные риски на изнашиваемых поверхностях. Износ эвольвентного профиля зубьев следует отнести к механическому стиранию, шлицы ведущей шестерни поддаются механическому стиранию и смятию.

Нарушение нормальной работы передач может быть также вызвано неточностями, допущенными при изготовлении отдельных деталей. Эти неточности приводят к концентрации нагрузки. Многие рекомендации по повышению нагрузочной способности зубчатых колес могут быть эффективными, если валы, подшипники и корпус будут достаточно жесткими и будет гарантировано точное изготовление и установка колес. Из обзора и анализа повреждений главных передач, военных и торговых кораблей [160] видно, что основной причиной повреждений является концентрация нагрузки, обусловленная неточностями изготовления и деформациями деталей передачи под нагрузкой. Ошибка в угле подъема зуба или параллельности валов по ширине колес в пределах 10 мкм приводит к увеличению нагрузки на торце шестерни в 2,25 раза [114].

Контактные разрушения, обусловленные тепловым эффектом шлифования боковых поверхностей зубьев, имеют место преимущественно у цементированных и закаленных колес в связи с образованием при этом структурных концентраторов напряжений. Установлено, что на цементированных и закаленных зубьях, проточенных затем на станках типа Маг с образованием структурных концентраторов напряжений, выкрашивание материала (начальные трещины) возникает, как правило, в отпущенных зонах зуба, а развитие контактных

разрушений в начальных стадиях полностью ориентируется в направлении шлифовочных штрихов.

Характер и уровень вибраций и шума в зубчатых передачах при данных условиях их работы являются обобщающими показателями точности изготовления и сборки передач. По одним лишь результатам контроля геометрических параметров деталей еще нельзя судить о качестве всей передачи, так как результирующее воздействие выявленных отклонений в геометрии оценить не представляется возможным. В связи с этим отсутствие вибраций и шума недопустимой интенсивности является одним из важных условий работоспособности и надежности быстроходных передач.

Контроль качества зубчатых передач по виброактивности и шуму применяют для оценки качества агрегатов в судостроении, автостроении и начинают вводить турбостроительных, авиационных, тракторных, энергомашиностроительных, станкостроительных заводах и в других отраслях машиностроения.

Количественным параметром шумности источника является его акустическая мощность. Параметром, который можно непосредственно измерить имеющимися в настоящее время приборами, является звуковое давление. Для улучшения пятна контакта зубьев по высоте в быстроходных зубчатых передачах с большим передаточным числом применяют иногда двойную доводку зубьев, состоящую из предварительной притирки зубчатых колес чугуном притиром и последующей притирки колес с шестернями в паре.

Приработка зубчатой пары при высоких окружных скоростях колес с применением чрезмерно густой абразивной пасты может привести к заеданию зубьев, а при использовании недостаточно профильтрованного абразива возможно образование местных повреждений на зубьях.

Притирка в паре бывших в эксплуатации зубчатых колес несколько снижает их износостойкость и контактную выносливость, так как при этом удаляется наклепанный в процессе эксплуатации поверхностный слой материала зубьев. Приработку зубчатых передач без абразива производят при ступенчато увеличивающейся нагрузке. Максимальная нагрузка при этом должна, очевидно, соответствовать преобладающей в процессе эксплуатации.

Повышение качества приработки зубчатых зацеплений возможно использованием ЭХМП. Для этого необходимо провести ряд исследований по данному направлению; выяснить влияние качества приработки на долговечность и ресурс зубчатых зацеплений; исследовать вопрос формирования пятна контакта при наличии макрогеометрических отклонений осей и поверхностей деталей зубчатого зацепления; изучить влияние ЭХМП на формирование пятна контакта и продление ресурса зацепления; подобрать состав электролита, обеспечивающего наилучшую электрохимико-механическую приработку.

## 1.4 Методы устранения макрогеометрических отклонений при приработке

### 1.4.1 Существующие методы приработки

Низкая точность обработки деталей и сборки механизмов вызывает необходимость включать в технологический процесс изготовления и особенно ремонта машин и агрегатов их обкатку, при которой происходит приработка трущихся поверхностей. В процессе приработки достигается изменение геометрии компенсирующих звеньев-поверхностей трения, в результате чего обеспечивается состояние замыкающего звена, соответствующее нормальной работе механизма [10]. Наряду с этим, во время приработки происходят переходы от неизношенного состояния поверхностей к эксплуатационному, связанные с изменением шероховатости поверхности, состояния микроструктуры, поверхности материала и режима трения [53].

Приработка поверхностей является одним из процессов в трении скольжения, при котором происходит трансформация режимов трения [53]. В обычных условиях приработка занимает продолжительное время. Обеспечение полной приработки с минимально возможным износом за короткое время увеличивает продолжительность нормальной работы сопряженных деталей [72, 143, 88, 92, 271]. Большое значение в процессе приработки имеет использование рациональных нагрузочно-скоростных режимов, которые определяют не только качество приработки, но и последующую долговечность двигателей. Очень сложен и до конца не решен вопрос по выбору этапов обкатки и по их содержанию (нагрузки, скорости и продолжительности) [270].

Анализ упомянутых выше работ показывает, что пути интенсификации процессов приработки происходит в трех основных направлениях: конструктивном, технологическом, эксплуатационном. В результате многолетнего опыта сложились два основных этапа:

- обкатка на заводах-изготовителях и ремонтных предприятиях;
- эксплуатационная обкатка.

На первом этапе частично прирабатываются трущиеся поверхности деталей, проводится кратковременное испытание двигателей для определения расхода топлива без опасности повреждений, а так же с целью проверки работоспособности механизмов в целом. По данным Б. И. Костецкого [167], заводы-изготовители “Skoda” (Чехословакия), “GMC” (США), “IKARUS” (Венгрия) не производят холодной обкатки.

О. С. Некрасов доводит, что в настоящее время холодная обкатка занимает 22...33 % времени, горячая на холостом ходу – 13...17 % и горячая под нагрузкой – 55...65 %. Наибольший износ (до 70 %) приходится на холодную обкатку [204]. Стендовая обкатка завершается обкаткой под нагрузкой. За стендовой следует второй основной этап – эксплуатационная обкатка. Инструкции заводов-изготовителей тракторных и комбайновых деталей предусматривает 60 часов работы с постоянным увеличением нагрузки, начиная примерно с 60-70 % мощности и заканчивая полной.

Такая продолжительность вызвана медленным протеканием процесса макроприработки [92]. Исследования приработки ДВС, проведенные доктором технических наук К. З. Савченко [238,239] показали, что при существующих технологиях приработки, полная приработка наступает лишь через 120-210 мото-часов работы двигателя. Существующие технологии не обеспечивают полной приработки в том объеме, который необходим. Ведущаяся, зачастую неправильно, обкатка в эксплуатационных условиях, со значительным периодом времени, снижает коэффициент использования машины в целом.

Ускорение приработки двигателей особо важно на ремонтных предприятиях. Доведения ее до близкой к полной, не только разрешит снизить до минимума материальные и трудовые затраты, но и значительно увеличит ресурс нового или капитально отремонтированного двигателя, тем самым повысится коэффициент использования, далеко не нового машинно-тракторного парка.

Шароновым Г. П. [280,281] проведено обоснование нагрузочно-скоростных режимов обкатки. Режим обкатки должен состоять из прокрутки, холостого хода и обкатки под нагрузкой; частота вращения коленчатого вала и удельные нагрузки в основных сопряжениях должны ступенчато возрастать по времени обкатки.

Во время холодной обкатки, в основном, прирабатываются детали соединений ЦПГ. По данным Е. М. Мухина и И. И. Столярова после 30 мин. холодной обкатки уплотняющая способность поршневых колец возрастает от двух до девяти раз [197]. Приработка на холостом ходу считается малоэффективной, но необходимой для прогрева и подготовки двигателя к обкатке под нагрузкой [219, 110].

Стендовая обкатка завершается обкаткой под нагрузкой. За стендовой следует эксплуатационная. Для тракторных и комбайновых дизелей она обычно составляет 60 часов. Такая продолжительность обкатки вызвана, прежде всего, медленным протеканием макроприработки [203]. В условиях ремонтного производства продолжительность обкатки больше, чем на машиностроительных заводах в 1,2...2,8 раза, а нагрузки на последних этапах составляют не более 80...90% от номинальных [270]. Сокращение времени обкатки позволит снизить затраты на ремонт машин.

Для ускорения процесса обкатки двигателей используется ряд технологических приемов, таких как подбор рациональных нагрузочно-скоростных режимов и режимов смазки [230], нанесение приработочных покрытий или проведение химико-термической обработки контактирующих поверхностей трудноприрабатываемых деталей (поршневые кольца, гильзы цилиндров) [194, 275], использование приработочных присадок к смазочному маслу и топливу [180, 234], изменение электромагнитного состояния деталей [207,2,206] и проведение электрохимико-механической приработки трущихся поверхностей [3,12,117]. Существующие методы приработки трущихся поверхностей представлены на рис. 1.4.

Маловязкие масла обладают высоким теплоотводом и текучестью, легко проникают в зазоры между трущимися деталями и вымывают инородные ча-

стицы (загрязнения) и продукты изнашивания. При использовании маловязких масел ускоряется процесс приработки, однако возникают предпосылки для задигов поверхностей трения из-за малой несущей способности и низких смазывающих свойств.

Для ускорения приработки некоторых наиболее трудноприрабатываемых деталей, предотвращения схватывания и вместе с тем увеличения опорной площади поверхностей трения наносятся прирабочные покрытия тонкого слоя свинца, олова и др. или проводится сульфатирование, сульфационирование поверхностей трения [270].

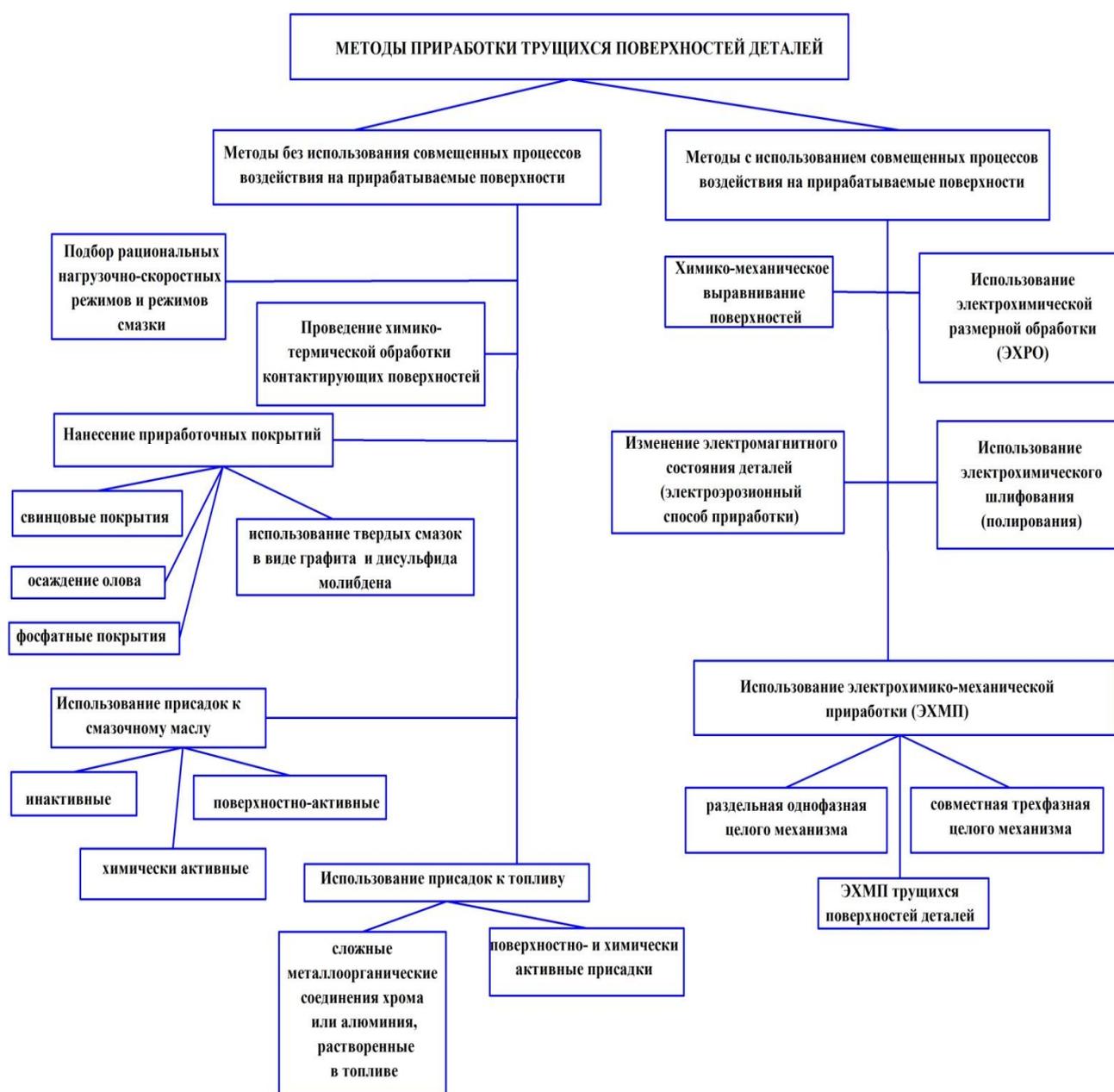


Рис.1.4 - Существующие методы приработки трущихся поверхностей

Свинцовые покрытия улучшают прирабатываемость и увеличивают сопротивляемость задиру, но сравнительно быстро окисляются.

Покрытие из олова на поверхности хромированного поршневого кольца уменьшает время приработки и увеличивает несущую способность трущейся пары, но адгезия хрома и олова позволяет желать лучшего, в этом случае действие присадки очень кратковременно.

Фосфатные покрытия значительно способствуют повышению стойкости к заеданию, но в начальный период износ сопряжений с таким покрытием резко возрастает, так как обычно поверхности имеют весьма большую шероховатость ( $R_a = 6$  мкм) [270].

Нанесение прирабочных покрытий и химико-термическая приработка – это весьма эффективные, но сложные наукоемкие и трудоемкие процессы, поэтому они не применяются для ремонтного производства [271].

Использование смазок в виде графита и дисульфида повышает антифрикционные свойства, однако имеется ряд недостатков: с возрастанием нагрузки и температуры существенно возрастает коэффициент трения. Дисульфид молибдена обладает высокой химической активностью и легко вступает в реакцию с водой и кислородом [257].

Широкое применение находят присадки к маслу и топливу. Выполняя различные функции, смазочные масла оказывают влияние во всех основных сопряжениях двигателя и происходящие в них процессы трения и изнашивания. Присадки к топливу имеют достаточно определенное назначение и влияют только на процессы, происходящие с деталями ЦПГ [243]. Большинство прирабочных присадок – сложные металлоорганические соединения хрома или алюминия, которые растворены в топливе. При сгорании эти соединения превращаются в мелкодисперсные абразивные частицы. Попадая на стенки цилиндров и образуя притирочные пасты, которые благодаря своей высокой твердости и температуры плавления влияют на усиление приработки деталей ЦПГ [229]. Наиболее распространены металлоорганические соединения на основе алюминия. К положительным качествам этих присадок относится точное дозирование и равномерное распределение по поверхности цилиндра без применения специальных устройств. Негативным фактором выступает повышенный износ деталей цилиндро-поршневой группы и топливной аппаратуры при длительном хранении они теряют свою эффективность.

Для повышения противоизносных свойств топлива используются поверхностно- и химически активные присадки. К ним относятся жирные кислоты, эфиры органических кислот и спиртов, жирные амины и др. Действие поверхностно-активных присадок связано с повышением прочности смазочной пленки [209]. Способность этих присадок понижать трение в большей мере, чем это может зависеть от вязкости масел. В то же время известны слабые стороны активных присадок - при высоких температурах, они снижают термоокислительную стабильность моторных масел, обладают недостаточной растворимостью и являются весьма редкими и дорогостоящими. Эти недостатки не приемлемы для современных предприятий.

К химически активным присадкам относятся различные соединения хлора, фосфора и др. Как уже известно, фосфор способствует повышенному износу сопряжений, особенно в начальный период приработки, сокращая время нормальной работы деталей [270].

Данные работ И. А. Кравца [168,169] с добавлением в моторные масла химически активных присадок продемонстрировали уменьшение микротвердости зеркала гильз цилиндров в процессе приработки с последующей стабилизацией на эксплуатационном уровне. В серийном эксплуатационном моторном масле микротвердость поверхности вначале возрастала в 1,5...2 раза в сравнении с исходной, затем снижалась, стабилизируясь на исходном уровне микротвердости. Кравцом И. А. отмечается, что поверхностно-активные присадки к маслу (0,2 % олеиновой кислоты к маслу ДС<sub>п</sub>-II) в значительной мере интенсифицируют процесс приработки, при этом понижаются критические удельные нагрузки на трущихся поверхностях, в результате чего снижается опасность схватывания и заклинивания кривошипно-шатунного механизма.

Обкатка двигателей на отработанных маслах разработаны в Харьковском строительном институте [271]. По наблюдениям В. А. Лемаха для получения оптимальных показателей двигателя по мощности и расходу топлива длительность обкатки на отработанном масле составила около 2 часов, а на свежем дизельном моторном масле 3 часа, при соблюдении равных условий. Под отработанным маслом – принято считать моторное масло, проработавшее в двигателях внутреннего сгорания некоторый период времени. В. А. Лемах отмечает хорошую прирабатывающую способность масла отработавшего в двигателях 50...60 часов. Считается, что фактором лучшей прирабатывающей способности становятся наличие механических примесей продуктов износа, пыли, различных результатов окисления масла [271].

