

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

На правах рукописи

Севагин Сергей Васильевич

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ГИДРОЦИЛИНДРОВ
ПОГРУЗОЧНО-ДОСТАВОЧНЫХ МАШИН**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: профессор, д.т.н. Мнацаканян Виктория Умедовна

Москва, 2022

Оглавление

	Стр.
Введение	4
 Глава 1. Анализ задачи повышения ресурса штоков на основе обеспечения качества их изготовления. Аналитический обзор	 11
1.1 Служебное назначение, особенности конструкции и причины отказов гидроцилиндров ПДМ	11
1.2 Уплотнения, применяемые в гидроцилиндрах ПДМ	26
1.3 Специфика механики контактного взаимодействия штока с уплотнением ..	31
1.4 Обзор методов технологического обеспечения качества и требуемой микрогеометрии поверхности штока	35
1.5 Цель и задачи исследования	41
 Глава 2. Обоснование требований к микропрофилю поверхности штока для условий контакта с уплотнением.....	 43
2.1 Исследование влияния параметров микропрофиля штока на характер контакта с уплотнением	43
2.2 Исследование контактного взаимодействия поверхности штока с уплотнением	49
2.3 Компьютерное моделирование контакта штока с уплотнением.....	59
2.3.1 Принятие расчетной модели взаимодействия двух тел	59
2.3.2 Исследование напряженно-деформированного состояния уплотнения при контакте со сферическим выступом микропрофиля штока	62
2.4 Результаты моделирования	70
2.5 Выводы.....	73
 Глава 3. Разработка и исследование эффективных технологических методов обеспечения требуемых параметров макро- и микрогеометрии штока	 74
3.1 Разработка и исследование эффективного метода достижения требуемых макрогеометрических параметров хромированного штока	74

3.2 Разработка и исследование эффективного метода достижения требуемого микропрофиля поверхности хромированного штока.....	82
3.3 Методика проведения экспериментальных исследований по обработке алмазным выглаживанием хромированной поверхности	87
3.4 Результаты экспериментальных исследований процесса получения требуемых параметров качества штока алмазным выглаживанием.....	96
3.5 Анализ результатов экспериментальных исследований	102
3.6 Выводы	106
Глава 4. Исследование влияния параметров поверхностного слоя штока, обработанного алмазным выглаживанием, на ресурс пары трения шток-уплотнение	107
4.1 Исследование влияния вида отделочной обработки штока на фактическую площадь контакта в паре шток-уплотнение	107
4.2 Исследование коэффициента трения в паре шток-уплотнение и скорости износа сопряжения	115
4.3 Выводы	123
Список сокращений и условных обозначений	127
Список литературы.....	129
Приложение А Рабочие чертежи оснастки для алмазного выглаживания ..	139
Приложение Б Документы о практическом использовании результатов	145

Введение

Актуальность работы. При комплексном освоении рудных месторождений в различных горно-геологических условиях широко применяются погрузочно-доставочные машины (ПДМ). Данный вид горного транспорта производится малыми сериями, как правило, по индивидуальным проектам заказчика под конкретные рудники.

К надежности подземной горной техники предъявляют более жесткие требования, чем к надежности наземного транспорта, что обусловлено прежде всего высокой трудоемкостью организации ремонтных работ в условиях ограниченного подземного пространства. В связи с этим чрезвычайно важно, чтобы ПДМ сохраняли работоспособность на протяжении всего периода эксплуатации до проведения очередного планового ремонта.

К числу наиболее ответственных устройств ПДМ, определяющих эффективность их функционирования, относятся гидроцилиндры. Они широко применяются в гидроприводах управления движениями ковша. Надежность гидроцилиндров, в свою очередь, в значительной степени зависит от ресурса штоков, как наиболее нагруженных элементов, а также уплотнительных систем, обеспечивающих герметичность ответственных соединений. Малый ресурс пары трения «шток-уплотнение» обусловлен интенсивным износом уплотнения вследствие работы в условиях граничной смазки и циклического нагружения, присутствия в подземном пространстве абразивных частиц, наличия макро- и микрогеометрических несовершенств рабочей поверхности штока. Интенсивный неравномерный износ уплотнений в ходе эксплуатации, в свою очередь, приводит к увеличению начальных зазоров в зоне контакта со штоком, куда со временем попадают посторонние механические частицы – пыль, продукты износа уплотнения и др., что вызывает ускоренный износ рабочей поверхности штока. Возникает необходимость частых ремонтов, и, как следствие, длительные простои ПДМ, что влечет за собой финансовые потери и существенные траты на приобретение большого числа запасных частей. Порядка 30–40% штоков силовых

гидроцилиндров ПДМ бракуется из-за невозможности их восстановления вследствие износа, а также высокой стоимости ремонта.

Использование в уплотнительных системах современных композиционных материалов выдвигает более высокие требования к качеству поверхности штока, в частности, к параметрам геометрической точности и его микропрофилю, который во многом определяет износостойкость сопряжённых поверхностей трения и их ресурс. Это неизбежно приводит к необходимости совершенствования технологии изготовления штока, так как базовый техпроцесс с финишной обработкой хромированной рабочей поверхности полированием не обеспечивает в полной мере должных макро- и микрогеометрических параметров его поверхностного слоя. Таким образом, повышение ресурса пары трения шток-уплотнение на основе выявления, обоснования и технологического обеспечения благоприятного микропрофиля и должной макрогеометрии рабочей поверхности штока, отвечающих условиям его эксплуатации в паре с уплотнением, является актуальной научной задачей, имеющей большое практическое значение.

В качестве альтернативных методов отделки высокотвердой хромированной поверхности штока предлагается использовать твердое точение и один из эффективных методов поверхностного пластического деформирования (ППД) - алмазное выглаживание, при помощи которых на заключительном этапе изготовления возможно обеспечить требуемые параметры геометрической точности и микропрофиля рабочей поверхности штока.

Разработка и внедрение альтернативных методов отделочной обработки хромированных штоков позволит управлять микропрофилем рабочих поверхностей и, тем самым, существенно повысить износостойкость и другие эксплуатационные свойства как поверхностного слоя штока, так и в целом сопряжения «шток-уплотнение».

Степень научной проработанности темы исследования. Существенный вклад в обеспечение надежности гидропривода горных машин, исследование связи ресурса гидроцилиндров с качеством поверхностного слоя деталей соединений внесли известные ученые в области горного машиностроения –

В.Н. Гетопанов, Е.М. Кривенко, Ю.Ф. Набатников, Г.И. Солод. Вопросам технологического обеспечения качества поверхности деталей машин при помощи методов поверхностного пластического деформирования посвящены работы ведущих советских и зарубежных ученых: В.Н. Браславского, М. А. Москалева, Л.Г. Одинцова, А.Н. Овсеенко, В.М. Смелянского, А.Г. Суслова, Ю.Г. Проскурякова, В.М. Торбило, Ю.Г. Шнейдера, D.C. Mitchell, M.B. Peterson, F.I. Clauss и др. Исследованию обработки ППД деталей с металлопокрытиями посвящены работы Л.И. Бобковой, В.У. Мнацаканян, А.Р. Папояна, Ш.У. Хидоятова и др. В то же время в научной литературе отсутствуют данные по обработке твердым точением и ППД хромированных деталей, что требует проведения комплекса исследований, направленных на выявление, обоснование и достижение благоприятных параметров макрогеометрии и микропрофиля поверхности штока, способствующих повышению ресурса пары трения «шток-уплотнение».

Цель работы: повышение ресурса гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин на основе разработки эффективной технологии отделочной обработки хромированного штока, обеспечивающей требуемые макро- и микрогеометрические параметры его рабочей поверхности и высокие эксплуатационные свойства пары трения «шток-уплотнение».

Идея работы состоит в использовании обработки поверхностным пластическим деформированием для обеспечения требуемых параметров микропрофиля и эксплуатационных характеристик поверхностного слоя хромированного штока, благодаря чему достигается высокий ресурс сопряжения «шток-уплотнение».

Задачи исследования:

1. Анализ конструкции, специфики эксплуатации и причин отказов гидроцилиндров ПДМ на основе данных производственной статистики.
2. Выявление требований и обоснование параметров микрогеометрии поверхностного слоя штока, обеспечивающих наиболее благоприятные условия контакта штока с уплотнением.

3. Исследование влияния микрогеометрии поверхности штока на эксплуатационные свойства и ресурс сопряжения шток-уплотнение.

4. Выявление, анализ и разработка технологических методов уменьшения макрогеометрических погрешностей штока после твердого хромирования.

5. Разработка технологических методов обеспечения рациональных параметров микропрофиля штока, отвечающих заданным требованиям по условиям контакта и ресурсу деталей сопряжения шток-уплотнение.

6. Исследование влияния микрогеометрии поверхности хромированного штока, обработанного алмазным выглаживанием, на ресурс трибосопряжения шток-уплотнение.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Получение благоприятного микропрофиля поверхности штока возможно за счёт моделирования вязкоупругого контакта с уплотнением, приводящего к снижению контактных напряжений в уплотнении и обеспечивающего высокий ресурс их соединения.

2. Нерегламентированные отклонения от заданной геометрической формы рабочей поверхности штока, возникающие в процессе хромирования, необходимо устранять обработкой твердым точением.

3. Для повышения ресурса соединения «шток-уплотнение» в качестве отделочной обработки хромированного штока целесообразно применять алмазное выглаживание, обеспечивающее благоприятные параметры микропрофиля поверхности штока для условий контакта с уплотнением и повышение ресурса пары трения на 24-28 %.

4. Установлена взаимосвязь между параметрами шероховатости поверхности штока и технологическими режимами отделочной обработки алмазным выглаживанием, представляющая собой полную квадратичную зависимость шероховатости от усилия деформирования и радиуса алмазного выглаживателя.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

подтверждается достаточным количеством экспериментальных данных, хорошей сходимостью теории и эксперимента, применением сертифицированных

программ, оборудования с высокими метрологическими характеристиками, использованием апробированных методов испытаний и обработки экспериментальных данных при проведении исследований.

Научная новизна работы состоит в решении актуальной научной задачи, заключающейся в раскрытии связи ресурса сопряжения шток-уплотнение с параметрами микропрофиля поверхности штока и технологическими методами их достижения, что имеет большое практическое значение для повышения эффективности эксплуатации гидроприводов горных машин.

Методы исследования. Теоретические исследования базируются на фундаментальных положениях теории вязкоупругости, механики контакта твердых тел, теории пластичности, теории резания, научных основах технологии машиностроения, методов компьютерного моделирования и конечно-элементного анализа. Экспериментальные исследования выполнены с использованием методов планирования экспериментов. Обработка результатов экспериментальных данных по достижению требуемых параметров микропрофиля хромированного штока выполнена с использованием методов математической статистики.

Научное значение работы состоит в:

- разработке научного подхода к определению благоприятного микропрофиля поверхности хромированного штока с целью повышения ресурса пары трения «шток-уплотнение» гидроцилиндров ПДМ;
- выявлении благоприятного микропрофиля поверхности штока при контакте с уплотнением на основе исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) материала уплотнения;
- разработке методов отделочной обработки хромированных штоков, обеспечивающих благоприятный микрорельеф поверхности и повышение эксплуатационных характеристик пары трения «шток-уплотнение».

Практическое значение работы:

1. Разработана технология обработки хромированной поверхности штока твердым точением, позволяющая устранить погрешности геометрической формы, возникающие в процессе хромирования.

2. Разработана технология сглаживающе-упрочняющей обработки хромированной поверхности штока алмазным выглаживанием, позволяющая создать благоприятный микрорельеф поверхности для контакта с уплотнением.

3. Разработана методика выявления благоприятного для контакта с уплотнением микропрофиля поверхности штока с учетом физико-механических свойств эластомеров, определяемых при одноосном растяжении с последующим моделированием испытаний в программе *MCalibration*.

4. Разработана имеющая свидетельство государственной регистрации управляющая программа для токарного станка с ЧПУ, обеспечивающая достижение требуемых параметров качества поверхности хромированного штока гидроцилиндра в процессе алмазного выглаживания.

5. Разработаны технологические рекомендации, направленные на повышение эксплуатационных характеристик пары трения «шток-уплотнение».

Личный вклад автора. Автором выполнены теоретические и экспериментальные исследования, компьютерное моделирование контактного взаимодействия шероховатой поверхности штока с уплотнением, сконструирована технологическая оснастка и разработана управляющая программа для станка с ЧПУ.

Реализация результатов диссертационной работы.

Научные и практические результаты диссертации приняты к использованию в ООО «НПЦПОДЗЕММАШ», ООО «ПТК ГИДРОФОРС» и АО «Можайское экспериментальное механическое предприятие», а также используются в учебном процессе Горного института НИТУ «МИСиС» при подготовке студентов машиностроительного профиля.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих международных и российских конференциях: XVII

Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов горно-геологического, нефтегазового, энергетического, машиностроительного и металлургического профиля в СПбГУ 2019 г.; форуме молодых ученых, приуроченном к международной студенческой научно-практической конференции «Автоматизация и информационные технологии», МГТУ Станкин, 2019 г.; XIX Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» в СПбГУ 2021 г., а также в международном научном симпозиуме «Неделя горняка» 2018-2020 г.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 6 научных трудах, из которых 3 – в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в журналах, индексируемых базой данных *Scopus*. По материалам диссертации получено свидетельство о государственной регистрации управляющей программы для станка с ЧПУ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 147 страницах машинописного текста, содержит 22 таблицы и 70 рисунков. Библиография включает 106 наименований.

Автор выражает огромную благодарность Кирильчатенко Николаю Петровичу за оказанную помощь в производстве технологической оснастки для проведения диссертационных исследований.

Глава 1. Анализ задачи повышения ресурса штоков на основе обеспечения качества их изготовления. Аналитический обзор

1.1 Служебное назначение, особенности конструкции и причины отказов гидроцилиндров ПДМ

Подземные погрузочно-доставочные машины (ПДМ), как разновидность горного транспорта, появились в 70-е годы прошлого столетия и применяются преимущественно для разработки сложных тонкожилых месторождений, в том числе крутопадающих. При помощи ПДМ осуществляют погрузку и транспортировку добытой горной породы на временные пункты перегрузки, а также их используют для погрузки горной массы в транспортные средства, например, подземные самосвалы – для ее дальнейшей перевозки к местам переработки. Данный вид горной техники производится малыми сериями, как правило, по индивидуальным проектам заказчика под конкретные рудники.

К надежности подземной горной техники предъявляют более жесткие требования, чем к надежности наземного транспорта, что обусловлено прежде всего высокой трудоемкостью организации ремонтных работ в условиях ограниченного подземного пространства. Последнее вызывает необходимость транспортировки вышедшей из строя машины с рабочего места на поверхность и возвращение ее после ремонта обратно в рудник. В связи с этим важно, чтобы машины сохраняли работоспособность на протяжении всего срока эксплуатации [1].

Традиционная конструктивная схема ПДМ различной грузоподъемности включает несущую шарнирно-сочлененную раму, колеса большого размера, низкий моторный отсек в заднем свесе. В качестве источника питания могут использоваться традиционные дизельные двигатели внутреннего сгорания, перспективные электрические моторы с кабельным питанием и электрические с аккумуляторным (батарейным) блоком [2].

Ведущими производителями подземной техники являются зарубежные компании:

– *Sandvik* (Швеция) с солидной линейкой дизельных ПДМ (с двигателями *Deutz* и *Volvo* от 71,5 до 352 кВт) и моделями электрических ПДМ г/п от 3 до 25 т (электрические кабельные *LH203E*, *LH409E*, *LH514E* и аккумуляторные *LH-518B* модели);

– *Hermann Paus Maschinenfabrik*, производящая компактные модели ПДМ с дизельным двигателем (модели *PFL 8*, *PFL 20* и *PFL 30*) и электромотором (*PFL 8E*) хорошо известна в России еще с советских времен. Практически все машины *Paus* могут быть дооснащены системами дистанционного управления и видеокамерами. Техника *Paus* применяется на Североуральском бокситовом руднике, на Юкспорском месторождении апатит-нефелиновых руд, на руднике «Ангидрид» в Норильском промышленном районе и др;

– *Aramine* (Франция) преимущественно производит машины для узких тоннелей как с дизельными двигателями (*L130D*, *L150D/XD* и *L350D*) так и с электромоторами с кабельным питанием (*L110E*, *L130E*, *L150E/XE*) и аккумуляторные (*L140B*);

– *Fadroma* (Польша), модельный ряд которой включает 8 ПДМ от 3 до 15 т с дизельными двигателями *Deutz* мощностью от 60 до 273 кВт с воздушным или жидкостным охлаждением (*LK07* и др);

– *AlpinMakine* (Турция) предлагает две модели ПДМ: *LHD 1,2* и *LHD 3,5* г/п 1,2 и 3,5 т, оснащенные дизельными двигателями *Deutz* (соответственно мощностью 58 и 74,9 кВт) с воздушным охлаждением;

– *TalpaMaden* (Турция) производит ряд ПДМ из 4 дизельных (с двигателями мощностью от 55 до 220 кВт) и одной батарейной электрической модели (*LE 110*).

Российские модели ПДМ с дизельными двигателями для горно-рудных предприятий России, Казахстана и Узбекистана выпускает группа компаний «Майнер»:

- МПД-1 – для работы в узких и низких тоннелях, грузоподъемностью (г/п) 3600 кг, с мощностью двигателя 69-84 кВт и ковшем вместимостью 1,6 м³;
- МДП-10 - для просторных тоннелей сечением 4х4 м грузоподъемностью 10 т. Оснащена двигателем мощностью 204–235 кВт и ковшем вместимостью 4–5,2 м;
- МПД-14 - для просторных туннелей с сечением 5х5 м и более с грузоподъемностью 14 т.

На российских горных предприятиях также успешно функционируют ПДМ, производимые объединением «БЕЛАЗ» (Республика Беларусь) с дизельными двигателями. В тоннелях с сечением не менее 4х4 м эксплуатируют модели МоАЗ-4035 массой 15,3 т и МоАЗ-4055. ПДМ модели МоАЗ-40751 с закрытой кабиной и двигателем *Cummins* мощностью 291 кВт предназначены для более просторных тоннелей [2].

Несмотря на разнообразие выпускаемых моделей ПДМ, они имеют ряд типовых компонентов со схожими характеристиками и функциями. Примером могут служить гидроцилиндры.

Основным исполнительным органом ПДМ является ковш различной вместимостью и грузоподъемностью в зависимости от модели машины. Выемка, погрузка и разгрузка горной массы осуществляется непосредственно механизмом стрелы и ковша, должную кинематику которых обеспечивает гидромеханический привод, где основным силовым узлом является гидроцилиндр.

Известно, что для обеспечения требований эксплуатационной надежности машины в целом все ее ответственные узлы и механизмы должны иметь одинаковый ресурс. Вместе с тем практика показывает, что в подавляющем числе случаев гидроцилиндры ПДМ вырабатывают лишь 60-70% от заложенного проектного ресурса. Это обстоятельство приводит к необходимости поиска эффективных решений, направленных на повышение ресурса объёмных гидроприводов ПДМ.

ПДМ работают в суровых условиях, характеризующихся высокими динамическими и статическими нагрузками, наличием вибраций, широкого температурного интервала, запыленности, агрессивных шахтных вод. В связи с этим реальный ресурс и эксплуатационная надежность гидроцилиндров ниже проектных значений. Этому также способствует удаленность рабочих мест эксплуатации ПДМ от участков технического обслуживания, что затрудняет проводить систематическую аппаратную оценку состояния деталей соединений и своевременно устранять, и менять на новые пришедшие в негодность элементы. Основная причина потери работоспособности гидроцилиндров – нарушение герметичности в парах трения цилиндр-поршень и грундбукса-шток из-за ускоренного износа уплотнений. В свою очередь, при износе уплотнений и несвоевременной их замене в образовавшиеся зазоры из окружающей запыленной атмосферы в зону контакта попадают различные твёрдые частицы, что приводит к интенсивному механическому (абразивному) износу металлических поверхностей, сопряженных деталей, даже несмотря на то, что поверхностный слой последних на этапе изготовления подвергается упрочняющей обработке.

Интенсивный износ уплотнений может быть вызван как низкими эксплуатационными характеристиками материала самого уплотнения, так и недостаточными качественными показателями поверхностного слоя ответной детали-штока, например, нерегламентированными погрешностями формы, или неоднородными свойствами хромированного слоя, несоответствующим условиям трения микропрофилем поверхности. В связи с этим существенным резервом в повышении ресурса пары шток-уплотнение является улучшение качества поверхности штока и создания благоприятного микропрофиля для контакта с уплотнением.

По оценкам [3], гидроцилиндр как запасная часть для горного оборудования займет самую большую долю рынка в течение 2022–2027 г. в связи с высоким процентом выхода его из строя.

Проанализируем данные об отказах гидроцилиндров ПДМ, исходя из номенклатуры приобретаемых запасных узлов и деталей и формируемых запросов

на техническое обслуживание оборудования 3-х рудников ПАО «ГМК Норильский никель» и 17 единиц ПДМ, применяющихся для погрузки и транспортировки руды.

Опыт эксплуатации ПДМ на Норильских рудниках показал, что на отказы гидроцилиндров приходится 40...50 % отказов всех машин ПДМ, применяемых на предприятии. Это подтверждается закупками ПАО «ГМК Норильский никель» значительного объема запасных частей для гидроцилиндров. На рисунке 1.1 представлено количество отказов гидроцилиндров ПДМ за 2019–2021 гг.

Представляют интерес три вида гидроцилиндров: подъемные цилиндры, используемые для подъема или опускания стрелы, к которой прикреплен ковш, цилиндры наклона, отвечающие за изменение угла ковша, и цилиндры поворота, представленные на рисунке 1.2.

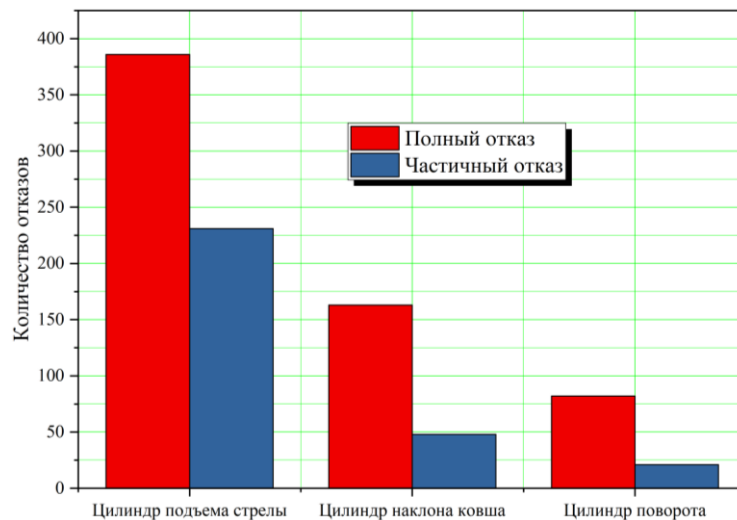


Рисунок 1.1 — Количество отказов гидроцилиндров на ПДМ различных моделей, применяемых на рудниках ПАО «ГМК Норильский никель» за 2019–2021 гг.



Рисунок 1.2 — Гидроцилиндр поворота Sandvik LH517

Наиболее частыми причинами отказов гидроцилиндра (за исключением поломки штока или проблем с соосностью цилиндра и штока) являются загрязнение, повреждение уплотнений и подшипников, химическая или тепловая деградация свойств материалов деталей, а также поверхностные структурные повреждения штока.

Анализ показал, что причинами выхода из строя узлов гидроцилиндра являются коррозия, различные механические повреждения (царапины, выбоины, сколы, задиры) на штоках и гильзах, возникающие вследствие внешнего механического воздействия мелких абразивных частиц добываемой породы, а также по причине загрязнения рабочей жидкости внутри гидравлической системы узла.

Установлено, что около 97 % отказов гидроцилиндров происходят из-за износа и разрушения уплотнений, в результате чего нарушается герметичность в соединениях и появляются утечки. Порядка 31 % отказов происходит по причине износа штоков и 55 % по причине неисправности уплотнительных систем (рисунок 1.3).

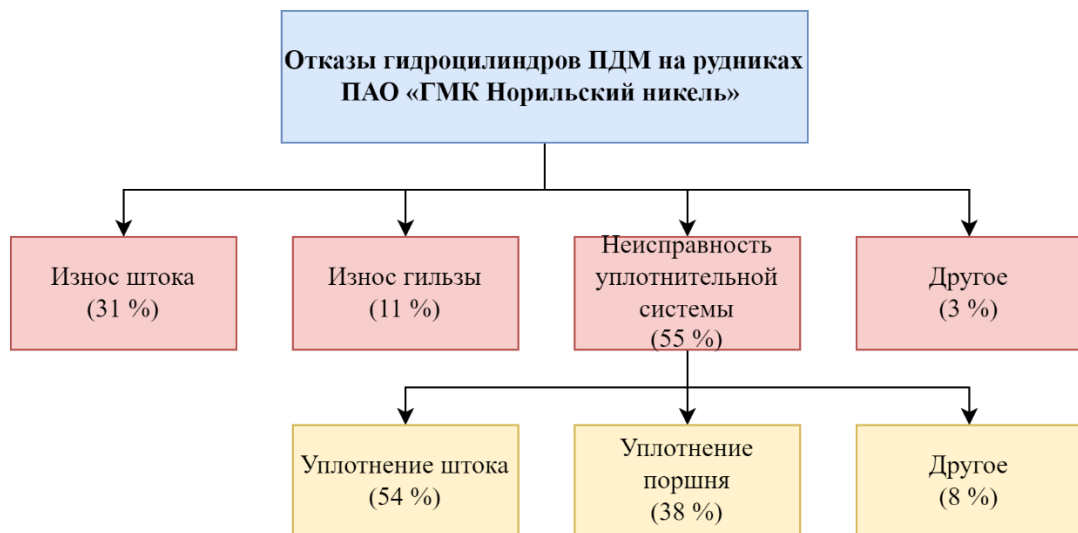


Рисунок 1.3 — Причины отказов гидроцилиндров ПДМ на рудниках ПАО «ГМК Норильский никель»

Также для поршневых гидроцилиндров характерен неравномерный износ по трибосопряженной поверхности из-за неравномерного контакта поверхности

трения. При износе изменяется форма поверхности и соответственно геометрия контакта, что нарушает работоспособность сопряжения [4].

Относительно высокая во многих случаях интенсивность изнашивания определяется: несовершенством изоляции направляющих от загрязнения; несовершенной смазкой; частыми остановками и реверсированием движения; переменностью использования различных участков, направляющих по их длине. Реверсивное движение вызывает в поверхностных слоях контактирующих тел знакопеременные сдвиговые деформации, т. е. последовательные изменения зон сжатия и растяжения, что приводит к некоторому увеличению силы трения и упругих деформаций вне контакта материалов трибосопряжения. Реверсивное движение изменяет также характер пластического деформирования. Знакопеременные деформации приводят к интенсивному процессу образования дефектов структуры.

Под действием циклических нагрузок в условиях граничной смазки гидроцилиндра масляная пленка разрушается, что приводит к непосредственному контакту металлических поверхностей у штока [5].

Основная часть неисправностей и повреждений гидроцилиндров происходит из-за износа уплотнительных колец штоковой полости в большой степени по причине несоответствия геометрической точности и микропрофиля поверхности штока условиям контакта с уплотнением. Последнее определяется видом выполняемой отделочной обработки штока на этапе его изготовления в условиях машиностроительного производства.

В паре шток-уплотнение грунбуксы имеет место колоссальная разница в свойствах материалов контактируемых поверхностей. Так, твердость поверхностного слоя штока значительно выше твердости уплотнения, т. е. по отношению к материалу уплотнения шток является абсолютно жёстким телом, оказывая на него интенсивное истирающее воздействие. Таким образом, в условиях трения скольжения при поступательном движении штока в отдельных зонах прилегающей части уплотнения возникают как напряжения растяжения, так и сжатия, причем значения их тем выше, чем больше нерегулярность

микрогеометрии поверхности штока и разброс по несовершенствам макрогеометрических отклонений его профиля.

Согласно государственному стандарту [6] «изнашивание — это процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличения его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела».

Изнашивание является сложным процессом, зависящим от двух взаимосвязанных групп факторов. С одной стороны, процесс изнашивания определяется условиями работы детали с учетом приложенных нагрузок, скорости перемещения, агрессивности среды и температуры эксплуатации, с другой стороны, он зависит также от способности металла детали противостоять действию изнашивающих нагрузок, что определяется его химическим составом, термической обработкой, структурой и полученными в результате этого механическими свойствами [7–10].

Влияние таких параметров как контактное давление, температура, вибрация, абразивность среды, приводит к изменению физико-механических свойств рабочих поверхностей штока, износу, вследствие чего происходит разрушение поверхностного слоя.

Шток — это выходное звено гидроцилиндра и, по сути, исполнительный, наиболее нагруженный орган гидропривода, который чаще всего выходит из строя. [11]. Эти ответственные детали часто подвергаются воздействию агрессивной среды и сжимающим циклическим нагрузкам [12]. Поскольку шток поршня выдвигается из цилиндра, он подвергается сильному воздействию внешних факторов. Перепады температур, осадки, грязь и пыль часто вызывают повреждение его поверхности, что приводит к сбоям, необходимости проведения ремонтных воздействий, вызывающих простой машины [13]. В таком важном элементе, как шток поршня, решающее значение имеет правильный выбор модификации поверхности. В статье [14] анализируются причины разрушения штока поршня, связанные с технологией его изготовления. Результаты показали, что возникшая трещина, с большой вероятностью, стала результатом неправильно

выбранной термообработки, которая привела, среди прочего, к склонности к коррозионному растрескиванию под напряжением (SCC) и низкой ударной вязкости материала штока.

Царапины чаще всего появляются на поверхности поршня, они нарушают геометрическую точность и могут способствовать потере герметичности.

В статье [15] исследуется состояние уплотнений при контакте с поверхностью хромированного штока. Испытания показали, что материал уплотнения и состояние поверхности штока имеют ключевое влияние на трение и характер износа уплотнений. Проблемой трения можно пренебречь, только если гидравлическая мощность привода достаточно высока. Для более требовательных устройств, при необходимости обеспечения высокой точности позиционирования и управления рабочих органов, пренебрегать трибологией нельзя. В статье [16] подтверждается, что материал, из которого изготовлены уплотнения, и условия давления в полости гидроцилиндра влияют на условия динамического трения. Исследования, описанные в [45, 60], показали, что на трибологические характеристики контактирующих тел и герметичность уплотнительной системы влияет шероховатость взаимодействующих поверхностей.

Высокая шероховатость поверхности скольжения, с одной стороны, приводит к образованию толстой смазочной пленки, снижающей контактное трение [19]. Однако при этом края уплотнений быстро изнашиваются, поскольку они соприкасаются с выступами шероховатостей, оказывающими царапающее механическое воздействие на материал уплотнения. Слишком маленькая шероховатость, в свою очередь, делает пленку тонкой, что способствует увеличению силы трения [20]. Вместе с тем, такой микропрофиль оказывает более благотворное влияние на состояние уплотнения, снижая негативное воздействие микрогребешков контрповерхности на целостность материала уплотнения.

В работе [21] обсуждается влияние анизотропной шероховатости поверхности на трение при контакте двух элементов. Анизотропная шероховатость создается во время обработки детали. Было показано, что сила трения уменьшается, если на поверхности цилиндра сделать канавку перпендикулярно направлению

движения. Таким образом, становится очевидным влияние микрогеометрии поверхностей трения на интенсивность их износа.

Практика показывает, что износ штоков происходит вследствие попадания абразивных частиц в зону контакта штока с уплотнением, что приводит к шаржированию поверхности штока и неблагоприятным последствиям, т. е. в данном случае превалирует механическое изнашивание. При воздействии внешней агрессивной среды может также проявляться коррозионно-механическое изнашивание [22].

Уплотнение плотно контактирует с поверхностью штока благодаря проявлению свойства упругости материала и выбранным конструктивным параметрам соединения, обеспечивающим его сжатие в радиальном направлении, при дополнительном наложении давления гидросистемы. Когда контактирующие поверхности двигаются друг относительно друга появляющееся в результате этого трение имеет два последствия: одно из них – износ, другое – уменьшение силы поступательного движения цилиндра, которая сокращается вследствие потерь на преодоление трения. Таким образом, с одной стороны должен быть обеспечен плотный контакт и герметизация узла во избежание утечек, с другой – беспрепятственное движение штока с минимальными потерями на трение.

Если трение можно предусмотреть в расчетах на стадии проектирования пары «уплотнения-шток», то степень износа сложно предсказать, поскольку она обусловлена массой факторов, связанных как с условиями эксплуатации и конструктивными параметрами узла, так и с состоянием поверхностного слоя сопрягаемых деталей.

Виды износа уплотнения можно разделить на четыре группы [23]:

1. Адгезионный износ, который развивается при контакте пары «металл-металл» или «уплотнение-металл» в области смещенного трения, где оба материала склонны к формированию смещенных слоев. Даже макроскопически гладкие поверхности являются шероховатыми на атомном уровне. Когда две такие поверхности соединяются, контакт возникает в местах расположения изолированных шероховатых выступов. При приложении обычной нагрузки

локальное давление в местах расположения шероховатостей становится чрезвычайно высоким. В отсутствие смазочных пленок такие поверхности сцепляются друг с другом. Тем не менее, даже небольшое количество смазки предупреждает сцепление (рисунок 1.4).

Касательное движение одной поверхности относительно другой может привести к тому, что в точке касания исчезнет смазывающая пленка и поверхности соединятся (произойдет слипание).

Непрерывное скольжение приводит к тому, что места соединения сдвигаются, и появляются новые соединения. Это и есть процесс адгезионного износа. Рельеф поверхности очень важен для предотвращения адгезионного износа, так как он определяет контактное напряжение в местах расположения выступов. Выбранные для поверхностей уплотнения материалы не должны легко слипаться для препятствия адгезионного износа.

Благодаря добавкам масла *HPL* помогают предотвратить данный тип износа в системе «металл-металл», но эти добавки не оказывают влияния в сочетаниях «уплотнение-металл»;

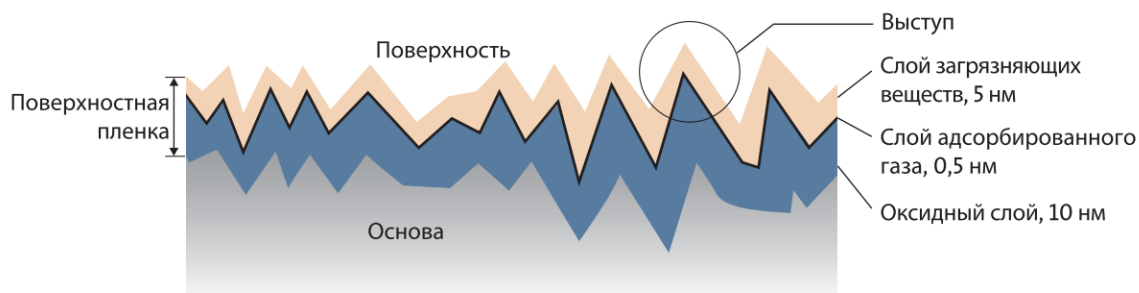


Рисунок 1.4 — Поверхность материала с загрязняющими веществами

2. Усталостный износ, который становится видимым по потере формы детали и нарушению структуры материала в результате многократного деформирования, выражается в виде локального поверхностного упрочнения с последующим быстрым отслоением частиц изношенного поверхностного слоя; обычно является результатом пульсирующих знакопеременных нагрузок;

3. Абразивный износ, которому подвержено как уплотнение, так металлическая контактная поверхность. Металл истирается собственными отделившимися частицами или в результате царапания твердыми посторонними частицами, присутствующими в окружающей среде.

