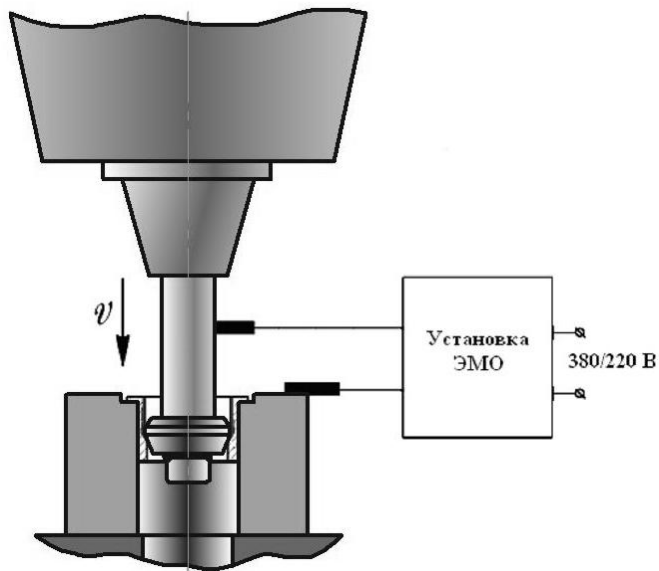


Министерство сельского хозяйства РФ  
ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА  
им. П.А. Столыпина»

**МОРОЗОВ А.В.**

**ОБЪЕМНОЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ  
ДОРНОВАНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ  
СТАЛЬНЫХ ВТУЛОК**

*Монография*



**Ульяновск – 2013**

УДК 621.77.04  
М 80  
ББК 34.4

Морозов А.В. Объемное электромеханическое дорнование тонкостенных стальных втулок. Монография / А.В. Морозов. – Ульяновск, УГСХА им. П.А. Столыпина, 2013. - 193 с.

**ISBN 978-5-905970-23-8**

Рецензенты:

д.т.н., профессор, декан факультета ТС в АПК ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина» **Казанцев С.П.**

д.т.н., профессор, заслуженный работник науки и образования, заведующий кафедрой «Материаловедение и ОМД» ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет» **Кокорин В.Н.**

Рассмотрены способы обработки отверстий деталей гладких цилиндрических сопряжений и конечные свойства обработанных поверхностей.

Предложен и теоретически обоснован способ объемного электромеханического дорнования тонкостенных стальных втулок.

Проведены исследования физико-механических и геометрических характеристик поверхностного слоя втулок обработанных предложенным способом. Также было исследовано усилие объемного электромеханического дорнования в зависимости от технологических режимов и прочность прессового соединения втулка – корпус полученного данным способом.

Показано влияние полученных свойств поверхности втулок на износостойкость.

Предназначена для инженерно-технических работников, научных организаций, а также аспирантов и студентов инженерных специальностей.

© Морозов А.В., 2013

© ФГБОУ ВПО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина», 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВНУТРЕННИХ ПО- ВЕРХНОСТЕЙ ТОНКОСТЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ВТУЛОК...	8
1.1 Детали класса «полые цилиндры» и особенности их изготовления.....	8
1.2 Анализ способов обработки отверстий .....	15
1.3 Виды и технологические характеристики процессов дорнования.....	34
1.4 Анализ условий эксплуатации и характерных износов гладких цилиндрических сопряжений.....	44
1.5 Обзор и анализ научно-исследовательской работы в области электромеханической обработки металлов.....	49
1.6 Выводы .....	60
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕ- СКОГО ДОРНОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ВТУЛОК.....	62
2.1 Обоснование возможности и условий применения технологии объемного электромеханического дорнования тонкостенных втулок.....	62
2.2 Тепловые явления при электромеханическом дорно- вании и методы расчета глубины упрочненного поверхно- стного слоя.....	70
2.3 Расчет площади пятна контакта инструмента с обра- батываемой поверхностью при объемном электромеханиче- ском дорновании.....	83
2.4 Расчет усилия электромеханического дорнования тон- костенной стальной втулки в замкнутом объеме.....	86
2.5 Выводы.....	95
3. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДОРНОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ВТУЛОК .....	96

3.1	Общая методика исследований.....	96
3.2	Образцы для исследований и инструмент.....	97
3.3	Экспериментальная установка, приборы и оборудование.....	99
3.4	Методика лабораторных исследований.....	102
3.5	Выводы.....	115
4.	ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДОРНОВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОСТЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ВТУЛОК .....	116
4.1	Влияние объемного электромеханического дорнования на физико-механические свойства поверхностного слоя тонкостенных стальных втулок.....	116
4.2	Влияние объемного электромеханического дорнования на шероховатость и текстуру волокон тонкостенных стальных втулок.....	122
4.3	Влияние объемного электромеханического дорнования на усилие при обработке стальных тонкостенных втулок.....	125
4.4	Качество соединения с натягом полученного объемным электромеханическим дорнованием тонкостенных стальных втулок.....	128
4.5	Влияние режимов объемного электромеханического дорнования на качественные и количественные характеристики.....	129
4.6	Износостойкость поверхностей обработанных объемным электромеханическим дорнованием.....	139
4.7	Выводы.....	143
5.	РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДОРНОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ВТУЛКИ КОРПУСА СРЕДНЕГО ТУРБОКОМПРЕССОРА ТКР – 11Н – 1 И ОЦЕНКА ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	145
5.1	Общие правила выполнения процесса электромеханического дорнования.....	145

5.2 Обоснование выбора для исследования марки турбокомпрессора.....	146
5.3 Анализ условий эксплуатации турбокомпрессора ТКР-11Н-1.....	148
5.4 Разработка технологического процесса ремонта втулки корпуса среднего турбокомпрессора с применением объемного электромеханического дорнования .....	154
5.5 Стендовые испытания турбокомпрессоров, с втулками установленными объемным электромеханическим дорнованием.....	160
5.6 Методика и результаты эксплуатационных испытаний отремонтированных турбокомпрессоров.....	163
5.7 Прогнозирование ресурса втулки установленной с натягом в средний корпус турбокомпрессора ТКР-11Н-1 объемным электромеханическим дорнованием .....	166
5.8 Экономическая эффективность применения технологии объемного электромеханического дорнования тонкостенных стальных втулок.....	170
5.9 Выводы.....	179
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ .....	180
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	182

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие сельского хозяйства во многом зависит от успехов в создании и реализации эффективных и ресурсосберегающих технологий, новых материалов и конструкций.

Требования повышения качества, надежности и долговечности работы деталей в машине и машины в целом в значительной степени определяются физико-механическими и геометрическими характеристиками металлов, и поверхностей обрабатываемых деталей. Именно качество рабочих поверхностей практически во всех случаях предопределяет важнейшие эксплуатационные свойства деталей - прирабатываемость, износостойкость, сопротивление схватыванию и др.

Решить проблему повышения срока службы машин можно двумя путями: совершенствованием организации производства и совершенствованием технологических процессов с помощью оснащения предприятий современными оборудованием и технологией, позволяющей производить изготовление и восстановление деталей с необходимым качеством рабочих поверхностей.

Такая технология должна быть доступна предприятиям любого уровня и характеризоваться простотой и универсальностью осуществления, незначительными материальными затратами на приобретение и обслуживание техники, низкой материалоемкостью и энергоемкостью при достижении необходимого качества деталей машин. Далеко не последнюю роль в выборе методов обработки отводится технологической безопасности и экологической чистоте разработок.

Широкое применение в сельскохозяйственной технике нашли детали класса полые цилиндры, в частности тонкостенные втулки, которые зачастую изготавливаются в несколько (2 ... 10) операций режущими и калибрующими инструментами путем снятия части металла (припуска) в стружку. Также в сельскохозяйственной технике применя-

ется большое количество дорогостоящих корпусных деталей, при ремонте отверстий которых находят свое широкое применение тонкостенные стальные втулки с качественными исполнительными поверхностями.

Снижение металлоемкости и повышение качества поверхностей при изготовлении тонкостенных втулок является актуальной задачей. Большой вклад в решение данной задачи внесли Проскураков Ю.Г., Розенберг О.А., Монченко В.П. и другие исследователи, разработки которых находят свое успешное применение при ремонте деталей автомобилей, тракторов, комбайнов и другой техники [70, 71, 74, 92, 96].

Анализ износа данных деталей показал, что большинство их выходит из строя из-за низких эксплуатационных свойств исполнительных поверхностей.

Обзор современных технологий восстановления и упрочнения, анализ их преимуществ и недостатков позволяет рекомендовать технологию электромеханической обработки, как один из эффективных способов повышения долговечности стальных тонкостенных втулок.

В данной работе представлены материалы по совершенствованию процесса электромеханической обработки (ЭМО) и его применение к обработке исполнительных поверхностей тонкостенных втулок с разработкой способа объемного электромеханического дорнования (ОЭМД).

# 1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТОНКОСТЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ВТУЛОК

## 1.1 Детали класса «полые цилиндры» и особенности их изготовления

### *1.1.1 Применяемость деталей класса «полые цилиндры»*

В конструкциях машин, оборудования, приборов и механизмов сельскохозяйственной техники широко применяются втулки, кольца, цилиндры и другие полые тела вращения, которые по общности конструктивно-технологических признаков объединяются в класс однотипных деталей полые цилиндры. Эти детали выполняют разнообразные функции и используются в широком диапазоне динамикоскоростных, эксплуатационных условий.

Рабочими и несущими поверхностями рассматриваемых деталей являются цилиндрические, конические, шлицевые и, реже, торцевые поверхности. Повышенные требования к точности, шероховатости, твердости и другим характеристикам нагруженных поверхностей устанавливаются в зависимости от условий и интенсивности их эксплуатации.

Долговечность деталей этого класса в основном определяется работоспособностью их несущих (рабочих) поверхностей, поэтому повышенные требования к точности и качеству последних являются одной из особенностей этих деталей, определяющей их классификацию и последовательность обработки. Наименование деталей в определенной степени отражает специфику их эксплуатации, конструктивные особенности и требования к изготовлению рабочих поверхностей. Детали с повышенными требованиями к качеству внутренней поверхности (отверстия) принято называть гильзами и втулками. Такие детали, как втулки-



пальцы и телескопические цилиндры, поверхности которых работают в равных эксплуатационных условиях, выполняются по одинаковым техническим требованиям.

Анализ [69, 70] применяемости и технологии изготовления деталей класса полые цилиндры показывает, что кольца, втулки, гильзы, и т. п. детали составляют 10 - 18% общего количества деталей, проходящих механическую обработку (рис. 1.1), а некоторые массовые изделия, такие, как втулочно-роликовые цепи, гидропневмоцилиндры, станы Козлова для строительных панелей, шахтные гидрокрепы, гусеничные траки, подшипники качения, в основном состоят из колец, втулок, гильз и плунжеров.



Рисунок 1.1 – Диаграмма распределения деталей класса полые цилиндры в общем количестве выпускаемых деталей проходящих механическую обработку

Широко применяемые в сельскохозяйственной технике гидропневматические приводы возвратно-поступательного движения в качестве основных имеют детали рассматриваемого класса. Так, для гидростоек шахтных крепей используются плунжерные гидроцилиндры, гильзы и буртовые втулки, а для автомобилей, тракторов, дорожных и строительных машин – поршневые, плунжер-

ные гидроцилиндры и цилиндры амортизаторов в подъемнотранспортных, дорожных и других машинах и металлообрабатывающих станках находят применение телескопические гидроцилиндры, состоящие из тонкостенных цилиндров, полых деталей с повышенными требованиями к точности, шероховатости, прямолинейности и износостойкости цилиндрических поверхностей.

По конструктивному оформлению деталей (рис. 1.2) применяемость составляет: осесимметричных втулок (рис. 1.2 1, 2) – более 85%, неравножестких деталей (рис. 1.2 3, 4) типа эксцентриков, разрезных цапг – до 15%. Ряд полых деталей свариваются с другими деталями в подушлы. Так, в транспортных, дорожных и сельскохозяйственных машинах до 12% втулок, пальцев, 43% гильз и 56% плунжеров привариваются в подушлы. Наиболее точные и трудоемкие детали – гильзы (рис. 1.2 5–7) выполняются осесимметричными (иногда с неглубокими проточками, канавками) и составляют соответственно 64,5 и 78%. Остальные детали этого типа из-за приварки к ним штуцеров, цапф, колец, фланцев, заглушек и т. п. несимметричны.

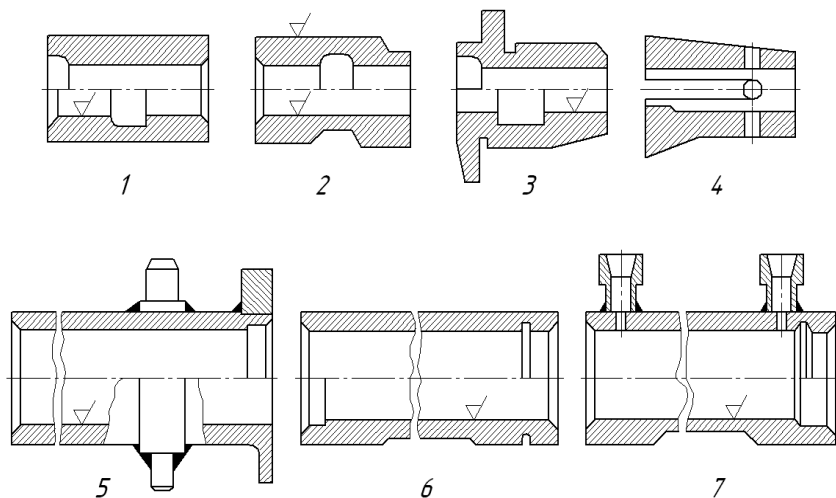


Рисунок 1.2 – Детали типа втулки и гильзы

Более 90% рассматриваемых деталей имеют относительную толщину стенки в диапазоне  $1,1 < D/d < 1,6$  (рис. 1.3) ( $D$  и  $d$  — соответственно наружный и внутренний диаметры), что указывает на возможность обработки цилиндрических поверхностей этих полых деталей пластическим деформированием, так как наибольшее отношение  $D/d < 2$  меньше теоретического предела 2,93, рекомендуемого для раздачи и обжима деталей подобного типа, известного из теории обработки металлов давлением.

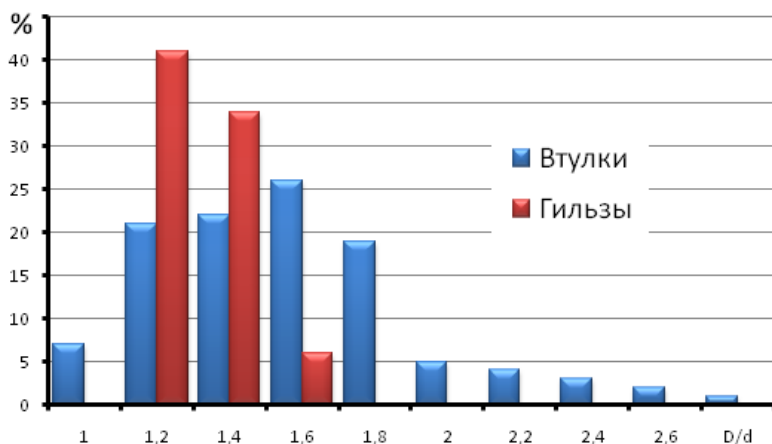


Рисунок 1.3 – Диаграмма распределения втулок и гильз по толщине стенки

Примерно у 92% втулок точность изготовления отверстий составляет 8 – 11 квалитет с шероховатостью внутренней поверхности  $20 > Ra > 1,25$  мкм, тогда как точность отверстий силовых гильз находится в пределах 7 – 11 квалитет при шероховатости поверхности  $2,5 > Ra > 0,16$  мкм (рис. 1.4 и 1.5.), причем наиболее вероятная точность 8 – 11 квалитет, а шероховатость поверхности  $0,63 > Ra > 0,16$  мкм. Обработка отверстий по 9 – 12 квалитету точности с шероховатостью поверхности  $2,5 > Ra > 0,63$  мкм допускается в основном для гильз пневмоцилиндров.

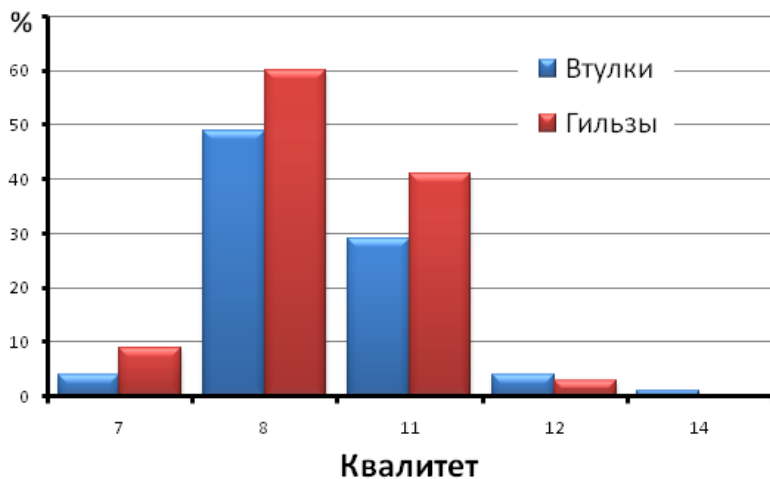


Рисунок 1.4 – Диаграмма распределения отверстий втулок и гильз по классам точности

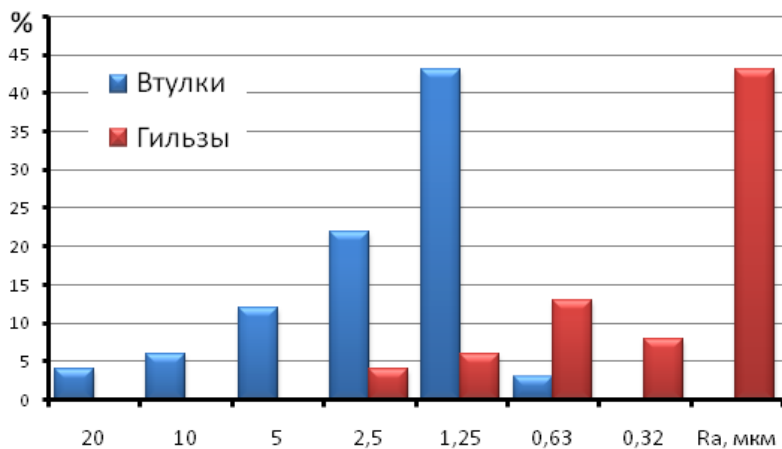


Рисунок 1.5 – Диаграмма распределения втулок и гильз по шероховатости внутренней поверхности

Требования к прямолинейности образующих гильз, в зависимости от вида силовых цилиндров (поршневые, плунжерные), находятся в пределах 0,02–0,10 мм на 100 мм длины.

### *1.1.2 Основные способы изготовления полых цилиндров*

Технико-экономический анализ методов и технологических процессов изготовления втулок, гильз, полых пальцев, плунжеров и т. п. деталей позволяет отметить следующее:

- основным методом изготовления деталей является многопереходная обработка режущим и абразивным инструментами, связанная с большим отходом (от 20 до 40%) металла и высокой трудоемкостью обработки. При этом, как правило, снижаются прочностные характеристики детали из-за перерезания волокон, образования на поверхностях микроскопических трещин, появления растягивающих остаточных напряжений и шаржирования несущих поверхностей абразивом, что отрицательно влияет на работоспособность деталей машин;

- технические условия оговаривают точность, чистоту, расположение и твердость поверхностей деталей без указания метода окончательной обработки, что не обеспечивает формирование оптимальных физико-механических свойств нагруженных поверхностей деталей, соответствующих условиям эксплуатации машин и механизмов. Выбор метода окончательной обработки основывается на возможностях завода и опыте традиционного применения режущих, абразивных и калибрующих инструментов;

- при окончательной обработке цилиндрических поверхностей наряду с абразивной обработкой применяются упрочняюще-калибрующие методы (раскатывание, дорнование, обкатывание), что существенно повышает долговечность деталей и производительность труда на финишных операциях.

- методы точной деформирующей обработки [70, 71, 72, 89, 90, 91] цилиндрических поверхностей (дорнование отверстий с большими натягами) при изготовлении полых цилиндров применяются недостаточно, что объясняется отсутствием инженерных рекомендаций по внедрению этих

методов и ограниченным распространением опыта некоторых заводов.

- основной технологической операцией при изготовлении деталей типа втулки, гильзы является точная обработка отверстий. В зависимости от конструкции втулки и технических условий к отверстию трудоемкость такой обработки составляет от 30 до 60% общей трудоемкости изготовления детали, а для гильз силовых цилиндров 65 - 90%. Обработка отверстий в таких деталях, в зависимости от точности, длины, диаметра и шероховатости поверхности, производится в несколько операций режущими, абразивными и, реже, калибрующими инструментами.

- стоимость материала в общей себестоимости изготовления втулок, в зависимости от сложности их формы и точности отверстий, составляет от 50 до 80%, а для силовых гильз от 35 до 50%, т. е. стоимость металла является основной составляющей частью себестоимости этих деталей.

С точки зрения наибольшей производительности отверстия во втулках целесообразно обрабатывать протяжками. Однако при обработке тонкостенных втулок с соотношениями  $1,1 < D/d < 1,2$  и  $L/d > 3$  ( $L$  – длина детали) возникает опасность потери их устойчивости, искривления оси и поломки протяжек. Кроме того, обработка резанием длинных отверстий в деталях из малоуглеродистых, вязких сталей не обеспечивает шероховатость поверхности выше  $Ra - 1,25$  мкм. Применение комбинированных, режуще-выглаживающих протяжек для обработки отверстий в тонкостенных втулках не всегда эффективно, так как не обеспечивается сглаживание остаточных микронеровностей из-за малой величины контактных давлений.

Наиболее сложны в производстве гильзы силовых цилиндров. По конструктивному оформлению, влияющему на последовательность операций, гильзы можно разделить на: гладкие, осесимметричные с неглубокими выточками; с приваренными штуцерами, цапфами; фланцевые. В зависимости

от точности отверстия (11 - 7 квалитет), шероховатости поверхности ( $1,25 >Ra> 0,16$  мкм) и диаметра гильзы обрабатываются по сложной, многопереходной (от 4 до 10 операций) технологии при значительном отходе металла в стружку.

С повышением точности отверстия, требований к снижению шероховатости поверхности втулок и гильз возрастает необходимый припуск, что увеличивает число операций, трудоемкость, металлоемкость, расход инструментов, электроэнергии, затраты на амортизацию и ремонт металлорежущего оборудования.

Анализ производства показывает, что возможности увеличения производительности труда и снижения себестоимости изготовления втулок, гильз за счет дальнейшего совершенствования методов обработки металлов резанием передовыми заводами фактически исчерпаны, и без применения точных, малоотходных способов обработки даже автоматизация изготовления может во многих случаях, оказаться неэффективной.

## **1.2 Анализ способов обработки отверстий**

Получение отверстий высокой точности, шероховатости с заданными физико-механическими характеристиками поверхностного слоя остается сложной технологической задачей, более сложной, чем обработка наружных поверхностей, что учитывается системой допусков и посадок. Поэтому выбор рационального способа обработки является основополагающим этапом в процессе получения отверстия требуемого качества.

Существующие способы обработки отверстий можно разделить на три основные группы (рис.1.6): обработка отверстий лезвийным инструментом; обработка отверстий абразивным инструментом и обработка отверстий упрочняюще – калибрующим инструментом.

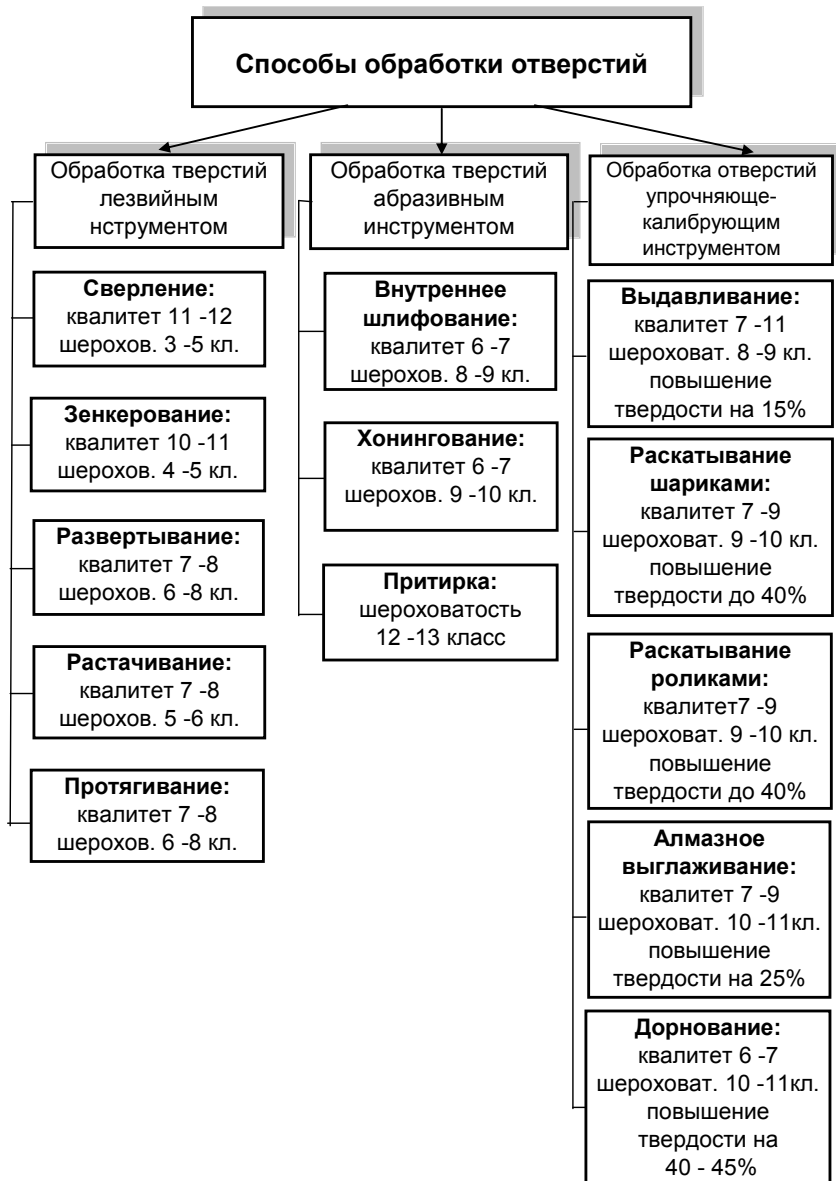


Рисунок 1.6 – Классификация основных способов обработки отверстий



### *1.2.1 Обработка отверстий лезвийным инструментом*

К способам обработки отверстий лезвийным инструментом относятся: сверление, зенкерование, развертывание, растачивание и протягивание.

**Сверлением** получают отверстия в сплошном материале. Для неглубоких отверстий используют стандартные сверла диаметром 0,30...80 мм.

Существует два метода сверления: 1) вращается сверло; 2) вращается заготовка.

Обработку отверстий диаметром до 25...40 мм осуществляют спиральными сверлами за один переход, при обработке отверстий больших диаметров (до 80 мм) – за два и более перехода сверлением и рассверливанием или другими методами. Для сверления отверстий диаметром свыше 80 мм применяют сверла или сверлильные головки специальных конструкций.

При обработке глубоких отверстий ( $L/D \geq 10$ ) трудно обеспечить требуемое положение оси отверстия относительно ее наружной цилиндрической поверхности. Чем больше длина отверстия, тем больше увод инструмента.

**Зенкерование** – предварительная операция, предназначенная для обработки отверстий, полученных в результате сверления, рассверливания спиральными сверлами, а также отверстий в литых и штампованных заготовках под последующее развертывание, растачивание или протягивание. Зенкерованием обрабатывают цилиндрические углубления (под головки винтов, гнезд под клапаны и др.), торцовые и другие поверхности.

Режущим инструментом при зенкеровании является зенкер. Зенкеры изготавливают цельными с числом зубьев 3...8 и более, диаметром 3...40 мм; насадными диаметром 32...100 мм и сборными регулируемым диаметром 40...120 мм. Рабочая часть зенкеров, изготовленных из быстрорежущих сталей, должна иметь твердость 62...65 HRC

и равномерную конусность по направлению к хвостовику (0,05 - 0,1 мм на 100 мм длины).

Зенкерование является производительным методом: повышает точность предварительно обработанных отверстий, частично исправляет искривление оси после сверления. Для повышения точности обработки используют приспособления с кондукторными втулками. Зенкерованием обрабатывают сквозные и глухие отверстия.

Зенкеры исправляют, но не устраняют полностью искривления оси отверстия. Припуски, снимаемые за один рабочий ход, могут достигать 6 мм на диаметр. Достижимая шероховатость  $Ra = 12,5 \dots 6,3$  мкм.

**Развертывание** предназначено для чистовой обработки отверстий  $Ra = 6,3 \dots 1,6$  мкм. Развертывание предпочтительнее применять при обработке глухих и ступенчатых отверстий; при изготовлении деталей с несколькими близко расположенными отверстиями, которые можно обрабатывать развертками, закрепленными в многошпиндельные головки одновременно; при обработке отверстий малого диаметра и большой длины; при последовательной обработке отверстий на токарно-револьверных, агрегатных, многопозиционных и других станках, когда операция (позиция) легко совмещается с другими операциями: сверлением, зенкерованием, подрезкой торцов и др.

Развертки, как и зенкера, выполняют цельными, насадными, с цилиндрическим, либо коническим хвостовиком, оснащают вставными ножами, впаянными пластинками из твердого сплава, либо изготавливают из быстрорежущих сталей и т. д.

Главные отличия разверток от зенкеров следующие: значительно большее число режущих зубьев; меньшие углы в плане; развертки предназначаются для снятия небольшого припуска и имеют стружечные канавки меньших размеров, чем у зенкеров.

Рекомендуется ограниченно применять или не рекомендуется применять совсем развертывание в массовом производстве, когда можно использовать протягивание; при обработке отверстий в термообработанных на высокую твердость деталях, когда предпочтительнее внутреннее шлифование; при обработке отверстий с жесткими допусками расположения оси, когда применение алмазного или координатного растачивания предпочтительнее.

Трудности обеспечения малых допусков расположения оси относятся к наиболее существенным недостаткам развертывания. Поэтому часто после сверления, зенкерования и развертывания отверстий на агрегатных и многопозиционных станках производят дополнительное растачивание отверстий. Отклонения размера, формы и шероховатость поверхности увеличиваются по сравнению с ранее достигнутыми, что требует дополнительного алмазного растачивания. Маршрут обработки оказывается нерациональным.

Частично эти недостатки развертывания могут быть устранены ориентированием разверток рабочей частью или специальными направляющими частями по жестким либо вращающимся кондукторным втулкам, увеличением длины кондукторных втулок и жесткости разверток, повышением износостойкости кондукторных втулок и направляющих частей разверток путем изготовления их из быстрорежущих сталей или твердых сплавов, а также оснащения пластинками из твердых сплавов, уменьшением радиального зазора между внутренней поверхностью кондукторной втулки и направляющей частью развертки за счет повышения точности их изготовления; применением специальных центрирующих кондукторных втулок и оправок с центрирующей направляющей частью, поддерживающих центров и др., что значительно уменьшает отклонения расположения осей обрабатываемых отверстий и дает возможность исключить последующее растачивание отверстий.

**Растачивание отверстий** имеет следующие преимущества:

широкая универсальность, позволяющая путем изменения расположения резцов относительно оси оправки или оси станка обрабатывать отверстия различных диаметров и глубины;

малые затраты на изготовление и заточку резцов и резцовых вставок при широком оснащении их рациональными инструментальными материалами, позволяющими в ряде случаев обрабатывать отверстия без подачи СОЖ в зону резания;

стабильное обеспечение высокой точности расположения осей обрабатываемых отверстий, так как при растачивании отверстий инструмент жестко закрепляют на станке и по обрабатываемому отверстию не направляют.

Недостатки растачивания следующие: вследствие широкой универсальности растачивания требуются разработка и использование с соответствующими затратами времени и средств специальных приспособлений и устройств для установки, наладки и подналадки резцов на размер обрабатываемого отверстия; из-за отсутствия силового замыкания между резцом, оправкой и поверхностью обрабатываемого отверстия повышаются требования к жесткости самого инструмента, элементов закрепления его на станке и меняется точность обработки как в поперечном сечении, так и вдоль оси обрабатываемого отверстия; отсутствие калибрующей части, нескольких зубьев и других конструктивных элементов, характерных для мерных инструментов, снижает размерную стойкость расточных инструментов, требует соблюдения специальных условий для «безрисочного» вывода инструмента из обработанного отверстия и т. д.

По конструктивному исполнению резцы, применяемые при растачивании, разделяют на токарные, расточные (стержневые, монолитные), предназначенные для непосредственного крепления в суппорте токарного станка, и держа-

вочные (квадратного или круглого сечения), которые могут быть закреплены в консольных оправках или борштангах.

Токарные и расточные резцы изготавливают с напайными пластинками из быстрорежущей стали или твердого сплава, с монокристаллической твердосплавной паяной или клееной рабочей частью, с механически прикрепленными неперетачиваемыми пластинами. Резцы из быстрорежущей стали небольших сечений выполняют сварными.

Для обработки отверстий с малыми допусками применяют резпластинку. В зависимости от технологических условий обработки выбирают соответствующий тип крепления пластинки, расположение которой определяется геометрией резца в плане.

**Протягивание** - один из высокопроизводительных способов механической обработки металлов, который широко применяют в массовом производстве взаимозаменяемых деталей машин, станков и других изделий машин и приборостроения.

Протяжками обрабатывают металлы и пластические массы, допускающие обработку резанием [96].

Особенности процесса протягивания следующие: применение точного многолезвийного, сложного в изготовлении инструмента; обработка заготовки одновременно по всему профилю; отсутствие между инструментом и изделием промежуточных звеньев; простота наладки станка и установки изделия и инструмента; высокая точность 9 – 7 квалитет и низкая шероховатость обработанной поверхности  $Ra = 0,32 \dots 2,5$  мкм; высокая производительность и экономичность процесса обработки.

Принципиального различия в устройстве и работе протяжек и прошивок нет. Протяжку протягивают сквозь обрабатываемое отверстие, а прошивку проталкивают. На протяжку действует растягивающая сила, а на прошивку – сжимающая, поэтому прошивки приходится делать более короткими.

Производительность протягивания в 3 – 12 раз выше производительности других способов механической обработки металла (развертывания, фрезерования, долбления, строгания, шлифования).

Протягивание применяют в различных отраслях машиностроения для обработки всевозможных внутренних (замкнутых) и наружных (открытых) поверхностей различных деталей.

Внутреннее протягивание используют для обработки различных отверстий: круглых (цилиндрических), квадратных, многогранных, шлицевых с различным профилем прямых и винтовых канавок, а также шпоночных и других фигурных пазов в отверстиях заготовки. Диаметр протягиваемых отверстий составляет 2 – 4000 мм, длина до 10м. Чаще всего протягивают отверстия диаметром 10 – 75 мм, длиной, не превышающей 2,5 – 3 диаметров. Ширина протягиваемых пазов составляет 1 – 200 мм.

Способы обработки отверстий лезвийным инструментом не смотря на свою распространенность и эффективность имеют ряд весомых недостатков. Это увод осевого инструмента от своей оси, что влечет за собой получение отверстия низкого качества точности, класс получаемой шероховатости также далеко не всегда удовлетворяет предъявляемым требованиям, следовательно, обработка отверстий лезвийным инструментом в основном служит промежуточным этапом в процессе получения отверстия высокого качества. Одним из недостатков обработки лезвийным инструментом является перерасход дорогостоящего материала в стружку, это влечет за собой дополнительные экономические затраты и затраты труда на послеоперационное обслуживание станков.

### *1.2.2 Обработка отверстий абразивным инструментом*

Под **внутренним шлифованием** понимают процесс абразивной обработки внутренних цилиндрических поверхностей преимущественно в телах вращения. Шлифование

отверстий в деталях машин и приборов обеспечивает высокую точность размеров и формы, а также необходимый класс шероховатости поверхности. Этот процесс иногда предшествует отделочным операциям: хонингованию, доводке и т. д. Ему же обычно предшествуют такие операции, как растачивание, развертывание и сверление, а также термическая обработка. При внутреннем шлифовании снимается припуск в несколько десятых долей миллиметра.

Внутреннее шлифование применяют при обработке точных отверстий в режущих, мерительных и вспомогательных инструментах, втулках, кольцах шарико- и роликоподшипников, гильзах цилиндров двигателей внутреннего сгорания, деталях гидроаппаратуры, шпинделях металлорежущих станков и других деталях машин и приборов. Область применения внутреннего шлифования охватывает все виды производства: от индивидуального (например, в инструментальных и ремонтных цехах) до поточно-массового, а также применяется на автоматических поточных линиях, например, в автоматическом цехе подшипников ОАО «Московский подшипник - (ГПЗ-1)», где шлифование отверстий является одной из ответственных и распространенных операций.

Внутреннее шлифование применяют не только как операцию окончательной обработки, но в ряде случаев и как промежуточную операцию (для повышения точности размера и геометрии и для подготовки обрабатываемой поверхности под отделочные операции). На внутришлифовальных станках можно обрабатывать детали как со сквозными, так и с глухими цилиндрическими и коническими отверстиями, а также со сферической поверхностью. Шлифованию подвергаются отверстия в деталях из различных металлов: стали с различными физико-механическими свойствами, чугуна, твердых и цветных сплавов, а также из неметаллических материалов.

Внутреннее шлифование чаще всего применяется при обработке точных отверстий в закаленных деталях или в деталях из высокотвердых и труднообрабатываемых металлов; точных отверстий с пересеченной поверхностью, например с выточкой, со шпоночными и шлицевыми пазами; глухих отверстий, отверстий в деталях с неодинаковой толщиной стенок или неоднородной твердостью металлов; отверстий 7 квалитета точности и выше, а также точных отверстий больших диаметров (свыше 100 мм), когда развертывание не может обеспечить требуемую точность.

При шлифовании отверстий, кроме точности размера и требуемой шероховатости поверхности, необходимо обеспечить также точность формы, т. е. цилиндричность, прямолинейность, перпендикулярность оси отверстия к торцам, а также концентричность по отношению к наружным поверхностям. Точность формы отверстий в чертежах обычно не оговаривается, но при этом подразумевается, что отклонения не выходят за пределы поля допуска. Измерения отклонений от геометрической формы отверстия затрудняются отсутствием отдельных видов контрольных приборов.

Возможны два вида шлифования. При шлифовании первого вида шлифовальный круг вращается вокруг своей оси, а обрабатываемая деталь - вокруг оси отверстия, будучи закрепленной в патроне или в другом приспособлении, связанном с вращающимся шпинделем бабки изделия. При шлифовании второго вида шлифовальный круг вращается вокруг своей оси и одновременно вокруг оси обрабатываемого отверстия, а деталь остается неподвижной. Такой вид шлифования называется планетарным и используется преимущественно при обработке отверстий в тяжелых и крупных деталях.

Особенностью внутреннего шлифования и его незаменимым достоинством является возможность исправления «увода» оси отверстия, образовавшегося при предшествующих шлифованию операциях.



На современных внутришлифовальных станках возможна одновременная обработка отверстия и торца детали. Такое сочетание обеспечивает повышение точности и производительности, а также высокую степень перпендикулярности торцевой поверхности к оси отверстия обрабатываемой детали.

Существующие внутришлифовальные станки позволяют обрабатывать отверстия диаметром от 5 мм, и в некоторых специальных случаях от 1 мм.