Холодная обкатка двигателей на водном растворе эмульсола, а горячая на эксплуатационном масле. Этот вариант обкатки разработан в Челябинском институте механизации и электрификации сельского хозяйства [267]. Проведенные исследования позволили сделать вывод, что лучшее качество приработанных поверхностей, наименьший первичный износ и наименьшая интенсивность износа после обкатки двигателя разрешает говорить, что срок работоспособности двигателей, прошедших холодную обкатку с применением раствора эмульсола, будет гораздо дольше по сравнению с двигателями без или с применением других СОЖ. Гаенко Л. М. предложил способ приработки двигателя внутреннего сгорания [72] интересный тем, что он включает режимы как холодной, так и горячей обкатки, причем продолжительность их режимов определяется по моменту достижения заданной величины механических потерь в двигателе. Этот способ отличается тем, что при холодной обкатке осуществляют, с целью уменьшения продолжительности, рециркуляцию воздуха из выпускного коллектора в впускной. Достигается снижение времени в 1,5 раза. Сравнительно с остальными способами недостатком является дороговизна и большая продолжительность.

С целью ускорения приработки И. А. Жигалов и С. П. Андронов [270] изобрели способ обкатки узла трения. Он заключается в том, что детали узла трения погружаются в ванну с составом для травления (2...24 % раствор фосфорной кислоты) и возбуждают в ней ультразвуковые колебания с частотой 0,02...1 МГц ультразвуковым генератором в течение 30...50 секунд. Затем детали вынимают из ванны, смывают и нейтрализуют остатки кислоты в 0,3...0,5 %-ном растворе каустической соды при температуре 25...30 °С в течение 30...50 секунд.

После этого рабочие поверхности деталей узла трения погружают в ванну со смазкой, которая предназначена для смазки узла в эксплуатационных условиях, возбуждают в нем ультразвуковые колебания с частотой 0,02...1 МГц и выдерживают 10...40 минут. Когда время обработки закончится, деталь вынимают из ванны. Предлагаемый способ, при прежней износостойкости узла, трения снижает время приработки в 14,4...54,5 раза [271]. Недостатком данного способа является то, что большая поверхность трения при обработке ультразвуком потребует чрезвычайно высоко-мощного источника электроэнергии и больших энергозатрат. Не нашли решения проблемы обработки громоздких деталей сложной конфигурации ультразвуком. Указанные недостатки повлияли на описанный способ приработки, и он не нашел широкого применения.

Способ формирования сервовитной пленки на трущихся поверхностях [113] состоит в том, что из определенного количества природного кварца, предварительно истертого, и органического связанного, образуют состав для формирования сервовитной пленки, содержащей 0,1...0,5 массовых долей природного истертого кварца, остальное – синтетический солидол. Дисперсность кварца 0,1...0,5 мкм. Смесь подвергают механоактивации на виброустройстве с интенсивностью виброактивности до  $1,5...2 \text{ м}^2/\text{с}^3$  продолжительностью 10 минут. Готовую смесь подают в зону трения на контактирующие между собой поверхности и проводят приработку в режиме  $P = 3 \text{ МПа}$ ,  $V = 0,1 \text{ мкс}^{-1}$ . В процессе приработки на трущихся поверхностях формируются сервовитные пленки. Они позволяют повысить долговечность и уменьшить коэффициент трения в местах соприкосновения поверхностей. Данным способом возможно приработать всего лишь сопряжение гильза-поршневые кольца. Остальные детали, такие как коренные и шатунные вкладыши прирабатываться не будут, так как данная смесь достаточно густая и ее невозможно подать по каналу коленвала к коренным и шатунным вкладышам.

#### **1.4.2 Применение электрохимической обработки для приработки трущихся поверхностей**

Способ электрохимической обработки (ЭХО), позволяющий создать пористый рельеф сопрягаемых поверхностей, впервые предложил доктор технических наук С. В. Венцель [61]. При взаимодействии электролита с металлом, работающего в качестве катода, на последнем образуются покровные пленки.

Механизм электропроводности во многом зависит от условий их возникновения и состава. Если пленка является проводником, то ток проходит через поры в ней, благодаря чему образуются микропористости (до 150...300 на 1 мм<sup>2</sup> при глубине 20 мкм) способствующие увеличению маслостойкости рабочей поверхности. Сама установка состоит из источника постоянного тока низкого напряжения, ванны для электролита, насоса, электродного устройства. Обрабатываемую деталь (комплект вкладышей для двигателя СМД-60) устанавливают на катод с зазором (0,1...0,3 мм) “плюс” источника подключен к детали и последовательно включают подачу электролита и источник тока. Применяется электролит на основе серной и ортофосфорных кислот, анодная плотность тока в пределах 30...50 А/см<sup>2</sup> температура 70...90°С, время обработки 1...12 мин. Лабораторные испытания проведены для определения эффективности предложенного способа на машине трения МИМ-1. Сравнивались образцы, вырезанные из коренных вкладышей, которые прошли ЭХО, и заводского изготовления, при взаимодействии с роликом из стали 45 с термообработкой (твердость не менее 52 HRA), что соответствует твердости шейки коленчатого вала.

На тщательно вымытую и обезжиренную колодочку наносили тонкий слой масла М-10Г, устанавливали в державку и проводили приработку пары ролик-колодочка, предварительно демонтировали с машины масляную ванну. Смазка осуществлялась только маслом, нанесенным на образец. Приработку вели до образования задира поверхностей, о чем судили по резкому увеличению момента сил трения. Время работы до образования задира фиксировали с пятикратной повторностью. Для ЭХО образцов это время составило 95 минут, а для заводских изделий – 56 минут. Таким образом, выяснили, что поверхность, обработанная электрохимическим способом, дольше сохраняла условия самосмазывания. При работе происходило постоянное торцевое истечение масла, масляная пленка уменьшалась по толщине до минимума и в какой-то момент наступал металлический контакт, характеризующийся локальными вспышками температуры. При этом из микрорезервуаров образцов, вследствие теплового объемного расширения на поверхности выделялась порция масла и нарушенная масляная пленка восстанавливалась.

Для исследования процессов, происходящих в паре трения вкладыши – коленчатый вал двигателя СМД-60 была применена установка, имитирующая работу подшипника 3-ей коренной шейки и вырезанные из вкладышей заводского изготовителя колодочки наряду с колодочками, обработанными электрохимическим способом. Эксперимент проводился в соответствии регламенту заводской обкатки для двигателя СМД-60 (холодная обкатка - 20, горячая – 135 минут).

Холодная обкатка воспроизводилась при работе экспериментальной установки без нагрузки, горячая путем нагружения пары трения с помощью устройства, развивающего усилие 608 кН, соответствующее среднеиндикаторному, за цикл для 3-ей коренной шейки. В процессе фиксировались: момент сил трения, температура в зоне трения. Результаты продемонстрировали, что у ЭХО-образцов момент сил трения и температура стабилизируется за более ко-

роткий срок времени, чем у образцов заводского исполнения. Эксперимент свидетельствует о более быстрой приработке поверхностей, обработанных электрохимическим способом. Взвешивание образцов до и после работы на установке показала, что износ (по массе) в 3...4 раза меньше, чем у образцов, необработанных ЭХО способом, следовательно, вкладыши с микропористой структурой по износостойкости превосходят заводские [61,94].

По данным Волченкова А.В., Буше Н.А. к трибологическим принципам назначения режимов обкаточных испытаний можно отнести то, что направление процессов в контакте (приспосабливаемость-заедание) обусловлено физической и химической природой защитных пленок, условиями смазки, которые определяются диапазоном изменения текущих значений параметров внешнего воздействия. Для обеспечения эффективной приработки параметры внешнего воздействия должны назначаться таким образом, чтобы: а) не наблюдалось необратимых процессов, сопровождающихся повышением коэффициента трения, т.е. внешними воздействиями должны быть созданы условия прохождения приработки, когда сопряжения не получают повреждений поверхностей и интенсивно реализуются процессы приспособляемости; б) не имели место режимы жидкостной смазки, когда поверхности трения полностью разделены слоем смазки и приработочные процессы неосуществимы [69].

### **1.4.3 Применение электрохимического полирования для приработки трущихся поверхностей**

Начало исследования электрохимического полирования (ЭХП) связано с опубликованными в 1935-1936 г.г. работами П. Жаке, в которых была показана возможность получения блестящей поверхности некоторых металлов при их анодной обработке в растворах фосфорной кислоты или смесях хлорной кислоты с уксусным ангидридом [297]. Эффект полирования заключается в сглаживании микронеровностей и возникновении блеска поверхности металла.

Существует множество представлений, объясняющие явления, имеющие место при ЭХП. По Жаке предполагалось, что располагаясь почти параллельно поверхности металла и имея электросопротивление относительно большое, чем масса электролита, этот слой создает благоприятные условия для преимущественного растворения микровыступов.

Эльмор [297] объяснял роль прианодного слоя электролита в процессе полирования не различием электросопротивления прохождению тока к микровыступам и микровпадинам, а диффузионными процессами. Условия диффузии продуктов растворения анода от микровпадин менее благоприятны, чем от микровыступов, что способствует преимущественному растворению последних и сглаживанию поверхности металла.

В отличие от Эльмора, Эдвардс считает [296], что эффект полирования связан с обеднением прианодного слоя акцепторами, представляющими собой ионы или молекулы, которые могут взаимодействовать с ионами растворяющегося металла.

Лайнер В.И. [179] исходит из положения, что поверхность металла при электрохимическом полировании находится в состоянии пассивности на участках микровпадин за счет преимущественного образования на них тонкой, вязкой пленки с большим электросопротивлением, что близко к первоначальным представлениям Жаке.

Щиголев П.В. [284] связывает сглаживание поверхности анода с окисной пассивностью, степень которой неодинакова на участках микровпадин и микровыступов. Сравнительно меньшая степень выступающих участков поверхности металла объясняется более интенсивным растворением окисной пленки на них как за счет преимущественной диффузии ионов металла и электролита, так и за счет несовершенства пленки на этих участках.

Представления о большей роли диффузионных процессов в изменении состояния поверхности металла при анодном полировании получили развитие в работах Кричмара С.И. [176].

Воздвиженский Г.С. рассматривает электрохимическое полирование как процесс электродекристаллизации, т.е. направленного разрушения кристаллической структуры поверхности с постепенно уменьшающимися фигурами травления [67].

Сглаживание микрошероховатостей поверхности анода происходит не за счет повышенной концентрации тока на выступах или диффузионных процессов у поверхности анода, а вследствие обстоятельств, обусловленных кристаллографической неоднородностью поверхности.

ЭХП нашло широкое применение как способ чистовой (окончательной) обработки деталей, работающих в условиях трения, механических нагрузок, коррозии, так как данный процесс связан с изменением микропрофиля и физико-химического состояния поверхности [89].

Электрохимическое полирование обеспечивает лучшие фрикционные свойства трущейся пары, в сравнении с механическим полированием, это подтверждено рядом исследований.

Для определения влияния способа обработки поверхности стали на коэффициент трения, были проведены исследования трущейся пары сталь 45 – сталь 45. Шероховатость поверхности шлифованных образцов соответствовала 9-му классу, механически и электрохимически полированных – 12 классу. В результате испытаний установлено, если одна из поверхностей была электрохимически полирована, коэффициент трения снижается в 2,5 раза по сравнению с механически полированными образцами. Электрохимическое полирование обеих сопряженных поверхностей приводит к снижению коэффициента трения в 3 раза. Сравнение со шлифованными образцами показывает еще большую эффективность электрохимической обработки [268].

Электрохимическое полирование приводит к значительно более быстрой стабилизации коэффициента трения в начальный период эксплуатации. Длительность этого периода уменьшается в 5-6 раз по сравнению с данными, полученными для механически полированных образцов [248].

Лучшие фрикционные свойства поверхности после электрохимического полирования в сравнении с механическим полированием при одинаковом классе шероховатости поверхности обусловлены формой микропрофиля. Микрорельеф, полученный механическим полированием, состоит из преимущественно высокочастотных неровностей, а после электрохимического полирования происходит сглаживание высокочастотных неровностей и остающийся микрорельеф характеризуется низкочастотными неровностями.

Электрохимически полированная поверхность позволяет повысить удельное давление, при котором режим трения переходит в гидродинамический, при этом износ уменьшается в 5 раз в сравнении с механическим полированием [89]. В отличие от механического полирования, электрохимическое позволяет удалять внешний слой металла, загрязненный инородными включениями, без разрушения структуры основы. На полученной таким способом поверхности, в условиях трения образуется окисная пленка повышенной однородности и с прочной связью с основой, что обуславливает высокую стабильность такой пленки.

Все эти преимущества электрохимического полирования, в сравнении с механическим, позволяют использовать этот способ для улучшения фрикционных свойств сопряженных деталей.

По данным, приводимым в работе [179], при испытании трущейся пары бронза-сталь было установлено уменьшение коэффициента трения и износа в зависимости от продолжительности электрохимического полирования. Практически отсутствовала разница коэффициентов трения в начале и конце опыта, т.е. исключался этап приработки трущейся пары. В результате электрохимического полирования сглаживались микрошероховатости, но почти сохранялся макропрофиль поверхности металла.

Поверхность, получаемая электрохимическим полированием, вследствие особенностей микрорельефа менее чем поверхности, сформированные другими методами чистовой обработки, восприимчива к загрязнениям.

ЭХП требует применения специального оборудования (приспособления, инструмента), необходимость точного поддержания режима электролиза, контроля и корректировки раствора, строгого соблюдения температурного режима работы ванны, необходимости тщательной очистки поверхностей деталей перед обработкой (химическая обработка в органических растворителях, электрохимическое обезжиривание). Для интенсификации процесса электрохимического полирования необходимо проводить в проточном электролите, а это требует более сложного оборудования, изготовление и эксплуатация которого обходится дороже, чем стационарных ванн. Кроме того, данный способ не позволяет исправлять макрогеометрические отклонения [268].

Все эти обстоятельства ограничивают применение данного способа при ремонте прецизионных деталей гидроагрегатов.

Одним из направлений в доводке и сокращении времени обкатки является пропускание электрического тока непосредственно через сопряженные детали, которым придается рабочее движение. Этот способ применяется для при-

работки основных сопряжений ДВС и является одним из перспективных направлений в исследовании. Наложение тока на поверхности при трении открыло ряд новых явлений [159,163,164,181] нашедших непосредственное применение в производстве. А Иноуэ Киеси ускорил приработку за счет ее проведения в специальных жидкостях (вода-графит, электролит-графит, электролит-абразивные частицы) с применением комбинированных способов (гальваническая и механическая обработка) [152].

Существуют способы, когда ток пропускается через сопряжения непосредственно во время приработки [2]. Этот способ был разработан в ГОСНИТИ Воловиком Е.Л. с сотрудниками для приработки основных сопряжений ДВС. Постоянный электрический ток через сопряжения пропускается с помощью установки КИ-11041.

При холодной обкатке ток 3...5 А и напряжением 0,8...1,2 В подавался в течение 25 минут через токосъемник на коленчатый вал дизеля и на блок [2]. При подаче тока оставшиеся микровыступы образуют термопары, размыкание которых в диэлектрике приводит к возникновению электрической микродуги и разрушению анодных выступов с образованием на их месте микрократеров глубиной до 5 мкм [206]. Как известно, электроэрозия вызывает образование мелких твердых частиц [164], которые в контакте могут играть роль абразива, что может являться причиной возрастания начального износа сопряжений, [270]. Характерной особенностью способа, предложенного Воловиком Е.Л. является то, что приработка происходит при разделении деталей масляной пленкой.

Как следует из всего вышеизложенного, большинство технологических приемов используемых для доводки деталей, имеют свои недостатки и оказываются недостаточно эффективными при макроприработке поверхностей.

#### **1.4.4 Электрохимико-механическая приработка трибосопряжений**

Существует способ приработки деталей цилиндрично-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма электрохимико-механической приработки использующий электрохимическое и механическое воздействие, благодаря чему обеспечивается быстрая макрогеометрическая приспособляемость деталей.

В течение ряда лет на кафедре ремонта машин и технологии конструкционных материалов Луганского государственного аграрного университета под руководством Алексеева В. П. велись работы по изучению и внедрению в производство электрохимико-механической приработки (ЭХМП). Активное участие в разработке способа принимал академик АН МССР Ю. Н. Петров. Затем исследования были продолжены автором в Восточноукраинском национальном университете им. В. Даля. Этот способ приработки защищен авторскими свидетельствами [1, 3] и патентами [211, 212, 213, 214,215].

Сущность ЭХМП состоит в следующем: деталям придается рабочее движение, в зону трения вместо масла подается электролит и через сопряжен-

ные детали пропускается переменный ток. В результате механического и электрохимического взаимодействия происходит быстрая макрогеометрическая прирабатываемость поверхностей [12, 127,170].

Метод ЭХМП нашел широкое применение при обкатке ДВС [14,18,224,233]. Проведенные исследования и внедрение на ремонтные заводы доказало эффективность ЭХМП при приработке основных сопряжений ЦПГ и КШМ. Ранее применялась отдельная однофазная приработка. Затем была разработана совместная трехфазная и однофазная для приработки отдельных сопряжений машин. Этапы выполнения различных способов электрохимико-механической приработки представлены на рис.1.5.