Когда такими частицами являются выступы на другой поверхности, речь идет об истирании закрепленным абразивом. В результате на подверженной такому воздействию поверхности образуются равномерные желобки.

Процесс истирания называют эрозией, если частица натывается на поверхность, и кинетическая энергия частицы способствует удалению материала с поверхности. В этом случае можно наблюдать более хаотичный износ, напоминающий пескоструйную очистку. Твердые частицы, задержавшиеся между двумя поверхностями скольжения, могут вызвать серьезные повреждения. Это называется истиранием незакрепленным абразивом (рисунок 1.5). Для уплотнения грубая ответная поверхность обычно является причиной истирания относительно мягких поверхностей эластомера.

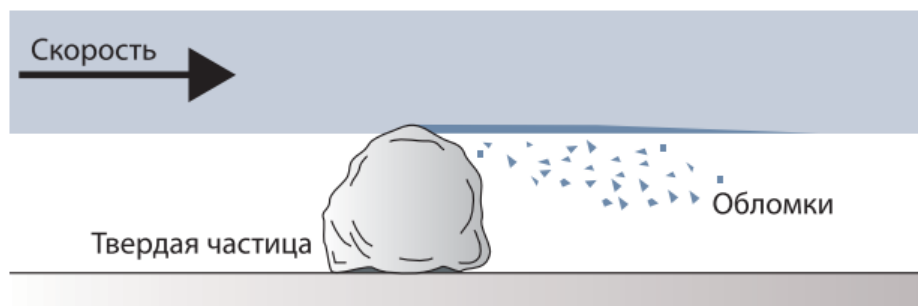


Рисунок 1.5 — Истирание абразивом

4. Коррозионный износ. На поверхностях, которые трутся друг о друга в агрессивных средах, могут образовываться продукты реакции. Эти продукты часто обладают низким сцеплением с поверхностью. Они могут удаляться при трении и, в итоге, вызывать абразивный износ. Коррозионный износ может наблюдаться на уплотнениях вала с твердыми поверхностями в агрессивной среде. Это может быть вызвано коррозией связующего вещества материала поверхности, при которой от материала будут отделяться твердые частицы.

Наиболее частые виды износа штоков ПДМ на предприятии ПАО «ГМК Норильский никель» представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 — Виды износа и процент от общего отказа гидроцилиндров, применяемых в ПДМ

Вид износа	Описание износа	Причины износа	Процент от общего отказа гидроцилиндра
Абразивный	Ускоренный износ уплотнения и штока под влиянием внешних факторов	Слишком грубая обработка поверхности	47
Экструзия	Повреждение уплотнения из-за зазора между скользящей поверхностью и корпусом. Чрезмерные зазоры позволяют уплотнению деформироваться в этих зазорах под давлением, что приводит к ползучести и / или разрыву материала.	Давление в системе слишком высокое Больше, чем обычно, зазор экструзии Расширение цилиндра Неправильный материал уплотнения.	12
Механическое повреждение	Повреждение уплотнительных элементов при экстремальных боковых нагрузках, превышающих допустимую нагрузку. Результатом обычно является контакт металла с металлом с серьезным повреждением всех компонентов.	Большая боковая нагрузка	5
Эрозия	Среда протекает через уплотнение, удаляя материал по мере его движения со стороны высокого давления на сторону низкого давления.	Поврежденная скользящая поверхность Загрязнение	21

На рисунке 1.6 показан износ П-образной манжеты. Отчетливо заметны следы износа на кромке уплотнения и мигрирующие частицы на контактирующей наружной цилиндрической поверхности.



Рисунок 1.6 — П-образная манжета штока из материала марки *NBR* со следами износа

На рисунке 1.7 показана крупным планом «губа» уплотнения U-образной формы, со следами истирания.

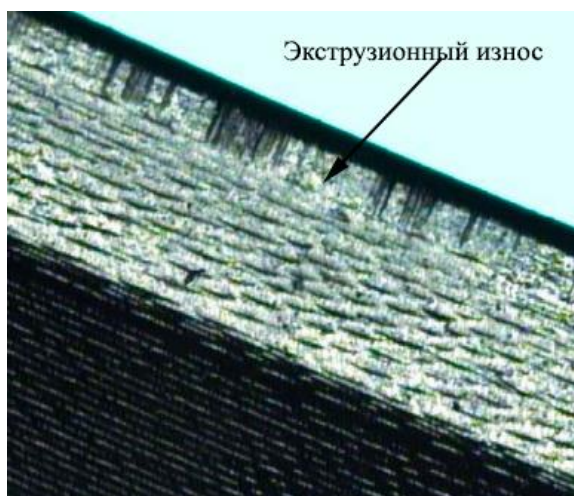


Рисунок 1.7 — Экструзионный износ U-образной формы уплотнения

На рисунке 1.8 представлено фото уплотнения из материала *PTFE* со следами абразивного износа с началом на «губе» и распространение его по всей контактной поверхности.

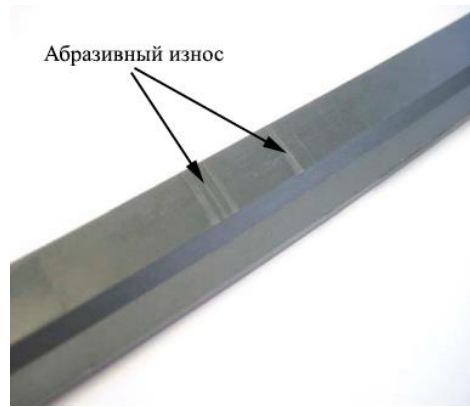


Рисунок 1.8 — Уплотнение с абразивным износом

На рисунке 1.9 представлена сильная эрозия полиуретанового уплотнения штока. Можно видеть, что эрозия начинается на кромке уплотнения (нижняя часть уплотнения) и распространяется по всей длине уплотнения.

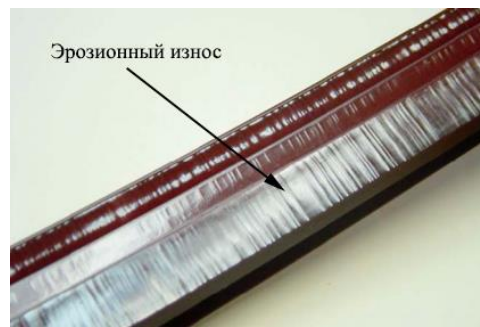


Рисунок 1.9 — Эрозионный износ уплотнения

На рисунке 1.10 представлен абразивный износ штока из-за микрорезания абразивными частицами (руды, частицы уплотнения, пыль), попавшими в зону трения между уплотнением и поверхностью штока.



Рисунок 1.10 — Абразивный износ штока

Таким образом, исходя из вышеизложенного, можно заключить, что отказ гидроцилиндров ПДМ от общего числа отказов машины имеет очень высокий процент. При этом преобладающим износом в уплотнительных системах гидроцилиндра является абразивное изнашивание.

1.2 Уплотнения, применяемые в гидроцилиндрах ПДМ

Применение тех или иных уплотнений в конструкции гидроцилиндра зависит от его устройства и назначения. Уплотнения гидроцилиндров ПДМ работают в средах, где грязь, пыль и агрессивные среды являются постоянными факторами. Поэтому конструкторско-технологические решения для уплотнительных систем должны обеспечивать их высокую надежность и герметичность, чтобы выдерживать одни из самых суровых условий эксплуатации, не допускать попадания внешних сред и сторонних смазочных материалов, а также обеспечивать наилучшую производительность машины. Гидравлические уплотнения должны не только предотвращать утечку жидкости из цилиндра, они также должны выдерживать высокое давление, экстремальные температуры и обладать химической стойкостью.

Таким образом, функции гидравлических уплотнений выходят далеко за рамки только лишь предотвращения утечек рабочей жидкости. На рисунке 1.11 представлен эскизный чертеж гидроцилиндра поворота ПДМ *Sandvik LH514*, из которого хорошо видно наличие значительного числа уплотнений, обеспечивающих надежную работу узла и понятна острая необходимость решения задачи повышения ресурса пары трения шток-уплотнение.

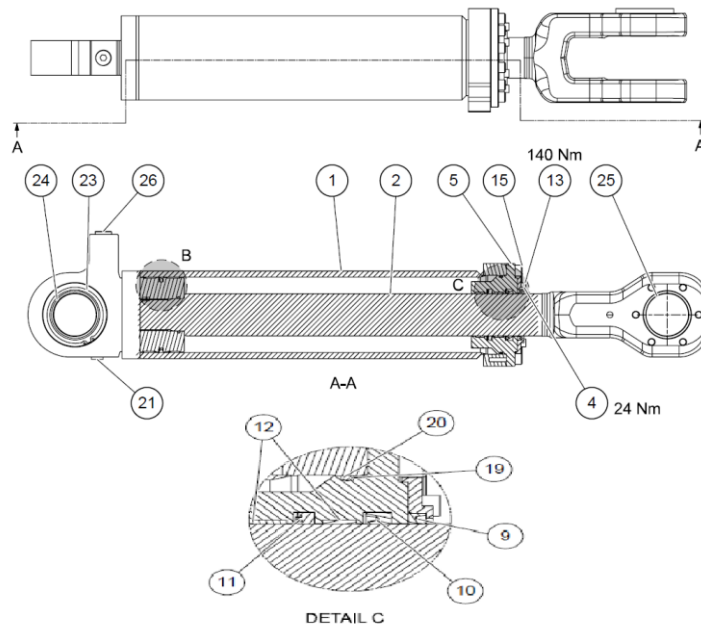


Рисунок 1.11 — Эскизный чертеж ПДМ Sandvik LH514 гидроцилиндра
№56014134

1 – гильза, 2 – шток, 4 – болт крышки, 5 – грундбукса, 9 – грязесъемник, 10,11 – уплотнение штока, 12 – направляющая штока, 13 – болт грундбуксы, 15 – крышка, 20 – кольцо уплотнительное (O-ring), 23 – подшипник, 24 – кольцо стопорное, 25 – втулка, 26 – заглушка

Основной и второй уплотнительный элемент штока (рисунок 1.12) обеспечивают герметичный контакт при скользящем движении между головкой цилиндра и штоком поршня. В зависимости от области применения система уплотнений штока может состоять из первичного уплотнения и вторичного или только из первичного уплотнения. Системы уплотнений штока для работы в тяжёлых условиях обычно состоят из комбинации обоих типов уплотнений.

Гидравлические цилиндры работают в различных областях применения и условиях окружающей среды, включающих воздействие пыли, грязи или внешних погодных условий. Чтобы предотвратить попадание этих загрязнений в узел цилиндра и гидравлическую систему, с внешней стороны грундбуксы устанавливаются грязесъёмники (рисунок 1.12). Грязесъёмники обеспечивают герметичный контакт со штоком поршня, когда оборудование неподвижно (статическое состояние, отсутствует возвратно-поступательное движение штока) и в процессе эксплуатации (динамическое состояние, происходит возвратно-

поступательное движение штока). Без грязесъёмника шток может переносить загрязнения в цилиндр. Наружное статическое уплотнение грязесъёмника внутри корпуса также играет важную роль в предотвращении проникновения через грязесъёмник влаги или загрязняющих частиц [24].

В дополнение к функции уплотнения как такового, уплотнения штока обеспечивают образование тонкой смазочной плёнки на штоке, которая смазывает как само уплотнение, так и грязесъёмник. Смазочный материал также защищает поверхность штока поршня от коррозии. Однако смазочная плёнка должна быть достаточно тонкой, чтобы во время обратного хода она возвращалась в цилиндр.

Также в гидроцилиндрах используются опорные и направляющие кольца (полосы) (рисунок 1.12). Они воспринимают радиальные нагрузки, действующие на узел цилиндра, и направляют шток в грядбуксе.

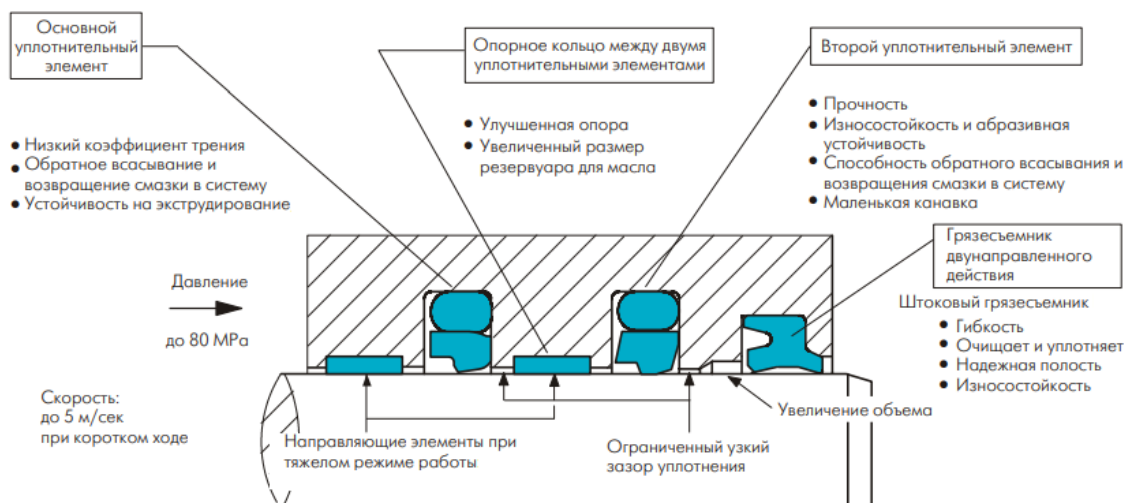


Рисунок 1.12 — Классическая схема конструкции уплотнения штока [25]

Для современных уплотнений применяют различные гиперупругие материалы, так называемые эластомеры - резина, полиуретановые и полиэфирные термоэластопласты, и фторопласты.

Рабочая скорость для эластомерных материалов находится обычно в пределах 0,1-0,5 м/с. Для фторопластовых материалов – до 5 м/с. Образование смазывающей пленки и трение в значительной степени зависят от скорости перемещения штока.

При скорости 0,05 м/с и ниже трение значительно увеличивается. При высоких температурах, когда снижается вязкость рабочей жидкости, может возникнуть явление «*Stick-slip*» (движение рывками). Для устранения данных проблем используют материалы с низким коэффициентом трения (например, политетрафторэтилен – *PTFE*) [26].

Одной из самых важных характеристик уплотнений является способность автоматически адаптироваться к изменяющимся условиям работы, поддерживая постоянную эффективность уплотнения при этом сводя к минимуму износ и трение. Это достигается при помощи изменения уплотняющего действия пропорционально давлению рабочей жидкости. Известно, что профиль уплотнения оказывает решающее влияние на упругую деформацию его уплотняющих кромок и на прилагаемую радиальную нагрузку в месте контакта с уплотняемыми поверхностями и, как результат, на поведение рабочей жидкости в гермоконтакте (рисунок 1.13). При недостаточной радиальной нагрузке пленка рабочей жидкости между уплотняющей кромкой и уплотняемой поверхностью достигает чрезмерной толщины, вызывая недопустимые утечки рабочей жидкости. Чрезмерная радиальная нагрузка, возникающая при работе на большом давлении, приводит к разрыву масляной пленки в гермоконтакте, даже во время движения. В этом случае недостаток смазки приводит к увеличению трения и быстрому повышению температуры, что резко сокращает долговечность уплотнения.

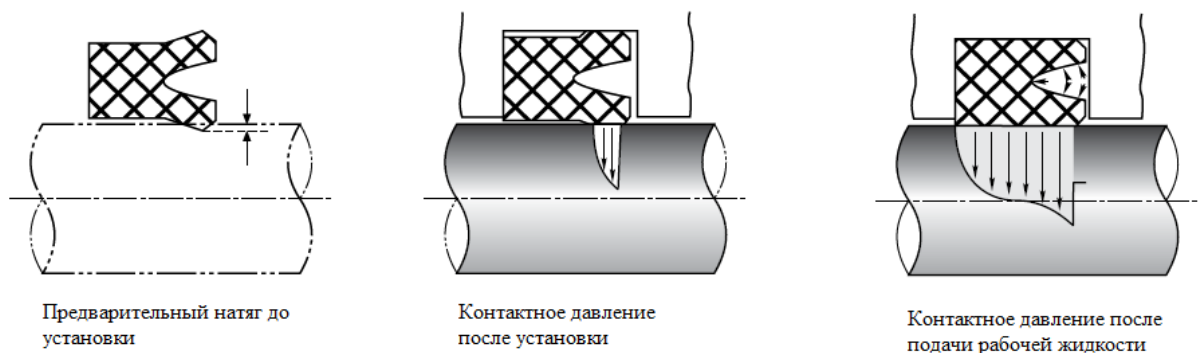
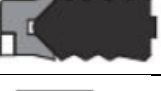


Рисунок 1.13 — Контактное давление уплотнения штока

Выбор штоковых уплотнений зависит от требований, определенных спецификой их применений, указанных в каталогах ведущих производителей

уплотнений, а после производится выбор по параметрам: диапазон давлений рабочей текучей среды в системе, а также частота и степень тяжести пиков давления, диапазон температур рабочей жидкости и компонентов узла цилиндра, как во время работы, так и в статическом состоянии, скорость хода поршня, совершающего возвратно-поступательное движение, тип и вязкость жидкости, используемой в системе, диаметры штока и отверстия, размеры канавок и зазоров уплотнения (если определены), общая длина цилиндра и длина хода цилиндра, а также характеристики обработки поверхности (если определены), оборудования, в котором будет использоваться цилиндр, и как он будет работать в оборудовании, а также условия монтажа, рабочие циклы и факторы окружающей среды (внешняя температура, загрязняющие вещества). Применяемые уплотнения в системе «уплотнения штока» в гидроцилиндрах ПДМ представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 — Применяемые уплотнения штока в гидроцилиндрах ПДМ

Профиль	Наименование	Материал	Применение
	Уплотнение штока	<i>NBR (PTFE)</i>	Мобильная гидравлика Прессы Горно-шахтные машины Сталелитейные машины Шлюзы
	Уплотнение штока	<i>NBR (PTFE)</i>	
	Уплотнение штока	<i>NBR (PTFE)</i>	
	Уплотнение штока	<i>NBR/TPE/POM</i>	
	Грязесъемник	<i>NBR (PTFE)</i>	
	Грязесъемник в металлическом корпусе	<i>NBR/Сталь</i>	
	Двойной грязесъемник	<i>NBR</i>	
	Направляющее кольцо штока	<i>POM/PTFE</i>	

Исходя из производственного опыта и анализа данных таблицы 1.2, наиболее применяемым материалом для уплотнений штоков ПДМ являются эластомеры, а именно *NBR* и *PTFE*.

1.3 Специфика механики контактного взаимодействия штока с уплотнением

Исследование механики контакта для самых разных узлов деталей, таких как подшипники, уплотнительные системы, механические передачи и другие, является чрезвычайно важным для описания напряженно-деформированного состояния тел и механики изнашивания в зависимости от принятых условий контакта, удельного контактного давления, микропрофиля поверхности и реологии материалов контактируемых элементов. Физические поверхности редко бывают идеально плоскими в местах соприкосновения. Кривизна или шероховатость поверхности часто приводят к тому, что контактные площади становятся чрезвычайно маленькими, и поэтому результирующие контактные давления и напряжения обычно относительно высоки. Во многих случаях это приводит к отказу или податливости в областях контакта. В частности, в металлических контактах часто наблюдается пластическая деформация. Такую пластическую деформацию следует рассматривать наряду с упругой деформацией, поэтому металлические контакты часто называют упруго-пластическими.

Основополагающая теория контакта Герца о контакте эллипсоидальных тел остается аналитической основой для большинства экспериментов по вдавливанию. При сферическом вдавливании соотношение Герца между приложенной силой (F) и результирующим вдавливанием (δ) вычисляется по формуле (1.1) [27].

$$F = \frac{4ER^{1/2}\delta^{3/2}}{3(1-\nu^2)}, \quad (1.1)$$

где ν – коэффициент Пуассона (коэффициент поперечного сжатия), E – модуль упругости (модуль Юнга), R – радиус индентора, δ – глубина вдавливания.

Радиус контакта a изменяется в зависимости от δ по формуле (1.2).

$$a = R^{1/2} \delta^{1/2} \text{ или } a = \sqrt{R\delta} \quad (1.2)$$

Поскольку контактная задача Герца основана на теории линейной упругости, то должна быть возможность определить меры напряжения и деформации, которые удовлетворяют соотношению Гука. Концепция аналогии между одноосным сжатием и сферическим вдавливанием была впервые исследована Табором [28; 29] для упруго-пластического вдавливания металлов и с тех пор распространена на другие классы материалов (полимеры, керамика, карбоны и стекло) [30–34].

Напряжения вдавливания (или среднего давления) σ^* и деформации ε^* определяются по формулам (1.3) и (1.4).

$$\sigma^* = \frac{F}{\pi a^2} \quad (1.3)$$

$$\varepsilon^* = 0,2 \frac{a}{R} \quad (1.4)$$

Безразмерный коэффициент деформации 0,2 был эмпирически определен [29] и подтвержден другими исследователями [35–37]. Определенные таким образом напряжение и деформация вдавливания аналогичны и при одноосном нагружении. Фактически, вдавливание — это, по сути, процесс сжатия, поскольку только край области контакта испытывает растяжение [27]. Деля напряжения на деформацию и заменив уравнения (1.1) и (1.2) для вдавливания Герца получается следующая линейная зависимость (Гука):

$$\sigma^* = \frac{20E}{3\pi(1-\nu^2)} \varepsilon^*, \quad (1.5)$$

где E — модуль нормальной упругости материала; ν — коэффициент Пуассона; ε^* — деформация.

При сравнении между вдавливанием и одноосным сжатием становится очевидным, что негуковские одноосные соотношения напряжение-деформация могут быть распространены на негерцевский контакт. В таблице 1.3 перечислены функции энергии гиперупругой деформации и соответствующие уравнения одноосного напряжения (σ) — растяжения (λ). Путем замены значений σ^* и ε^* , приведенных в (1.3) и (1.4) для напряжения и деформации, одноосные соотношения

преобразуются в уравнения контакта силы и радиуса контакта. Однако в большинстве инструментальных испытаний на вдавливание радиус контакта не является измеряемой величиной. Вместо этого прямо или косвенно отслеживают изменение глубины вдавливания с увеличением величины приложенной силы. Предполагая несжимаемость материала и то, что радиус контакта изменяется с глубиной вдавливания в соответствии с формулой (1.2), к лагранжовой одноосной системе Муни-Ривлина [38] применили альтернативное определение деформации, как $\varepsilon^* = a / R$ [30–32; 34; 39].

Тогда соотношение между приложенной силой и радиусом контакта при вдавливании сферического индентора определяется по формуле:

$$F = \pi B_1 \left(\frac{a^5 - 3Ra^4 + 3R^2a^3}{Ra^2 - 2R^2a + R^3} \right) + \pi B_2 \left(\frac{a^5 - 3Ra^4 + 3R^2a^3}{-a^3 + 3Ra^2 + R^3} \right), \quad (1.6)$$

где B_1 и B_2 — подгоночные параметры, связанные соотношением (1.7).

$$B_1 + B_2 = \frac{4E_0}{9\pi(1-\nu^2)}, \quad (1.7)$$

где E_0 — начальный или бесконечно малый модуль Юнга.

Таблица 1.3 — Функции энергии гиперупругой деформации и соответствующие уравнения напряжения – деформации при одноосном растяжении для известных моделей

Модель	Параметры (Потенциал энергии деформации (W) Одноосное напряжение (σ) – растяжение (λ) уравнение Начальный модуль сдвига (G_0))
Муни-Ривлин, Неогуковский материал [40; 41]	$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3)$ $\sigma = 2C_1(\lambda - \lambda^{-2}) + 2C_2(1 - \lambda^{-3})$ $G_0 = 2(C_1 + C_2)$ для Неогуковского материала $C_2=0$ подгоняемые коэффициенты: C_1 и C_2

Модель	Параметры (Потенциал энергии деформации (W) Одноосное напряжение (σ) – растяжение (λ) уравнение Начальный модуль сдвига (G_0))
Приведенный полином [40]	$W = \sum_{i=1}^N C_i (I_1 - 3)^i$ $\sigma = 2(\lambda - \lambda^{-2}) \sum_{i=1}^N C_i (\lambda^2 + 2\lambda^{-1} - 3)^{i-1}$ $G_0 = 2C_1$ подгоняемые коэффициенты: C_i
Огдена [42]	$W = \sum_{i=1}^N \frac{2C_i}{a_i^2} (\lambda_x^{a_i} + \lambda_y^{a_i} + \lambda_z^{a_i} - 3)$ $\sigma = \sum_{i=1}^N \frac{2C_i}{a_i} (\lambda^{a_i-1} - \lambda^{-a_i/2-1})$ $G_0 = \sum_{i=1}^N C_i$ подгоняемые коэффициенты: C_i и a_i
Фанга [43; 44]	$W = \frac{C}{2b} \{ \exp[b(I_1 - 3)] - 1 \}$ $\sigma = C(\lambda - \lambda^{-2}) \exp[b(I_1 - 3)]$ $G_0 = C$ подгоняемые коэффициенты: C и b
Ван-дер-Ваальса [45]	$W = C \left\{ -(I_{1m} - 3) \left[\ln \left(1 - \sqrt{\frac{I_1 - 3}{I_{1m} - 3}} + \sqrt{\frac{I_1 - 3}{I_{1m} - 3}} \right) - \frac{2}{3} b \left(\frac{I_1 - 3}{2} \right)^{3/2} \right] \right\}$ $\sigma = C(\lambda - \lambda^{-2}) \left[\left(1 - \sqrt{\frac{\lambda^2 + 2\lambda^{-1} - 3}{\lambda_m^2 + 2\lambda_m^{-1} - 3}} \right)^{-1} - b \sqrt{\frac{\lambda^2 + 2\lambda^{-1} - 3}{2}} \right]$ $G_0 = C$ подгоняемые коэффициенты: C и b

1.4 Обзор методов технологического обеспечения качества и требуемой микрогеометрии поверхности штока

При решении задач, направленных на повышение ресурса пар трения, особую значимость приобретают вопросы технологического обеспечения качества поверхности и, в частности, требуемого микрорельефа сопряженных поверхностей. Несущая способность поверхностного слоя во многом обусловлена не только свойствами материала и высотой единичных неровностей – микрогребешков поверхности, но в большей степени и их формой. Последнее становится особенно актуальным при значительной разнице в твердости и природе материалов сопряженных деталей, как в случае контакта металлического штока с неметаллическим уплотнением.

На рисунке 1.14 представлены различные виды поверхностного взаимодействия твёрдых тел между собой и рабочими средами при различных условиях эксплуатации горной техники и взаимосвязь контактных явлений с различными параметрами шероховатости поверхности, характерных для горных машин.

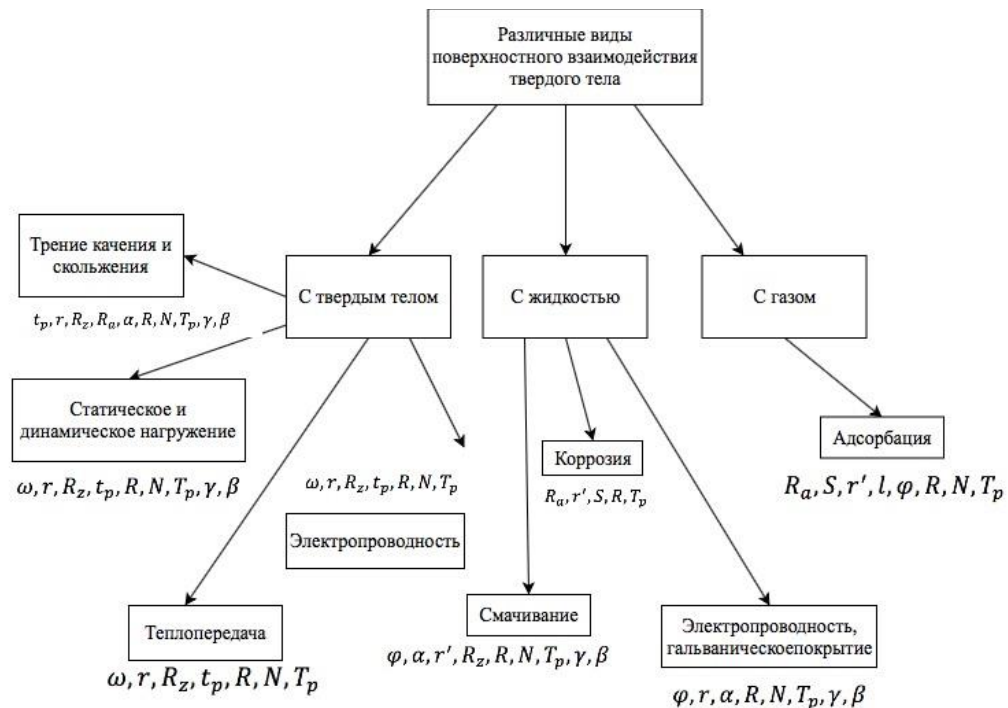


Рисунок 1.14 — Схема видов поверхностного взаимодействия твердого тела [46; 47]

Практика показывает, что широко применяемые для штоков такие методы отделочной обработки, как шлифование и полирование хоть и обеспечивают требуемую шероховатость поверхности по Ra до 0,32 мкм, вместе с тем, не позволяют достичь тот микропрофиль, который обеспечил бы наиболее благоприятные условия контакта штока с уплотнением. Так или иначе, любая абразивная обработка – предварительная или отделочная, включая тонкую, основана на принципе микрорезания и поэтому при возможности получения минимальной шероховатости форма единичных неровностей здесь все равно остается либо островершинной, либо имеет резкие ломаные переходы от плоских участков к боковым поверхностям, например, при трапециевидной форме микропрофля. Наряду с этим, на поверхности металла вследствие обработки резанием всегда присутствуют остаточные растягивающие напряжения [48; 49], что также снижает несущую способность поверхностного слоя, уменьшая заложенный ресурс.

Поверхность штока подвергается хромированию, чем обеспечивается достаточно высокая твердость и износостойкость поверхностного слоя. Альтернативных методов отделочной обработки высокотвердых поверхностей не так много, поэтому полирование является наиболее приемлемым как с технической, так и с экономической точек зрения. Безусловно, для деталей с тонкими покрытиями, в частности штока, оно обеспечивает требуемые параметры качества по шероховатости поверхности, но в то же время недостаточные для обеспечения должного ресурса при контакте с уплотнением в условиях циклического нагружения и трения. В связи с этим возникает необходимость в поиске других методов, обеспечивающих на заключительном этапе механообработки поверхностей дополнительный комплекс положительных свойств, и которые возможно применить к деталям с тонкопленочными покрытиями.

Так, одним из известных эффективных методов отделочной обработки деталей является обработка поверхностным пластическим деформированием (ППД). При этом, в зависимости от целей обработки, различают сглаживающую,

сглаживающе-упрочняющую и упрочняющую обработку. Широкое применение на практике нашла сглаживающе-упрочняющая обработка. При использовании ППД в технологическом процессе изготовления деталей изменяются физико-механические свойства поверхностного слоя, возникают благоприятные сжимающие напряжения, повышается твердость и прочность, уменьшается шероховатость поверхности, обеспечивается возможность получать регулярный микрорельеф с заданной формой единичных неровностей и требуемой площадью углублений, что в совокупности является одной из главных задач и достоинств применения ППД [50, с. 12-14].

Преимущества применения ППД: отсутствие эффекта микрорезания, малая шероховатость обработанной поверхности за один проход, отсутствие шаржирования абразивными зернами обрабатываемой поверхности и нагрева поверхностного слоя в процессе обработки, благодаря чему удастся избежать появления растягивающих термических напряжений, создание слоя с благоприятными сжимающими напряжениями, низкий коэффициент трения, увеличенная адгезия с покрытиями в случае обработки биметаллических деталей с покрытиями.[50, с. 12-14].

Согласно ГОСТ-18296-72 методы ППД классифицируются на статические и ударные методы обработки (рисунок 1.15). При статических методах обработки инструмент, рабочие тела или среда воздействуют на обрабатываемую поверхность с определенной силой P с малой скоростью приложения, происходит плавное перемещение очага воздействия последовательно по всей поверхности, подлежащей обработке. При этом инерционные силы не оказывают существенного влияния на ППД. К таким методам относятся различные виды выглаживания (рисунок 1.16, а) и накатывания (рисунок 1.16, б) [50, с. 11].

При ударных методах (рисунок 1.16, в) инструмент, рабочие тела или среда многократно воздействуют на всю обрабатываемую поверхность или на ее часть, при этом сила воздействия P в каждом цикле изменяется от нуля или от некоторого значения P_1 до максимума, а в случае локального ударного воздействия очаг

деформирования может (как и в статических методах) последовательно и равномерно проходить всю обрабатываемую поверхность [50, с. 11].

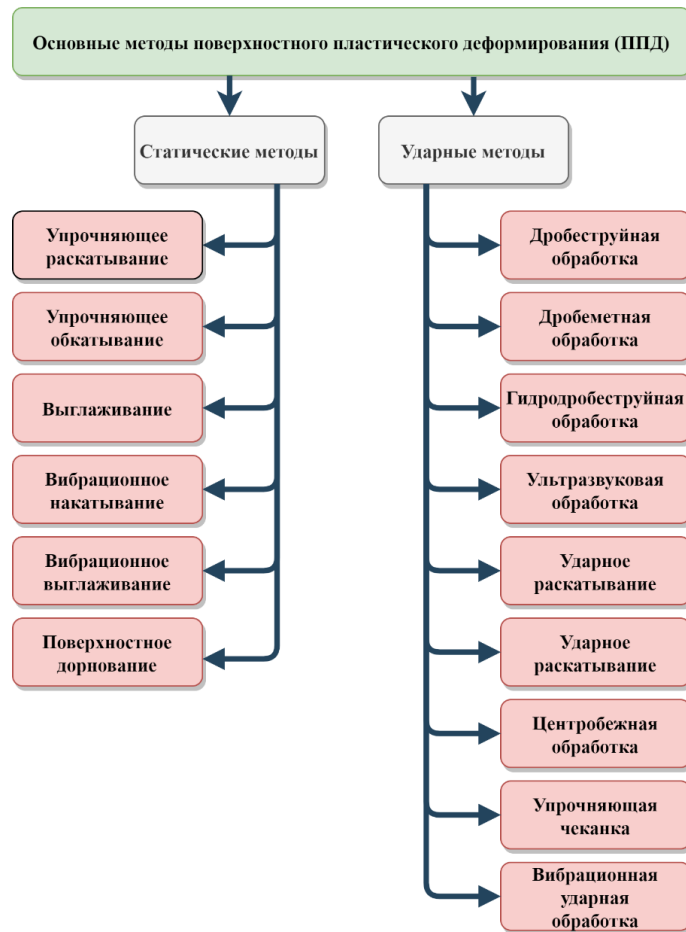


Рисунок 1.15 — Основные методы ППД

Все методы поверхностного упрочнения, кроме механического, требуют после себя окончательной обработки. Это вызвано эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к готовой детали: точностью геометрической формы, шероховатостью поверхности, износостойкостью и др. Однако операции механической обработки такие как: шлифование, полирование, суперфиниширование — существенно изменяют состояние поверхностного слоя детали, снижая в большинстве случаев эффект, полученный предварительным упрочнением. Возможность использования поверхностного механического упрочнения как отделочной операции, не требующей после себя дополнительной механической обработки резанием, выгодно отличает этот процесс от других методов упрочняющей обработки.