Чистовым шлифованием обеспечивается 6 квалитет точности, а шероховатость поверхности  $Ra = 0,8 \dots 0,32$  мкм. При длительном выхаживании достигается  $Ra = 0,4$  мкм.

Однако процесс внутреннего шлифования имеет ряд ограничений.

1. В отличие от наружного и плоского шлифования, при котором диаметр шлифовального круга в известной мере не зависит от диаметра обрабатываемой поверхности детали, при внутреннем шлифовании диаметр круга ограничен размером обрабатываемого отверстия. Следовательно, скорость круга нельзя повышать за счет увеличения его диаметра и единственным средством повышения скорости резания является увеличение числа оборотов шпинделя круга. В то же время с изменением диаметра шлифовального круга изменяется длина поверхности контакта шлифовального круга с обрабатываемым отверстием. При постоянном соотношении между диаметрами отверстия и шлифовального круга величина поверхности контакта будет также пропорциональна этому соотношению. С уменьшением поверхности контакта повышается давление, а следовательно, и сьем металла, но при этом увеличивается шероховатость обрабатываемой поверхности. Повышение давления при малой величине поверхности контакта требует применения кругов повышенной твердости.

По нормам техники безопасности работы на шлифовальных станках окружная скорость круга  $v_k$  не должна

превышать 35 м/сек. Существующие конструкции станков с ременным приводом при обработке отверстий диаметром от 40 до 100 мм позволяют приблизиться к  $v_k = 35$  м/сек. Шлифование отверстий диаметром менее 40 мм приходится производить с пониженной скоростью ( $v_k = 15 - 25$  м/сек и ниже), так как трудно получить высокое число оборотов шпинделя. При весьма малых диаметрах отверстий (5 мм и ниже) окружная скорость круга при существующих числах оборотов шпинделя составляет лишь 3 – 5 м/сек.

Так, например, при диаметре шлифуемого отверстия 5 мм и  $v_k = 35$  м/сек понадобилось бы иметь число оборотов круга  $n_k = 134000$  в минуту, что неосуществимо при ременном приводе. Вместе с тем с возрастанием скорости увеличиваются сопротивления передачи и снижается к. п. д. станка.

2. Шпиндель круга по своим размерам и форме не всегда может представлять собой достаточно жесткую конструкцию, что ограничивает применение производительных режимов шлифования и в то же время влияет на точность обработки.

**Хонингование** является одним из методов отделочной обработки отверстий. Процесс осуществляется с помощью хонинговальных головок (хонов) со вставными абразивными брусками. Хонингование выполняется на специальных станках, которые подразделяются на две группы: вертикально-хонинговальные и горизонтально-хонинговальные.

Хонинговальная головка совершает совмещенное движение: вращательное и возвратно-поступательное при постоянном давлении абразивных брусков на обрабатываемую поверхность в среде смазочно-охлаждающей жидкости.

В процессе хонингования абразивные бруски удаляют слой металла толщиной 0,3...0,5 мкм за один двойной рабочий ход при общем припуске 0,01...0,07 мм для стали и 0,02...0,20 мм для чугуна. При этом снимаются как микро-

неровности, оставшиеся после предыдущей операции, так и некоторая часть основного металла, что позволяет устранить конусообразность, овальность, бочкообразность.

Предварительная обработка отверстий под хонингование может быть выполнена растачиванием, зенкерованием, развертыванием или шлифованием.

**Притирка** (доводка внутренних поверхностей) – является окончательным методом обработки заготовок деталей типа тел вращения, обеспечивающим малые отклонения размеров, отклонения формы обрабатываемых поверхностей и  $Ra = 0,16 \dots 0,01$  мкм. Этот метод характеризуется одновременным протеканием механических, химических и физико-химических процессов. Доводку выполняют с помощью ручных притиров или на специальных доводочных станках.

Анализируя данные способы обработки отверстий абразивным инструментом можно отметить, что наряду с приведенными выше достоинствами имеют место следующие недостатки:

1) при обработке абразивным инструментом поверхность отверстия шаржируется осколками абразивных зерен, существенно влияя на качество обработки;

2) при шлифовании пластичных материалов часто происходит внедрение абразивных частиц в обрабатываемую поверхность. В результате этого происходит ускоренный износ контактируемых поверхностей;

3) сложность обработки отверстий малых диаметров, связанная со снижением жесткости и прочности инструмента.

### *1.2.3 Обработка отверстий упрочняюще-калибрующим инструментом*

Формообразование поверхности без снятия стружки методами холодного пластического деформирования позво-

ляет изготавливать детали сложной конфигурации с достаточно высокой точностью.

Весьма прогрессивными в этом отношении являются также методы окончательной чистовой обработки деталей упрочняюще-калибрующими инструментами, так как помимо уменьшения шероховатости и повышения точности обработки, эти методы обеспечивают упрочнение поверхностного слоя деталей.

Из разработанных способов механического поверхностного упрочнения металлов в настоящее время в промышленности уже довольно широко применяются обкатывание и раскатывание поверхностей деталей роликами или шариками, прокатывание по профилю деталей между роликами, дорнование цилиндрических и фасонных отверстий, центробежно-шариковая обработка ротационными упрочнителями и др. Широко распространены также процессы формообразующей обработки сложных поверхностей в холодном состоянии с одновременным упрочнением поверхностного слоя металла, в частности выдавливание заготовок в холодном состоянии.

Эти процессы, основанные также на принципе взаимодействия путем копирования, скольжения или обкатывания поверхностей точным формообразующим инструментом, обеспечивают калибрование и окончательную отделку деталей высокого класса точности.

**Холодное объемное выдавливание** деталей (прессование) по технико-экономической эффективности процесса и качеству обработанных изделий занимает одно из первых мест среди других прогрессивных методов. Оно является процессом формообразования деталей переменного сечения, основанным на использовании пластических свойств металлов и сплавов, и заключается в вытеснении материала заготовки в условиях всестороннего сжатия в калибрующие зазоры, образованные рабочими деталями штампа (матрицей и пуансоном).

Холодным выдавливанием можно с успехом заменить такие методы, как обработка резанием, чистовая вытяжка, точное литье и частично - горячая штамповка. При этом достигается 7 – 11 квалитет точности, 8 – 9-й класс шероховатости; коэффициент использования возрастает до 0,9 – 0,96, в то время как при обработке резанием он равен 0,3 – 0,5, а при литье и горячей штамповке – 0,6 – 0,7 [59].

Холодное выдавливание дает возможность также повысить производительность труда и значительно уменьшить трудоемкость изделий.

Помимо перечисленных преимуществ, при холодном выдавливании происходит наклеп металла, что повышает прочностные характеристики материала деталей и дает возможность применять более дешевые марки сталей без ухудшения прочностных характеристик материала готовых деталей. Так, например, механические характеристики (пределы прочности и упругости) стали марки 10 при степени деформации  $q = 0,40$  повышаются до уровня стали 40 недеформированной [59].

К достоинствам холодного выдавливания относится также и возможность механизировать и автоматизировать этот процесс в условиях массового производства, создавать групповые переналаживаемые штампы в серийном производстве.

При **раскатывании** цилиндрических отверстий **шарики** или **ролики**, расположенные в сепараторе раскатки, обкатываясь по внутренней поверхности детали, воздействуют на поверхностный слой металла радиальными и окружными силами, деформируя выступы микронеровностей исходной шероховатости [ 29, 30, 82, 83, 85, 112].

Радиальные усилия в зоне контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью должны создавать удельные давления, превышающие предел текучести материала детали. При этом деформирование выступов шероховатостей сопровождается подъемом металла во впадине до уровня

сглаженной поверхности. Высота шероховатостей исходной поверхности уменьшается вплоть до полного заполнения микровпадин. Дальнейшее деформирование поверхности сопровождается ухудшением ее качеств. В этом случае на раскатанной поверхности из-за перенаклепа может появиться шелушение поверхностных слоев металла.

При работе с оптимальными режимами раскатывание обеспечивает шероховатость обработанной поверхности в пределах 9 - 10-го класса в зависимости от исходной шероховатости, а также точность, соответствующую 7 - 9 качеству. Роликовые жесткие нерегулируемые раскатки позволяют получать даже 6 – 7 качество точности [29, 30, 112].

В зависимости от химического состава, структуры и механических свойств металла твердость металла раскатанной поверхности может повышаться на 40%, а износостойкость - в полтора раза.

Отсутствие на раскатанной поверхности острых микронеровностей и шаржированного абразива значительно повышает износостойкость таких сопрягаемых деталей, как манжеты в гидроцилиндрах и различные уплотнения в трущихся местах, которые изготавливаются из кожи, резины и полихлорвинила.

Пластически обработанные поверхности имеют более высокую антикоррозионную стойкость.

Так как вязкие металлы не представляется возможным обработать резанием с высоким классом чистоты поверхности отверстий, раскатывание в этом случае является весьма эффективным средством чистовой, размерной и упрочняющей обработки. Раскатывание отличается высокой производительностью, стабильностью и простотой исполнения. Стоимость операции раскатывания в сравнении с полированием и хонингованием в 3 – 4 раза меньше.

Однако шариковые раскатки уступают роликовым в производительности и экономически достижимом качестве точности и поэтому не могут быть рекомендованы в массо-

вом производстве. Более перспективными в этом отношении являются роликовые раскатки. Но несмотря на это отечественные и зарубежные роликовые раскатки имеют существенный недостаток: под действием осевых усилий нагруженные ролики затормаживают вращение сепаратора; при этом ролики испытывают трение скольжения о торцовую и боковую стенки окна сепаратора, в результате чего изнашиваются ролики по наружному диаметру и опорному торцу, а также стенки в окнах сепаратора. Все это снижает долговечность указанной конструкции роликовых раскаток и сказывается на качестве обработки.

Одним из методов финишной обработки деталей поверхностным пластическим деформированием является **алмазное выглаживание**, которое применяют для упрочнения точных и высоконагруженных деталей.

Сущность процесса выглаживания заключается в упругопластической деформации поверхностного слоя при взаимодействии алмазного инструмента и обрабатываемой детали.

Сравнительно широкое применение алмазное выглаживание получило благодаря существенным преимуществам, связанным с физико-механическими свойствами алмаза. Наряду с высокой твердостью и теплопроводностью алмаз имеет низкий коэффициент трения по металлу. Рабочая поверхность алмаза может быть отполирована до  $R_z = 0,025 - 0,063$  мкм, что обеспечивает получение низкой шероховатости выглаженной поверхности. Алмазное выглаживание в отличие от обкатывания позволяет обрабатывать почти все металлы, поддающиеся пластической деформации, – и термообработанные до 55 – 60 HRC. При этом вследствие малых площадей контакта инструмента и детали сила выглаживания находится в пределах 50-300 Н, что позволяет обрабатывать нежесткие детали (тонкостенные втулки и валы) [14, 77, 78].

Выглаживание производится с целью уменьшения шероховатости поверхности до  $R_a = 0,04$  мкм, упрочнение поверхностного слоя на 20 – 30 % по сравнению с исходной твердостью и уменьшение отклонений от круглости в среднем на 40 %, от овальности и конусообразности на 10 – 20 % [77, 78].

### Дорнование отверстий

Чистовая обработка сквозных и глухих цилиндрических отверстий в деталях из стали, чугуна и цветных металлов продолжает оставаться трудоемкой операцией технологического процесса механической обработки, что связано, прежде всего с пониженной жесткостью инструмента, затруднениями с удалением стружки и плохим отводом тепла из зоны резания в отверстия обрабатываемой детали.

На рисунке 1.7 приведены данные, характеризующие экономически достижимые параметры шероховатости обработанной поверхности отверстий, полученных различными способами обработки.

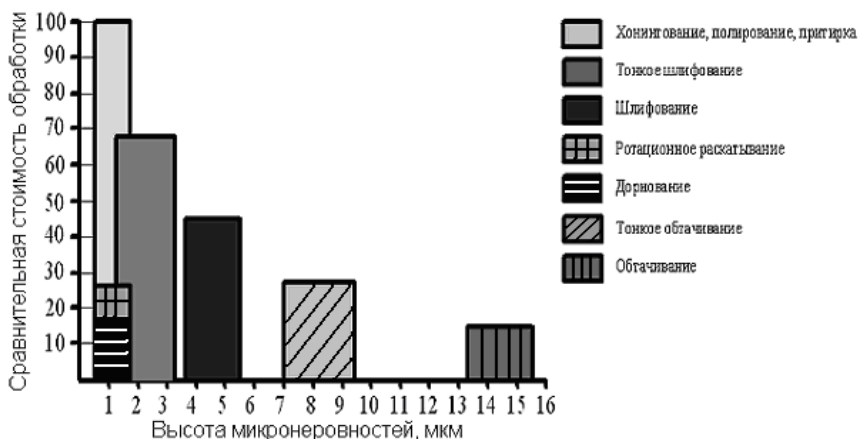


Рисунок 1.7 – Сравнительная стоимость обработки пластическим деформированием и различными методами обработки резанием



Достижение высокой степени чистоты поверхности (см. рисунок 1.7) возможно добиться при применении процессов резания лишь с помощью таких трудоемких операций, как хонингование, притирка или доводка.

За последнее время на машиностроительных предприятиях страны все более широко применяются процессы дорнования и раскатывания отверстий, в основу которых положен метод холодного пластического деформирования поверхностного слоя металла без снятия стружки. Данные процессы поверхностной обработки позволяют при сравнительно низкой себестоимости процесса добиться значительно высокой чистоты обработанной поверхности (см. рисунок 1.7).

На практике часто удается сочетать чистовую обработку с одновременным улучшением физико-механических свойств материала поверхности или значительным повышением точности размеров дорнованных отверстий [1, 70, 71, 89, 90, 92].

Диаметры отверстий, обрабатываемых по новым технологиям, колеблются в пределах от 1 до 600 мм при значительной длине обрабатываемых деталей; считавшиеся до некоторого времени предельными значения временного сопротивления  $150 - 170 \text{ кг/мм}^2$  и твердость 33 – 35 HRC, свыше которых обработка металлов в холодном состоянии не рекомендовалась, оказались заниженными [89, 92]. Практика имеет примеры по чистовой обработке поверхности сталей до твердости HRC выше 45 единиц.

В настоящее время дорнование с успехом применяется при обработке цилиндрических отверстий в деталях с симметричными и не симметричными стенками, изготовленными из различных марок легированных сталей, высокопрочных чугунов, алюминиевых и бронзовых сплавов. С применением дорнования достигается высокая точность и чистота поверхности; повышается износостойкость и усталостная прочность деталей, особенно ослабленных отвер-

ствиями как концентраторами напряжений; увеличиваются прочность прессовых посадок и стабильность в работе подвижных посадок; повышается статическая прочность цилиндров, работающих под высоким внутренним давлением [70, 71, 72, 89, 91, 92].

Дорнование можно использовать как промежуточную операцию перед термообработкой. Размерная точность отверстий закаленных деталей возрастает при этом в 1,6 – 2,3 раза, а это позволяет уменьшить припуск на последующих операциях хонингования или черновой доводки.

Дорнование также находит свое применение при обработке тонкостенных деталей типа втулки и гильзы в специально изготовленных обоймах, что позволяет получить высокую точность как внутренней, так и наружной поверхности.

По сравнению с раскатыванием и алмазным выглаживанием дорнование обеспечивает:

- 1) значительно больший диапазон рабочих натягов;
- 2) более высокую производительность процесса;
- 3) менее жесткие требования к точности размера и классу шероховатости поверхности отверстия на операции предшествующей дорнованию;
- 4) конструктивно простой в изготовлении и эксплуатации инструмент, обладающий значительной размерной стойкостью.

Поэтому в большинстве случаев дорнование является технологически и экономически более перспективным видом обработки, чем раскатывание и алмазное выглаживание.

### **1.3 Виды и технологические характеристики процессов дорнования**

Различают процессы сглаживающего, калибрующего, упрочняющего и формообразующего дорнования. Все эти

процессы отличаются друг от друга прежде всего тем, что режимы и схемы деформирования металла для каждого из них назначаются с определенной целью. Сглаживающее дорнование применяется для уменьшения исходной шероховатости поверхности отверстия, калибрующее дорнование применяется для повышения точности размеров и геометрической формы отверстий заготовок (например, после термической обработки), упрочняющее дорнование используется для повышения физико-механических характеристик металла заготовок за счет упрочнения, формообразующее дорнование применяют для профилирующей формообразующей обработки отверстий специальными дорнами (например, мелкозубых шлицев).

Различают процессы свободного и несвободного дорнования [92], основное отличие между которыми определяется условиями деформирования наружных поверхностей заготовок. При свободном дорновании всегда отсутствуют ограничения деформаций этих поверхностей. Именно так выполняются процессы поверхностного дорнования заготовок всех видов, а также объемного дорнования заготовок толстостенных и со средней толщиной стенки.

Однако применение свободного объемного дорнования отверстий тонкостенных заготовок ( $D/d \leq 1,2$ ) ограничено (из-за малой собственной жесткости заготовки) низкими нормальными напряжениями в зоне контакта дорн - деталь, которые часто не обеспечивают интенсивного выглаживания обрабатываемых поверхностей.

С другой стороны, из-за невысокой продольной жесткости эти заготовки при длине ( $L/d < 10$ ) быстро теряют при свободном объемном дорновании свою продольную устойчивость, искривляясь вдоль продольной оси.

Дорнование тонкостенных заготовок в условиях жесткого или упругого ограничения деформации их наружных поверхностей (несвободное дорнование) значительно снижает или полностью устраняет указанные недостатки [70,

71, 73, 92]. Несвободное дорнование выполняется в жестких или упругих обоймах, а также путем совмещения дорнования с редуцированием наружной поверхности заготовок. Основные схемы несвободного дорнования в жестких обоймах показаны на рисунке 1.7.

В очаге пластической деформации металла при дорновании можно выделить две зоны: зону, характеризующуюся увеличением внутреннего и наружного диаметров заготовки (до момента полного прилегания наружной поверхности заготовки к внутренней поверхности обоймы), и зону, характеризующуюся уменьшением толщины стенки заготовки и течением металла в кольцевой зазор между дорном и обоймой.

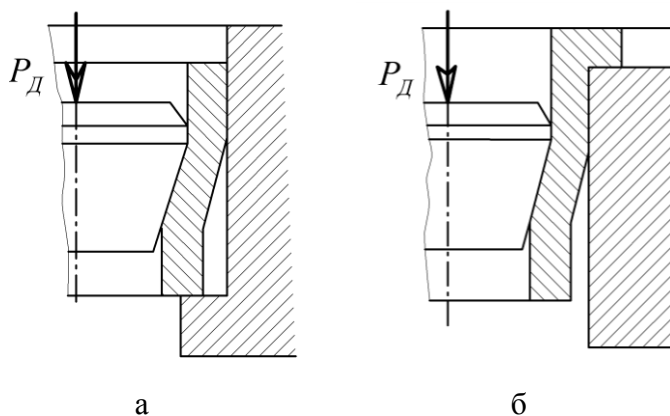


Рисунок 1.7 – Несвободное дорнование по схеме: а – сжатия, б – растяжения

Направление течения металла при пластической деформации может быть различно: навстречу движению дорна (рис. 1.7, а) или наоборот – по ходу его движения (рис. 1.7, б), что способствует уменьшению силы трения между контактируемыми поверхностями заготовки и обоймы.

Указанные особенности процесса дорнования в жестких обоймах и разнообразие применяемых схем дефор-

мирования определяют широкие возможности обработки заготовок деталей типа втулок, гильз. Кроме того, путем изменения формы или рельефа внутренней рабочей поверхности жесткой обоймы можно получить на наружной поверхности новую форму (насечку, резьбу и др.). Основные разновидности несвободного дорнования в жестких обоймах представлены на рисунке 1.8.

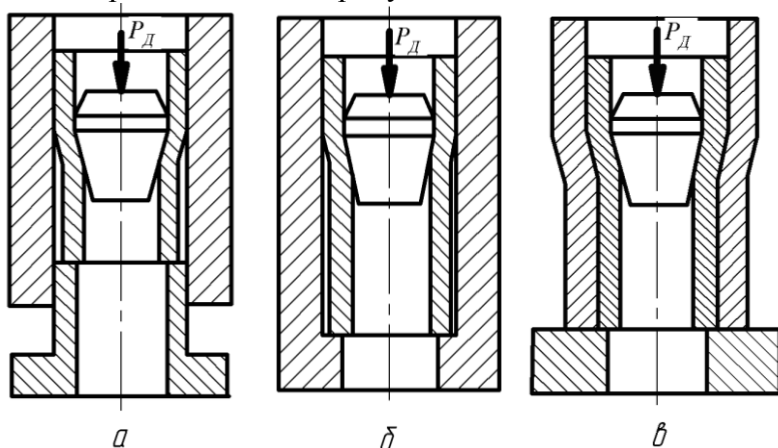


Рисунок 1.8 – Виды несвободного объемного дорнования в жесткой обойме: а – плавающей; б – неподвижной; в – деформируемой

Применение плавающей обоймы (рис. 1.8, а) обеспечивает постоянство деформирующей силы, отсутствие осевых относительных перемещений заготовки в обойме, а также сравнительно более облегченные условия пластического течения металла, чем при использовании обойм других видов. Из-за отсутствия осевых перемещений заготовки в обойме в специальных плавающих разъемных обоймах несвободным дорнованием можно получить специальные профили по наружной поверхности заготовки.

При дорновании в неподвижной обойме (рис. 1.8, б) условия пластического течения металла усложняются из-за

возникновения значительных сил трения между движущимся в осевом направлении деформированным участком заготовки и неподвижной обоймой, что приводит к существенному увеличению силы дорнования. Пластически деформируемые обоймы (рис. 1.8, в) применяют для получения больших тангенциальных деформаций обрабатываемых заготовок без их разрушения. В результате деформационного упрочнения металла заготовки, обработанные дорнованием в обойме, приобретают повышенные механические свойства (по сравнению со свойствами исходного материала) по всему сечению трубной заготовки, причем наибольшее упрочнение получают слои металла у поверхности отверстия. Это позволяет в некоторых случаях отказаться от дальнейшей термической обработки деталей или использовать вместо легированных и углеродистых сталей малоуглеродистые стали. Необходимо также отметить, что благоприятные схемы деформирования металла и локальность очага пластических деформаций при несвободном дорновании в жестких обоймах определяют меньшие по сравнению с холодным выдавливанием значения деформирующих сил. В связи с этим процесс дорнования в обойме может быть успешно осуществлен на протяжных станках и гидропрессах малой мощности.

Применение современных смазочных материалов для холодной обработки металлов давлением позволяет получить поверхность отверстия с шероховатостью  $Ra = 0,32 \dots 0,04$  мкм. Точность диаметральных размеров, получаемая при дорновании деталей в обойме, зависит от точности исходных заготовок, конструкции обоймы и режимов деформирования и находится в пределах 8-10-го квалитетов. Удаление дефектных торцовых частей детали в ряде случаев позволяет повысить точность диаметральных размеров до 7-го квалитета.

Дорнование в жесткой обойме может применяться при обработке как пластичных материалов, так и материалов с

пониженной пластичностью (высоколегированные стали, чугуны и др.).

Процессы несвободного дорнования в упругих обоймах пока не имеют полных технологических характеристик, так как практически не исследованы и не изучены.

По числу деформирующих зубьев дорнов различают однозубое и многозубое дорнование. Однозубое дорнование (поверхностное и объемное) в настоящее время применяется в основном при исследованиях процессов многозубого дорнования.

Многозубое дорнование позволяет осуществлять значительно большие, чем при однозубом дорновании, деформации за один рабочий ход инструмента и, что особенно важно, за счет изменения, геометрии, размеров и конструкции зубьев и самих многозубых дорнов позволяет целенаправленно изменять схему напряженно-деформированного состояния и общую последовательность пластического деформирования заготовок, обеспечивая при этом высокие качественные и точностные характеристики обработанных отверстий.

**Специальные виды процессов дорнования** [90] – дорнование шариком, через промежуточную разрезную втулку, с гидравлическим противодавлением, с дополнительным вращением дорна и заготовки, с наложением на заготовку (инструмент) дополнительных механических движений или продольных ультразвуковых колебаний. Дорнование шариком – основной и наиболее простой процесс, применяемый при поверхностном дорновании отверстий колец и обойм подшипников. Преимуществами этого процесса является простота инструмента, стабильное обеспечение практически одинаковых условий пластического деформирования заготовок шариком, а также простота его хранения, транспортирования и работы в условиях автоматизированного производства (на автоматических линиях). Дорнование через промежуточную разрез-

ную (или цанговую) втулку применяется в тех случаях, когда требуется исключить деформации сдвига и образование дополнительного поля остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемого отверстия. Дорнование с гидравлическим противодавлением применяется преимущественно для обработки тонкостенных трубных заготовок типа колец, втулок и коротких гильз в жесткой обойме, когда в обычных условиях из-за возникающих больших удельных давлений между контактируемыми поверхностями (инструмент – деталь) происходит выдавливание смазочного материала, что приводит к появлению переноса металла, схватывания, задиров и других процессов при трении, вызывающих ухудшение качества поверхности и отрицательно влияющих на износ инструмента. Процессы дорнования с гидравлическим противодавлением характерны тем, что за счет непрерывного течения жидких смазочных материалов в зоне контакта «инструмент – заготовка» они обеспечивают устойчивое и надежное разделение при дорновании контактирующих поверхностей дорна и заготовки, т. е. условия дорнования в режиме трения со смазочным материалом.

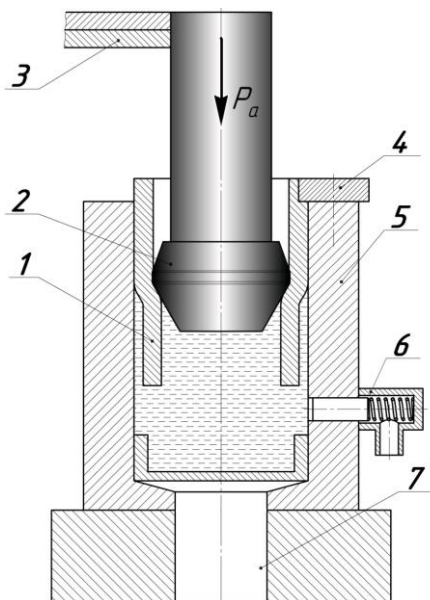
Непрерывное течение жидких смазочных материалов практически может быть обеспечено путем уменьшения объемов специальных гидрополостей гидродорнов или гидроопор при перемещении дорна в отверстии заготовки под действием силы дорнования. Причем в отличие от гидрофицированных опор, снабженных различными гидроприводами или замкнутыми гидрополостями, гидроопора автоматически обеспечивает процесс дорнования с гидравлическим противодавлением.

При использовании гидроопор возможны две схемы обработки (рисунок 1.9).

Для осуществления процесса по схеме а (встречное дорнование) заготовку 1 помещают внутрь обоймы 5 и устанавливают на выталкиватель 7. Затем в обойму заливают жидкостную смазку и обрабатывают отверстие заготовки



дорном 2. При входе дорна в отверстие наружный диаметр заготовки увеличивается до размеров диаметра внутренней полости обоймы, заполненной жидкостью. При движении дорна объем замкнутой полости уменьшается, а давление жидкости в ней увеличивается. Заготовка под давлением жидкости выдавливается из опоры и после прохода дорна с большой скоростью перемещается вверх. Поэтому чтобы избежать повреждения верхнего торца заготовки, на ее пути ставят мягкую прокладку – демпфер 3, смягчающий удар.



а – встречное; б – попутное

Рисунок 1.9 – Гидродорнование в обойме

При дорновании по схеме б (попутное дорнование) выталкиванию обрабатываемой заготовки из обоймы препятствует упор 4. В этом случае давление жидкости в полости обоймы остается постоянным за все время обработки и поддерживается регулятором высокого давления б, служащим также для удаления излишков смазочного материала.

Процесс дорнования с гидравлическим противодавлением имеет свои особенности, определяемые тем, что жидкость в полости обоймы давит на всю поверхность заготовки, в результате чего происходит ее всестороннее сжатие. Это позволяет увеличить предельную степень деформации металла при обработке и натяг на один зуб дорна. Следовательно, этот процесс можно использовать, для обработки заготовок из хрупких материалов (например, чугуна). Трение между контактируемыми поверхностями заготовки и инструмента вследствие наличия жидкостной пленки между ними значительно меньше, чем при обратном выдавливании. В отличие от устройств для осуществления гидроэкструзии обойма для дорнования с гидравлическим противодавлением обычно проще и надежнее в работе из-за отсутствия в ней каких-либо уплотнений.

Основными параметрами процесса являются: натяг дорнования, форма и размеры заготовки, геометрия рабочей части инструмента (угол заборного конуса, ширина цилиндрической ленточки и угол обратного конуса), скорость дорнования. Все эти факторы влияют на толщину жидкостной пленки, образующейся при дорновании между рабочими поверхностями инструмента и детали (размер щели), на давление жидкости в щели, величину шероховатости обработанной поверхности, а также на точность и качество детали.

Дорнование с гидравлическим противодавлением позволяет значительно увеличить прочность и износостойкость деталей, улучшить качество обработки, повысить точность формы отверстия. С другой стороны, следует учитывать, что при реализации этого процесса требуются в 2-3 раза большие силы деформирования, чем при обычном несвободном дорновании в жесткой обойме и определенная сложность изготовления приспособления для реализации данной схемы.

Схема процесса поверхностного дорнования вращающейся заготовки и дорна на токарном станке показана на рисунке 1.10.

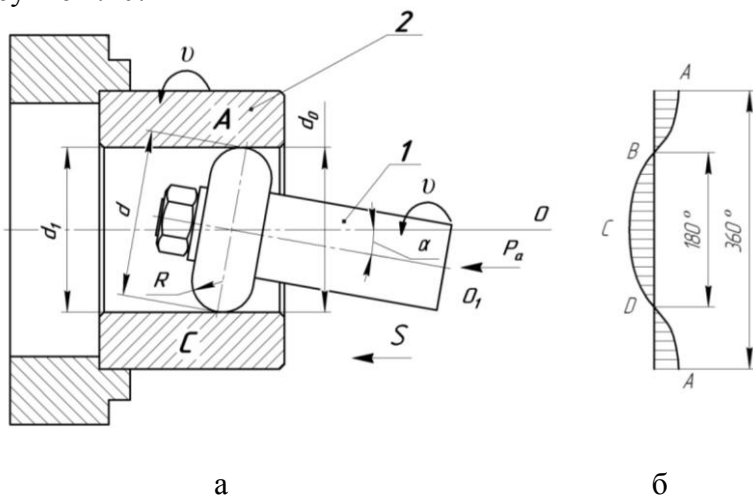


Рисунок 1.10 – Дорнование с вращением заготовки и дорна: а – схема процесса; б – эпюра осевых перемещений точек контакта

Дорн 1 получает за счет натяга  $i_d$  вращательное движение от обрабатываемой заготовки 2, закрепленной в трехкулачковом патроне токарного станка. Осевая подача  $S$  дорна 1 включается только при выравнивании окружных скоростей заготовки и дорна, после чего дорн под действием осевой силы перемещается вдоль образующей отверстия, обеспечивая калибрующее поверхностное дорнование отверстия заготовки на всей длине.

В данном процессе выделяются две характерные зоны - первичной (BCD) и вторичной (BAD) пластической деформации поверхностного слоя отверстия заготовки (рис. 1.10, б). Анализ этих зон показывает, что в точках В и D осуществляется непосредственное формирование диаметральной точности обрабатываемого отверстия.

Специальными видами дорнования являются также процессы с наложением на заготовку (или инструмент) дополнительных механических движений или продольных ультразвуковых колебаний. Основной целью этих процессов является расширение технологических возможностей и эффективности воздействия инструмента (дорнов) на обрабатываемый металл заготовок. Например, наложение на инструмент продольных ультразвуковых волн (УЗВ) с оптимальной частотой около 18 кГц обеспечивает при дорновании достаточную амплитуду колебаний деформирующих зубьев дорнов, что благоприятствует условиям контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки, снижает на 50 – 70 % уровень остаточных напряжений в заготовке, уменьшает на 20 – 40 % силу дорнования, а также улучшает параметры шероховатости обработанных поверхностей отверстий заготовок.

#### **1.4 Анализ условий эксплуатации и характерных износов гладких цилиндрических сопряжений**

При решении задач, связанных с износом деталей гладких цилиндрических сопряжений, основные конструктивные схемы которых представлены на рис.1.11, необходимо учитывать, что интенсивность изнашивания сопряжений чаще всего определяется структурой и физико-механическими свойствами материалов деталей (твердость, шероховатость, плотность), условиями работы сопряжения (наличие смазки, абразива, давление, температура, скорость относительного перемещения трущихся деталей), конструктивными особенностями сопряжения (шарнир, подшипник скольжения, направляющая, наличие уплотнения, открытое сопряжение). С целью повышения долговечности гладких сопряжений необходимо добиваться улучшения физико-механических свойств сопрягаемых деталей, улучшения качества поверхности, создание благоприятных эпюр оста-

точных напряжений за счет использования упрочняющих технологий.

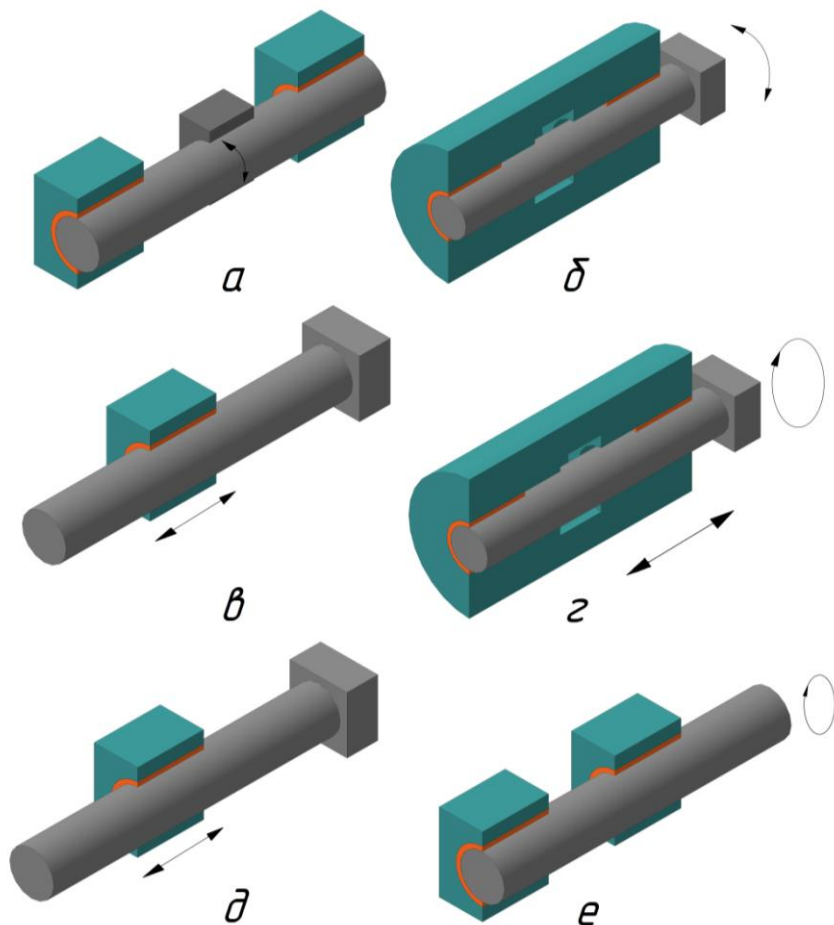


Рисунок 1.11 – Конструктивные схемы подвижных сопряжений: а, б – шарниры; в, с, д – направляющие; е – подшипники скольжения

Для назначения режимов упрочнения, обеспечивающих реальное повышение надежности и долговечности деталей гладких сопряжений, необходимы сведения об усло-

виях работы, характере изнашивания, материале деталей. Это особенно важно для назначения режимов поверхностного упрочнения деталей. В связи с этим был проведен анализ стальных, чугунных, порошковых железоуглеродистых втулок по следующим характеристикам: содержание углерода, величина предельно допустимого износа. При этом выбирались детали, выбраковка которых производилась в связи с износом внутреннего диаметра.

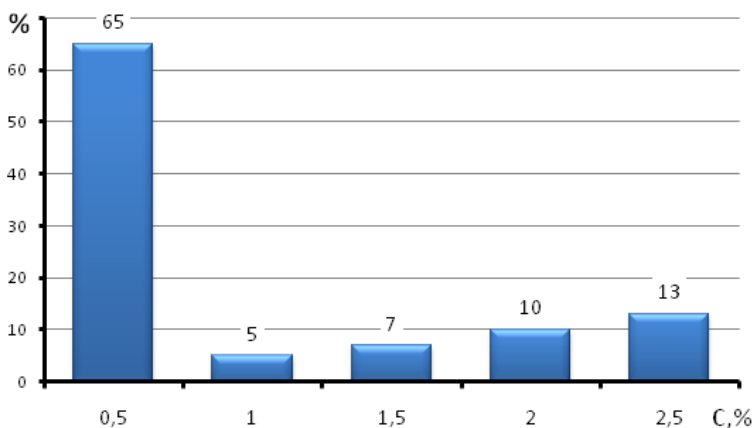


Рисунок 1.12 – Распределение железоуглеродистых втулок по содержанию углерода

Как видно из рисунка 1.12 наибольшее распространение имеют втулки из сталей с содержанием углерода до 0,5 %. Это цементируемые стали 10, 20, 25, качественные углеродистые стали 40, 45, 40Х. Доля втулок из этих сталей превышает 60 % от исследованных. Гораздо реже других применяются железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода 0,5 – 1,0 %. Около 10 % составляют втулки с содержанием углерода 1 – 2 %, основную часть этой группы составляют втулки из железуглеродистых порошков. Значительную часть (более 20 %) составляют втулки из чугунов и высокоуглеродистых порошковых материалов.

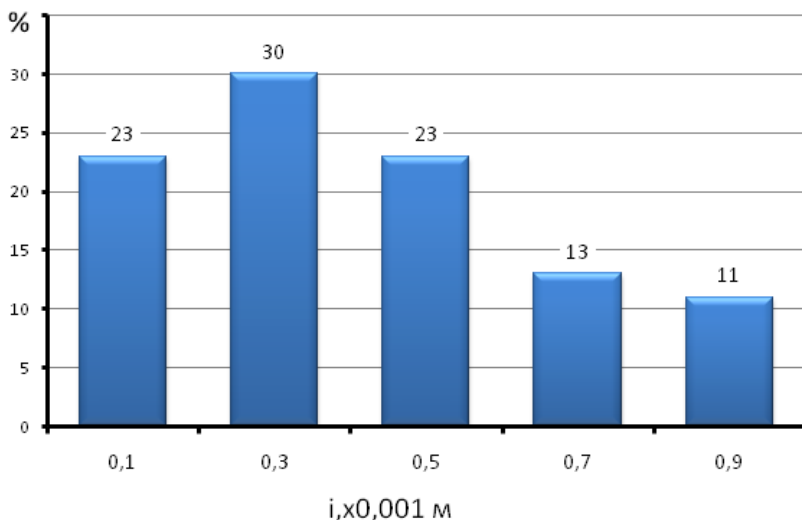


Рисунок 1.13 – Распределение стальных втулок по величине износа

Размерный анализ деталей показал, что около 40 % втулок имеют внутренний диаметр в интервале 30 мм, более 30 % втулок имеют внутренний диаметр в пределах 20 мм.