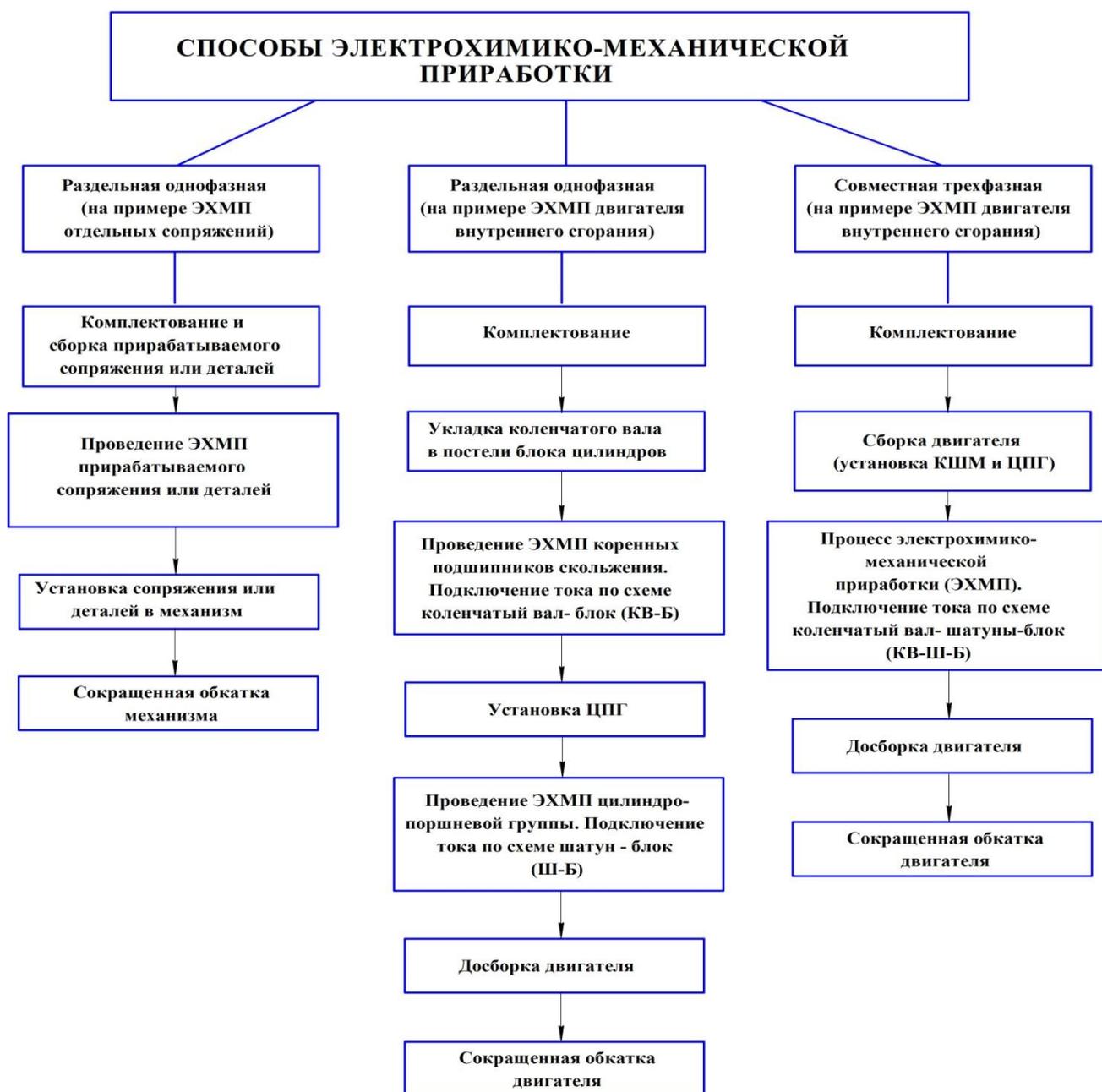


Рис.1.5 - Существующие способы ЭХМП

Первые исследования метода ЭХМП были проведены на трибосопряжениях сталь-чугун, сталь-сплав АСМ в среде водных растворах солей на машине трения СМЦ-2 [22] было установлено, что для данных сопряжений наилучшим является электролит, содержащий в своем составе 10 %  $\text{NaNO}_3$ , 0,6 %  $\text{NaCl}$  и 0,4 %  $\text{NaHPO}_4$ . Причем на площадь пятна контакта на чугуне влияет лишь концентрация поваренной соли: с ростом последней площадь пятно контакта уменьшается.

Было установлено, что сила тока существенно влияет на съём металла прирабатываемого сопряжения и развитие площади пятна контакта. Выявлено, что повышенные значения силы тока могут быть эффективно использованы для приработки деталей с искаженной геометрической формой рабочих поверхностей [15].

Характер влияния нагрузки на исследуемые показатели прирабатываемости также зависит от природы материалов. В трибосопряжении сталь-чугун износ материалов увеличивается с ростом нагрузки и растет площадь пятна контакта. Скорость скольжения оказывала более сложное влияние на характер изменения показателя прирабатываемости [16].

Отличается переход от граничного трения к полужидкостному и жидкостному с увеличением частоты вращения такое предположение вызывает характерные изменения показателей прирабатываемости. Результатом исследований по выбору состава электролита для ЭХМП явилось предложение принять смесь 1/5 – 1/3 ч. по объему водного раствора хлористого натрия или нитрата натрия с концентрацией от 10 % до насыщения с глицерином [21]. В дальнейшем применялись в основном три электролита, представляющих собой смеси растворов солей  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaNO}_2$  и  $\text{NaNO}_3$  и глицерина в соотношении 1:4. ЭХМП на таких электролитах значительно улучшает условия теплоотвода, вымывания продуктов изнашивания и смазки трущихся поверхностей. Но вопрос выбора оптимального состава электролита до конца не решен и требует дальнейших продолжений исследования. Учитывая реальную точность деталей, поступающих на сборку двигателя при его ремонте, вопросам макроприработки основных сопряжений следует уделять повышенное внимание. В. П. Алексеев и Л. Н. Болдарь утверждают, что негативное влияние низкой точности деталей, поступающих на сборку двигателей, на ресурс ЦПГ значительно снижается с применением ЭХМП. Качество приработки деталей ЦПГ оценивалась по угару масла определяемого согласно ГОСТ18509-73[6]. Испытания показали, что в среднем угар масла составил 0,74 %, что значительно меньше норм, предусмотренных техническими требованиями на ремонт. Увеличение ресурса и уменьшение уга-ра моторного масла обеспечивается меньшей величиной первичного приработочного износа деталей и меньшей интенсивностью износа при эксплуатации [12].

Ситуация сложившаяся на сегодняшний день, связанная с производством деталей машин, требует поиска решений способа улучшения их исходного низкокачественного состояния. Применение вязких электролитов при макроприработке сопряжений цилиндро-поршневой группы позволило значительно

улучшить качество приработки [38,40]. Протекание электрохимико-механических процессов, приводящих к приработке, зависит от условий смазки. Исследования показали, что при малых скоростях перемещения поршня ( $V = 0,2$  м/с) без газовых нагрузок переходное сопротивление несколько повышается в средней части хода поршня, с возрастанием скорости до 1,6 м/с сопротивление было высоким по всему ходу поршня, кроме участков, прилегающих к мертвым точкам. При частоте вращения свыше  $150 \text{ мин}^{-1}$  преобладающим является гидродинамические режимы трения между кольцом и гильзой [149]. В условиях ЭХМП при гидродинамической смазке на прирабатываемых поверхностях протекает чисто электрохимическая реакция: ток проходит через детали, разделенные слоем электролита. Следствием этого является травление поверхностей при их анодной поляризации с частотой переменного тока [6]. Режим граничного и переходного трения, помимо прочего, усиливает эффект электрохимической реакции при жидкостном трении. В результате механических и электрохимических воздействий, достигается быстрая приработка ЦПГ.

С точки зрения проводимости смазанного контакта граничные смазочные пленки можно условно разделить на два типа: а) «толстые» (свыше 1 нм) моно- и полимолекулярные пленки, обеспечивающие хорошие антифрикционные качества контакта, но одновременно исключают его высокую электропроводность; б) «тонкие» ( $\leq 1$  нм) неразрывные или имеющие отдельные разрывы (металлические пятна) пленки, характеризующиеся высоким уровнем контактной проводимости. В практике эксплуатации сопряжений с точечной контактной геометрией, как при стационарном положении, так и при скольжении могут быть реализованы условия для существования обоих типов граничной смазочной пленки.

Для формирования тонкой пленки необходимо достижение некоторого характерного для данного смазочного материала и металла подложки критического давления, приводящего к разрушению структуры граничного слоя [74].

Гидродинамический режим смазки подшипника скольжения в настоящее время характеризуется: минимальной толщиной смазочного слоя  $h_{\min}$ , эюрой распределения давления и характеристики определяются как расчетным методом, так и экспериментально, причём если расчётные и экспериментальные значения  $h_{\min}$ , а также давления в масляном слое имеют удовлетворительную сходимость, то траектория перемещения центра вала шатунного подшипника, полученная расчётным путём, существенно отличается от экспериментальной [116].

Электрохимическая обработка имеет ряд положительных свойств: во-первых, воздействие на материал производится наложением тока на среду и детали и происходит на тонком уровне, в результате чего продукты съема находятся в виде атомов, молекул; во-вторых, при ЭХРО происходит снятие внутренних напряжений как в микро-, так и в макрообъеме поверхностных слоев материала; в-третьих, при сочетании определенных материалов можно добиться качественного легирования поверхности; в-четвертых, электрохимическая

обработка позволяет производить при определенных условиях и локальный съем материалов деталей [322].

Большое внимание вопросам приработки трибосистем уделяется учеными во всём мире, так Петер Блау [311] выделил восемь разновидностей зависимостей момента трения в начале приработки. В его работах заложены фундаментальные основы в изучении процессов приработки.

Во всем мире наиболее перспективным при приработке трущихся поверхностей является применение совмещённых процессов. Электрохимико-механическое полирование широко применяется для формирования поверхностей с заданными свойствами на деталях из карбида кремния [291,306], титана [325], на медных поверхностях [316,325,288] в электронной промышленности [308]. Основы технологии электрохимико-механического полирования описаны учёными Китая и Тайваня [304,314,310]. Применение ЭХМП позволило добиться отличных результатов при изготовлении жестких дисков компьютеров [288]. Основы электрохимико-механической приработки меди и серебра еще раз доказывают эффективность данного вида приработки за счёт того, что формообразование поверхности проходит и при гидродинамическом режиме трения за счет электрохимического фактора процесса [318...321]. Применение органических кислот значительно усиливает положительный эффект при химико-механическом полировании поверхностей при изготовлении современных деталей микроэлектронной промышленности [295,301]. Зарубежными учёными разрабатывались математические модели процесса с учётом внедрения абразивных частиц в обрабатываемую поверхность [292], кроме этого были разработаны модели химико-механического полирования меди с помощью плоского притира [300]. Особое место в исследованиях уделяется формированию разделительных слоев смазки между трущимися поверхностями [298,299,305].

Согласно исследованиям Кембриджского и Массачусетского институтов технологии Д. Окуму Оума и Дьюну С. Бонингу эффективным оказывается даже применение химико-механического выравнивания поверхностей с формированием во впадинах шероховатости оксидных пленок [292]. Подобных результатов достиг и Дик де Рувер в своей статье [295].

Позже была сделана попытка раскрыть механизм макроприработки поршневых колец к зеркалу гильз цилиндра, исследовать выходы по току при различных режимах трения в паре кольцо-гильза. Были проведены исследования по выбору рационального состава электролита, определен оптимальный режим ЭХМП цилиндрической поверхности поршневых колец. В работе Т. Н. Замоты [127] показана принципиальная возможность исправлять макрогеометрию трущихся деталей путем ЭХМП, которая характерна для деталей ремонтируемых двигателей, и развивать площадь пятна контакта при сравнительно небольшом износе. Было отмечено, что на изменение макрогеометрии оказывает влияние электрические параметры и режим нагружения трущихся пар.

Исследования контактного взаимодействия смазанных поверхностей, проведенные А.Г. Кузьменко и А.В. Дихой, позволяют рассмотреть вопросы приработки трущихся поверхностей с учетом механического фактора изнаши-

вания для сопряжений, не имеющих погрешностей [177, 178]. Вопросы приработки подшипников скольжения с макрогеометрическими отклонениями подняты Сорокатым Р.В.[244]. В монографии разработана методика расчета параметров изменения триботехнических характеристик контакта цилиндрических сопряжений с искаженной макрогеометрией.

Метод оценки триботехнических свойств для условий режима работы представлен в монографии Дмитриченко Н.Ф. и Мацаканова Р.Г. Результатом явилась математическая модель зависимости интенсивности износа от исходных параметров (толщины масляного слоя, работы трения, динамической вязкости масла, микротвёрдости, режима работы) [104].

Однако, с учетом реального состояния блоков, вкладышей, коленчатых валов и других деталей двигателей и других механизмов, влияния электрохимического фактора процесса требуется разработка теоретических предпосылок обеспечения макрогеометрической приработки основных сопряжений путем ЭХМП.

В настоящее время окончательно не раскрыт механизм ЭХМП основных сопряжений машин с макрогеометрическими отклонениями, а также закономерности изменения триботехнических характеристик. Известно, что контактные давления между деталями механизма, имеющего макрогеометрические отклонения, зависят от величины этих отклонений, поэтому этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Применение ЭХМП имеет ряд существенных преимуществ перед другими видами окончательной обработки. В отличие от абразивной притирки при ЭХМП полностью исключается образование абразивных частиц в виде продуктов износа и других видов, так как воздействие на материал производится наложением тока на среду и детали и происходит на тонком уровне, в результате чего продукты съема находятся в среде в виде атомов, молекул. Как и при электрохимическом полировании, при ЭХМП происходит снятие внутренних напряжений, как в микро-, так и макрообъеме поверхности материала. ЭХМП позволяет производить локальный съём металла, но при этом отсутствуют пассива ионные явления, характерные для электрохимической обработки. Кроме того ЭХМП обеспечивает совместную обработку деталей без применения специальных инструментов в отличие от абразивной и электрохимической обработок, благодаря этому происходит быстрая структурная, микро- и макрогеометрическая приспособляемость трущихся поверхностей.

Известно, что электрохимико-механическое взаимодействие трущихся поверхностей позволяет приспособлять их макрогеометрии друг к другу. В ряде гидроагрегатов в качестве материалов сопрягаемых деталей используется бронза и сталь. Финишной обработкой их поверхностей служит абразивная доводка. Одним из недостатков ее является некачественная подготовка поверхности и искажение макрогеометрии сопрягаемых деталей. Из-за этого имеет место малая фактическая площадь пятна контакта, что приводит к значительному приработочному износу при допустимых зазорах в сопряжении 0,002...0,006 мм. Причем изнашивание сопровождается схватыванием, натирами и т.п. Кро-

ме того, в процессе абразивной доводки возможно шаржирование поверхности, что значительно увеличивает износ в эксплуатации.

Возможным путем решения задачи повышения качества приработки основных сопряжений гидроагрегатов может быть электрохимико-механическая приработка. Однако ЭХМП данных сопряжений на применяемых электролитах [34,37] затруднена, так как при больших нагрузках и малых зазорах имеет место граничный режим трения, что уменьшает электрохимическую составляющую процесса приработки.

## **1.5 Сравнительный анализ методов приработки поверхностей трения**

Существующие методы приработки трущихся поверхностей можно разделить на десять основных видов (рис.1.4). Первым из них является подбор рациональных нагрузочно-скоростных режимов и режимов смазки, при которых изменяется динамика контактного взаимодействия и разделение трущихся поверхностей маловязкими маслами. Такой подход позволяет ускорять приработку, но высока вероятность появления задиров. Нанесение прирабочных покрытий, проведение химико-термической обработки, применение присадок к маслу и топливу (второй, третий, четвертый и пятый вид) приводит к образованию третьего тела между трущимися поверхностями и снижению коэффициента трения, что иногда затрудняет макроприработку. Появление абразива при сгорании топлива с некоторыми присадками ускоряет приработку, но увеличивают прирабочные износы.

Остальные виды можно отнести к совмещенным процессам, при которых воздействие на прирабатываемые поверхности происходит за счет взаимодействия физических и химических факторов, что значительно интенсифицирует процесс приработки и повышает его качество.

Наряду с достоинствами каждый метод имеет свои недостатки. Выводы об эффективности применения того или иного метода можно сделать на основе их анализа. Сравнительный анализ методов приработки поверхностей трения приведен в табл.1.2.

С целью объективной оценки существующих способов приработки проведем многокритериальную оценку, результаты которой представлены в табл.1.3. В качестве критериев оценки были выбраны наиболее важные для формирования износостойких поверхностей и позволяющие эффективно способствовать макроприработке трущихся деталей. Одним из таких показателей для оценки эффективности способа приработки является отсутствие абразива (критерий 1).

Интенсификация приработки с добавлением или формированием абразивных частиц, хотя и ускоряет процесс, но значительно повышает прирабочный износ, а также способствует шаржированию мягких поверхностей тре-

ния (например, вкладышей подшипников скольжения) и их дальнейшему быстрому износу.

Таблица 1.2 - Анализ методов приработки поверхностей трения

Наименование метода приработки	Достоинства	Недостатки
<b>1.Подбор рациональных нагрузочно- скоростных режимов и режимов смазки</b>	маловязкие масла обладают высокой охлаждающей способностью и текучестью, легко проникают в зазоры между поверхностями трения и вымывают инородные частицы загрязнений и продукты изнашивания, попадающие в это пространство. При использовании маловязких масел ускоряется процесс приработки	из-за малой несущей способности и относительно низких смазывающих свойств масляного слоя возникают предпосылки для задиоров поверхностей трения
<b>2.Нанесение прирабочных покрытий</b>	<b>свинцовые покрытия</b> улучшают прирабатываемость и повышают сопротивляемость задиру	сравнительно быстро окисляются
	<b>осаждение олова</b> на поверхности хромового покрытия поршневых колец уменьшает время приработки и несколько увеличивает несущую способность трущейся пары	длительность действия олова в этом случае кратковременна из-за плохой адгезии с хромом
	<b>использование твердых смазок</b> в виде графита и дисульфида молибдена повышает антифрикционные свойства	с увеличением нагрузки и температуры коэффициент трения возрастает, а дисульфид молибдена обладает высокой химической активностью и легко вступает в реакцию с водой и кислородом
	<b>фосфатные покрытия</b> значительно повышают стойкость к заеданию	в начальный период износ деталей с покрытиями резко возрастает, т. к. поверхности имеют большую шероховатость ( $R_a = 6 \text{ мкм}$ )
<b>3. Проведение химико-термической обработки поверхностей</b>	весьма эффективные и широко используются в промышленности [65]	сложные и трудоемкие процессы, поэтому они не нашли должного применения в ремонтном производстве [65]. Требуют применения специального оборудования и оснастки для проведения процесса.