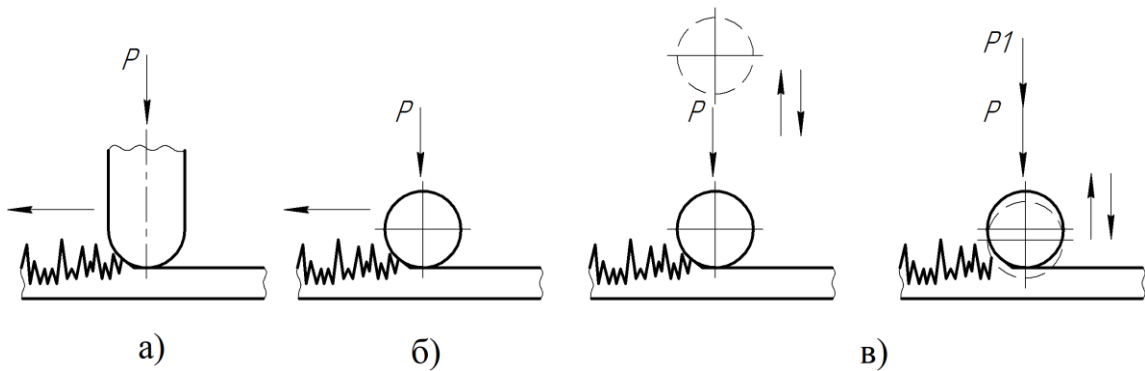


Рисунок 1.16 — Характер контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью при различных методах ППД

В современном машиностроении применяются многие виды поверхностного механического упрочнения. Широкое распространение получило поверхностное упрочнение деталей обдувкой дробью. Исследованиями многих авторов показано, что дробеструйный наклеп является эффективным методом повышения долговечности деталей, работающих в условиях циклических нагрузок. К достоинствам дробеструйной обработки следует отнести возможность обрабатывать изделия сложной геометрической формы [46; 48]. Недостатком данного метода является низкая производительность, особенно при обработке деталей из закаленных сталей, и высокая шероховатость поверхности. Дробеструйный наклеп не позволяет устранять некоторые погрешности геометрической формы деталей, полученные при предварительной механической обработке.

Обкатка роликами и шариками в качестве отделочной упрочняющей обработки поверхностей деталей используется в промышленности давно. Исследования процесса накатки показали, что он отличается высокой производительностью, сравнительно прост и с успехом может быть применен для повышения износостойкости и усталостной прочности деталей. Номенклатура обрабатываемых изделий чрезвычайно широка. Однако значительные усилия, необходимые для эффективного упрочнения закаленных сталей (особенно при обкатке роликами), не позволяют применять этот процесс при обработке тонкостенных деталей.

Дробеструйный наклеп, а также обкатка шариками и роликами стали классическими методами упрочнения ППД. Однако непрерывное совершенствование конструкции машин, а также повышение требования к их качеству, привело к тому, что с 1950-х годов были предложены новые методы ППД. Метод центробежного ударного наклепа получил широкое применение при обработке различных деталей. Интенсивное развитие вибрационного наклепа, позволяет, наряду с другими преимуществами обкатки, получать на поверхностном слое детали регулярный микрорельеф [51].

К разновидностям вибрационного наклепа относится и ультразвуковая обкатка. Наложение ультразвука позволяет значительно интенсифицировать процесс упрочнения, вследствие чего появляется возможность применять меньшие усилия обкатки, чем при обычной обработке шариками или роликами. Однако следует отметить недостатки данного процесса: необходимость специального приспособления или устройства, обеспечивающего вибрацию инструмента, и невозможность обработки деталей малой жесткости.

К наиболее перспективным методам исследования с начала 50-х годов 20-го века относится алмазное выглаживание, впервые предложенное фирмой *General Electric*[52].

Сущность метода алмазного выглаживания заключается в пластическом деформировании поверхностных слоев обрабатываемой детали алмазом (природный, синтетический), обладающим высокой твердостью, низким коэффициентом трения по металлу и малой шероховатостью (Ra 0,02–0,04 мкм), рабочая часть которого ограничена в виде сферы или цилиндра. Алмазный инструмент, прижимаясь с определенным усилием к детали, скользит по ней, вызывая сглаживание исходных микронеровностей и упрочняя ее поверхность[53].

Имея низкую производительность, по сравнению с обкаткой роликами и шариками, алмазное выглаживание обладает рядом преимуществ, вызвавших большой интерес к этому методу. Уже первые исследования [53] показали возможность применения алмазного выглаживания для повышения качества поверхностного слоя и уменьшения износа деталей. Использование алмаза с малым

радиусом рабочей части позволяет эффективно упрочнять закаленные стали при небольших давлениях (50-400 Н) на них. В связи с этим возникает возможность упрочнять тонкостенные детали, которые нельзя обрабатывать другими методами ППД без нарушения их геометрической формы. Малые рабочие усилия позволяют использовать прецизионные станки, не нарушая точности последних. При алмазном выглаживании может быть достигнута шероховатость до $Ra\ 0,08\ \mu\text{м}$ [52]. Большие возможности открываются при использовании алмазного выглаживания для отделочной обработки деталей с тонкопленочными покрытиями [54].

1.5 Цель и задачи исследования

В результате анализа статистических данных ПАО «ГМК Норильский никель» и ряда литературных источников установлено, что одной из насущных и серьезных проблем, возникающих при эксплуатации ПДМ, является преждевременная потеря работоспособности гидроцилиндров по причине износа уплотнений и штока. Это приводит к разгерметизации гидроцилиндров, необходимости вывода ПДМ из эксплуатации и выполнения внепланового ремонта, что сопряжено со значительными финансовыми потерями, учитывая высокую трудоемкость ремонта рудничной техники.

Выявлено, что существенным резервом в вопросах повышения ресурса пары трения шток-уплотнение является установление и достижение требуемого микропрофиля поверхности хромированного штока, обеспечивающего благоприятные условия контакта с уплотнением. Для этого необходимо проведение исследования напряженно-деформированного состояния материала уплотнения при контакте со штоком с учетом формы гребешков шероховатости поверхности штока и свойств материала уплотнения. Также чрезвычайно важен правильный выбор метода отделочной обработки штока. Однако представленные в литературных источниках и научных трудах данные по обеспечению благоприятного микропрофиля поверхностей трения получены и рекомендованы преимущественно для компактных материалов, пар трения в сочетании «металл-

металл» или биметаллических деталей с толщиной покрытий до 1 мм, работающих в условиях граничной смазки. Исследования и рекомендации по обеспечению требуемого микропрофиля для деталей с хромированной поверхностью на этапах отделочной обработки практически отсутствуют. Исследования влияния микропрофиля штока на ресурс пары трения шток-уплотнение также весьма ограничены. В связи с этим были сформулированы цель работы и задачи настоящего исследования.

Цель работы: повышение ресурса гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин на основе разработки эффективной технологии отделочной обработки хромированного штока, обеспечивающей требуемые макро- и микрогеометрические параметры его рабочей поверхности и высокие эксплуатационные свойства пары трения «шток-уплотнение».

Задачи исследования:

1. Анализ конструкции, специфики эксплуатации и причин отказов гидроцилиндров ПДМ на основе данных производственной статистики.
2. Выявление требований и обоснование параметров микрогеометрии поверхностного слоя штока, обеспечивающих наиболее благоприятные условия контакта штока с уплотнением.
3. Исследование влияния микрогеометрии поверхности штока на эксплуатационные свойства и ресурс сопряжения шток-уплотнение.
4. Выявление, анализ и разработка технологических методов уменьшения макрогеометрических погрешностей штока после твердого хромирования.
5. Разработка технологических методов обеспечения рациональных параметров микропрофиля штока, отвечающих заданным требованиям по условиям контакта и ресурсу деталей сопряжения шток-уплотнение.
6. Исследование влияния микрогеометрии поверхности хромированного штока, обработанного алмазным выглаживанием, на ресурс трибосопряжения шток-уплотнение.

Глава 2. Обоснование требований к микропрофилю поверхности штока для условий контакта с уплотнением

2.1 Исследование влияния параметров микропрофиля штока на характер контакта с уплотнением

Известно, что износостойкость пар трения во многом обусловлена микрогеометрическими характеристиками сопряженных поверхностей, так как именно микрогребешки поверхности первыми вступают в контактное взаимодействие, воспринимая внешнюю нагрузку и обеспечивая фактическую площадь контакта поверхностей и условия распределения смазочного материала на границе контакта. При этом для каждой конкретной пары трения в зависимости от условий смазки и назначения (вал-подшипник скольжения, шарико-винтовая передача, фрикционные передачи, ременные передачи и др.) рекомендуются строго определенные параметры как по высоте микронеровностей, так и по геометрической форме.

Существует прямая зависимость между качеством сопрягаемой поверхности штока и характеристиками уплотнения: чем лучше отделка, тем дольше прослужит уплотнение. Фактически, оптимальная обработка, обеспечивающая требуемые параметры микропрофиля поверхности, может обеспечить конкурентное преимущество в долговечности и эксплуатационных характеристиках уплотнения [55].

Основными показателями качества поверхности являются физико-механические свойства поверхностного слоя, выражаемые пределом прочности материала на растяжение σ_b или его твердостью, параметры размерной точности и шероховатости поверхности Ra , Rz . Вместе с тем, что касается характеристик шероховатости, высотных параметров Ra или Rz сопрягаемой поверхности штока или среднего значения шероховатости недостаточно для правильной оценки качества конкретной поверхности, потому что вполне возможно иметь очень разные текстуры поверхности с аналогичными значениями Ra , и эти различия

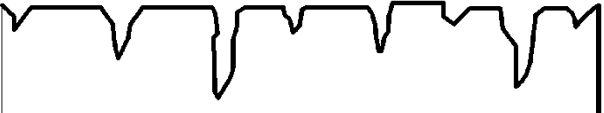
могут сильно повлиять на рабочие характеристики уплотнения и уровень износа [55]. Поэтому необходимо оценивать не только высоту профиля поверхности, но и форму профиля шероховатости поверхности трения в соответствии с DIN EN ISO 4287. В связи с этим для поверхностей деталей пар трения более актуальное значение приобретает коэффициент смятия профиля (КСП) Rmr , который в большей степени и определяет условия контакта деталей сопряжений.

В таблице 2.1 приведены три профиля, каждый из которых имеет одинаковые показатели по Rz и Ra . Разница в несущей способности поверхности становится очевидной, когда сравниваются профили микрогребешков по параметру Rmr . Так, форма замкнутого и сферического профилей с КСП $Rmr = 70\%$, обеспечивают лучшие условия контакта при работе пары трения и, следовательно, более высокие эксплуатационные характеристики деталей [55].

В соответствии с [56] и [57], согласно международному стандарту ISO P 468, для уплотняемых поверхностей обычно задают три параметра шероховатости Ra (Rz) и $Rmax$ и один шагово-высотный t_p .

На рисунке 2.1 параметр t_p – относительная опорная длина профиля, P – уровень сечения профиля от линии выступов. В соответствии с ГОСТ P выбирается в процентах от $Rmax$. Для уплотняемых поверхностей этот показатель должен находиться в диапазоне $50\% \leq t_{50} \leq 90\%$ при уровне $P = 50\%$ от $Rmax$.

Таблица 2.1 — Профили поверхностей

Модели профиля поверхности	Профиль поверхности	Ra	Rz	Rmr
Замкнутый профиль		0,2 мкм	1,0 мкм	70 %
Открытый профиль		0,2 мкм	1,0 мкм	15 %
Сферический профиль		0,2 мкм	1,0 мкм	70 %

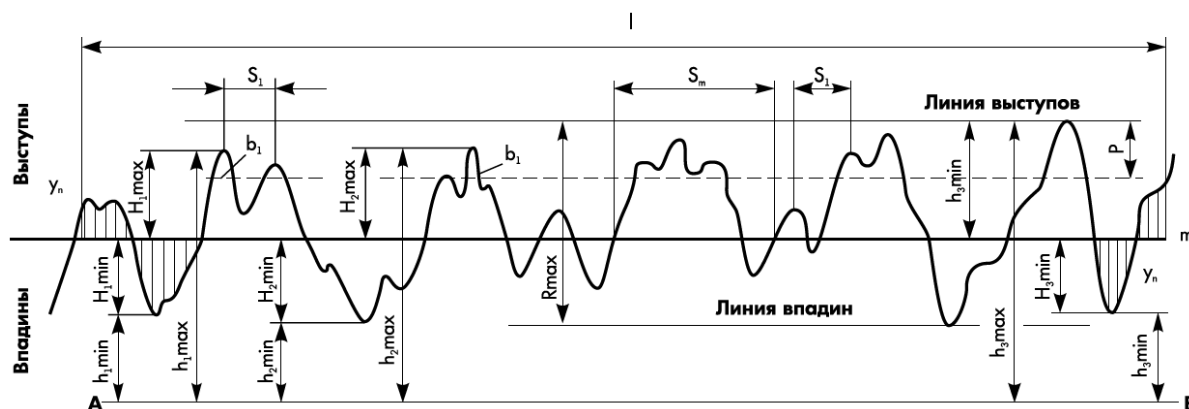


Рисунок 2.1 — Схема шероховатости поверхности и ее элементы

На сегодняшний день на Российском рынке измерительных приборов, в частности профилометров для измерения параметров шероховатости, преобладают приборы импортного производства, которые определяют параметры шероховатости не по ГОСТ, а по ISO 4287-1997. С замерами параметров Ra (Rz) и $Rmax$ проблем нет, т. к. они соответствуют ГОСТ и ISO. Параметр t_p в ISO 4287-1997 отсутствует, поэтому предлагается использовать его аналог – относительную опорную длину профиля, величину $Rmr(c)$, где «C» соответствует «P», но берется в долях от Rz .

Перечисленные параметры описывают только топоологию поверхности, но не ее абразивные свойства. Поэтому рекомендуется выполнять финишную обработку поверхностей деталей гидроцилиндров - гильз и штоков, обкаткой роликами, алмазным выглаживанием или накатным полированием (ППД), т. е. без снятия материала, только за счет деформационного сглаживания и упрочнения. При этом на уплотняемых поверхностях не допускается наличие следов коррозии, раковин, царапин, задигов [58].

Для уплотнительных систем гидроцилиндров существует зависимость [59; 60] между силой трения и шероховатостью поверхности, которая показана на рисунке 2.2.

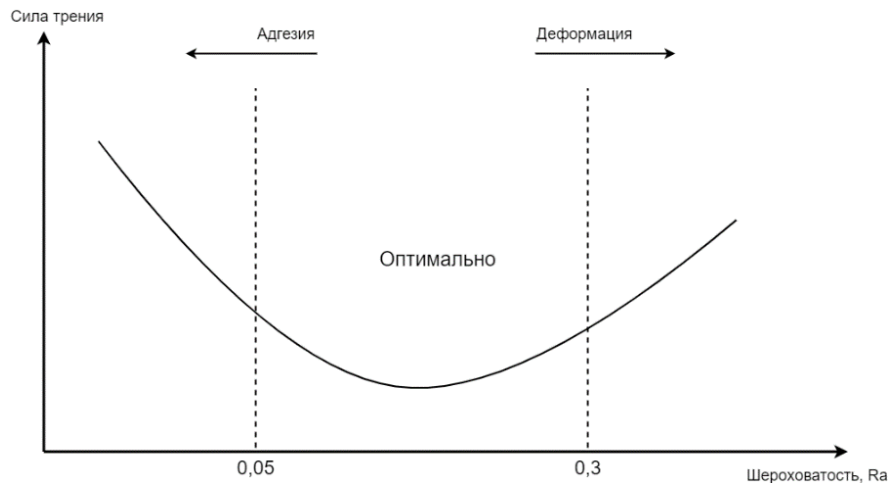


Рисунок 2.2 — Оптимальный диапазон шероховатости для уплотняемой поверхности

Дополнительные сведения о текстуре рельефа могут быть получены из анализа кривой опорной поверхности (*Bearing ratio curve*) или по-другому она известна как кривая Эбботта-Файрстоуна, пример которой представлен на рисунке 2.3, дающей более полную информацию о характеристиках профиля поверхности. Наклон в конце кривой отображает впадины профиля, которые служат в качестве резервуаров для смазочного материала, а также начальный износ (приработка уплотнения).

Чтобы оценить начальный износ уплотнения, в *ISO13565-2:1996* введены такие параметры шероховатости, определяемые с помощью кривой Эббота-Файрстоуна, как:

- средняя высота выступов профиля (Rpk), характеризующая высоту выступов, быстро изнашивающихся в первый период эксплуатации, значительно влияющая на время приработки поверхностей трения. Для сокращения времени первого периода необходимо стремиться к снижению параметра Rpk ;

- средняя высота центральной области профиля шероховатости, длительное время находящаяся в работе и являющаяся несущей площадью по мере срабатывания наружных слоев (Rk), влияющая на эксплуатационные свойства и определяющая срок службы поверхностей трения;

– средняя глубина впадин профиля (Rvk), характеризующая маслосъемность поверхностей трения; с увеличением параметра Rvk возрастает маслосъемность и уменьшается коэффициент трения;

– относительная материальная составляющая к выступам (Mr_1) – доля материала в процентах, отделенная линией, разделяющая выступы от сердцевины профиля;

– относительная материальная составляющая к впадинам (Mr_2) – доля материала в процентах, отделенная линией, разделяющая впадины от сердцевины профиля;

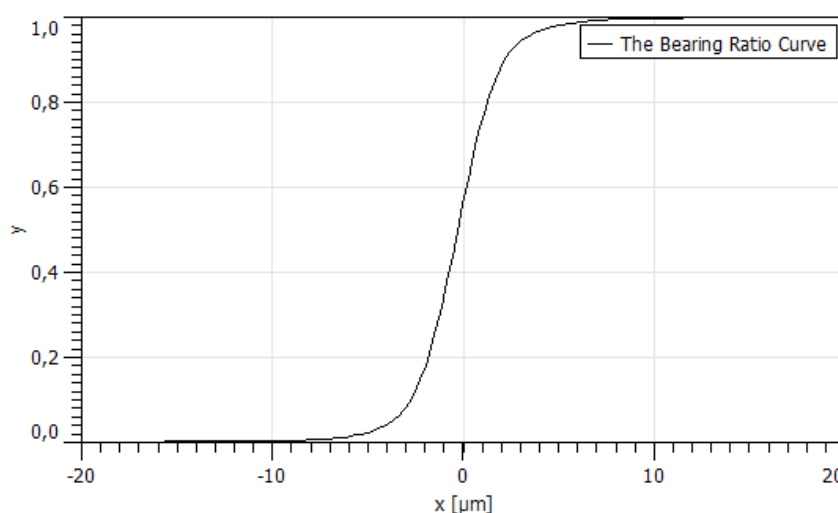


Рисунок 2.3 — Кривая опорной поверхности (кривая Эббота-Файрстоуна)

На рисунке 2.4 приведена графическая интерпретация этих параметров шероховатости с использованием кривой Эббота-Файрстоуна.

При одновременном уменьшении величины параметра Rpk и уменьшении процентного значения Mr_1 происходит повышение доли материала, приходящегося на участок выше средней линии профиля (впадины), что увеличивает фактическую площадь контакта сопрягаемых деталей.

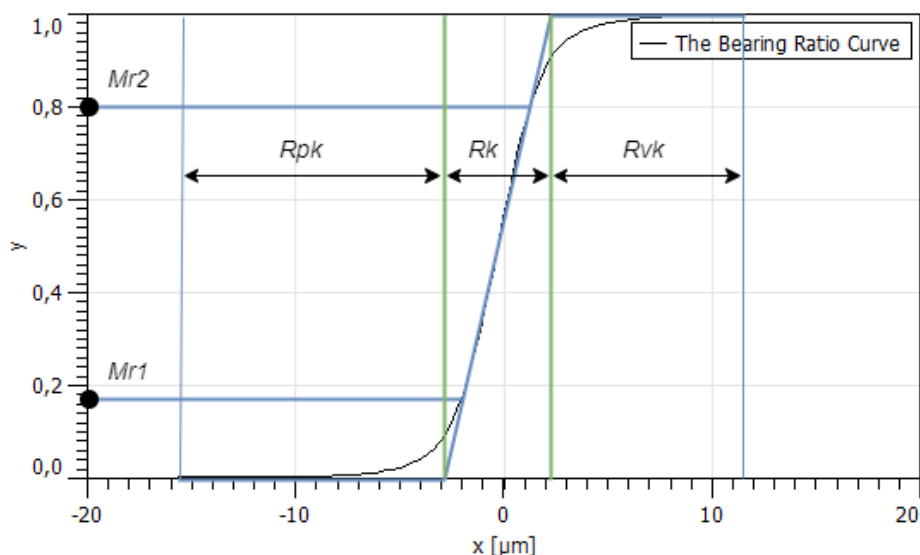


Рисунок 2.4 — Определение параметров Rk , Rpk , Rvk , $Mr1$ и $Mr2$

Итогом оценки получаемых параметров, прогнозирующих повышение износостойкости, является вид средней части кривой и численные значения параметров Rpk и Rk . При этом большую долговечность имеют поверхности с более пологой опорной кривой и меньшими значениями параметров Rpk и Rk . Кривая опорной поверхности после приработки в период установившегося изнашивания становится более полой, что соответствует и более высокой её износостойкости.

Материальное соотношение Rmr (в ГОСТ t_p) является выраженным в процентах отношением части профиля, занятой материалом, к длине оценки l_n определенным на уровне сечения s и выражается уравнением (2.1)

$$R_{mr} = \frac{1}{l_n} (L_1 + L_2 + \dots L_n) \times 100 [\%] \quad (2.1)$$

Кривая Эббота-Файерстоуна также позволяет определить материальное соотношение Rmr (рисунок 2.5) в зависимости от уровня сечения s . Она описывает отношение длины заполнения материалом к оценочной длине при выраженной в процентах заданной глубине сечения s .

Уровнем сечения s называют расстояние между используемой линией сечения и выбранной базовой линией C_{ref} .

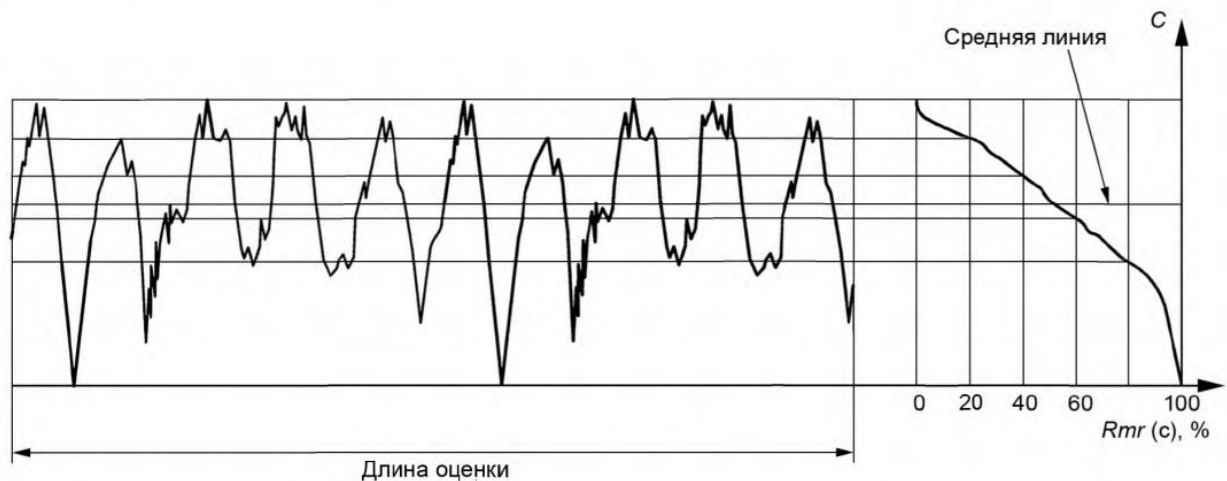


Рисунок 2.5 — Определение параметра Rmr

В итоге для повышения долговечности и эксплуатационных характеристик уплотнений и штока необходимо иметь на поверхности штока форму сферического профиля или форму замкнутого профиля с материальным соотношением Rmr $70 \div 95\%$, при этом шероховатость поверхности Ra штока не должна быть ниже $0,05$ мкм и не выше $0,3$ мкм.

2.2 Исследование контактного взаимодействия поверхности штока с уплотнением

Вязкоупругие материалы, из которых выполняют современные уплотнения, могут демонстрировать сильно зависящие от времени отклики при различных периодах нагрузки и рабочих температурах, такие как мгновенная эластичность, эластичность с задержкой и вязкое течение. Когда к вязкоупругому материалу прикладывается постоянная деформация при одноосном испытании, материал может релаксировать, и для поддержания того же уровня деформации требуется меньшее напряжение [10; 61]. Чтобы охарактеризовать вязкоупругость такого материала, функция модуля релаксации $\psi_r(t)$ определяется как отношение значения напряжений к постоянной деформации [62].

$$\psi_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (2.2)$$

Точно также функция податливости используется для представления поведения ползучести вязкоупругого материала при постоянном напряжении.

$$\phi_e(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (2.3)$$

С аналитической точки зрения реакции вязкоупругости можно смоделировать как группу пружин и амортизаторов. Простая модель Максвелла состоит из последовательно соединенных одной пружины и демпфера. Обобщенная модель Максвелла имеет несколько блоков элементов Максвелла, соединенных параллельно [62] (также называемых моделью Вейхерта, если включена свободная пружина), как показано на рисунке 2.6. В этой модели напряжения от каждого блока накладываются и эффективный модуль релаксации выражается в виде уравнения:

$$\psi_r(t) = \left[g_0 + \sum_{i=1}^n g_i \exp(-t / \tau_i) \right] H(t), \quad (2.4)$$

где τ_i – время релаксации одной элементной модели, равное отношению демпферной вязкости η_i к жесткости пружины g_i , $H(t)$ – ступенчатая функция Хевисайда.

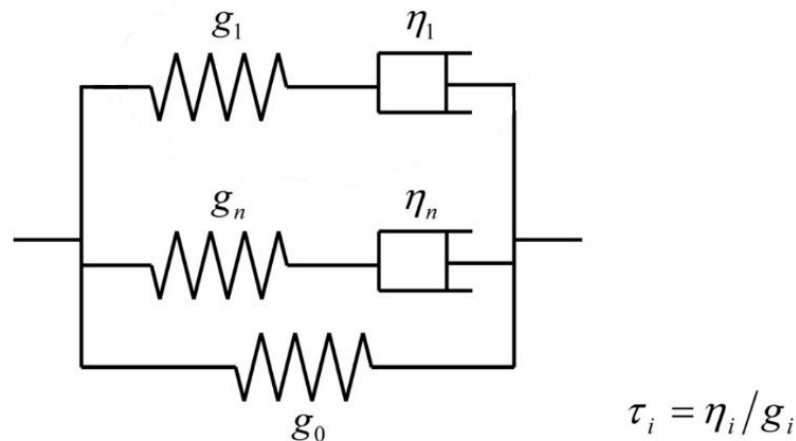


Рисунок 2.6 — Схема обобщенной модели вязкоупругости Максвелла

Естественный спектр времен релаксации вязкоупругого материала можно описать, включив в уравнение столько экспоненциальных членов, сколько необходимо (уравнение (2.4) [62].

Реакция вязкоупругого материала на произвольный профиль деформации может быть получена путем разложения нагружения на небольшие этапы. Здесь предполагается линейная вязкоупругость. Следовательно, результаты напряжений от этих небольших ступенчатых нагрузок могут быть масштабированы и наложены друг на друга для получения окончательных откликов на напряжения. Изменение напряжения может быть выражено следующим наследственным интегралом Больцмана уравнение [62]:

$$\sigma(t) = \int_0^t \psi_r(t-\xi) \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi \quad (2.5)$$

Аналогичное уравнение для деформации может быть получено подобным образом, если материал подвергается повторному нагружению [63].

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \phi_c(t-\xi) \frac{d\sigma(\xi)}{d\xi} d\xi \quad (2.6)$$

В отличие от эластичного материала, податливость и модуль функции вязкоупругости не являются взаимно обратными. После применения преобразования Лапласа к уравнениям (2.5) и (2.6), получается уравнение:

$$\overline{\phi_c}(s) \overline{\psi_r}(s) = \frac{1}{s^2}, \quad (2.7)$$

где s – переменная преобразования Лапласа.

Следовательно, соотношение функций податливости и модуля во временной области может быть получено с помощью обратного преобразования уравнения:

$$\int_0^t \phi_c(\xi) \psi_r(t-\xi) d\xi = t \quad (2.8)$$

Принцип соответствия обеспечивает метод решения вязкоупругих задач путем заимствования существующих упругих решений. В области преобразования Лапласа или Фурье вязкоупругие определяющие уравнения эквивалентны соответствующим уравнениям упругости. Упругое решение можно использовать в области преобразования, если граничное условие обрабатывается надлежащим образом, а результаты могут быть преобразованы обратно во временную область.

Авторы [64] предложили вязкоупругое решение контакта шар-плоскость, используя интегральный оператор вязкоупругости в упругом решении Герца. Контактное решение при известном профиле нагрузки [64] представлено уравнением:

$$a(t)^3 = \frac{3(1-\nu)R}{4} \int_0^t \phi_c(t-\xi) \frac{dW(\xi)}{d\xi} d\xi, \quad (2.9)$$

где $W(t)$ – нормальная нагрузка, R – радиус индентора, $a(t)$ – радиус контакта. Соответствующее решение по Герцу представлено уравнением:

$$a^3 = \frac{3(1-\nu)}{8\mu} \quad (2.10)$$

В уравнении (2.9) вязкоупругая податливость ползучести используется для замены константы упругости $1/2\mu$. Используя оператор релаксации вязкоупругого материала, решение для контактного давления $p(r,t)$ можно выразить как [27]:

$$p(r,t) = \frac{2}{\pi R(1-\nu)} \int_0^t \psi_r(t-\xi) \frac{d}{d\xi} \left[\text{Re} \left(\sqrt{a^2(\xi) - r^2} \right) \right] d\xi \quad (2.11)$$

Авторы [64] также указали, что контактное решение в уравнениях (2.9) и (2.11) справедливы только тогда, когда площадь контакта монотонно увеличивается. Если решение используется для случая, когда нагрузка на вдавливание уменьшается после достижения пикового значения, в зоне контакта возникнет неожиданное отрицательное давление.

Уравнение нормального смещения поверхности, вызванное контактным давлением, необходимо для постановки контактной задачи. Для линейно-упругого материала нормальное перемещение u_3 распределенным поверхностным давлением $p(x'_1, x'_2)$ можно сформулировать интегралом Буссинеска [27]:

$$u_3(x_1, x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(1-\nu)p(x'_1, x'_2) dx'_1 dx'_2}{2\pi\mu \sqrt{(x_1 - x'_1)^2 + (x_2 - x'_2)^2}} \quad (2.12)$$

Следуя принципу соответствия, решение о перемещении вязкоупругой поверхности может быть получено на основе манипуляций с упругим решением уравнения (2.12):

1. замена модуля упругости $1/2\mu$ на вязкоупругую податливость ползучести;

2. разделение давления во временной области на бесконечно малые интервалы, $\frac{\partial p}{\partial \xi}$;

3. наложение вкладов давлений во все интервалы времени с помощью наследственного интеграла, $\int_0^t () d\xi$.

Нормальное перемещение поверхности, $u_3(x_1, x_2, t)$, в момент времени t на вязкоупругой поверхности можно выразить как

$$u_3(x_1, x_2, t) = \int_0^t \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x_1 - x'_1, x_2 - x'_2, t - \xi) \times \frac{\partial p(x'_1, x'_2, \xi)}{\partial \xi} dx'_1 dx'_2 d\xi, \quad (2.13)$$

где $G(x_1, x_2, t) = \frac{(1-\nu)\varphi_c(t)}{\pi\sqrt{x_1^2 + x_2^2}}$ – функция Грина, представляющая профиль

деформации на вязкоупругом полупространстве под действием единичной сосредоточенной силы. Уравнение (2.13) показывает, что смещение вязкоупругого материала зависит от давления в ходе всего процесса контакта (или эффекта памяти).

Рассмотрим жесткий шар, находящийся в контакте с вязкоупругим телом, как показано на рисунке 2.7. Подход с нормальным контактом приводит к распределенному межфазному давлению p и поверхностной деформации u_3 , которые должны удовлетворять основным уравнениям контакта [27]:

$$\int_{A_c} p(x_1, x_2, t) dx_1 dx_2 = W(t) \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} h(x_1, x_2, t) &= h_0(x_1, x_2) + u_3(x_1, x_2, t) - \delta = 0, \\ p(x_1, x_2, t) &> 0, A_c(t) \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} h(x_1, x_2, t) &= h_0(x_1, x_2) + u_3(x_1, x_2, t) - \delta > 0, \\ p(x_1, x_2, t) &= 0, A_c(t) \end{aligned} \quad (2.16)$$

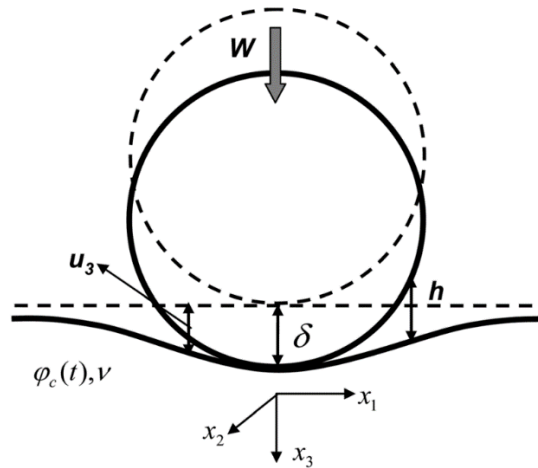


Рисунок 2.7 — Контакт жесткой сферы с вязкоупругим полупространством

где $A_c(t)$ – реальная площадь контакта в момент времени t , h – поверхностный зазор, h_0 – начальный поверхностный зазор, δ – приближение твердого тела (или глубина вдавливания).

Для сферы радиусом R выполняется аппроксимированное соотношение $h_i = (x_1^2 + x_2^2) / 2R$, если размер индентора намного больше размера контактной площадки [27]. Уравнение (2.14) представляет собой уравнение равновесия мгновенной силы. Уравнения (2.15) и (2.16) позволяют определить давление и поверхностный зазор в контактной и неконтактной областях соответственно. Однако в текущей модели не учитывается поверхностная адгезия (т. е. растяжение (отрицательное давление) на границе контакта не допускается).