Наибольший интерес представляют данные о величине предельно допустимых износов (рис. 1.13). Свыше 70 % всех исследованных втулок имеют предельно допустимые износы до 0,5 мм. Это обстоятельство делает правомерным применение поверхностных методов упрочнения с целью повышения долговечности значительной номенклатуры стальных втулок.

Наиболее часто выходят из строя трущиеся сопряжения, работающие в условиях сухого трения в присутствии абразива. Это всевозможные сопряжения ходовой части (ось – втулка, цапфа – втулка), сопряжения «палец – направляющая втулка», «ступица – направляющая втулка», в которых трущиеся детали совершают возвратно – поступательное и качательное движения. С увеличением наработки за-

зор в трущемся сопряжении увеличивается. Существенное значение имеют условия эксплуатации техники.

Согласно [56] износостойкость и долговечность сопряжений резко возрастает с повышением твердости одной или обеих трущихся деталей. В этом случае для изготовления деталей рекомендуется применять закаленные стали, отбеленные чугуны. Не всегда экономически выгодно добиваться повышения твердости всей детали в большинстве случаев бывает достаточным упрочнение исполнительной поверхности на глубину предельного износа данной детали. Как выяснилось из анализа большинство сопряжений поступают на сборку после термической или химикотермической обработок (табл. 1.1). Упрочнение втулок данными способами являются длительным многооперационным процессом, включающим в себя предварительную механическую обработку, объемную закалку и последующую механическую и доводочную операции, так как при длительном высокотемпературном нагреве втулок (особенно тонкостенных) имеет место коробление исполнительных поверхностей.

Таблица 1.1

Стали и виды упрочняющей обработки, используемые для изготовления цапф шарнирных соединений [75]

Марка стали	Вид упрочняющей обработки	В % от общего количества
Сталь 20	цементация, закалка ТВЧ	10 %
Сталь 35	закалка ТВЧ	10 %
Сталь 45	закалка ТВЧ	10 %
Сталь 40Х	закалка ТВЧ	70 %

Исследованию работоспособности трущихся сопряжений посвящены работы [56, 57, 61, 94, 95, 99], в некоторых из них приводятся классификации изнашивающихся и восстанавливаемых сопряжений. Для большинства подвижных



сопряжений определены и имеются в справочной литературе величины предельно допустимых зазоров, регламентированы допустимые износы каждой из трущихся деталей сопряжения, согласно которым в процессе дефектации принимается решение о годности детали для дальнейшей эксплуатации, о необходимости замены ее новой деталью.

Анализ данных рис. 1.13 позволил разделить исследуемые втулки на 6 групп в зависимости от величины предельно допустимого износа (табл. 1.2). Такая классификация позволяет разработать режимы поверхностного упрочнения для групп деталей, имеющих близкие значения предельно допустимых износов.

Таблица 1.2

Классификация предельно допустимого износа втулок в гладких подвижных сопряжениях

№ группы	1	2	3	4	5	6
Предельно допустимый износ, $\times 10^{-3}$ м	меньше 0,1	0,1 – 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 0,7	0,7 – 1,0	более 1,0

Исходя из анализа видов и величин изнашивания гладких цилиндрических сопряжений, можно сделать вывод о том, что поиск и разработка рациональной отделочно-упрочняющей технологии применительно к тонкостенным втулкам является актуальной задачей современного производства.

## 1.5 Обзор и анализ научно-исследовательской работы в области электромеханической обработки металлов

### 1.5.1 Особенности процесса электромеханической обработки металлов

Основные особенности ЭМО – это нагрев металла действием двух источников тепловыделения: электрическо-

го тока и трения; мгновенный локальный нагрев места контакта инструмента и детали, сопровождающийся действием значительных давлений; кратковременное термомеханическое воздействие измеряется сотыми долями секунды; высокая скорость охлаждения определяется интенсивным отводом теплоты во внутрь детали. Эти отличия обуславливают образование совершенно специфической микроструктуры – «белого слоя», мелкодисперсной и твердой структуры поверхностного слоя, представляющего собой мелкодисперсный мартенсит с раздробленными блоками мозаики, обладающего высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами [116].

Сущность электромеханического упрочнения состоит в том, что в процессе обработки через зону контакта инструмента с деталью проходит ток большой силы и низкого напряжения, приводящий к мгновенному нагреву контактной зоны обрабатываемой детали выше температуры фазового превращения. Объем перемещающейся зоны высокотемпературного нагрева при этом значительно меньше объема детали, что приводит к быстрому охлаждению разогретого металла и к поверхностной закалке поверхности детали.

Если рассматривать ЭМО с точки зрения процессов обработки давлением, то это безусловно процесс ППД, обеспечивающий как упрочнение, так и улучшение качественных показателей микрогеометрии поверхности, и следовательно решает задачи отделочной чистовой обработки деталей.

С другой стороны ЭМО является процессом термической обработки, так как сопровождается нагревом локальных объемов поверхностного слоя последовательно распространяющихся по всей поверхности обработки по винтовой (токарные станки) или прямой (фрезерные) линии за счет взаимного относительного движения детали и инструмента.

Все вышеперечисленные моменты обеспечивают решение нескольких технологических задач: упрочнение (по-

вышение твердости и улучшение физико-механических показателей); повышение качественных показателей микрогеометрии поверхности, т.е. задачи отделочной обработки. Следовательно ЭМО есть процесс отделочно-упрочняющей поверхностной термомеханической обработки.

### *1.5.2 Влияние электромеханического упрочнения на физико-механические и эксплуатационные свойства деталей машин*

К эксплуатационным свойствам относятся показатели, влияющие на работу узла, машины и т. д. в процессе эксплуатации, т.е. они оценивают качество работы в благоприятных и типичных условиях при оптимальных и предельных режимах работы [6, 116].

Эксплуатационные свойства деталей и узлов машин существенно зависят от качества сопрягающихся поверхностей и поверхностного слоя. Они в свою очередь определяются геометрическими показателями (макроотклонения, волнистость, шероховатость) и физико-механическими (микротвердость, остаточные напряжения, структура) характеристиками и взаимным расположением микронеровностей на сопрягаемых элементах.

Основной причиной повышения долговечности деталей машин обработанных ЭМО является увеличение твердости металла связанное с измельчением структуры, полученной в условиях всестороннего сжатия, образующегося при быстром охлаждении мелкодисперсного мартенсита, который наследует дислокационную структуру сильно деформированного аустенита, повышение шероховатости поверхности на 2-3 класса и появление остаточных напряжений сжатия.

Применение технологии ЭМО повышает основные эксплуатационные свойства деталей машин, что указывает на перспективность этой технологии.

### *1.5.3 Обзор работ выполненных в области электромеханической обработки*

Основоположителем способа электромеханической обработки является Б.М. Аскинази. Он исследовал и разработал тепловые процессы при сглаживании и методы расчета глубины упрочненного слоя; особенности термомеханических процессов в поверхностном слое, природу и структуру светлой зоны; внутренние напряжения поверхностного слоя; влияние упрочнения на усталостную прочность и износостойкость деталей; прочность неподвижных сопряжений, восстановленных электромеханическим методом; режимы восстановления и качество неподвижных посадок; провел исследования в области восстановления деталей подвижных сопряжений и возможности ЭМВ с введением дополнительного металла, а также повышение качества металлургических и наплавочных покрытий после ЭМО [5].

А.И. Бражюнас исследовал термические процессы при ЭМО и структуру упрочненного слоя, разработал оптимальные режимы для увеличения износостойкости, глубины упрочнения и чистоты поверхности ходовых винтов, также им сконструировано несколько типов оригинальных инструментов для процесса электромеханического упрочнения [116].

Александров Ю.Д. в своей работе исследовал фазовый состав поверхностного слоя после ЭМО с различным содержанием углерода в слое, влияние на упрочнение рода тока, а также чистоту поверхности и изменение диаметра в диапазоне оптимальных режимов. Определил остаточные напряжения и исследовал влияние режимов обработки и рода тока на усталостную прочность и износостойкость [3].

В работе Шиленкова Ф.В. [116] разработан и изучен технологический процесс поверхностного упрочнения зубчатых колес ЭМО, а так же исследован процесс ЭМО на основе экспериментальных данных теплового поля и металлографического анализа; влияние режима ЭМО и обработки

ваемого материала на глубину и твердость упрочнения поверхностного слоя, с определением влияния ЭМО на изменения основных точностных параметров и чистоты поверхности зубчатых колес.

В работе Полуэткина А.В. [6] обоснована возможность применения ЭМО для упрочнения железных деталей и исследовано влияние режимов обработки на эксплуатационные свойства.

Тончев Г.П. исследовал ЭМО с целью оптимизации параметров, условий и режимов обработки, установил рациональные области применения изменения параметров режимов ЭМО, ввел аналитические зависимости, позволяющие определить основные тепловые характеристики процесса ЭМУ, провел исследования износостойкости и усталостной прочности [6].

Веретенников Н.В. разработал и изучил ЭМУ рабочей поверхности цилиндров двигателей, а также влияние ЭМО на физико-механические и износные свойства серого чугуна [19].

Никифоров И.С. в своей работе исследовал влияние параметров ЭМО на физико-механические свойства материала клапанов и их эксплуатационные характеристики, дал технологические рекомендации по обработке клапанов.

Работа Санторовича Г.В. посвящена исследованию возможности повышения физико-механических свойств наплавленного металла методом термомеханического воздействия электромеханической обработкой. Изучено влияние температуры обработки и усилия деформирования на глубину упрочнения, микротвердость, твердость, ударную вязкость, величину остаточных напряжений и микроструктуру наплавленного металла; исследована динамика изменения показателей тонкой кристаллической структуры наплавленного металла в результате термопластического воздействия ЭМО; выявлена связь износостойкости с показателями субструктуры, установлено влияние ЭМО при оптимальном

режиме на усталостную прочность и ее связь с субструктурой и напряженностью поверхностного слоя.

Надольский В.О. исследовал влияние режимов ЭМУ на упрочняемость серого чугуна, чистоту, точность обработки и износостойкость деталей; основные электрофизические параметры и температурное поле при ЭМУ; влияние рода тока на изменение качественных показателей процесса электромеханического упрочнения; разработал усовершенствованную конструкцию оборудования и технологической оснастки для выполнения ЭМУ.

В работе Палехова Ю.И. [80] исследован процесс ЭМУ ведущих элементов фрикционной пары с целью повышения их надежности. Выявлена зависимость физико-механических свойств обрабатываемых поверхностей от режимов ЭМУ, влияние режимов ЭМУ серого чугуна на качественные и эксплуатационные показатели, определены оптимальные значения его параметров.

Карапетян Г.П. исследовал электромеханическое упрочнение деталей дизельных двигателей типа ЯМЗ, установил, что ЭМУ увеличивает диффузию хромированного слоя с чугунной основой, что приводит к устойчивой работе хромового слоя; на основе лабораторных и эксплуатационных испытаний разработал практические рекомендации [43].

В работе Уварова А.В. обосновано применение нового способа электромеханической обработки цилиндрических зубчатых колес методом свободного обката с использованием круглой рейки с кольцевыми зубьями. Получены аналитические зависимости для расчета нормальной контактной площади оптимальных усилий, коэффициента перекрытия и допустимой погрешности установки инструмента, которые оказывают непосредственное влияние на качественные параметры обрабатываемых цилиндрических зубчатых колес.

В работе Сафронова В.В. [102] разработан, теоретически обозначен и экспериментально внедрен эффективный

технологический способ повышения долговечности стальных деталей типа цилиндр электромеханической обработкой. Установлен характер влияния технологических факторов ЭМО цилиндров на точность обработки, качество поверхности и распределение тепла в поверхностном слое. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена зависимость толщины упрочненного слоя от исходной структуры обрабатываемого металла. На основе проведенных исследований электродных потенциалов дано объяснение повышению коррозионной стойкости поверхностного слоя после ЭМО.

Федоров С.К. [110] исследовал особенности работы и основные дефекты деталей резьбовых соединений, находящихся в различных условиях эксплуатации, обосновал и исследовал принципы электромеханического упрочнения деталей с наружной метрической резьбой, разработал конструкторско-технологический способ повышения долговечности вновь изготавливаемых деталей резьбовых соединений. Предложил способ восстановления профиля резьбы в момент зарождения дефектов за счет пластического перераспределения материала детали.

В работе Дудкиной Н.Г. [35] раскрыты основные закономерности формирования структуры поверхности при электромеханической обработке и влияние наведенной структуры белого слоя на изменение механических свойств, кинетику деформации и разрушения стали 45 под нагрузкой; раскрыта природа давлений при ЭМО, как комплексного параметра контактных напряжений от механического давления на инструмент и термоупругих напряжений, возникающих при нагреве локального микрообъема, что позволило определить энергетический коэффициент  $K_3$ , характеризующий условия образования белого слоя при ЭМО, предложены расчетные зависимости, связывающие топографию упрочненной поверхности с технологическими параметрами (скоростью и подачей) ЭМО. Установлены закономерности изменения физико-

механических свойств и кинетики протекания микропластических деформаций стали 45 от структурной неоднородности упрочненной поверхности при ЭМО, определены закономерности изменения циклической прочности стали 45 от различной топографии поверхности после ЭМО.

Работа Федоровой Л.В. [109] совершенствует метод ЭМО применительно к упрочнению предварительно полученного профиля метрической резьбы и разработки принципиально новых способов восстановления дефектной винтовой поверхности за счет пластического термодинамического перераспределения металла искаженных участков, выдавливания материала из основания и перемещения его в нужном направлении с одновременным формированием впадины и боковых поверхностей. Определены условия формирования профиля витков резьбы с закаленной поверхностью и вязкой сердцевиной. Изыскана возможность электромеханического восстановления изношенного профиля резьбы. Установлена зависимость давления в зоне контакта от геометрических параметров инструмента и от физико-механических свойств металла.

В работе Федотова Г.Д. [111] получены приближенные аналитические уравнения распределения температурных полей в инструменте от постоянно действующего нормально-кругового источника тепла в детали, при движении источника тепла по винтовой линии. Показана возможность применения при ЭМО безвольфрамовых инструментальных материалов с низкой тепловой активностью с целью повышения эффективности операций ЭМО за счет большего упрочняющего воздействия на поверхностные слои обрабатываемых деталей при равном выделении тепла в зоне контакта инструмента с деталью; применение твердых сплавов с большим электрическим сопротивлением позволяет достигать равного упрочняющего воздействия с меньшими энергетическими затратами и получением в поверхностных сло-



ях обрабатываемых деталей сжимающих остаточных напряжений.

Исследован механизм изнашивания материала инструмента и предложены классификации износов и способов уменьшения изнашивания. Установлено, что применение износостойких покрытий из нитридов и карбидов титана, полученных различными способами, значительно увеличивает износостойкость инструмента и улучшает параметры микрометрии обрабатываемых деталей за счет уменьшения адгезионного взаимодействия с материалом инструмента.

Получены зависимости влияния основных технологических режимов ЭМО и материала инструмента (Т15К6, ВК8, КНТ16, ВК8+TiN) на шероховатость обрабатываемых деталей. Исследовано влияние ЭМО на эксплуатационные показатели подвижных сопряжений и механизм изнашивания контактирующих тел при различных вариантах отделочной обработки металлической поверхности

#### *1.5.4 Влияние технологических режимов ЭМО на качественные показатели формируемого слоя*

Назначение конструктивных и технологических параметров ЭМО один из важнейших и ответственных этапов проектирования технологии, связанной с решением весьма сложных задач. Такая сложность во многом объясняется, с одной стороны, многофакторностью зависимостей и взаимосвязей характеристик упрочненного поверхностного слоя и режимов электромеханического упрочнения, а с другой – трудоемкостью и большим объемом исследований, которые необходимо провести для различных материалов с целью достоверного установления таких взаимосвязей.

Ю.Г. Шнейдер [116] указывает на несколько методов назначения параметров обработки и качества поверхности, которые могут использоваться и в случае ЭМО: а) расчетное нормирование на основе аналитических зависимостей и результатов математического моделирования; б) нормиро-

вание по прототипу; в) нормирование по результатам экспериментальных исследований.

Расчетное нормирование основывается на математическом моделировании физических процессов и явлений (тепловых процессов, фазовых и структурных превращений, напряженно деформированного состояния и других), протекающих в поверхностном слое материала в ходе воздействия на него концентрированными потоками энергии при электромеханическом упрочнении и обеспечивает научно обоснованное, а потому надежное и точное назначение режимов обработки.

Способ нормирования по прототипу заключается в поиске прототипа обрабатываемой ЭМО детали, идентично ей по назначению и условиям эксплуатации, конструкции, материалу, термической и механической обработке и другим характеристикам. После этого назначаются конструктивно - технологические параметры ЭМО для исследуемой детали аналогично найденному прототипу. Выполнение условия полной идентичности практически во всех случаях обязательно, и именно это требование резко ограничивает возможности широкого использования данного способа в инженерной практике.

Поскольку расчетный метод лишь только начинает разрабатываться и входить в практику нормирования, а метод прототипа, как указывалось выше, не точен, основным, хотя и относительно трудоемким и дорогостоящим, является метод нормирования режимов ЭМО на основе результатов экспериментальных исследований, выполненных с целью определения конструктивно – технологических характеристик ЭМУ, обеспечивающих требуемые в конкретных эксплуатационных условиях параметры качества поверхностного слоя обработанной детали.

Таким образом, чтобы целенаправленно управлять процессами формирования параметров качества упрочненной поверхности, необходимо знать основные кинематические и

энергетические зависимости параметров режима ЭМО с характеристиками создаваемой структуры и физико-механическими свойствами образуемого поверхностного слоя. При этом большое число регулируемых параметров режима ЭМО, с одной стороны, облегчает задачу оптимизации характеристик обработанного ЭМО поверхностного слоя, с другой – значительное количество таких характеристик существенно усложняет технологическое обеспечение заданное конструктором параметров качества упрочненной поверхности [116].

Б.М. Аскинази [5, 6], в зависимости от степени влияния на структуру, разделил режимы ЭМО на следующие группы: чистовой (отделочный режим); средний (отделочно-упрочняющий режим) с малыми глубинами упрочнения и высокий с более значительной глубиной упрочнения (жесткий режим). Параметры режимов ЭМО при упрочнении среднеуглеродистых сталей приведены в табл.1.3 [116].

Таблица 1.3 - Параметры режимов ЭМО при упрочнении среднеуглеродистых сталей

Режим упрочнения	Инструмент	Плотность тока $j$ , А/мм <sup>2</sup>	$v$ , м/мм	S, мм/об	Ra, мкм	$h_y$ , мм	Число проходов
Отделочный	Пластина	200-250	80-130	0,2-0,3	0,63-0,16	0,02-0,03	1-2
Отделочно-упрочняющий	Пластина	270-320	8-15	0,2-0,3	0,63-0,16	0,06-0,10	2-3
Жесткий	Ролик	400-600	8-10	0,2-0,3	2,5-0,63	0,15-0,30	1-2

В таблице 1.4 представлены данные (по монографиям Б.М. Аскинази [5, 6]) о влиянии основных режимов ЭМО на глубину и микротвердость упрочненного поверхностного слоя различных деталей машин после электрохимического упрочнения (которые могут быть использованы в качестве прототипа при разработке технологии ЭМО).

Таблица 1.4 - Влияние основных режимов ЭМО на физико-механические свойства упрочненных деталей

Прототип		Режимы ЭМО					Параметры слоя	
Деталь	Материал	I, А	U, В	v, м/мин	S, мм/об	P, Н	h <sub>y</sub> , мм	H <sub>ц</sub> , МПа
Червяк	Сталь 35Х, Цианирование	1300	-	12,5 об/мин	-	-	0,35	10500
Червяк	Сталь 35Х, цианирование	950	-	12,5 об/мин	-	-	0,23	10500
Шаровая опора	Сталь 40, нормализация	350	-	9,04	0,12	-	0,08-0,12	5580
Втулка	Сталь 40Х, нормализация	380	-	35,4	0,4	900	-	4640
Втулка	Сталь 40Х, нормализация	500	2,3	21,6	0,5	500	-	5720
Шкворень кулака	Сталь 45, нормализация	600	-	6,5	0,195	-	0,17	8350
Образец	Сталь 45, нормализация	220	-	5,1	0,14	200	0,05-0,06	7400

## 1.6 Выводы

Одной из наиболее распространенных деталей используемых в технике является втулка.

Установлено, что основной причиной выхода из строя втулок является абразивное изнашивание, которое особенно возрастает при использовании сельскохозяйственной техники в полевых условиях. В зону трения абразивные частицы попадают как со стороны атмосферного воздуха, представляющего собой воздушно-атмосферную смесь, так и из рабочей жидкости.

С целью повышения долговечности гладких сопряжений необходимо добиваться улучшения физико-механических свойств сопрягаемых деталей, улучшения качества поверхности, создание благоприятных эпюр остаточных напряжений за счет использования упрочняющих технологий

Рассмотренные способы отделочной и упрочняющей обработок металлических деталей подвижных сопряжений решают задачи увеличения долговечности сопрягаемых деталей частично.

Большинство сопряжений поступают на сборку после термической обработки. Упрочнение втулок данным способом является длительным многооперационным процессом, включающим в себя изготовление втулки, объемную закалку и последующую механическую обработку, так как при длительном высокотемпературном нагреве втулки (особенно тонкостенной) имеет место коробление исполнительной поверхности.

Среди способов восстановления и поверхностного упрочнения рабочих поверхностей деталей сельскохозяйственной техники перспективной является электромеханическая обработка, заключающаяся в одновременном высокотемпературном и силовом воздействии на обрабатываемую поверхность.

Исходя из вышесказанного следует, что разработка способа отделочно-упрочняющей обработки тонкостенных стальных втулок на основе ЭМО является актуальной научно-практической задачей.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДОРНОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ВТУЛОК

### 2.1 Обоснование возможности и условий применения технологии объемного электромеханического дорнования тонкостенных втулок

#### 2.1.1 Условия применения несвободного электромеханического дорнования

Увеличение диаметра отверстия втулки и уменьшение толщины стенки при свободном электромеханическом дорновании ограничивается предельным состоянием детали, которое в зависимости от физико-механических свойств материала, размеров и дефектов поверхности заготовки и других факторов проявляется в виде потери устойчивости (рис.2.1). Это явление можно значительно отдалить (вплоть до момента разрушения металла) за счет применения обоймы в качестве приспособления повышающего жесткость обрабатываемой тонкостенной втулки.

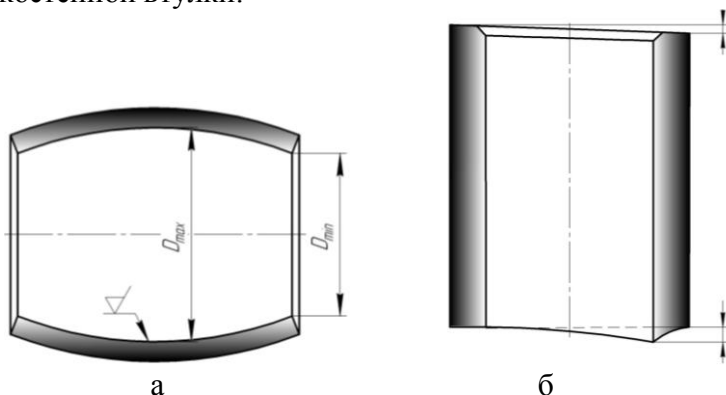


Рисунок 2.1 – Виды предельного состояния и разрушения деталей при свободном электромеханическом дорновании втулок: а – бочкообразность; б – искажение торцов

Электромеханическое дорнование отверстий втулок в обойме обеспечивает прямолинейность оси детали, во много раз увеличивая предельно допустимые деформации сечения втулок до появления признаков разрушения металла.

Процессы несвободного объемного дорнования в настоящее время нашли достаточно широкое применение в практике при обработке сравнительно тонкостенных заготовок  $1,1 \leq D/d \leq 1,2$  [70]. К основным достоинствам несвободного дорнования следует отнести прежде всего возможность создания больших контактных давлений в зоне деформации при ограниченной поперечной жесткости детали, что способствует достижению высокой точности внутренней и наружной поверхностей деталей, интенсивному сглаживанию шероховатостей и значительному упрочнению металла по всему поперечному сечению заготовки. Несвободное дорнование позволяет производить одновременную обработку внутренней и наружной поверхностей, причем в ряде случаев после дорнования отпадает надобность в их последующей механической обработке. Ниже рассматриваются наиболее употребительные схемы несвободного объемного дорнования – в обойме и совмещенное дорнование с редуцированием.

### *2.1.2 Особенности несвободного электромеханического дорнования*

В отличие от свободного электромеханического дорнования обработка заготовки в обойме происходит в условиях ограниченной деформации по наружной поверхности за счет принудительного уменьшения толщины стенки. Процесс электромеханического дорнования в обойме характеризуется следующими особенностями.

Схема напряженного состояния материала соответствует всестороннему неравновесному сжатию, что позволяет наиболее полно использовать пластические свойства металла. Очаг пластической деформации локализован на не-

большом участке контакта заготовки с инструментом, поэтому сила дорнования сравнительно невелика. Обычно заготовка устанавливается в обойму с некоторым зазором, поэтому в начальной стадии процесс электромеханического дорнования выполняется как свободный и лишь при достижении определенного натяга становится несвободным.

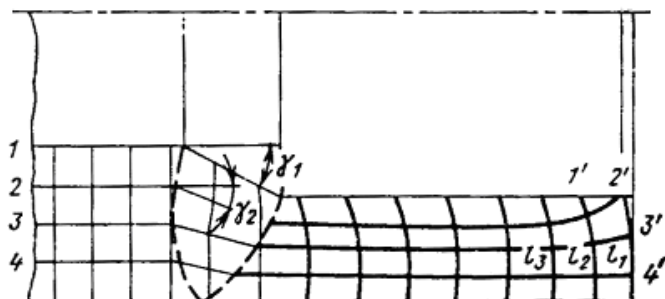


Рисунок 2.2 – Схема деформации координатной сетки при деформировании в обойме

Характер течения металла при электромеханическом дорновании в обойме изучался на разрезных образцах [91] с нанесенной на боковую поверхность координатной сеткой (рис. 2.2). Прямые линии сетки претерпевают в очаге деформации двойной изгиб в начале и в конце контакта с заборным конусом дорна. Углы изгиба уменьшаются от поверхности отверстия к периферии. Поперечные линии координатной сетки изгибаются несимметрично относительно толщины стенки изгибы больше вблизи поверхности отверстия. Форма изгибов по перечных линий показывает, что кольцевые слои металла деформируемой заготовки помимо линейных деформаций подвергаются деформации простого сдвига. По искажениям координатной сети можно сделать вывод о том, что в очаге деформации главные радиальные напряжения являются деформациями укорочения, а главные окружные и осевые - деформациями удлинения. Компоненты



ненты деформации, выраженные через логарифмические степени деформации,

$$\varepsilon_r = \ln \frac{S}{S'} = \ln[(r_2 - r)/(r_2 - r_1)];$$

$$\varepsilon_t = \ln[(r_2 + r)/(r_2 + r_1)];$$

$$\varepsilon_z = \ln \frac{Z}{Z'}.$$

На поверхности отверстия ( $r = r_1$ )  $\varepsilon_t = 0$ . В случае деформирования тонкостенных деталей, когда  $r_1 \approx r_2$ , величина окружной деформации  $\varepsilon_t$  будет лишь немногим отличаться от нуля и на наружной поверхности. Поэтому деформированное состояние металла при электромеханическом дорновании в обойме можно считать плоским, при котором  $\varepsilon_r = \varepsilon_t$ . Радиальные напряжения  $\sigma_r$ , вызывающие уменьшение толщины стенки заготовки, являются сжимающими.

Таким образом, напряженное состояние металла в очаге деформации при дорновании в обойме соответствует всестороннему неравноосному сжатию, а так как деформированное состояние плоское, то напряжение  $\sigma_t$  по направлению действия которого деформация отсутствует, равно полусумме двух других главных напряжений, т. е.

$$\sigma_t = 0,5(\sigma_r + \sigma_z).$$

Соотношение величин главных напряжений по закону наименьшего сопротивления соответствует следующей системе неравенств:

$$[\sigma_r] > [\sigma_t] > [\sigma_z],$$

что позволяет принять упрощенное условие пластичности в виде

$$\sigma_z - \sigma_r = \beta \sigma_s$$

При дорновании в обойме все главные напряжения сжимающие, что способствует повышению пластичности обрабатываемого материала и позволяет применять процесс для обработки малопластичных и даже хрупких материалов, таких, как силумин, чугуны. Для этого дорнование следует

производить в условиях повышенного гидростатического давления, что достигается предварительной запрессовкой заготовки в обойму, подпором свободных кромок внешней нагрузкой и другими методами.

*Схемы процессов дорнования в обойме.* Дорнование в обойме может производиться по схемам сжатия или растяжения в плавающей или неподвижной (жесткой или разъемной) обоймах, однозубыми или многозубыми дорнами. Для дорнования в обойме трубчатую заготовку помещают в цилиндрическую полость и базируют ее в зависимости от схемы дорнования по торцу или по бурту, после чего производят проталкивание или протягивание через ее отверстие дорна. Деформируемая часть заготовки (при дорновании по схеме сжатия) движется навстречу ходу дорна. При дорновании по схеме растяжения деформируемый металл перемещается в том же направлении, что и дорн. После хода дорна деталь выпрессовывают из жесткой обоймы или свободно вынимают из разъемной обоймы.

Дорнование в обойме по схеме сжатия может применяться как для обработки пластичных материалов, так и материалов с пониженной пластичностью (высоколегированные стали, ковкий чугун и др.). Дорнование с растяжением применяют только при обработке сравнительно пластичных материалов.

Применение плавающей обоймы обеспечивает постоянство деформирующей силы независимо от длины обрабатываемой заготовки. Для получения значительных деформаций за один рабочий ход инструмента дорнование в обойме осуществляют многозубым дорном. Деформируемые (упруго или пластически) обоймы применяют для получения значительных окружных деформаций обрабатываемой заготовки без ее разрушения. Обоймы, рабочая (внутренняя) поверхность которых имеет определенный рельеф, позволяют изготавливать детали, имеющие на наружной поверхности насечку, мелкие шлицы, резьбу и др.

Совмещая свободное дорнование и дорнование в обойме, можно получать детали с переменной толщиной стенки. Этот принцип положен в основу способа изготовления втулок с концевым утолщением [А. с. № 295591 (СССР)].

Трубную заготовку с толщиной стенки, равной толщине буртика, не на полную глубину помещают в обойму так, чтобы длина выступающей части заготовки равнялась высоте получаемого буртика, и однократно дорнуют ее по схеме сжатия, упирая заготовку торцом в опорную втулку (рис. 2.3). Деформируемый металл при этом течет в осевом направлении в сторону, противоположную движению дорна. Для предотвращения затекания металла в зазор между дорном и опорной втулкой на опорном торце заготовки предусмотрена внутренняя фаска. Трение между деформированным металлом и обоймой устраняется, так как обойма имеет возможность перемещаться вместе выдавливаемым материалом относительно опорной втулки. После рабочего хода первого зуба дорна опорную втулку убирают, так как многократное деформирование с базированием на опорный торец заготовки приводит к появлению нескольких буртиков из-за обратного течения металла вдоль оси заготовки. Дальнейшее деформирование заготовки вторым и третьим зубьями дорна осуществляют по схеме растяжения с использованием в качестве опорной ее базы частично отформованного буртика.

Особенности процесса дорнования деталей в обойме и разнообразие применяемых схем деформирования определяют широкие возможности обработки деталей типа втулок, гильз. Диапазон диаметров обрабатываемых в обоймах деталей колеблется от нескольких миллиметров до нескольких сотен миллиметров. Дорнованием в обойме можно изготавливать детали со средней толщиной стенки и особо тонкостенные детали ( $1,6 \geq D/d \geq 1,03$ ), при этом относительная длина обрабатываемых деталей  $L/D \approx 10$ .

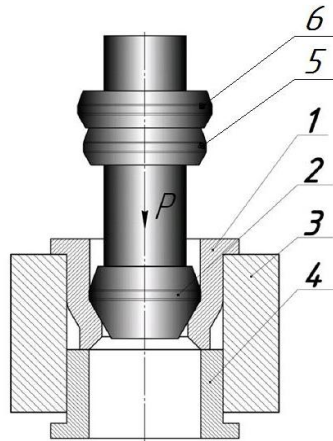


Рисунок 2.3 - Схема способа изготовления втулок с концевым утолщением: 1-заготовка; 2,5,6-соответственно первый, второй и третий зубья дорна; 3-обойма; 4-опорная втулка

В результате деформационного упрочнения детали, изготовленные дорнованием в обойме, имеют повышенные механические свойства (по сравнению со свойствами исходного материала) по всему сечению детали. Причем наибольшее упрочнение получают слои металла у поверхности отверстия. Это позволяет в некоторых случаях отказаться от дальнейшей термической обработки деталей, а также использовать взамен легированных и углеродистых сталей малоуглеродистые. Необходимо также отметить, что дорнование в обойме с локализацией очага пластического деформирования позволяет уменьшить по сравнению с холодным выдавливанием деформирующие силы. В связи с этим процесс дорнования может быть успешно осуществлен на протяжных станках и гидропрессах малой мощности.

### *2.1.3 Преимущества процесса обработки нагретых металлов*

С повышением температуры нагрева резко изменяются физико-механические характеристики металла и в

первую очередь его предел прочности и твердость. При температуре нагрева свыше  $600^{\circ}\text{C}$  происходит резкое понижение  $\sigma_{\text{в}}$ .

Наиболее невыгодными являются температуры нагрева порядка  $250 - 350^{\circ}\text{C}$ , при которых сопротивляемость стали значительно повышается. Это объясняется явлением синеломкости.

При высоких температурах нагрева значения предела прочности сталей различной твердости приближаются друг к другу, а следовательно в зоне этих температур может быть достигнута, примерно, их одинаковая обрабатываемость.

По данным В.Д. Кузнецова [57], не только стали, но и различные металлы, будучи приведены к определенным тепловым состояниям, могут иметь одинаковые значения временного сопротивления.

Таким образом, путем регулирования режимов нагрева и тепловых состояний различных металлов можно достичь одинаковой их сопротивляемости обработке.

Последнее обстоятельство имеет большое практическое значение так как представляется возможным обрабатывать твердую сталь так же легко, как, например, олово, что даст возможность в значительной мере повысить производительность.

Как известно, металл, нагретый до высокой температуры, становится более пластичным, чем металл при низкой температуре. Это обстоятельство способствует тому, что в значительной мере уменьшаются упругие деформации поверхностного слоя при давлении инструмента.

Воздействие высокой температуры в процессе обработки способствует затеканию неровностей, остающихся на поверхности после прохода инструмента, что дает возможность получить более высокую чистоту обработанной поверхности при прочих равных условиях.

## 2.2 Тепловые явления при электромеханическом дорновании и методы расчета глубины упрочненного поверхностного слоя

Сложность тепловых явлений, происходящих при электромеханическом дорновании, определяется взаимодействием большого количества факторов, от которых они зависят. К этим факторам относятся: тепловыделение электрического тока, тепло трения инструмента об обрабатываемую деталь, тепло деформации металла в поверхностном слое, теплообмен между инструментом и поверхностным слоем и, наконец, теплопередача в окружающую среду и во внутрь металла. На современном этапе изучения этого процесса представляется возможным лишь в первом приближении дать оценку происходящих явлений теплообразования, учитывая главнейшие факторы и абстрагируясь от менее важных и второстепенных. При этом должны быть сделаны определенные допущения.

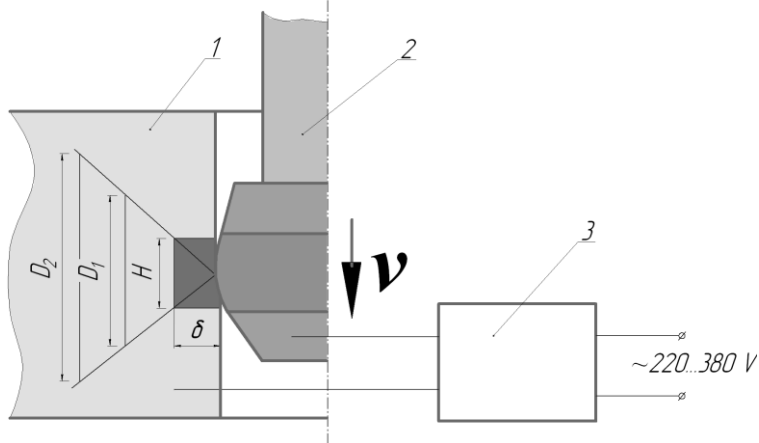


Рисунок 2.4 – Схема теплообразования в изделии при электромеханическом дорновании: 1 – изделие; 2 – инструмент; 3 – установка ЭМО

На рисунке 2.4 представлена схема теплообразования в изделии при электромеханическом дорновании.

Если принять, что электрический ток распространяется в детали прямолинейно во всех направлениях от центра контакта, то для каждого данного момента можно себе представить электросиловой конус с диаметрами в сечений  $D_1$  и  $D_2$ , который является как бы проводником для данного участка электрической цепи. Имея в виду, что сечение конуса возрастает пропорционально квадрату диаметров  $D_1$  и  $D_2$ , а плотность тока будет падать обратно пропорционально сечению, нетрудно видеть, что наиболее интенсивное тепловыделение будет происходить в месте контакта и затем, по мере углубления, резко падать. Ввиду значительной скорости электромеханического дорнования -  $v$  и длительности контакта, измеряемой в тысячных долях секунды, выравниванием температур можно пренебречь [57]. Мы также считаем, возможным пренебречь тепловыделением, связанным с деформациями в поверхностном слое. Таким образом, остаются два основных источника тепла:

1. Тепло трения инструмента об обрабатываемую деталь.

2. Тепловыделение тока, проходящего через место контакта изделия с инструментом.

Эти два источника тепла, накладываясь, друг на друга, образуют у места контакта сверх высокотемпературный объем с высотой  $H$ , глубиной -  $\delta$  шириной -  $b$  (перпендикулярно плоскости чертежа). Условно можно назвать высокотемпературным объемом такой объем, где имеют место температуры не ниже  $600^\circ\text{C}$ , то есть температуры, оказывающие существенное влияние на пластические свойства стали. Сверхвысокотемпературным объемом можно назвать такой объем, температура нагрева которого превышает температуру фазового превращения стали ( $A_{c3}$ ). Сечение такого объема в виде светлого фона показано на микрофотографии стали 40X (рис.2.5). Предыдущий опыт [5] показывает,

что ширина светлого слоя  $-b$  в зоне достаточно мощных упорочняющих режимов близка к ширине контакта инструмента с изделием. Тоже самое относится к высоте  $-H$ .

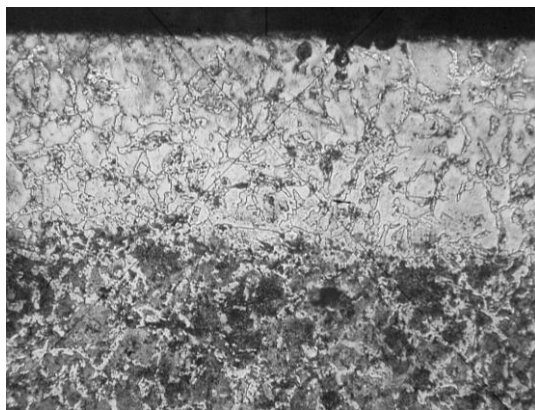


Рисунок 2.5 – Микрофотография поверхностного слоя стали 40X ( $\times 200$ )

Исходя из вышеизложенного и анализа фактических данных, на рис. 2.6 показана схема распределения температур в системе инструмент-изделие по оси  $-z$ , проходящей через центр контакта перпендикулярно оси изделия.