Продолжение табл.1.2

Наименование метода приработки	Достоинства	Недостатки
<b>4. Использование присадок к смазочному маслу</b>	оказывают влияние на процессы трения и изнашивания всех основных сопряжений двигателя	окончательная приработка трущихся поверхностей происходит после действия присадки
инактивные (коллоидный графит, дисульфид молибдена, мелкодисперсный порошок каолина, порошковое олово и др.)	приводит к сокращению процесса приработки	не оказывают активного действия на формирование необходимых физико-механических свойств поверхностных слоев трущихся деталей, поэтому после смены масла возникают дополнительные приработочные явления [270]
поверхностно-активные (жирные кислоты, эфиры органических кислот и спиртов, жирные амины и др.)	механизм действия присадок связан с повышением прочности смазочной пленки [98]. Эти присадки способны понижать трение в большей мере, чем это может зависеть от вязкости масел. Отмечается, что поверхностно-активные присадки к маслу (0,2% олеиновой кислоты к маслу ДС <sub>П</sub> -II) значительно интенсифицируют процесс приработки деталей	они имеют слабые противозадирные свойства при высоких температурах, снижают термоокислительную стабильность моторных масел, обладают недостаточной растворимостью и являются дефицитными и дорогостоящими. Из-за этих недостатков ПАП практически не применяются при обкатке двигателей [271]
химически активные (соединения хлора, фосфора и др.)	могут ускорять процесс приработки трущихся поверхностей [68]	фосфор может способствовать повышенному износу сопряжений в начальный период времени [93], при этом понижаются критические удельные нагрузки на трущихся поверхностях, в результате чего возрастает опасность схватывания и заклинивания деталей кривошипно-шатунного механизма; соединения хлора являются химически активными и могут вступать в реакцию с металлами деталей машин, что вызывает коррозионные процессы.

Продолжение табл.1.2

Наименование метода приработки	Достоинства	Недостатки
<p>присадки с органическими соединениями меди</p>	<p>-для реализации эффекта избирательного переноса при трении используют обкаточное масло ОМП - 2 , присадку ОГМ и другие содержащие органические соединения меди. Снижение массового износа ЦПГ в 1,5...2 раза при использовании обкаточного масла ОМП - 2 объясняется образованием на рабочих поверхностях налета меди .</p> <p>- взаимодействие присадок в моторном масле с трущимися поверхностями приводит к образованию в контакте своеобразного "третьего тела" в виде тонких пленок , наблюдается снижение приработочного износа и сокращение времени приработки [66,257].</p>	<p>при наличии макрогеометрических отклонений от идеальной формы наблюдается неравномерные приработка и величины износов [84].</p>
<p><b>5. Использование присадок к топливу:</b> представляют собой сложные металлоорганические соединения хрома или алюминия, растворяемые в топливе</p>	<p>при сгорании топлива такие соединения образуют мелкодисперсные абразивные частицы. Эти частицы попадают на стенки цилиндров и образуют притирочные пасты, благодаря высокой твердости и температуре плавления усиливают приработку деталей ЦПГ, обеспечивается точное дозирование и равномерное распределение по цилиндрам без применения специальных устройств</p>	<p>влияют на приработку только деталей ЦПГ, эти присадки вызывают повышенный износ деталей цилиндро-поршневой группы и теряют свою эффективность при длительном хранении, а в некоторых случаях увеличивают износ и заедание топливной аппаратуры [269]</p>
<p>используются поверхностно - и химически активные присадки</p>	<p>при добавлении 0,8...1,2% присадки растворенной и коллоидной серы в смазочное масло и топливо обкатываемых двигателей мощность механических потерь снижается на 25...35%, а износ гильз цилиндров - в 2,5 раза</p>	<p>при работе двигателя на топливо-воздушной смеси с присадкой сернистого ангидрида (SO<sub>2</sub>) в количестве 0,23% серы в бензине, износ возрастает в 4 раза по сравнению с обычными условиями. На сернистом топливе скорость изнашивания верхнего поршневого кольца увеличивается в 2 - 2,5 раза по сравнению с работой на топливе с малым содержанием серы [270] .</p>

Продолжение табл.1.2

Наименование метода приработки	Достоинства	Недостатки
<b>6.Химико-механическое выравнивание поверхностей</b>	повышается производительность процесса	выравнивание поверхности происходит по схеме инструмент-деталь, повышенные давления на поверхность приводят к скалыванию, выравнивание поверхности недостаточное
<b>7. Изменение электромагнитного состояния деталей (электроэрозионный способ приработки)</b>	приводит к сокращению процесса приработки [205,206]	электроэрозионное воздействие на поверхности приводит к максимальному упрочнению поверхности, что особенно недопустимо для основных сопряжений двигателей, наличие абразивных частиц приводит к шаржированию поверхностей и усиливает износ
<b>8. Использование электрохимической размерной обработки (ЭХРО)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- воздействие на материал производится наложением тока на среду и детали и происходит на тонком уровне, в результате чего продукты съема находятся в среде в виде атомов, молекул;</li> <li>- при ЭХРО происходит снятие внутренних напряжений, как микро-, так и макрообъеме поверхности материала;</li> <li>- при сочетании определенных материалов происходит качественное легирование поверхности [115,217]. ЭХРО позволяет производить локальный съем материалов деталей [218].</li> </ul>	необходимо учитывать пассивационные явления [195].
<b>9. Использование электрохимического шлифования (полирования)</b>	при электрохимическом шлифовании происходит снижение сил резания при обработке сталей в 3-5 раз, твердых сплавов в 1,2 - 2,7 раза. Понижается температура резания, что исключает появление прижогов и микротрещин в поверхностном слое, возрастает производительность металлосъема [287,288].	невозможна совместная приработка трущихся поверхностей, обработка происходит по схеме инструмент-деталь.

Продолжение табл.1.2

Наименование метода приработки	Достоинства	Недостатки
<b>10.Использование электрохимико-механической приработки (ЭХМП)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- в результате совместного механического и электрохимического воздействия на поверхности, достигается быстрая макрогеометрическая приработка;</li> <li>- макрогеометрическая приработка при ЭХМП осуществляется в режиме холодной обкатки, что особенно важно, с учетом недостаточной структурной термостойкости гальванического хрома;</li> <li>- имеется возможность управлять процессом приработки за счет изменения скоростного показателя - частоты вращения коленчатого вала и токовых параметров <math>I</math> и <math>U</math>;</li> <li>-способ совместной приработки, исключающий наличие в растворе твердых частиц и обеспечивающий электрохимическое взаимодействие трущихся поверхностей при пропускании переменного тока</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-необходимость выдерживания технологии процесса;</li> <li>-включение в технологический процесс изготовления и ремонта машин дополнительной операции.</li> </ul>

Процесс приработки должен исключать возможность появления задиров на поверхностях трения и не способствовать их окислению (критерии 2 и 3). С учетом того, что две поверхности начинают контактировать по очень маленькой площади фактического контакта, то важным является повышение несущей способности пары трения, для исключения катастрофического изнашивания в этот период. Исходя из этого, сложно объективно оценить способ приработки без учета увеличения несущей способности поверхности (критерий 4).

Общим для всех способов является стремление ускорить макроприработку поверхностей. Но бывают исключения, когда приоритетным является формирование качества поверхности (критерий 5). Получение высокого качества приработки сопряжения и машины в целом невозможно без формирования определенной топологии поверхностей трения. Оценка по критерию 6 показывает соответствие рассматриваемого способа современным требованиям.

Очень важна совместная доводка прирабатываемых поверхностей (критерий 7). Отлично доведенные детали по отдельности требуют дополнительной приработки в трибосопряжении. Безусловно, что современный способ приработки должен увеличивать ресурс. Поэтому важна сравнительная оценка по критерию увеличения ресурса (критерий 8). Способ приработки должен быть экономически оправдан (критерий 9), а возможность управления процессом позволяет формировать любые заданные свойства, что является наиболее важным (критерий 10).

Таблица 1.3 - Оценка методов приработки трущихся поверхностей

Наименование метода	Критерии оценки методов приработки поверхностей трения										Сумма положительных критериев
	1) отсутствие абразива	2) отсутствие задиров	3) отсутствие окисления	4) увеличение несущей способности	5) ускорение приработки	6) возможность формирования топологии поверхности	7) возможность совместной доводки	8) увеличение ресурса сопряжения	9) экономичность	10) возможность управления процессом	
1. Подбор рациональных нагрузочно-скоростных режимов и режимов смазки	-	-	-	-	+	-	+	-	+	-	3
2. Нанесение прирабочных покрытий:											
- свинцовые покрытия	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	5
-осаждение олова	+	-	+	+	+	-	-	+	-	-	5
-использование твердых смазок в виде графита и дисульфида молибдена	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	6
-фосфатные покрытия	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	2
3. Проведение химико-термической обработки контактирующих поверхностей	-	+	+	+	+	-	-	+	-	-	5
4. Использование присадок к смазочному маслу											
-инактивные	+	+	+	+	+	-	+	-	-	-	6
-поверхностно-активные	+	-	+	-	+	-	+	-	-	-	4
-химически активные	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	2
5. Использование присадок к топливу:											
-сложные металлоорганические соединения хрома или алюминия, растворяемые в топливе	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	2
-поверхностно - и химически активные присадки	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	2
6. Химико-механическое выравнивание поверхностей	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	2
7. Электроэрозионный способ приработки	-	-	+	-	+	-	+	-	-	-	3
8. Использование электрохимической размерной обработки (ЭХРО)	+	+	-	-	-	+	-	+	-	+	5
9. Использование электрохимического шлифования (полирования)	+	+	+	-	+	+	-	+	-	+	7
10. Использование электрохимико-механической приработки (ЭХМП)	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	10

## 1.6 Выводы по первой главе, цель и задачи исследований

Анализ литературных источников по проблеме трущихся поверхностей сопряжений позволил сделать следующие выводы:

1. Большинство технологических приемов, направленных на ускорение приработки, имеют свои недостатки и оказываются недостаточно эффективными при макроприработке основных сопряжений машин. Прежде всего, следует

отметить их общий недостаток - то, что применение большинства из этих способов вызвано, прежде всего, стремлением ускорить приработку, а не перенести условия структурной приспособляемости на начальный период и именно потому, что внешние факторы воздействия при приработке исключаются, действительная приработка достигается через сотни часов. Кроме того, применение всякого рода покрытий, в том числе и пленок, как, например, графита, меди изменяет внутреннюю структуру основного материала и отрицательно сказывается на дальнейшей эксплуатации. Использование таких присадок как АЛП - 2 и АЛП - 3 приводит к образованию абразивных продуктов износа. Как известно, электроэрозионное воздействие на поверхности приводит к максимальному упрочнению поверхности, что особенно недопустимо для основных сопряжений двигателей. Вместе с тем, применение того или иного способа приработки приводит к сокращению процесса приработки.

2. При приработке основных сопряжений двигателей необходимо отметить высокую вероятность сборки сопряжений из дефектных деталей. Особенно это касается ремонтного производства. Двигатели, в которых детали имеют макроотклонения от правильных геометрических форм, имеют худшие технико-экономические показатели и меньший ресурс, по сравнению с двигателями, собранными из не дефектных деталей. Недостаточно высокая точность обработки и сборки механизмов вызывает необходимость включать в технологический процесс изготовления или ремонта машин и агрегатов их обкатку, при которой происходит приработка трущихся поверхностей.

3. Во время приработки происходят коренные изменения характеристик микрорельефа поверхности и структурно фазового состояния поверхностного слоя. После окончания приработки возникает "равновесная шероховатость поверхности", однако окончательная приработка на микроуровне возможна только после макроприработки сопряжений.

4. В обычных условиях приработка занимает продолжительное время. Обеспечение полной приработки с минимально возможным износом за короткое время увеличивает ресурс сопряженных деталей. Большинство из существующих технологических приемов ускорения приработки не наилучшим образом влияют на макроприработку деталей, которая наиболее интенсивно протекает на стадии холодной обкатки.

5. Для повышения ресурса насосов и предупреждения преждевременных отказов необходимо выполнить главное условие – обеспечить большую площадь пятна контакта сопряженных поверхностей. При существующей технологии абразивной доводки в соответствии с ТУ, площадь пятна контакта сферических поверхностей должна быть не менее 70% от номинальной. Однако, как показывает практика, эта технология не обеспечивает высокой надежности насосов. Поэтому, требуется поиск новых способов, обеспечивающих качественную макроприработку сопряженных поверхностей.

6. Одним из наиболее перспективных направлений в исследовании ускорения и улучшения макроприработки основных сопряжений двигателя является применение совмещенных процессов: электрохимических и механических.

Существует способ приработки деталей ЦПГ и КШМ (ЭХМП), использующий электрохимическое и механическое воздействие, благодаря чему обеспечивается быстрая макрогеометрическая приспособляемость деталей. Применение ЭХМП при обкатке различных типов двигателей подтвердило эффективность способа в целом.

Однако до конца не раскрыт механизм макроприработки основных сопряжений машин с учетом их особенностей, не проведен всесторонний анализ выбора рационального способа приработки сопряженных поверхностей. Необходимо теоретически исследовать процесс компенсации макрогеометрических отклонений трущихся поверхностей основных сопряжений машин при ЭХМП, разработать методологию исследования процесса приработки трущихся поверхностей и оценить результаты исследования изменения триботехнических характеристик трущихся поверхностей деталей при ЭХМП.

Исходя из вышесказанного, была сформулирована цель и задачи исследований. Цель исследования - на основании комплекса теоретических и экспериментальных исследований усовершенствовать метод электрохимико-механический приработки поверхностей деталей основных трибосопряжений машин с макрогеометрическими отклонениями с обеспечением его управляемости.

В соответствии с целью работы решались следующие основные задачи научного исследования.

1. Провести анализ конструкций, условий эксплуатации и повреждаемости деталей точных сопряжений машин, исследовать динамику изменения макрогеометрии поверхностей сопрягаемых деталей в процессе приработки при изготовлении и ремонте.

2. Исследовать режимы приработки типовых сопряжений с учетом отклонений от реальных форм деталей. На основе изучения современных методов устранения макрогеометрических отклонений при приработке определить критерии оценки эффективности существующих методов, сформулировать цель и задачи исследований.

3. Осуществить комплексную теоретическую оценку метода электрохимико-механической приработки.

4. Разработать методологию исследований процесса электрохимико-механической приработки.

5. Провести экспериментальное подтверждение теоретических исследований. Проследить за изменениями макрогеометрии и триботехнических характеристик деталей при ЭХМП различных сопряжений при приработке. Провести оптимизацию режимов приработки сопряжений. Сделать эксплуатационную проверку работоспособности приработанных деталей и узлов машин.

6. Обосновать основы управления процессом приработки поверхностей деталей основных сопряжений машин с макрогеометрическими отклонениями.

7. Расширить область использования метода ЭХМП на основные типы сопряжений машин при их изготовлении и ремонте. Оценить эффективность внедрения результатов исследований.

## ОБОБЩЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. ЭХМП основных сопряжений двигателей является высокоэффективным процессом макроприработки трущихся поверхностей: кроме механического воздействия, характеризуемого  $V_M$ , процесс приработки ускоряется за счет электрохимических процессов. Теоретически обосновано использование для макрогеометрической приработки основных сопряжений машин электрохимико-механического метода (цилиндрических с перекосом и несоосностью; плоских; сферических и зубчатых) и экспериментально доказана его эффективность при повышении эксплуатационной износостойкости трущихся поверхностей деталей, ограничивающих ресурс механизмов.

2. Вид трибосопряжения и погрешности формы и расположения деталей оказывают значительное влияние на развитие площади пятна контакта при макроприработке, поэтому способ приработки должен учитывать особенности различных видов сопряжений и характер макрогеометрического отклонения поверхностей от правильных геометрических форм. При несоосности цилиндрического трибосопряжения площади контакта в десятки раз выше, чем при перекосе. Назначение одинаковых режимов приработки без учета особенностей геометрии контакта может привести к значительному сокращению ресурса сопряжения. Ускорение макроприработки возможно за счет подбора оптимального состава электролита. Он должен обладать низкой электропроводимостью, пассивирующими свойствами, а также способствовать поддержанию гидродинамического режима смазки.

3. Имеется возможность управлять процессами приработки за счет изменения скоростного показателя - частоты вращения коленчатого вала и токовых параметров  $I$  и  $U$ . Режим ЭХМП должен обеспечивать высокий выход по току  $\eta_{ad}$  и минимальный зазор  $h$ .

4. Электрохимико-механическая приработка (доводка) позволяет улучшать макрогеометрию цилиндрических поверхностей трения. Конусность роликов уменьшалась на 80% при напряжении 4В. Добавление олеиновой кислоты (до 4%) к электролиту для ЭХМП способствует росту пятна контакта на колодочке (с 6 мм<sup>2</sup> на чистом электролите, до 20 мм<sup>2</sup> на электролите с 4% содержанием олеиновой кислоты). Дальнейшее повышение концентрации олеиновой кислоты не приводит к увеличению площади.

5. Добавление 5% олеиновой кислоты к электролиту для ЭХМП привело к увеличению в 4 раза удельного развития площади пятна контакта в сравнении с результатами, полученными в опытах на базовом электролите (с 4 мм<sup>2</sup>/мг на чистом электролите, до 16,49 мм<sup>2</sup>/мг на электролите с 5% содержанием олеиновой кислоты).