Изначальный плотный контакт штока с уплотнением (рисунок 2.8) изменяется вследствие износа как самого уплотнения, так и поверхности штока. При этом немаловажную роль в активации процесса изнашивания играет микропрофиль штока непосредственно контактирующий с поверхностью уплотнения. Таким образом, требует решения задача обеспечения на штоке благоприятного микрорельефа, с желательно большим радиусом выступов микропрофиля, обеспечивающего наиболее плотное прилегание штока к уплотнению и предотвращающего истирающие (механическое) воздействие на уплотнение при возвратно-поступательном движении.

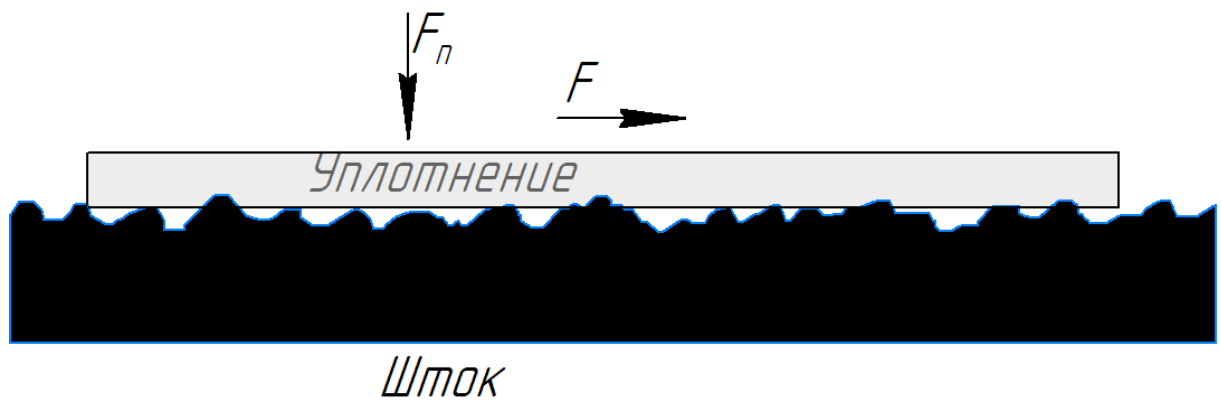


Рисунок 2.8 — Схема контакта штока и уплотнения

Решение данной задачи требует исследования контактного взаимодействия штока как жесткого тела с вязкоупругой поверхностью уплотнения с целью определения фактической площади контакта двух тел и соответственно наиболее рационального микропрофиля поверхности и его параметров, и метода получения.

Ранее было доказано [65], что формирование шероховатости поверхности трения в процессе приработки контактирующих тел зависит от других ее характеристик, в частности волнистости, макроотклонения и упрочнения. Применительно к контакту штока с уплотнением, ввиду большой разницы твердости двух контактирующих поверхностей, из указанных параметров доминирующее влияние на характер контакта будет оказывать макроотклонение, микропрофиль поверхности и упрочнение, поскольку в процессе приработки непосредственно в зоне трения имеет место контакт твердых вершин микрогребешков штока с менее твердой поверхностью уплотнения. При наличии сглаженного профиля штока исключается процесс срезания вершин гребешков и, соответственно, негативное влияние на состояние поверхности уплотнения.

Исследованиями контакта шероховатых поверхностей занимались такие ученые, как А.В. Верховский (первооткрыватель), Ф.П. Боуден, Д. Тейбор, В.А. Журавлев, И.Ф. Ачард, В. Линкольн, А. Лодж, Н. Хоувелл, И.В. Крагельский, Л.Ф. Бессонов, Е.М. Шевцова, Н.Б. Демкин, Я.А. Рудзит, А.М. Керопян.

Как показано в работе [66], контактирование двух тел (рисунок 2.10, а) начинается с поверхностей, которые имеют шероховатость, волнистость и

макроотклонения. Это приводит к дискретности их взаимодействия, а также разделению площадей контакта на номинальную A_n , контурную A_c и фактическую A_f (рисунок 2.10 – б).

Когда две номинально плоские поверхности находятся в контакте, шероховатость поверхности вызывает контакт в дискретных пятнах контакта (стыках). Деформация происходит в области пятен контакта, создавая напряжения, которые противодействуют приложенной нагрузке. Сумма площадей всех пятен контакта составляют реальную (истинную) площадь контакта, и для большинства материалов с приложенной нагрузкой это будет только небольшая часть видимой (номинальной) площади контакта (той, которая имела бы место, если бы поверхности были идеально гладкими; плавными). Реальная площадь контакта зависит от поверхности, топографии, свойств контактируемых материалов и условия межфазного нагружения. Близость выступов приводит к адгезионным контактам, вызванным межатомными взаимодействиями. Когда две поверхности движутся относительно друг друга, адгезия этих неровностей и другие источники взаимодействия поверхностей вносят вклад в силу трения. Повторяющиеся поверхностные взаимодействия, а также поверхностные и подповерхностные напряжения, возникающие на границе раздела, приводят к образованию частиц износа и возможному разрушению.

Шероховатость контактирующих поверхностей влияет на режим трения покоя в части предельного перемещения и коэффициента трения покоя. Авторы [67] исследовали влияние шероховатости поверхности в предельном перемещении между полимерной пластиной и стальным цилиндром. Они обнаружили, что предельное смещение уменьшается с увеличением среднего значения параметра шероховатости R_a стального контртела, затем проходит через минимум и, наконец, увеличивается с увеличением R_a , как схематично показано на рисунке 2.9. Также была обнаружена зависимость между коэффициентом статического трения и величиной шероховатости поверхности (R_a) контртела. Они объяснили такое поведение наличием адгезионной и деформационной составляющих трения.

Эффекты адгезии уменьшаются в зоне I (рисунок 2.9), когда Ra увеличивается из-за уменьшения количества и размера соприкасающихся неровностей, что приводит к уменьшению уровня трения. В области II пахотная составляющая трения увеличивается с ростом Ra , в результате коэффициент трения покоя, а также предельное смещение, увеличиваются в этом домене.

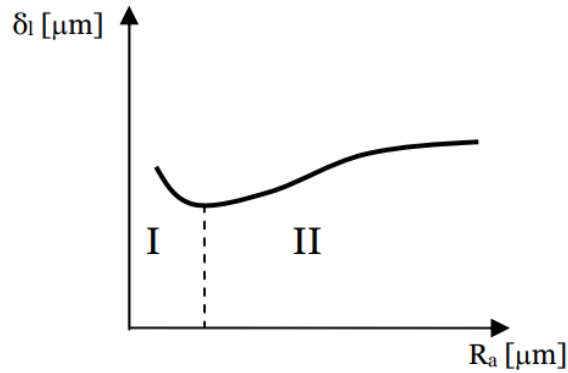


Рисунок 2.9 — Влияние шероховатости поверхности на предельное перемещение

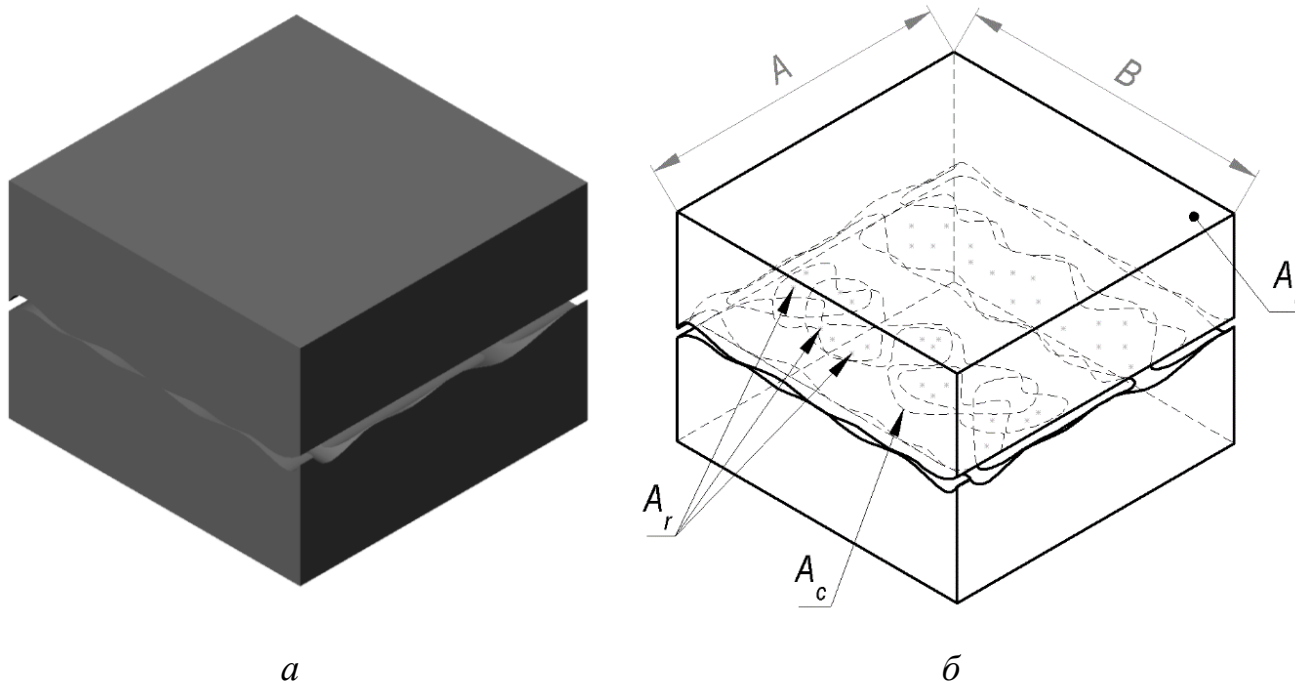


Рисунок 2.10 — Площадь контакта

В работе [66] Н.Б. Демкин отмечает, что: «Под номинальной площадью касания понимается та поверхность Aa , при которой соприкасались бы два идеально гладких тела. Данная поверхность характеризуется геометрией контакта,

приложенной нагрузкой и физико-механическими свойствами взаимодействующих тел».

Контурная площадь касания A_c равна сумме площадок, ограниченных контурами, в которые вписаны области с близлежащими площадками фактического контакта. Контурные площадки легко обнаруживаются при проверке качества сопряжения деталей на краску – это пятно касания или пятно контакта.

В работах [2, 4] Н.Б. Демкин и И.В. Крагельский отмечают, что: «Фактическая площадь контакта A_f зависит от микро - и макрогеометрии поверхностей, волнистости, физико-механических свойств поверхностного слоя и от нагрузки. При небольшой нагрузке ее рост сопровождается увеличением размеров площадок контакта. С дальнейшим ростом нагрузки увеличивается число площадок касания при сохранении размеров их почти неизменными». Исследованиями [66] установлено, что при высоких нагрузках площадь фактического контакта не превышает 40% номинальной площади. Из изложенного следует, что при взаимодействии реальных шероховатых поверхностей характер взаимодействия должен зависеть от фактической величины площади их контакта.

Проблема объяснения того, как площадь контакта может быть пропорциональна нагрузке, когда контакт является упругим, впервые возникла при изучении трения полимеров, но именно автор работы [69] подчеркнул, что это более широкая проблема, и продемонстрировал, как ее можно объяснить с помощью концепции «выпуклости на выпуклостях». Анализ модели показал, что увеличение нагрузки в первую очередь увеличивает количество контактов, а не их размер: «по мере увеличения сложности модели количество отдельных областей становится более пропорциональным нагрузке, а их размеры - менее зависимыми от нее».

Были приведены доказательства того, что происходит с притертыми поверхностями: размеры отдельных контактных площадок практически не зависят от нагрузки. Это не противоречит теории Боудена и Табора, но и не является ее естественной частью.

2.3 Компьютерное моделирование контакта штока с уплотнением

2.3.1 Принятие расчетной модели взаимодействия двух тел

В трибологической системе поступательных гидравлических уплотнений в целом предполагается смешанная смазка. При описании системы следует учитывать вклад как твердого, так и жидкого контакта. Структура модели эластодинамического моделирования показана на рисунке 2.11. В дальнейшем расчете жидкостным контактом следует пренебречь для упрощения расчетной модели. Таким образом, рассматривается взаимодействие между микроскопическими деформациями уплотнения в зоне контакта.

Описание твердого контакта и микроскопических эффектов физически мотивировано и основано на теории контактной механики Перссона [70; 71].

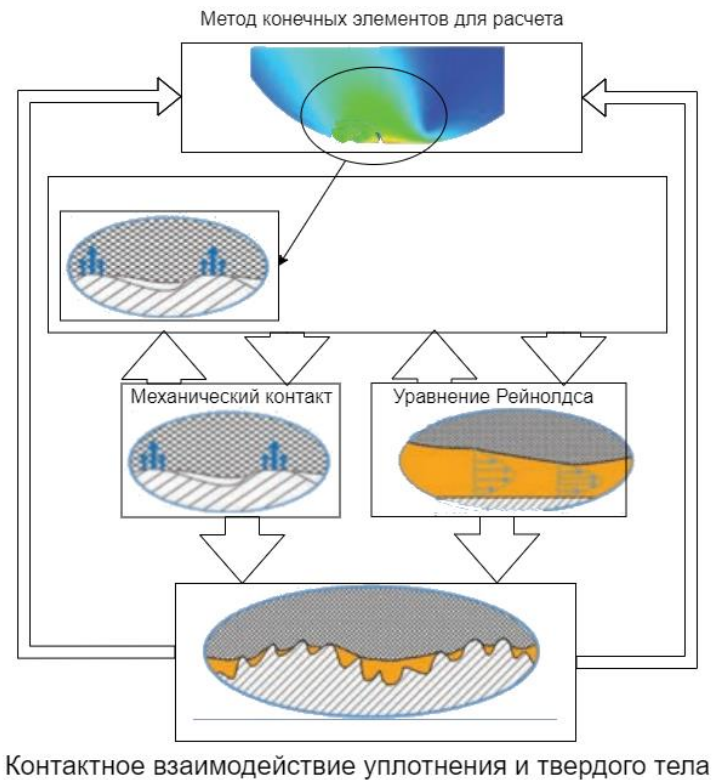


Рисунок 2.11 — Структурная схема эластодинамического моделирования

На рисунке 2.12 и рисунке 2.13 показана схема исследуемой контактной задачи. Твердый шероховатый сферический микровыступ (штока) внедряется в резиновый блок (уплотнение) с нормальной нагрузкой F_L . Вводится система координат с осью

x вдоль направления скольжения, где $x=0$ мм соответствует начальному положению оси сферы. Граничная поверхность фиксируется в направлении x . Граничные условия в задаче выглядят как:

$$u_x = 0$$

$$u_z = dz < 0$$

В моделировании методом конечных элементов (МКЭ) расчетные давления, силы являются локально усредненными величинами в области каждого узла, в то время как реальные физические величины быстро меняются в пространстве [72].

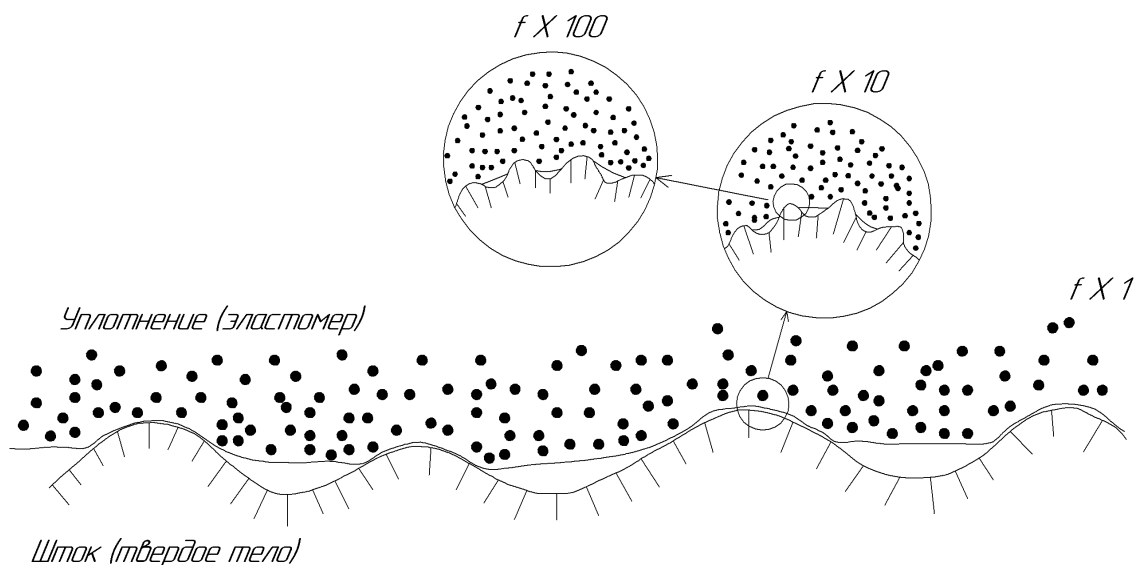


Рисунок 2.12 — Контакт штока и уплотнения при различных масштабах

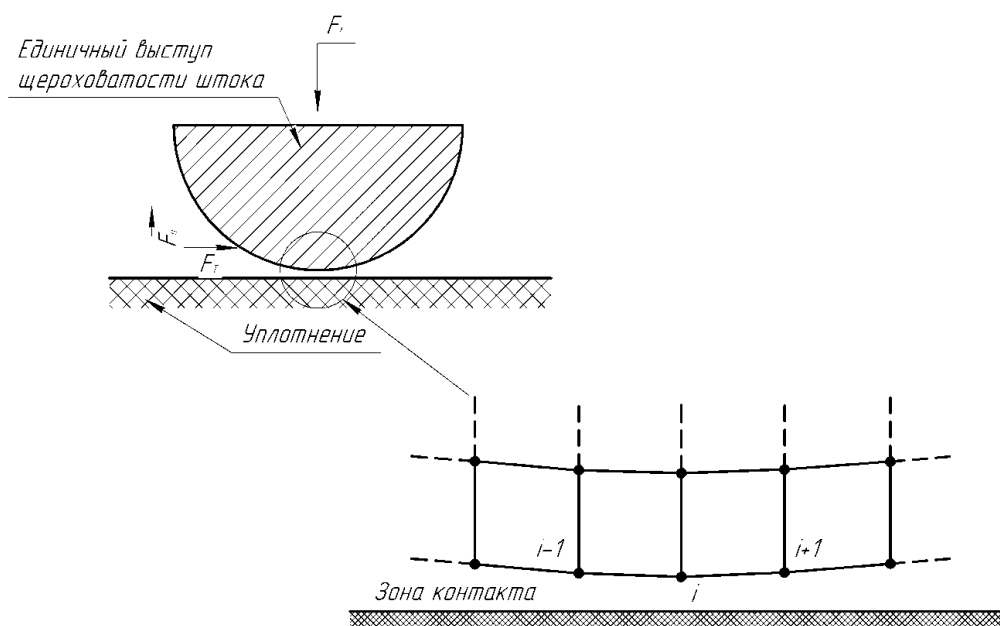


Рисунок 2.13 — Схема исследуемого контакта

На поверхность уплотнения в зоне контакта действуют нормальные силы F_N и тангенциальные силы F_T . В режиме смешанного трения эти силы представляют собой сумму контактных сил твердого тела и контактных сил жидкости:

$$F_N = F_N^{тв.тела} + F_N^{жид} = \sum_{i=1}^n A_i (p_i^{тв.тела} + p_i^{жид}) \quad (2.17)$$

$$F_T = F_T^{тв.тела} + F_T^{жид} = \sum_{i=1}^n A_i (\tau_i^{тв.тела} + \tau_i^{жид}), \quad (2.18)$$

где A_i - соответствующая область узла, определяемая по формуле

$$A_i = 0,5w(x_{i+1} - x_{i-1}), \quad (2.19)$$

где x_i - x -позиция узла i , как показано на рисунке 2.13, а w - это ширина уплотняющего контакта.

Выше уже было отмечено, что принимается упрощенная модель без учета жидкости в контакте, то уравнение (2.17) и (2.18) записывается как:

$$F_N = F_N^{тв.тела} = \sum_{i=1}^n A_i p_i^{тв.тела} \quad (2.20)$$

$$F_T = F_T^{тв.тела} = \sum_{i=1}^n A_i \tau_i^{тв.тела} \quad (2.21)$$

Однако, как отмечено в работах [73; 74], при очень малых нагрузках существует контактный режим с одной шероховатостью, что приводит к масштабированию по Герцу для упругих неровностей.

Так же при контакте жесткой сферы с эластомером площадь контакта согласно теории Герца пропорциональна $E^{-2/3}$, где E модуль упругости или вещественная часть комплексного модуля эластомера [75].

2.3.2 Исследование напряженно-деформированного состояния уплотнения при контакте со сферическим выступом микропрофиля штока

Надлежащий анализ эластомеров требует специального моделирования в инженерных программах с помощью инструментов нелинейного анализа методом конечных элементов, которые сильно отличаются от тех, что используются для упругопластических материалов. Особенности свойств эластомеров заключаются в следующем.

1. Подвергаются большим упругим деформациям порядка от 100 до 700 %, которые полностью обратимы, т. е. исходная форма восстанавливается при снятии нагрузки.
2. Практически несжимаемы, то есть могут менять свою форму, но общий объем остается почти постоянным.
3. Нелинейная зависимость напряжение-деформация.
4. Материал смягчается, а затем снова становится более жестким при растяжении, тогда как при сжатии они имеют довольно жесткую реакцию.

В анализе методом конечных элементов теория гиперупругости используется для представления нелинейной реакции гиперупругих материалов на большие деформации. Гиперупругость популярна из-за простоты использования в моделях конечных элементов. Обычно данные кривых напряжения-деформации, полученные в результате экспериментальных испытаний, используются для подбора констант теоретических моделей, таким образом аппроксимируя реакцию материала [76; 77].

Тестирование эластомеров с целью определения моделей материалов часто трактуются неправильно. Соответствующие эксперименты еще четко не определены национальными или международными организациями по стандартизации. Эта трудность связана со сложными математическими моделями, которые необходимы для определения нелинейных и почти несжимаемых свойств эластомеров.

Точность результатов анализа и моделирования деформационного отклика эластомерного материала при сжимающей нагрузке будет во многом зависеть от свойств материала, выбранного для анализа. Учитывалось, что эластомеры демонстрируют несжимаемость со значением коэффициента Пуассона, очень близким к 0,5, что дополнительно усугубляется нелинейным характером зависимости напряжения от деформации. Эластомеры имеют низкий модуль упругости (E) в диапазоне от 10 МПа до 4 ГПа (значение E для большинства металлов находится в диапазоне от 50 до 400 ГПа), но очень высокое относительное удлинение, достигающее 1000% (удлинение для металлов всегда меньше чем 100%) [78].

Данные по свойствам материала *PTFE*, используемые при моделировании НДС в настоящей работе, были получены экспериментальным путем при одноосном растяжении. Впоследствии, с использованием программы *MCalibration*, были смоделированы различные испытания для определения реологических свойств (характеристик) эластомера, например, при сжатии и кручении. При этом на каждом этапе испытаний модель подвергалась калибровке для получения достоверных результатов по свойствам. Данный способ определения свойств эластомеров широко применяется в научном мире при исследовании гиперупругих материалов [79; 80].

В работе [80] было обнаружено, что модели *Mooney-Rivlin* стабильны в пределах установленной границы деформации. Они дают хорошее описание материала относительно сжимающей нагрузки, приложенной к образцу.

Пятипараметрическая модель *Mooney-Rivlin* эластомера выражена формулой [81]:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + C_{02}(I_2 - 3)^2, \quad (2.22)$$

где W – энергия деформации, I_1 и I_2 – являются уменьшенными инвариантами правого тензора деформации Коши-Грина и могут выражаться в виде основных коэффициентов растяжения, C_{10} , C_{01} , C_{20} , C_{02} , и C_{11} – материальные константы (параметры) Муни-Ривлина, которые оцениваются по данным испытаний.

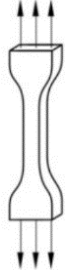
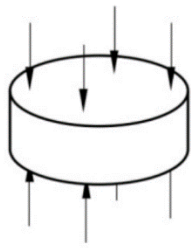
Для полностью заданного в CAE материала модели *Mooney-Rivlin* необходимо задать параметры C_{10} , C_{01} , C_{20} , C_{02} , и C_{11} , которые определяются состоянием нагрузки. Данные параметры могут быть определены путем проведения тестовых экспериментов для нахождения механических свойств материала.

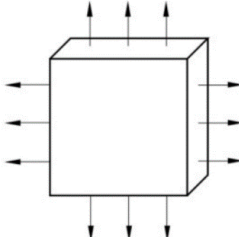
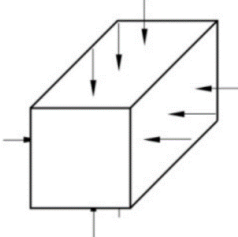
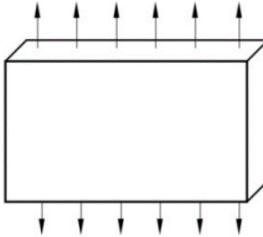
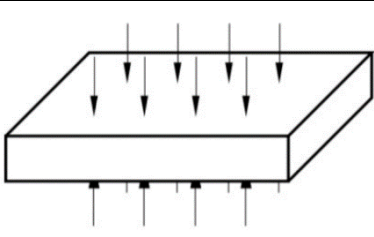
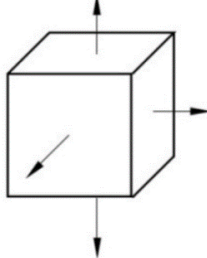
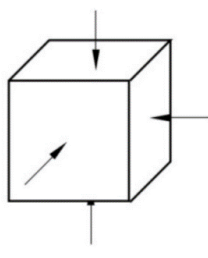
В случае, когда параметры, описывающие сдвиг и сжимаемость материала неизвестны, в программных модулях ANSYS существует возможность задавать свойства гиперупругому материалу при помощи экспериментальных тестовых данных. Данные представляют собой таблицу значений, описывающих зависимость напряжения от деформации. Используя метод наименьших квадратов, из полученных данных ANSYS вычисляет параметры для модели потенциальной энергии деформации. В отличие от пластичных материалов, тестовые данные для гиперупругих материалов должны задаваться в виде номинального напряжения и номинальной деформации. В программе ANSYS существует возможность использования данных, которые соответствуют следующим экспериментальным тестам над материалом [82]:

1. одноосные растяжения и сжатия;
2. двuosные растяжения и сжатия;
3. плоские растяжения и сжатия;
4. объемные растяжения и сжатия.

Перечисленные виды деформаций показаны в таблице 2.2:

Таблица 2.2 — Виды деформации, исследуемые в ANSYS

Наименование теста	Растяжение	Сжатие
Одноосные деформации		

Наименование теста	Растяжение	Сжатие
Двуосные деформации		
Плоскостные деформации		
Объемные деформации		

Также для того, чтобы, полностью охарактеризовать гиперупругий материал, необходимо найти растяжение λ_i , которое определяется состоянием нагрузки. Один и тот же материал будет вести себя по-разному в зависимости от того, как он загружен, как показано на рисунке 2.14. В типичном испытании образец подвергается желаемому состоянию нагрузки, и измеряется соотношение между напряжением и деформацией [79; 80].

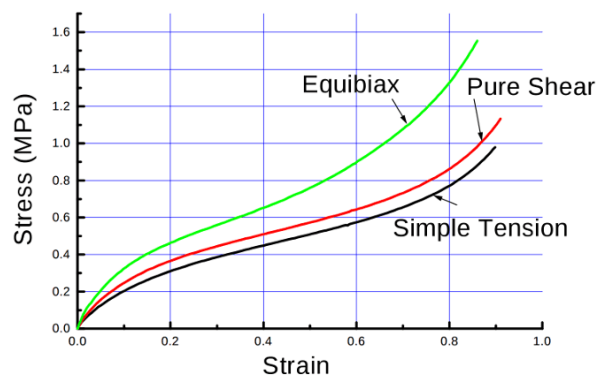


Рисунок 2.14 — Пример кривых напряжения-деформации для гиперупругого материала

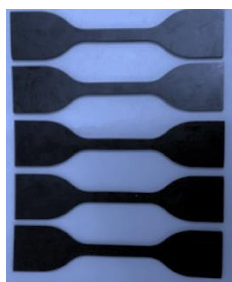
В случае одноосного растягивающего нагружения несжимаемого материала образец нагружается вдоль одной оси. Растяжение вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 1 + \varepsilon \\ \lambda_2 &= \lambda_3 = \lambda_1^{-1/2}\end{aligned}\quad (2.23)$$

В случае двусосного растягивающего нагружения несжимаемого материала образец нагружается по двум перпендикулярным осям с одинаковой величиной. Растяжение вычисляется:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \lambda_2 = 1 + \varepsilon \\ \lambda_3 &= \lambda_1^{-2}\end{aligned}\quad (2.24)$$

Для задания свойств материала в программе ANSYS были проведены испытания материалов уплотнений *NBR* и *PTFE* на одноосное растяжение, образцы показаны на рисунке 2.15. Эксперимент проводился при температуре $24^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, относительная влажность 50%. Размеры образцов (рисунок 2.16) были выполнены по американскому стандарту *ASTM D412* (Стандартные методы испытаний вулканизированной резины и термопластичных эластомеров — растяжение) и *ASTM D575* (Стандартный метод испытаний).



а



б

Рисунок 2.15 — Образцы материалов для испытаний на одноосное растяжение:

(а) *NBR* и (б) *PTFE*

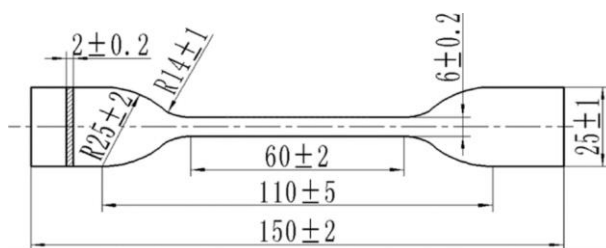


Рисунок 2.16 — Размер образцов

Кривая напряжение-деформация при одноосном растяжении, с 6-ю скоростями растяжения (100/с, 10/с, 1/с, 0,1/с, 0,01/с, 0,001/с) материалов *PTFE* и *NBR* представлены на рисунках 2.17, 2.18 и 2.19.

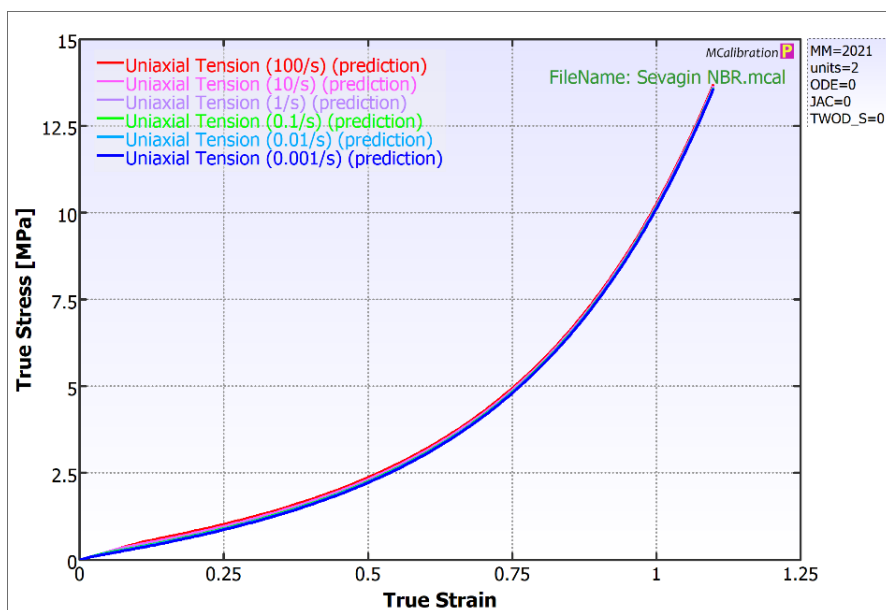


Рисунок 2.17 — Кривые напряжения-деформации для материала *NBR* полученные при различных скоростях растяжения

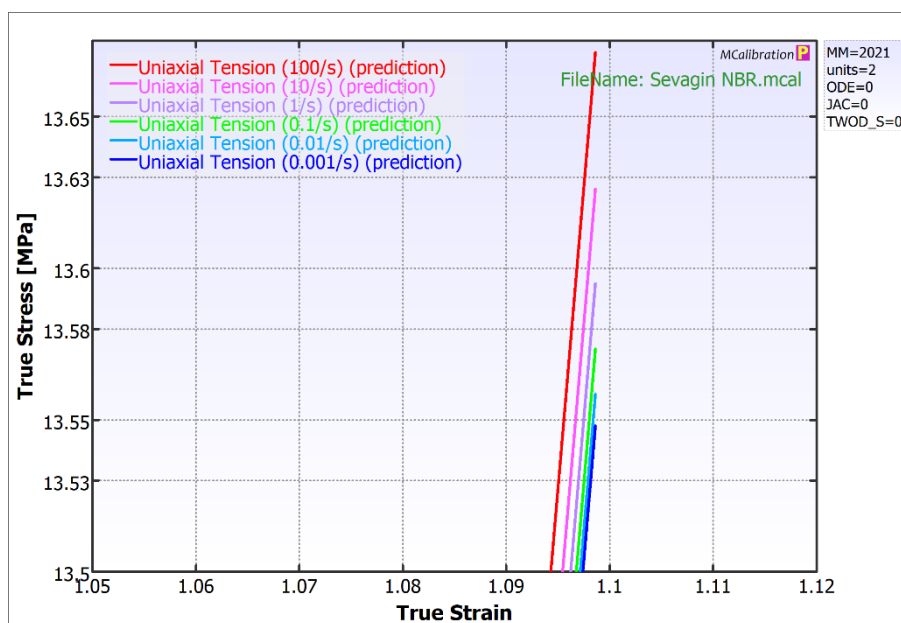


Рисунок 2.18 — Увеличенные фрагменты кривых напряжения-деформации для материала *NBR*

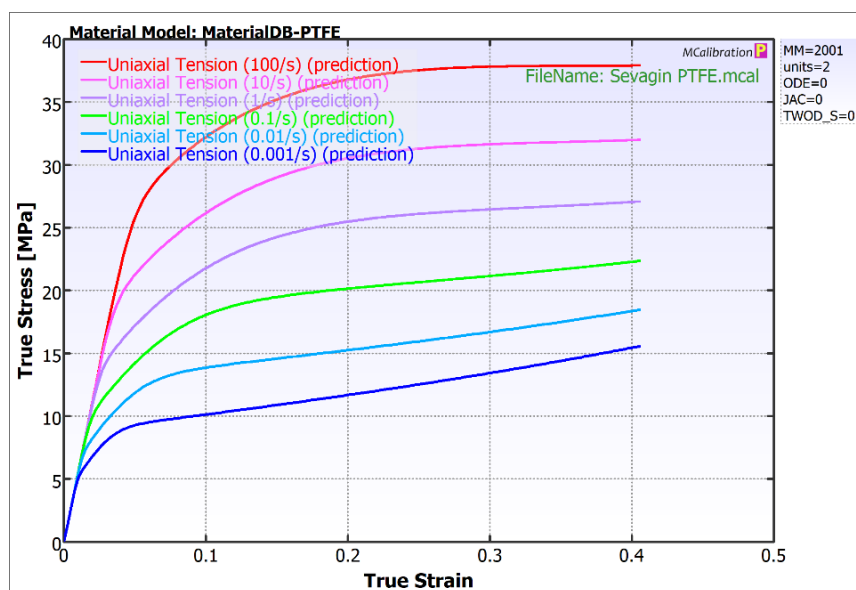


Рисунок 2.19 — Кривые напряжения-деформации для материала *PTFE*, полученные при различных скоростях растяжения

Для материалов уплотнений *NBR* и *PTFE* были получены безразмерные константы C_{10} , C_{01} , C_{20} , C_{02} , и C_{11} , используемые в дальнейшем для исследования НДС эластомера. Установленные параметры приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 — Константы модели *Mooney-Rivlin*

Константа	<i>NBR</i>	<i>PTFE</i>
C_{10} (МПа)	-0,26	-0,45
C_{01} (МПа)	0,36	0,71
C_{11} (МПа)	0,12	1,62
C_{20} (МПа)	2	2,5
C_{02} (МПа)	-0,19	-0,82

Вдавливание моделировалось как контакт между жесткой сферой ($R = 10$ и 50 мкм), а также для трапецевидной формы шероховатости, полученной после полирования, и эластомерным кубом в осесимметричной модели с использованием коммерческого пакета *FEA* (ANSYS).