При этом имеется в виду, что трущиеся между собой теплообменные среды должны иметь одинаковую температуру на поверхности их раздела. Заштрихованная часть температурного поля показывает повышение температур в связи с пропусканием электрического тока, через зону контакта инструмента с изделием.

Под активным объемом имеется в виду объем инструмента (дорна), который ограничен поверхностью контакта и подвергается наиболее интенсивному нагреву.

Таким образом, общее количество выделенного тепла в джоулях за время прохождения высокотемпературным объемом расстояния  $-H$  выразится:

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (2.1)$$



где  $Q_1$  – тепло трения инструмента об обрабатываемую деталь;

$Q_2$  – тепло, выделяемое проходящим током.

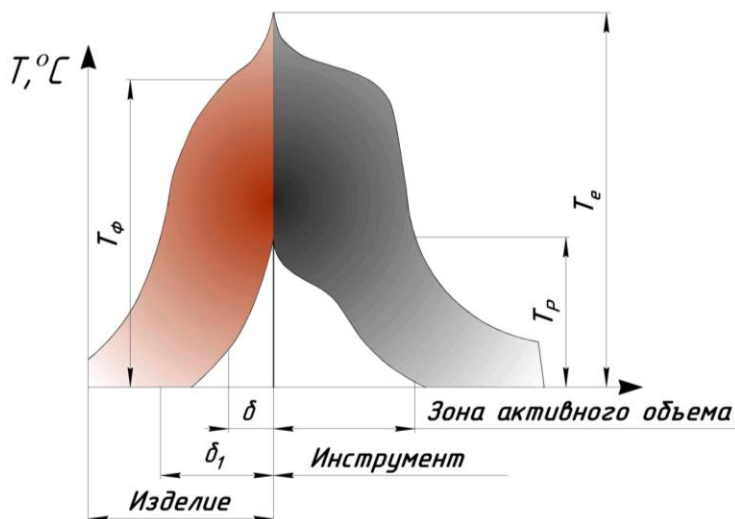


Рисунок 2.6 – Схема распределения температур в системе инструмент – изделие:  $\delta$  – глубина сверхвысокотемпературного объема;  $\delta_1$  – глубина высокотемпературного объема;  $T_\phi$  – температура фазового превращения стали Ас<sub>3</sub>;  $T_e$  – наибольшая температура при работе с током;  $T_p$  – наибольшая температура при работе без тока

$$Q_1 = \frac{FH}{10,2}, \text{ Дж} \quad (2.2)$$

где  $F$  – сила трения при сглаживании в кг;

$H$  – высота высокотемпературного объема в см.

Согласно закону Амонтона - Кулона:

$$F = P \cdot f \quad (2.3)$$

где  $P$  – нормальное давление при сглаживании в кг.

$f$  – коэффициент трения при сглаживании. Следовательно,

$$Q_1 = \frac{PHf}{10,2}, \text{ Дж} \quad (2.4)$$

Согласно закону Джоуля – Ленца:

$$Q_2 = I^2 R \tau, \text{ Дж}$$

где  $I$  – сила тока вторичной цепи в амперах,  
 $R$  – сопротивление, Ом;  
 $\tau$  – время прохождения тока, с.

Величину  $Q_2$  можно также выразить через напряжение тока. С учетом потерь в электрической цепи формула примет следующий вид:

$$Q_2 = \eta I U \tau, \text{ Дж} \quad (2.5)$$

где  $\eta$  – коэффициент, учитывающий потери во вторичной цепи трансформатора.

Таким образом, общее количество тепла, выделенного за время прохождения инструментом расстояния –  $H$  выразится:

$$Q = \frac{PHf}{10,2} + \eta I U \tau$$

Умножая на соответствующие коэффициенты оба слагаемых правой части равенства, определим количество тепла –  $Q_T$ , поглощаемого сверхвысокотемпературным объемом за время  $\tau$ .

$$Q_T = \left( \frac{PHf}{10,2} + \eta I U \tau \right) \mu k,$$

где  $\mu$  – коэффициент, определяющий ту часть тепла создаваемого в зоне контакта, которая отводится в деталь;

$k$  – коэффициент, учитывающий ту часть теплоты, выделяемой в детали, которая поглощается сверхвысокотемпературным объемом.

С другой стороны, пользуясь методом теплового баланса, можно написать:

$$Q_T = g C T_\Phi,$$

где  $g$  – вес материала на который воздействует сверхвысокотемпературный объем в граммах,

$C$  – удельная теплоемкость металла в Дж/г °С;

$T_{\phi}$  – температура фазового превращения металла в градусах.

Здесь мы учитываем начальную температуру нагрева, поскольку абсолютная величина этой температуры находится в пределах точности определения –  $T_{\phi}$ .

$$g = H\delta b\gamma,$$

где  $b$  – ширина сверх высокотемпературного объема в см;

$\gamma$  – удельный вес в г/см<sup>3</sup>;  $H$  и  $\delta$  имеют прежние значения.

Следовательно,

$$Q_T = H\delta b\gamma C T_{\phi} \quad (2.6)$$

Приравнивая одно значение  $Q_T$  к другому получим:

$$\left(\frac{PHf}{10,2} + \eta IU\tau\right)\mu k = H\delta b\gamma C T_{\phi}$$

Для инженерной практики имеет особое значение глубина залегания упрочненного светлого поверхностного слоя.

Решая приведенное выше уравнение относительно –  $\delta$  получим:

$$\delta = \frac{\left(\frac{PHf}{10,2} + \eta IU\tau\right)\mu k}{C H b \gamma T_{\phi}} \quad (2.7)$$

Подставив значение  $\tau = H/v$ ,

где  $v$  – скорость дорнования в см/сек, и сделав соответствующие преобразования, получим:

$$\delta = \frac{\left(\frac{Pvf}{10,2} + \eta IU\tau\right)\mu k}{C v b \gamma T_{\phi}} \quad (2.8)$$

Для возможности использования приведенной выше зависимости расчета необходимо определить коэффициенты:  $k$ ,  $\mu$ ,  $\eta$ ,  $f$ .

Определение коэффициента трения при сглаживании дается ниже в отдельном параграфе.

Величина  $\eta$  определена методом исключения рабочего контакта путем замены твердосплавной пластины щеткой, из красной меди, электрическим сопротивлением которой можно пренебречь. Многочисленными опытами при различной силе тока установлено, что  $\eta$  применительно к нашей установке колеблется в пределах 0,41-0,43 (в среднем 0,42). Однако и выявленные нами значения двух коэффициентов еще не делают приведенную выше формулу расчетной, а поэтому обращаемся к другому методу расчета величины  $\delta$ , основанному на решении дифференциального уравнения теплопроводности.

Для условий электромеханического дорнования необходимо составить такую расчетную схему, которая бы отражала наиболее важные черты и особенности этого процесса. Электромеханический метод дорнования отличается относительно высокой скоростью обработки порядка 7–30 м/мин. и выше, в связи, с чем тепловой источник может быть отнесен к мощному сосредоточенному быстро движущемуся источнику [101]. В этом случае тепло не успевает распространяться впереди источника и процесс распространения тепла в полубесконечном теле сводится к сумме сдвинутых по времени плоских процессов.

Применительно к быстро движущемуся точечному источнику Н.Н. Рыкалиным предложена формула для определения температуры в поверхностном слое полубесконечно-го тела

$$T(r, t) = \frac{q}{2\pi\lambda v t} l - \frac{r^2}{4at}, \quad (2.9)$$

где:  $T$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$q$  – тепловой поток, Дж/с;

$v$  – скорость перемещения источника тепла, см/с;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Дж/см  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t$  – время, с;

$a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ;

$r$  – расстояние точки от оси относительно которой определяется температура.

Величина  $l - \frac{r^2}{4at}$  характеризует изменение температуры

в зависимости расстояния от оси движения источника; это изменение описывается кривой нормального распределения.

Приведенная выше формула является решением дифференциального уравнения теплопроводности Фурье для мгновенного источника при допущении, что теплофизические константы ( $C$ ,  $\lambda$ ,  $a$ ) не зависят от температуры; их принимают усредненными в расчетном интервале температуры.

К особенностям теплообразования при электромеханическом дорновании следует отнести то, что имеется два основных источника тепла, которые накладываются друг на друга: тепло, создаваемое электрическим током и тепло, создаваемое трением. При значительных скоростях движения источника следует также учитывать периодичность переменного тока.

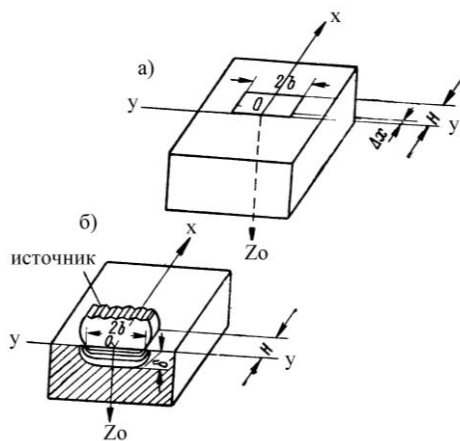


Рисунок 2.7 – Схема нагрева поверхностного слоя полубесконечного тела мощным быстро движущимся источником (а); характер температурного поля в разрезе по  $y - y$  (б).

На рисунке 2.7 показана схема воздействия быстро движущегося источника тепла на элементарный плоский слой толщиной  $\Delta x$  полубесконечного тела применительно к условиям электромеханического дорнования. Ось –  $x$  направлена по движению источника;  $H$  – высота контакта;  $2b$  – ширина контакта в направлении –  $y$ ; ( $\delta$  – глубина распространения данной температуры в направлении  $z$ ).

Тепловые потоки в сечении  $y$ – $y$  будут направлены нормально к изотермам. Учитывая, что величина –  $2b$  во много раз превышает глубину  $\delta$ , пренебрегаем теплопередачей в направлении оси –  $y$ .

Применительно к процессу электромеханического дорнования мгновенная интенсивность теплового потока выразится:

$$q = q_1 + q_2 \quad (2.10)$$

где:  $q_1$  – интенсивность теплового потока, выделяемого электрическим током;

$q_2$  – интенсивность теплового потока, выделяемого трением.

Мгновенная интенсивность источника тока при его изменении по синусоидальному закону может быть определена по формуле:

$$q_1 = RI_{\max}^2 \sin^2 \omega t,$$

где  $R$  – среднее сопротивление, Ом;

$I_{\max}$  – амплитудное значение тока, А;

$\omega$  – угловая частота переменного тока;

$t$  – время, с.

Мгновенная интенсивность источника тепла, выделяемого трением выразится:

$$q_2 = \frac{fPv}{10,2}, \quad (2.11)$$

где:  $P$  – нормальное давление в кг;

$f$  – коэффициент трения;

$v$  – скорость дорнования, см/сек.

Выражение  $q_1$ , учитывающее периодичность электрического тока, наиболее полно отражает физическую сущность процесса электромеханического дорнования. Однако следует иметь в виду, что электромеханическое дорнования производится в несколько проходов, при которых имеет место нивелировка теплового действия тока.

Степень этой нивелировки зависит от сочетания большого количества факторов, которые практически трудно учесть, а поэтому при расчетах будем иметь в виду средние температуры поверхностного слоя, создаваемые средними значениями силы тока без учета его периодичности. В этом случае:

$$q_1 = RI^2 \quad (2.12)$$

С практической точки зрения нас интересует глубина проникновения высоких максимальных температур и связанное с этим изменение структуры и физико-механических свойств поверхностного слоя,

Значение максимальных температур на небольших расстояниях  $\delta$  от поверхности движения сглаживающей пластины может быть определено аналогично случаю быстродвижущегося точечного источника [101].

Максимальная температура на определенной глубине –  $\delta$  должна соответствовать моменту, когда скорость изменения температуры  $\Delta T(t)/\Delta t = 0$

Если путем дифференцирования решить уравнение применительно к значению максимальной температуры  $T_m$  с учетом приведенного выше условия, а также подставить вместо  $a = \lambda/C\gamma$ ,

где  $C$  – удельная теплоемкость;

$\gamma$  – удельный вес, и принять  $I / I \approx 0,368$ , то формула примет следующий вид:

$$T_{m(r)} = \frac{0,736q}{\pi\nu C\gamma r^2} \quad (2.13)$$

На первый взгляд может показаться, что для условий электромеханического дорнования расчетная схема приме-

нительно к точечному источнику может быть применена с гораздо большим основанием, чем для условий электродуговой сварки. Однако характер расположения изотерм зависит не только от абсолютных размеров источника, но и от удельной его мощности.

При ОЭМД эта удельная мощность значительно ниже. В нашем случае имеет место схема нагрева поверхностного слоя полубесконечного тела мощным равномерно распределенным быстро движущимся кольцевым источником. При этом величина  $-2b$  во много раз превышает глубину  $-\delta$ , а изотерма распределяются почти параллельно поверхности нагрева.

Строго говоря, в технике не существуют точечные источники. Условно, с известным приближением точечным источником можно считать источник, имеющий такую удельную мощность, при которой изотермы в полубесконечном теле распределяются концентрично поверхности контакта. Такая картина, хотя бы с некоторым приближением, может иметь место в том случае, когда ширина контакта (в направлении перпендикулярном движению источника) по крайней мере, будет равна глубине проникновения интересующей нас высокой температуры. Если считать, что в условиях электромеханического дорнования мощность источника распределяется пропорционально ширине контакта  $-2b$  (рис.2.7), то мы вправе разделить на одну и ту же величину  $2b/r$  как ширину контакта  $-2b$ , так и мощность источника  $q$  при этом глубина проникновения высокой температуры не изменится, и задача о ее определении сведется к схеме точечного источника. При уменьшении на одну и ту же величину мощности источника тепла и поверхности контакта, удельный тепловой поток не изменится. Таким образом, при  $r = \delta$  формула примет вид:

$$T_{m(\delta)} = \frac{0,736q}{\pi\nu C\gamma v\delta} \quad (2.14)$$



Применительно к условиям электромеханического дорнования, расчетная формула, определяющая максимальную температуру на определенной глубине –  $\delta$ , примет следующий вид:

$$T_{m(\delta)} = \frac{0,368\mu \left( \frac{Pvf}{10,2} + \eta IU \right)}{\pi C \nu \gamma \delta}.$$

Все обозначения в этой формуле имеют прежние значения. Решая относительно –  $\delta$  получим:

$$\delta = \frac{0,368\mu \left( \frac{Pvf}{10,2} + \eta IU \right)}{\pi C \nu \gamma T_m}. \quad (2.15)$$

Если сравнить приведенную формулу (2.15) с формулой (2.8) и учесть, что  $\delta=b/2$ , то нетрудно видеть сходство этих формул. При этом раскрывается значение коэффициента:

$$K = \frac{0,368 \cdot 2}{\pi} = 0,234$$

Таким образом, формула примет следующий вид:

$$\delta = \frac{0,234\mu \left( \frac{Pvf}{10,2} + \eta IU \right)}{C \nu \gamma T_m}. \quad (2.16)$$

Интересно отметить, что решение задачи об определении глубины упрочнения –  $\delta$  двумя различными методами привело к одним и тем же результатам, что свидетельствует о справедливости этих решений.

Как уже указывалось, коэффициенты –  $\eta$  и  $f$  нами определены экспериментальным путем. Остается определить коэффициент –  $\mu$ . Наиболее распространенным методом для определения коэффициента  $\mu$  считается калориметрический метод. Однако в нашем случае применение этого метода усложняется необходимостью крепления вращающегося образца на станке. Кроме того, во время электромеханической обработки высокотемпературному нагреву подвергается

сравнительно тонкий поверхностный слой и удельный вес потерь тепла перед калориметрированием может оказаться настолько значительным, что полученные результаты будут сильно искажать действительность.

В этой связи нами применен расчетно-металлографический метод определения  $\mu$ , сущность которого состоит в следующем:

При электромеханической обработке закаленной стали в поверхностном слое, как видно из рисунка 2.5, образуется светлая зона, которая является результатом повторной закалки и фазовых превращений.

Нижний контур светлого поверхностного слоя соответствует минимальной температуре фазового превращения для данной стали, которая в нашем случае соответствует  $T_{m(\delta)}$ . Расчетно-металлографический метод оценки коэффициента  $\mu$  основан на определении зоны термического влияния источника тепла. Имея возможность измерить  $b$  и  $\delta$  и зная коэффициенты  $\eta$  и  $f$ , представляется возможным определить коэффициент  $\mu$ .

$$\mu = \frac{C\nu\gamma T_m}{0,234 \left( \frac{P\nu f}{10,2} + \eta IU \right)} \quad (2.17)$$

Опыты показывают, всякое изменение параметров дорнования связанное с увеличением мощности источника и размеров светлого поверхностного слоя, способствует увеличению коэффициента  $\mu$  и, наоборот, увеличение скорости дорнования и давления способствуют его понижению.

Для более мощных режимов  $\mu \approx 0,6$  и для менее мощных режимов  $\mu \approx 0,5$ .

Можно полагать, что в пределах исследованных режимов расчетно-металлографический метод является наиболее достоверным. Приведенная выше расчетная формула (2.16) дает возможность управлять получением необходимого упрочненного поверхностного слоя. Так, например, зная по техническим условиям величину допустимого изно-

са отверстия втулки, мы имеем возможность рассчитать такой режим объемного электромеханического дорнования, который обеспечит соответствующую глубину упрочнения, что может иметь большое практическое значение. При этом для получения светлого износоустойчивого поверхностного слоя следует учитывать структуру обрабатываемого материала и минимальную температуру, при которой происходит фазовое превращение. Для среднеуглеродистых сталей  $T_T \approx 900^\circ\text{C}$ .

### **2.3 Расчет площади пятна контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью при электромеханическом дорновании**

При расчете площади пятна контакта инструмента с компактной деталью принимались посылки о том, что пятно контакта есть плоская фигура - окружность, эллипс, прямоугольник, в зависимости от формы обрабатываемой детали и обрабатывающего инструмента. Площадь пятна контакта определялась по формулам площадей плоских фигур. Использование этих формул для случая обработки отверстий деталей электромеханическим дорнованием не представляется возможным, поскольку контакт инструмента с внутренней поверхностью обрабатываемого цилиндра осуществляется по замкнутому контуру. Поэтому возникла необходимость разработки новой методики определения площади пятна контакта инструмента с деталью.

В общем случае пятно контакта недеформируемого инструмента с пластичной поверхностью представляют собой пространственную фигуру, образованную на инструменте (торе, цилиндре, шаре) пересечением пластичной поверхности детали - чаще всего цилиндра. Поэтому для нахождения площади пятна контакта необходимо решать задачу о пересечении двух пространственных фигур. При электромеханической обработке наиболее часто применяется двухрадиусный инструмент, рабочая поверхность кото-

рого представляет собой поверхность тора. При обработке деталей типа втулок обрабатываемая поверхность представляет собой цилиндр.

Исходя из вышесказанного, считаем, что наиболее общим случаем контакта инструмента с деталью является задача о пересечении цилиндра с тором одновременно по всей длине. Пятно контакта является частью поверхности жесткого тора и усеченного конуса, ограниченной пересечением с пластичным цилиндром.

Для нахождения площади пятна контакта необходимо решить задачу о пересечении двух пространственных фигур.

Внутренняя поверхность цилиндра в процессе обработки ее внешней поверхностью дорна представлена на рисунке 2.8.

Полная площадь пятна контакта инструмента (дорна) с внутренней поверхностью цилиндра будет равна сумме всех площадей в последующем выраженных формулами (2.18, 2.20, 2.21).

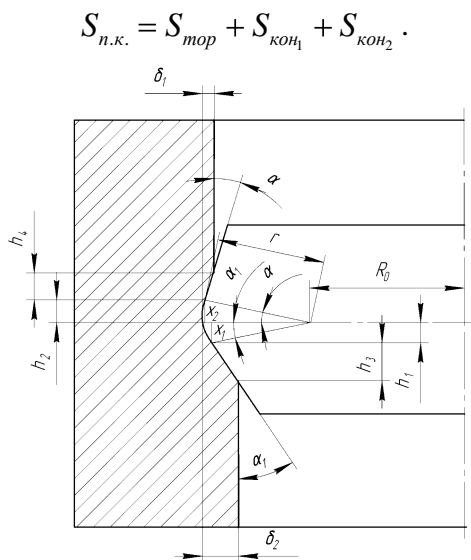


Рисунок 2.8 – Схема для расчета пятна контакта

Площадь поверхности ограниченная тором находится по формуле:

$$S_{\text{тор}} = \pi r^2 R_0 \left( \frac{\alpha + \alpha_1}{360} \right), \quad (2.18)$$

где:  $r$  – малый радиус тора;

$R_0$  – радиус кольца;

$\alpha, \alpha_1$  – углы образованные поверхностью усеченного конуса и

поверхностью цилиндра.

Площадь боковой поверхности усеченного конуса находится по формуле:

$$S_{\text{у.к.}} = \pi l R_0 + r, \quad (2.19)$$

где:  $l$  – образующая усеченного конуса.

Используя эти зависимости получим площадь контакта поверхности дорна с поверхностью цилиндра в зоне упругой деформации:

$$x_1 = r - r \cos \alpha = r (1 - \cos \alpha);$$

$$l_1 = \frac{\delta_1 - x_1}{\sin \alpha};$$

$$R_1 = R_0 + \cos \alpha;$$

$$r_1 = r - \delta_1$$

Окончательно формула площади усеченного конуса в зоне упругой деформации примет вид:

$$S_{\text{кон2}} = \pi l_1 R_1 + r_1 = \frac{\pi \delta_1 - r (1 - \cos \alpha) R_0 + r (1 + \cos \alpha) - \delta_1}{\sin \alpha} \quad (2.20)$$

Проведя аналогичные выводы для зоны пластической деформации получим:

$$S_{\text{кон2}} = \pi l_2 R_2 + r_2 = \frac{\pi \delta_2 - r (1 - \cos \alpha_1) R_0 + r (1 + \cos \alpha_1) - \delta_2}{\sin \alpha_1} \quad (2.21)$$

Оперируя полученными выражениями и рекомендуемыми усредненными параметрами плотности тока при ЭМО приведенными в п. 1.5.3, через простейшие математические

преобразования была получена линейная теоретическая зависимость (рис. 2.9) изменения силы тока от величины диаметра обрабатываемого ПЭМД отверстия.

Приведенные выше формулы так же в полной мере могут быть использованы для расчета рабочих поверхностей инструмента (дорна) при ЭМД с целью оптимизации процесса.

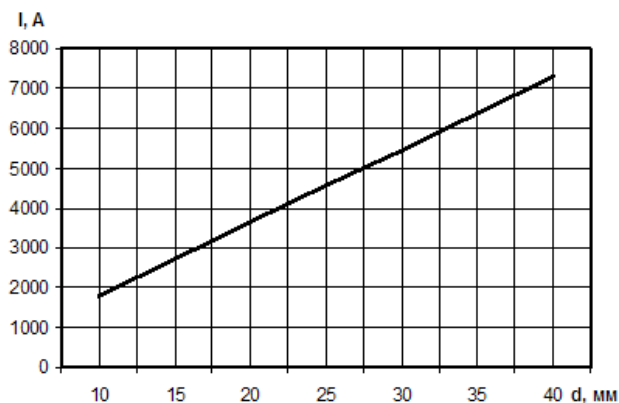


Рисунок 2.9 – График теоретической зависимости силы тока от диаметра отверстия при ОЭМД

## 2.4 Расчет усилия электромеханического дорнования тонкостенной стальной втулки в замкнутом объеме

За основу взят метод расчета усилий возникающих при механическом дорновании «прямым» выдавливанием. Возникающие в деформируемой части осевые растягивающие напряжения не должны превышать истинный предел прочности деформированного металла. Для обработки по этой схеме необходимо образование технологического фланца, бурта или выступа по отверстию.

Теоретические и экспериментальные исследования усилий показали, что метод совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности не обеспечивают достаточную сходимость расчетных и опытных дан-

ных при одновременной обработке в замкнутых объемах цилиндрических поверхностей тонкостенных втулок пластическим деформированием. При выводе зависимостей для расчета тяговых усилий при электромеханическом дорновании в обойме тонкостенных втулок принят метод баланса работ, разработанный Е.А. Поповым для решения задачи вытяжки с утонением.

Обработка цилиндрических поверхностей с ограничением радиального течения металла оправками, обоймами происходит в условиях, близких к объемной деформации, когда главные деформации не равны нулю. При этом относительные окружные деформации на дорн не превышают  $\epsilon_d \leq 0,1$ , что позволяет в первом приближении считать деформированное состояние плоским. Деформирующая обработка осуществляется с применением локального высокотемпературного нагрева втулки в условиях граничного трения при коэффициенте трения  $0,05 \leq \mu \leq 0,2$ . поэтому с достаточной точностью можно принять, что нормальные напряжения на контактных поверхностях близки к главным радиальным.

Для вывода теоретических зависимостей используем полярную систему координат  $(\rho, \theta)$  и обозначения, принятые на расчетной схеме. Определим условия редуцирования на жесткой оправке. Найдем осевые напряжения  $\sigma_z$ , действующие в недеформируемой части втулки на входе в очаг деформации, по методу баланса работ [70]:

$$A_B = A_d,$$

где  $A_d$ - работа внутренних сил или работа деформации;  $A_B$  – работа внешних сил:

$$A_B = A_a - A_T,$$

где  $A_a$ - работа активных сил - деформирующего усилия;  $A_T$  – работа сил трения:

$$A_T = A_M + A_o;$$

где  $A_M$  – работа сил трения на конической матрице;  $A_o$  – работа сил трения на жесткой оправке.

Работа деформации

$$A_d = A_{\tau R} + A_{\tau r} + A_o,$$

где  $A_{\tau R}, A_{\tau r}$  – работа деформации на входе и выходе трубы из очага деформации;  $A_o$  – работа в очаге деформации.

Работа активных сил через составляющие работ внешних и внутренних сил равна:

$$A_a = A_{\tau R} + A_{\tau r} + A_o + A_d + A_m$$

или в дифференциальном виде:

$$dA_a = dA_{\tau R} + dA_{\tau r} + dA_o + dA_d + dA_m. \quad (2.22)$$

Определим составляющие работ через элементарные перемещения относительно матриц  $dh$ . Из условия постоянства объема металла до и после деформации  $s_1 dh = R \alpha dh_R$ . Для плоско деформированного состояния размеры элементарных объемов в нормальной плоскости принимаем равными единице. Если  $s_1$  - исходная толщина втулки, то  $s_1 = R \sin \alpha$ ,  $dh \approx dh_R$ . Из условия постоянства объема  $\rho R \alpha dh_\rho = R \alpha dh_R$  радиальное перемещение любого элемента  $dh_\rho = R/\rho dh$ , а на выходе из очага деформации  $dh_r = R/r dh$ .

Приращение работы деформации в очаге равно интегралу скалярного тензора напряжений и тензора приращений деформаций по объему очага последних:

$$dA_\sigma = \iiint_V \sigma_i d\varepsilon_i dV. \quad (2.23)$$

Без учета упрочнения металла  $\sigma_i = \sigma_s$ ;  $dV = \rho \alpha dr$ ;

$$d\varepsilon_i = -\frac{2}{\sqrt{3}} d\varepsilon_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}} d\varepsilon_\rho; (\varepsilon_d \approx \varepsilon_{cp} \approx 0)$$

$$d\varepsilon_\theta = \frac{dh_\rho}{\rho} = \frac{R}{\rho^2} dh.$$

После подстановки значений  $\sigma_i$ ,  $d\varepsilon_i$ ,  $dV$  в выражение (2.23) получим:

$$dA_\sigma = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{cp} R \alpha dh \ln \frac{R}{r}. \quad (2.24)$$

Принимаем, что касательные напряжения на границах очага деформации  $\tau_{\rho\theta} = 1/2 \sigma_s$ , тогда элементарная сила от касательных напряжений будет:



при  $\rho = R$   $dN = 1/2\sigma_s R d\theta$   
 при  $\rho = r$   $dN = 1/2\sigma_s r d\theta$ ,  
 а путь действия этих сил  
 $dh_{Rt}g\theta = dh_{Rt}g\theta$ .

Элементарная работа касательных сил (при  $\rho = R$ ) на выходе в очаг деформации находится по формуле:

$$dA_{tR} = \frac{1}{2} \sigma_s R dh |\ln \cos \alpha|.$$

Если принять  $|\ln \cos \alpha| \approx \frac{1}{2} \alpha^2$ , то

$$dA_{tR} = \frac{1}{4} \sigma_s R \alpha^2 dh, \quad (2.25)$$

а элементарная работа на выходе из очага деформации при  $\rho = r$

$$dA_{tr} = \frac{1}{4} \sigma_s R \alpha^2 dh. \quad (2.26)$$

Определим работу сил трения на контактных поверхностях без учета влияния касательных напряжений. Совместное решение приближенных уравнений равновесия

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0$$

Из условия пластичности  $\sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_s$  при  $\rho = r$  и  $\sigma_\rho = 0$  имеет вид

$$\sigma_\rho = -\sigma_s \ln \frac{\rho}{r}; \quad \sigma_\theta = -\sigma_s (1 + \ln \frac{\rho}{r}).$$

Элементарная сила трения на контактных поверхностях

$$\mu \sigma_\theta d\rho = \mu - \sigma_s \left( 1 + \ln \frac{\rho}{r} \right) d\rho,$$

а путь работы этой силы равен:

$$dh_\rho = \frac{R}{\rho} dh.$$

Элементарная работа сил трения по матрице (дорну) определяется

$$dA_M = \int_r^R \mu \sigma_s \left(1 + \ln \frac{\rho}{r}\right) \frac{R}{r} dh d\rho = \mu \sigma_s R dh \left(1 + \frac{1}{2} \ln \frac{R}{r}\right) \ln \frac{R}{r}. \quad (2.27)$$

В очаге деформации течение металла опережает движение оправки, поэтому относительное перемещение металла по ней можно определить как разность смещений  $dh_{\rho 0} = dh(R/\rho - 1)$ , а элементарную работу трения по оправке как

$$dA_o = \int_r^R \mu \sigma_s dh_{\rho 0} d\rho = \frac{1}{2} \mu \sigma_s R dh \ln \frac{R}{r}. \quad (2.28)$$

Элементарную работу всех активных сил получим при подстановке выражений (2.24) – (2.28) в уравнение (2.22):

$$dA_a = \sigma_s R dh \left[ \alpha \ln \frac{R}{r} + \frac{\alpha^2}{2} + \mu \left(1 + \frac{1}{2} \ln \frac{R}{r}\right) \ln \frac{R}{r} + \frac{\mu}{2} \left(\ln \frac{R}{r}\right)^2 \right]. \quad (2.29)$$

Элементарная работа активных сил, вызванная осевыми сжимающими напряжениями  $\sigma_z$  в передающей части втулки при перемещении толкателя на величину  $dh$ , равна:

$$dA_a = \sigma_z R \alpha dh. \quad (2.30)$$

Совместным решением уравнений (2.29) и (2.30) получим значение осевых напряжений в недеформированной части втулки, а упрочнение металла учтем подстановкой  $\sigma_s = \sigma_{cp} = 0,5(\sigma_1 + \sigma_2)$ :

$$\sigma_z = \sigma_{cp} \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{R}{r} + \frac{\alpha}{2} + \frac{\mu}{\alpha} \ln \frac{R}{r} \left(1 + \ln \frac{R}{r}\right) \right]$$

или

$$\sigma_z = \sigma_{cp} \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{S_1}{S_2} + \frac{\alpha}{2} + \frac{\mu}{\alpha} \ln \frac{S_1}{S_2} \left(1 + \ln \frac{S_1}{S_2}\right) \right]. \quad (2.31)$$

Дифференцируя выражение (2.31) по  $\alpha$  и приравнявая его нулю, получим приближенную зависимость для расчета  $\alpha_{opt}$  (в град):

$$\alpha_{opt} \approx 81 \sqrt{\mu \ln \frac{S_1}{S_2} \left(1 + \ln \frac{S_1}{S_2}\right)}. \quad (2.32)$$

Учитывая, что  $\ln\left(\frac{\Delta S}{S_2} + 1\right) \approx \frac{\Delta S}{S_2} \approx \frac{i}{2S}$ , получим прибли-

женное значение для расчета  $\alpha_{\text{опт}}$  через натяг ( $i_D, i_d$ ) при редуцировании на неподвижной оправке или при дорновании в обойме:

$$\alpha_{\text{опт}} \approx 40,5 \sqrt{\frac{\mu i}{S_2} \left(1 + \frac{i}{2S}\right)}$$

Получим формулу для расчета тягового усилия при механическом дорновании отверстий в неподвижной обойме без зазора.

$$P_D = \frac{\pi \sigma_{\text{ср}} \left( \Phi_{\text{об}}^2 - d_1^2 \right)}{4} \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{S_1}{S_2} + \frac{\alpha}{2} + \frac{\mu}{\alpha} \ln \frac{S_1}{S_2} \left( 1 + \ln \frac{S_1}{S_2} \right) \right].$$

Схема для расчета усилий при обработке с растяжением полых цилиндров представлены на рисунке 2.9.

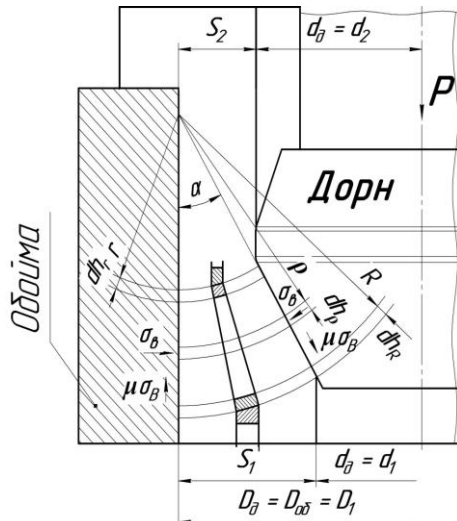


Рисунок 2.9 – Расчётная схема для определения усилий при электромеханическом дорновании с растяжением тонкостенных втулок в замкнутом объёме

В деформированной зоне детали действуют осевые растягивающие напряжения  $\sigma_z$ , а возникающие силы трения

по обойме (оправке) уменьшают их значения. Элементарные работы, определяемые формулами (2.24) – (2.26), останутся неизменными. Определим изменяемые составляющие элементарных работ по формуле (2.22). Совместным решением приближенных уравнений равновесия  $\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0$  и условия пластичности в виде  $\sigma_\rho - \sigma_\theta = \sigma_s$  при  $\rho = R$  и  $\sigma_\rho = 0$  получим:

$$\sigma_\rho = \sigma_s \ln \frac{R}{\rho}; \sigma_\theta = -\sigma_s \left(1 - \ln \frac{R}{\rho}\right).$$

При дорновании с креплением заготовки за бурт в очаге деформации действуют растягивающие осевые напряжения. Составляющие элементарных работ сил трения по дорну и обойме для данного случая будут:

$$dA_{\text{д}} = \mu\sigma_s R dh \left(1 - \frac{1}{2} \ln \frac{R}{r}\right) \ln \frac{R}{r};$$

$$dA_{\text{об}} = \frac{1}{2} \mu\sigma_s R dh \left(\ln \frac{R}{r}\right)^2.$$

Растягивающее напряжение, возникающее в деформированной (передающей) зоне детали, равно сумме составляющих активных сил:

$$\sigma_z = \sigma_{\text{ср}} \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{R}{r} + \frac{\alpha}{2} + \frac{\mu}{\alpha} \ln \frac{R}{r} \left(1 - \ln \frac{R}{r}\right) \right] \quad (2.33)$$

или

$$\sigma_z = \sigma_{\text{ср}} \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{S_1}{S_2} + \frac{\alpha}{2} + \frac{\mu}{\alpha} \ln \frac{S_1}{S_2} \left(1 - \ln \frac{S_1}{S_2}\right) \right].$$

Усилия растяжения, возникающее в передающей зоне дорнуемой детали, без учета трения по обойме (оправке) будет равно:

$$P_z = \frac{\pi\sigma_z \left( d_{\text{об}}^2 - d_{\text{д}}^2 \right)}{4}. \quad (2.34)$$

Выражение (2.33) позволяет определить предельную деформацию за один проход из условия прочности на растяжение деформированного сечения детали.

Усилие на преодоление трения по обойме

$$P_{об} = \frac{\pi \mu \sigma_{ср} D_{об}}{\alpha} S_2 \ln \frac{S_1}{S_2}. \quad (2.35)$$

Усилие при механическом дорновании втулки в обойме по схеме с растяжением определяется суммой выражений (2.34) и (2.35):

$$P_{д} = \pi \sigma_{ср} S_2 D_{об} \left\{ \left( 0,5 + \frac{d_{д}}{2D_{об}} \right) \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{S_1}{S_2} + \frac{\alpha}{2} + \frac{\mu}{\alpha} \ln \frac{S_1}{S_2} \left( 1 - \ln \frac{S_1}{S_2} \right) \right] + \frac{\mu}{\alpha} \ln \frac{S_1}{S_2} \right\} \quad (2.36)$$

Из формулы общего количества выделенного тепла в калориях за время прохождения высокотемпературным объемом определенного расстояния - Н, которое выражается:

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (2.37)$$

можно определить коэффициент трения  $Q_1$  – тепло трения инструмента об обрабатываемую деталь;  $Q_2$  – тепло, выделяемое проходящим током.

$$Q_1 = \frac{2,1FH}{5,1}, \text{ Дж}, \quad (2.38)$$

где F – сила трения при сглаживании, Н;

Н – высота высокотемпературного объема, см.

Согласно закону Амонтона – Кулона:

$$F = P \cdot \mu,$$

где P – нормальное давление при сглаживании в Н.

Коэффициент трения  $\mu$  - коэффициент трения при сглаживании. Следовательно,

$$Q_1 = \frac{2,1PH\mu}{5,1}, \text{ Дж}. \quad (2.39)$$

Согласно закону Джоуля – Ленца:

$$Q_2 = I^2 R \tau, \text{ Дж}, \quad (2.40)$$

где I – сила тока вторичной цепи, А;

R – сопротивление, Ом;

$\tau$  – время прохождения тока, с.

Величину  $Q_2$  можно также выразить через напряжение тока. С учетом потерь в электрической цепи формула примет следующий вид:

$$Q_2 = \eta IU\tau, \text{ Дж} \quad (2.41)$$

где  $\eta$  - коэффициент, учитывающий потери во вторичной цепи трансформатора.

Таким образом, подставив формулы (2.39 и 2.41) в выражение (2.37) получим формулу для расчета общего количества тепла, выделенного за время прохождения инструментом расстояния - H:

$$Q = \frac{PH\mu}{10,2} + \eta IU\tau \quad (2.42)$$

Из формулы (2.41) выразим коэффициент трения  $\mu$ :

$$\mu = \frac{5,1 Q - \eta IU\tau}{2,1PH} \quad (2.43)$$

Подставив полученное выражение (2.43) в (2.36), получим расчетную формулу для определения усилия объемного электромеханического дорнования:

$$P_{\text{ОЭМД}} = \pi\sigma_{\text{ср}}S_2D_{\text{об}} \left( 0,5 + \frac{d_{\text{д}}}{2D_{\text{об}}} \right) \left[ \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{S_1}{S_2} + \frac{\alpha}{2} + \frac{5,1 Q - \eta IU\tau}{2,1\alpha PH} \ln \frac{S_1}{S_2} \left( 1 - \ln \frac{S_1}{S_2} \right) \right] + \pi\sigma_{\text{ср}}S_2D_{\text{об}} \frac{5,1 Q - \eta IU\tau}{2,1\alpha PH} \ln \frac{S_1}{S_2} \quad (2.43)$$

Как видно из формулы при увеличении силы тока коэффициент трения снижается, что также существенно влияет на снижение усилия ОЭМД.