6. Анализ макрогеометрических отклонений в трибосопряжениях КШМ показал их существенное влиянием на изнашиваемый объем и площадь контакта деталей. Исходя из геометрических параметров изнашиваемого

объема и сравнительного анализа схем трибосопряжений при наличии и отсутствия перекосов, получены аналитические выражения для оценки изнашиваемого объема и площади контактов в трибосопряжении. Отклонения от экспериментальных измерений порядка 8%.

7. Полученные математические зависимости массы изнашиваемого материала при приработке цилиндрических сопряжений с возвратно-поступательным движением позволяют сделать вывод о том, что ЭХМП в 1,5...2 раза более эффективна, чем существующие способы приработки. В опытах без тока возможна приработка механизмов с трехкратным перекосом, при наложении переменного тока силой 5А дефектность механизма может быть увеличена почти до 5-кратного перекоса, и при этом будет обеспечиваться необходимый съем с поршня. В многоопорных валах отклонения от правильных геометрических форм даже одной опоры влияют на электрохимико-механическую приработку всех опор вала в целом; применять формулу для определения минимальной толщины пленки смазочного материала для сопряжений вал-подшипник с макрогеометрическими отклонениями нельзя без учета величины этих отклонений.

8. Для повышения эффективности процесса ЭХМП необходимо обеспечить значение критерия Зоммерфельда  $S_m$  приблизительно равным  $10^{-5}$ , значение рабочего напряжения процесса  $U_p$  должно приближаться к напряжению холостого хода  $U_{xx}$ , которое подбирается опытным путем для обеспечения максимальной скорости электрохимического съема. Процесс ЭХМП можно контролировать электрохимическими и механическими факторами, влияющими на толщину минимального слоя электролита  $h_{min}$ , его электропроводимость  $\chi$  и пассивирующие свойства, формирующих  $R_{эл}$ -сопротивление минимального слоя электролита;  $R_{эл} \cdot h/h_{min}$  -сопротивление слоя электролита в зоне макрогеометрического отклонения и  $R_{пл}$  - сопротивление пассивационной пленки. Наличие пассивационной пленки только ускоряет выравнивание поверхности, поэтому необходимо подбирать электролит с пассивирующими свойствами. При анодном растворении поверхности, ее выравнивание будет зависеть от разницы силы тока  $I_1$  и  $I_2$ . Чем больше эта разница, тем быстрее и эффективнее процесс уменьшения макрогеометрического отклонения

9. ЭХМП может эффективно применяться для приработки различных сопряжений машин:

-полученные экспериментальные доказательства уменьшения приработочных износов и замедление изменения макрогеометрии поверхностей доказывает эффективность способа ЭХМП деталей ЦПГ двигателей, а лучшая износостойкость доведенных чугуновых поршневых колец говорит о целесообразности их доводки по схеме кольцо по кольцу;

- ЭХМП может быть применена для доводки зубчатых зацеплений, как эффективный способ исправления геометрии рабочих поверхностей сопряженных деталей. В зубчатых зацеплениях, имеющих перекося осей

шестерен в пределах допустимых, применение ЭХМП позволяет увеличить площадь пятна контакта на 41,6% от начального. Эффективно процесс электрохимико-механической приработки (доводки) протекает при перекосах зубчатых поверхностей до 3...4 раз превышающих допустимые значения по ТУ;

- электрохимико-механическая доводка торцевых поверхностей канавки втулки кольцевого уплотнения турбокомпрессора устраняет искажение макрогеометрии и приводит к формированию износостойкого микрорельефа, что позволяет снизить приработочный износ деталей кольцевого уплотнения на 30...40% и, соответственно, повысить его ресурс;

- ЭХМП пары трения бронза-сталь позволяет увеличивать площадь пятна контакта с одновременным уменьшением износа. Развитие удельной площади пятна контакта при ЭХМП в три раза выше в сравнении с опытами без тока, поэтому применение этого способа для доводки сопряжений из исследуемых материалов является оправданным. Лучшие результаты получены при силе тока  $I=4A$ , частоте вращения ролика  $700 \text{ мин.}^{-1}$  нагрузке в паре  $P=40H$ . Недопустимо повышение силы тока свыше  $5A$ , так как это вызывает электроэрозионный процесс изнашивания прирабатываемых поверхностей.

- ЭХМД позволяет доводить уплотнительные кольца турбокомпрессора по схеме кольцо по кольцу с 95% вероятностью. Доводимые износы уплотнительных колец турбокомпрессора ТКР-11 находятся в пределах 4-12 мг. Увеличение зазоров в замке не превышало 0,08 мм, и величина зазора находилась в пределах технических условий.

10. Определено, что технологически на процесс ЭХМП пар трения легче всего влиять с помощью скорости  $V$  и нагрузки  $P$ , а откликом процесса взять рабочее напряжение процесса  $U_p$ . Если рабочее напряжение процесса  $U_p$  ниже напряжения холостого хода  $U_{xx}$ , то скорость взаимного перемещения прирабатываемых поверхностей следует повысить, для создания минимальной разделительной пленки электролита, при которой эффективность ЭХМП максимальна. В случае повышения рабочего напряжения  $U_p$  до значений близких к напряжению холостого хода  $U_{xx}$ , целесообразно обеспечить минимальную разделительную пленку электролита повышением нагрузки  $P$ . Напряжение процесса должно быть максимальным, при котором обеспечивается анодное растворение, но исключается электроэрозия поверхности ( $U$  должно находиться в пределах 3,5...4,5В).

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 1045049 (СССР). Способ приработки деталей. / Алексеев В.П., Болдарь Л.Н., Михалёв В.Д. Оpubл. 30.09.83. Бюл.№36.
2. А.с. №337682 (СССР). Способ обкатки двигателей. / Воловик Е.Л., Моисеев А.М., Нигаматов М.Х., Бутенко В.М., Кривенко П.М.- Оpubл. в Б.И.,1972, №15.
3. А.с. №637764 (СССР). Способ приработки деталей. / Алексеев В.П., Болдарь Л.Н., Михалёв В.Д.
4. Авдонькин Ф.Н. Исследование влияния эксплуатационных факторов на износ сопряжений цилиндро-поршневой и шатунно-кривошипной групп деталей автомобильных двигателей. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени докт. техн. наук. М.,1966.- С.32
5. Айбиндер С.Б. Холодная сварка металлов. Рига, изд-во АН Латв.ССР, 1957. - 162с.
6. Алексеев В. П. Стадии электрохимико-механической приработки (доводки) сопряжения вал - подшипник скольжения // Тр. Харьковского авиационного института им. Жуковского Н. Е. "Авиационная техника и технология" по материалам седьмой международной конференции "Новые технологии в машиностроении". Харьков, ХАИ, 1998. - С. 475 - 485.
7. Алексеев В. П., Замота Т. Н., Зорин Р. В. Влияние электромеханических процессов на трение и износ поверхностей в механизме ползун – цилиндр / В. П. Алексеев, Т. Н. Замота, М. А. Домбровский, Р. В. Зорин // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2003. – № 31 (43). – С. 4–9.
8. Алексеев В. П., Замота Т. Н., Мельников А. И. Износ первого компрессионного кольца, как компенсирующего звена размерной цепи кривошипно-шатунного механизма (КШМ) при проведении электрохимико-механической приработки (доводки) // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету/ Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2002 –С.7-10.
9. Алексеев В. П., Замота Т. Н., Парфилко В. В. Исследование влияния электролита с водным раствором  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  на показатели прирабатываемости хромированной поверхности кольца к чугуну // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету/ Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2002 –С.9-12.
10. Алексеев В.П. О выборе предварительных (технологических) размеров замыкающего звена размерной цепи механизма, подвергаемого электрохимико-механической доводке (ЭХМД) // Совер. констр., улучшение рем. и экспл. с.-х. техн., Харьков, 1986.- С.74-82.
11. Алексеев В.П. Теоретическое обоснование размеров вала и подшипника при электрохимико-механической приработке (доводке)

(ЭХМП(Д)) в режиме гидродинамической смазки // Тр. Киевского национального аграрного университета, НАУ, 1998.-С.308...314.

12. Алексеев В.П. Электрохимико-механическая макроприработка деталей / В.П. Алексеев // Монография - Луганск:Элтон-2, 2011. –204с.

13. Алексеев В.П., Бойко А.И., Замота Т.Н., Изюмский В.А. Электрохимико-механическая доводка рабочих поверхностей втулок торцевого уплотнения турбокомпрессора // Проблемы трибологии – Издательство Хмельницкого национального университета, 2006. – С.92-95.

14. Алексеев В.П., Болдарь Л.Н. и др. Разработка технологии контроля, комплектования ЭХМП деталей и обкатки тракторных двигателей при капитальном ремонте // Материалы отчетной научно-технической юбилейной конференции, посвящённой 75-летию ЛСХИ,- Луганск,1996.- С.63-66.

15. Алексеев В.П., Болдарь Л.Н. Оценка качества электрохимико-механической приработки (доводки) деталей цилиндро-поршневой группы // Совершенствование конструкций, улучшение ремонта и эксплуатации сельскохоз. техники.: Межвуз. тематич. сб. научн. трудов/ Харьк. с.-х. ин-т. им. В.В.Докучаева. Харьков, 1986. - С.92-102.

16. Алексеев В.П., Болдарь Л.Н., Замота Т.Н. Исследование закономерностей изменения макрогеометрии деталей в паре трения сталь-чугун под влиянием токовых параметров // Збірник наукових праць Луганського сільськогосподарського інституту. Технічні науки. Вид-во ЛСГІ. - Луганськ, 1998. - С.8-12.

17. Алексеев В.П., Болдарь Л.Н., Изюмский В.А. Основные положения электрохимико-механической приработки (доводки) деталей двигателей // Организация и технология ремонта механизмов, машин, оснастки: Тезисы докладов.- Киев.- 1996.- С.5-6.

18. Алексеев В.П., Болдарь Л.Н., Лангазов В.Н. Оценка некоторых показателей прирабатываемости основных соединений рядных двигателей СМД при использовании электрохимико-механической приработки (доводки) // Двигателестроение.- 1990.- №7.- С.42-45.

19. Алексеев В.П., Болдарь Л.Н., Лангазов В.Н., Изюмский В.А. Рабочие гипотезы электрохимико-механической приработки (доводки)-макроприработки деталей двигателей внутреннего сгорания // Збірник наукових праць Луганського сільськогосподарського інституту. Технічні науки.- Луганськ: Видавництво ЛСГІ.- 1997.- С.9-13.

20. Алексеев В.П., Болдарь Л.Н., Лангазов В.Н., Изюмский В.А. Совершенствование технологии ЭХМП(Д) деталей двигателей // Материалы отчетной научно-технической конференции сотрудников ЛСХИ по итогам 1994 года: Тезисы докладов.- Луганск.- 1995.- С.65-67.

21. Алексеев В.П., Болдарь Л.Н., Михалев В.Д. Влияние режима электрохимико-механической приработки на показатели прирабатываемости трущихся пар // Совершенствование конструкций, улучшение ремонта и эксплуатации с.-х. техники: Межвузовский тематический сб. научн. тр. ХСХИ им. Докучаева В.В.- Харьков.- 1979.- С.80-84.

22. Алексеев В.П., Болдарь Л.Н., Михалев В.Д. Выбор состава электролита для электрохимико-механической приработки трущихся пар // Совершенствование конструкций, улучшение ремонта и эксплуатации с.-х. техники: Межвузовский тематический сб. научн. тр. ХСХИ им. Докучаева В.В. - Харьков.- 1978.- С.65-68.

23. Алексеев В.П., Болдарь Л.Н., Михалев В.Д. Электрохимико - механическая приработка подвижных сопряжений ремонтируемых двигателей, как способ повышения ремонтпригодности // Повышение ремонтпригодности машин и технологического оборудования: Тезисы докладов Всесоюзного симпозиума.-М.: ВНИИММАШ.-1978.-с.138-140.

24. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Изюмский В.А. Особенности процесса электрохимико-механической приработки (доводки) цилиндро-поршневой группы автотракторных двигателей // Збірник наукових праць Луганського державного аграрного університету. Технічні науки. №4(10). Вид-во ЛДАУ. - 1999. - С.10-18.

25. Алексеев В.П., Замота Т.Н. Изменение радиального зазора в месте неприлегания кольца к гильзе // Збірник наукових праць Національного аграрного університету "Механізація сільськогосподарського виробництва". Том V. "Сучасні проблеми механізації сільського господарства". - Київ: НАУ, 1999. - С.111-113.

26. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Домбровский М.А. Влияние силы тока на показатели процесса ЭХМП(Д) цилиндро-поршневой группы при перекосе поршня // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин/ КНТУ, 2005, Випуск 35,1. – С.187-189.

27. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Домбровский М.А. Влияние скорости движения ползуна на показатели его прирабатываемости к гильзе при ЭХМП(Д) // Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету – Вінниця, 2005. – Випуск 20 – С.176-181.

28. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Домбровский М.А. Выбор состава электролита для совместной макроприработки пар трения поршень-гильза и поршневое кольцо-цилиндр // Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: Збірник наукових праць / УкрНДІ прогнозування та випробування техніки і технологій для с.-г. виробництва імені Леоніда Погорілого (УкрНДІПВТ ім.Л.Погорілого); - Дослідницьке, 2004. – Випуск 7 (21). – 465 с. - С.213-218.

29. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Домбровский М.А. Обоснование расширения допустимого перекоса поршня в гильзе при использовании ЭХМП(Д) // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во. ЛНАУ, 2005 – №49(72). – С.3-11.

30. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Домбровский М.А. Оценка радиальной шероховатости поршня при ЭХМП сопряжения ползун-цилиндр // Збірник

наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2004 – №42(54). – С.3-10.

31. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Домбровский М.А., Зорин Р.В. Влияние электрохимико-механических процессов на трение и износ поверхностей в механизме ползун-цилиндр // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2003 – №31(43). – С.4-9.

32. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Зорин Р.В., Изюмский В.А. Исследование процесса ЭХМП(Д) сопряжений шейки многоопорного вала – подшипники // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2006. - №64 (87). – С.3-7.

33. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Зорин Р.В., Изюмский В.А. Моделирование процесса ЭХМП(Д) сопряжений шейки многоопорного вала – подшипники // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2005. - №49 (72). – С.12-16.

34. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Иванов С.С. Влияние токовых параметров на изменение макрогеометрии наружной поверхности стального плунжера при ЭХМП сферического сопряжения с добавлением олеиновой кислоты // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2008. – №91. – С.5-12.

35. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Изюмский В.А. Исследование электрохимико-механической приработки (доводки) поверхностей хромового покрытия поршневого кольца и чугуна гильзы цилиндров // Збірник наукових праць Луганського державного аграрного університету. Технічні науки №6/17. - Луганськ: Вид-во ЛДАУ. - 2000. - С. 12-16.

36. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Изюмский В.А. Особенности процесса электрохимико-механической приработки (доводки) цилиндрико-поршневой группы автотракторных двигателей // Збірник наукових праць луганського державного університету. – Луганськ, № 4 (10) – 1999, с.10-18.

37. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Иванов С.С. О возможности электрохимико-механической приработки (доводки) основных сопряжений аксиально-поршневых насосов // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2006. – №64(87). – С.8-11.

38. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Иванов С.С. ЭХМП(Д) пары трения на электролите с добавлением олеиновой кислоты // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2006 – №65(88). – С.3-7.

39. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Парфилко В.В. Исследование влияния электролита с водным раствором  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  на показатели прирабатываемости пары трения сталь-сплав АО20-1 // Збірник наукових праць Кіровоградського

державного технічного університету /техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація./ - Вип.. 10. – Кіровоград: КДТУ, 2001. – С.287 – 289.

40. Алексеев В.П., Замота Т.Н., Парфилко В.В., Иванов С.С., Изюмский В.А. Влияние олеиновой кислоты на шероховатость контактирующих поверхностей при электрохимико-механическом взаимодействии // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2006. – №64(87). – С.12-20.

41. Алексеев В.П., Махнев А.А. Моделирование процессов электрохимико-механической приработки (доводки) на трехфазном токе // Збірник наукових праць луганського державного університету. – Луганськ, 2000, с. 17-22.

42. Алексеев В.П., Махнев А.А., Домбровский М.А.. Оптимизация показателей режима электрохимико-механической приработки (доводки) основных сопряжений двигателя на трехфазном токе // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. - Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2003.-№31(43).-С.10-17.

43. Алексеев В.П., Болдарь Л.Н., Замота Т.Н. Исследование закономерностей макрогеометрии деталей в паре трения сталь-чугун под влиянием токовых параметров // Збірник наукових праць Луганського сільськогосподарського інституту. Технічні науки. Вид-во ЛСПІ. - Луганськ, 1998. - С.8-12.

44. Аулин В.В., Замота Т.Н., Изюмский В.А. Изменение триботехнических характеристик контактных поверхностей зубчатого зацепления шестерен при электрохимико-механической приработке // Вісник інженерної академії України, Випуск 3-4.- Київ, 2008.- С.169-172

45. Аулін В.В. Фізичні основи процесів самоорганізації в триботехнічних системах: Монографія / В.В. Аулін. – Кіровоград: Видавець Лисенко В.Ф., 2014. – 370 с.

46. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. М., Физматгиз, 1963 – 472с.

47. Аяотс М.Э., Тамре М.И. Оценка контактных площадей и давлений в парах вал-втулка при наклоненной оси // Трение и износ.-1993-№2.-т.14.- С.24-29.

48. Баев А.С. Экспериментально– теоретическое исследование динамических упругих прогибов коленчатых валов судовых дизелей / А. С. Баев // Двигателестроение, 1991. – №6 – С. 4– 5.

49. Байкалова В.Н., Колокатов А.М., Приходько И.Л. Обработка деталей машин, восстановленных наплавкой // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1998.- №6.- С.26-28.

50. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. Пер. с англ. А.В. Белого; Под ред. А.И. Свириденка, - М.: «Машиностроение», 1986 – 360с.