Размер ячейки был изменен, чтобы быть более точным вблизи сферы и грубым на крайних точках модели. Дно и стороны куба были зафиксированы в пространстве, жесткая сфера могла перемещаться только в вертикальном направлении. Предполагалось, что контакт между сферой и кубом происходит без

трения. Из моделирования была извлечена взаимосвязь между радиусом контакта и глубиной вдавливания.

На рисунке 2.20 показана геометрия исследуемой задачи: жесткий шар радиуса R внедряется в уплотнение (эластомер).

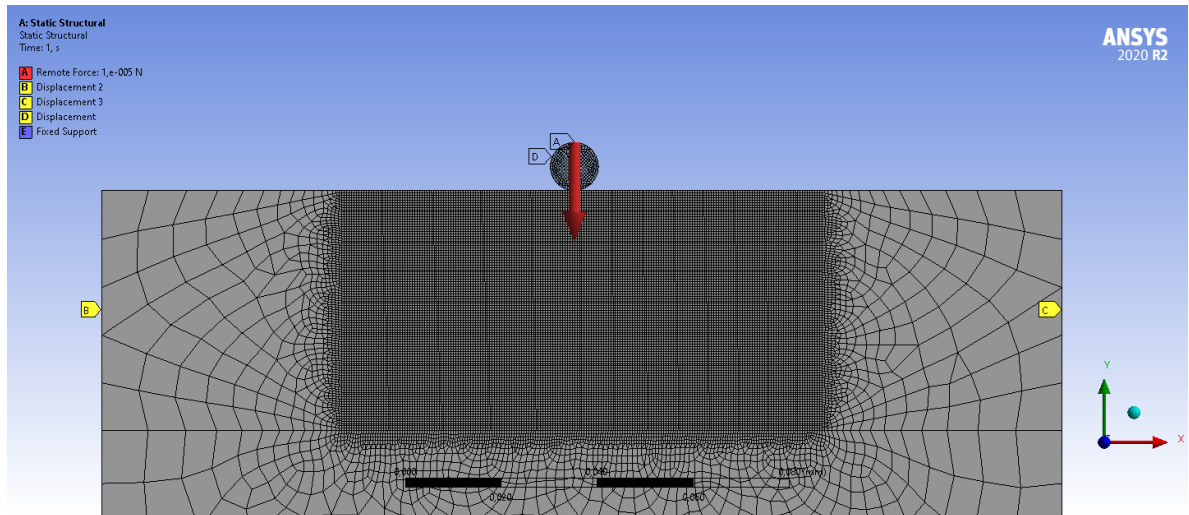


Рисунок 2.20 — Расчетная модель контакта жесткого шара с эластомером

Для эластичной подложки приложенную нагрузку F можно определить через радиус контакта, a по теории JKR .

$$a = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[FR \left(\frac{(1-\mu^2)}{E} \right) \right]^{1/3}, [\text{м}], \quad (2.25)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – Модуль Юнга, Па; F – приложенная сила, Н; R – радиус индентора, м.

Приложенная к сфере сила, на основе теории контакта Герца определяется выражением (по Джонсону, Кенделу и Робертсу (JKR)):

$$F = \frac{16Ga^3}{3R} - 4\sqrt{2\pi Ga^3 A_{адг}}, [\text{Н}], \quad (2.26)$$

где G – модуль сдвига, Па; a – радиус контакта, м; $A_{адг}$ – работа адгезии, Н/м.

А давление в точке по хорде контакта определяется по соотношению:

$$p = \frac{3F}{2\pi a^2} \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right]^{1/2}, [\text{Па}] \quad (2.27)$$

2.4 Результаты моделирования

В результате компьютерного моделирования были выявлены значения напряжений и глубины вдавливания единичного микровыступа поверхности штока. На рисунке 2.21 представлено поле напряжений для единичной неровности в форме усеченного конуса. Из рисунка 2.21 видно, что наибольшая концентрация напряжений в эластомере наблюдается под периферийными участками выступа (в зоне максимального контактного давления) на глубине от 0,001 мм от поверхности деформированного участка и составляет 4,7 МПа. Принимая во внимание циклический возвратно-поступательный характер относительного движения при контакте штока с уплотнением, можно констатировать, что при достижении критического цикла нагружения в этих участках начнут отделяться частицы уплотнения наряду с усилением износа краевого участка микровыступа штока.

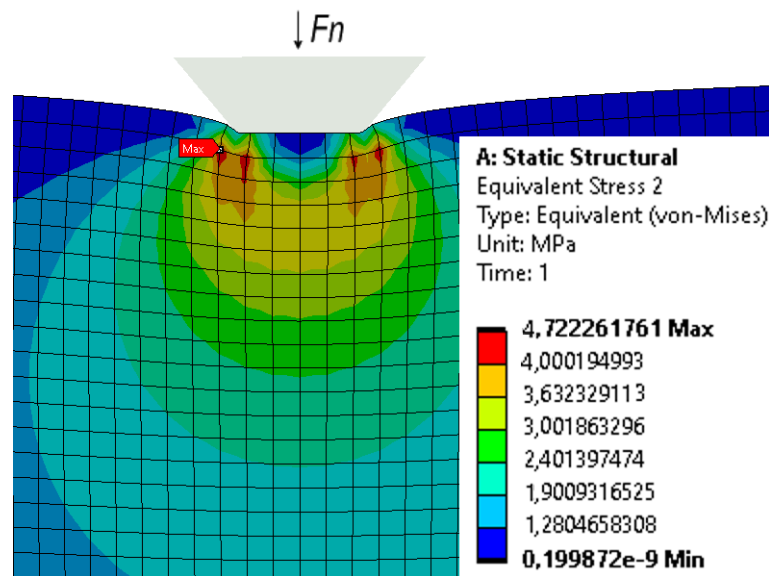


Рисунок 2.21 — Поле напряжений при внедрении в уплотнение единичной неровности в форме усеченного конуса

На рисунке 2.22 представлено поле напряжений для единичной неровности в форме сферы радиусом 10 мкм, получаемой после алмазного выглаживания. Область максимальной концентрации напряжений наблюдается в данном случае под наиболее выступающей частью профиля (на участках с максимальным

контактным давлением) на такой же глубине, как в случае усеченного конуса. Максимальное напряжение здесь составляет 2,53 МПа.

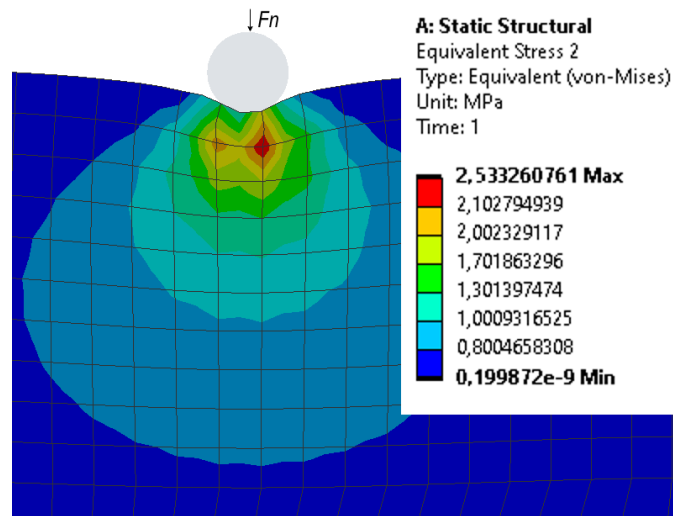


Рисунок 2.22 — Картина напряжений в уплотнении при внедрении единичной неровности в форме сферы $R = 10$ мкм

На рисунке 2.23 представлена форма концентрации напряжений для единичной неровности в форме сферы радиусом 50 мкм, получаемой после сглаживающей обработки ППД алмазным выглаживанием. В этом случае, по сравнению с предыдущими, возникают напряжения, не превышающие 0,86 МПа, что указывает на наиболее благоприятные условия контакта единичного выступа с эластомером.

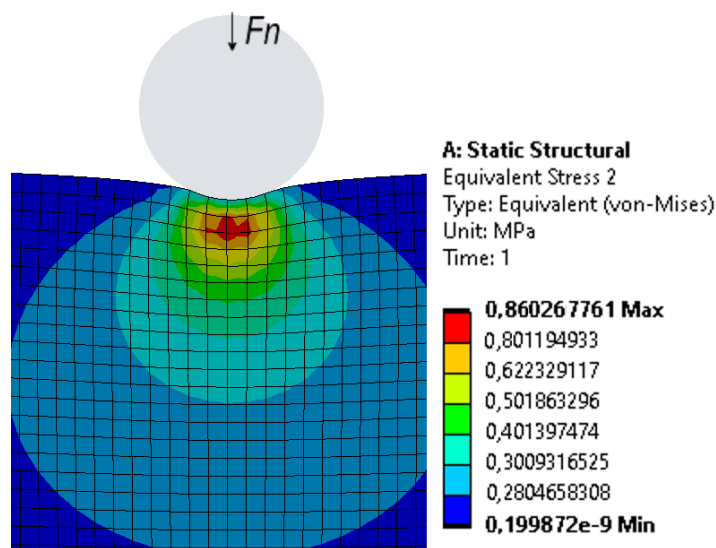


Рисунок 2.23 — Картина напряжений в уплотнении при вдавливании единичной неровности в форме сферы $R = 50$ мкм

В таблице 2.4 показаны параметры, полученные при помощи МКЭ в результате моделирования контакта.

Таблица 2.4 — Параметры полученные МКЭ

Форма профиля единичного выступа	Глубина вдавливания, мм	Максимальное напряжение, МПа
Сфера 10 мкм (алмазное выглаживание)	0,002	2,53
Сфера 50 мкм (алмазное выглаживание)	0,002	0,86
Усечённый конус (полирование)	0,002	4,7

Распределение максимальных напряжений под поверхностью полупространства в плоскости Z представлено на рисунке 2.24.

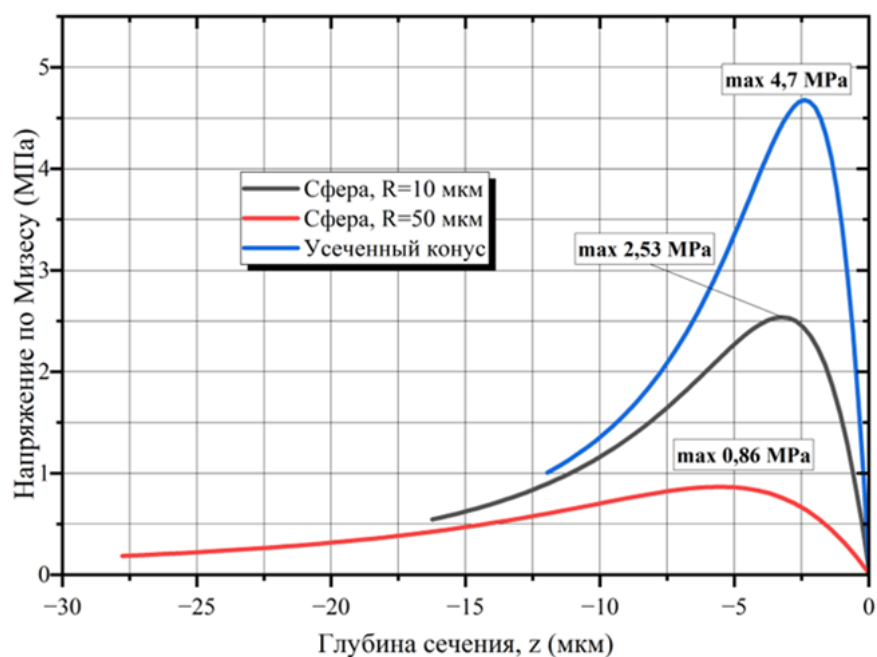


Рисунок 2.24 — Распределение напряжений по глубине полупространства при внедрении единичных выступов различных профилей.

Проанализировав результаты моделирования по возникающим в уплотнении напряжениям, делаем вывод, что наиболее благоприятной формой микропрофиля штока для контакта с уплотнением является сфера радиусом от 50 мкм, получение которой возможно финишной обработкой ППП, в частности, таким методом как алмазное выглаживание.

2.5 Выводы

1. На основе проведения теоретических исследований выявлены параметры микропрофиля, в полной мере характеризующие показатели качества поверхности штока в условиях контакта с уплотнением такие как Ra (Rz), R_{max} , коэффициент смятия профиля R_{mr} , шагово-высотный параметр tp и радиус вершины выступа профиля шероховатости поверхности R , имеющие важное значение для обеспечения должного ресурса уплотнительных систем.

2. Предложена расчетная схема контакта жесткого тела различной формы с упругим полупространством, отражающая характер взаимодействия микропрофиля поверхности штока и уплотнения, на основе которой в программе ANSYS создана компьютерная модель и решена контактная задача внедрения единичного выступа микропрофиля штока в уплотнение.

3. Для исследования характера взаимодействия уплотнения со штоком испытанием на растяжение с последующим моделированием различных испытаний в программе *MCalibration* определены свойства эластомеров марок *NBR* и *PTFE*, а также константы C_{10} , C_{01} , C_{11} , C_{20} , C_{02} , характеризующие принятую модель вязкоупругого тела.

4. На основе анализа НДС эластомера при взаимодействии с единичными выступами различной формы, представленными в виде жестких тел, установлено, что наиболее благоприятными являются условия контакта уплотнения с поверхностью штока, микропрофиль которого описывается сферами с радиусом от 50 мкм. При таком контакте напряжения уровень напряжений в уплотнении не превышает 0,86 МПа, тогда как при взаимодействии с выступом в форме усеченного конуса максимальные напряжения составляют 4,7 МПа.

Глава 3. Разработка и исследование эффективных технологических методов обеспечения требуемых параметров макро- и микрогеометрии штока

Технологическое обеспечение требуемых параметров качества поверхностного слоя штоков является одной из важнейших задач настоящего исследования. Разработанные в данной главе процессы отделочной обработки хромированной поверхности штока твердым точением и алмазным выглаживанием являются предпочтительными методами достижения требуемых макрогеометрии и микропрофиля выступов шероховатости поверхности, описанной в главе 2. Качество отделочной обработки оценено по результатам измерения и анализа шероховатости и микротвердости обработанной поверхности.

3.1 Разработка и исследование эффективного метода достижения требуемых макрогеометрических параметров хромированного штока

Геометрическая точность деталей машин характеризуется размерной точностью, точностью формы поверхностей, образующих деталь, и точностью их взаимного расположения. Отклонения макро и микро геометрии рабочих поверхностей деталей от установленных требований снижают эксплуатационные характеристики узлов трения, влияют на температуру в зоне контакта сопрягаемых поверхностей, а также на характер и интенсивность износа сопряженных деталей.

Исследование поверхностей образцов из стали 40Х после гальванического осаждения покрытий показало, что в ряде случаев хромирование приводит к формированию погрешности геометрической формы цилиндрических поверхностей в виде отклонения от круглости. Анализ полученных круглограмм (рисунок 3.2) показал, что отклонение от круглости проявляется, преимущественно, в виде овальности. При этом полученный допуск формы поверхностей оказался практически равным допуску на размер, что неприемлемо для штоков и ряда деталей гидроаппаратуры, размерная точность которых

соответствует квалитетам *IT7-IT8*, а точность формы должна быть не более 1/3 допуска на размер.

Недопустимые отклонения формы штока негативно сказываются на условиях контакта с уплотнительными элементами, ускоряя износ последних. В связи с этим обеспечение требуемой геометрической точности на заключительных этапах изготовления штоков является одной из важнейших технологических задач.

Традиционное полирование, применяемое для отделки хромированных поверхностей штоков, обеспечивает необходимую шероховатость поверхности, но погрешность формы не устраняет $2Z_{\min} = 2(R_z + h)$. В связи с этим на основе анализа технологических возможностей различных методов финишной обработки [10; 46–48; 66; 83–85] пришли к мнению устранять нерегламентированные отклонения высокотвердых поверхностей хромированных штоков твердым точением $2Z_{\min} = 2 \left[(R_z + h) + \sqrt{\Delta_{\Sigma}^2} \right]$.

Штоки для ПДМ *Sandvik LH517* изготавливают из хромистой стали марки 42Cr4 по стандарту *EN 10083*. Для штоков отечественных гидроцилиндров применяется сталь марки 40X (ГОСТ 4543-71), которая является отечественным аналогом зарубежной стали 42Cr4. Сравнительный анализ химического состава марок сталей, выполненный при помощи спекроскопа, приведен в таблице 3.1.

Сталь 40X характеризуется хорошей обрабатываемостью резанием, высокой прокаливаемостью при поверхностном упрочнении ТВЧ и достаточно высокими пределом прочности при растяжении и пределом текучести. Этот класс стали имеет очень хорошую совместимость с хромом ввиду схожести кристаллического строения. Поэтому самым распространенным способом упрочнения деталей из этой стали является хромирование.

Для исследования параметров обработки твердым точением хромированной поверхности штоков из стали 40X были изготовлены цилиндрические образцы. Заготовки образцов были выполнены из круглого проката диаметром 60 мм и длиной 100 мм, что позволило произвести эксперимент на участке 40 мм с двух сторон образца. После улучшения образцы обрабатывались точением до диаметра

52 мм и подвергались закалке ТВЧ на глубину $h \geq 2$ до твердости 51...57 HRC. После термической обработки образцы обрабатывались шлифованием до диаметра 50h7 и подвергались гальваническому хромистому покрытию ХТВ78 по ГОСТ 9.306-85. Таблица 3.1 — Химический анализ сталей, применяемых для штоков гидроцилиндров российских и зарубежных производителей.

Химический элемент, %	Марка стали	
	42Cr4 EN 10083	40X ГОСТ 4543-71
<i>C</i>	0,38	0,36
<i>Si</i>	0,22	0,22
<i>Mn</i>	0,6	0,52
<i>Ni</i>	0,0025	0,3
<i>S</i>	0,035	0,035
<i>P</i>	0,007	0,007
<i>Cr</i>	1,1	1,1
<i>Cu</i>	0,2	0,2

До настоящего времени вопрос об улучшении рассеивающей способности электролита для хромирования решен не до конца; более того, в применяемых в настоящее время растворах не представляется возможным повысить степень равномерности электроосаждения хромового покрытия на профилированных изделиях. Основные причины этого заключаются в том, что при хромировании с увеличением плотности тока возрастает выход хрома по току, а также в том, что немаловажно, что катодный потенциал при применяемых на практике плотностях тока почти не меняется [86].

В связи с неравномерной рассеивающей способностью используемого электролита улучшение равномерности распределения хромового покрытия на изделиях достигается применением специальных практических приемов и приспособлений. Используя их, удастся вести осаждение хромового покрытия, так сказать, «в размер», т. е. наносить покрытие, не искажая правильной геометрической формы детали. Однако такой способ хромирования, — так называемое размерное хромирование, находит весьма ограниченное применение, так как лишь тонкие слои покрытия (до 0,02-0,07 мм) удастся наносить, избегая искажения правильной геометрической формы деталей. При осаждении более толстых слоев

покрытие неизбежно приходится подвергать механической обработке шлифованием для устранения возникших при хромировании овальности и конусности деталей, что ведет к значительному увеличению стоимости готовых деталей. Кроме того, при шлифовании, даже при тонком, возможно возникновение разных дефектов в виде прижогов поверхности или шаржирования поверхности абразивными зернами, что отрицательно сказывается на качестве поверхностного слоя и формируемых при отделке эксплуатационных свойствах.

Практика хромирования показывает, что избежать появления конусности можно при электролитическом хромировании деталей в горизонтальном положении. Однако в связи с рядом трудностей этот метод подвески деталей применяется весьма редко. Одна из основных трудностей – это то, что во избежание появления овальности и некоторых других дефектов детали во время процесса хромирования должны вращаться вокруг своей оси с определенной скоростью, что очень сложно осуществимо для габаритных в длину штоков [87].

Анализ хромированных образцов показал, что слой хромированной поверхности получился около 79 мкм на сторону. Твердость поверхности деталей из стали 40Х после хромирования повысилась от 55 *HRC* после закалки ТВЧ до 65 *HRC*.

Один из основных выводов, сделанных при анализе хромированной поверхности, состоит в установлении факта отсутствия самонивелирующего эффекта на покрытых поверхностях [87].

Для измерения отклонения от круглости образцов использована портальная координатно-измерительная машина (КИМ) *MITUTOYO CRYSTA-APEX S9108* (Рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 — КИМ *MITUTOYO CRYSTA-APEX S9108*

Отклонение от круглости определяли по формуле 3.1 как максимальную полуразность между наибольшим и наименьшим диаметрами в каждом из сечений образца.

$$\Delta_{кр} = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{2} \quad (3.1)$$

Результаты измерения отклонения от круглости показывают, что после твердого точения отклонение от круглости снижается в 2-3 раза. Исходное отклонение партии деталей составило 15,5 мкм, что соответствует 10-й степени точности. Твердое точение способствует повышению точности формы хромированных штоков на 1-2 степени точности.

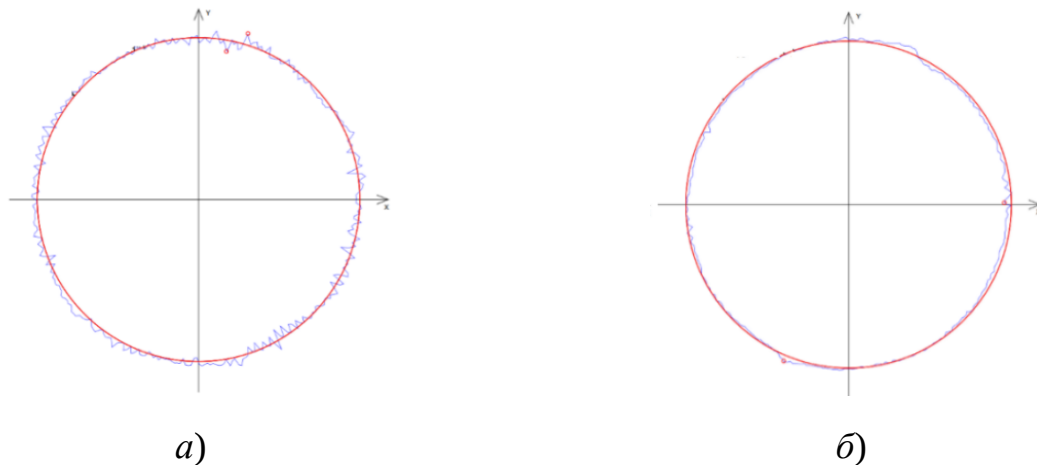


Рисунок 3.2 — Круглограммы поперечных сечений:

а) до твердого точения; б) после твердого точения

Обработкой традиционным полированием, которое обычно применяется в качестве отделочной обработки, устранить погрешность формы не представляется возможным. Поэтому было принято решение отделочную обработку хромированных образцов выполнять твердым точением резцами, оснащенными пластинами из кубического нитрида бора *CBN*, поскольку твердость поверхностного слоя образцов после гальванического хромирования варьировалась в пределах 62-64 *HRC*. Геометрические характеристики применяемых пластин фирмы *ZCC-CT* (КНР) представлены в таблице 3.2. Обработка выполнялась на токарном станке с ЧПУ *DMG MORI CTX 310* [87].

Покрытые *TiAlN* режущие пластины из *CBN* демонстрируют лучшую твердость и износостойкость. Поэтому в этом эксперименте были выбраны режущие пластины из *CBN* с покрытием *TiAlN*. Основными компонентами режущих пластин являются *CBN* в микрозерне с *TiN* и Al_2O_3 , которые покрыты слоем *TiAlN*. В общем случае отрицательные углы наклона предпочтительны при механической обработке твердых сталей. Режущие пластины, использованные в экспериментах, были снабжены отрицательным углом наклона 50 градусов. В таблице Таблица 3.3 представлены режимы резания при обработке образцов.

Условия резания, такие как скорость резания и подача инструмента, были выбраны на основе спецификаций режущих пластин с *CBN*.

Таблица 3.2 — Технические характеристики режущих пластин для твердого точения

№ п.п.	Режущая пластина	Главный угол в плане (°)	Радиус скругления (мм)
1	<i>CNGA 120404</i>	80	0,4
2	<i>CNGA 120408</i>	80	0,8
3	<i>DNGA 150404</i>	55	0,4
4	<i>DNGA 150408</i>	55	0,8

Экспериментальные исследования проводились на основе планирования эксперимента методом Тагути [88–90]. Для каждого фактора были выбраны 3 уровня влияния, представленные в таблице 3.3.

Таблица 3.3 — Режимы резания при твердом точении, уровни варьирования

Режимы резания	Режим А	Режим Б	Режим В
Скорость резания (м/мин)	300	400	500
Подача (мм/об)	0,04	0,06	0,08
Глубина резания (мкм)	20	25	30

Метод эксперимента был основан на ортогональной матрице Тагути с учетом трех факторов на трех уровнях [91]. В настоящем анализе было проведено всего 9 серий экспериментов. Схема эксперимента для параметров с использованием ортогонального массива L9 показана в таблице 3.4. Каждая строка этой таблицы представляет собой эксперимент с различным сочетанием параметров и их уровней, полученных с помощью программного пакета *Minitab19*.

Таблица 3.4 — План эксперимента по методу Тагути L9

Номер эксперимента	Скорость резания	Подача	Глубина резания
1	Режим А	Режим А	Режим А
2	Режим А	Режим Б	Режим Б
3	Режим А	Режим В	Режим В
4	Режим Б	Режим А	Режим Б
5	Режим Б	Режим Б	Режим В
6	Режим Б	Режим В	Режим А
7	Режим В	Режим А	Режим В
8	Режим В	Режим Б	Режим А
9	Режим В	Режим В	Режим Б

В таблице 3.5 представлены режимы обработки в соответствии с планом эксперимента, а также результаты отклонения от круглости для каждого обработанного образца. Из рисунка 3.3 можно сделать вывод, что глубина резания является доминирующим параметром, влияющим на отклонения от круглости.

Таблица 3.5 — Результаты эксперимента по отклонению от круглости, полученного с использованием ортогональной матрицы L9

№ п.п.	Скорость резания, X_1 , м/мин	Подача, X_2 , мм/об	Глубина резания, X_3 , мкм	Отклонение от круглости $\Delta_{кр}$, мкм
1	300	0,04	20	24,3
2	300	0,06	25	20,1
3	300	0,08	30	14,2

4	400	0,04	30	17,0
5	400	0,06	20	25,2
6	400	0,08	25	22,1
7	500	0,04	25	25,3
8	500	0,06	30	16,4
9	500	0,08	20	23,2

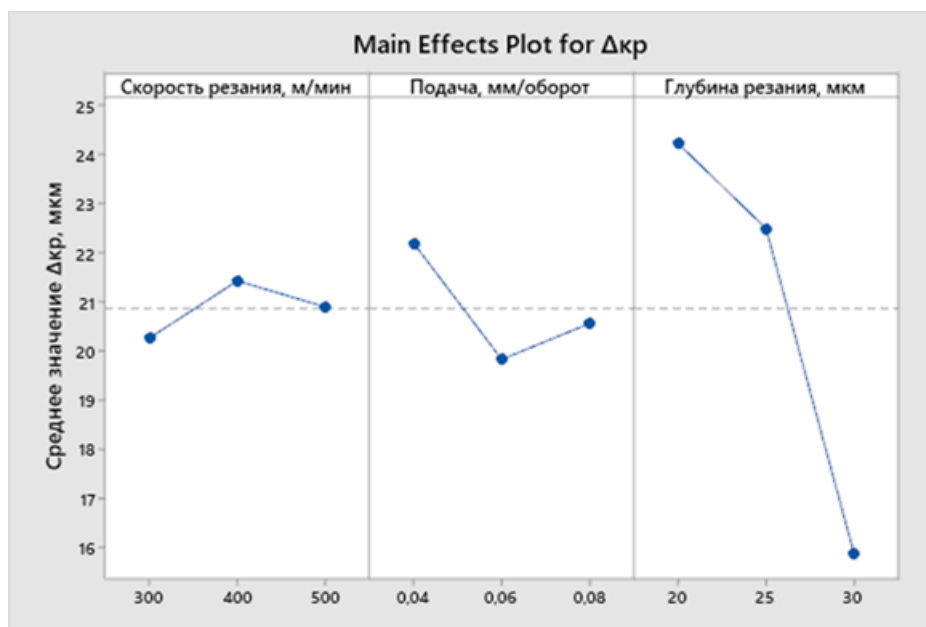


Рисунок 3.3 — График влияния режимов обработки на отклонение от круглости

$\Delta_{кр}$

Дисперсионный анализ — это статистическая обработка, наиболее часто применяемая к результатам экспериментов для определения процентного вклада каждого фактора. Изучение таблицы дисперсионного анализа для данного эксперимента помогает определить, какие из факторов нуждаются в контроле, а какие нет. Таким образом, дисперсионный анализ используется для определения доминирующего параметра и его процентного вклада в отклонение от круглости [87].

Из рисунка 3.4 видно, что процентная доля влияния глубины резания на отклонение от круглости составляет 85,33%, после которой следуют подача и скорость. Критерий Фишера обозначен как *F-Value* и не используется для расчета ошибок, поскольку Критерий Фишера в основном используется для входных

параметров процесса для определения процентного вклада каждого параметра процесса для различных переменных отклика.

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Скорость резания, м/мин	2	2,047	1,49%	2,047	1,023	0,22	0,819
Подача, мм/оборот	2	8,807	6,42%	8,807	4,403	0,95	0,513
Глубина резания, мкм	2	117,007	85,33%	117,007	58,503	12,64	0,073
Error	2	9,260	6,75%	9,260	4,630		
Total	8	137,120	100,00%				

Рисунок 3.4 — Таблица дисперсионного анализа для оценки влияния режимов резания на отклонение от круглости

При вышеописанной обширной экспериментальной работе и последующем анализе результатов с использованием планирования эксперимента методом Тагути, скорость 300 м/мин, подача 0,08 мм/об и глубина резания 30 мкм являются оптимальными настройками параметров твердого точения для достижения отклонения от круглости, не выходящего в отклонения допуска штока.

Уравнение регрессии, устанавливающее связь между параметрами обработки, имеет вид:

$$\Delta_{кр} = 20,867 - 0,6X_1 + 0,57X_2 + 0,03X_3 \quad (3.2)$$

$$R^2=0,934$$

3.2 Разработка и исследование эффективного метода достижения требуемого микропрофиля поверхности хромированного штока

Как было отмечено в первой главе, одним из целесообразных способов отделочной обработки деталей машин является поверхностное пластическое деформирование, в частности, алмазное выглаживание, с помощью которого можно успешно обрабатывать высокотвердые поверхностные слои деталей.

Особенностью алмазного выглаживания по сравнению с другими методами поверхностного упрочнения является применение в качестве деформирующего элемента натуральных или синтетических алмазов, обладающих очень высокой твердостью, низким коэффициентом трения по металлу и малой шероховатостью ($Ra\ 0,02\div0,04$ мкм). Благодаря малым радиусам рабочей части инструмента $R_{алм} = 0,75\div3,5$ мм при сравнительно небольших нагрузках (порядка 50-300 Н) в результате создания на контактной площадке высоких давлений можно обрабатывать маложесткие детали из мягких и из закаленных сталей и сплавов твердостью $HRC\ 60-65$, а также поверхностные слои биметаллических изделий, упрочненных различными покрытиями. В частности, алмазное выглаживание успешно применяется для отделки деталей с газотермическими покрытиями, сформированными плазменным и ионно-плазменным напылением [92].

Для оценки способов интенсификации процесса выглаживания применительно к тонкопленочным покрытиям, к числу которых относятся хромовые покрытия штоков, следует учитывать ряд технологических особенностей и требований к входным параметрам процесса отделки для проведения бездефектной отделочной обработки [87].

Шероховатость обработанной поверхности в наибольшей степени определяется динамическими и кинематическими параметрами поверхностного пластического деформирования. Основным динамическим параметром процесса выглаживания является давление, оказываемое на обрабатываемую поверхность, определяемое усилием деформирования, радиусом инструмента и механическими свойствами обрабатываемого материала (твердостью, пределом текучести, модулем упругости и др.). Давление, соответствующее минимальной высоте полученных микронеровностей, можно считать оптимальным для материалов (покрытий) данного класса, а соответствующие ему силу и радиус инструмента – оптимальными по параметру шероховатости. Давление пропорционально нормальной силе F_y , поэтому характер зависимости шероховатости от силы такой, как и зависимость от давления, и обратный от радиуса инструмента. Под действием нагрузки инструмент во время движения по обрабатываемой поверхности

выдавливает канавку, раздвигая металл в стороны как по направлению вектора скорости, так и по направлению вектора подачи. В зависимости от соотношения величин исходной шероховатости и абсолютного внедрения h инструмента могут образоваться очаги деформации трех видов. Для очага деформации первого вида характерно незначительное внедрение инструмента ($h \leq R_{z\text{исх}}$, характерно для сглаживающей обработки), для очага деформации второго вида – внедрение, соизмеримое с исходной шероховатостью ($h \approx R_{z\text{исх}}$, сглаживающе-упрочняющая обработка), а для очага деформации третьего вида – внедрение, превышающее исходную шероховатость ($h > R_{z\text{исх}}$, упрочняющая обработка) (рисунок 3.5). При обработке ППД тонких покрытий с целью получения требуемой микрогеометрии поверхности целесообразно рассматривать схему обработки первого вида, т. е. сглаживающее ППД.