## 2.5 Выводы

1. Теоретически обоснована необходимость применения обоймы ограничивающей наружный диаметр тонкостенной стальной втулки при обработке ее ОЭМД.

2. Получены теоретические зависимости для расчета глубины упрочненного поверхностного слоя тонкостенной стальной втулки обработанной ОЭМД, позволяющие подобрать технологические режимы для получения упрочненного слоя требуемой толщины.

3. Произведен расчет пятна контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью в процессе ОЭМД. Полученные зависимости позволяют оптимально подбирать геометрические параметры инструмента.

4. Теоретически обосновано снижение усилия в процессе ОЭМД тонкостенных стальных втулок в сравнении с механическим дорнованием.

### **3 МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДОРНОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ВТУЛОК**

#### **3.1 Общая методика исследований**

Общая методика исследования включает комплексное изучение структуры, физико-механических свойств упрочненного поверхностного слоя тонкостенных втулок обработанных электромеханическим дорнованием и влияние основных параметров режимов обработки на эксплуатационные свойства детали. При этом исследования проводились в следующей последовательности:

- анализ применимости и выбор по основным конструктивно-технологическим характеристикам наиболее распространенный диапазон деталей типа «втулка»;

- анализ основных способов изготовления втулок и классифицирование способов обработки отверстий;

- исследование особенностей обработки тонкостенных стальных втулок не свободным дорнованием;

- сбор и обработка информации об условиях эксплуатации и износах стальных втулок;

- анализ возможностей электромеханического упрочнения и работ, выполненных в данном направлении с целью разработки эффективного способа обработки тонкостенных стальных втулок на основе данного анализа;

- проведение теоретического обоснования возможности применения разработанной технологии электромеханического дорнования к обработке отверстий тонкостенных стальных втулок;

- теоретическое обоснование условий образования структуры, физико-механических свойств, снижение усилия при применении технологии электромеханического дорнования отверстий тонкостенных стальных втулок;



- исследование влияния режимов электромеханического дорнования при обработке тонкостенных стальных втулок на глубину упрочненного поверхностного слоя, состояние шероховатости поверхности, точность размеров обработанных втулок и изменение усилия;

- проведение лабораторных и стендовых сравнительных испытаний износостойкости обработанных электромеханическим дорнованием тонкостенных стальных втулок;

- определение эффективности применения разработанной технологии.

При разработке методик проведения исследований за основу принимались методы, регламентированные Государственным стандартом. При отсутствии таковых использовались и разрабатывались оригинальные методики, учитывающие особенности процесса обработки электромеханическим дорнованием тонкостенных втулок, наиболее рациональные способы изготовления образцов, возможности имеющегося лабораторного оборудования. При этом учитывался опыт проведения исследований в близких отраслях науки и техники.

### **3.2 Образцы для исследований и инструмент**

Исходя из проведенного анализа тонкостенных втулок, используемых в сельскохозяйственной технике, по маркам применяемого материала и основным размерам данных деталей, в качестве материала для исследований выбрана среднеуглеродистая хромистая сталь 40Х и сталь 20 ГОСТ 1050 – 88, также для дополнительных исследований применялась шарикоподшипниковая сталь марки ШХ15 ГОСТ 801 – 78. Втулки изготавливались с внутренним диаметром характеризующим величину натяга 29,5 мм, 29,6 мм, 29,7 мм, наружный диаметр всех втулок составлял 35мм, высота 15мм.

Перед электромеханическим дорнованием втулки устанавливались в специально изготовленные обоймы (рис. 3.1) из силумина АК12 ГОСТ 1583 – 89Е наружный диаметр которых составлял не менее 90мм, высота 40мм, а внутренний диаметр соответствовал наружному диаметру устанавливаемых втулок.



Рисунок 3.1 – Образцы для проведения исследований

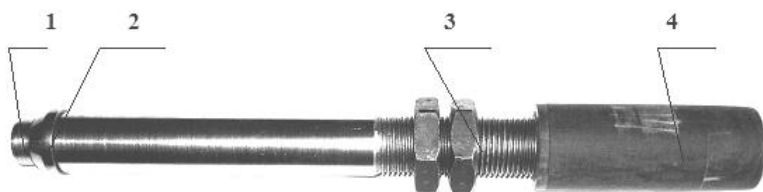


Рисунок 3.2 – Инструментальная державка со сменным дорном: 1 - фиксирующая гайка; 2 – дорн; 3 – гайки для крепления токопроводящего кабеля; 4 – токоизоляционная втулка

Инструментом при ОЭМД является державка со сменным дорном 3 (рис. 3.2) из материала имеющего теплостойкость выше, чем у обрабатываемого материала. В исследованиях применялся инструмент из твердого сплава марки Т15К6 ГОСТ 3882 – 88. Выбор материала объясняется дос-

таточной стойкостью и прочностью твердого сплава при высоких температурах.

При изготовлении инструмента - дорна (рис. 3.3) контролировались его геометрические параметры на приборе УИМ – 21.

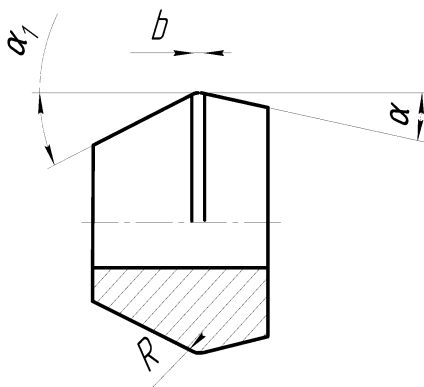


Рисунок 3.3 - Инструмент для ОЭМД

При обработке тонкостенных втулок электромеханическим дорнованием использовался твердосплавный дорн диаметром 30мм со следующими параметрами:  $\alpha_1 = 30^\circ$ ;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $b = 0,5\text{мм}$ ;  $R = 2\text{мм}$ . Чистота поверхности соответствует 12 классу шероховатости.

### 3.3 Экспериментальная установка, приборы и оборудование

При ОЭМД тонкостенной втулки (рис. 3.4) через место контакта инструмента (дорна) 2 с отверстием втулки 3 проходит ток большой силы и низкого напряжения, приводящий к сильному нагреву локальной контактируемой кольцевой поверхности. При ОЭМД тонкостенных втулок с целью избежания ее деформации используется обойма 4, которая ограничивает изменение размеров втулки по наружному диаметру. С целью обеспечения стабильности пятна контакта ОЭМД производилось по схеме растяжения.

Для выполнения экспериментальных исследований сконструирована экспериментальная установка, позволяющая в полной мере отслеживать интересующие нас параметры (рис. 3.5).

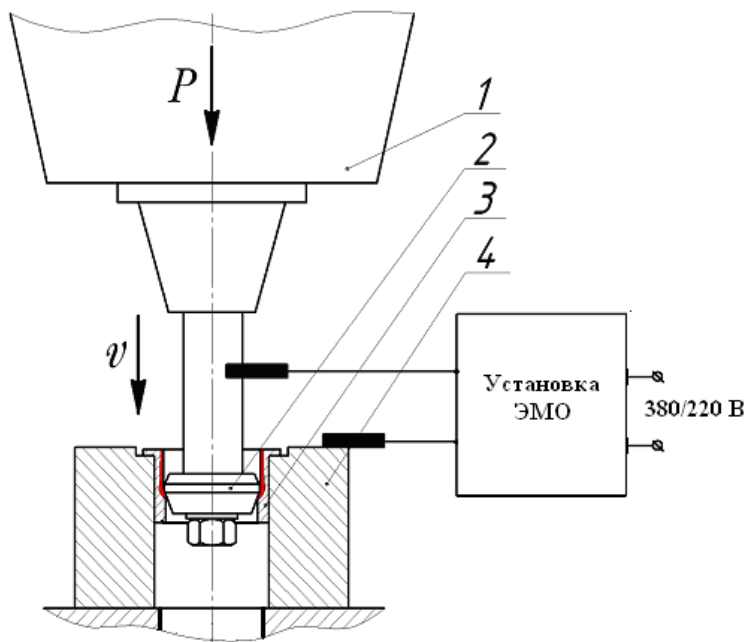


Рисунок 3.4 – Схема процесса ОЭМД: 1 – вертикально-фрезерный станок; 2 – инструмент; 3 – втулка; 4 – обойма

ЭлектроМеханическое дорнование тонкостенных стальных втулок производилось на вертикально-фрезерном станке модели 6В11 с автоматическим перемещением платформы в вертикальном направлении, что позволяло изменять скорость электроМеханического дорнования в исследуемых интервалах. В качестве источника тока применяется установка ЭМО с аппаратурой регулирования электрических параметров приборами контроля, управления и защиты, объединенными в одной конструкции.

Таблица 3.1

## Техническая характеристика установки

Напряжение питания, В	380
Рабочее напряжение, В	0...7
1 Режим, В	0...2,5
2 Режим, В	3
3 Режим, В	4,5
4 Режим, В	5,5
5 Режим, В	6
Предельная величина рабочего тока, кА	10
Максимальная выходная мощность при кратковременной работе, кВт	50
Число ступеней регулирования	7

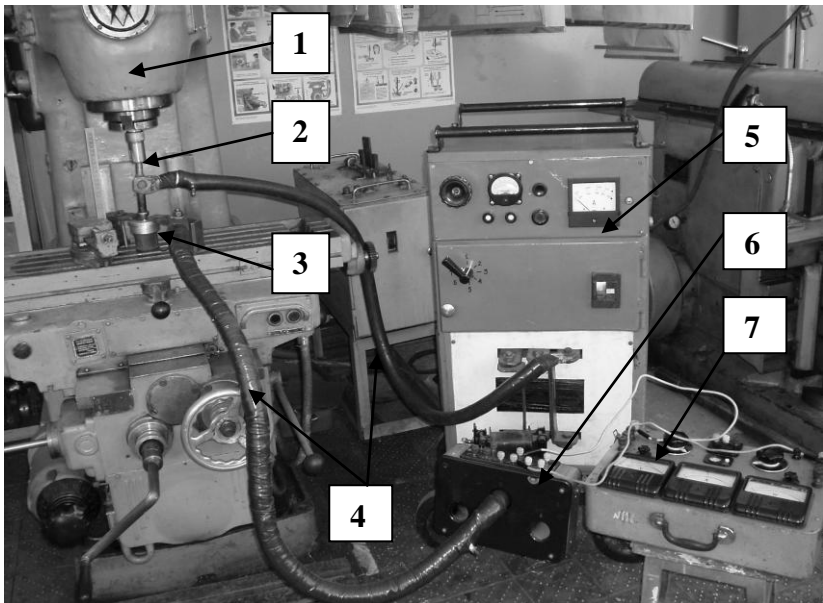


Рисунок 3.5 – Экспериментальная установка для электро-механического дорнования тонкостенных втулок: 1 – вертикально-фрезерный станок 6В11; 2 – инструмент (дорн) с приспособлением для измерения усилия; 3 – обойма с установленной в ней тонкостенной втулкой; 4 – токоподводящие кабели; 5 – УЭМО 5М; 6 – трансформатор тока; 7 – универсально-измерительный комплект К50

Лабораторные исследования проводились с использованием комплекса измерительной аппаратуры К-50, позволяющего производить измерения величины тока с точностью  $\pm 10$  А.

Инструмент изолируется от станка трансформаторной изоляционной лентой, чтобы избежать прохождения тока через станок. Место контакта токопроводящих кабелей с контактируемой поверхностью инструмента и детали, а также с контактами установки ЭМО предварительно зачищается наждачной бумагой.

### **3.4 Методика лабораторных исследований**

*3.4.1 Методика металлографических исследований структуры поверхностного слоя образованного электрохимическим дорнованием*

Для оценки качества и прогнозирования работоспособности упрочненной поверхности необходимо провести металлографические исследования полученной структуры для различных материалов на разных режимах.

Для проведения металлографических исследований из обработанных электрохимическим дорнованием втулок изготавливали микрошлифы по методике в соответствии с ГОСТ 2789 – 73.

Для выявления микроструктуры образцы травили в 4% растворе азотной кислоты в течении 5...7 с. После травления образцы промывались проточной водой и просушивались.

Исследование микроструктуры полученных шлифов проводили при увеличении в 300 раз с помощью микроскопа МИМ – 7.

Испытание на микротвердость проводили с помощью микротвердомера ПМТ – 3 квадратной алмазной пирамидкой с углом при вершине  $136^\circ$ . Нагрузка на индентор составляла 0,5 и 1,0 Н. При проведении испытаний измеряли

диагональ отпечатков и определяли микротвердость по табличным данным, приведенным в паспорте прибора, и по формуле:

$$H = \frac{P}{F_{\text{омн}}} = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{P}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2},$$

где: P – нагрузка, Н;  $\alpha$  – угол при вершине алмазной пирамидки; d - диагональ отпечатка, мкм.

Измерение микротвердости производили через 25 мкм между центрами отпечатков вдоль зоны соединения и от поверхности вглубь основы металла. Значение микротвердости определялось по результатам усреднения 10...15 замеров.

Фотографии микроструктуры получали при помощи видеокамеры Махио ТС – 300, установленной вместо окуляра микротвердомера ПМТ – 3 и соединенной через порт USB с персональным компьютером (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Прибор ПМТ-3 с видеокамерой

Изображение выводилось непосредственно на экран монитора, полученные снимки в графическом формате сохранялись на жесткий диск компьютера.

### *3.4.2 Методика измерения шероховатости поверхности образованной объемным электромеханическим дорнованием*

Для исследования параметров шероховатости использовался профилометр модели 130.0.01-ПС (рис. 3.7).

При установке датчика относительно измеряемой детали учитывалась длина трассы ощупывания. При нажатой кнопке длина трассы равна семи отсечкам шага (предварительный ход, равный двум отсечкам шага, и измерение на длине пяти отсечек шага). При отсечке шага 2,5 мм включали короткую трассу, так как максимальный ход привода равен 10 мм.

Корпус привода и датчик устанавливался параллельно трассе измерения при помощи стойки или микроподачи. Если датчик установлен неверно, индикатор на электронном блоке указывает на ошибку. При правильной установке датчика в исходном состоянии стрелка индикатора должна находиться в левой зоне шкалы.

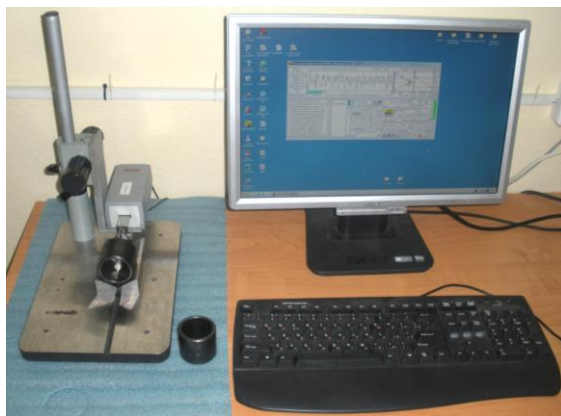


Рисунок 3.7 – Общий вид профилометра модели 130.0.01-ПС

При измерении параметров шероховатости привод перемещает датчик по измеряемой поверхности. После про-



хождения всей трассы датчик ускоренно возвращается в исходное положение, а на экране электронного блока появляется значение измеряемого параметра.

За контролируемые параметры шероховатости были выбраны  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ .

Измерения проводились с трех кратной повторностью, поскольку на показания могут оказывать влияние единичные изменения внешних условий.

Если максимальное значение показаний прибора не превышает 0,3 от нижнего предела выбранного диапазона измерения (табл. 3.2), то относительная погрешность измерения требуемого параметра шероховатости от влияния внешних условий не будет превышать 0,5 допускаемой погрешности профилометра в пределах данного диапазона измерения.

При этом получение максимального значения погрешности маловероятно, особенно для параметра  $R_z$ .

Таблица 3.2

Допускаемые значения при измерении шероховатости

Параметр	Диапазон измерения			Допускаемое значение (0,3 нижней границы)
	на электронном блоке	верхняя граница	нижняя граница	
$R_{max}, R_z$	1	1	0,2	0,06
	10	10	1	0,3
	100	100	10	3,0

Если результаты проверки влияния внешних условий будут больше указанных значений, то значение шероховатости измеряемых поверхностей должно не менее, чем в три раза, превышать уровень влияния внешних условий.

### 3.4.3 Методика измерения усилия при не свободном электромеханическом дорновании тонкостенной стальной втулки

Изменения усилия в процессе электромеханического дорнования фиксируем специально сконструированной телескопической державкой (рис. 3.8).

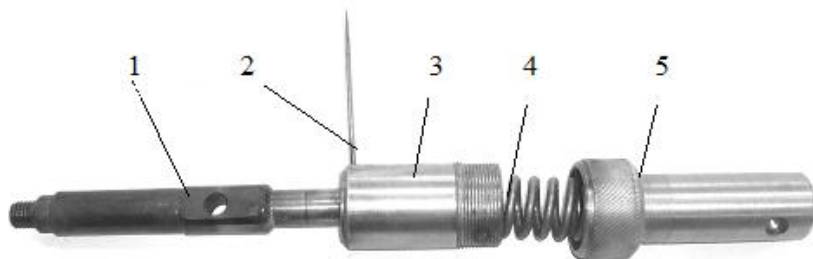


Рисунок 3.8 – Телескопическая державка для измерения усилия электромеханического дорнования: 1–шток; 2–стрелка; 3–корпус; 4–оттарированная пружина; 5–хвостовик

Шток 1 на одном конце имеет резьбовую и установочную поверхность для крепления, при помощи гайки, твердосплавного инструмента (дорна), на фрезерованной поверхности средней части штока имеется отверстие для крепления токоподводящего кабеля и обеспечения надежного контакта. На другом конце штока 1 имеется поршень, который перемещается внутри корпуса 3 и упирается в двоякую тарированную пружину 4. Тарировка пружины производилась на тарировочном стенде МИП-150-2 ГОСТ 17086-71 (тарировочный график двоякой пружины представлен на рисунке 3.9). На конце корпуса 3 имеется резьба для крепления хвостовика 5, при помощи которого телескопическая державка фиксируется в патроне вертекально-фрезерного станка, также хвостовик 5 является упором для двоякой пружины 4.

Внутренняя поверхность корпуса обрабатывается графитовой смазкой с целью снижения коэффициента трения между внутренней поверхностью корпуса и поверхно-

стями поршня и сдвоенной пружины перемещающихся внутри корпуса в процессе измерения усилия электромеханического дорнования.

Изменение сжатия пружины в процессе замера усилия электромеханического дорнования тонкостенной втулки фиксируется посредством перемещения стрелки 2, которая прикреплена к поршню, относительно линейки с ценой деления 1 мм.

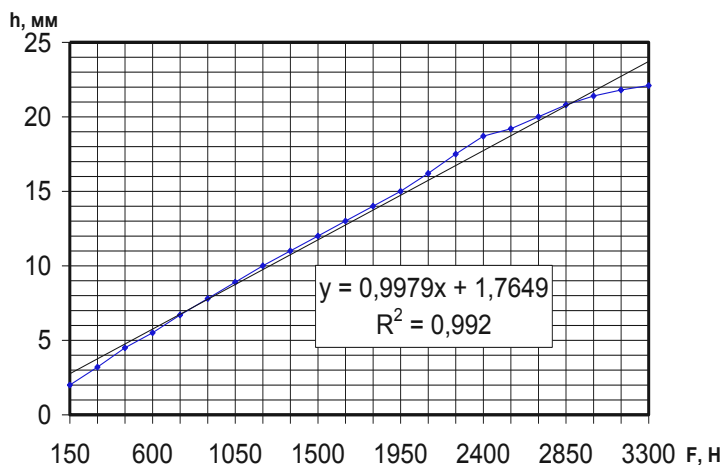


Рисунок 3.9 – График тарировки пружины

#### 3.4.4 Методика триботехнических лабораторно-стендовых испытаний

Исследования на износостойкость проводим на машине трения 2070 СМТ–1 (см. рис. 3.11) по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 23.224-86 [27].



Рисунок 3.10 - Общий вид модернизированной машины трения 2070 СМТ -1

Для записи величины момента силы трения, используем потенциометр КСП-4 с пределом измерения  $0...10$  мВ. Для замера величины температуры в зоне трения используем стандартную термопару, которая с одной стороны впаивается в испытуемую колодку, а с другой стороны при помощи разъема подключается к мультиметру. Кроме того, для удобства работы камеру для масла модернизируем (см. рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Испытательная камера

При испытании колодка 16 (см. рисунок 3.12) удерживалась с помощью шарика установленного в просверленном гнезде, что позволяет ей самоустанавливаться относительно ролика 17. Такое крепление обеспечивает хорошую воспроизводимость результатов при повторных опытах. В индустриальное масло И-Г-А-46 находящегося в картере машины трения добавляли 5% (по весу) кварцевую пыль. Гранулометрический состав кварцевой пыли приведен в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Гранулометрический состав кварцевой пыли

Размеры фракций, мм	0,1 – 0,05	0,05 – 0,005	меньше 0,005
Содержание фракций, %	18,1	46,6	35,3

Триботехническим испытаниям подвергались две партии образцов – базовые и экспериментальные:

1) Базовые образцы. Колодки изготавливались из втулок корпуса среднего турбокомпрессоров ТКР-11Н-1, ролики из высокопрочного чугуна ВЧ 80.

2) Экспериментальные образцы. Колодки изготавливались из втулок, имеющих марку стали 40Х и ШХ15, обработанных ЭМД и втулки из стали 40Х, обработанной дорнованием без подвода тока, а ролики также изготавливались из высокопрочного чугуна ВЧ 80.

На рисунках 3.13 и 3.14 изображены образцы для испытаний на машине трения.

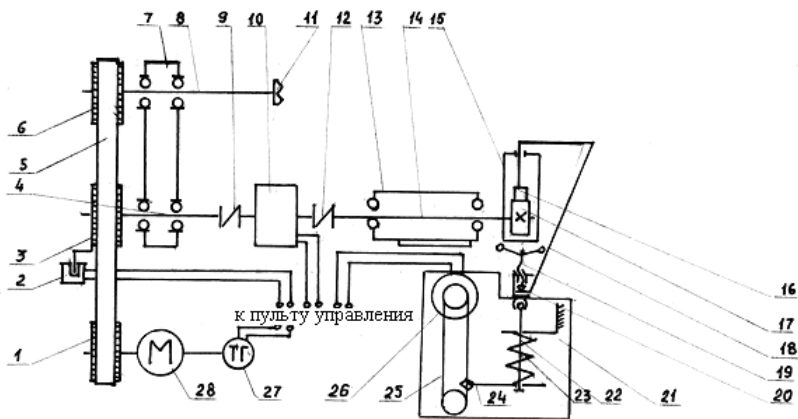


Рисунок 3.12 – Схема машины трения СМТ-1 для испытания по схеме “ролик-колодка”: 1, 6 – шкив сменный; 2 – датчик числа циклов; 3 – шкив; 4 – вал; 5 – ремень зубчатый; 7 – корпус; 8 – вал; 9, 12 – муфта; 10 – датчик момента; 11 – муфта кулачковая; 13 – шпиндель сменный; 14 – вал бабки; 15 – камера испытательная; 16 – колодка; 17 – ролик; 18 – кронштейн; 19 – ось-винт; 20 – пята; 21 – механизм нагружения; 22 – тяга; 23 – пружина; 24 – планка; 25 – нить; 26 – датчик нагрузки; 27 – датчик скорости; 28 – электродвигатель.

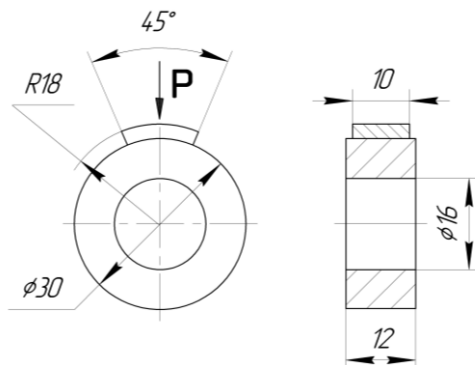


Рисунок 3.13 – Схема испытаний и размеры образцов

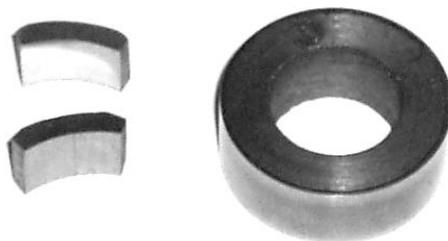


Рисунок 3.14 – Общий вид роликов и колодок

В таблице 3.4 даны материалы образцов для испытаний с указанием их технологических характеристик.

Триботехнические испытания состоят из трех этапов: притирки, приработки и длительных стационарных износных испытаний.

К испытаниям на этапе приработки допускались образцы, если площадь их взаимного прилегания при установке на испытательной машине составляла не менее 90% от номинальной расчетной поверхности контакта. Взаимная предварительная приработка образцов проводилась непосредственно на машине трения под нагрузкой меньшей, чем прилагаемая на испытаниях. После обеспечения указанно прилегания образцы маркировали, промывали в бензине или ацетоне, высушивали в сушильном шкафу в течении 30 минут при 353 К° и снова взвешивали. Затем определяем средний из-

нос по трём опытам. Взвешивание проводили на весах ВЛР-200 с точностью измерения 0,0001 г (см. рисунок 3.15).

Таблица 3.4

Материалы образцов пар трения

№ п/п	Деталь	Материал	Твёрдость	Шероховатость поверхности $R_a$ , мкм	Пара трения
1	Втулка подвергнутая объемной закалке и последующей механической обработке.	Сталь 40Х ГОСТ 4543-71	383...416 HV	1,25	Колодка
2	Втулка обработанная ЭМД с режимами: $I = 5000A$ ; $i = 0,4$ мм; $v = 66$ мм/мин.	Сталь 40Х ГОСТ 4543-71	503...519 HV	0,32	
3	Втулка обработанная ЭМД с режимами: $I = 5000A$ ; $i = 0,4$ мм; $v = 66$ мм/мин.	ШХ 15 ГОСТ 801-78	613...634 HV	0,46	
4	Втулка обработанная дорнованием.	Сталь 40Х ГОСТ 4543-71	274...287 HV	0,64	
5	Уплотнительное кольцо ГОСТ 846-73	ВЧ 80 ГОСТ 7293-85	248...351 HV	0,8...1,25	Ролик

Подготовленные образцы устанавливали на машину трения 2070 СМТ-1. Задавали необходимый режим подачи масла в зону контакта. Приводили в движение подвижный образец с частотой, обеспечивающей заданную скорость скольжения, после чего к образцам пары трения прикладывали предусмотренную испытаниями нагрузку.





Рисунок 4.15 - Общий вид весов ВЛР-200

Приработка проводилась при средней скорости относительного скольжения 0,08 м/с. Режим смазки – граничное трение; подача смазки – разовая в картер; режим смазывания – окупанием. После завершения каждой ступени нагружения, нагрузка снималась, и образцы тщательно осматривались и взвешивались.

Операция притирки позволяет увеличить площадь прилегания контактирующих поверхностей ролика и колодки. Длительность притирки – 3 часа.

В процессе триботехнических испытаний замерялся момент трения  $M_{тр}$ , при различных нагрузках затем по формуле подсчитывался коэффициент трения

$$f_{тр} = \frac{2M_{тр}}{d \cdot N}, \quad (3.1)$$

где:  $f_{тр}$  – коэффициент трения;

$d$  – диаметр ролика;

$N$  – нормальная нагрузка.

Стационарные износные испытания проводили в фиксированном режиме при фиксированной нагрузке. Время стационарных испытаний составляло 24 часа.

Полученные данные о первоначальных массах образцов ( $G^k$  и  $G^p$ ) до и после каждого вида испытаний заносили в протокол испытаний. Их средние значения  $\overline{G^k}$  и  $\overline{G^p}$  приведены в таблицах.

Интенсивность изнашивания роликов  $J^p$  и колодок  $J^k$  определяли по потере ими массы –  $\Delta G^k$  и  $\Delta G^p$ .

Расчетные формулы для оценок:

$$\overline{J^k} = \frac{\delta^k}{L^k} = \frac{\Delta G^k}{q^k \cdot S^k} \cdot \frac{1}{T \cdot n \cdot \pi \cdot d^p}, \quad (3.2)$$

где  $S^k = l^k \cdot b^k$ ;

$$\overline{J^p} = \frac{\delta^p}{L^p} = \frac{\Delta G^p}{q^p \cdot S^p} \cdot \frac{1}{T \cdot n \cdot l^p}, \quad (3.3)$$

где  $S^p = \pi \cdot d^p \cdot b^k$ ;  $\delta^k, \delta^p$  – средняя толщина изношенного слоя элементов пары трения;  $L^k, L^p$  – пути трения элементов пары за время испытаний  $T$ , при скорости вращения ролика  $n$  (об/мин);  $S^k, S^p$  – номинальная площадь контакта колодки и ролика;  $l^k, b^k$  – длина и ширина колодки;  $d^p$  – диаметр ролика;  $q^k, q^p$  – удельная масса материала колодки и ролика.

Интенсивность изнашивания пары в целом  $J_\Sigma = J^p + J^k$

Перед проведением испытаний проводили тарировку механизма нагружения машины трения согласно руководства по эксплуатации.

Тарировочный график представлен на рисунке 3.16. Момент силы трения при лабораторных испытаниях, определяем на установке СМТ-1 с помощью индуктивного датчика (см. рисунок 3.12, позиция 10).

Перед проведением экспериментов производим тарировку датчика машины трения в статическом режиме, согласно инструкции по эксплуатации. По результатам тарировки строим тарировочный график (см. рисунок 3.17).

Момент силы трения регистрируем и записываем предварительно протарированным потенциометром КСП–4 с точностью 0,1 мВ.

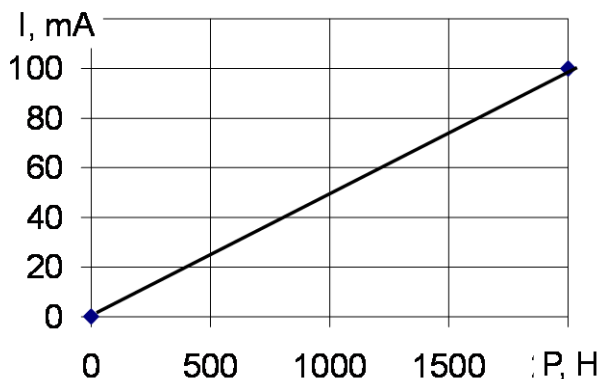


Рисунок 3.16 – Тарировочный график механизма нагружения машины трения СМТ-1

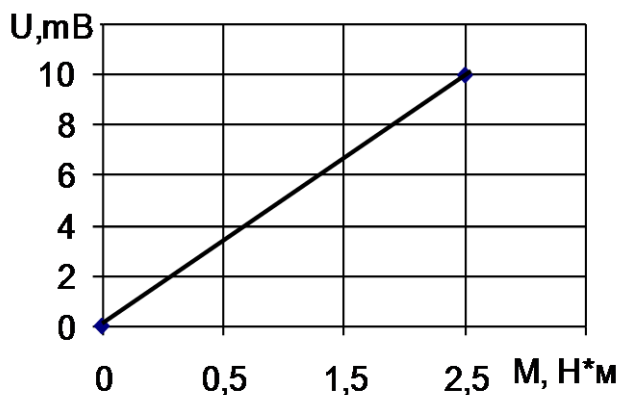


Рисунок 3.17 – Тарировочный график индуктивного датчика момента силы трения

### 3.5 Выводы

1. Подобрано необходимое оборудование и разработаны соответствующие методики проведения лабораторных, стендовых и эксплуатационных испытаний, позволяющие в полном объеме отслеживать интересующие результаты

2. Для замера усилия в процессе электромеханического дорнования спроектирована и изготовлена телескопическая державка.

## **4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДОРНОВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОСТЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ВТУЛОК**

### **4.1 Влияние объемного электромеханического дорнования на физико-механические свойства поверхностного слоя тонкостенных стальных втулок**

Исследование структуры металла поверхностного слоя необходимо для понимания физико-механических свойств трущихся деталей и их эксплуатационных показаний.

Процесс формирования структуры поверхностного слоя в ходе электромеханического упрочнения представляет собой совокупность целого ряда явлений, основными из которых, являются взаимно конкурирующие процессы: закалка, а затем самоотпуск и вторичный, отпуск закаленного металла.

Анализ процессов изменения структуры в данном разделе проводится на примере стали 40Х, выбор которой обусловлен тем, что ее свойства в различных исходных состояниях достаточно хорошо известны благодаря широкому применению для изготовления деталей сельскохозяйственной техники. Характерные закономерности изучаемых эффектов будут, затем распространены, с учетом ряда особенностей, и на другие марки сталей и конкретные детали.

Металлографический анализ проводился на основе методики описанной в п. 3.4.1.

Исследования структуры поверхностного слоя после ОЭМД показали, что белый слой представляет собой практически нетравящуюся обычными способами структуру повышенной твердости. Структура белого слоя, наблюдаемая в оптический микроскоп, не имеет ни игольчатого, ни какого-либо иного характерного кристаллического строения и выглядит как сплошное, однородное светлое поле. Это объясняется тем, что при электромеханическом дорновании диффузия кислорода и азота в поверхностный слой почти исключается, поскольку процесс происходит мгновенно, давление во много раз превышает давление трения и фазовые превращения совмещаются с пластическими деформациями.

Специфические свойства рассматриваемого белого слоя объясняются возникновением в нем особого бесструктурного мартенсита, характеризующегося, большой дисперсностью структуры, существенной концентрационной неоднородностью и значительными искажениями кристаллического строения. Кроме того, причиной пониженной травимости и высокой твердости являются изменения электронного строения и химических связей отдельных элементов в результате действия в зоне обработки экстремальных температур и давлений. Белый слой, формирующийся на поверхности металла при воздействии концентрированных потоков энергии, наследует как неоднородность состава и свойств аустенита, зарождающегося, вообще говоря, в аномальных условиях, так и близкую к критической мелкозернистость его структуры.

Можно также наблюдать, что превращение структурно свободного феррита происходит не только путем разрастания аустенитных участков, образовавшихся на месте бывших перлитных зерен, но и путем возникновения в самом структурно свободном феррите новых аустенитных центров и их роста.

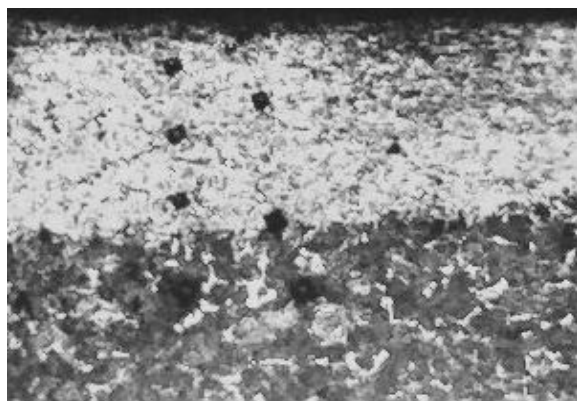


Рисунок 4.1 – Микроструктура упрочненного ОЭМД слоя стали 40Х ( $\times 270$ )

На рисунке 4.1 показан общий вид поверхностного слоя, упрочненного ОЭМД, образцов из среднеуглеродистой

стали (сталь 40Х), исходная структура которой состоит из перлита и сетки феррита. Подробно структура стали 40Х после ЭМО была рассмотрена нами выше, поэтому здесь мы лишь кратко остановимся на некоторых характерных особенностях.

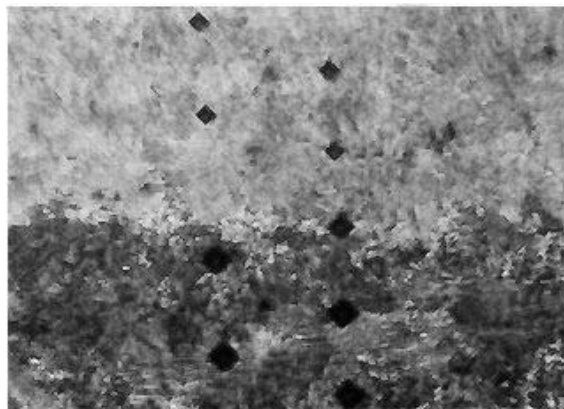


Рисунок 4.2 – Микроструктура упрочненного ОЭМД слоя стали ШХ15 ( $\times 320$ )

Кинетика образования аустенита в доэвтектоидной стали при нагреве характеризуется определенными особенностями, связанными с наличием в ней структурно свободного феррита. При высокоскоростном нагреве доэвтектоидной стали в условиях ОЭМД становится возможным независимое превращение структурно свободного феррита в безуглеродистое  $\gamma$ -железо, т. е. без взаимодействия между ним и науглероженным аустенитом. С увеличением скорости нагрева растворение избыточного феррита в аустенит постепенно «подавляется», в результате чего все большая часть феррита перегревается до более высоких температур, при которых создаются термодинамические предпосылки для его бездиффузионного превращения в аустенит, типичного для чистого железа (при температурах выше  $905^{\circ}\text{C}$ ), с последующим (при охлаждении) образованием в таких областях малоуглеродистого мартенсита.

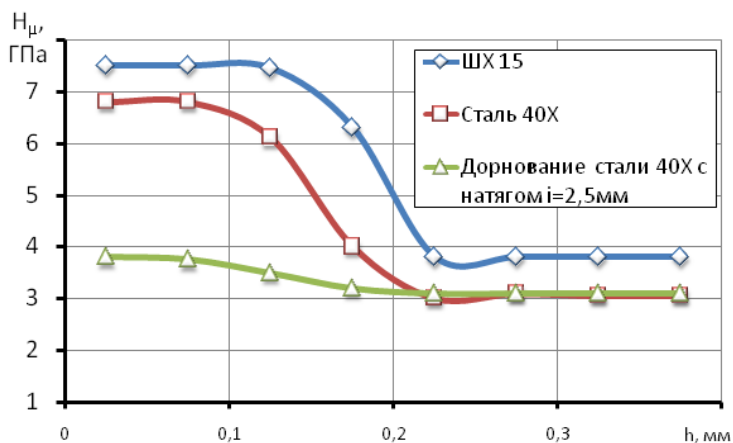


Рисунок 4.3 – Распределение микротвердости по глубине в зависимости от марки стали при несвободном электромеханическом дорновании тонкостенной втулки диаметром отверстия 30мм на следующих режимах:  $I = 5000\text{A}$ ;  $i = 0,4\text{мм}$ ;  $v = 66\text{мм/мин}$

Анализируя микрофотографии (рис. 4.1) и (рис. 4.2), а также график (рис. 4.3) следует отметить, что при одинаковом термомеханическом воздействии глубина упрочненного слоя значительно повышается в зависимости от увеличения содержания углерода в данных марках сталей. Это объясняется тем, что при повышении процентного содержания углерода, а следовательно, и более глубоком проникновении высокой температуры увеличивается омическое сопротивление металла. Рост твердости в данном случае, в том числе и для высокоуглеродистых сталей, связан с повышением дисперсности металла и выделением карбидной фазы.

Также следует отметить, что твердость поверхности после ЭМД превышает твердость поверхности после механического дорнования [70] более чем в два раза.

Полученные результаты глубины микротвердости после ОЭМД тонкостенной стальной втулки при различных

режимах силы тока наглядно представлены в виде микрофотографий (рис. 4.5) и графически (рис. 4.4).