51. Белый А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А.В.Белый, Г.Д. Карпенко, Н.К. Мышкин – М.: «Машиностроение», 1991 – 218с.
52. Билик Ш.М. Макрогеометрия деталей машин. Изд.2-е перераб. и доп.-М.:Машиностроение, 1973.- 344с.
53. Блау П.Д. Модель приработки и других переходных процессов в трении скольжения // Проблемы трения и смазки. Труды американского общества инженеров-механиков.- 1988.-№2.-С.108-116.
54. Бойко А.И., Замота Т.Н. Динамика изнашивания кинематической пары «цилиндр в цилиндре», преобразующей вращательное движение в поступательное // Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства імені Петра Василенка, «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва», Випуск 69-Харків, 2008.- С.285-293
55. Болдарь Л.Н. Разработка технологии электрохимико-механической приработки основных сопряжений автотракторных двигателей при их ремонте. - Дисс. на соиск. учён. степени канд. техн. наук. - Кишинев,1985.-230с.
56. Большаков В.В., Григорьев М.А., Федоров С.Н. Конструкция элементов ЦПГ и расход масла на угар // Автомобильная промышленность.- 1999.- №12.- С.16-20.
57. Боуден Ф., Тейбор Д. Трение и смазка. Пер. с англ.- М.: Машгиз, 1960.- 152с.
58. Бурштейн Л.М., Кобяков С.В. Соотношения для приближённой оценки толщины масляного слоя пары поршневое кольцо-цилиндр // Трение и износ.- 1988.- т.9- №4.- С.683-688.
59. В.М. Михлин, А.Г. Дарер. Ресурсосберегающий метод определения допустимых износов, изменений параметров при техническом обслуживании и ремонте машин ГОСНИТИ // МЭСХ №1 -2007. - С.20-22
60. Валетов В.А. Микрогеометрия поверхности и её эксплуатационные свойства // Вестник машиностроения.-1986.- №4.- С.39-41.
61. Венцель С.В. Смазка и долговечность двигателей внутреннего сгорания. - К.: Техника,1977.- 208с.
62. Вернигора Е.И. Неперпендикулярность осей посадочных отверстий под гильзы цилиндров к общей оси отверстий коренных опор и ее допустимое значение при капитальном ремонте. Специальность 05.20.03-Эксплуатация, восстановление и ремонт сельскохозяйственной техники. Автореферат на соискание учен. степени к.т.н. Новосибирск -1988г.- 19 с.
63. Вершинина Н.И., Епархин О.М., Асташкевич Б.М. Исследование возможности повышения стабильности макрогеометрии чугуновых гильз цилиндров с помощью термообработки // Двигателестроение.-1990.-№8.- С.12-17
64. Вешкельский С.А., Светличный М.Н. Монтаж, эксплуатация и ремонт двигателей внутреннего сгорания.- М.:Машиностроение,1966.-275с.
65. Виноградов Ю.М. Исследование эффективности химико-

термических обработок для различных металлов // Теория смазочного действия и новые материалы: Сборник.- М.: Наука, 1965.- С.176-183.

66. Власенко М.В. Підвищення довговічності дизелів сільськогосподарських машин на стадії після ремонтної обкатки шляхом модифікування поверхонь тертя деталей трибохімічним методом. Автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук. – Кіровоград, 1997. – 16 с.

67. Воздвиженский Г.С. Некоторые дискуссионные вопросы механизма электрохимической полировки металлов. – «Известия КФ АН СССР. Сер. хим. наук», 1959, №5. - С.23 – 34

68. Вознюк Л.Ф., Савченко Н.З. Кравец И.А. Применение поверхностно-активных и химически активных присадок к маслам для обкатки тракторных двигателей // Технология и организация производства.-1969.- №5.- С.14-17.

69. Волченков А.В., Буше Н.А. Трибологические принципы назначения режимов обкаточных испытаний двигателей / А.В. Волченков, Н.А. Буше // Трение и износ. – 1991. – Т.12. – №3,– С. 506– 514.

70. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике.-.:Наука,1964. - 872с.

71. Гаджиев Г.Х. Расчет равновесной шероховатости внутренней поверхности составного цилиндра контактной пары / Г. Х. Гаджиев // Трение и износ. – 2003. – Т.24, №2 – С. 132– 135.

72. Гаенко Л.М. Методика расчета и определения оптимального режима приработки автомобильных дизельных двигателей после капитального ремонта. - М.: Транспорт, 1967. - 110с.

73. Гаркунов Д.Н. Эффект безизносности (избирательный перенос)-новый этап в повышении износостойкости деталей машин // Вестник машиностроения.- 1983.- №4.- С.36-41.

74. Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В., Поляков А.А. Избирательный перенос в узлах трения. М., «Транспорт», 1969 - 109с.

75. Гинзбург Е.Г., Хамбский Н.Т. Производство зубчатых колес. Вып. в изд. 3/е перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1978. - С.138.

76. Голубев А.И. Торцовые уплотнения вращающихся валов. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1974. – 325 с.

77. Глухарев Е.Г., Зубарев Н.И. Зубчатые соединения.: Справочное пособие.- Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1976.- 198 с.

78. Голего Н.Л. Схватывание в машинах и методы его устранения. Киев, «Техника», 1965. - 231с.

79. Головатенко А.Г. Повышение эффективности ремонта и эксплуатации дизелей // Двигателестроение.- 1991.- №4.- С.41-42.

80. Голубничий Н.Т. Для повышения качества ремонта кривошипно-шатунных механизмов ДВС // Автомобильная промышленность.- 1986.- №11. - С.5-6.

81. Голубничий Н.Т. Повышение точности сборки на примере ремонта автотракторных двигателей // Вестник машиностроения.- 1983.-№8.-С.49-52.

82. Голубничий Н.Т., Кишуков Х.М. Оценка точности сборки двигателей // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1989.- №1-С.56-57.
83. Горский Н.Д. Исследование полноты восстановления кривошипно-шатунного механизма тракторных двигателей при капитальном ремонте с целью повышения их надёжности. Автореф. дисс. на соиск. учён. степени канд. техн. наук.- Л., 1973.- 21с.
84. Горюнов Ю.В. и др. Эффект Ребиндера. М., «Наука», 1966 – 128с.
85. Горячева И.Г., Добычин М.Н. Механизм формирования шероховатости в процессе приработки // Трение и износ.- 1982.-т.3.- №4.-С.632-642.
86. ГОСТ 18509-88\*. Дизели тракторные и комбайновые. Виды и программы стендовых испытаний-М.: Изд.стандартов,1988.- 34с.
87. ГОСТ 2789-73\*. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики - М.: Изд.стандартов, 1973 -12с.
88. Григорьев М.А. Износ и долговечность автомобильных двигателей / Григорьев М.А., Пономарёв Н.Н.- М.: Машиностроение, 1976. -248с.
89. Грилихес С.Я. Электрохимическое полирование. Л., «Машиностроение» (Ленингр.отд -ние),1976. - 208с.
90. Гришко В.А. Повышение износостойкости зубчатых передач.- М.: Машиностроение. 1977.- 232с.
91. Гурвич И.Б. Долговечность автомобильных двигателей.- М.: Машиностроение, 1967.-103с.
92. Гурвич И.Б. Эксплуатационная надёжность автомобильных двигателей./ Гурвич И.Б., Сыркин П.Э., Чумак В.И.-2-е изд. перераб. и доп.-М.: Транспорт,1994. - 144с.
93. Гурвич И.Б., Егорова А.П. Повышение долговечности автомобилей ГАЗ (обзор)// Двигателестроение.-1991.-№10-11.- С.75-78.
94. Гусев В.Н., Рожков Л.А. Способ анодного протравливания металлов. А.с. СССР, №28384.
95. Дадашев Р.Б. Размерный анализ кривошипно – шатунного механизма судовых малоразмерных дизелей / Р.Б. Дадашев // Расчет и конструирование двигателей. – Ленинград, «Политехника. Двигателестроение». – 1991. – №2 – С. 9 – 11.
96. Демин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. – М.: «Машиностроение», 1981 – 244с.
97. Денисов А.С. Изменение технического состояния двигателей в межремонтном периоде. // Мех.и электр.селхоз-ва, 1983, №7,- С.47-49
98. Денисов А.С. Изменение технического состояния двигателей при эксплуатации в доремонтном периоде // Мех.и электр.селхоз-ва,1982, №8-С.51-57.
99. Денисов А.С. Исследование зависимости работоспособности подшипников коленчатого вала от изменения геометрической формы шейки. Автореф. дисс. на соиск. учён. степени канд.техн наук (05.22.11), Саратов,

1975. - 16с.

100. Дерягин Б.В. и др. Адгезия твердых тел. М., «Наука», 1973 – 279с.

101. Дидур В.А. Трибологический подход к нормированию загрязненности смазочных масел // Проблема трибологии. Международный научный журнал: Хмельницкий – 1996.- №2.- С.10-16.

102. Дизели СМД – 14Н, СМД – 14НГ, СМД – 14АН, СМД – 14БН, и их модификации. Технические требования на капитальный ремонт.– М. ГОСНИТИ, 1984. – 203 с

103. Дизели тракторные и комбайновые. Общие технические требования. ГОСТ 20000-88.

104. Дмитриченко Н.Ф. Смазочные процессы в условиях нестационарного трения: Монография / Н.Ф.Дмитриченко, Р.Г.Мацаканов.- Житомир: ЖИТИ, 2002.-308 с.

105. Дунаев П.Ф. Размерные цепи. Изд. 2-е доп. и перераб.- М.: Машгиз, 1963.- 308с.

106. Дьяченко П.Е. Влияние шероховатости поверхности на её износ // Качество поверхностей деталей машин: Сборник.- Кн.2.М.: Машгиз, 1950.- С.14-18.

107. Дьяченко П.Е., Вайнштейн В.Э. Волнистость стальной поверхности и ее влияние на износ подшипниковых материалов // Качество поверхности деталей машин. Сб. 2. Изд-во АН СССР, 1953.-162с.

108. Дьяченко П.Е., Якобсон М.О. Качество поверхности при обработке металлов резанием. М., Машгиз. 1951 – 205с.

109. Дюмин И.Е. Исследование влияния погрешностей сборки кривошипно-шатунного механизма на качество ремонта двигателей. Автореф. дисс. на соиск. учён. степени канд. техн. наук. М., 1961.-16с.

110. Дюмин И.Е. Повышение эффективности ремонта автомобильных двигателей.- М.: Транспорт, 1987.-175с.

111. Евдошмов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ эксперимента при решении задач трения и износа. – М.: Наука, 1980.– 228 с.

112. Ермолов Л.С. Ремонт двигателей СМД.– М.: Колос, 1969 – 632 с.

113. Ждановский Н.С., Николаенко А.В. Надежность и долговечность автотракторных двигателей.- Л.: Колос( Ленингр. отд-ние),1974.-223 с.

114. Заболонский К.И. Зубчатые передачи. Распределение нагрузки в зацеплении. К.: Техника, 1977.-с.208.

115. Зайдман Г.Н., Верховецкий И.Н. Электрохимическая размерная обработка чугуна при абразивном воздействии // Электронная обработка материалов.- 1971.- №2.- С.17-21.

116. Замота Т. Н. , Зорин Р. В. Теоретические предпосылки обеспечения компенсации неточностей многоопорного вала с помощью ЭХМП(Д) / Т. Н. Замота, Р. В. Зорин // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2008. № 91. – 309 с.

117. Замота Т.Н. Оптимизация факторов, влияющих на процесс приработки хромированных поршневых колец // Збірник наукових праць Національного аграрного університету "Механізація сільськогосподарського виробництва". Том VI. "Теорія і розрахунок сільськогосподарських машин". - Київ: НАУ, 1999. - С.250-253.

118. Замота Т.М. Поліпшення триботехнічних характеристик при доведенні деталей гідроагрегатів, що труться // Матеріали LXVI наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету. – К: НТУ, 2010.- С.114

119. Замота Т.М., Зорін Р.В., Лисокобилко Д.В. Зменшення конусності циліндрових поверхонь тертя при електрохіміко-механічному припрацюванні // Матеріали LXVII наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету. – К: НТУ, 2011.- С.112

120. Замота Т.Н. Физико-химические основы процесса макроприработки плоских поверхностей трения // Проблеми трибології. Міжнародний науковий журнал. – Хмельницький національний університет. – 2011., №2, С.26...30

121. Замота Т.Н. Электрохимические основы процесса макроприработки плоских поверхностей трения при ЭХМП(Д) // Проблеми трибології. Міжнародний науковий журнал. – Хмельницький національний університет. – 2011., №4, С.56...61

122. Замота Т.Н. , Аулин В.В. Доводка торцевого уплотнения турбокомпрессора электрохимико-механическим способом // Наука - образованию, производству, экономике: Материалы Восьмой международной научно-технической конференции, г.Минск: Белорусский национальный технический университет, 2010.-С.92-93

123. Замота Т.Н. Влияние перекоса поршня в гильзе на триботехнические характеристики контакта /Т.Н.Замота, В.В. Аулин // Вісник інженерної академії України, Випуск 1. – Київ, 2010. – С. 196 – 200.

124. Замота Т.Н. Влияние электрохимических процессов, протекающих в смазывающей среде, на приработку трущихся поверхностей при ЭХМП(Д) // Тези Міжнародної науково-практичної конференції «Ольвійський форум-2011»: Стратегії України в геополітичному просторі, 8-12 червня, 2011.- Ялта, Крим, Україна. - С.38-39

125. Замота Т.Н. Выравнивание поверхностей трения с макрогеометрическими отклонениями при ЭХМП(Д) // Актуальні проблеми інженерної механіки: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2011. – С.76-77.

126. Замота Т.Н. Обеспечение макрогеометрической приспособляемости трущихся поверхностей деталей машин электрохимико-механической приработкой (доводкой) // Сучасні проблеми триботехніки:

Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2009. – С.101...102.

127. Замота Т.Н. Оптимизация технологических факторов электрохимико-механической приработки (доводки) боковых поверхностей поршневых колец в соединениях гильза-кольцо при ремонте тракторных и комбайновых двигателей. Дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Луганск–2001. - 206 с.

128. Замота Т.Н. Теоретические предпосылки ЭХМП машин // Тези Міжнародної науково-практичної конференції «Ольвійський форум - 2010»: Стратегії України в геополітичному просторі, 11-15 червня, 2010.- Ялта, Крим, Україна. - С.18-19

129. Замота Т.Н. Управление процессом приработки поверхностей деталей основных сопряжений машин // Тези Міжнародної науково-практичної конференції «Ольвійський форум- 2012: Стратегії України в геополітичному просторі», «Трибологія, енерго- та ресурсозбереження», 7 червня, 2013.- Ялта, Крим, Україна.- С.68-70

130. Замота Т.Н., Аулин В.В.. Управление процессом электрохимико-механической приработки деталей сельскохозяйственной и автотракторной техники // Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції. Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки. Вип.1.-Кіровоград, КНТУ, 2013.- С.221-222

131. Замота Т.Н., Аулин В.В. Влияние макрогеометрических отклонений в сопряжениях двигателей на триботехнические характеристики приработки // Проблеми трибології. Міжнародний науковий журнал. – Хмельницький Національний університет. – 2009., №4. - С.68...75.

132. Замота Т.Н., Аулин В.В. Закономерности приработки деталей различных типов сопряжений // Тези Міжнародної науково-практичної конференції «Ольвійський форум- 2012: Стратегії України в геополітичному просторі», «Трибологія, енерго- та ресурсозбереження», 7-8 червня, 2012.- Ялта, Крим, Україна. - С.69-72

133. Замота Т.Н., Аулин В.В. Исследование процессов выделения пузырьков газа в смазывающей среде при приработке и их влияние на изменение режима трения // Проблеми трибології. Міжнародний науковий журнал. – Хмельницький національний університет. – 2011., №1.- С.95...99.

134. Замота Т.Н., Аулин В.В. Развитие площади пятна контакта при макроприработке поверхностей трения // Проблеми трибології. Міжнародний науковий журнал. – Хмельницький національний університет. – 2012., №1.- С.6...11

135. Замота Т.Н., Аулин В.В. Ускорение макрогеометрической приработки неэквидистантных поверхностей // Материалы Девятой международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике», 2011. - Минск, Белоруссия.- С.107-108.

136. Замота Т.Н., Зорин Р.В. Улучшение триботехнических характеристик подшипников скольжения двигателей // Сучасні проблеми

триботехніки: Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2009. – С.99...100.

137. Замота Т.Н., Зорин Р.В. Определение выхода по току при ЭХМП(Д) сопряжение вал-вкладыш при наличии макрогеометрических отклонений // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин / КНТУ, 2009, Випуск 40. – С.269-275.

138. Замота Т.Н., Зорин Р.В. Сравнительная оценка эффективности различных способов ЭХМП(Д) при приработке подшипников скольжения // Проблемы трибологии. Міжнародний науковий журнал. – Хмельницький Національний університет. – 2009., №4, С.58...62.

139. Замота Т.Н., Зорин Р.В., Аулин В.В. Повышение износостойкости чугунных поршневых колец дизелей // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 9-й Международной научно-технической конференции, г. Ялта- Киев: АТМ Украины, 2009.- С.60...63

140. Замота Т.Н., Зорин Р.В., Кравченко А.П.. Исследование процесса ЭХМП(Д) подшипников скольжения ДВС с макрогеометрическими отклонениями на трехфазном токе // Материалы 6-й международной научно-технической конференции «Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств»,Изд-во ПГУАС, г. Пенза.- 2010. - С.92 -97.

141. Замота Т.Н., Кравченко А.П., Аулин В.В. Улучшение макрогеометрии цилиндрических поверхностей трения при электрохимико-механической доводке // Политранспортные системы: материалы VII Всерос. науч.- техн. конф., Красноярск, 25-27 ноября 2010 г. – Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2010. – С.235-240

142. Заренбин В.Г., Богомолов В.В. Исследование триботехнических свойств поршневых колец в различных смазочных средах // Таврич. гос. агротех. акад. Тр.- 1997.- т.2.- вып.2.- С.66-68.