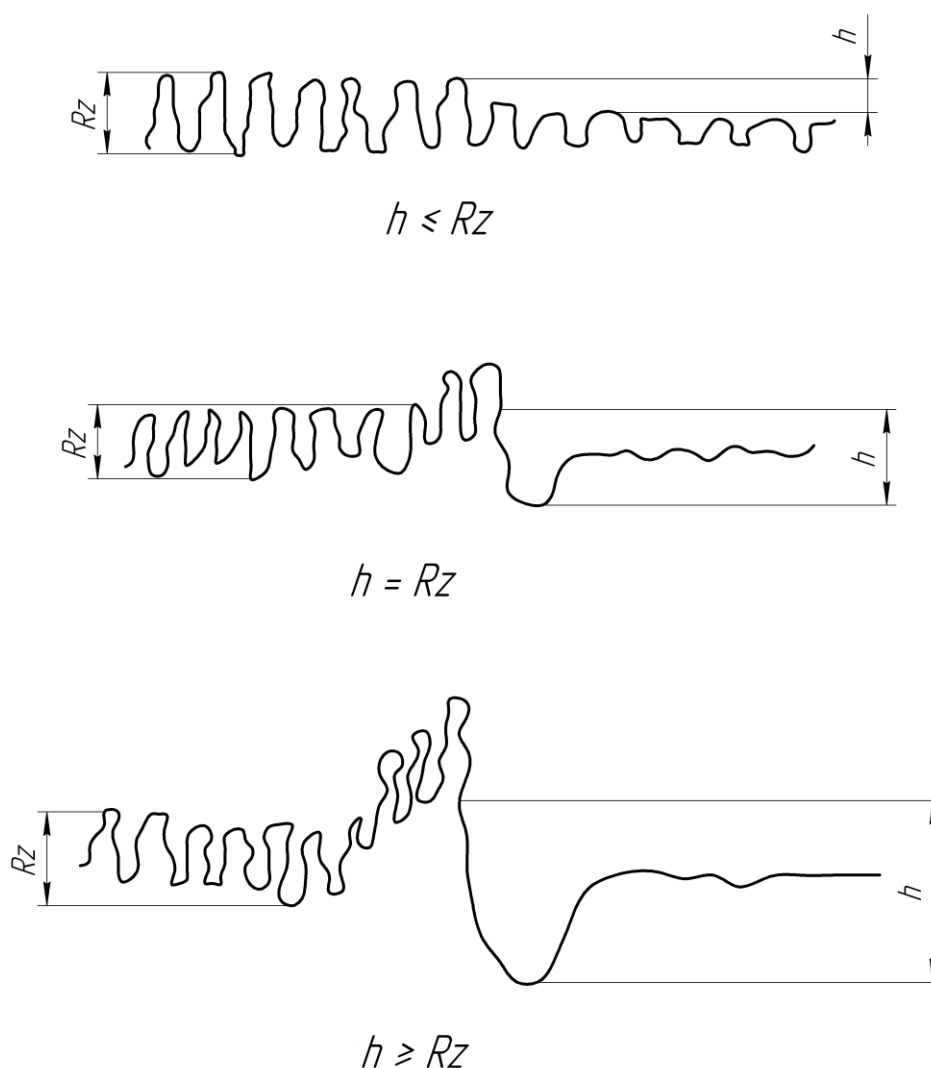


Рисунок 3.5 — Очаги деформации при обработке ППД

Основные параметры деформационного упрочнения при выглаживании определяются глубиной внедрения инструмента, складывающейся из глубин пластического и упругого оттеснения обрабатываемой поверхности. Пластическая составляющая определяется остаточной деформацией микронеровностей, а упругая – восстановлением материала и определяется по формуле (3.3).

$$h = 2,4R_{алм} \left(\frac{p}{E}\right)^2, \text{ мм} \quad (3.3)$$

где $R_{алм}$ – радиус рабочей части алмаза, мм; p – среднее контактное давление, МПа; E – модуль упругости, МПа.

В расчетных зависимостях чаще используется относительное внедрение инструмента $h/R_{алм}$, величина которого является мерой деформации обрабатываемого материала. При достижении критического значения относительной глубины внедрения деформация материала перейдет из упругой области в пластическую и затем в микрорезание, т. е. численное значение $h/R_{алм}$ характеризует поведение материала под нагрузкой в очагах деформации трех видов. Таким образом, понятие оптимальной силы должно быть соотнесено с зонами деформации: упругой, упруго-пластической и пластической [87].

Анализ литературных данных по методикам определения сил выглаживания показывает, что такого дифференцированного подхода нет, и поэтому расчетные значения оптимальных сил, предлагаемые в различных работах, сильно различаются. Однако во всех случаях сила $F_y = pS_{пр}$, где p – контактное давление; $S_{пр}$ – площадь проекции пятна контакта рабочей части инструмента на деталь. Площадь проекции пятна контакта $S_{пр}$ для инструментов с различной геометрией рабочей части определяется по выражениям, приведенным в работах [93; 94].

Среднее контактное давление определяется по формуле (3.4)

$$p = C\sigma_T, \quad (3.4)$$

где C – коэффициент упрочнения; σ_T – предел текучести материала заготовки, МПа.

Коэффициент упрочнения C зависит от склонности материала к деформационному упрочнению. В работе [68] рекомендуется принимать $C=10$ с

учетом максимального наклепа. Вместо предела текучести σ_T в работе [95] рекомендуется использовать напряжение текучести σ_s , характеризующее момент перехода упругих деформаций в пластические для конкретных температурно-скоростных условий деформирования.

Как правило, численное значение среднего контактного давления соизмеряют с твердостью материала, т. е. полагают $p=HV$ (МПа). Однако силы деформирования, рассчитанные по твердости HV материала, оказываются значительно меньше экспериментальных. Критическим отношением, допускающим применение напряжения текучести в расчетных формулах сил выглаживания, является отношение $\sigma_s/E=0,01$; если это отношение больше, то расчет следует вести по твердости.

Для большой группы металлов характер деформации определяется отношением нормального давления к модулю упругости. При упругом деформировании без учета упрочнения это отношение находится в пределах $0,001-0,01$. Если отношение $p/E>0,01$, то в зоне контакта наблюдаются пластические деформации. Это подтверждает количественные ограничения по диапазонам применимости предела текучести и твердости при расчете сил выглаживания. Следовательно, для сглаживающих и сглаживающе-упрочняющих режимов выглаживания при определении оптимальной силы или давления следует применять σ_s или σ_T , а для упрочняющих режимов – твердость материала (HV или HV). Численные значения коэффициента упрочнения C для сглаживающей и сглаживающе-упрочняющей обработки нужно выбирать из диапазона $10 \leq C \leq 3$. При этом нижнее значение рекомендуется для сглаживающих режимов выглаживания, а верхнее – для сглаживающе-упрочняющих.

Исходной величиной для подсчета силовых факторов процесса выглаживания является среднее контактное давление, связанное с твердостью обрабатываемого материала, для относительно мягких сплавов типа незакаленных сталей и цветных металлов $p=(0,8 \div 1,0)HV$, а для твердых сплавов типа закаленных сталей $p=(0,7 \div 0,9)HV$.

Важными параметрами деформационного процесса при выглаживании являются кинематические факторы, которые определяются подачей инструмента S , скоростью выглаживания V и их соотношением. Подача инструмента определяет количество циклов деформации (кратность нагружения), которым подвергается каждая отдельная неровность выглаживаемой поверхности. С возрастанием подачи кратность нагружения падает и наоборот. Кратность нагружения определяется геометрией рабочей части инструмента. Так, шероховатость будет минимальной при выглаживании сферическим инструментом по токарной схеме обработки при $S=0,03\div 0,05$ мм/об и резко увеличивается при подачах $S=0,10\div 0,12$ мм/об.

3.3 Методика проведения экспериментальных исследований по обработке алмазным выглаживанием хромированной поверхности

Анализ литературных источников показал, что данные по обработке тонкопленочных покрытий весьма ограничены, а сведения по обработке ПВД поверхностей, упрочненных электролитическими покрытиями, в частности, хромированием, практически отсутствуют. Это привело к необходимости решить поставленную задачу путем проведения экспериментальных исследований.

Для проведения экспериментов были подготовлены образцы из стали 40Х, подвергнутые закалке с низким отпуском и покрытые хромом. Конечные размеры образцов и параметры микропрофиля для проведения эксперимента представлены на рисунке 3.6 и в таблице 3.6.

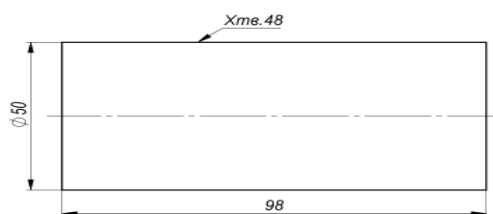


Рисунок 3.6 — Эскиз образца для проведения эксперимента

С учетом требований, предъявляемых к поверхностям трения скольжения, эксплуатируемых в условиях граничной смазки, формировалось пористое хромовое покрытие.

Таблица 3.6 — Исходные параметры исследуемых образцов до обработки алмазным выглаживанием

Порядок проведения	Ra	HV	Mr_2 , %
1	1,30	689	62
2	1,32	697	55
3	1,59	689	62
4	1,25	647	65
5	1,22	683	60
6	1,06	693	56
7	1,16	690	64

Продолжение таблицы 3.6

Порядок проведения	Ra	HV	Mr_2 , %
8	1,61	669	63
9	1,49	687	61
10	1,27	695	59
11	1,09	660	57
12	1,04	672	65
13	1,12	668	61
14	1,37	691	63
15	1,03	671	61
16	1,56	659	57
17	1,05	692	64
18	1,58	651	65
19	1,30	648	65
20	1,32	672	63
21	1,09	687	58
22	1,42	664	58
23	1,00	665	61
24	1,43	670	62
25	1,39	696	65
26	1,59	674	61
27	1,08	680	62
28	1,27	642	62
29	1,11	652	62
30	1,07	644	60
31	1,25	676	61
32	1,54	666	65
33	1,21	685	59
34	1,44	695	64
35	1,58	700	64
36	1,33	673	59
37	1,05	688	61
38	1,47	690	65
39	1,50	650	63
40	1,19	664	57
41	1,38	663	62
42	1,52	640	61
43	1,02	694	58

44	1,01	676	55
45	1,24	688	56
46	1,32	648	59
47	1,02	697	55
48	1,34	680	63
49	1,03	645	55
50	1,62	654	58
51	1,03	690	61
52	1,13	652	62
53	1,53	649	63
54	1,02	669	56
Среднее значение	1,28	672	60

Для создания деформирующей силы в методах ППД применяют «упругий» и «жесткий» контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью. Широкое распространение получили державки с упругими силовыми элементами (рисунок 3.7). В этом случае усилие деформирования создается либо с помощью тарированной пружины, либо пневматическим или гидравлическим приводом. На практике в качестве силовых элементов оправок часто применяют винтовые проволочные пружины. Пружина предварительно нагружается заданной силой выглаживания при настройке приспособления. Такие державки просты в обслуживании и имеют незначительные габаритные размеры.

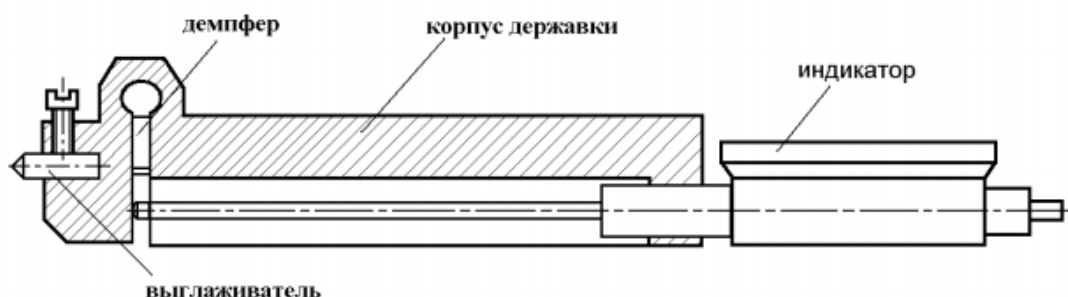


Рисунок 3.7 — Упругая оснастка для алмазного выглаживания

Устройства с упругим контактом между алмазом и обрабатываемой поверхностью предпочтительнее еще и потому, что траектория перемещения деформирующего инструмента в процессе обработки определяется формой исходной заготовки. Такая конструкция державки инструмента создает постоянство нормальной силы при обработке, что практически обеспечивает

неизменяемость формы исходной заготовки. При упругом контакте достигается более равномерный наклеп всей обработанной поверхности, хотя погрешности формы детали в этом случае не исправляются. В этом случае имеет место безразмерная обработка.

В упругих оправках выглаживатель может устанавливаться непосредственно в отверстие державки или через переходную втулку. Упругие державки обладают повышенной чувствительностью к биению обрабатываемой поверхности. При обработке деформирующей системе сообщается дополнительное усилие (перемещение оправки) для исключения влияния упругой деформации поверхностного слоя образца на качество поверхности. При этом оправка с выглаживателем свободно «плавает», опираясь на пружину, и полностью воспринимает силу предварительно нагруженной пружины. Приспособление устанавливают в резцедержателе токарного станка, нагружение осуществляется при помощи поперечной подачи резцедержателя, выглаживание выполняется по кинематической схеме точения с продольной подачей.

При жестком контакте деформирующая сила обеспечивается натягом между инструментом и обрабатываемой поверхностью. В устройствах с жестким контактом нормальная сила (натяг) создается за счет поперечной подачи инструмента, осуществляемой винтом поперечной подачи станка. Такая схема не обеспечивает равномерного упрочнения всей выглаживаемой поверхности из-за неточностей формы и размеров заготовки, погрешностей установки ее на станке, неравномерной жесткости ее по длине и, как следствие различного прогиба от давления инструмента, неравномерные механические свойства в основном металле на различных участках ее поверхности. Поэтому нагружающие устройства с «жестким контактом» не нашли широкого применения, хотя они более просты в изготовлении по сравнению с устройствами с упругим контактом.

Для реализации обработки алмазным выглаживанием хромированной поверхности была сконструирована специальная державка. При этом для конструирования и создания чертежей упругой оправки использовался программный продукт САПР *SolidWorks* 2018. 3D модель упругой оправки

представлена на рисунке 3.9, фото оправки, сделанной на заводе ООО «ПСК ПластМеталл» представлено на рисунке 3.10. Чертежи оснастки приведены в приложении А. Оправка изготавливалась из конструкционной стали 40. В качестве упругого элемента использовалась винтовая пружина, располагаемая между корпусом и выглаживателем.

Тарирование пружины производилось на предприятии ООО «МЭМП» с помощью машины для испытания пружин на сжатие-растяжение серии *TLS-S*.

Результаты тарирования представлены в таблице 3.7 и на рисунке 3.8.

Таблица 3.7 — Результаты тарирования пружины

Перемещение , мкм	Нагрузка , Н	Перемещение , мкм	Нагрузка , Н	Перемещение , мкм	Нагрузка , Н
3,51	10	45,63	130	87,75	250
7,02	20	49,14	140	91,26	260
10,53	30	52,65	150	94,77	270
14,04	40	56,1	160	98,28	280
17,55	50	59,67	170	101,79	290
21,06	60	63,18	180	105,3	300
24,57	70	66,69	190	108,81	310
28,08	80	70,1	200	112,32	320
31,59	90	73,71	210	115,83	330
35,1	100	77,22	220	119,34	340
38,61	110	80,73	230	122,85	350
42,12	120	84,24	240	126,36	360

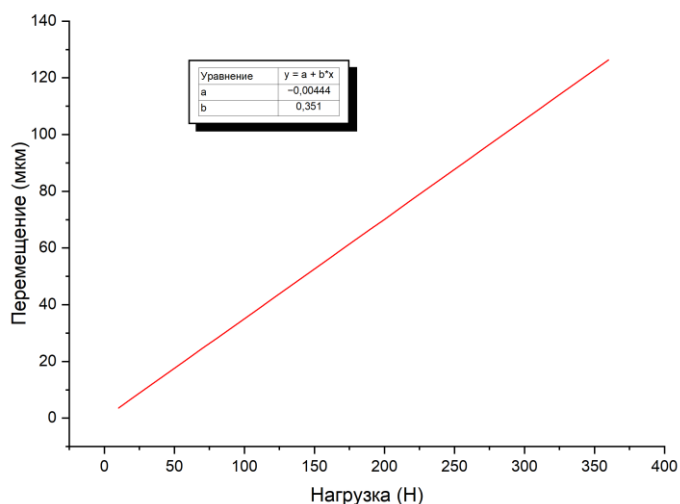


Рисунок 3.8 — График тарирования пружины

В качестве индентора для выполнения, собственно, выглаживания использовалась вставка из синтетического алмаза марки АСПК-3 (алмаз синтетический поликристаллический). Радиус выглаживателя варьировался от 1,5 до 3,0 мм.

Выбор алмазного выглаживателя из числа других определялся уникальными свойствами материала – чрезвычайно высокой твердостью, низким коэффициентом трения по металлу, высокой степенью чистоты, с которой может быть отполирован алмаз, высокой теплопроводностью.

Кроме того, малая величина радиуса применяемого инструмента – выглаживателя – от 1,5 до 3,0 мм обуславливает малую величину силы выглаживания (до 20 кг), что позволяет обрабатывать маложесткие детали и тонкостенные, а также детали с тонкими покрытиями, снижая требования к жесткости технологического оборудования.

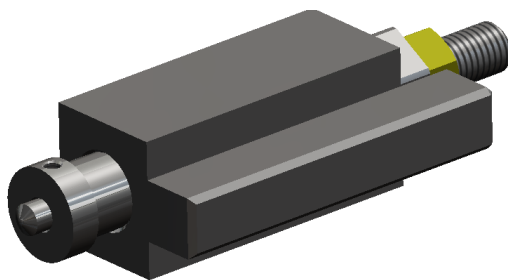


Рисунок 3.9 — 3D модель упругой оправки для алмазного выглаживания



Рисунок 3.10 — Оправка для алмазного выглаживания, изготовленная в производственных условиях завода ООО «ПСК ПластМеталл»

Для оценки величины усилия деформирования использовался индикатор часового типа.

Топография поверхностей исследуемых образцов проводилась на оптическом 3D микроскопе фирмы *Sensofar* модель *S neox* (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 — Оптический 3D микроскоп *Sensofar S neox*

Также была проведена оценка микротвердости образцов после обработки алмазным выглаживанием.

Планирование экспериментов и анализ результатов являются важными этапами в раскрытии характера процесса. Для описания эксперимента используем полный факторный эксперимент с 4 факторами и 3 уровнями варьирования.

Факторы, варьируемые в эксперименте, выбраны в соответствии со сведениями по рекомендуемым режимам обработки алмазным выглаживанием для сталей твердостью $HRC > 50$ единиц, но так как при обработке по хромистому покрытию нет данных в научном сообществе и на производстве, то был добавлен третий уровень ближе к минимальным значениям (таблица 3.8). Этими факторами являются:

- А: Усилие выглаживания, P , Н;
- Б: Скорость вращения шпинделя, V , мм/мин;
- В: Подача продольная S , мм/об;
- Г: Радиус выглаживателя, $R_{алм}$, мм.

Таблица 3.8 — Факторы и связанные с ними уровни

	Фактор	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
А	Усилие выглаживания, Н	50	100	150
Б	Скорость вращения, м/мин	100	150	200
В	Подача продольная, мм/об	0,02	0,05	0,1
Г	Радиус выглаживателя, мм	1,5	3	—

Выбранный план является планом полного 4-хфакторного эксперимента, что позволяет рассматривать все взаимодействия. В таблице 3.9 представлена матрица плана.

Таблица 3.9 — Матрица проведения эксперимента

А: Усилие выглаживания, Н	Б: Скорость вращения, м/мин	В: Подача мм/об	Г: Радиус выглаживателя, мм	Стандартный порядок	Порядок проведения
150	150	0,02	1,5	43	1
150	100	0,05	3,0	40	2
50	200	0,05	1,5	15	3
50	100	0,02	3,0	2	4
100	100	0,05	3,0	22	5
100	100	0,10	3,0	24	6
100	200	0,10	3,0	36	7
100	200	0,05	3,0	34	8
100	100	0,02	1,5	19	9
100	100	0,02	3,0	20	10
100	150	0,02	3,0	26	11
50	150	0,05	1,5	9	12
100	200	0,05	1,5	33	13
50	100	0,05	3,0	4	14
50	200	0,02	1,5	13	15
150	150	0,10	3,0	48	16
50	150	0,02	3,0	8	17
50	200	0,05	3,0	16	18
50	200	0,10	1,5	17	19
100	100	0,10	1,5	23	20
150	200	0,02	1,5	49	21
50	200	0,02	3,0	14	22
150	200	0,10	1,5	53	23
150	150	0,10	1,5	47	24
150	200	0,10	3,0	54	25
100	200	0,02	1,5	31	26
100	100	0,05	1,5	21	27
150	100	0,10	1,5	41	28
100	150	0,05	1,5	27	29
50	150	0,02	1,5	7	30
100	150	0,05	3,0	28	31

А: Усилие выглаживания, Н	Б: Скорость вращения, м/мин	В: Подача мм/об	Г: Радиус выглаживателя, мм	Стандартный порядок	Порядок проведения
50	150	0,10	1,5	11	32
150	150	0,05	3,0	46	33
100	150	0,10	3,0	30	34
150	100	0,02	1,5	37	35
50	150	0,05	3,0	10	36
150	150	0,02	3,0	44	37
50	100	0,02	1,5	1	38
150	200	0,05	3,0	52	39
100	200	0,10	1,5	35	40
150	100	0,02	3,0	38	41
100	150	0,10	1,5	29	42
50	200	0,10	3,0	18	43
100	150	0,02	1,5	25	44
50	150	0,10	3,0	12	45
50	100	0,10	1,5	5	46
100	200	0,02	3,0	32	47
150	150	0,05	1,5	45	48
50	100	0,05	1,5	3	49
150	200	0,02	3,0	50	50
150	200	0,05	1,5	51	51
50	100	0,10	3,0	6	52
150	100	0,10	3,0	42	53
150	100	0,05	1,5	39	54

Порядок обработки данных в эксперименте был случайным, полученный порядок отражен в столбце, озаглавленном «Порядок проведения». В столбце «Стандартный порядок» задано положение конкретной комбинации факторов в матрице плана для четырех факторов с тремя уровнями.

Особенности производственного процесса не позволили выделить время на более чем 5 экспериментальных обработок для дублирования эксперимента. Таким образом, ни одна из обработок не была дублирована. Однако при одной обработке было обработано около 54 образцов, обработанных алмазным выглаживанием, что обеспечило многократные повторения.

Повторения важны для учета неопределенности измерений и повышения надежности анализа. В данном случае подходящим решением было рассмотрение среднего количества обработок [96]. В других случаях, подходящим решением может быть среднеквадратическое отклонение при повторениях для каждой

реплики. Повторения дают информацию о факторах, которые могут влиять на вариабельность процесса.

Исходная шероховатость поверхности Ra образцов была получена в результате рекомендованного ранее предварительного твердого точения и составляла 0,63–0,8 мкм (рис. 3.12).

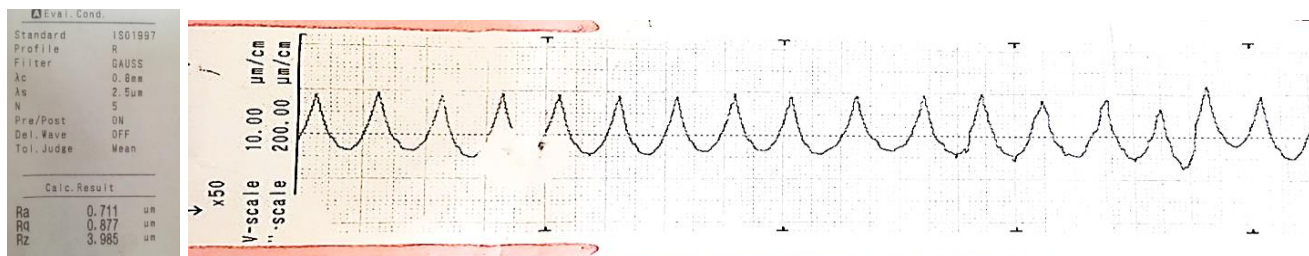


Рисунок 3.12 — Шероховатость поверхности образцов после твердого точения, выполняемого в качестве предварительной обработки перед ППД

3.4 Результаты экспериментальных исследований процесса получения требуемых параметров качества штока алмазным выглаживанием

После проведения эксперимента в измерительной лаборатории завода ООО «ПСК ПластМеталл» было выполнено профилографирование обработанных участков поверхностей образцов. Результаты измерения шероховатости поверхности по параметру Ra , радиуса микросферы профиля $R_{сф}$ и коэффициент площади материала в зависимости от усилия деформирования, подачи, скорости вращения шпинделя и радиуса выглаживателя представлены в таблице 3.10, а профилограммы поверхностей образцов на рисунке 3.13.

Из рис. 3.13 видно, что усилие деформирования и радиус выглаживателя оказывают существенное влияние на формирование микропрофиля поверхности. Предварительные эксперименты показали, что для получения лучших результатов по шероховатости необходимо, чтобы предварительная шероховатость была не выше 0,8 мкм. Тогда обработку можно выполнить за один проход инструмента.

Выполнение обработки за один проход имеет существенное значение для выглаживания тонких покрытий, так как позволяет уменьшить исходную шероховатость в 2–2,5 раза без нарушения адгезии покрытия с основой.

Таблица 3.10 — Результаты эксперимента

А: Усилие выглаживания, Н	Б: Скорость вращения, м/мин	В: Подача, мм/об	Г: Радиус выглаживателя, мм	Стандартный порядок	Порядок проведения	Ra, мкм	Rсф, сферы, мкм	Mr ₂ , мкм	HV
150	150	0,02	1,5	43	1	0,38	80	85	957
150	100	0,05	3,0	40	2	0,19	40	87	954
50	200	0,05	1,5	15	3	0,23	50	85	956
50	100	0,02	3,0	2	4	0,38	40	83	899
100	100	0,05	3,0	22	5	0,19	40	87	911
100	100	0,10	3,0	24	6	0,29	60	87	903
100	200	0,10	3,0	36	7	0,15	40	88	957
100	200	0,05	3,0	34	8	0,23	50	85	970
100	100	0,02	1,5	19	9	0,4	60	88	957
100	100	0,02	3,0	20	10	0,22	70	87	901
100	150	0,02	3,0	26	11	0,3	80	89	908
50	150	0,05	1,5	9	12	0,16	80	85	962
100	200	0,05	1,5	33	13	0,22	40	85	899
50	100	0,05	3,0	4	14	0,3	40	85	972
50	200	0,02	1,5	13	15	0,32	80	82	937
150	150	0,10	3,0	48	16	0,25	40	84	906
50	150	0,02	3,0	8	17	0,28	50	83	897
50	200	0,05	3,0	16	18	0,28	80	81	877
50	200	0,10	1,5	17	19	0,34	50	83	954
100	100	0,10	1,5	23	20	0,4	80	89	914
150	200	0,02	1,5	49	21	0,36	70	83	918
50	200	0,02	3,0	14	22	0,37	40	82	979
150	200	0,10	1,5	53	23	0,29	60	85	979
150	150	0,10	1,5	47	24	0,14	40	84	911
150	200	0,10	3,0	54	25	0,24	70	81	923
100	200	0,02	1,5	31	26	0,33	80	88	927
100	100	0,05	1,5	21	27	0,23	40	87	970
150	100	0,10	1,5	41	28	0,35	40	84	926
100	150	0,05	1,5	27	29	0,38	40	91	876
50	150	0,02	1,5	7	30	0,32	50	83	957

Продолжение таблицы 3.10

А: Усилие выглаживания, Н	В: Скорость резания, м\мин	В: Подача, об\мин	Г: Радиус выглаживателя, мм	Стандартный порядок	Порядок проведения	R_a , мкм	R_{sf} , сферы, мкм	Mr_2 , мкм	HV
100	150	0,05	3,0	28	31	0,26	70	90	873
50	150	0,10	1,5	11	32	0,14	50	83	897
150	150	0,05	3,0	46	33	0,4	80	87	931
100	150	0,10	3,0	30	34	0,31	40	88	903
150	100	0,02	1,5	37	35	0,38	50	88	968
50	150	0,05	3,0	10	36	0,36	50	85	900
150	150	0,02	3,0	44	37	0,27	50	85	942
50	100	0,02	1,5	1	38	0,19	50	86	947
150	200	0,05	3,0	52	39	0,3	40	86	882
100	200	0,10	1,5	35	40	0,14	70	88	892
150	100	0,02	3,0	38	41	0,25	70	84	942
100	150	0,10	1,5	29	42	0,25	70	88	925
50	200	0,10	3,0	18	43	0,24	60	85	971
100	150	0,02	1,5	25	44	0,26	50	89	910
50	150	0,10	3,0	12	45	0,4	70	84	903
50	100	0,10	1,5	5	46	0,22	70	85	925
100	200	0,02	3,0	32	47	0,17	50	87	964
150	150	0,05	1,5	45	48	0,24	70	86	880
50	100	0,05	1,5	3	49	0,39	80	86	953
150	200	0,02	3,0	50	50	0,4	70	85	923
150	200	0,05	1,5	51	51	0,34	40	88	924
50	100	0,10	3,0	6	52	0,37	40	84	946
150	100	0,10	3,0	42	53	0,25	70	85	910
150	100	0,05	1,5	39	54	0,15	60	87	883

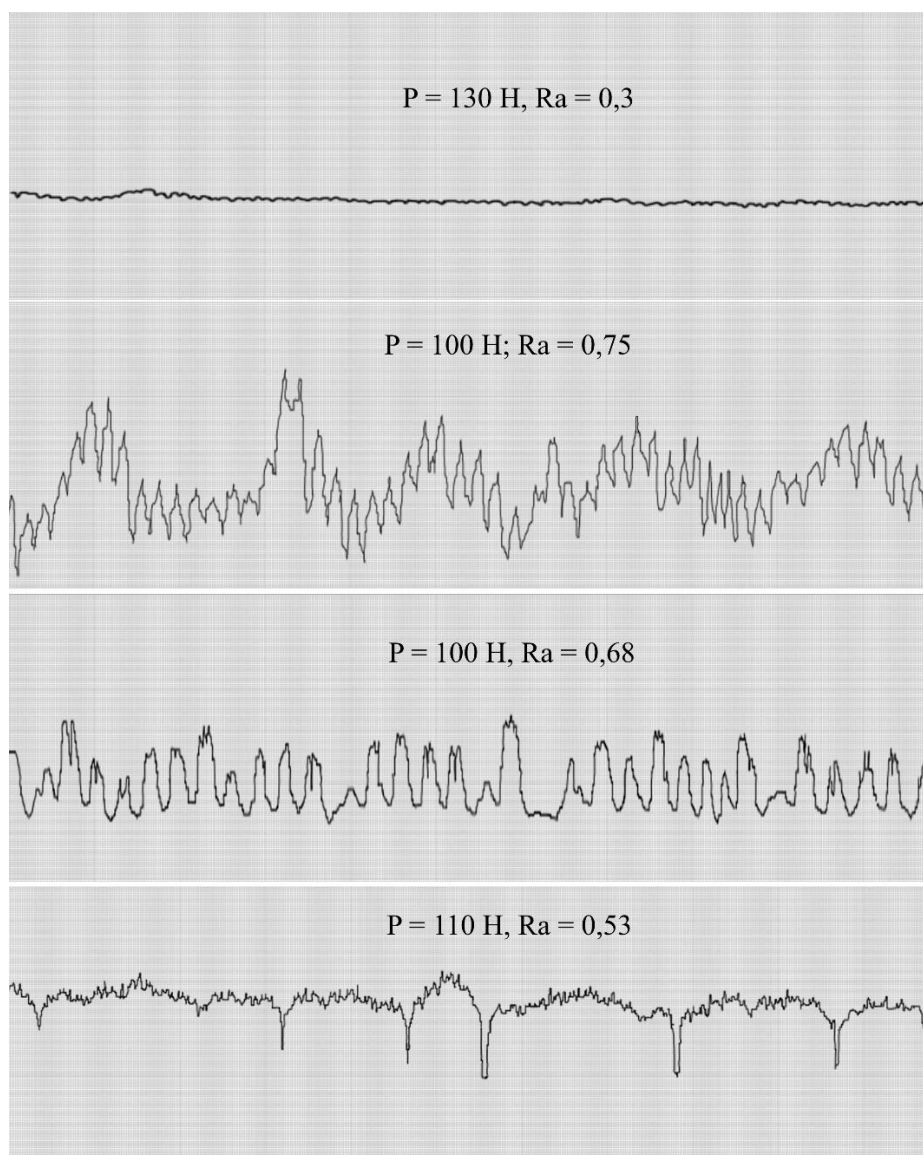


Рисунок 3.12 — Профилограммы поверхностей образцов после алмазного
выглаживания инструментом с различным радиусом выглаживателя: *а, в, г* -

$R_{алм}=1,5$ мм; *б* - $R_{алм}=3,0$ мм

На рисунке 3.12 изображены профилограммы хромированной поверхности после алмазного выглаживания с различной величиной усилия деформирования. Отчетливо заметно, что с увеличением усилия деформирования до определенного значения шероховатость уменьшается с 0,75 мкм до минимального значения 0,4 мкм. Установлено, что уменьшение шероховатости до 0,32 мкм можно достигнуть за счет оптимизации подачи выглаживателя.

Изучение шероховатости и топографии обработанной поверхности показало, что в зависимости от направления смятия микрогребешков тонкого покрытия возникает картина, соответствующая схеме, изображенной на рисунке 3.13, аналогичной случаю обработки компактного материала.

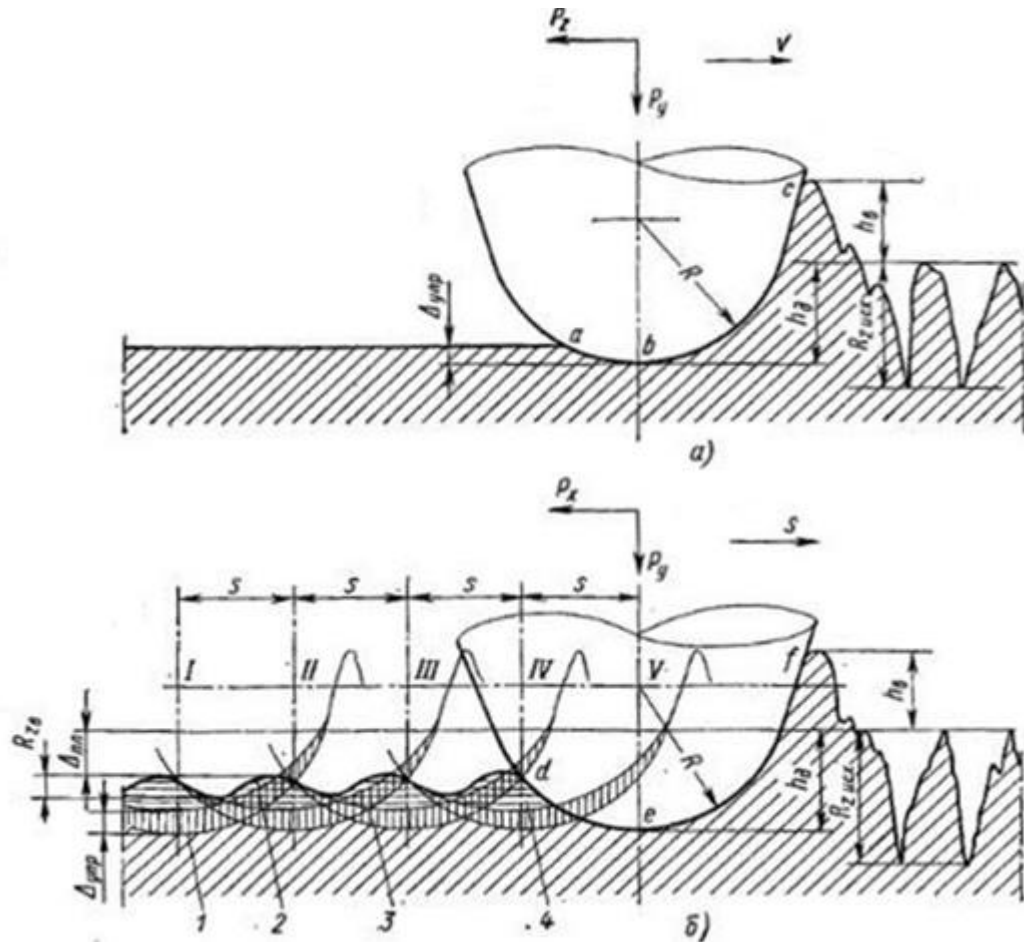


Рисунок 3.13 — Схема деформирования хромированной поверхности в различных направлениях

Прижатый к обрабатываемой хромированной поверхности с силой P_y инструмент внедряется в нее на заданную глубину h_d , и при движении в направлении, противоположном направлению вращения заготовки, сглаживает исходные неровности (рисунок 3.13, а). Вследствие неоднородности исходной шероховатости хромированной поверхности, разброса по твердости и наличия волнистости реальная поверхность не является совершенно гладкой в направлении

движения инструмента, вместе с тем высота шероховатости в указанном направлении (продольная шероховатость) значительно меньше, чем высота поперечной шероховатости.