Из представленного графика (рис. 4.4) видно, что с увеличением силы тока глубина упрочненного слоя увеличивается. Это связано в первую очередь с лучшей прокаливаемостью материала в момент контакта внутренней поверхности тонкостенной втулки с кольцевым высокотемпературным источником. Также стоит отметить, что при силе тока меньше 4500А равномерный сплошной белый слой не образуется.

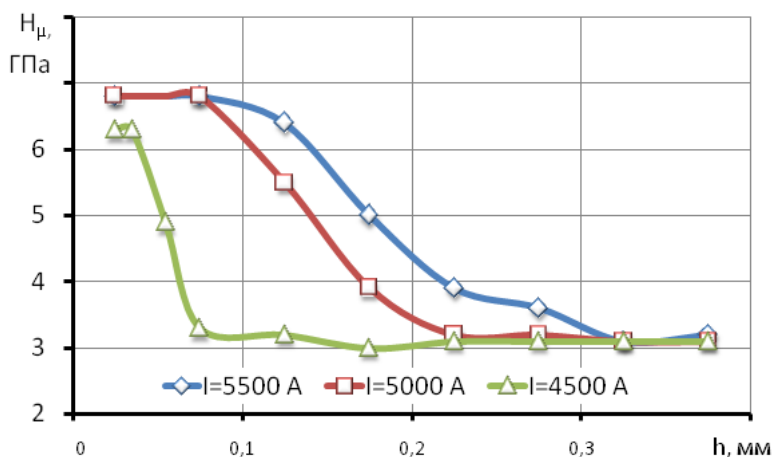
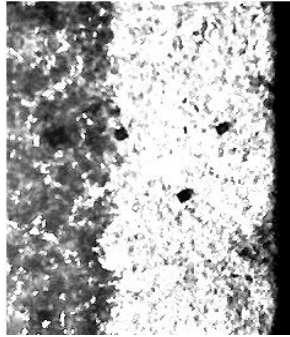
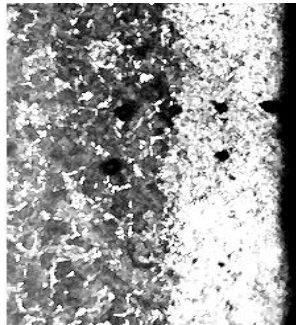


Рисунок 4.4 – Распределение микротвердости по глубине в зависимости от силы тока при несвободном электро-механическом дорновании тонкостенной втулки (сталь 40Х), диаметр отверстия 30мм, толщина стенки  $s = 2,5$ мм, натяг электро-механического дорнования  $i = 0,4$ мм;  $v = 66$ мм/мин

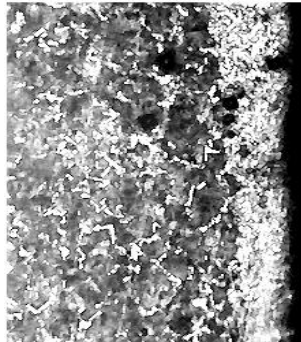




а)  $I = 5500 \text{ A}$ ,  $\delta = 0,18 \text{ мм}$



б)  $I = 5000 \text{ A}$ ,  $\delta = 0,1 \text{ мм}$



в)  $I = 4500 \text{ A}$ ,  $\delta = 0,03 \text{ мм}$

Рисунок 4.5 – Влияние силы тока при электромеханическом дорновании тонкостенной втулки из стали 40Х на глубину фазовых превращений в поверхностном слое. Диаметр отверстия втулки 30мм, натяг  $i = 0,4\text{мм}$ ;  $v = 66\text{мм/мин}$

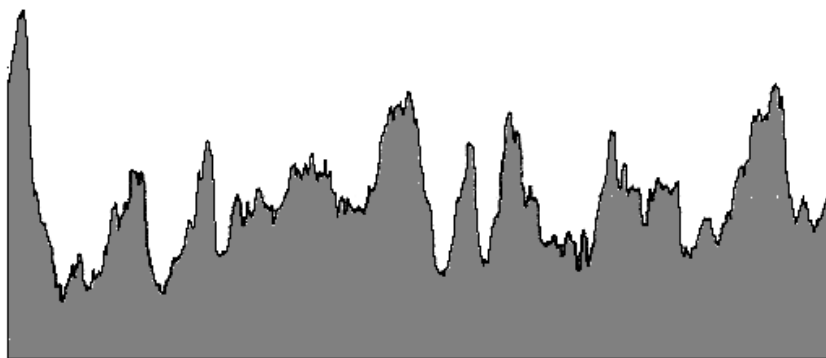
## 4.2 Влияние объемного электромеханического дорнования на шероховатость и текстуру волокон тонкостенных стальных втулок

Исследования по замеру шероховатости поверхности тонкостенной стальной втулки обработанной ОЭМД проводились в соответствии с методикой описанной в п. 3.5.2.

При изучении полученных профилограмм поверхностей тонкостенных втулок обработанных ОЭМД (рис. 4.6) можно отметить, что первоначальная шероховатость полученная в результате чернового растачивания внутренней поверхности тонкостенной втулки значительно снижается с увеличением натяга ОЭМД.

Резкое снижение шероховатости в зависимости от натяга ОЭМД в 15...120 раз по параметру  $R_a$  в сравнении с исходной объясняется воздействием больших пластических деформаций кольцевого сечения и сдвиговых деформаций, возникающих в местах при скольжении инструмента по обрабатываемой поверхности. Одновременно под действием высоких температур происходит затекание неровностей, остающихся на поверхности после прохода инструмента, что дает возможность получить более высокую чистоту обработанной поверхности при прочих равных условиях, а также больших радиальных окружных и сдвиговых деформаций неровности (некруглость, выступы, впадины, риски) тонкостенной втулки выравниваются, сглаживаются по дорну и частично переносятся на свободную поверхность детали.

На рисунке 4.7 представлен график изменения величины шероховатости по  $R_a$  в зависимости от натяга у трех различных марок сталей. Можно отметить, что при равных условиях шероховатость стали 20 меньше чем у стали 40X и значительно меньше чем у ШХ15. Эта тенденция сохраняется с увеличением натяга ОЭМД. Объясняется это в первую очередь механическими свойствами исследуемых сталей и устойчивостью формы микровыступов против пластического смятия.



а)  $R_a = 8,092$  мкм;  $R_z = 47,2$  мкм;  $R_{max} = 57,0$  мкм



б)  $R_a = 0,542$  мкм;  $R_z = 5,18$  мкм;  $R_{max} = 7,50$  мкм



в)  $R_a = 0,322$  мкм;  $R_z = 3,35$  мкм;  $R_{max} = 4,59$  мкм



г)  $R_a = 0,066$  мкм;  $R_z = 0,70$  мкм;  $R_{max} = 1,04$  мкм

Рисунок 4.6 – Профилограммы внутренних поверхностей тонкостенных втулок из стали 40X с диаметром отверстия 30 мм, толщиной стенки 2,5мм: а – черновое растачивание; б – обработка электромеханическим дорнованием с натягом 0,3 мм, при  $I = 5000$ А,  $v = 66$  мм/мин; в - обработка электромеханическим дорнованием с натягом 0,4 мм, при  $I = 5000$ А,  $v = 66$  мм/мин; г - обработка электромеханическим дорнованием с натягом 0,5 мм, при  $I = 5000$ А,  $v = 66$  мм/мин

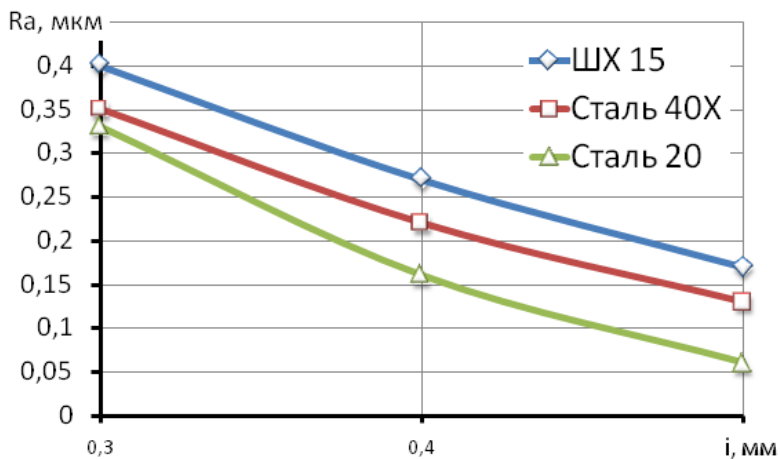


Рисунок 4.7 – Влияние величины натяга на параметры шероховатости в зависимости от марки стали при ОЭМД тонкостенной втулки с диаметром отверстия 30мм при  $I = 5000\text{A}$ ,  $v = 66\text{ мм/мин}$

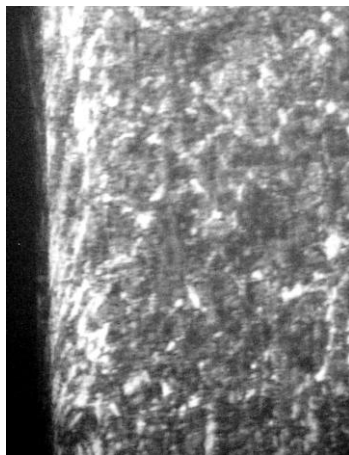


Рисунок 4.8 – Текстура волокон тонкостенной втулки из стали 40Х ( $\times 270$ ) полученная после ОЭМД при  $I = 4000\text{A}$

При рассмотрении микрофотографии продольного разреза тонкостенной втулки (рис. 4.8) обработанной ОЭМД с силой тока 4000А сплошной белый слой не образуется, но

отчетливо видно формирование направления волокон металла, что свидетельствует о наличии при ОЭМД процесса пластической деформации. Волокна поверхностного слоя обработанной ОЭМД втулки имеют вытянутую форму, что объясняется кинематикой течения металла в направлении движения инструмента. Поверхностный слой данной структуры характеризуется процессом горячего наклепа, при котором температура деформации выше температуры порога рекристаллизации. Это подтверждает тот факт, что одновременно с высокотемпературным нагревом имеет место пластическая деформация.

На основании выше изложенного можно предположить, что ОЭМД может являться окончательным этапом обработки внутренней поверхности без предшествующей чистовой механической обработки. Также в связи со своей конструктивной простотой при определенных условиях ОЭМД может в полной мере, в сельскохозяйственных ремонтных мастерских, заменять трудоемкие финишные операции – хонингование, шлифование, тонкое точение, развертывание, протягивание и полирование.

#### **4.3 Влияние объемного электромеханического дорнования на усилие при обработке стальных тонкостенных втулок**

Тяговые усилия при обработке тонкостенных стальных втулок являются важной технологической характеристикой процесса пластического деформирования при высокотемпературном нагреве цилиндрических поверхностей, значение которой необходимо для: выбора оборудования требуемой мощности и усилия; расчета инструмента и деформирующих элементов на жесткость и прочность; выбора необходимой силы тока; расчета на устойчивость, смятие опорного торца и прочных тонкостенных втулок; выбора оптимальной формы и геометрии деформирующе - нагрева-

тельного элемента; оценки качества подготовки поверхности перед ОЭМД.

Измерения тяговых усилий при обработке тонкостенных стальных втулок ОЭМД проводились в соответствии с разработанной методикой п. 3.5.3.

При исследовании тягового усилия при ОЭМД, которое фиксировалось в зависимости от натяга и силы тока (рис. 4.9) наблюдается значительное повышение усилия при увеличении натяга. Одновременно с этим усилие несколько падает при увеличении силы тока. Это связано с тем, что при повышении температуры нагрева резко изменяются физико-механические характеристики металла и в первую очередь его предел прочности и твердость. При высоких температурах нагрева значения предела прочности сталей различной твердости приближаются друг к другу, а следовательно в зоне этих температур может быть достигнута, примерно, одинаковая их обрабатываемость.

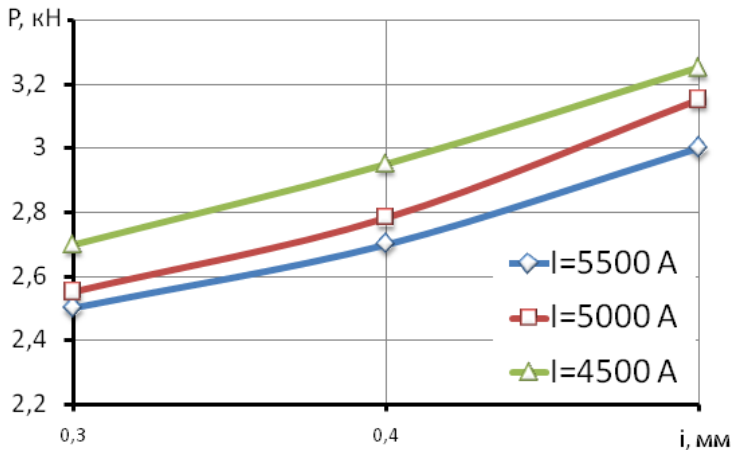


Рисунок 4.9 – Влияние силы тока и натяга на усилие при ОЭМД тонкостенных втулок из стали 40Х, диаметр отверстия 30мм, толщина стенки  $s = 2,5$ мм при  $v = 66$  мм/мин

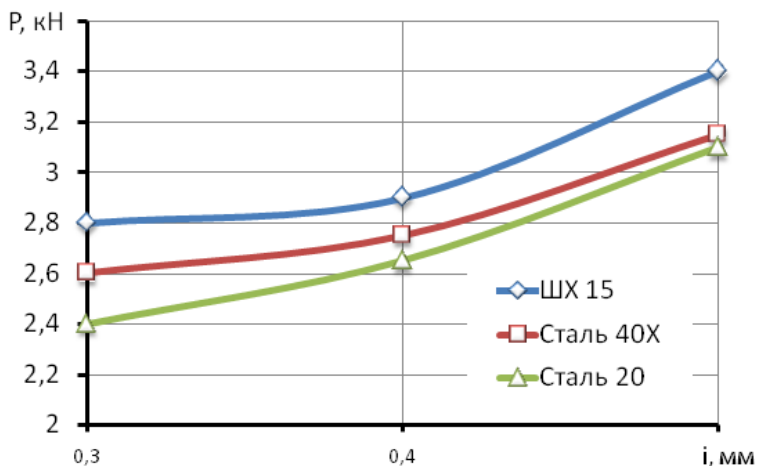


Рисунок 4.10 – Влияние величины натяга на величину усилия в зависимости от марки стали при ОЭМД тонкостенных втулок с диаметром отверстия 30мм, толщина стенки  $s = 2,5$ мм при  $I = 5000$ А,  $v = 66$  мм/мин

На рисунке 4.10 представлены полученные экспериментальным путем зависимости изменения тягового усилия от натяга и марки стали. Из графика видно, что тяговое усилие с увеличением натяга резко возрастает, что связано с увеличением деформируемого объема и соответственно повышением сопротивления. С повышением физико-механических свойств исследуемых марок сталей тяговое усилие при ОЭМД также незначительно возрастает. Это объясняется тем, что сталь с более высокими механическими свойствами имеет большую сопротивляемость механическим деформациям чем сталь с низкими физико-механическими свойствами.

При сравнении тягового усилия, возникающего в процессе ОЭМД и при механическом дорновании, опираясь на собственные экспериментальные данные (рис. 4.9, 4.10) и данные полученные ранее [69, 70 и 91], важным показателем является значительное снижение тягового усилия при обработке стальной тонкостенной втулки ОЭМД (около 10

раз). Это объясняется тем, что в процессе ОЭМД происходит высокотемпературный нагрев обрабатываемой поверхности, который приводит к резкому повышению пластичности обрабатываемого металла. Следствием этого является малое сопротивление пластической деформации при обработке.

Обобщая выше изложенное можно отметить, что использование процесса ОЭМД исключает необходимость в специальном оборудовании с большими тяговыми усилиями, что является приоритетным моментом при использовании данного способа в сельскохозяйственных ремонтных мастерских.

#### **4.4 Качество соединения с натягом полученного объемным электромеханическим дорнованием тонкостенных стальных втулок**

При исследовании процесса ОЭМД также учитывалось прочность соединения с натягом между обоймой и электродорнуемой в ней тонкостенной втулкой.

В обычных условиях прочность подобного соединения в основном зависит от величины натяга, определяющего значение радиальных сил по контрактной поверхности сопрягаемых деталей. За счет упругого расширения охватываемой детали и упругого сжатия охватываемой детали в месте их контакта образуются и стабильно сохраняются определенные сжимающие радиальные напряжения, обеспечивающие необходимую прочность соединения. Однако при запрессовке в отверстия деталей с недостаточной радиальной жесткостью типа тонкостенных втулок, обычно не удаётся обеспечить необходимой прочности соединения. В большинстве случаев практики такие соединения не имеют достаточной прочности и надежности.

Прочность прессового соединения полученного после ОЭМД в зависимости от натяга оценивалось зависимо-



стью усилия выпрессовывания, которое фиксировалось на разрывной машине Р – 10, и момента проворачивания (рис. 4.11). Замеры момента проворачивания осуществлялись при помощи моментного ключа ГОСТ Р 51254 – 99 с пределом измерения 1000 Н·м.

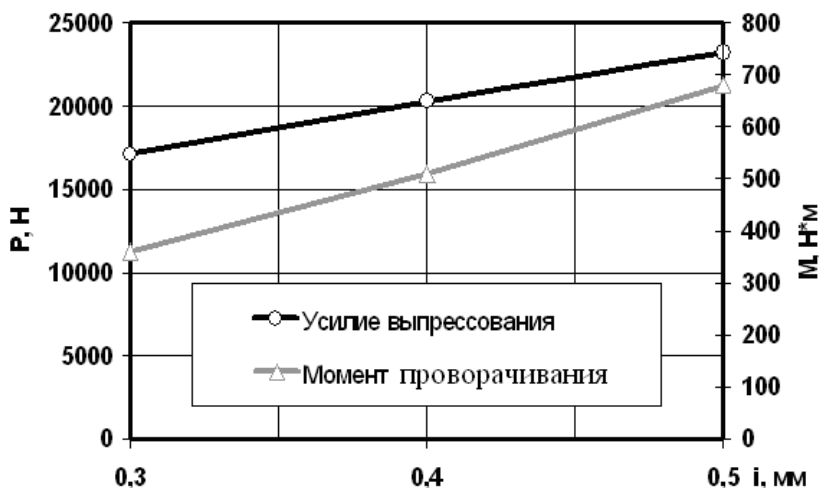


Рисунок 4.11 – График зависимости усилия выпрессовывания и момента проворачивания от величины натяга электромеханического дорнования

Из графика видно, что с увеличением натяга ОЭМД, как усилие выпрессовывания, так и момент проворачивания повышаются. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что полученное соединение соответствует техническим требованиям, предъявляемым на прессовые соединения подобного типа [65, 92].

#### 4.5 Влияние режимов объемного электромеханического дорнования на качественные и количественные характеристики

Оптимальный режим электромеханического дорнования назначается в зависимости от изнашиваемости отвер-

ствия втулки, условий эксплуатации, требуемого качества поверхности.

Анализ литературы в области электромеханической обработки показывает, что наибольшее влияние на глубину упрочнения оказывает сила электрического тока, усилие прижатия инструмента (в нашем случае натяг), скорость обработки. Чтобы объективно установить степень влияния каждого из вышеназванных факторов, получить максимум информации при минимуме затрат, применяется метод математического планирования эксперимента [39, 46, 66], который позволяет при минимальном количестве опытов получить математическую модель процесса. Такая модель может быть с успехом использована для нахождения необходимых режимов технологического процесса и управления им. В качестве образцов для проведения исследований применялись втулки из стали 40Х, с диаметром отверстия характеризующим величину натяга 29,5 мм, 29,4 мм, 29,5 мм, толщиной стенки 2,5 мм, диаметр отверстия обоймы, в которое устанавливалась втулка перед обработкой изготовлялось в соответствии с наружным диаметром устанавливаемой втулки. Электромеханическое дорнование отверстий втулок проводилось специально изготовленным инструментом (дорном) из твердого сплава Т15К6 диаметром 30 мм. Охлаждение инструмента и втулок, а также смазка трущихся поверхностей производилось индустриальным маслом «И-Г-А-46».

Исходная микротвердость материала составляла  $208 \pm 5$  кг/мм<sup>2</sup>. Глубина упрочненного слоя определялась на шлифах по микротвердости. Во избежание ошибок измерения глубины упрочнения, вызванных погрешностями определения микротвердости, твердость упрочненного слоя принималась не меньшей 260 кг/мм<sup>2</sup>. Опыты проводились с четырехразовой повторяемостью. Математическая обработка производилась на ЭВМ по специально разработанной программе для полнофакторного эксперимента. Методика

выбора и оптимизации контролируемых параметров технологического процесса электромеханического дорнования тонкостенных втулок соответствовала РДМУ-109-77. При этом планировался полнофакторный эксперимент, позволяющий получить математическую модель процесса и выбрать контролируемые параметры.

Предварительные эксперименты показали, что удовлетворительные результаты глубины упрочненного слоя и величины шероховатости получаются при электромеханическом дорновании на следующих режимах: сила тока  $I = 5000$  А, скорость  $v = 66$  мм/мин при относительном натяге  $i = 0,4$  мм.

В качестве независимых переменных (факторов) были выбраны сила тока  $I$ , относительный натяг  $i$ , скорость обработки  $v$ . Верхние и нижние уровни варьируемых факторов приведены в таблице 4.1. Для предсказания направления градиента была выбрана линейная модель:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{1,2}x_1x_2 + b_{1,3}x_1x_3 + b_{2,3}x_2x_3 + b_{1,2,3}x_1x_2x_3 \quad (4.1)$$

Таблица 4.1

#### Интервалы и уровни варьирования факторов

Наименование фактора	Обозначение фактора	Единица измерения	Интервал варьирования	Уровни факторов		
				нижний	основной	верхний
1. Сила тока, $I$	$X_1$	А	0,5	4500	5000	5500
2. Натяг, $i$	$X_2$	мм	0,1	0,3	0,4	0,5
3. Скорость движения инструмента, $v$	$X_3$	мм/мин	33	33	66	99

#### 4.5.1 Влияние режимов электромеханического дорнования на глубину упрочненного слоя

В таблице 4.2 приведен полный план матрицы планирования полнофакторного эксперимента типа  $2^k$ , где  $k$  – число факторов, при  $k = 3$  число точек плана 8. Матрица

планирования отражает последовательность реализации всех возможных комбинаций факторов. В графах факторов знак «+» означает, что в данном опыте данный фактор должен находиться на верхнем уровне, соответственно знак «-» означает, что фактор должен находиться на нижнем уровне. Реализация плана эксперимента проводилась в случайной последовательности, выбранной по таблице равномерно распределенных случайных чисел. По мере реализации плана, полученные действительные значения параметра оптимизации (отклики) записывались в графах  $y_1, y_2, y_3, y_4$ .

Таблица 4.2

Полный план матрицы планирования  $2^3$  (параметр оптимизации – глубина упрочнения)

№ п/п	Значение факторов в кодовых обозначениях				Комбинации произведений факторов в кодовых обозначениях				Действительные значения параметра оптимизации по реализации эксперимента				
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_{cp}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,15	0,15	0,10	0,12	0,130
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,20	0,18	0,25	0,20	0,208
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,05	0,08	0,07	0,1	0,075
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,13	0,16	0,14	0,14	0,142
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,12	0,10	0,13	0,13	0,120
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,20	0,15	0,20	0,15	0,175
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,04	0,03	0,03	0,04	0,035
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,14	0,12	0,11	0,13	0,125

После обработки результатов эксперимента получена математическая модель процесса:

$$y = -0,054 + 0,072 x_1 - 0,32 x_2 - 0,00078 x_3 \quad (4.2)$$

Проверка адекватности модели проводилась по критерию Фишера (F). Расчетное значение  $F = 0,867$ , табличное значение 2,62 [66].

Из уравнения (4.2) были составлены уравнения (4.3, 4.4) на основании которых построены графики в виде поверхностей отклика - зависимости глубины упрочненной зоны от значений параметров режима электромеханического дорнования (рис. 1, 2).

$$y = -0,054 + 0,072 \cdot I - 0,32 \cdot i, \quad (4.3)$$

где:  $I$  – сила тока;

$i$  – натяг электромеханического дорнования

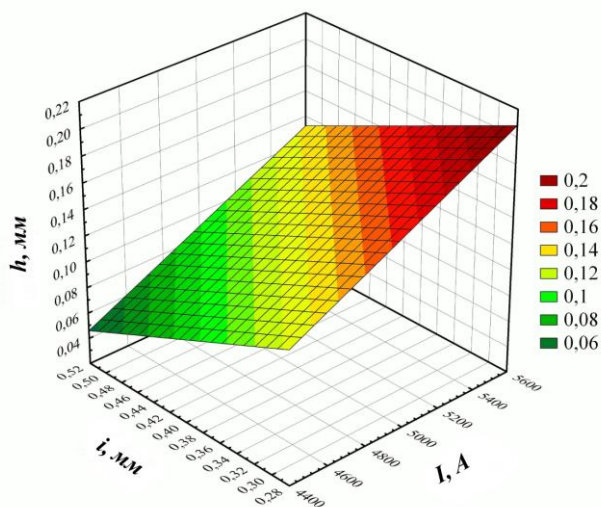


Рисунок 4.12 – Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия силы тока и натяга при ОЭМД

$$y = -0,054 + 0,072 \cdot I - 0,00078 \cdot v, \quad (4.4)$$

где:  $I$  – сила тока;

$v$  – скорость перемещения инструмента относительно обрабатываемого отверстия

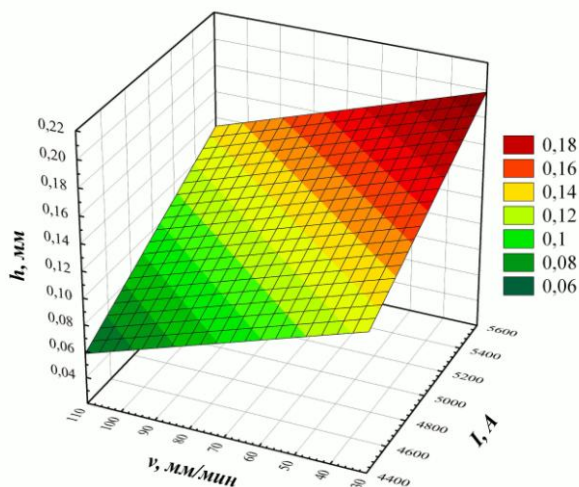


Рисунок 4.13 – Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия силы тока и скорости движения инструмента при ОЭМД

На основании полученной формулы (4.2) можно сделать определенные выводы о влиянии каждого из факторов на параметр оптимизации. Наибольшее влияние на глубину упрочненного слоя оказывает натяг электромеханического дорнования, это объясняется тем, что с увеличением натяга возрастает площадь пятна контакта, соответственно плотность тока снижается, в связи с этим происходит уменьшение глубины упрочненного слоя.

Не маловажное значение на изменение глубины упрочненного слоя оказывает сила тока. При увеличении силы тока возрастает температура в зоне контакта инструмента (дорна) с обрабатываемым отверстием, что влечет за собой лучшую прокаливаемость обрабатываемой поверхности и увеличение глубины упрочненного слоя.

Анализируя формулу (4.2) также можно отметить, что скорость электромеханического дорнования, в иссле-

двумя пределами, оказывает незначительное влияние на изменение параметра отклика.

Выше изложенное также подтверждается графическими изображениями (рис. 4.12, 4.13) на основании которых можно оптимально подбирать режимы электромеханического дорнования в зависимости от условий эксплуатации и требований предъявляемых к обрабатываемому отверстию.

#### 4.5.2 Влияние режимов объемного электромеханического дорнования на изменение шероховатости обрабатываемой поверхности

Матрица планирования, отражающая последовательность реализации всех возможных комбинаций факторов при исследовании их влияния на шероховатость в процессе ОЭМД представлена в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Полный план матрицы планирования  $2^3$  (параметр оптимизации – шероховатость поверхности по  $R_a$ )

№ п/п	Значение факторов в кодовых обозначениях				Комбинации произведений факторов в кодовых обозначениях				Действительные значения параметра оптимизации по реализации эксперимента				
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_{cp}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,34	0,32	0,34	0,35	0,34
2	+	+	-	-	-	-	+	+	0,28	0,30	0,27	0,27	0,29
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,11	0,09	0,13	0,10	0,11
4	+	+	+	-	+	-	-	-	0,07	0,08	0,08	0,09	0,08
5	+	-	-	+	+	-	-	+	0,37	0,34	0,37	0,36	0,36
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,29	0,26	0,27	0,29	0,28
7	+	-	+	+	-	-	+	-	0,12	0,12	0,14	0,14	0,13
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,10	0,07	0,09	0,08	0,09

После обработки результатов эксперимента получена математическая модель процесса:

$$y = -0,799 + 0,282x_1 - 1,87x_2 + 0,0304x_3 + 0,16x_1x_2 - 0,006x_1x_3 \quad (4.5)$$

Проверка адекватности модели проводилась по критерию Фишера (F). Расчетное значение  $F = 0,156$ , табличное значение 3,14 [66].

На основании полученного уравнения (4.5) можно сделать определенные выводы о влиянии каждого из факторов на параметр оптимизации. Незначительное влияние на шероховатость в процессе ОЭМД оказывает скорость, поэтому с целью упрощения уравнения фактором скорости ОЭМД можно пренебречь.

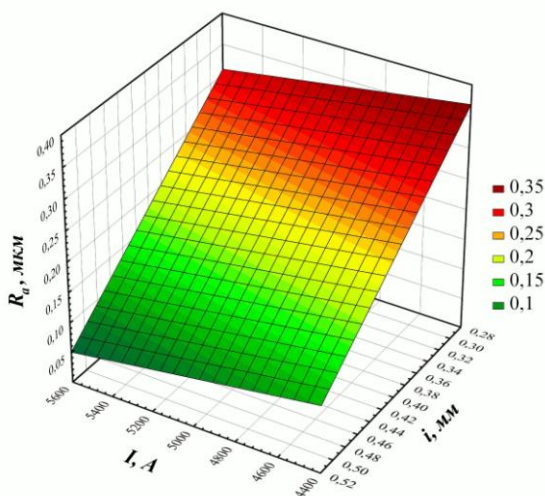


Рисунок 4.14 – Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия силы тока и натяга при ОЭМД

По полученному уравнению (4.6) построен график в виде поверхности отклика: зависимости величины шероховатости от значений параметров режима электрохимического дорнования (рис. 4.14).

$$y = -0,799 + 0,282 \cdot I - 1,87 \cdot i + 0,16 \cdot I \cdot i, \quad (4.6)$$

где  $I$  – сила тока;

$i$  – натяг электрохимического дорнования



Выбирая нужные режимы ОЭМД можно добиться оптимальной шероховатости внутренней поверхности обработанной втулки в зависимости от условий ее эксплуатации. Так, например, шероховатость поверхности подвижных уплотнений должна быть не более 1,25 и не менее 0,08 мкм, так как при более низких микронеровностях возрастают прилипание и износ [24, 25]. Следы механической обработки должны совпадать с направлением движения.

#### 4.5.3 Влияние режимов объемного электромеханического дорнования на усилие

Полный план матрицы планирования полнофакторного эксперимента типа  $2^k$  приведен в таблице 4.4. Матрица планирования отражает последовательность реализации всех возможных комбинаций факторов и их влияние на параметр оптимизации – тяговое усилие. В результате обработки полученных экспериментальных данных на ЭВМ при помощи специально разработанной программы получили математическую модель (4.7) процесса ОЭМД в зависимости от влияния каждого из факторов на исследуемый параметр.

$$y = -630,875 + 165,25x_1 + 2498,75x_2 + 15,236x_3 - 482,5x_1x_2 - 3,3x_1x_3 - 37,875x_2x_3 + 8,25x_1x_2x_3 \quad (4.7)$$

Из уравнения (4.7) видно, что значительно преобладает над другими факторами влияние натяга ОЭМД, влияние скорости практически не сказывается на изменение усилия ОЭМД в связи с этим данный параметр учитывать не будем. После преобразований математическая модель в виде уравнения (4.7) приобрела следующий вид:

$$y = -630,875 + 165,25 \cdot I - 2498,75 \cdot i + 482,5 \cdot I \cdot i, \quad (4.8)$$

где  $I$  – сила тока;

$i$  – натяг электромеханического дорнования

Таблица 4.4

Полный план матрицы планирования  $2^3$  (параметр оптимизации – тяговое усилие при ОЭМД)

№ п/п	Значение факторов в кодовых обозначениях				Комбинации произведений факторов в кодовых обозначениях				Действительные значения параметра оптимизации по реализации эксперимента				
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$	$Y_{cp}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	252	260	262	254	257
2	+	+	-	-	-	-	+	+	248	243	231	230	238
3	+	-	+	-	-	+	-	+	301	319	323	317	315
4	+	+	+	-	+	-	-	-	265	272	300	291	282
5	+	-	-	+	+	-	-	+	283	289	298	290	290
6	+	+	-	+	-	+	-	-	250	249	231	230	240
7	+	-	+	+	-	-	+	-	348	343	338	343	343
8	+	+	+	+	+	+	+	+	341	327	340	328	334

На основании полученного уравнения (4.8) построен график в виде поверхности отклика (рис.4.15).

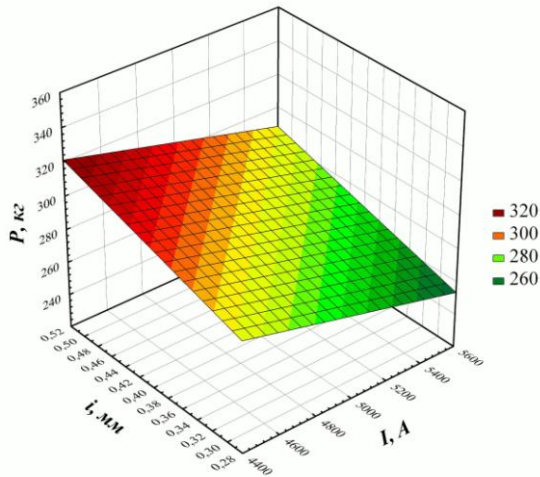


Рисунок 4.15 – Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия силы тока и натяга при ОЭМД

Изучение влияния режимов обработки на тяговое усилие имеет большое практическое значение. Данный график позволит правильно подобрать станок в зависимости от его технических условий и требований, предъявляемых к обрабатываемой втулке.

#### **4.6 Износостойкость поверхностей обработанных объемным электромеханическим дорнованием**

Коэффициент трения является одной из наиболее важных физических характеристик трущегося сопряжения. Физико-механические свойства и состояние шероховатости поверхностного слоя оказывают решающее влияние на значение коэффициента трения.

С целью изучения влияния ОЭМД на величину коэффициента трения проведены измерения момента и коэффициента трения пары: закаленная сталь – высокопрочный чугун; сталь 40Х после ОЭМД – высокопрочный чугун; ШХ15 после ОЭМД – высокопрочный чугун; сталь 40Х после дорнования – высокопрочный чугун. Режимы испытания и характеристики данных пар трения описаны в п. 3.5.4.

Результаты замеров момента трения приведены на рисунке 4.16. Каждое из приведенных значений является средним для четырех измерений. По полученным данным рассчитывался коэффициент трения (рис. 4.17).

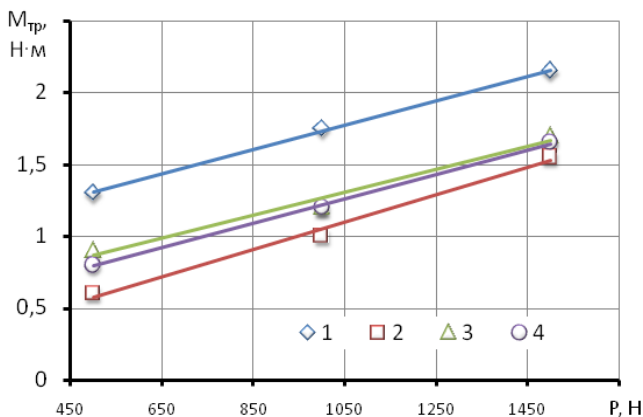


Рисунок 4.16 – Изменение момента трения в зависимости от усилия нагружения: 1 – закаленная сталь – высокопрочный чугуn; 2 – сталь 40X после ОЭМД – высокопрочный чугуn; 3 – ШХ15 после ОЭМД – высокопрочный чугуn; 4 – сталь 40X после дорнования – высокопрочный чугуn

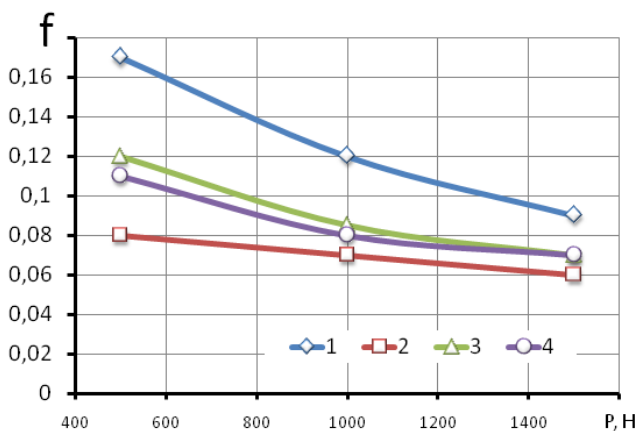


Рисунок 4.17 – Изменение коэффициента трения в зависимости от усилия нагружения: 1 – закаленная сталь – высокопрочный чугуn; 2 – сталь 40X после ОЭМД – высокопрочный чугуn; 3 – ШХ15 после ОЭМД – высокопрочный чугуn; 4 – сталь 40X после дорнования – высокопрочный чугуn

Из графиков видно, что у пар трения, колодки которых обработаны ОЭМД и дорнованием момент трения и коэффициент трения меньше чем у пар трения с закаленными и механически обработанными колодками. Такой результат можно объяснить тем, что в процессе ОЭМД и дорнования образуется микрогеометрия с лучшими характеристиками, чем после закалки и последующего чистового растачивания.