143. Заренбин В.Г., Касумов А.Х. Исследование режимов приработки автомобильных двигателей при капитальном ремонте. - М.: Транспорт, 1983.- 78с.

144. Захаров А.П. Теоретическое и экспериментальное обоснование величин начальных зазоров в сопряжении цилиндрической поршневой группы тракторных двигателей. Автореф. дисс. на соиск. учёной степени канд. техн. наук, Челябинск, 1963.-16с.

145. Зорин Р. В. Исследование процесса доводки модели многоопорного вала с оптимизацией его параметров / Р. В. Зорин // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2007. – № 64 (87). – С. 3–7.

146. Зорін Р.В., Замота Т.М., Беляков О.Є. Особливості процесу ЕХМП(Д) сполучень шийки багатоопорного валу – підшипники // Матеріали LXVII наукової конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету. – К: НТУ, 2011.- С.114

147. Иванов В.П. Цена качества ремонта / В. П. Иванов // МЭСХ, 1999. – №7. – С. 23– 25.
148. Изотов А.Д., Аскенрольд М.Л. Измерение давлений в масляном слое подшипников ДВС. В сб.: Труды ЦНИДИ, вып.70, Л., С. 20-22.
149. Изюмский В.А. Повышение межремонтного ресурса деталей мобильной и сельскохозяйственной техники электрохимико-механической приработкой цилиндрико-поршневой группы.- Дисс. на соиск. учен степ. канд. техн. наук - Луганск, 2004. - 230с.
150. Ильин И.М., Бекиров Я.А. Технология изготовления прецизионных деталей гидропривода. М.; «Машиностроение», 1971 – 159с.
151. Индин Б.В. Исследование влияния электрохимической обработки на содержание легирующих элементов в поверхностном слое антифрикционных сплавов АО-06 и АО-20 // Электронная обработка материалов. - 1978. - №3.- С. 20-21.
152. Иноуэ Киеси. Способ чистовой обработки спаренных деталей, работающих в зацеплении. Японский патент №49-48052, 1970.
153. Кабаков М.Г., Стесин С.П. Технология производства гидроприводов. М., «Машиностроение», 1974 – 191с.
154. Каданер Л.И., Котляр А.М., Щербак М.В. и др. Методика исследования кинетики анодного растворения металлов в условиях их абразивного разрушения // Электронная обработка материалов.- 1971.- №1.- С.15-20.
155. Казарцев В.И. Ремонт машин (тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин). Изд.3, перераб.и доп. – Л.: Москва,-1961.- 368с.
156. Кациграс Г.А. Особенности сборки и приработки капитально отремонтированных двигателей.– М.: Росвузиздат, 1963. – 28 с.
157. Кашин И.П. Исследование несущей способности смазочного слоя подшипников коленчатого вала тракторного дизеля с целью повышения его долговечности и совершенствования эксплуатационных качеств машинно–тракторных агрегатов. Автореф. дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: 05.410- Механизация сельскохозяйственного производства – Москва, 1972. – 21 с.
158. Керчер Б.А. Исследование макрогеометрии гильз цилиндров и её влияние на работу быстроходных автотракторных двигателей. Автореф. дисс. на соиск. учён. степени канд. техн. наук (441), Харьков, 1971.-16с.
159. Кишкин С.Г., Клышен А.А. Эффекты электрического и магнитного воздействия на ползучесть металлов и сплавов // ДАН СССР.- М.: Наука, 1973.- т.211.-№2.- С.325-327.
160. Колчин Н.И. Зубчатые и червячные передачи. Некоторые вопросы кинематики, динамики, расчета и производства. Л.: Машиностроение. 1974 - с.352.
161. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. - М.: Наука, 1974. - 210с.
162. Коновалов С.И. Исследование деформаций и работоспособности подшипников коленчатого вала двигателей сельскохозяйственных тракторов

Специальность 05.20.01- механизация сельскохозяйственного производства  
Автореферат на соискание научной степени к.т.н. Кострома - 1974. - 24 с.

163. Кончиц В.В. Электропроводность точечного контакта при граничной смазке. Ч.2. / В. В. Кончиц // Трение и износ. – 1991. – Т.12, №3. – С. 465– 475.

164. Коршунов Л.Г., Минц Р.И. Влияние электризации и малых постоянных токов на износ металлов при трении скольжения // Физико-химическая механика материалов.- 1967.- т.3.- №4.- С.392-396.

165. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И.Костецкий // К.: Техника, - 1970. – 396 с.

166. Костецкий Б.И., Носовский И.Г. Износостойкость и антифрикционность деталей машин. К., [«Техніка»], 1965.- 206с.

167. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов Д.К. и др. Поверхностная прочность материалов при трении.- К.:Техника, 1976.-292с.

168. Кравец И.А. Исследование процесса приработки деталей тракторных дизельных двигателей. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. - Киев, 1969.- 16с.

169. Кравец И.А., Самсоненко С.Г., Гридин А.Г. Способ приработки пары трения. А.с. СССР, №1535689.

170. Кравченко А.П., Замота Т.Н., Аулин В.В. Улучшение приработки поверхностей трения // Материалы Международной научной конференции «Двигатели внутреннего сгорания: актуальные проблемы и пути решения», 24-28 октября, 2011.- Минск, Белоруссия.- С.98-104.

171. Крагельский И.В., Колесниченко Н.Ф. Качество поверхности и трение в машинах.- К.: Техника, 1969. - 145 с.

172. Крагельский И.В. О трении несмазанных поверхностей // Труды Всесоюзн. конф. по трению и износу в машинах.- М.: Изд-во АН СССР, 1939.- т.1.- С.543-561.

173. Крагельский И.В. Трение и износ. Изд. 2-е перераб. и доп.- М.: Машиностроение, 1968.- 480с.

174. Крагельский И.В., Колесниченко Н.Ф. Качество поверхности и трение в машинах.-К.: Техника, 1969. - 145с.

175. Кревсун Э.П., Лукашевич А.В., Михалычев Б.Н., Сафонов С.П. Сравнение экспериментальных характеристик пар трения с различной шероховатостью поверхностей при гидродинамическом режиме смазки // Трение и износ.- 1983.-т4.-№5. - С.779-785.

176. Кричмар С.И. Изменение микрогеометрии поверхности при электрохимическом растворении и осаждении металлов. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени докт. техн. наук.- М., 1968.- 32с.

177. Кузьменко А.Г. Дослідження зносоконтактної взаємодії змащених поверхонь тертя / А.Г.Кузьменко, О.В.Диха // Монографія. – Хмельницький: ХНУ, 2005. – 183 с.

178. Кузьменко А.Г. Методи розрахунків і випробувань на зношування та надійність: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / А.Г.Кузьменко // – Хмельницький: ТУП, 2002. – 151 с.
179. Лайнер В.И. Современная гальванотехника. М., «Машиностроение», 1967 – 384с.
180. Лашхи В.Л., Демьянов Л.А. Оценка прирабочных свойств обкаточных масел // Трение и износ.- 1991.- т.12, №1.- С.118-123.
181. Лихтеров С.Д., Шор Г.И. Электровязкостный эффект в маслах с присадками // Технология топлива и масел.- 1980.- №1.- С.43-45.
182. Лихтман В.И., Щукин Е.Д., Ребиндер А.А. Физико-химическая механика металлов. М., Изд-во АН СССР, 1962 – 303с.
183. Лозовский В.Н. Надежность гидравлических агрегатов. М., «Машиностроение», 1974. - 320 с.
184. Ломоносов Ю.Н., Фелинский В.Ю. Обоснование рационального режима обкатки двигателя // Техника в сельском хозяйстве. - 1991. - №6.- С.66-68.
185. Любимов В.В., Китаев Ю.В. Влияние анионного состава электролита на выравнивающие свойства электрохимической обработки с периодической абразивной депассивацией // Электронная обработка материалов.- 1983.- №5. - С.13-17.
186. Маврикиди Ф.И. Разработка методов расчета пространственных размерных цепей. Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: 05.02.08 - Технология машиностроения – Москва, 1987. – 23 с.
187. Малахов В.В. Исследование стабильности геометрической формы и взаимного расположения несущих поверхностей блоков цилиндров тракторных двигателей. Автореф. дисс. на соиск. учён. степени канд. техн. наук, Киев, 1965.- 16с.
188. Маслов И.В. Определение динамических нагрузок на коренные подшипники дизеля с помощью метода конечных элементов / И. В. Маслов // Двигателестроение, 1986. – №3 – С. 11– 12
189. Маталин А.А. Технология механической обработки. Л. «Машиностроение» (Ленинград. отд-ние), 1977 – 464с.
190. Махнев А.А. Регулирование тока при электрохимико-механической приработке (доводке) пары трения // Авиационно-космическая техника и технология. Тр. Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского. – Харьков, ХАИ, 2000. - С.21-25.
191. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рошин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.
192. Михин Н.М., Макушкин С.А. Расчет величины сближения в подшипнике скольжения с автокомпенсацией износа / Н. М. Михин, С.А Макушкин. // Трение и износ. – 1992. – Т.13. – №3, С. 413– 420.
193. Мишин И.А. Износостойкость деталей автотракторных двигателей.- М.,- Л.: Машгиз, 1960. - 138с.

194. Молдаванов В.П. Производство поршневых колец ДВС. - М.: Машиностроение, 1980. - 270с.
195. Мороз И.И. Основы повышения точности электрохимического формообразования.- Кишинёв: Штиинца, 1977. - 293с.
196. Мухин Е.М., Столяров И.И. Обкатка V-образных автомобильных двигателей при капитальном ремонте.- М.: Транспорт, 1974.- 102с.
197. Мухин Е.М., Столяров И.И. Приработка и испытание автомобильных двигателей.- М.: Транспорт, 1981.-62с.
198. Надежность и долговечность машин. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Бершадский Л.И. и др. «Техника», 1975. - 408с.
199. Надежность объемных гидроприводов и их элементов. /[Ю.А. Беленков, В.Г. Неман, М.П. Селиванов, Ю.В. Точилин]. - М.: «Машиностроение», 1977. - 167с.
200. Назаров А.Д. Влияние отклонений массогеометрических параметров деталей КШМ на приработку и техническое состояние отремонтированных двигателей / А. Д. Назаров // МЭСХ, 2002. - №8 - С. 28-30.
201. Назаров А.Д. Влияние технологических факторов на изнашивание шатунных подшипников коленчатого вала дизелей / А. Д. Назаров А.Д. // МЭСХ, 1998. - №12 - С. 24 - 25.
202. Нгуен Д.Д. Совершенствование комплектования деталей при капитальном ремонте двигателей. Автореф. на соиск. учён. степени канд. техн. наук (05.22.10). - М., 1985. - 18с.
203. Некрасов С.С. и др. Приработка деталей при обкатке двигателя.- // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1996. - №4.- С.37.
204. Некрасов С.С., Стрельцов В.В. Повышение ресурса двигателей обкаткой на масле с присадками // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1985.- №10.- С.11-13.
205. Нигаматов М.Х. Интенсификация технологического процесса приработки тракторных и комбайновых дизелей при ремонте. Автореф. дисс. на соиск. уч. степени докт. техн. наук. - Челябинск, 1988. - 30 с.
206. Нигаматов М.Х. Ускоренная обкатка двигателей после ремонта. - М.: Колос, 1984. - 178 с.
207. Нигаматов М.Х. Формирование поверхностей деталей гильза-кольцо отремонтированных двигателей при обкатке с применением тока // Восстановление деталей и ремонт машин: Сборник.- Калуга, 1975.- С.219-225.
208. Никитин Ю.Н. Исследование работоспособности подшипников коленчатого вала тракторных дизелей типа А- 41. Автореф. дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. - Москва, 1973. - 21 с.
209. Носихин П. И. Повышение качества и ускорение обкатки капитально отремонтированных дизелей в условиях ремонтных предприятий агропрома: Автореф. дисс. ...канд. техн. наук: 05.20.08/ МИИСП им. Горячкина В. П. - М., 1990. - 16с.
210. Обеспечение износостойкости изделий. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения: ГОСТ 23.002-78.

211. Пат. України на корисну модель № 48905. // В.В. Аулін, Т.М. Замота. МПК (2009). В 23 Н 9/00. Опубл. 12.04.2010; Бюл. №7 . «Спосіб припрацювання сполучень деталей дизеля».
212. Пат. України на корисну модель № 88977 // В.В.Аулін, Т.М.Замота. МПК (2014). В 23 Н 9/00. Опубл. 10.04.2014; Бюл. №7 . «Спосіб припрацювання пар тертя».
213. Пат. України на корисну модель № 88978 // В.В.Аулін, Т.М.Замота. МПК (2014). В 23 Н 9/00. Опубл. 10.04.2014; Бюл. №7 . «Спосіб припрацювання пар тертя».
214. Патент 1811440 СССР. Способ электрохимико-механической приработки цилиндрично-поршневой группы. / Алексеев В.П., Болдарь Л.Н. Приоритет с 12.04.91.
215. Патент на корисну модель № 24735 «Спосіб припрацювання деталей» G01M 15/00,/ Алексеев В.П., Замота Т.Н., Иванов С.С., Парфилко В.В. / Бюл. № 10, от 10.07.2007
216. Петров Ю.Н., Алексеев В.П., Болдарь Л.Н Совместная электрохимико-механическая доводка цилиндрично-поршневой группы двигателей // Электронная обработка материалов.- 1982.-№3. - С.88-90.
217. Петров Ю.Н., Корчагин Г.Н., Зайдман Г.Н., Саушкин Б.П. Основы повышения точности электрохимического формообразования.- Кишинёв, 1977.- 152с.
218. Петров Ю.Н., Маслов А.В., Саушкин Б.П. Исследование анодного поведения титановых сплавов при ЭХРО. 3. Неводные и водно-органические растворы солей// Электронная обработка материалов.- 1986.- №1.- С.7-12.
219. Погорелый И.П. Обкатка и испытание тракторных и автомобильных двигателей. М.: Колос, 1973. - 208с.
220. Польцер Т., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания. – М.: Машиностроение, 1984. - 264с.
221. Полещенко П.В., Чернов Г.Г. Допуски и размерные цепи в сельскохозяйственных машинах. Справочное пособие. М.: Машгиз, 1963.-254с.
222. Пономарев В.В. Овальность и износ гильз цилиндров двигателей // Автомобильный транспорт.- 1971.- №12. - С.29-32.
223. Практикум по прикладной электрохимии: Учебное пособие для ВУЗов./Под ред. Н.Т. Кудрявцева и П.М. Вячеславова.- 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Химия, - 1980. - 288 с.
224. Производственные испытания и внедрения в производство электрохимико-механической приработки (ЭХМП) сопряжений гильзы цилиндров-поршневые кольца и коленчатый вал-подшипники скольжения // Отчет по НИР № 11/81, номер госрегистрации 01.84.0.065090.- Ворошиловград: ВСХИ, 1984.- 393с.
225. Псьол С.В. Методи оцінки зносу і надійності підшипників ковзання в умовах змінних навантажень. Автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук: 05.02.04 - Тертя та зношування в машинах – Хмельницький, 2003. – 22 с.
226. Пурэвжав Л. Выбор и оптимизация методов сборки двигателей

ЗМЗ-24 при капитальном ремонте с целью улучшения качества. Автореф. дисс. на соиск. учён. степени канд. техн. наук (05.22.10) / Московский автомоб.-дор. ин-т.- М., 1991. - 23с.

227. Путинцев С.В., Аникин С.А. Расчётная модель и анализ условий смазки и трения поршневого кольца быстроходного тракторного дизеля // Трение и износ.- 1988.- т.9.- №4.- С.617-626.

228. Пучков В.П., Трунников В.В., Шаханов А.А., Рудковский Н.И., Шестаков В.С. Баланс составляющих расхода масла на угар тракторного дизеля // Двигателестроение.- 1991.- №4.- С.47-48.

229. Рабинович А.Ш., Худайбердиев Т.С. О теории износа поршневых колец // Техника в сельском хозяйстве.- 1991.-№5. - С.31.

230. Резников В.Ф., Кондратьев В.М. Перспективы производства высокооборотных дизелей за рубежом и новые проблемы их смазывания // Двигателестроение.- 1980. - №2.- С.55-57.

231. Рождественский Ю.Н. и др. Опыт доводки шатунных подшипников тракторных двигателей типа 8ЧВН15/16. / Рождественский Ю.Н., Ахтамов М.К., Балюк Б.К., Фалеев Л.Н // Двигателестроение.- 1988. - №8. - С.51-53.

232. Розробка технології прискореної обкатки тракторних двигунів з використанням ЕХМП основних з'єднань. / Звіт по НДР. - Луганськ : ЛСГІ, 1994.- 97с.

233. Розробка технології прискореної обкатки тракторних двигунів з використанням ЕХМП основних з'єднань. / Звіт по НДР – Луганськ, 1996- 66с.

234. Романов В.Н., Романова Г.А. Выбор метода заводской обкатки // Двигателестроение. - 1981.- №10. - С.53-55.

235. Румянцев С.И. и др. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей / С.И. Румянцев, А.Ф. Синельников, Ю.Л. Штоль.- М. Машиностроение, 1989. - 272 с.

236. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. – Киев: Наук. Думка 1984 – 271с.

237. Савченко Н.З. Теоретические и экспериментальные основы процесса приработки сопряженных деталей двигателей внутреннего сгорания: Дисс. на соиск. учен. степени докт. техн. наук. - Киев: Украинская сельскохозяйственная академия, 1971.-396с.