После прохода инструмента происходит частичное упругое восстановление поверхности на величину $\Delta_{\text{упр}}$. Вследствие того, что впереди выглаживателя образуется небольшой валик пластически деформированного металла покрытия h_B , передняя полуповерхность выглаживателя получается нагруженной немного больше, чем задняя полуповерхность. Поэтому при выглаживании возникает сила P_z .

При продольном перемещении (рисунок 3.13, б) выглаживатель раздвигает металл деформируемых неровностей покрытия в стороны. При этом со стороны исходной поверхности образуется валик деформированного металла h_6 , а со стороны выглаженной поверхности происходит искажение профиля канавок, образовавшихся при предыдущих оборотах детали в результате пластического течения металла, выдавливаемого из-под выглаживателя в сторону выглаженной поверхности. При этом в наибольшей степени искажается профиль канавки, образованной на предыдущем обороте [97–99].

После каждого оборота обрабатываемой заготовки канавка, а точнее след выглаживателя, перемещается в осевом направлении на величину подачи s . При этом происходит ее многократное перекрытие при последующих оборотах обрабатываемой детали, так как ширина этой канавки больше величины подачи. Вследствие того, что со стороны пока еще невыглаженной поверхности образуется валик деформированного металла h_6 , правая полуповерхность (в направлении подачи) нагружена гораздо больше, чем левая полуповерхность. Поэтому в процессе выглаживания возникает осевая сила P_x .

Таким образом, зная механику деформирования поверхностного слоя покрытия, необходимо назначать такие режимы (усилие деформирования и глубину внедрения инструмента), чтобы исключить образование перед

выглаживателем валиков значительной высоты во избежание отслоения тонкого покрытия.

Микротвердость поверхности, определяемая методом Виккерса, изменялась следующим образом (таблица 3.11):

Таблица 3.11 — Изменение микротвердости (по Виккерсу) хромированной поверхности до и после алмазного выглаживания в зависимости от шероховатости поверхности

P , гс	Ra , мкм		
50	0,4	0,7	1,5
	990 HV	870 HV	780 HV

При этом упрочнение выглаженной поверхности относительно исходной хромированной составило 26-28%.

Упрочнение поверхностного слоя при алмажном выглаживании обусловлено увеличением числа дефектов (искажений) в кристаллической решетке материала покрытия и плотности дислокаций при поверхностном пластическом деформировании.

Таким образом, эксперименты показали, что при выполнении алмазного выглаживания хромированных поверхностей и установлении требуемой величины усилия деформирования необходимо учитывать упругую отдачу материала обрабатываемой заготовки.

Эксперименты также показали, что при алмажном выглаживании, выполненном сразу после хромирования, возможно получить шероховатость поверхности Ra в пределах 0,4...0,7 мкм и степень упрочнения ΔH 26-28%.

3.5 Анализ результатов экспериментальных исследований

По результатам экспериментальных данных были получены регрессионные модели, устанавливающие связь между шероховатостью обработанной

хромированной поверхности образцов и режимами обработки. Из рисунка 3.14 видно, что с увеличением радиуса инструмента уменьшение шероховатости при увеличении усилия деформирования происходит более активно. Вместе с тем при меньшем радиусе индентора интервал усилий деформирования, обеспечивающих минимальную шероховатость, несколько шире, чем при радиусе 3,0 мм.

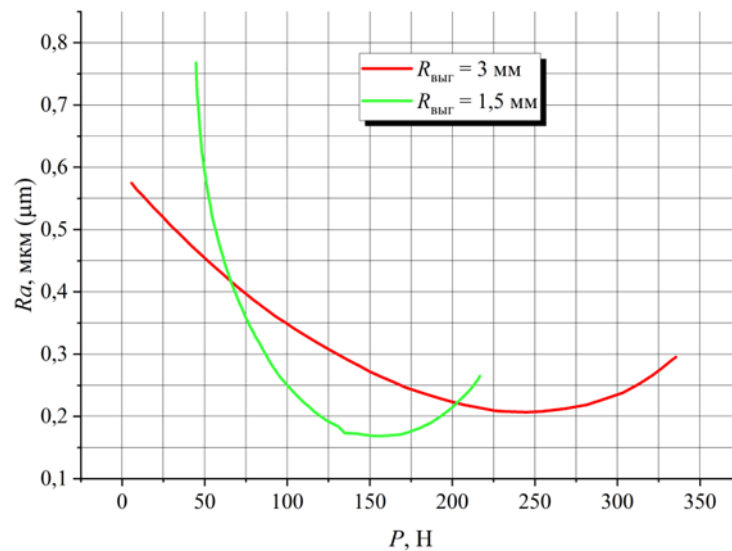


Рисунок 3.14 — Зависимость шероховатости от силы выглаживания при исходной шероховатости поверхности покрытия $Ra = 0,63$ мкм.

Важным параметром процесса при алмазном выглаживании является кинематический фактор, который определяется подачей инструмента. Подача определяет количество циклов деформации (кратность нагружения), которым подвергается каждая отдельная неровность выглаживаемой хромированной поверхности. Так, шероховатость будет минимальной при выглаживании с подачей $0,03 \div 0,05$ мм/об и резко увеличивается при подаче больше 0,1 мм/об.

На рисунке 3.15 представлена зависимость шероховатости поверхности после алмазного выглаживания от усилия выглаживания и подачи, а также выявлена квадратичная модель зависимости шероховатости от усилия выглаживания и подачи, что получило экспериментальное подтверждение для хромированных образцов из стали 40Х.

$$Ra = 0,412 - 0,0019P - 1,734S + 0,00001P^2 + 15,79S^2 - 0,007PS, \quad (3.1)$$

где P – усилие выглаживания, Н; S – подача, мм/об.

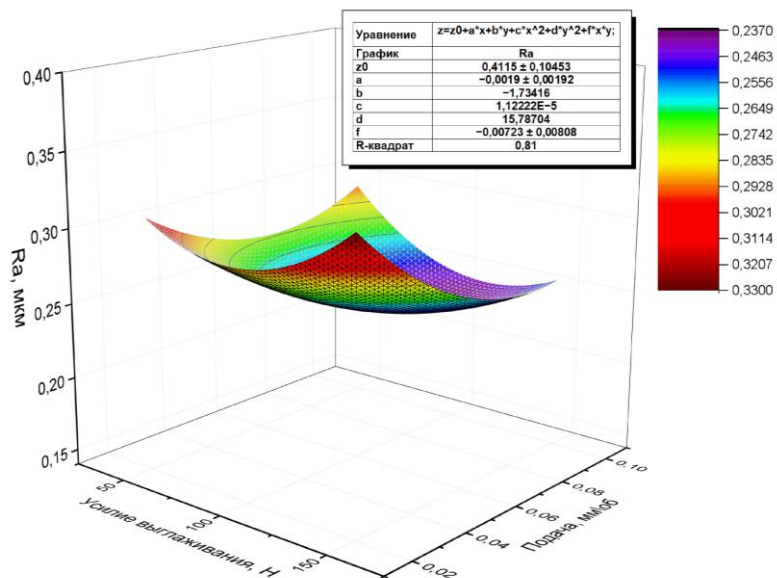


Рисунок 3.15 — Зависимость шероховатости от усилия выглаживания и подачи

На рисунке 3.16 представлена зависимость радиуса сферического микрогребешка после алмазного выглаживания от усилия выглаживания и подачи, а также выявлена квадратичная модель зависимости шероховатости от усилия выглаживания и подачи.

$$Rc\phi = 87,3 + 0,08P - 199,5S + 0,0001P^2 + 2731,5S^2 - 1,7PS \quad (3.2)$$

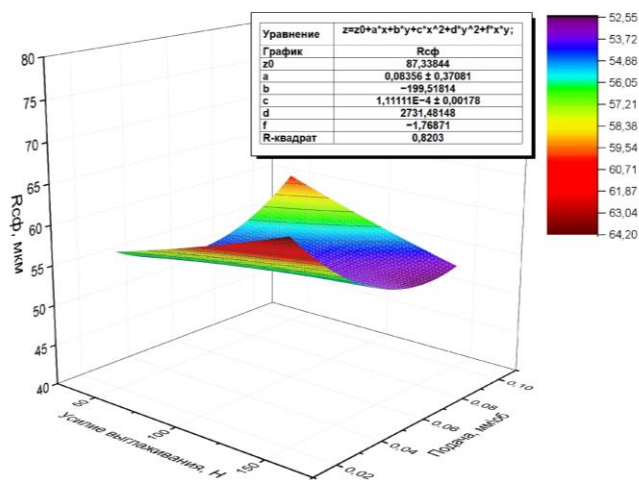


Рисунок 3.16 — Зависимость радиуса сферического микрогребешка от усилия выглаживания и подачи

Регрессионная модель зависимости радиуса сферического микрогребешка от технологических режимов также получила экспериментальное подтверждение для хромированных образцов из стали 40Х. На рисунке 3.17 представлена профилограмма поверхности после алмазного выглаживания с радиусом выступов микропрофиля от 50 мкм и выше, выявленная в главе 2, которая является наиболее благоприятной для условия контакта уплотнения с хромированной поверхностью штока.

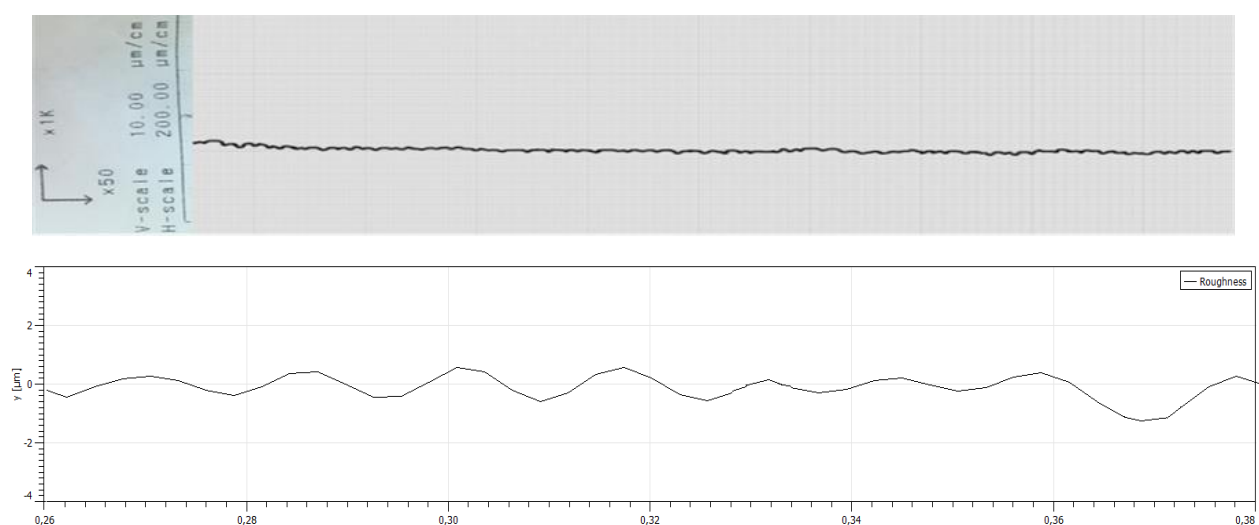


Рисунок 3.17 — Профилограмма шероховатости поверхности после алмазного выглаживания с радиусом единичного сферического выступа $R_{сф}$ от 50 мкм и шероховатостью $Ra=0,26$ мкм

Таким образом, при помощи экспериментального исследования удалось достичь требуемого микропрофиля с радиусом 50 мкм и выявить квадратичную модель связи между шероховатостью поверхности и технологическими параметрами отделочной обработки алмазным выглаживанием.

3.6 Выводы

1. В результате анализа параметров качества штоков после хромирования, выявлено, что в ряде случаев при упрочнении поверхностного слоя электролитическим методом возможно появление нерегламентированной погрешности геометрической формы в виде отклонения от круглости, значение которой соизмеримо с допуском на размер.

2. Установлено, что для обеспечения требуемой макрогеометрии поверхности после хромирования целесообразно взамен традиционного полирования применять обработку твердым точением, благодаря чему устраняется погрешность формы. В результате проведения и обработки данных экспериментальных исследований получены оптимальные режимы обработки твердым точением, обеспечивающие требуемую точность геометрической формы хромированных штоков: скорость резания $V = 350$ м/мин; продольная подача $S = 0,05$ мм/об, глубина резания $t = 26$ мкм.

3. Установлено, что для обеспечения требуемого микропрофиля поверхности штока для благоприятных условий контакта с уплотнением в качестве отделочной обработки хромированного штока целесообразно применять сглаживающую обработку алмазным выглаживанием.

4. В результате проведения серии экспериментальных исследований получены уравнения регрессии, устанавливающие связь между шероховатостью обработанной поверхности и режимами выглаживания, а также оптимальные параметры процесса обработки, обеспечивающие получение шероховатости поверхности $Ra = 0,26$ мкм с $Rc\phi \approx 50$ мкм: радиус выглаживателя $R_{алм} = 1,5$ мм, скорость выглаживания $V = 200$ м/мин, продольная подача выглаживателя $S = 0,06$ мм/об, усилие деформирования $P = 150$ Н.

Глава 4. Исследование влияния параметров поверхностного слоя штока, обработанного алмазным выглаживанием, на ресурс пары трения шток-уплотнение

4.1 Исследование влияния вида отделочной обработки штока на фактическую площадь контакта в паре шток-уплотнение

От фактической площади контакта зависит износ, время взаимодействия на единичном контакте и температура, развиваемая при трении [66; 68; 85].

Авторы [100] обнаружили, что площадь контакта эластомера с шероховатой поверхностью упругого материала остается почти постоянной на низкой скорости перемещения (до 2 м\мин), в то время как на высокой скорости реальная площадь контакта уменьшается, что приводит к увеличению удельного давления в паре трения и соответственно, ускоренному износу уплотнения.

Для выявления фактической площади контакта в трибосопряжении шток-уплотнение были подготовлены образцы уплотнений из двух разных материалов *NBR* и *PTFE* размером 10 × 30 мм (рисунок 4.1). Исследование проводилось оптическим методом при помощи светового микроскопа *Keyence VHX-600* (Япония).

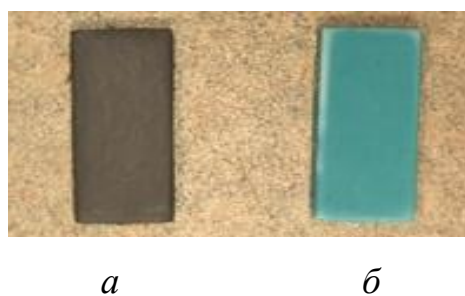


Рисунок 4.1 — Фото образцов: *a* - *NBR*; *б* - *PTFE*

В экспериментах в качестве контртела участвовали образцы из стали 40Х, одна часть из которых была обработана полированием, вторая — алмазным выглаживанием. При этом шероховатость поверхности образцов *Ra* находилась в диапазоне 2,8...3,2 мкм.

На поверхность каждого из прямоугольных образцов уплотнений укладывалась тонкая стеклянная пластинка (15×15 мм), поверх которой поочередно устанавливались образцы, обработанные алмазным выглаживанием и полированием, и прижимались к поверхности контакта при помощи грузов с усилием $F=30\text{Н}$. В образцах было предусмотрено сквозное отверстие диаметром 8 мм для возможности наблюдения топографии контакта (рисунок 4.2). Эксперимент проводился в ФГАО ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО» с использованием сертифицированного оборудования. Изображения были получены с 500-кратным увеличением. Фото фактической площади контакта в виде характерных пятен контакта показано в таблице 4.1.

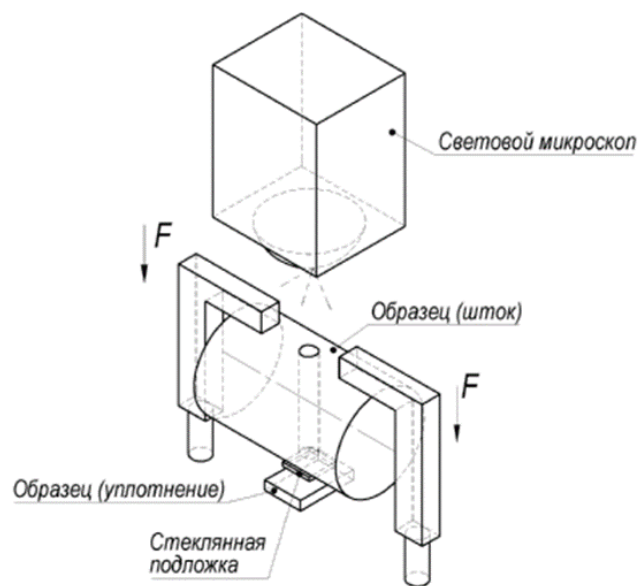
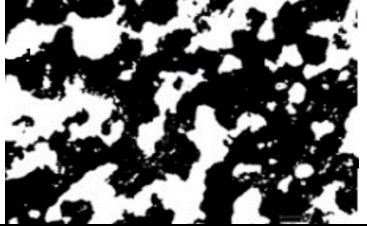


Рисунок 4.2 — Схема установки для определения фактической площади контакта в паре шток-уплотнение

Из таблицы **Ошибка! Источник ссылки не найден.1.** отчетливо видно, что для образца с финишной обработкой алмазным выглаживанием градиент площади контакта выше, чем для полированного образца., возможно, благодаря прежде всего сферической форме единичных микровыступов поверхности и регулярному микропрофилю образцов, создаваемых обработкой поверхностным пластическим

деформированием. Это способствует более равномерному и плотному прилеганию уплотнения. Для полированных образцов наблюдается дискретный характер контакта, причем, для уплотнения из материала *NBR* площадь контакта больше, чем для *PTFE*, вероятно, вследствие более высокой податливости материала к деформации.

Таблица 4.1 — Пятна контакта при взаимодействии с уплотнением полированных и выглаженных образцов, нагрузка $F=30$ Н

Метод обработки	<i>NBR</i>	<i>PTFE</i>
Полирование		
Алмазное выглаживание		

При исследовании трения эластомеров для расчета фактической площади контакта Ar в работе [33] предлагается использовать следующее уравнение:

$$\frac{Ar}{Ac} = 1 - e^{(-K_5 q_e / E)}, \quad (4.1)$$

где q_e – контурное давление, e – основание натурального логарифма, K_5 – эмпирический коэффициент. Ac – контурная площадь контакта.

Заметно, что уравнение (4.1) не содержит параметров, характеризующих геометрию поверхности, и может применяться лишь для расчета фактической площади контакта эластомеров.

Поэтому для расчета фактической площади контакта эластомера и шероховатой поверхности стального образца в нашем случае применяется модель Буша, Гибсона и Томаса (*BGT*) [102]. Модель *BGT* предполагает, что шероховатые

поверхности тела находятся в чисто нормальном контакте с вершинами полуэллипсоидальных неровностей. Когда нормальная нагрузка невелика, получается асимптотическая линейная зависимость между реальной площадью контакта и нормальной нагрузкой [103]. Следовательно, модель *BGT* справедлива для слабонагруженных упругих контактов, таких как в рассматриваемом эксперименте.

Согласно модели *BGT* реальная площадь контакта A_r (как доля контурной площади A_c) определяется выражением:

$$\frac{A_r}{A_c} = \frac{k}{\sqrt{|\nabla h|}^2} \frac{\bar{p}}{E^*} \frac{100}{M_{r2}} \quad (4.2)$$

где, k – константа пропорциональности, определяемая выражением $\sqrt{2\pi}$; $\sqrt{|\nabla h|}$ – среднеквадратичное значение (*RMS*) шероховатой поверхности; p – среднее давление на номинальной площади контакта A_a ; E^* – эффективный модуль Юнга контактной пары; M_{r2} – относительная материальная составляющая к впадинам.

Кривые коэффициента площади опоры поверхности и вытекающие из них параметры относятся к так называемым «функциональным параметрам». Они в основном важны с трибологической точки зрения, поскольку существенно влияют на износостойкость и срок службы компонентов.

Как было отмечено в главе 2.1, кривые коэффициента смятия профиля – это отношение суммарной площади поверхности профиля, которое получается путем усечения вершин поверхности плоскостью, параллельной средней плоскости, на заданном уровне усечения z на площади выборки, к общей площади (рисунок 4.3).

Параметры поверхностного слоя образцов, в том числе параметр площади контактной поверхности на заданном уровне сечения материала M_{r2} , которые подвергались эксперименту, представлены в таблице **Ошибка! Источник ссылки не найден.2**.

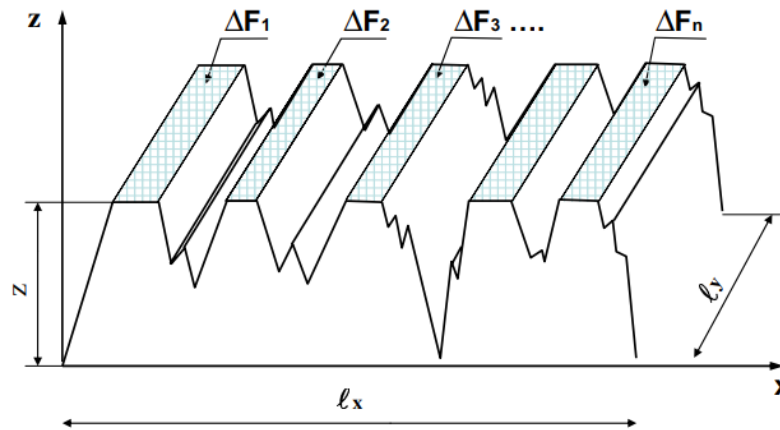


Рисунок 4.3 — Эскиз для интерпретации площади опоры поверхности на заданном уровне усечения z микропрофиля плоскостью, параллельной средней плоскости

Сравнивая площадь, полученную в результате усечения вершин микронеровностей поверхности, с общей площадью, коэффициент площади материала можно выразить уравнением:

$$M_r = \frac{1}{l_x} \frac{1}{l_y} \sum_{i=1}^n \Delta F_n \times 100\%, \quad (4.3)$$

где l_x и l_y - базовые длина и ширина опорной поверхности анализируемого участка контакта; ΔF_n - элементарная площадь сечения единичного микровыступа шероховатости.

Таблица 4.2 — Параметры шероховатости испытываемых образцов штоков

Метод финишной обработки	№ образца	Ra , мкм	Rq , мкм	Rp , мкм	Rv , мкм	Rt , мкм	Rz , мкм	Rk , мкм	Rpk , мкм	Rvk , мкм	Mr_2 , %
		x 10 ⁻¹									
Полирование	1	2,83	4,76	7,08	4,42	13,31	73,58	8,02	6,25	5,22	77
	2	3,43	5,06	7,88	4,72	14,21	89,18	8,03	6,05	5,68	83
	3	3,93	6,16	7,38	5,22	14,74	102,18	7,87	6,06	5,87	72
	4	3,23	6,06	6,28	4,72	12,31	83,98	7,44	6,64	5,34	77
	5	3,83	4,76	7,78	5,12	13,01	99,58	7,46	6,03	5,83	83

	6	3,23	5,86	6,48	4,32	12,61	83,98	7,72	6,32	5,03	72
	7	3,33	5,46	7,78	4,42	13,95	86,58	7,52	6,92	5,85	72
	8	2,83	4,96	6,88	5,02	12,31	73,58	7,47	6,19	5,29	82
	9	3,03	5,66	7,68	5,32	12,71	78,78	7,63	6,71	5,46	81
	10	3,43	4,86	7,88	5,22	14,32	89,18	7,55	6,54	5,70	74
	11	3,63	5,06	7,18	5,22	14,61	94,38	7,89	6,94	5,08	77
	12	2,93	5,76	7,58	4,52	14,43	76,18	7,21	6,59	5,67	77
Алмазное выглаживание	1	2,93	4,76	6,03	3,43	9,91	76,18	4,51	3,71	3,33	91
	2	3,13	5,86	6,13	3,63	9,86	81,38	4,5	3,47	3,38	90
	3	2,73	5,86	6,03	3,93	9,85	70,98	4,72	3,31	3,43	92
	4	2,33	5,46	5,43	3,93	10,11	60,58	5,05	3,52	3,41	88
	5	2,03	4,96	5,53	3,33	10,13	52,78	4,64	3,5	3,38	89
	6	2,13	5,86	5,93	3,43	10,01	55,38	4,81	4,05	3,34	91
	7	1,63	5,16	5,73	3,93	10,08	42,38	5,03	3,54	3,32	90
	8	3,13	5,56	5,53	4,13	10,15	81,38	5,08	4,09	3,49	88
	9	2,13	5,66	6,13	3,53	10,14	55,38	4,56	3,75	3,36	91
	10	2,93	4,76	5,93	3,73	10,18	76,18	4,95	3,93	3,36	91
	11	1,93	5,46	5,23	3,93	10,18	50,18	4,57	3,41	3,35	89
	12	2,83	4,56	5,33	3,93	10,08	73,58	4,94	3,83	3,46	91

На рисунке 4.4 и рисунке 4.5 показаны экспериментальные зависимости фактической площади контакта от нагрузки, имеющие линейный характер как для полированных образцов, так и образцов, выглаженных алмазным индентором. Красными и зелеными точками показаны экспериментальные значения фактической площади соответственно при контакте с уплотнениями из *NBR* и *PTFE*.

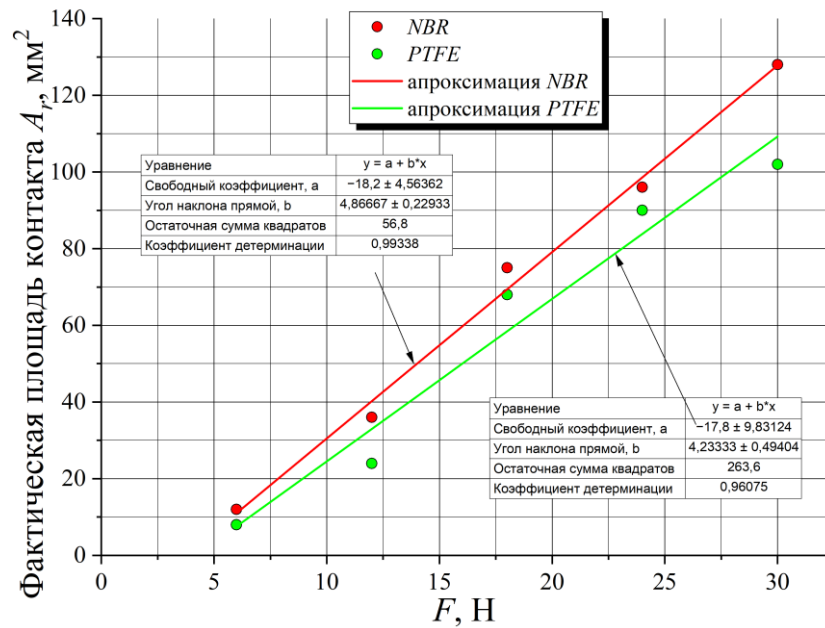


Рисунок 4.4 — Зависимость фактической площади контакта от внешней нагрузки (образец после полирования)

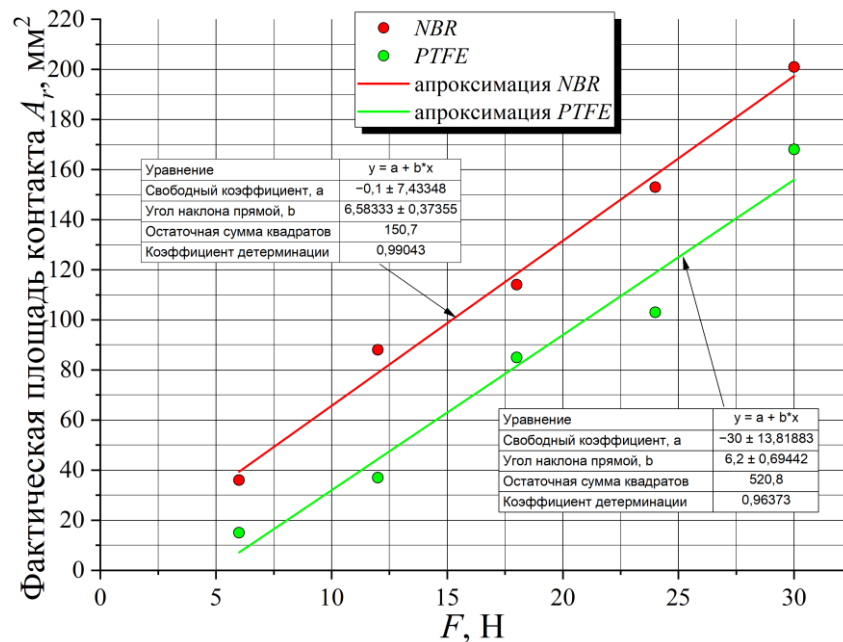


Рисунок 4.5 — Зависимость фактической площади контакта от нагрузки (образец после алмазного выглаживания)

Аналитический расчет фактической площади контакта A_r выполнялся по формуле (4.2) для всех материалов уплотнений и образцов штока. Расчет A_r проводился при нормальном давлении p , соответствующем нормальной нагрузке в

экспериментах (6, 12, 18, 24 и 30 Н). Полученные зависимости площади контакта от усилия представлена на рисунке 4.6 и 4.7.

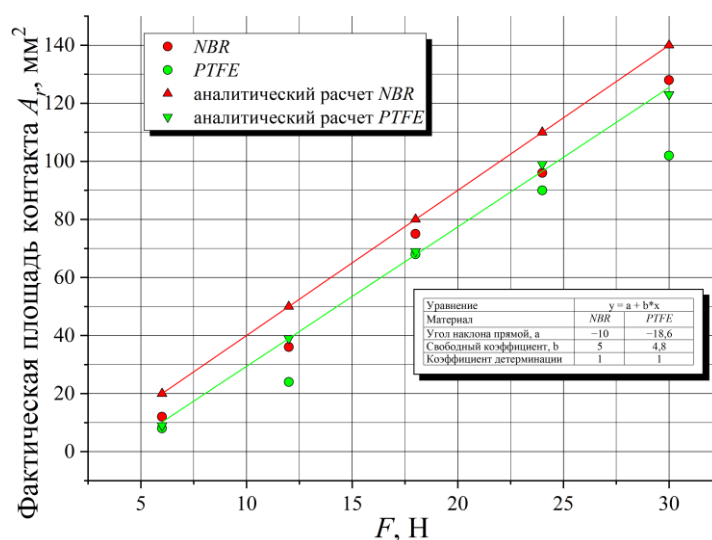


Рисунок 4.6 — График зависимости фактической площади контакта от нагрузки, полученный при помощи аналитического расчета (образцы после полирования)

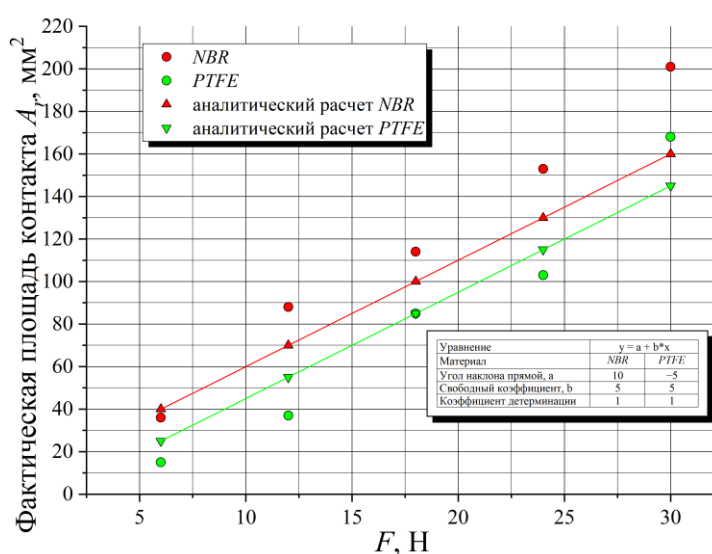


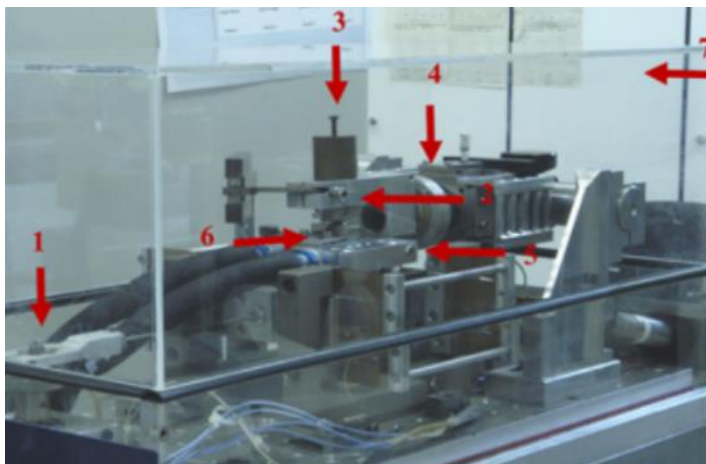
Рисунок 4.7 — График зависимости фактической площади контакта от нагрузки, полученный при помощи аналитического расчета (образцы после алмазного выглаживания)

На основании представленных результатов можно сделать следующий вывод. В случае образцов, обработанных алмазным выглаживанием площадь

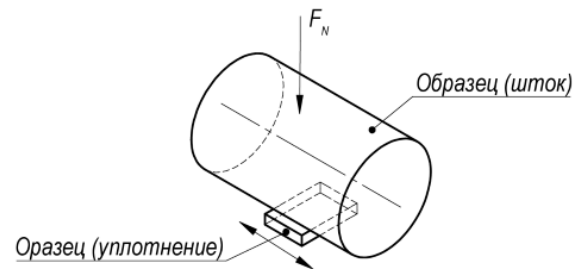
контакта с увеличивается на 61% для уплотнения марки *NBR* и на 31% для уплотнений из материала *PTFE* по сравнению с площадью контакта при взаимодействии уплотнений с полированными образцами.

4.2 Исследование коэффициента трения в паре шток-уплотнение и скорости износа сопряжения

Исследования износа и коэффициента трения скольжении проводились с помощью трибометра с возвратно-поступательным скользящим движением образца уплотнения по поверхности контртела – образца из стали 40Х. На рисунке 4.8 (а) и (б) показаны узлы и детали трибометра и схема испытаний, использованная в данном исследовании.