В результате замера температуры колодки в процессе испытаний было выявлено, что температура в процессе приработки у колодок обработанных ОЭМД и дорнованием составляла на 8...10°C меньше чем у закаленных механически обработанных колодок также на 10...15°C меньше при установившемся трении. Это объясняется более благоприятной микрогеометрией обработанной ОЭМД и дорнованием поверхности, которая исключает разрыв масляной пленки между трущимися поверхностями

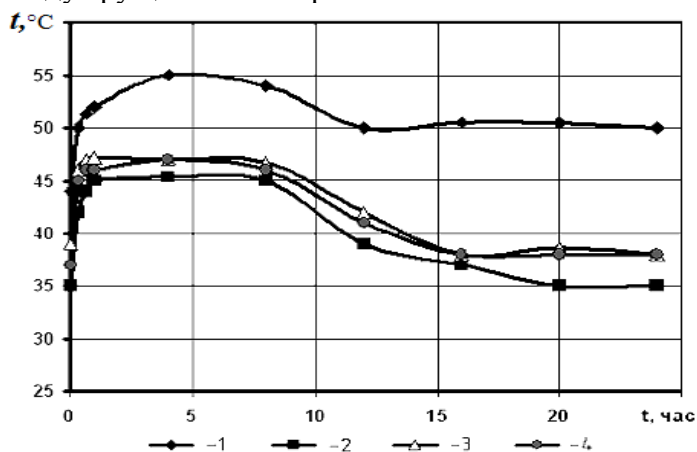


Рисунок 4.18 – Изменение температуры колодок за время испытаний: 1 – закаленная сталь – высокопрочный чугун; 2 – сталь 40X после ОЭМД – высокопрочный чугун; 3 – ШХ15 после ОЭМД – высокопрочный чугун; 4 – сталь 40X после дорнования – высокопрочный чугун

Результаты стационарных износных испытаний исследуемых пар трения сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5

Результаты интенсивности изнашивания исследуемых пар трения

Подвижный образец (ролик)	Неподвижный образец (колодка)	$\overline{J}_p$	$\overline{J}_k$	$\overline{J}_\Sigma$
Высокопрочный чугун ВЧ80	Закаленная сталь 40Х	$1,54 \cdot 10^{-11}$	$5,26 \cdot 10^{-11}$	$6,80 \cdot 10^{-11}$
Высокопрочный чугун ВЧ80	Сталь 40Х обработанная ОЭМД	$0,96 \cdot 10^{-11}$	$2,88 \cdot 10^{-11}$	$3,84 \cdot 10^{-11}$
Высокопрочный чугун ВЧ80	ШХ15 обработанная ОЭМД	$0,69 \cdot 10^{-11}$	$2,15 \cdot 10^{-11}$	$2,84 \cdot 10^{-11}$
Высокопрочный чугун ВЧ80	Сталь 40Х обработанная дорнованием	$7,15 \cdot 10^{-11}$	$4,29 \cdot 10^{-10}$	$1,44 \cdot 10^{-10}$

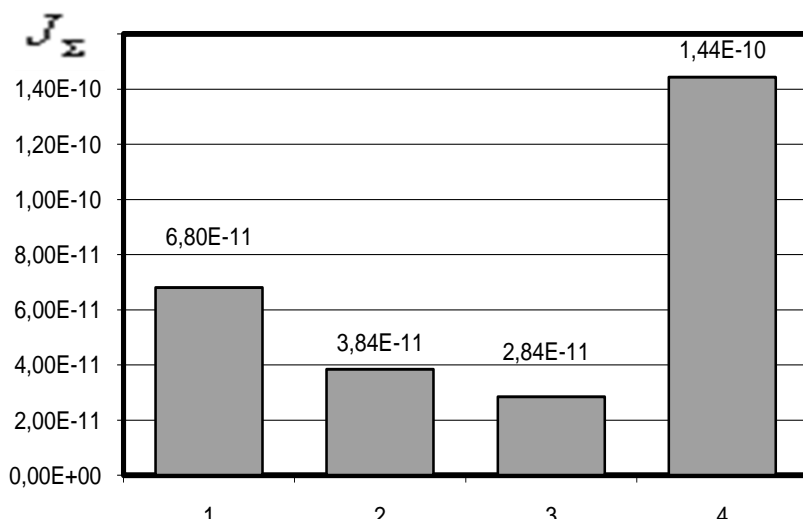


Рисунок 4.19 – Интенсивность изнашивания исследуемых пар трения: 1 – закаленная сталь – высокопрочный чугун; 2 – сталь 40Х после ОЭМД – высокопрочный чугун; 3 – ШХ15 после ОЭМД – высокопрочный чугун; 4 – сталь 40Х после дорнования – высокопрочный чугун

Сравнительную оценку изнашиваемости исследуемых образцов осуществляли по суммарной интенсивности изнашивания ролика и колодки.

Анализ данных таблицы 4.5 и рисунка 4.19 показал, что пары трения, у которых рабочая поверхность колодок обработана ОЭМД, имеют интенсивность изнашивания в 2 раза меньше по сравнению с парами трения с закаленной колодкой и в 3,4 раза меньше чем у пар трения, колодка которых обработана дорнованием.

Из проведенных исследований следует, что обработка ОЭМД тонкостенных стальных втулок позволит в значительной степени повысить износостойкость сопряжения в целом, а отсутствие шаржирования рабочей поверхности абразивом и частицами сорванных микронеровностей создает благоприятные условия работы резиновых манжет и уплотнительных колец.

#### **4.7 Выводы**

1. Проведенный металлографический анализ поверхности обработанной объемным электромеханическим дорнованием показал, что упрочненная зона представлена в виде белого слоя, ниже которого следует исходная структура металла. Твердость упрочненной зоны стали 40X составляет 48...52 HRC, а ШХ15 60...63 HRC.

2. Результаты замеров шероховатости поверхностей тонкостенных стальных втулок обработанных объемным электромеханическим дорнованием после чернового растачивания с натягом от 0,3 до 0,5 мм,  $I = 5000\text{A}$ ,  $v = 66\text{мм/мин}$  показали, что высота микронеровностей в зависимости от натяга уменьшается в 15...120 раз в сравнении с исходной и составляет 0,54...0,07мкм.

3. В результате эксперимента установлено, что при объемном электромеханическом дорновании тонкостенных стальных втулок в замкнутом объеме возникающее усилие в

10 раз меньше чем усилия, возникающие при механическом дорновании подобной втулки при прочих равных условиях. Также экспериментом установлено, что объемное электро-механическое дорнование на исследуемых режимах позволяет получить качественное соединение с натягом по наружному диаметру.

4 Испытания на износостойкость показали, что пары трения, у которых рабочая поверхность колодок обработана объемным электро-механическим дорнованием имеют интенсивность изнашивания в 2 раза меньше по сравнению с парами трения, имеющими закаленные колодки и в 3,4 раза меньше чем у пар трения колодки которых обработаны дорнованием.



## **5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДОРНОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ ВТУЛКИ КОРПУСА СРЕДНЕГО ТУРБОКОМПРЕССОРА ТКР–11Н–1 И ОЦЕНКА ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

### **5.1 Общие правила выполнения процесса электро-механического дорнования**

Приступая к электромеханическому дорнованию, необходимо проверить исправность контактов и всего оборудования установки. Для этого:

- устанавливают державку, со сменным дорном нужного размера, через переходный конус в шпиндель, изолируя ее от металлических частей станка;
- закрепляют болтом к хвостовику державки кабель от трансформатора;
- устанавливают переключателем ток, соответствующий выбранному режиму в зависимости от диаметра обрабатываемого отверстия;
- включают рубильник трансформатора;
- устанавливают на станке подачу в соответствии с выбранным режимом электро-механического дорнования;
- включают станок;
- подводят инструмент (дорн) к обрабатываемому отверстию и создают усилие прижатия порядка 300 – 600 Н;
- после включения подачи тока нажимают кнопку «пуск», а затем включают подачу;
- при подходе инструмента (дорна) к концу обрабатываемого отверстия необходимо выключить ток, нажав кнопку «стоп», чтобы избежать проискривание в месте контакта и быстрый износ инструмента.

Признаками нормальной обработки и правильно выбранного режима являются:

- наличие небольшого красного кольца в месте контакта инструмента с отверстием без всякого искрения;
- наличие блестящей ровной обработанной поверхности.

В случае появления слишком светлого кольца в зоне контакта нужно уменьшить силу тока, изменив положение переключателя на пониженную ступень трансформатора или переместив скользящий контакт реостата.

Если нагрев в зоне контакта совершенно отсутствует, нужно проверить исправность всех контактов, а также изоляцию инструмента в шпинделе станка; при недостаточном нагреве следует увеличить ток.

При ЭМД сравнительно больших и глубоких отверстий следует применять смазывающе-охлаждающие жидкости.

## **5.2 Обоснование выбора для исследования марки турбокомпрессора**

Основная тенденция развития современных тракторных и комбайновых двигателей – повышение агрегатных мощностей при практическом сохранении их массы и габаритов за счет применения турбонаддува. Использование турбонаддува позволило значительно повысить технический уровень тракторных и комбайновых двигателей.

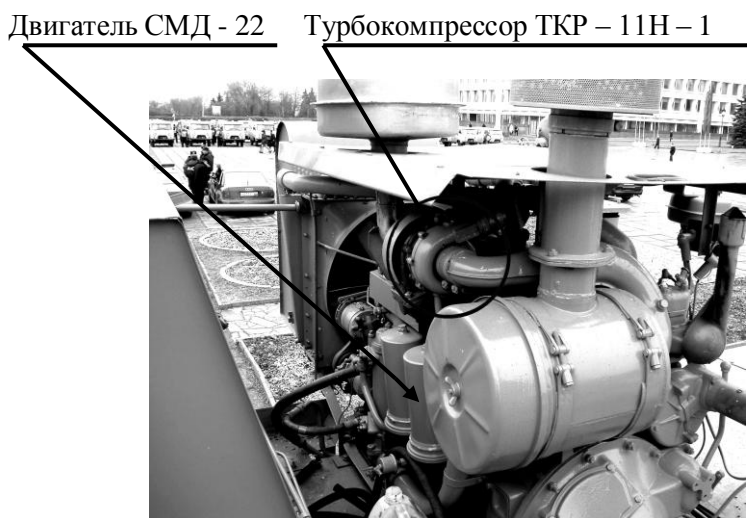


Рисунок 5.1 – Расположение турбокомпрессора на двигателе

Высокие технико-экономические показатели газотурбинного наддува, как способа повышения мощности на 15...30%, обусловили широкое применение его в автотракторных и комбайновых двигателях. В настоящее время газотурбинным наддувом снабжены все комбайновые и многие тракторные двигатели (СМД-60/61, СМД-62/63, СМД – 64/65, СМД-66/67, СМД-31/32, СМД-17/18 и др.) (рис 5.1) [12, 33]. Наиболее частое применение для наддува этих двигателей используются турбокомпрессоры типоразмеров: ТКР – 11 и его модификации (рис. 5.2).



Рисунок 5.2 – Общий вид турбокомпрессора ТКР – 11Н – 1

Промышленными предприятиями для наддува дизелей выпускаются в основном турбокомпрессоры двух типоразмеров ТКР-11 и ТКР-8,5. Наибольшее применение в автотракторных и комбайновых дизелях в настоящее время находят турбокомпрессоры ТКР-11.

Обоснованием для выбора марки турбокомпрессора для исследования является:

1. Значительная применяемость турбокомпрессоров в агропромышленном комплексе;
2. Использование в эксплуатации большого количества турбокомпрессоров, прошедших капитальный ремонт.

Капитально отремонтированные турбокомпрессоры, как правило, имеют более низкие показатели надежности [51, 65]. Их ресурс, во многих случаях, ниже ресурса двигателя, что часто приводит к отказам дизелей и простоям машин, а следовательно и к снижению производительности труда в сельскохозяйственном производстве.

На основании вышеизложенного, в качестве исследуемой марки турбокомпрессора выбран СМД-ТКР-11Н, широко применяемый на машинах сельскохозяйственного назначения, в частности в двигателях СМД-17КН, СМД-18КН зерноуборочных комбайнов [115].

Турбокомпрессор СМД-ТКР-11Н-1 является типичным представителем выпускающихся в настоящее время турбокомпрессоров и представляет собой газотурбинную установку, использующую для привода низкотемпературную часть общего теплового напора (выхлопные газы), и подающего сжатый в компрессорной части воздух во всасывающий коллектор дизеля.

### **5.3 Анализ условий эксплуатации турбокомпрессора ТКР–11Н–1**

Опыт эксплуатации турбокомпрессоров тракторных и комбайновых двигателей ЯМЗ–238НБ, СМД–60, СМД–22, СМД–17КН и др. показывает, что турбокомпрессор является одним из менее надежных узлов. Так, по данным ГОСНИТИ, количество отказов турбокомпрессора составляет 2...13% от всего количества отказов по двигателю. Средние доремонтные ресурсы двигателя и турбокомпрессора (данные ГОСНИТИ) [65] приведены в таблице 5.1.

Ресурс, как у нового, так и у отремонтированного турбокомпрессоров в среднем на 20% ниже ресурса соответственно нового и отремонтированного двигателей. Ресурс отремонтированного турбокомпрессора составляет лишь 62% от ресурса нового.

Таблица 5.1

Средний доремонтный ресурс двигателя и турбокомпрессора

Марка двигателя	Новые, мото-часов		Отремонтированные, мото-часов	
	двигатель	турбокомпрессор	двигатель	турбокомпрессор
СМД-60	3800	3140	2200	1950
ЯМЗ-238НБ	4200	3580	3400	2700

Условно устройство турбокомпрессора можно разделить на два основных узла: подшипниковый узел и узел газо-маслянных уплотнений (рис. 5.3).

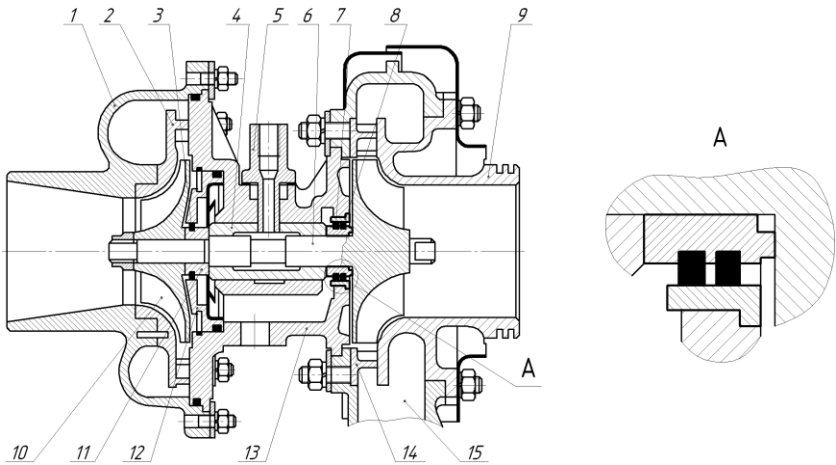


Рисунок 5.3 – Турбокомпрессор ТКР-11Н-1 в сборе: 1 – корпус компрессора, 2 – вставка компрессора, 3 – кольцо уплотнительное (компрессора), 4 – подшипник, 5 – фиксатор, 6 – вал ротора в сборе, 7 – кольцо уплотнительное (турбины), 8 – втулка, 9 – вставка турбины, 10 – колесо компрессора, 11 – маслоотражатель, 12 – диск уплотнения компрессора в сборе, 13 – корпус средний, 14 – венец соловой в сборе, 15 – корпус турбины.

Подшипниковый узел можно разделить на «радиальный подшипник» (сопряжения «вал ротора – подшипник»),

«подшипник – корпус средний») и «осевой подшипник» (сопряжения «торцовая поверхность втулки уплотнений вала ротора – торцовая поверхность подшипника», «торцовая поверхность подшипника – торцовая поверхность маслоотражателя»).

Узел газо-масляных уплотнений составляют сопряжения «маслоотражатель – кольцо уплотнительное», «втулка уплотнения ротора – кольцо уплотнительное», «кольцо уплотнительное – корпус средний (втулка)», «кольцо уплотнительное – диск уплотнения компрессора».

Из диаграммы повторяемости дефектов основных деталей подшипникового узла и узла газо-масляных уплотнений (рис. 5.4) видно, что суммарная повторяемость дефектов деталей узла газо-масляных уплотнений примерно в 1,3 раза выше, чем у подшипникового узла.

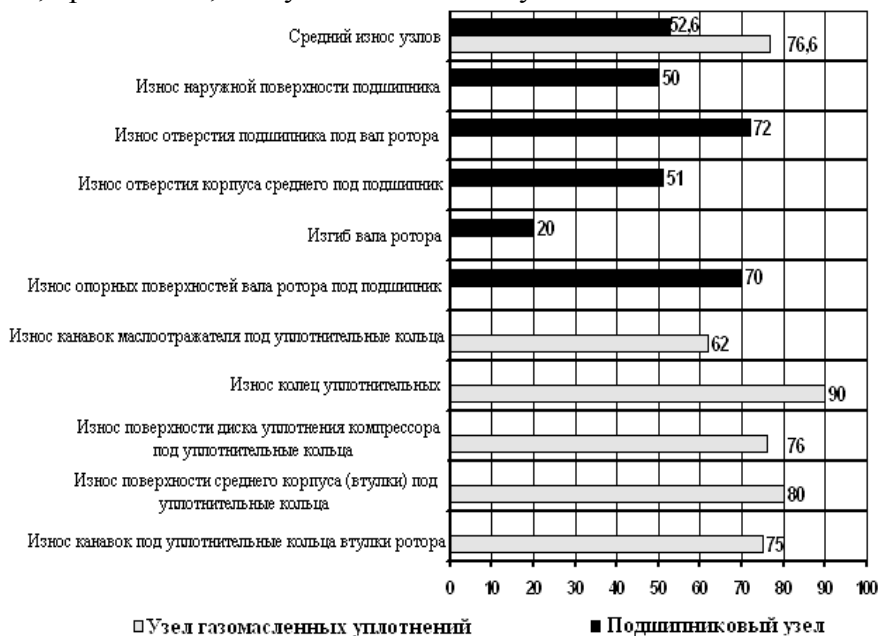


Рисунок 5.4 – Диаграмма повторяемости дефектов основных деталей подшипникового узла и узла газо-масляных уплотнений

Механизм изнашивания деталей узла уплотнения ТКР со стороны турбины можно представить в следующем виде. Высокая скорость вращения вала в бронзовом подшипнике приводит к некоторому перемещению его в осевом направлении, что одновременно с попаданием мелких абразивных частиц, находящихся в смазке, в область сопряжения втулки корпуса среднего с наружной поверхностью уплотнительного кольца влечет за собой постепенный износ сопрягаемых поверхностей. С обратной стороны высокая температура совместно с воздействием абразивных частиц, врезающихся под действием высокого давления отработавших газов, в детали узла уплотнения также оказывает отрицательное влияние на износ сопрягаемых поверхностей.

Увеличение зазора в уплотнении приводит к выбросу масла из корпуса подшипника в проточные части турбины и компрессора. Отложения, возникающие в результате сгорания этого масла на колесах компрессора и турбины, приводят к значительному дисбалансу ротора, который вызывает резкий рост радиального зазора как узла уплотнения так и подшипникового узла. После чего использование ТРК не целесообразно.

Одновременно с этим узел уплотнения является одним из наиболее ответственных элементов ТКР. От надежности его работы зависит целый ряд эксплуатационных показателей агрегата (рис. 5.5).

Неисправность работы узла уплотнения в первую очередь влияет на работу самого ТКР. Масло, просочившееся через уплотнение, оседает в виде нагара на колесе турбины, что влечет за собой дисбаланс ротора и появление автоколебаний. В связи с этим резко снижается частота вращения ротора турбины и удельная мощность двигателя.

Экономичность и экологичность агрегата снабженного ТКР также во многом зависит от надежной работы узла уплотнения.

Во-первых, это связано с перерасходом топлива в связи с нехваткой воздуха подаваемым под избыточным давлением в камеру сгорания дизеля, что также является причиной превышения ПДК выхлопных газов и следовательно влияет на экологичность агрегата.

Во-вторых, утечка масла через неисправный узел уплотнения, которая зачастую исчисляется литрами за смену, в равной степени влияет как на экономические, так и на экологические показатели работы техники.

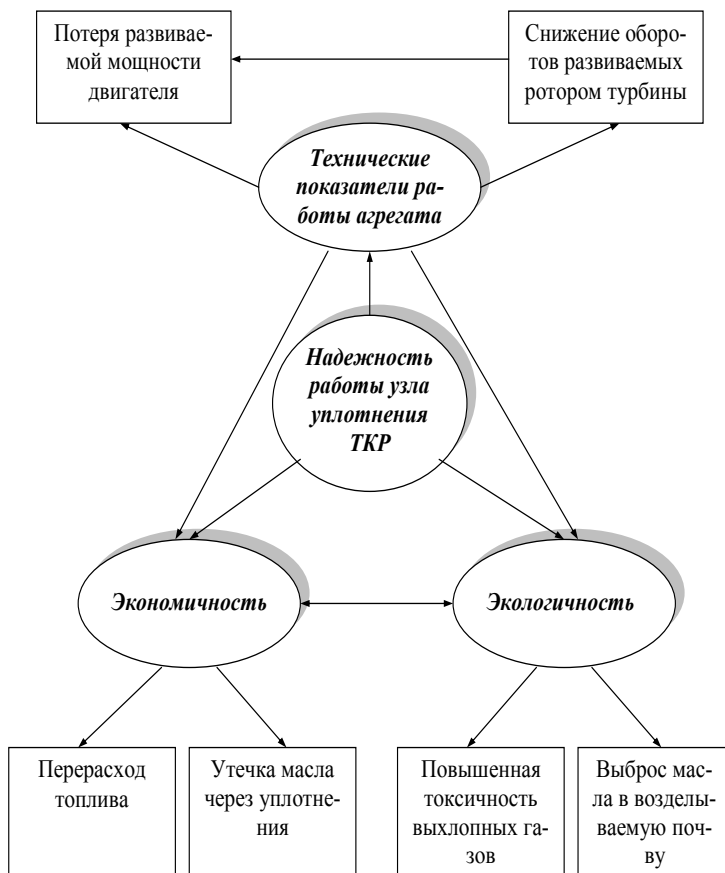


Рисунок 5.5 – Влияние надежности узла уплотнения ТКР на эксплуатационные показатели работы агрегата



Одной из деталей узла газо-маслянных уплотнений, имеющей высокий процент выхода из строя (см. рисунок 5.4), является втулка корпуса среднего. Вместе с тем, также стоит отметить, что ремонт данной втулки представляет собой трудоёмкий многофункциональный процесс.



Рисунок 5.6 – Фрагмент втулки корпуса среднего после работы 1600 мото-часов

Отверстия втулки под уплотнительные кольца среднего корпуса изнашиваются не по всей длине, а лишь в местах перемещения уплотнительных колец в продольном направлении. Глубина износа в среднем составляет 70 – 130 мкм. Износ поверхностей под уплотнительные кольца втулки среднего корпуса больше, чем у диска уплотнения, это связано с большими амплитудами вибрации ротора со стороны более тяжелого колеса турбины и, вероятно со снижением твердости втулки (в среднем корпусе) из-за многократного нагрева, во время длительной работы двигателя до температуры отпуска стали.

Разработка эффективного способа ремонта втулки корпуса среднего турбокомпрессора, позволяющего повысить ресурс и снизить трудоёмкость ремонта втулки, явля-

ется актуальной задачей, решение которой отчасти позволит повысить ресурс турбокомпрессоров и двигателя в целом.

#### **5.4 Разработка технологического процесса ремонта втулки корпуса среднего турбокомпрессора с применением объемного электромеханического дорнования**

Технологические процессы проектируются в соответствии с требованиями стандартов ЕСКД и ЕСТД, а также с учетом дополнений, разъяснений и ограничений, изложенных в руководящих технических материалах и отраслевых стандартах.

При проектировании технологических процессов ремонта изделия разрабатывают соответствующую документацию: маршрутные карты (МК), карты эскизов (КЭ), операционные карты (ОК), карты технологических процессов (КТП), карты типовых технологических процессов (КТТП) и ведомости оснастки (ВО).

Исходные данные для проектирования технологического процесса ремонта турбокомпрессоров следующие:

1. Сведения о дефектах и предполагаемой программе восстановления деталей.

2. Организационная форма восстановления деталей.

При разработке технологического процесса должны учитываться возможности ремонтных предприятий и их техническое оснащение.

3. Выбор рационального способа устранения дефекта.

Экспериментальные исследования показали, что наиболее приемлемым способом получения тонкостенной стальной втулки с высокими физико-механическими свойствами и установка ее с натягом в корпус средней турбокомпрессора является электромеханическое дорнование.

4. План выполнения всех операций, предусмотренных маршрутом.

### **Проектирование маршрута обработки**

При использовании настоящего технологического процесса допускается замена в нем оборудования и оснастки другим оборудованием и оснасткой, обеспечивающими заданные параметры обработки и измерения элементов (поверхностей). На основе проведенных исследований разработан технологический процесс ремонта турбокомпрессоров с использованием ЭМД применительно к ремонту втулки корпуса среднего. Маршрут данного технологического процесса приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2

Маршрут технологического процесса ремонта турбокомпрессора ТКР – 11Н – 1

№ оп.	Наименование и содержание операций	Оборудование	Приспособление и инструмент
1	2	3	4
<b>005</b>	<b>Слесарная</b> 1. Разобрать турбокомпрессор согласно техническим требованиям на капитальный ремонт (ТК)*.		Верстак ОПГ 1468-01-060А; тиски слесарные ГОСТ 5698-51; набор гаечных ключей.
<b>010</b>	<b>Моечная</b> 1. Промыть детали турбокомпрессора в растворе моющего средства «Лабомид-203» концентрации 20 г/л при температуре 80...90°С. 2. Для очистки от нагара, лаковых и смолистых отложений, промыть детали в расплаве солей при температуре 400°С.	Моечная машина ОМ-5299; машина для очистки в растворе солей ОМ-4944.	Контейнер цеховой, моющее средство «Лабомид-203», расплав солей.

1	2	3	4
015	<p><b>Дефектовочная*</b></p> <p>Дефектовать детали турбокомпрессора согласно техническим требованиям на капитальный ремонт (КР):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. При наличии трещин и обломов лопаток колеса турбины вал заменить.</li> <li>2. Проверить вал ротора на изгиб (при величине биения более допустимой ТК вал заменить).</li> <li>3. Определить износ канавок под уплотнительные кольца (при ширине канавки более допустимой ТК втулку уплотнения заменить – выполнить операции 020, 025, 030, 035).</li> <li>4. Определить износ опорных поверхностей вала ротора под подшипник.</li> <li>5. Определить износ диаметра отверстия подшипника под вал ротора (при износе более 210 мкм подшипник заменить).</li> <li>6. Определить износ торцовых поверхностей подшипника (при износе более 210 мкм подшипник заменить).</li> <li>7. Определить износ подшипника под фиксатор (при износе более 210 мкм подшипник заменить).</li> </ol>		<p>Прибор для проверки деталей на биение в центрах ПБ-250; калибр специальный ПР, НЕ (1,8-1,92мм); микрометр рычажный 0-25 с точностью 0,002мм МР02020 ГОСТ 4381-87; нутромер с точностью 0,002мм 10-18мм ГОСТ 9244-75; микрометр рычажный с точностью 0,002мм 50-75мм МР-02020 ГОСТ 4381-87; микрометр рычажный с точностью 0,002мм 25-50мм МР-02020 ГОСТ 4381-87.</p>

Продолжение таблицы 5.2

1	2	3	4
	<p>8. Определить износ отверстия среднего корпуса под подшипник.</p> <p>9. Определить износ отверстия втулки среднего корпуса под уплотнительные кольца (при наличие следов износа втулку заменить – выполнить операции 040, 045).</p> <p>10. Определить износ поверхности фиксатора сопрягаемой с подшипником (при износе более 200 мкм - деталь браковать).</p> <p>11. Определить износ отверстия диска уплотнения компрессора под уплотнительное кольцо (при износе более 200 мкм - деталь браковать).</p> <p>12. Определить износ наружной и торцевых поверхностей уплотнительных колец (при износе более 200 мкм уплотнительные кольца заменить).</p>		
<b>020</b>	<p><b>Штамповочная</b></p> <p>1. Спрессовать втулку уплотнения с вала ротора турбокомпрессора.</p>	Пресс гидравлический 1671М.	Оправка специальная.

Продолжение таблицы 5.2

1	2	3	4
025	<p><b>Штамповочная</b></p> <p>1. Напрессовать заготовку втулки уплотнения на вал ротора до упора в торец колеса турбины.</p>	Пресс гидравлический 1671М.	Оправка специальная.
030	<p><b>Токарная</b></p> <p>1. Точить наружную поверхность втулки уплотнения до номинального размера.</p> <p>2. Точить канавку под уплотнительное кольцо до номинального размера.</p> <p>3. Точить вторую канавку под уплотнительное кольцо до номинального размера.</p>	Токарно-винторезный станок 1К62	Трехкулачковый патрон; центр вращающийся; резец проходной упорный правый; резец канавочный.
035	<p><b>Балансировочная</b></p> <p>1. Балансировать вал ротора с колесом турбины в двух плоскостях колеса турбины до величины, указанной в технических требованиях на капитальный ремонт.</p>	Станок балансировочный ДБ – 50А; машина шлифовальная.	Круг шлифовальный.
040	<p><b>Штамповочная</b></p> <p>1. Выпрессовать втулку из корпуса среднего турбокомпрессора.</p>	Пресс гидравлический 1671М.	Оправка специальная.

Продолжение таблицы 5.2

1	2	3	4
<b>045</b>	<p><b>Электромеханическая</b></p> <p>1. Установить втулку изготовленную из стали 40Х, с внутренним диаметром <math>30^{+0,052}</math> мм и наружным <math>34,5_{-0,39}</math>, в отверстие корпуса среднего.</p> <p>2. Обработать отверстие втулки ОЭМД с режимами: сила тока <math>I = 5000A</math>; скорость ОЭМД <math>v = \text{мм/мин}</math>; абсолютный натяг <math>i = 0,4\text{мм}</math>.</p>	Вертикально-фрезерный станок 6В11; инструмент для ОЭМД; УЭМО – 6М.	Фиксаторы специальные.
<b>050</b>	<p><b>Слесарная</b></p> <p>1. Собрать вал ротора с маслоотражателем, колесом компрессора и гайкой специальной, специальную гайку затянуть крутящим моментом согласно ТК.</p>		Верстак ОРГ 1468-01-060А; тиски слесарные ГОСТ 5698-51; набор гаечных ключей.
<b>055</b>	<p><b>Балансировочная</b></p> <p>1. Балансировать вал ротора в сборе с маслоотражателем, колесом компрессора и гайкой специальной в двух плоскостях колеса компрессора до величины, указанной в технических требованиях на капитальный ремонт.</p>	Станок балансировочный ДБ-50А; машина шлифовальная.	Круг шлифовальный.
<b>060</b>	<p><b>Слесарная</b></p> <p>1. Собрать турбокомпрессор согласно техническим требованиям на капитальный ремонт.</p>		Верстак ОРГ 1468-01-060А; тиски слесарные ГОСТ 5698-51; набор гаечных ключей.

1	2	3	4
<b>065</b>	<b>Контрольная</b> 1. Обкатать и испытать турбокомпрессор на обкаточном стенде согласно техническим требованиям на капитальный ремонт.	Стенд для обкатки и испытания турбокомпрессоров.	Набор гаечных ключей.

Примечание\* - для турбокомпрессоров ТКР-11Н-1, ТКР-11Н-2, ТКР-11Н-10, ТКР-11С-1, ТКР-11Н-3 «Турбокомпрессоры тракторных и комбайновых дизелей. Технические требования на капитальный ремонт ТК 10-05.0001.003-86».

Применение ОЭМД в технологическом процессе ремонта втулки корпуса среднего турбокомпрессора позволяет уменьшить количество используемого при ремонте специального оборудования и сократить время ремонта.

Отремонтированные турбокомпрессоры с установленными втулками по предложенной технологии, эксплуатируются в хозяйствах Ульяновской области. Результаты эксплуатации показывают, что их средний ресурс не ниже ресурса серийных агрегатов.

### **5.5 Стендовые испытания турбокомпрессоров, с втулками установленными объемным электромеханическим дорнованием**

После изготовления или ремонта все турбокомпрессоры подвергаются обкатке и испытанию на контрольном режиме, на основании результатов которого дается заключение о качестве изготовления или ремонта.

Обкатка и испытание турбокомпрессоров производится на специализированных стендах. Эти же стенды используются для испытания турбокомпрессоров на надежность. Классификация стендов для испытания турбокомпрессоров и их элементов на надежность показана на рисунке 5.7. Для испытания турбокомпрессоров применяются стенды, созданные на основе дизельных двигателей (моторные) и безмоторные.



Моторный стенд представляет собой дизельный двигатель с установленным испытываемым турбокомпрессором; при этом режимы испытания ТКР задаются работой дизеля.

Данные по износостойкости деталей ТКР будут максимально приближены к реальным условиям эксплуатации. Для обкатки и испытания турбокомпрессоров, отремонтированных с применением способа электромеханического дорнования, был применен моторный стенд на базе двигателя СМД – 62. Согласно техническим требованиям на капитальный ремонт испытательный стенд должен обеспечить регулирование и поддержание температуры масла в пределах 65-95°С. Кроме того, стенд должен иметь приборы и оборудование, необходимые для измерения параметров с заданной погрешностью измерения (таблица 5.3).

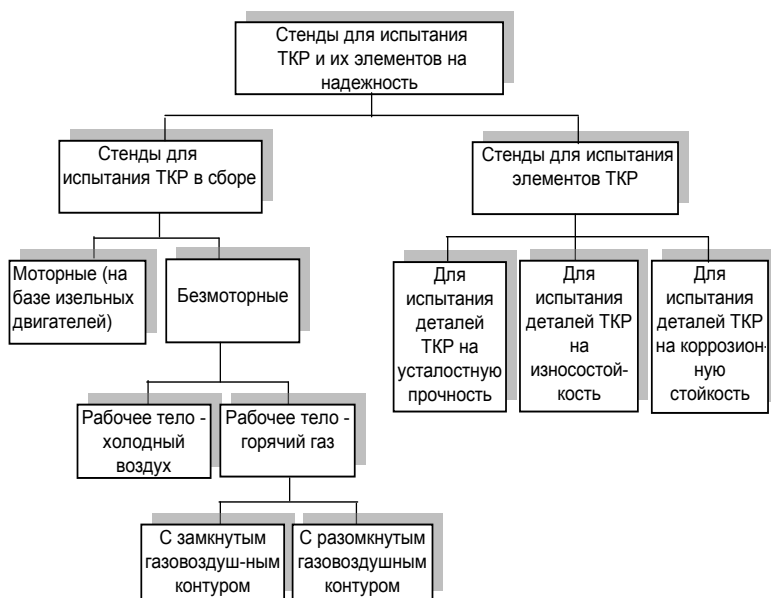


Рисунок 5.7 – Классификация стендов для испытания турбокомпрессоров и их элементов на надежность

Измерение числа оборотов ротора производили с помощью индукционного датчика. Датчик устанавливается в патрубке вставки компрессора напротив граней гайки компрессора, число импульсов от датчика регистрировалось электронносчетным частотомером ЧЗ – 33.

Перед испытанием партии отремонтированных турбокомпрессоров проверяется техническое состояние стенда. Для этого на стенд устанавливается эталонный турбокомпрессор и проходит обкатку по программе испытаний. При этом фиксируются значения всех контролируемых параметров.

Таблица 5.3

Погрешности измеряемых на стенде параметров при обкатке и испытании турбокомпрессоров

Параметр	Погрешности измерения
Частота вращения ротора	$\pm 1,0\%$
Температура газов перед турбиной	$\pm 10^{\circ}\text{C}$
Давление газов перед турбиной	$\pm 0,01 \text{ кгс/см}^2$
Давление воздуха на выходе из компрессора	$\pm 0,01 \text{ кгс/см}^2$
Давление масла на входе в турбокомпрессор	$\pm 0,25 \text{ кгс/см}^2$
Температура масла входе в турбокомпрессор и на выходе из него	$\pm 5^{\circ}\text{C}$
Расход воздуха через компрессор (только для настройки стенда)	$\pm 0,01 \text{ кг/с}$
Барометрическое давление	$\pm 0,13 \text{ кПа}$
Температура воздуха на входе в компрессор и в турбину	$\pm 1^{\circ}\text{C}$

В процессе обкатки на первом режиме проверяются течь масла и утечка газе через неплотности. При испытании параметры турбокомпрессора должны соответствовать данным, указанным в таблице 5.4.

Работа на контрольном режиме служит основанием для приемки турбокомпрессора. При этом он должен удовлетворять следующим требованиям:

- герметичность всех соединений и корпусных деталей;
- отсутствие при работе посторонних шумов и звуков;
- равномерность работы и стабильность параметров;
- отсутствие задевания ротора за неподвижные детали.

Таблица 5.4

Режимы обкатки при приемосдаточных испытаниях турбокомпрессоров ТКР-11Н-1

Частота вращения ротора, об/мин	Степень повышения давления компрессора, не менее	Избыточное давление рабочего тела на входе в турбину, кгс/см <sup>2</sup> , не более	Температура рабочего тела на входе в турбину, °С	Давление масла в турбокомпрессоре, кгс/см <sup>2</sup>	Продолжительность испытаний, мин
20000 – 25000	-	-	-	3 ... 4	2
35000±350	-	-	400±25	3 ... 4	3
40000±400	-	-	550±25	3 ... 4	4
45000±450	-	-	600±25	3 ... 4	4
Контрольная точка					
45000±450	1,53 ... 1,57	0,52 ... 0,56	600±10	3 ... 4	5

## 5.6 Методика и результаты эксплуатационных испытаний отремонтированных турбокомпрессоров

Отремонтированные турбокомпрессоры соответствующие техническим условиям на капитально отремонти-

рованные изделия, будут передаваться в рядовую эксплуатацию.

Количество испытуемых объектов принято из условия, что относительная ошибка не превышает 0,2, при доверительной вероятности 0,95 и коэффициенте вариации 0,4. Тогда наименьшее количество объектов испытаний при плане  $[N, U, r]$ , согласно РД 50-690-89 равно 15.

В процессе оптимизации технологии ремонта деталей турбокомпрессоров, агрегаты устанавливались на отремонтированные двигатели СМД-62 и отправлялись хозяйствам – заказчикам для проведения испытания.

На подконтрольную партию заводится журнал наблюдений, в котором с периодичностью раз в два месяца будут заноситься сведения о техническом состоянии турбокомпрессора и его наработке.

Оценка показателей надежности отремонтированных сборочных единиц будут определяться параметрическим методом по РД 50-690-89 исходя из предположения, что закон распределения ресурса отремонтированных турбокомпрессоров подчиняется закону Вейбула. Параметры распределения Вейбула  $\bar{a}$  и  $\bar{b}$  будут вычисляться в зависимости от той информации, которая будет получена в момент оценки.

Для сравнительной оценки износостойкости втулок установленных в средний корпус турбокомпрессора по существующей технологии и по разработанной технологии п. 5.3 с применением ОЭМД. Турбокомпрессоры с экспериментальными втулками (15 штук) устанавливались на отремонтированные двигатели и отправлялись на эксплуатационные испытания в районы Ульяновской области.

За время проведения эксплуатационных испытаний вышли из строя два турбокомпрессора с ремонтными втулками, установленными в средний корпус турбокомпрессора по существующей технологии. Ресурс их составил соответственно 1705 и 1736 мото-часов. Также после 1814 мото-часов был доставлен на первый ремонт турбокомпрессор с втулкой установленной заводом изготовителем. Данные турбокомпрессоры вышли из строя по причине снижения оборотов ротора турбины, и как следствие потери мощности

двигателя и течи масла через узел уплотнения со стороны турбины. После разборки и дефектовки деталей этих турбокомпрессоров втулки корпуса среднего выбраковывались вследствие износа (рис. 5.8 а, б).

Следует отметить, что значительное влияние на ресурс турбокомпрессоров оказывают условия эксплуатации и соблюдение мероприятий позволяющих продлить срок службы турбокомпрессора.

Для сравнения из турбокомпрессора № 287334 прошедшего эксплуатационные испытания и попавшего в ремонт после 1782 мото-часов по причине выхода из строя двигателя, на который он был монтирован, была извлечена втулка установленная в корпус средней ОЭМД. В результате исследования данной втулки следов износа не обнаружено. Светлая полоса выделяющаяся на рабочей поверхности втулки (рис 5.8 в) является местом прилегания наружной поверхности уплотнительного кольца к данной поверхности.