238. Савченко Н.З., Кравец И.А., Вознюк Л.Ф. Исследование коэффициента трения в процессе приработки сопряженных деталей дизельных двигателей // Исследования по механизации и электрификации сельского хозяйства: Сборник.- Вып.19. - Киев.: Изд-во УСХА, 1969. - С.16-25

239. Савченко Н.З., Кравец И.А., Вознюк Л.Ф. Режимы ускоренной обкатки ускоренной обкатки унифицированных дизельных двигателей СМД-14 // Техника в сельском хозяйстве. - 1970. - №3. - С.40-42.

240. Седыкин Ф.В. и др. О точностных возможностях метода размерной электрохимической обработки // Электронная обработка материалов. - 1973. - №1. - С.11-13.

241. Семенов В.С. Режим смазки пары трения поршневое кольцо - цилиндровая втулка ДВС // Двигателестроение. - 1991. - №10-11. - С. 19-23.
242. Семенов В.С., Генрихсен Е.В. Экспериментальное исследование состояния масляной пленки между поршневым кольцом и цилиндровой втулкой поршневых машин // Машиноведение, АН СССР.- 1975.- №5.- С.77-81.
243. Семенов В.С., Трофимов П.С. Долговечность цилиндро-поршневой группы судовых дизелей.- М.: Транспорт, 1969. - 216с.
244. Сорокатый Р.В. Метод трибоэлементов: Монография / Р.В. Сорокатый. – Хмельницкий: Изд-во ХНУ., 2013. – 240 с.
245. Серая Е.А. Методика определения параметров оптимальной шероховатости поверхностей деталей при ремонте двигателей тракторов сельскохозяйственного назначения. Автореф. дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: 05-412 Эксплуатация и ремонт сельскохозяйственных орудий – Москва, 1971. – 19 с.
246. Силивангам С.К. Разработка методических основ параметрического комплектования деталей при ремонте автомобильных двигателей. Автореф. дисс. на соиск. учён. степени канд. техн. наук (05.22.10)- М., 1991.- 19с.
247. Соколов А.Д. Разработка конструктивных требований к износостойкости покрытий при увеличении долговечности поршневых колец // Двигателестроение. - 1989. - №2. - С.55-58.
248. Справочное руководство по гальванотехнике. Под ред. В.И. Лайнера. Пер. с нем. М., «Металургиздат», 1969. - 415с.
249. Стрельцов В.В. и др. Повышение эффективности обкатки отремонтированных двигателей // Механизация и электрификация сельского хозяйства.- 1996.- №2.- С.25-27.
250. Суворова Г.С., Зайдман Г.Н., Энгельгарт Г.Р., Петров Ю.Н. Исследование процесса электрохимического формообразования поверхности при подвижном катоде // Электронная обработка материалов. - 1988.- №3.- С.5-7.
251. Судзуки, Лудема. Механизм изнашивания в процессе приработки стальных деталей в условиях скольжения со смазкой // Проблемы трения и смазки. Труды американского общества инженеров-механиков. - 1988. - №3. - С. 24-32.
252. Сулима А.М. и др. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. / Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. - М.: Машиностроение, 1988. - 239с.
253. Сумеркин Ю.В. Анализ дополнительных перемещений поршня в цилиндре кривошипно-шатунного механизма // Энергомашиностроение, 1974 №8.-С.23-28.
254. Сырицын Т.А. Эксплуатация и надежность гидро - и пневмоприводов: - М.: «Машиностроение», 1990 – 247с.
255. Такигути М., Матида К., Фурухама С. Силы трения поршня о стенку цилиндра высокооборотного карбюраторного двигателя внутреннего сгорания // Проблемы трения и смазки. Труды американского общества

инженеров-механиков. Пер. с англ.- 1988.- №4.- С.106-112.

256. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию / М.М. Тененбаум, д-р техн. наук проф. – М.: «Машиностроение», 1976 – 271с.

257. Терхунов А.Г., Мороз В.Е., Черновол М.И. и др. Ускоренная приработка двигателей// Техника в сельском хозяйстве.- 1979.- №10.- С.61-63.

258. Тетюхин В.И., Фрейманис В.Ж., Янсон В.М. Эксплуатация и ремонт шестеренных, аксиально – поршневых и пластинчатых насосов. Л., Стройиздат, Ленинград. отд-ние. 1974 - 182с.

259. Технический анализ / К.И. Годовская, Л. В. Рябина, Г.Ю. Новик, М.М. Гернер – 3-е изд., перераб и доп.- М.: Высш.школа, 1979.-464с.

260. Технический уровень и качество технологии электрохимико-механической приработки и обкатки отремонтированных тракторных дизелей // Отчет по НИР №23. - Ворошиловград: ВСХИ, 1984. - 97с.

261. Технический уровень и качество технологии электрохимико-механической приработки и обкатки отремонтированных тракторных дизелей // Отчет по НИР №47.- Ворошиловград: ВСХИ, 1984. - 99с.

262. Турбокомпрессоры тракторных и комбайновых двигателей. Технические требования на капитальный ремонт. – М.: ГОСНИТИ, 1988. -89 с.

263. Трибология: Исследования и приложения: Опыт США и стран СНГ / Под. ред. В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина. М.: Нью-Йорк, 1993.- 454 с.

264. Трение, изнашивание и качество поверхности [Сборник статей.] Ред. коллегия д-р техн. наук, проф. М.М. Хрущев (отв. ред.). - М., «Наука», 1973, - 150с.

265. Теплый М.И. Определение износа в паре трения вал – втулка / М.И. Теплый // Трение и износ.- 1983. – Т.4, №2.- С.249 - 257.

266. Троян Н.С. К вопросу нарушения размерных цепей кривошипно-шатунного механизма тракторного двигателя при капитальном ремонте / Н. С. Троян // Повышение эффективности использования техники в сельхозпроизводстве. Сборник научных трудов. Горький – 1970. – Т.70.– С. 276– 285.

267. Ульман И.Е., Быков Н.М. Влияние СОЖ на качество обкатки тракторных двигателей // Механизация и электрификация соц. с.-х.- 1960.- №4.- С.12-15.

268. Федотьев Н.П., Грилихес С.Я. Электрохимическое травление, полирование и оксидирование металлов. М. – Л., «Машгиз», 1957. - 245с.

269. Хмелевой Н.М., Архипов В.С. Изнашивание поршневых колец дизельного двигателя в зависимости от концентрации присадки и содержания серы в топливе // Труды ГОСНИТИ.- 1969.- т.20. - С.49-69.

270. Храмцов Н.В. и др. Обкатка и испытание автотракторных двигателей. / Храмцов Н.В., Королёв А.Е., Малаев В.С.- М.: Агропромиздат, 1991.- 125с.

271. Храмцов Н.В. Надежность отремонтированных автотракторных двигателей.- М.: Росагропромиздат, 1989. - 160с.

272. Хрущов М.М. Исследование приработки подшипниковых сплавов и

цапф.- М.: Изд-во АН СССР, 1946. - 127с.

273. Худайбердиев Т.С. Анализ появления зазоров между кольцом и цилиндром в двигателе // Техника в сельском хозяйстве.-1991.- №5. - С.31.

274. Худайбердиев Т.С. Влияние зазоров в сопряжении кольцо-цилиндр на температуру поршня // Техника в сельском хозяйстве. - 1991. - №6. - С.27.

275. Чеповецкий И.Х., Ющенко С.А. Антифрикционно-деформационный метод формирования рабочих поверхностей гильз цилиндров ДВС // Двигателестроение. - 1990. - №8. - С.38-40.

276. Черкун В.Е. Ремонт и долговечность тракторных гидросистем. М., «Колос», 1972. – 256с.

277. Черкун В.Е. Ремонт тракторных гидросистем – 2-е изд, перераб. и доп. – М.: «Колос», 1984 – 253с.

278. Чернавский С.А. Подшипники скольжения.- М.: Машгиз, 1963.- 244с.

279. Чумак В.И., Гурвич И.Б., Егорова А.П., Жолобов Л.А., Баранов А.И. Влияние изнашивания двигателя на параметры его рабочего процесса и эффективности// Автомобильная промышленность.- 1986.- №11.- С.21-24.

280. Шаронов Г.П. Применение присадок к маслам для ускорения приработки двигателей .- М.-Л.:Химия,1965.-223с.

281. Шаронов Г.П., Сухоруков В.С. Влияние сборочных зазоров и приработки ЦПГ на межремонтный срок службы двигателей // В сб. научн. тр. Саратовского сельскохозяйственного ин-та. - Вып. 46. - Саратов, 1975. - С.144-155.

282. Шварцбурд Б.И. Технология производства гидравлических машин. – М.: «Машиностроение», 1978 – 352с.

283. Шпеньков Г.П. Физикохимия трения. – Минск; «Университетское», 1991 – 396с.

284. Щиголев П.В. Электрохимическая и химическая полировка металлов. М., АН СССР, 1959. - 186с.

285. Эйвазова З.Э., Джанахмедов А.Х., Вагидов М.А. Разработка метода автоматизированного проектирования оптимальных подшипников скольжения и его применение в узлах станков – качалок / З. Э. Эйвазова, А.Х. Джанахмедов, М. А. Вагидов // Трение и износ. – 1992. – Т.13, №5. С. 848–849.

286. Электрохимико-механическая приработка деталей двигателей как способ ускорения обкатки // Информационный листок №25-92Р.- Луганск: ЛЦНТИЭИ,1992.-3с.

287. Эрлихман Ф.М., Энгельгарт Г.Р., Оларь Л.Н., Зайдман Г.Н., Доменте Г.С. Электрохимическое формообразование при наличии изоляции в межэлектродном промежутке// Электронная обработка материалов.- 1988.- №2.- С.5-8.

288. Alan S. Brown. Flat, Cheap, and Under Control. IEEE Spectrum. – January 2005. – pp.40– 45.

289. Baldwin B.A., "Anti-Wear Additive Mechanisms in Sliding Contacts".

NASA Conference Pub. 2300, 1983, p.391-413.

290. Blau P.J., “Interpretations of the Friction and Wear Break-in Behavior of Metals in Sliding Contact”. *Wear*, Vol.71, 1989, p.29-43.

291. Canhua Li, Ishwara B. Bhat, Rongjun Wang, Joseph Seiler. Electro-Chemical Mechanical Polishing of Silicon Carbide. *Journal of Electronic Materials*, Vol.33, №5, 2004. – pp.481– 486.

292. D. Okumu Ouma, Duane S. Boning, James E. Chung and other. Characterization and Modeling of Oxide Chemical– Mechanical Polishing Using Planarization Length and Pattern Density Concepts. *IEEE 2002*. – pp.232– 244.

293. Davis C.B., “Influence of Roughness and Oxidation of Wear of Lubricated Sliding Metal Surfaces”, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, Vol.53, №4, 1951, p.919.

294. Davis F.A., and Eyre T.S. “The effect of friction modify on piston ring and cylinder bore friction and wear”. *Tribology International*, Vol.23, 1990, p. 163-172.

295. Dick de Roover, Abbas Emami– Naeini, Jon L. Ebert. Model– Based Control for Chemical– Mechanical Planarization (CMP). *AACC 2004*. – pp.3922– 3929.

296. Edwards J. – «*J. Electrochemical Soc.*», 1950, 97, p. 223

297. Elmore W.C. – «*J. of Applied Physics*», 1940, № 12, p.797

298. Furuchama S., Sumi T. A dynamic theory of piston-ring lubrication (3-rd report, Measurement of oilfilm thickness). *Bulletin of ISME- Vol.№4.- №16.- 1961*, p744-751.

299. Furuhamma S., Hiruma M. The relationsheep between piston ring scuffing and the formation of surface profile. London- New York. “Pistonring Scuff”, 1976, p 35 - 43.

300. Guanghui Fu, Abhijit Chandra, Sumit Guha, Ghatu Subhash. A Plasticity– Based Model of Material Removal in Chemical– Mechanical Polishing (CMP). *IEEE 2001*. – pp.406– 417.

301. J. Seok, C.P. Sukam, L. Borucki and other. Developing the Structure of a Cu CMP Model. *IEEE 2003*. – pp.303– 306.

302. Jacquet P. – «*Comptes Rendus*», 1936, № 5, p.402

303. Jahanmir S., and Beltzer M. “Effect of Additive Molecular Structure on Friction Coefficient and Adsorption”. *Journal of Tribology*, Vol.108, №1, 1986, p.109-116.

304. Jui– Chin Chen, Wen– Ta Tsai. Chemical– mechanical polishing behavior of tantalum in slurries containing citric acid and alumina. *Surface & Coatings Technology* 185 (2004). – pp.50– 57.

305. Kang S.C., and Ludema K.C., “The “Breaking-in” of Lubricated Surfaces”, *Wear*, Vol.108, 1986, p.375.

306. L. Economikos, X. Wang, A. Sakamoto, P. Ong, M. Naujok, R. Knarr, L. Chen, Y. Moon, S. Neo, J. Salfelder, A. Duboust, A. Manens, W. Lu, S. Shrauti, F. Liu, S. Tsai, W. Swart. Integrated Electro – Chemical Mechanical Planarization (Ecmp) for Future Generation Device Technology. *IEEE, 2004*. – pp.233– 235.

307. M. Mellier, T. Berger, R. Duru and other. Full Copper Electrochemical Mechanical Planarization (Ecmp) as a Technology Enabler for the 45 and 32nm Nodes. IEEE 2007. – pp.70– 72.

308. Milind Kulkarni, Dedy Ng, Melloy Baker and other. Electropotential–stimulated wear of copper during chemical mechanical planarization. Wear 263 (2007). – pp.1470– 1476.

309. Neale M.J. The scuffing of piston ring.” Chartered Mech. Eng.”, 1974,21, №8,p.79-81.

310. P.C. Goonetilleke, D. Roy. Electrochemical– mechanical planarization of copper: Effects of chemical additives on voltage controlled removal of surface layers in electrolytes. Materials Chemistry and Physics 94 (2005). – pp.388– 400.

311. Peter J. Blau. On the nature of running– in. Tribology International 38 (2005). – pp.1007– 1012.

312. Rowe G.W., “Surface Topographic Changes at Breakdown of Thin- film Lubrication”, Wear, Vol.28, 1974, p.125.

313. Ruff A.W., and Blau P.J., “Studies of Microscopic Aspects to Wear Processes in Metals”. Nat. Bur. of Standards, Report № NBSIR-80-2058, 1980.

314. Samuel B. Emery, Jennifer L. Hubble, Maria A. Darling and other. Chemical factors for chemical– mechanical and electrochemical– mechanical planarization of silver examined using potentiodynamic and impedance measurements. Materials Chemistry and Physics 89 (2005). – pp.345– 353.

315. Sheasby J.S., Caughlin T.A., Blahey A.G., Laycock K.F. “ A reciprocating wear test for evaluating boundary lubrication”. Tribology International, Vol. 23, 1990, p.301-308.

316. Shuo– Jen Lee, Yu– Ming Lee, Ming– Feng Du. The polishing mechanism of electrochemical mechanical polishing technology. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003). – pp.280– 286.

317. Spalvins T., and Buzek B. “Frictional and Morphological Characteristics of Ion-plated Soft Metallic Films”. Thin Solid Films, Vol. 84, №3,1981., p.266.

318. Taras Zamota, Alexander Kravchenko, Viktor Aulin. Improvement of roughness at running insurfaces of details // Материалы шеснадесетата научно-техническа конференция «Транспорт, екология – устойчиво развитие», сборник доклади, изд.-во ТУ-Варна. – 2010.- С.607 – 614.

319. Taras Zamota, Alexander Kravchenko. Electrochemical-mechanical running in of the main engine’s conjugations // ТЕКА, Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture.-Vol. XD.- Lublin, 2010.- P.58-65

320. Taras Zamota, Alexander Kravchenko. Improvement of tribotechnical characteristics of piston ring surfase at running in // ТЕКА, Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture.-Vol. XB.-Lublin,2010.-P.323-330

321. Taras Zamota, Victor Aulin. Improvement of Tribotechnical Characteristics of the Main Engine’s Pairings at Electrochemical-Mechanical running-in // ТЕКА, Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture.-Vol. 13, № 3 - Lublin, 2013.- P.244-251

322. Tzu– Hsuan Tsai, Yung– Fu Wu, Shi– Chern Yen. A study of copper chemical mechanical polishing in urea– hydrogen peroxide slurry by electrochemical impedance spectroscopy. *Applied Surface Science* 214 (2003). – pp.120– 135.

323. Victor Aulin, Taras Zamota. Selective wear of cuttings elements of working organs of tillage machines with realization of self-sharpening effect //TEKA, Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture.-Vol. 13, № 4 - Lublin, 2013.- P.9-17

324. Waletow W., Staufert G. *Moderne Method der Oberflächenforschung.- Technische Rundschau*, 1981, №10, s.5-7.

325. Yair Ein– Eli, David Starosvetsky. Review on copper chemical– mechanical polishing (CMP) and post– CMP cleaning in ultra large system integrated (ULSI)– An electrochemical perspective. *Electrochimica Acta* 52 (2007). – pp.1825– 1838.

326. Yuan– Long Chen, Shu– Min Zhu, Shuo– Jen Lee and other. The technology combined electrochemical mechanical polishing. *Journal of Materials Processing Technology* 140 (2003). – pp.203– 205.

327. Yung– Fu Wu, Tzu– Hsuan Tsai. Effect of organic acids on copper chemical mechanical polishing. *Microelectronic Engineering* (2007). – pp.1– 9.

Научное издание

Замота Тарас Николаевич,  
Аулин Виктор Васильевич

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ ПРИРАБОТКИ  
ОСНОВНЫХ СОПРЯЖЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ И РЕМОНТЕ

Монография

---

Наукове видання

Замота Тарас Миколайович,  
Аулін Виктор Васильович

УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ПРИПРАЦЮВАННЯ  
ОСНОВНИХ СПРЯЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ І РЕМОНТІ

Монографія

Російською мовою

---

Редактор – Замота Т.М.  
Технічний редактор – Лисенко В.Ф.  
Комп'ютерний набір – Замота О.М.