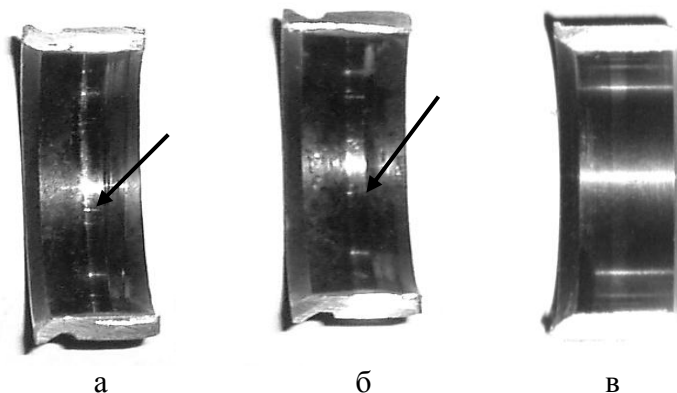


Рисунок 5.8 – Следы износа втулки корпуса среднего турбокомпрессора ТКР-11Н-1 после эксплуатационных испытаний: а – ремонтная втулка установленная в корпус турбокомпрессора по стандартной технологии после 1736 мото-часов; б – втулка нового турбокомпрессора после 1814 мото-часов; в – втулка установленная в корпус турбокомпрессора с натягом объемным электромеханическим дорнованием после 1782 мото-часов

Предварительные результаты эксплуатационных испытаний показали, что втулки, установленные в корпус средний турбокомпрессора ТКР-11Н-1 способом ОЭМД являются устойчивыми к износу в реальных условиях эксплуатации.

### **5.7 Прогнозирование ресурса втулки установленной с натягом в средний корпус турбокомпрессора ТКР-11Н-1 объемным электромеханическим дорнованием**

Основу прогноза ресурса сопряжения составляют результаты, полученные в ходе проведения триботехнических испытаний: приработки и стационарных износных испытаний, а также данные о наработках турбокомпрессоров в доремонтном и межремонтном периоде эксплуатации.

По данным первичной информации [42]: параметры функции распределения наработок ТКР двигателя СМД-62 до капитального ремонта составляет:  $N = 15$ ;  $\bar{t} = 3,14 \cdot 10^3$  м · ч;  $t_{ci} = 320$  м · ч;  $\nu t = 0,42$ ;  $b = 2,56$ ;  $a = 3,175 \cdot 10^3$  м · ч,

$$F t = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t - t_{cm}}{3,14 \cdot 10^3} \right)^{2,56} \right], \quad (5.1)$$

а параметры функции распределения межремонтных наработок  $N = 20$ ;

$\bar{t} = 1,95 \cdot 10^3$  м · ч;  $t_{ci} = 230$  м · ч;  $\nu t = 0,48$ ;  $b = 2,2$ ;  $a = 1,941 \cdot 10^3$  м · ч,

$$F t = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{t - t_{cm}}{1,941 \cdot 10^3} \right)^{2,2} \right]. \quad (5.2)$$

Расчетные значения параметров распределения ресурса сопряжения «втулка корпуса среднего – кольцо уплотнительное» в доремонтном и межремонтном периодах вносим в таблицу 5.5.

Как правило, после доремонтной эксплуатации, практически все втулки и уплотнительные кольца подлежат замене. Следовательно, с некоторой ошибкой, величина которой из-за отсутствия достаточной информации практически невозможно оценить, параметры распределения наработок сопряжения «втулка корпуса среднего – кольцо уплотнительное», равны параметрам распределения наработок ТКР.

Такое же заключение можно сделать и по отношению к отремонтированным ТКР.

Таблица 5.5

Параметры функций распределения ресурса сопряжения «втулка корпуса среднего – кольцо уплотнительное» в доремонтном  $F_d(t)$  и в межремонтном  $F_{mp}(t)$  периодах

Параметры	Доремонтные	Межремонтные
$\bar{t}$ , м·ч	3140	1950
$t_{cm}$ , м·ч	320	230
$\nu t$	0,42	0,48
a	3175	1941
b	2,56	2,2

По результатам триботехнических испытаний (п. 4.6) проводим формирование вариационных рядов интенсивностей изнашивания и износостойкости стандартных и пар трения с применением ОЭМД (модельных) и определяем параметры функции распределения интенсивностей изнашивания сопряжения «втулка корпуса среднего – кольцо уплотнительное».

По данным стационарных износных испытаний пар трения:

1. Базовых

$$I_{\Sigma,c} \cdot 10^{-11}: 13,54; 10,18; 6,80; 8,73; 12,08; 9,34,$$

$$\varepsilon_{\Sigma} \cdot 10^{11}: 0,074; 0,098; 0,147; 0,115; 0,083; 0,107.$$

## 2. Обработанных способом ОЭМД

$$I_{\Sigma,o} \cdot 10^{-11} : 6,18; 2,34; 4,71; 4,26; 3,83; 7,13,$$

$$\varepsilon_{\Sigma} \cdot 10^{11} : 0,162; 0,427; 0,212; 0,235; 0,261; 0,140.$$

оцениваем параметры функций распределения износостойкости стандартных  $F_B(\varepsilon)$  и обработанных ОЭМД  $F_o(\varepsilon)$  пар:

Базовые пары трения:  $N = 6$ ;  $\bar{\varepsilon} = 0,104 \cdot 10^{11}$ ;  
 $\nu \varepsilon \approx 0,56$ ;  $b = 1,83$ ;  $a = 0,127 \cdot 10^{11}$

$$F_B = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\varepsilon}{0,127 \cdot 10^{11}} \right)^{1,83} \right]. \quad (5.3)$$

Обработанные способом ОЭМД пары трения:  $N = 6$ ;  
 $\bar{\varepsilon} = 0,240 \cdot 10^{11}$ ;  $\nu \varepsilon \approx 0,43$ ;  $b \approx 2,21$ ;  $a = 0,281 \cdot 10^{11}$

$$F_o = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\varepsilon}{0,281 \cdot 10^{11}} \right)^{2,21} \right]; \quad (5.4)$$

Расчетные значения параметров распределения интенсивностей изнашивания сопряжения «штулка корпуса среднего – кольцо уплотнительное» вносим в таблицу 5.6.

Таблица 5.6

Параметры функций распределения износостойкости базовых  $F_B(\varepsilon)$  и обработанных ОЭМД сопряжений  $F_o(\varepsilon)$  «штулка корпуса среднего – кольцо уплотнительное»

Параметры	Базового	Обработанного
$\bar{\varepsilon}$	$0,104 \cdot 10^{11}$	$0,240 \cdot 10^{11}$
$\nu \varepsilon$	0,56	0,43
$a_j$	$0,127 \cdot 10^{11}$	$0,281 \cdot 10^{11}$
$b_j$	1,83	2,21

По статистическим данным о ресурсах турбокомпрессора в доремонтном и межремонтных периодах экс-



плуатации и износостойкости сопряжения «втулка корпуса среднего – кольцо уплотнительное», с использованием формул (5.1 – 5.4), составлена таблица 5.7. В таблице 5.7 символами  $F(t)$  и  $F(\varepsilon)$  обозначены функции распределения наработок и износостойкости соответственно.

Таблица 5.7

F(t) F(ε)	Ресурсы, м·ч		Износостойкость, $\times 10^{11}$	
	Нового турбокомпрессора	Отремонтированного турбокомпрессора	Базового сопряжения	Обработанного ОЭМД сопряжения
0,005	846,0	314,0	0,0068	0,023
0,01	1315,0	470,0	0,0082	0,0272
0,05	1638,0	735,0	0,0277	0,0720
0,10	1948,0	931,0	0,059	0,161
0,20	2197,0	1216,0	0,070	0,185
0,30	2342,0	1450,0	0,080	0,211
0,40	2762,0	1667,0	0,090	0,236
0,50	3271,0	1880,0	0,130	0,267
0,60	3588,0	2104,0	0,162	0,284
0,70	3833,0	2351,0	0,195	0,308
0,80	4143,0	2650,0	0,223	0,343
0,90	4717,0	3078,0	0,258	0,390
0,95	5193,0	3440,0	0,290	0,437
0,99	6085,0	4134,0	0,337	0,5059

Методически прогноз ресурса сопряжения «втулка корпуса среднего – кольцо уплотнительное», где рабочая поверхность втулки обработана ОЭМД, проводится следующим образом.

Так, например, ресурс нового сопряжения с износостойкостью  $0,09 \cdot 10^{11}$  в составе нового турбокомпрессора составляет  $\sim 2800$  м·ч. При этой наработке  $\sim 40\%$  турбокомпрессоров снимается с эксплуатации. У сопряжения, втулка которого обработана ОЭМД, при этой наработке вероятность отказа составляет  $\sim 0,075$ . Следовательно, можно

предположить, что сдвиг распределения составляет  $\sim 850$  м·ч, т.е. по критерию начала отказа ресурс сопряжения с обработанной ОЭМД втулкой в  $850:320 = 2,66$  раза больше.

Ресурс исследуемого сопряжения с износостойкостью  $0,3 \cdot 10^{11}$  в доремонтном периоде эксплуатации составляет  $\sim 5200$  м·ч. При этой наработке  $\sim 0,985\%$  турбокомпрессоров снимается с эксплуатации. У сопряжения, втулка которого обработана ОЭМД, при этой наработке вероятность отказа составляет  $\sim 0,70$ . Следовательно, можно предположить, что вероятность отказа сопряжения, втулка которого обработана ОЭМД за эту наработку в 1,4 раза меньше.

Фактически значение среднего ресурса сопряжения «втулка корпуса среднего – кольцо уплотнительное» после ремонта с применением ОЭМД может быть установлено путем наблюдения за эксплуатацией отремонтированных турбокомпрессоров в рядовых условиях.

По предварительным подсчетам после наработки 1700 – 2000 м·ч отказов отремонтированных с применением ОЭМД по причине выхода из строя сопряжения «втулка корпуса среднего – кольцо уплотнительное» не наблюдается.

Таким образом, из проведенных расчетов следует, что ресурс сопряжения «втулка корпуса среднего – кольцо уплотнительное» при установки данной втулки с применением ОЭМД повышается на 23% также в 1,4 раза уменьшается вероятность отказа по сравнению с подобным сопряжением нового турбокомпрессора.

## **5.8 Экономическая эффективность применения технологии объемного электромеханического дорнования тонкостенных стальных втулок**

Расчёт экономического эффекта от внедрения технологии ремонта сборочной единицы с применением ОЭМД проводится на основании сравнения предлагаемой и существующей технологии в соответствии с положениями методических указаний по комплексной оценке эффективности мероприятий научно-технического прогресса.

Рассмотрим подробнее существующую и предлагаемую нами технологии ремонта втулки корпуса среднего турбокомпрессора ТКР-11Н-1 (рис.5.9).

Существующая технология включает в себя изготовление втулки из стали 40Х, 45Х. Последующая операция является объёмная закалка корпуса втулки до рекомендуемой твердости 39-45 HRC. Окончательным этапом в ремонте втулки корпуса среднего является растачивание отверстия запрессованной в него втулки. Эта операция необходима в целях ликвидации неровностей и отклонения профиля, которые могут иметь место после объёмной закалки и смещение оси симметрии в процессе запрессовки. Точность после растачивания должна соответствовать JT 9, а шероховатость поверхности не должна превышать  $R_a$  1,25 мкм.



Рисунок 5.9 – Последовательность операций используемых при ремонте втулки корпуса среднего турбокомпрессора по существующей и предлагаемой технологиям

Предлагаемый нами способ позволяет сократить количество операций и улучшить физико-механические свойства и шероховатость.

Включает в себя:

- изготовление втулки из материала сталь 40Х (45);
- установка втулки с переходной посадкой в отверстие корпуса среднего;
- объемное электромеханическое дорнование отверстия втулки с режимами:

$$I = 5000A; v = 66 \text{ мм/мин}; i = 0,4\text{мм.}$$

Расчет экономической эффективности производится на основе сравнения себестоимости ремонта 1см<sup>2</sup> втулки по существующей (таблица 5.8) и предлагаемой (таблица 5.9) технологии ремонта.

Таблица 5.8

Экономический расчет себестоимости ремонта втулки корпуса среднего турбокомпрессора ТКР-11Н-1 по существующей технологии

№ п\п	Характеристика	Значение характеристики для рабочих мест			
		№1	№2	№3	№4
1	2	3	4	5	6
1	Функции	<i>Изготовление втулки</i>	<i>Объемная за-калка втулки</i>	<i>Запрессовка втулки в корпус</i>	<i>Расточка отверстий запрессованной втулки в размер</i>
2	Оборудование	<i>Токарно-винторезный станок 1К62</i>	<i>Печь муфельная</i>	<i>Пресс гидравлический 1671М</i>	<i>Вертикально-расточной станок 2А78</i>
3	Потребляемая мощность N, кВт	12	18	2,2	3

Продолжение таблицы 5.8

1	2	3	4	5	6
4	Производительность П, см/мин	4,7	0,63	70	2,8
5	Стоимость оборудования С, руб.	3000000	240000	30000	80000
6	Срок эксплуатации Р, лет	20	10	20	20
7	Стоимость э/энергии Э, руб/кВт час	2,2	2,2	2,2	2,2
8	Стоимость 1кг расходных материалов С <sub>м</sub> , руб.	120(токарные резцы) 80 (Сталь 40Х)	—	—	120 (резцы)
9	Удельный расход расходных материалов g, г/см	0,05(резцы) 2-3 (Сталь40Х)	—	—	0,05
10	Коэффициент использования рабочего времени, к	0,8	0,6	0,2	0,8

Продолжение таблицы 5.8

1	2	3	4	5	6
11	Месячная заработная плата обслуживающего персонала (с налогами) М, руб.	7000	7000	7000	7000
12	Затраты на электроэнергию Зээ, руб./см <sup>2</sup>	$Z_{ээ} = Э \times N / 60 \times \Pi$			
		$5,1 \times 12 / (60 \times 4,7) = 0,09$	$5,1 \times 18 / (60 \times 0,63) = 1,04$	$5,1 \times 2,2 / (60 \times 70) = 0,001$	$5,1 \times 3 / (60 \times 3) = 0,03$
13	Затраты на расходные материалы Змат, руб./см <sup>2</sup>	$Z_{мат} = C_m \times g$			
		$(120 \cdot 0,001 \cdot 0,05) + (80 \cdot 0,001 \cdot 2,5) = 0,21$	—	—	$130 \cdot 0,001 \cdot 0,005 = 0,006$
14	Затраты на заработную плату Зопл, руб/см <sup>2</sup>	$Z_{опл} = M \times (20 \times 8 \times 60 \times k \times \Pi) = M / 9600 \times k \times \Pi$			
		$7000 / 9600 \times 0,8 \times 4,7 = 0,19$	$7000 / 9600 \times 0,6 \times 0,63 = 1,93$	$7000 / 9600 \times 0,2 \times 70 = 0,05$	$7000 / 9600 \times 0,8 \times 2,8 = 0,32$
15	Затраты на амортизацию оборудования Ам, руб.	$A_m = C / (10 \times 12 \times 20 \times 8 \times 60 \times \Pi) = C / 1152000 \times \Pi$			
		$300000 / (1152000 \times 4,7) = 0,06$	$240000 / (1152000 \times 0,63) = 0,33$	$30000 / (1152000 \times 70) = 0,0004$	$80000 / (1152000 \times 2,8) = 0,02$

Продолжение таблицы 5.8

1	2	3	4	5	6
16	Себестоимость по видам обработки руб./см <sup>2</sup>	$C = 3_{\text{ээ}} + 3_{\text{мат}} + 3_{\text{опл}} + A_{\text{м}}$			
		0,55	3,3	0,05	0,38
17	Себестоимость обработки поверхности площадью 1см <sup>2</sup> , руб.	$0,55 + 3,3 + 0,05 + 0,38 = 4,28$			
18	Себестоимость ремонта на программу 1000 штук ,руб.	$S_n = \pi \times (D^2 - d^2) / 2 + \pi \times h \times (D + d) = 27,6$			
		$27,6 \times 4,28 \times 1000 = 118128$			

Таблица 5.9

Экономический расчет себестоимости ремонта втулки корпуса среднего турбокомпрессора ТКР-11Н-1 по предлагаемой технологии

№ п\п	Характеристика	Значение характеристики для рабочих мест	
		№1	№2
1	2	3	4
1	Функции	<i>Изготовление втулки</i>	<i>Установка втулки в корпус способом ОЭМД</i>

Продолжение таблицы 5.9

1	2	3	4
2	Оборудование	<i>Токарно-винторезный станок 1К62</i>	<i>Вертикально-фрезерный станок, установка ЭМО</i>
3	Потребляемая мощность N, кВт	<i>12</i>	<i>40</i>
4	Производительность П, см/мин	<i>4,7</i>	<i>6,3</i>
5	Стоимость оборудования С, руб.	<i>3000000</i>	<i>180000</i>
6	Срок эксплуатации Р, лет	<i>20</i>	<i>15</i>
7	Стоимость э/энергии Э, руб./кВт час	<i>5,1</i>	<i>5,1</i>
8	Стоимость 1кг расходных материалов См, руб.	<i>120 (токарные резцы) 80 (Сталь 40Х)</i>	—
9	Удельный расход расходных материалов г, г/см	<i>0,05(резцы) 2-3 (Сталь)</i>	—
10	Коэффициент использования рабочего времени, к	<i>0,8</i>	<i>0,4</i>



Продолжение таблицы 5.9

1	2	3	4
8	Стоимость 1кг расход- ных материа- лов См, руб.	120(ток. резцы) 80 (Сталь 40X)	—
9	Удельный расход рас- ходных мате- риалов g, г/см	0,05( резцы) 2-3 (Сталь)	—
10	Коэффициент использова- ния рабочего времени, k	0,8	0,4
11	Месячная за- работная пла- та обслужи- вающего пер- сонала (с на- логами) М, руб.	7000	7000
12	Затраты на электроэнер- гию $Z_{ээ}$ , руб./см <sup>2</sup>	$Z_{ээ} = Э \times N / 60 \times П$	
		$5,1 \times 12160 \times 4,7 = 0,09$	$5,1 \times 40 / (60 \times 6,3) = 0,23$
13	Затраты на расходные материалы $Z_{мат.}$ , руб./см <sup>2</sup>	$Z_{мат} = C_m \times g$	
		$(120 \times 0,001 \times 005) + (80 \times 0,001 \times 2,5) = 0,21$	—

Продолжение таблицы 5.9

1	2	3	4
14	Затраты на заработную плату Зопл, руб/см <sup>2</sup>	$Зопл = M \times (20 \times 8 \times 60 \times k \times \Pi) = M / 9600 \times k \times \Pi$	
		$7000 / 9600 \times 0,4 \times 4,7 = 0,19$	$7000 / 9600 \times 0,4 \times 6,3 = 0,29$
15	Затраты на амортизацию оборудования Ам, руб.	$Ам = C / (10 \times 12 \times 20 \times 8 \times 60 \times \Pi) = C / 1152000 \times \Pi$	
		$300000 / (1152000 \times 4,7) = 0,06$	$180000 / (1152000 \times 6,3) = 0,02$
16	Себестоимость по видам обработки руб/см <sup>2</sup>	$C = Зэ + З_{мат} + Зопл + Ам$	
		$0,09 + 0,21 + 0,19 + 0,06 = 0,55$	$0,23 + 0,29 + 0,02 = 0,54$
17	Себестоимость обработки поверхности площадью 1см <sup>2</sup> , руб.	$0,55 + 0,54 = 1,09$	
18	Себестоимость ремонта на программу 1000 штук Ср, руб.	$S_n = \pi \times (D^2 - d^2) / 2 + \pi \times h \times (D + d) = 27,6$	
		$27,6 \times 1,09 \times 1000 = 30084$	

Основная особенность этого расчета заключается в том, что он может быть применен для определения себестоимости ремонта втулок различных размеров.

Учитывая размеры ремонтируемой втулки, экономическая эффективность по сравнению с существующей техно-

логией на программу 1000 ремонтов составит 88044 рубля. Это показывает, что затраты на ремонт по предлагаемой технологии с применением электромеханического дорнования, в 3,9 раза меньше, чем по существующей технологии.

## **5.9 Выводы**

1. Проведенный анализ условий эксплуатации турбокомпрессора ТКР–11Н–1 выявил, что втулка корпуса среднего турбокомпрессора имеет высокий процент выхода из строя по причине изнашивания, вследствие чего нарушается герметичность узла уплотнения турбокомпрессора, в состав которого входит данная втулка. Также установлено, что имеющаяся технология ремонта втулки корпуса среднего турбокомпрессора ТКР–11Н–1 представляет собой трудоемкий многооперационный процесс.

2. Разработана технология ремонта турбокомпрессора ТКР – 11Н – 1 с применением ОЭМД на стадии замены втулки корпуса среднего.

3. За время проведения эксплуатационных испытаний турбокомпрессоров с экспериментальными втулками, установленными в корпус средний ОЭМД, отказов по причине износа исследуемых втулок не зафиксировано.

4. В результате прогнозирования установлено, что ресурс сопряжения в состав, которого входит втулка, обработанная ОЭМД, увеличился на 23% по сравнению с тем же сопряжением нового турбокомпрессора.

5. Экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии ремонта турбокомпрессора с применением ОЭМД втулки корпуса среднего в сравнении с существующей технологией на программу 1000 ремонтов составит 88044 рубля. Затраты на изготовление и установку втулки в корпус средний турбокомпрессора по предлагаемой технологии с применением ОЭМД, в 3,9 раза меньше, чем по существующей технологии.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Выявлено, что в условиях ремонтного производства отсутствуют эффективные способы отделочно-упрочняющей обработки позволяющие с наименьшими затратами получать высокие физико-механические свойства и микрогеометрию внутренней поверхности тонкостенных стальных втулок.

2. Получены теоретические зависимости для расчета глубины упрочненного поверхностного слоя тонкостенной стальной втулки, обработанной ОЭМД, из которой можно установить влияние силы тока на глубину упрочненного слоя.

3. Произведен расчет пятна контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью в процессе ОЭМД. Полученные зависимости позволяют оптимально подбирать геометрические параметры инструмента, назначить режимы ОЭМД для широкой номенклатуры деталей.

4. Теоретически обосновано и практически подтверждено снижение усилия в процессе ОЭМД тонкостенных стальных втулок в зависимости от увеличения силы тока.

5. Металлографический анализ поверхностей обработанных ОЭМД показал, что упрочненная зона представляет собой белый слой, ниже которого следует исходная структура металла. Твердость упрочненной зоны стали 40X составляет 48...52 HRC, а ШХ15 60...63 HRC. Глубина белого слоя 0,18...0,03 мкм зависит от силы тока, величины натяга и процентного содержания углерода в обрабатываемых сталях.

6. Результаты замеров шероховатости поверхностей тонкостенных стальных втулок, обработанных ОЭМД, после черного растачивания с натягом от 0,3 до 0,5 мм,  $I = 5000A$ ,  $v = 66\text{мм/мин}$  показали, что в зависимости от натяга высота микронеровностей уменьшается в 15...120 раз в сравнении с исходной и составляет 0,54...0,066 мкм.

7. Экспериментальные исследования показали, что при ОЭМД тонкостенных стальных втулок с натягом 0,5 мм

усилие составляем 3380 Н, что в 10 раз меньше, чем усилия, возникающие при механическом дорновании подобной втулки при прочих равных условиях. Установлено, что ОЭМД позволяет получить качественное соединение с натягом по наружному диаметру втулки, усилие выпрессовывания втулки в зависимости от натяга ОЭМД составляет 17200...23700 Н, момент проворачивания 350...640 Н·м.

8. Получены регрессионные зависимости влияния основных технологических режимов ОЭМД на глубину упроченного слоя, шероховатость обработанной поверхности и усилие, возникающее при ОЭМД, которые позволяют прогнозировать качество обрабатываемых втулок и назначать режимы обработки исходя из условий эксплуатации деталей.

9. Испытания на износостойкость показали, что пары трения у которых рабочая поверхность колодок обработана ОЭМД имеют интенсивность изнашивания в 2 раза меньше по сравнению с парами трения, имеющими закаленные колодки и в 3,4 раза меньше чем у пар трения колодки которых обработаны дорнованием.

10. За время проведения эксплуатационных испытаний турбокомпрессоров с экспериментальными втулками, установленными в корпус средний ОЭМД, отказов по причине износа исследуемых втулок не зафиксировано. Ресурс сопряжения в состав, которого входит данная втулка, увеличился на 23% по сравнению с тем же сопряжением нового турбокомпрессора.

11. Экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии ремонта турбокомпрессора с применением ОЭМД втулки корпуса среднего на программу 1000 ремонтов составит 88044 рубля. Затраты на изготовление и установку втулки в корпус средний турбокомпрессора по предлагаемой технологии с применением объемного электромеханического дорнования, в 3,9 раза меньше, чем по существующей технологии.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акименко Ю.А. Исследование процесса дорнования отверстий тонкостенных деталей в обойме: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Брянск, 1975.–21с.

2. Александров Ю.Д. Влияние некоторых параметров на чистоту поверхности при электромеханическом сглаживании.// Исследование и применение процессов электромеханической обработки металлов. Ульяновск, 1970. – Вып. 1 – С.35-40.

3. Александров Ю.Д. Исследование качественных показателей автомобильных деталей, обработанных электромеханическим способом: Автореф. дис... канд. техн. наук.- Ульяновск, 1968. – 21с.

4. Алексеев В.Н. Кувайцев И.Ф. Автотракторные эксплуатационные материалы. - М.: Воениздат, 1979. – 172с.

5. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. – Л.: Машиностроение, 1977, – 184с.

6. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. – 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. – 200с.

7. Аскинази Б.М., Веретенников Н.В. Упрочнение цилиндров двигателей внутреннего сгорания электромеханическим методом.// Исследование и применение процессов электромеханической обработки металлов. – Ульяновск, УСХИ, 1970. – С.137 – 149.

8. Аскинази Б.М., Наумчев С.Б. Повышение эксплуатационных свойств железобетонных втулок электромеханической обработкой.// Тракторы и сельхозмашины. – 1983. – № 8 – С.35 – 36.

9. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – Киев: Наукова думка, 1988. – 238с.

10. Бабей Ю.И. Об аномальном ускорении диффузии при образовании белых слоев.// Физико-химическая механика материалов. – 1975. – № 4 – С.104 – 106.
11. Бабей Ю.И., Сопронюк Н.Г., Гурей В.М. Влияние содержания углерода в стали на качество белых слоев и их сопротивление коррозионно-механическому разрушению.// Физико-химическая механика материалов. – 1977. – № 4 – С.49 – 53.
12. Байков Б.П., Бордуков В.Г., Иванов П.В. Турбокомпрессоры для наддува дизелей. Л.: Машиностроение, 1975. – 199с.
13. Балагуров Б.Я. Протекание тока через тонкие пленки с топологической структурой.// Техническая физика. – 1981. – т. 51, вып. 6. – С.1146.
14. Башков Г.П. Выглаживание восстановленных деталей. М.: Машиностроение, 1979. – 214с.
15. Безухов Н.И., Бажанов В.Л., Гольденблат И.И. и др. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур. – М.: Машиностроение, 1965. – 568с.
16. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. В 2-х томах. – М.: Машиностроение, 1968.
17. Бернштейн М.Л., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. – М.: Metallurgia, 1983. – 420с.
18. Вайдаев В.П., Стопалов С.Г. Надежность сельскохозяйственных тракторов и пути ее повышения.// Тракторы и сельхозмашины. – 1984. – № 10 – С.15 – 17.
19. Веретенников Н.В. Исследование процесса электромеханической обработки цилиндров двигателей в условиях ремонтного производства: Дис... канд. техн. наук. – Ульяновск, 1972. – 166с.

20. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. 3-е изд. Доп. И перераб. М.: Колос, 1973. – 199с.
21. Власкин В.В. Результаты микрометражных исследований изношенных деталей турбокомпрессоров ТКР – 11Н – 1 // Энергосберегающие технологии и системы в АПК: Межвуз. сб. научн. трудов / МГУ им. Н.П. Огарева, 2004. – С.217 – 222.
22. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность) Учебник. – 4 – е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616с.
23. Головин Г.Ф. Остаточные напряжения, прочность и деформации при поверхностной закалке с токами высокой частоты. Л.: Машиностроение, 1976. – 144с.
24. Голубев Ю.А., Кононенко А.П. Уплотнительные устройства машин и машиностроительного оборудования. М.: Машиностроение, 1984. –103с.
25. Голубев Г.А., Кукин Г.М. и др. Контактные уплотнения вращающихся валов. М.: Машиностроение, 1976. – 210с.
26. ГОСТ 25.502-79. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 32с.
27. ГОСТ 23.224-86. Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 28с.
28. Гриднев В.Н., Мешков Ю.Я., Ошкадеров С.П., Трефилов В.И. Физические основы электротермического упрочнения стали. – Киев: Наукова думка, 1973. – 436с.
29. Гусенков А.П. Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин. – М.: Наука, 1992. – 405с.
30. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. Т. 2 – М.: Металлургиздат, 1961. – 416с.



31. Девятов Е.М. Использование ультразвуковых колебаний для электромеханического способа восстановления деталей.// Труды ЧИМЕСХ, 1972. – С.248 – 250.
32. Демин Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. – 218с.
33. Диденко А.М. Дизели СМД./ Справочник. М.: Агропромиздат, 1990. – 272с.
34. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статической обработки результатов исследований) 5-е изд., доп. И перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351с.
35. Дудкина Н.Г. Влияние структурно-неоднородного поверхностного слоя на физико-механические и эксплуатационные свойства Стали 45, подвергнутой электромеханической обработке: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Волгоград, 1992. – 18с.
36. Дунаев Л.Ф., Мешков О.П., Варламов Л.П. Допуски и посадки. Обоснование выбора. – М.: Высш. школа, 1984. – 112с.
37. Елизаветин М.Л. Повышение надежности машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 430с.
38. Завьялов А.С. Фазовые превращения в железоуглеродистых сталях. – М.: Судпромгиз, 1948. – 214с.
39. Зажигаев Л.С., Кишьян А.Д. Методы планирования и обработки результатов. Л.: 1971. -230с.
40. Зайдес С.А., Кропоткина Е.Ю., Лебедев А.Р. Моделирование процессов поверхностного пластического деформирования/ под ред. С.А. Зайдеса. – Иркутск: Издательство ИрГТУ, 2004. – 309с.
41. Икрамов У.А. Расчетные методы оценки абразивного износа. М.: Машиностроение, 1987. – 281с.
42. Исследование надежности дизелей и уточнение структуры ремонтного цикла/ Отчет о НИР. Рук. работы к.т.н. Кривенко П.М. ГОСНИТИ, 1981, ВНИТЦ, Инв. № 02822037.

43. Карапетян Г.П. Исследования электромеханического способа упрочнения деталей дизельных двигателей типа ЯМЗ с целью увеличения послеремонтного ресурса (на примере автомобилей МАЗ и КрАЗ, работающих в горных условиях Армянской ССР: Дис... канд. техн. наук. – Ереван, 1981. – 204с.
44. Карпенко Г.В., Бабей Ю.И., Карпенко И.В., Гутман Э.М. Упрочнение стали механической обработкой. – Киев: Наукова думка, 1966. – 204с.
45. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487с.
46. Касандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. М.: Наука, 1978. – 232с.
47. Кидин И.Н. Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов. – М.: Metallургия, 1969. – 387с.
48. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин: Учеб. пособ. для машиностр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 319с.
49. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. – М.: Машиностроение, 1974. – 259с.
50. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: Наука, 1975. – 227с.
51. Колбасин А.А. Восстановление и повышение надежности узла трения турбокомпрессора семейства СМД: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Харьков, 1988. – 18с.
52. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1978. – 209с.
53. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев.: Наукова думка, 1976. – 678с.
54. Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. Справочник. М.: Машиностроение, 1980. – 246с.
55. Кряжков В.М. Научные основы восстановления работоспособности сопряжений деталей сельскохозяйст-

венных тракторов применением металлопокрытий и упрочняющей технологии: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Л., 1973. – 50с.

56. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. – 420с.

57. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. Т. 3. Томск. 1944. – 256с.

58. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528с.

59. Лурье Г.Б., Штейнберг Я.И. Упрочняюще-отделочная обработка рабочих поверхностей деталей машин поверхностным пластическим деформированием. Обзор. М.: Машиностроение, 1971. – 286с.

60. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599с.

61. Масино М.А. Повышение долговечности автомобильных деталей при ремонте. – М.: Транспорт, 1972. – 148с.

62. Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под общ. Ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 6-е изд., стереотип. – М.: Изд – во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 648с.

63. Машины и стенды для испытания деталей. Под ред. Решетова Д.Н., М.: Машиностроение, 1979. – 176с.

64. Методика определения экономической эффективности законченных научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ по сельскому хозяйству. – М.: 1977. – 120с.

65. Методические рекомендации по ремонту турбокомпрессоров тракторных и комбайновых дизелей – Москва: Центр научно-технической информации, пропаганды и рекламы, 1986. – 64с.

66. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. Методические указания. М.: Изд. Стандартов, 1978. – 112с.
67. Мучник Г.Ф., Рубашев И.Б. Методы теории теплообмена. Теплопроводность. Ч. 1. – М.: Высшая школа, 1970. – 287с.
68. Мойсюк В.Н. Множественный корреляционный анализ результатов пассивного эксперимента. М.: Машиностроение, 1978. – 156с.
69. Монченко В.П. Обработка отверстий дорнованием с большими натягами во втулках. – М.: НИИМАШ, 1965. – 194с.
70. Монченко В.П. Эффективная технология производства полых цилиндров. М.: Машиностроение, 1980. – 248с.
71. Монченко В.П. Дорнование отверстий в длинных втулках и гильзах. – М.: НИИТАвтопром, 1967. – 145с.
72. Монченко В.П. Дорнование отверстий с большими натягами. – М.: ЦНИИТракторсельхозмаш, 1971. – 163с.
73. Монченко В.П. Обработка поверхностей гладких втулок давлением.// Труды ВИСХОМ им. В.П. Горячкина, 1971, – Вып. 8 – С.134–138.
74. Монченко В.П. Деформирующая обработка отверстий втулок и гильз гидропневмоцилиндров. – М.: НИИМАШ, 1976. – 158с.
75. Наумчев С.В. Повышение долговечности порошковых железобитумных деталей электромеханической обработкой при восстановлении работоспособности подвижных сопряжений сельскохозяйственной техники: Дис... канд. техн. наук. – Ульяновск, 1985.– 238с.
76. Научные основы прогрессивной техники и технологии/ Г.И. Марчук, И.Ф. Образцов, Л.И. Седов и др. – М.: Машиностроение, 1986. –376с.

77. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей машин поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1980. – 327с.
78. Одинцов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. М.: Машиностроение, 1981. – 223с.
79. Орловский В.А. Качество поверхностей деталей после отделочно-упрочняющей обработки.// Повышение уровня технической эксплуатации сельскохозяйственной техники. – Горки, 1990. – С.70 – 73.
80. Палехов Ю.И. Исследование электромеханического упрочнения рабочих поверхностей, ведущих элементов автомобильных сцеплений при их ремонте: Дис... канд. техн. наук. – М.: 1973. – 221с.
81. Панченко Е.В. и др. Лаборатория металлографии. –М.: Металлургия, 1965. – 274 с.
82. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностей пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. – 152с.
83. Папшев Д.Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками. М.: Машиностроение, 1968. – 132с.
84. Паустовский А.В. Исследование процесса и механизма электромеханической обработки: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Киев, 1972. – 23с.
85. Повышение долговечности деталей машин методом поверхностного наклепа. /Под ред. И.В. Кудрявцева. – М.: Машиностроение, 1965.–211с.
86. Повышение усталостной прочности деталей машин поверхностной обработкой. – Л.: Машгиз, 1952. – 215с.
87. Попилов Л.Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 544с.
88. Практикум по технологии конструкционных материалов и материаловедению /Под общ. ред. С.С. Некрасова. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1983. – 256с.

89. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий. – Свердловск: Машгиз, 1961. – 192с.
90. Проскуряков Ю.Г., Дорнование цилиндрических отверстий с большими натягами./ отв. Редактор Ф.Ф. Валяев. –Ростов на Дону: Издательство Ростовского университета, 1982. – 168с.
91. Проскуряков Ю.Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. – М.: Машиностроение, 1971. – 234с.
92. Проскуряков Ю.Г. и др. Дорнование отверстий тонкостенных деталей в обоймах / Акименко Ю.А., Суханов Э.С. и др.// Вестник машиностроения. – 1971. – №12. – С.37 – 41.
93. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288с.
94. Пучин Е.А., Дидманидзе О.Н., Корнеев В.М. Средства технологического оснащения в системе технического сервиса АПК. Научно-практическое издание. – М.: УМЦ «ТРИАДА», 2004. – 100 с.
95. Решетов Д.Н. Работоспособность и надежность деталей машин. – М.: Высшая школа, 1974. – 206с.
96. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наук. думка, 1990. – 330с.
97. Розенберг А.М. и др. Качество поверхности, обработанной деформирующим протягиванием/ Розенберг О.А., Гриценко Э.И., Посвятенко Э.К. – Киев: Наук. думка, 1977 – 187с.
98. Рыжов Э.В., Гальперин Г.Л., Гончаренко Ю.Н. Влияние электромеханической обработки на фреттингостойкость посадочных поверхностей под подшипники качения. – М.: ГОСНИТИ. Т.69. 1983. – С.79-83.

99. Рыжов Э.В. и др. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин /Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176с.

100. Рыжов Э.В., Поляков Д.Д. Чистота поверхности и опорная площадь при электромеханическом сглаживании.// Исследование и применение процессов электромеханической обработки металлов. – Ульяновск, 1970. – Вып. 1 – С.28 – 35.

101. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1975. – 296с.

102. Сафронов В.В. Повышение долговечности стальных цилиндров электромеханической обработкой: Автореф. дис... канд. техн. наук. – М., 1984. – 16с.

103. Садовский В.Д. Структурная наследственность в стали. – М.: Металлургия, 1973. – 91с.

104. Семенов А.П., Ковш И.Б., Петрова И.М. и др. Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии. – М.: Наука, 1992. – 404с.

105. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240с.

106. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000. – 320с.

107. Ткачев В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. – М.: Машиностроение, 1978. – 264с.

108. Турбокомпрессоры тракторных и комбайновых дизелей. Технические требования на капитальный ремонт. ТК 10-05.0001.003 – 86. М.: ГОСНИТИ, 1988. – 65с.

109. Федорова Л.В. Обоснование и разработка технологии электромеханической обработки при упрочнении и восстановлении деталей с наружной метрической резьбой

сельскохозяйственной техники: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Саранск, 1994. – 16с.

110. Федоров С.К. Упрочнение и восстановление деталей резьбовых соединений электромеханической обработкой в условиях сельскохозяйственного ремонтного производства: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Ульяновск, 1990. – 18с.

111. Федотов Г.Д. Технологическое обеспечение повышения долговечности цилиндрических поверхностей автотракторных деталей электромеханической обработкой: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Саратов, 1985. – 16с.

112. Хворостухин Л.А., Шишкин С.В., Ковалев А.П., Ишмаков Р.А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением. – М.: Машиностроение, 1988. – 142с.

113. Цетлин Б.В. Безопасность труда при термической обработке металлов. – М.: Профиздат, 1955. – 156с.

114. Шаврин О.Ю. Технология и оборудование термомеханической обработки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1983. – 176с.

115. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика)/ МГУ им. Н.П. Огарева и др.; Ф.Х. Бурумкулов, П.П. Лезин, П.В. Сенин и др. – Саранск, 2003. – 504с.

116. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация./ Багмутов В.П., Паршев С.Н и др. – Новосибирск: Наука, 2003. – 318с.



**А.В. Морозов**

**Объемное электромеханическое дорнование  
тонкостенных стальных втулок**

**Монография**

Ульяновск: УГСХА им. П.А. Столыпина, 2013.- 193с.

Подписана в печать 9.09.2013

Формат 60×84/16

Усл. печ. лист 11,4 Тираж 500 Заказ №33

---

432017, Ульяновск, бульвар Новый Венец, 1