а



б

Рисунок 4.8 — Трибометр (а) и схема испытаний (б):

- 1 – двигатель постоянного тока с эксцентриковым регулированием; 2 – верхний рычаг со встроенным тензодатчиком; 3 – собственный груз (F_N);
 4 – вращающийся рычаг; 5 – вибрационный стол; 6 – блок держателя образца;
 7 – камера.

Образцы из материалов уплотнения *NBR* и *PTFE*, характеристики которых представлены в таблице 4.3, в первой серии испытаний совершали возвратно-поступательные движения относительно цилиндрического образца, покрытого

хромом и обработанного алмазным выглаживанием, во второй - в контакте с цилиндрическим хромированным образцом, обработанным полированием. Контактное трение проходило в условиях сухого трения. Параметры испытания приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.3 — Характеристики образцов

Свойство	<i>NBR</i>	<i>PTFE</i>
Плотность, г/см ³	1,31	2,17
Масса образца, мг	3450	5980
Предел прочности при разрыве, МПа	11, 3	30,5
Прочность на раздир (метод С), %	20	58
Удлинение при разрыве, %	30	40
Твердость по Шору А	84	—
Твердость по Шору D	—	56

Таблица 4.4 — Параметры испытаний

Параметры теста	Трибологическая система №1	Трибологическая система №2
Верхний образец	1. Хромированный образец после полирования (трапециевидная форма шероховатости); 2. Хромированный образец после алмазного выглаживания (сферическая форма шероховатости, $R > 50$ мкм)	
Нижний образец	<i>NBR</i>	<i>PTFE</i>
Тип трения	Сухой	
Длина хода (L_x), мм	10	
Нормальная нагрузка (F_N), Н	30	
Температура (Т), °С	Комнатная	
Количество циклов (n)	1 150 000	
Скорость скольжения, м/с	0,07	
Общее расстояние, пройденное за весь тест, м	15 200	
Общая продолжительность теста, мин	3975	

Перед началом испытания и после все образцы были очищены ацетоном и высушены. Стальные образцы и уплотнения взвешивали с точностью до 0,01 мг на микроаналитических весах модели *Sartorius ME235S-OCE*. Было замечено, что после испытания на стальных образцах не было потери массы, что связано прежде всего со значительной разницей в твердости контактирующих материалов. Во время каждого испытания фактическая длина хода (L_x), сила трения ($F_{тр}$) измерялись и регистрировались в режиме онлайн на протяжении всего испытания как основные трибологические величины. После каждого испытания по сохраненным значениям рассчитывались величины коэффициента трения, а по измерениям потери веса определяли объемный износ (V_w) уплотнения. Силу трения ($F_{тр}$) рассчитывали по формуле:

$$F_{mp} = \frac{F_E}{2L_x} \quad (4.4)$$

где F_E – энергия трения, Дж;

L_x – длина хода при возвратно-поступательном движении, м

Авторами [104; 105] подробно описана энергия трения (F_E), рассеиваемая в течение одного колебательного цикла с ходом $2L_x$, которая соответствует площади в пределах гистерезиса контура трения и определяется по формуле:

$$F_E = F_{mp,cr.} S, \quad (4.5)$$

где S – расстояние скольжения (путь трения), рассчитываемое через длину хода L_x образца в процессе возвратно-поступательного движения:

$$S = 2L_x n, \quad (4.6)$$

где n – количество циклов, L_x – длина хода.

Средний коэффициент трения ($\mu_{cr.}$) представляет собой рассчитанное среднее значение параметра по данным второго этапа эксперимента. Продолжительность испытаний и трибологические условия приведены в Таблица 4.4. Каждое испытание повторялось три раза и определялись соответствующие средние значения $\mu_{cr.}$

$$F_{mp,cr.} = \mu_{cr.} F_n, \quad (4.7)$$

Во всех вышеперечисленных испытаниях измеряли массу образца уплотнения до и после испытания на износ. Объемный износ (ΔV) рассчитывали путем деления разницы в весе на соответствующее значение плотности материала уплотнения. Удельная скорость износа W_s (мм³/Нм) определялась по формуле как потеря объема за единицу длины пути и приложенной нормальной нагрузки (F_n) [106].

$$W_s = \frac{\Delta V}{SF_n} \quad (4.6)$$

На рисунке 4.9 и рисунке 4.10 показано изменение коэффициента трения в зависимости от числа циклов (n) для материалов *PTFE* и *NBR* в контакте с образцами, обработанным полированием и алмазным выглаживанием, в условиях сухого трения скольжения.

В первой серии экспериментов с участием полированных образцов коэффициент трения сначала медленно увеличивался, а затем, по достижении стационарного состояния, изменялся незначительно (рис. 4.9). Так, продолжительность периода приработки длилась до 20000 циклов для обоих материалов уплотнения и здесь наблюдалось небольшое увеличение коэффициента трения, после чего при установившемся контакте коэффициент трения оставался практически постоянным: для полированного образца с уплотнением марки *NBR* изменялся с 0,42 до 0,375, а для стального образца в контакте с *PTFE* – среднее значение коэффициента трения составляло 0,34.

Коэффициент трения эластомеров, находящихся в контакте с выглаженными образцами, несколько меньше, чем при контакте с полированными. Вместе с тем период приработки для них длился дольше, в особенности для материала *PTFE* – 250000 циклов

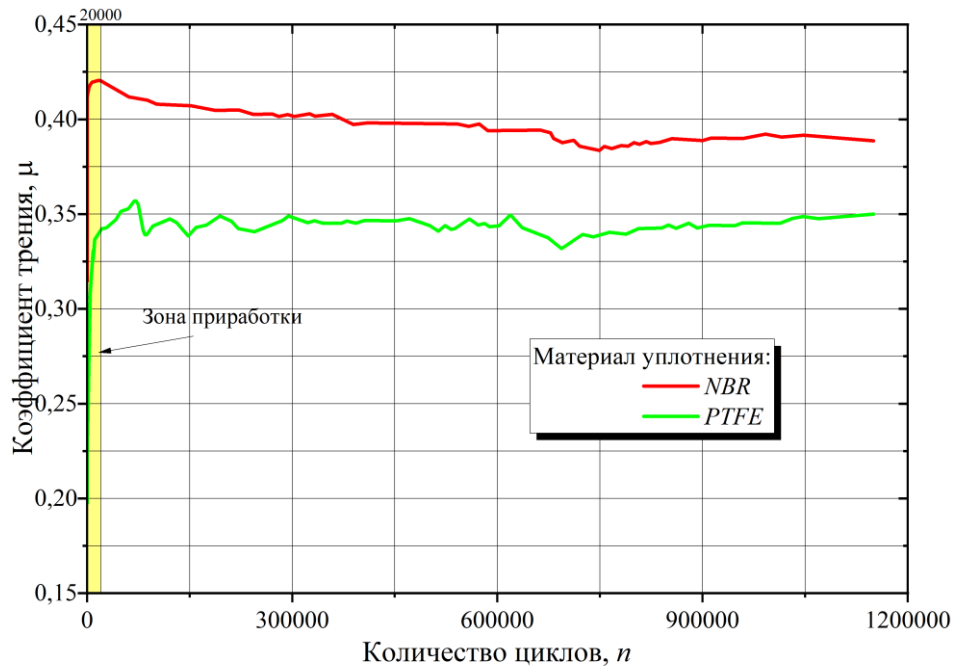


Рисунок 4.9 — Коэффициент трения при контакте с уплотнениями полированных образцов

Из рис. 4.10 видно, что характер приработки для материала *PTFE* является плавным, протяженным во времени, что характерно для более жесткого материала уплотнения, благоприятно сказывается на износостойкости уплотнения и установлении стационарного режима трения.

Для материала *NBR* коэффициент трения после периода приработки сначала снижется, а затем несколько увеличивается. Несмотря на такой характер изменения коэффициента трения, его значение меньше, чем при контакте с полированными образцами. График без резких перепадов численных значений, что говорит о более благоприятных условиях контакта.

Коэффициент трения в обоих случаях монотонно незначительно увеличивается с ростом числа циклов, после чего приобретает стабильное значение.

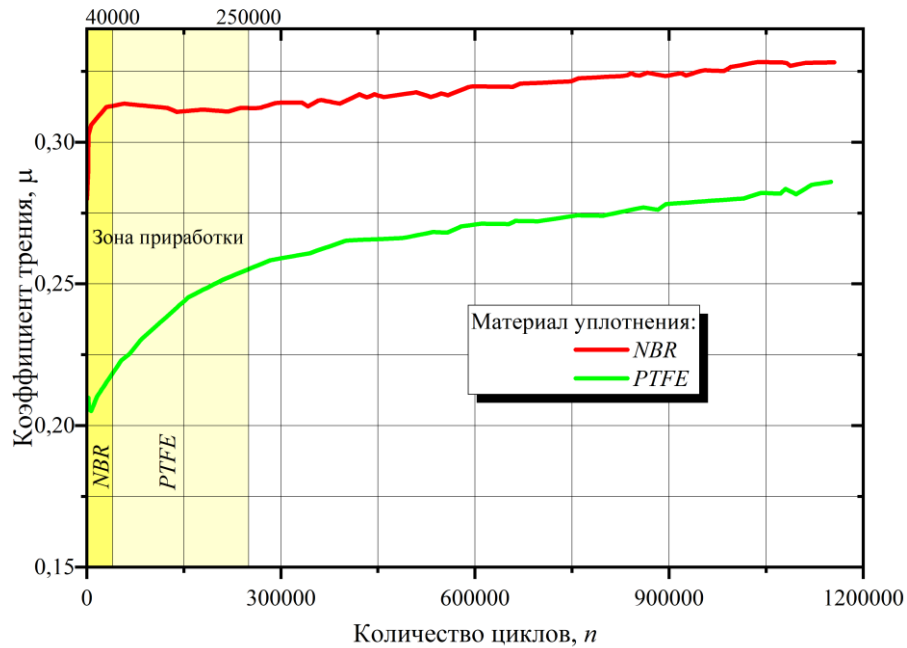


Рисунок 4.10 — Коэффициент трения при контакте с уплотнениями образцов, обработанных алмазным выглаживанием

Средние значения коэффициентов трения ($\mu_{\text{ср.}}$) и удельные скорости износа (W_s) уплотнений при контакте с образцами, обработанными полированием и алмазным выглаживаем, в условиях сухого трения показаны на рисунках 4.11 и 4.12.

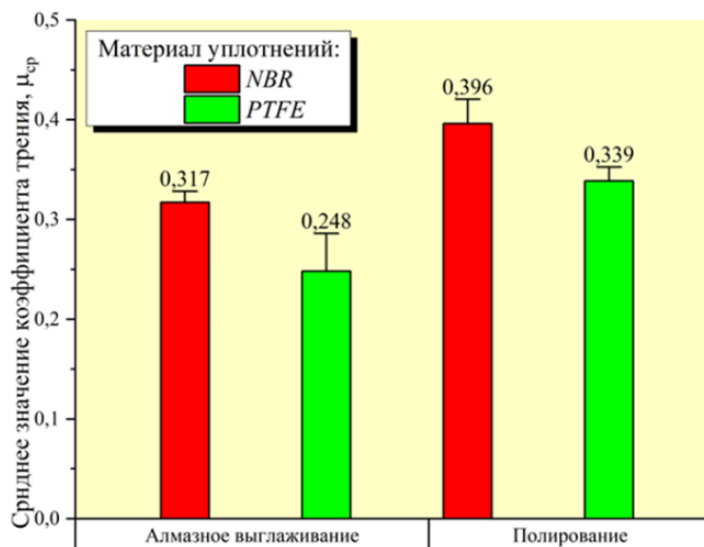


Рисунок 4.11 — Средний коэффициент трения ($\mu_{\text{ср.}}$) для материалов уплотнений NBR и PTFE при взаимодействии с полированными образцами и обработанными алмазным выглаживанием

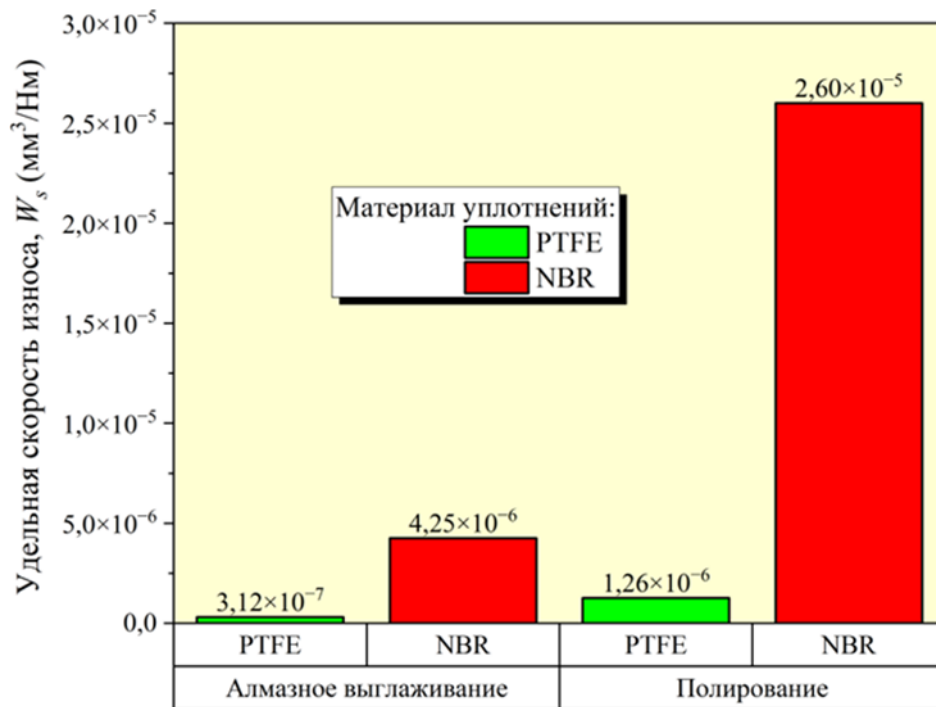


Рисунок 4.12 — Удельная скорость износа (W_s) для материалов уплотнений *NBR* и *PTFE* при разных отделочных операциях

Из рисунка 4.11 видно, что метод отделочной обработки хромированных образцов штоков оказывает существенное влияние на коэффициент трения при контакте с уплотнением. Так, при контакте с полированным образцом коэффициент трения оказался выше - 0,339 для материала *PTFE* и 0,396 для материала *NBR*, чем для пары трения с участием хромированного образца, обработанного алмазным выглаживанием - 0,248 для материала *PTFE* и 0,317 для материала *NBR*.

Из рисунка 4.12 можно сделать вывод, что скорость износа уплотнения *PTFE* при контакте с хромированным образцом после отделки алмазным выглаживанием составляет $3,12 \times 10^{-7}$ мм³/Нм, что значительно меньше чем у такого же уплотнения при контакте с полированным образцом, значение удельной скорости износа которого $1,26 \times 10^{-6}$ мм³/Нм. Аналогичный вывод можно сделать для контакта уплотнения из *NBR*, удельная скорость износа которого в паре с полированным образцом составляет $4,25 \times 10^{-6}$ мм³/Нм, тогда как в паре с полированным штоком, значение удельной скорости доходит до $2,6 \times 10^{-5}$ мм³/Нм.

Также была произведена оценка ресурса трибосопряжения, результаты которого представлены на рисунке 4.13. Расчет ресурса производился по формуле (4.7).

$$T = \frac{U_{\max}}{J}, \quad (4.7)$$

где $U_{\max}$ – предельный объемный износ подвижного сопряжения деталей узла трения, мкм^3 ; J – объемная интенсивность изнашивания, $\text{мкм}^3/\text{ч}$.

Значение $U_{\max}$ принималось равным 20 мкм^3 в соответствии с каталогами ведущих производителей уплотнений после критического нарушения герметичности.

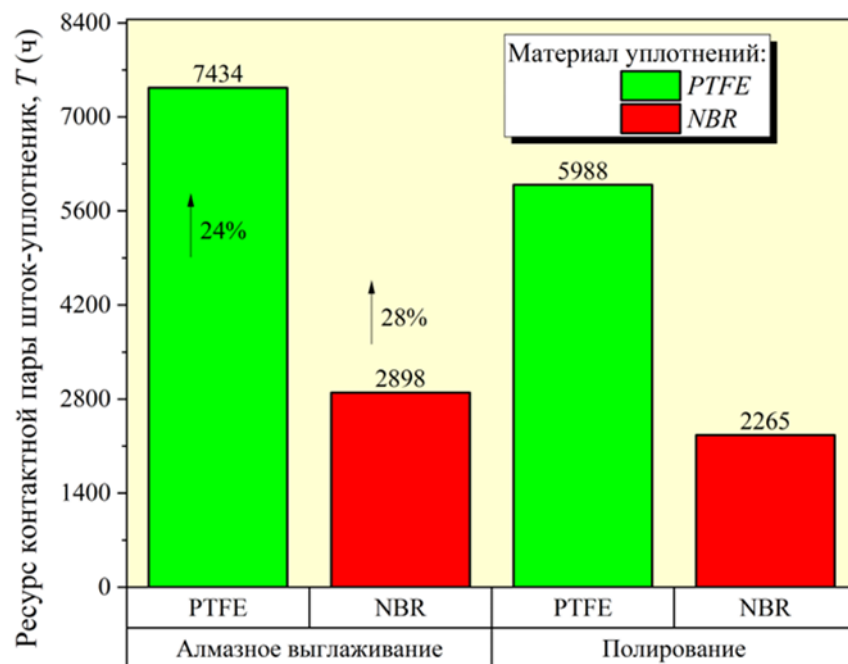


Рисунок 4.13 — Оценка ресурса трибосопряжения в зависимости от метода отделки поверхности хромированных штоков

Из рисунка 4.13 можно сделать вывод, что ресурс контактной пары «шток-уплотнение» с образцами после алмазного выглаживания, находящимися в контакте с уплотнением из материала *PTFE*, вырос на 24% и на 28% в контакте с уплотнением марки *NBR*, по сравнению с ресурсом сопряжений с полированными образцами.

4.3 Выводы

1. На основе проведения экспериментальных исследований было выявлено, что фактическая площадь контакта у образцов штоков, обработанных алмазным выглаживанием, находящихся в сопряжении с уплотнением из материала *PTFE*, увеличилась на 31%, а с уплотнением из материала *NBR* на 61% по сравнению с фактической площадью контакта с уплотнениями полированных образцов при нагружении образцов силой $F=30$ Н.

2. Отделочная обработка хромированных образцов штоков алмазным выглаживанием позволила снизить средний коэффициент контактного трения с уплотнением из марки *PTFE* с 0,339 до 0,248 или на 27%, и для материала *NBR* с 0,396 до 0,317 или на 20%, по сравнению с образцами, обработанными полированием.

3. Удельная скорость износа уплотнений *PTFE* (*NBR*) при взаимодействии с выглаженными образцами составляет $3,12 \times 10^{-7}$ мм³/Нм ($4,25 \times 10^{-6}$ мм³/Нм), что меньше аналогичного параметра при трении сухом скольжении по поверхности полированного образца $1,26 \times 10^{-6}$ мм³/Нм ($2,6 \times 10^{-5}$ мм³/Нм), что связано, прежде всего, со спецификой микропрофиля выглаженной поверхности, представляющего собой микрорельеф с выступами сферической формы с радиусом скругления от 50 мкм и выше. После расчета удельной скорости износа для материалов уплотнений *NBR* и *PTFE*, находящихся в сопряжении со штоком с различными методами отделочной обработки, произведена оценка ресурса контактной пары шток-уплотнение

4. Установление скорости износа уплотнений при взаимодействии с полированными и выглаженными образцами позволило рассчитать и сравнить ресурс сопряжений, который для уплотнений из материала *PTFE* при контакте с выглаженными образцами вырос на 24%, а для *NBR* – на 28%, по сравнению с ресурсом сопряжения с участием полированных образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе теоретических и экспериментальных исследований дано решение актуальной научной задачи повышения ресурса гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин на основе раскрытия связи эксплуатационных свойств сопряжения шток-уплотнение с параметрами микропрофиля поверхности штока и технологическими методами их достижения, что способствует увеличению срока эксплуатации погрузочно-доставочных машин и имеет важное научно-практическое значение для горной промышленности.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. На основе анализа специфики эксплуатации ПДМ на предприятии ПАО «ГМК Норильский никель» установлены причины отказов гидроцилиндров и выявлены требования к микрогеометрии сопряженных поверхностей «шток-уплотнение». Установлено, что до 87% отказов гидроцилиндров происходят из-за разрушения уплотнений, нарушения герметичности и наличия утечек, из которых до 55% из-за неисправности уплотнительных систем, остальные – по причине износа штоков.

2. На основе проведения теоретических исследований выявлены параметры микрогеометрии поверхности, в полной мере характеризующие показатели качества поверхностного слоя штока в условиях контакта с уплотнением такие как Ra (Rz), R_{max} , R_{mr} , шагово-высотный параметр t_p и радиус вершины выступа профиля шероховатости поверхности R , имеющие важное значение для обеспечения должного ресурса уплотнительных узлов. Рассмотрены различные модели микропрофилей поверхностей, рекомендуемых для штока гидроцилиндра.

3. На основе решения контактных задач теории упругости, в частности задачи внедрения жесткого тела в вязкоупругое полупространство, дано обоснование параметров микрогеометрии поверхности штока, обеспечивающих

наиболее благоприятные условия контакта штока с уплотнением. Установлено, что рациональной формой единичных выступов микропрофиля штока для контакта с уплотнением является сфера с радиусом от 50 мкм, при этом напряжения в уплотнении не превышают 0,86 МПа, тогда как при контакте с выступом в форме усеченного конуса напряжения достигают 4,7 МПа, а для сферы с радиусом 10 мкм – 2,53 МПа

4. На основе анализа погрешностей макрогеометрии штока, возникающих в процессе хромирования, предложено вместо традиционного полирования поверхности применять твердое точение, при помощи которого удастся устранить нежелательные отклонения от точности формы штока негативно сказывающихся на работоспособности рассматриваемого соединения, и достичь требуемой геометрической точности рабочей поверхности. Определены рациональные параметры обработки твердым точением: скорость резания $V = 350$ м/мин; продольная подача $S = 0,05$ мм/об, глубина резания $t = 26$ мкм.

5. Для достижения благоприятного микропрофиля штока в виде набора единичных выступов сферической формы с радиусом при вершине от 50 мкм, выявленного при помощи компьютерного моделирования, в качестве отделочной обработки хромированной поверхности предложено применять алмазное выглаживание, которое обеспечивает рациональные параметры микропрофиля штока, отвечающие заданным требованиям по условиям контакта и ресурсу деталей сопряжения шток-уплотнение. Определены оптимальные режимы бездефектной обработки, обеспечивающие требуемый микропрофиль поверхности при обработке инструментом с радиусом выглаживателя $R_{алм} = 1,5$ мм: скорость выглаживания $V = 200$ м/мин, продольная подача выглаживателя $S = 0,06$ мм/об, усилие деформирования $P = 150$ Н.

6. На основе проведенных экспериментальных исследований полированных и выглаженных хромированных образцов в контакте с уплотнениями из различных материалов установлено, что фактическая площадь контакта выглаженных образцов с уплотнением под нагрузкой больше, чем у полированных в среднем на

46 %, что благотворно сказывается на условиях контакта уплотнения со штоком в части уменьшения удельного давления на единицу площади контакта.

7. Путем стендовых испытаний определены коэффициенты трения в парах «шток полированный-уплотнение» и «шток выглаженный-уплотнение» и установлено, что в условиях сухого трения в первом случае среднее значение коэффициента трения составляет 0,34, тогда как для пары шток выглаженный-уплотнение *PTFE*, оно составляет 0,25, что на 26% меньше. Аналогичные значения для материала уплотнения *NBR* составляет соответственно 0,4 и 0,32.

8. В результате проведения серии трибологических экспериментов установлено, что удельная скорость изнашивания Ws уплотнения из материала *PTFE* при контакте с выглаженным образцом уменьшается с $1,2 \cdot 10^{-6}$ до $3,12 \cdot 10^{-7}$ мм³/Нм, а для уплотнения *NBR* Ws уменьшается с $2,6 \cdot 10^{-5}$ до $4,25 \cdot 10^{-6}$ мм³/Нм.

9. В результате реализации предложенных технологических решений по отделочной обработке хромированных штоков алмазным выглаживанием ресурс пары трения шток-уплотнение, определяющий ресурс гидроцилиндра, увеличился на 24-28 %, что существенно повышает эффективность эксплуатации гидропривода ПДМ, уменьшает затраты на техобслуживание и устранение внеплановых простоев.

Список сокращений и условных обозначений

ПДМ – погрузочно-доставочная машина

ППД – поверхностно-пластическое деформирование

ЧПУ – числовое программное управление

NBR – бутадиен-нитрильный каучук

PU – полиуретан

ν – коэффициент Пуассона (коэффициент поперечного сжатия)

E – модуль упругости

a_0 – Герцовое решение радиуса контакта с использованием мгновенного модуля

a – радиус контакта

A_c – площадь контакта

D – коэффициент влияния вязкоупругого перемещения

g_i – жесткость пружины в обобщенной модели Максвелла

G – функция Грина вязкоупругой деформации за счет единичной нагрузки

h, h_0 – поверхностный зазор, начальный поверхностный зазор

$H(t)$ – ступенчатая функция Хэвисайда

p_0 – решение Герца пикового давления с использованием мгновенного модуля

p – контактное давление

R – радиус индентора

t – время

u_3 – нормальное смещение поверхности

$W(t)$ – нормальная нагрузка вдавливания

ΔW – амплитуда гармонической нагрузки

x_1, x_2 – координаты в пространстве

ΔV – объем износа

W_s – удельная скорость износа

F – сила вдавливания

$F_{\text{выг}}$ – усилие выглаживания

V – скорость резания

S – подача инструмента

μ – коэффициент трения

$\mu_{\text{ср}}$ – средний коэффициент трения

Rmr – коэффициент смятия профиля

t_p – относительная опорная длина профиля

Rpk – средняя высота выступов профиля

Rk – средняя высота центральной области профиля

Rvk – средняя глубина впадин профиля

Ra – среднее арифметическое отклонение профиля

Rz – высота неровностей профиля по десяти точкам

R_{max} – наибольшая высота неровностей профиля

$\psi_r(t)$ – функция модуля релаксации

Aa – номинальная площадь контакта

Ac – контурная площадь контакта

Ar – фактическая площадь контакта

F_N – нормальная сила

F_T – тангенциальная сила

$\Delta_{\text{кр}}$ – отклонения от круглости

$R_{\text{алм}}$ – радиус рабочей части алмаза

HV – твердость по методу Виккерса

HRC – твердость по методу Роквелла

q_e – контурное давление

$F_{\text{тр}}$ – сила трения

V_w – объемный износ

Список литературы

1. Величко С.А. Прогнозирование среднего ресурса гидроцилиндров, отремонтированных с восстановлением деталей электроискровым методом / С.А. Величко // Труды Госнिति. – 2015. – Т. 120.
2. Погрузочно-доставочные машины – Основные средства [Электронный ресурс]. – URL: <https://os1.ru/article/26765-pogruzochno-dostavochnye-mashiny> (дата обращения: 11.12.2021).
3. Mining Remanufacturing Components Market [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/mining-remanufacturing-components-market-44140438.html> (дата обращения: 12.11.2021).
4. Севагин С.В. Обеспечение требуемого качества изготовления штоков гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин / С.В. Севагин, А.П. Вержанский // Горный Информационно-Аналитический Бюллетень (научно-Технический Журнал). – 2021. – № 5.
5. О модернизации конструкции гидроцилиндров / Д.Ю. Кобзов [и др.] // Механики Ххi Веку. – 2012. – № 11.
6. ГОСТ 27674-88 Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 21 с.
7. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
8. Елагина О.Ю. Технологические методы повышения стойкости деталей машин : Учебное пособие / Елагина О.Ю.
9. Ишлинский А.Ю. Механика : идеи, задачи, приложения / А.Ю. Ишлинский. – М.: Наука, 1985. – 623 с.
10. Чичинадзе А.В. Основы трибологии : (Трение, износ, смазка) / А.В. Чичинадзе. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2001. – 663 с.

11. Skowrońska J. Overview of Materials Used for the Basic Elements of Hydraulic Actuators and Sealing Systems and Their Surfaces Modification Methods / J. Skowrońska, A. Kosucki, Ł. Stawiński // *Materials*. – 2021. – T. 14. – № 6.
12. Cracking due to Cu and Ni segregation in a 17-4 PH stainless steel piston rod / J. Tian [et al.] // *Engineering Failure Analysis*. – 2016. – Vol. 65. – P. 57-64.
13. Kowalski K. Exploitation and repair of hydraulic cylinders used in mobile machinery / K. Kowalski, T. Złoto, Bo N. J. Persson // *Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. – 2014. – № 14. – P. 53-58.
14. Failure analysis of AISI 410 stainless-steel piston rod in spillway floodgate / D.C. Moreira [et al.] // *Engineering Failure Analysis*. – 2019. – Vol. 97. – P. 506-517.
15. Papatheodorou T. Influence of hard chrome plated rod surface treatments on sealing behavior of hydraulic rod seals / T. Papatheodorou, P. Hannifin // *Sealing Technology*. – 2005. – Vol. 2005. – № 4. – P. 5-10.
16. Tran X.B. Modeling of dynamic friction behaviors of hydraulic cylinders / X.B. Tran, N. Hafizah, H. Yanada // *Mechatronics*. – 2012. – Vol. 22. – № 1. – P. 65-75.
17. Experimental investigations on the effect of rod surface roughness on lubrication characteristics of a hydraulic O-ring seal / B. Wang [et al.] // *Tribology International*. – 2021. – Vol. 156. – P. 106791.
18. Kanters A.F.C. Lubrication of reciprocating seals: Experiments on the influence of surface roughness on friction and leakage / A.F.C. Kanters, M. Visscher // *Tribology Series : Tribological Design of Machine Elements* / eds. D. Dowson [et al.]. – Elsevier, 1989. – Vol. 14. – Lubrication of reciprocating seals. – P. 69-77.
19. Крагельский И.В. Узлы трения машин / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
20. Bauer W. Hydraulic Components Design / W. Bauer // *Hydropneumatic Suspension Systems* / ed. W. Bauer. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. – P. 95-140.
21. Influence of anisotropic surface roughness on lubricated rubber friction: Extended theory and an application to hydraulic seals / M. Scaraggi [et al.] // *Wear*. –

2018. – Vols. 410-411. – Influence of anisotropic surface roughness on lubricated rubber friction. – P. 43-62.

22. Влияние шероховатости рабочих поверхностей системы колесо - рельс карьерных локомотивов на реализуемый коэффициент сцепления / А.М. Керопян [и др.] // Трение И Износ. – 2019. – Т. 40. – № 1.

23. John T. Burwell, Jr. Survey of possible wear mechanism / John T. Burwell, Jr // Wear. – 1957. – Vol. 1. – № 2. – P. 119-141.

24. Гидравлика и гидропривод / Н.С. Гудилин [и др.]; ред. И.Л. Пастоев. – 4-е. – М.: Издательство «Горная книга», 2007. – 519 с.

25. Trelleborg - Гидравлические уплотнения [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.trelleborg.com/ru/seals> (дата обращения: 29.11.2021).

26. SKF - Гидравлические уплотнения/общая техническая информация [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.skf.com/ru/products/industrial-seals/hydraulic-seals/general-technical-information> (дата обращения: 01.11.2021).

27. Johnson K.L. Contact Mechanics / K.L. Johnson. – Cambridge: Cambridge University Press, 1985.

28. Tabor D. A simple theory of static and dynamic hardness / D. Tabor, G.I. Taylor // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. – 1948. – Vol. 192. – № 1029. – P. 247-274.

29. Tabor D. The hardness of metals / D. Tabor. – Oxford: Clarendon Press, 1951.

30. An attempt to determine the true stress-strain curves of amorphous polymers by nanoindentation / G. Hochstetter [et al.] // Tribology International. – 2003. – Vol. 36. – № 12. – P. 973-985.

31. Briscoe B.J. Nano-indentation of polymeric surfaces / B.J. Briscoe, L. Fiori, E. Pelillo // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1998. – Vol. 31. – № 19. – P. 2395-2405.

32. Elasto-plastic deformation of glass-like carbons heat-treated at different temperatures / N. Iwashita [et al.] // Carbon. – 2001. – Vol. 39. – № 10. – P. 1525-1532.

33. Fischer-Cripps A.C. Indentation stress-strain curves for “quasi-ductile” ceramics / A.C. Fischer-Cripps, B.R. Lawn // *Acta Materialia*. – 1996. – Vol. 44. – № 2. – P. 519-527.
34. Swain M.V. Indentation plasticity and the ensuing fracture of glass / M.V. Swain, J.T. Hagan // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1976. – Vol. 9. – № 15. – P. 2201-2214.
35. Field J.S. Determining the mechanical properties of small volumes of material from submicrometer spherical indentations / J.S. Field, M.V. Swain // *Journal of Materials Research*. – 1995. – Vol. 10. – № 1. – P. 101-112.
36. On the measurement of stress–strain curves by spherical indentation : Proceedings of the 28th International Conference on Metallurgic Coatings and Thin Films / E.G. Herbert [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2001. – Vols. 398-399. – P. 331-335.
37. Taljat B. New analytical procedure to determine stress-strain curve from spherical indentation data / B. Taljat, T. Zacharia, F. Kosel // *International Journal of Solids and Structures*. – 1998. – Vol. 35. – № 33. – P. 4411-4426.
38. Lin D. Elasticity of rubber-like materials measured by AFM nanoindentation / D. Lin // *eXPRESS Polymer Letters*. – 2007. – Vol. 1. – P. 576-584.
39. Mesarovic S.Dj. Spherical indentation of elastic–plastic solids / S.Dj. Mesarovic, N.A. Fleck // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 1999. – Vol. 455. – № 1987. – P. 2707-2728.
40. Mooney M. A Theory of Large Elastic Deformation / M. Mooney // *Journal of Applied Physics*. – 1940. – Vol. 11. – № 9. – P. 582-592.
41. Treloar L.R.G. The Physics of Rubber Elasticity / L.R.G. Treloar Google-Books-ID: EfCZXXKQ50wC. – OUP Oxford, 1975. – 323 p.
42. Ogden R.W. Large deformation isotropic elasticity – on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids / R.W. Ogden, R. Hill // *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*. – 1972. – Vol. 326. – № 1567. – P. 565-584.

43. Fung Y.C. Elasticity of soft tissues in simple elongation / Y.C. Fung // *The American Journal of Physiology*. – 1967. – Vol. 213. – № 6. – P. 1532-1544.
44. Fung Y.C. Pseudoelasticity of arteries and the choice of its mathematical expression / Y.C. Fung, K. Fronek, P. Patitucci // *The American Journal of Physiology*. – 1979. – Vol. 237. – № 5. – P. H620-631.
45. Kilian H.-G. An interpretation of the strain-invariants in largely strained networks / H.-G. Kilian // *Colloid and Polymer Science*. – 1985. – Vol. 263. – № 1. – P. 30-34.
46. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г. Шнейдер. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1982. – 248 с.
47. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов [и др.]. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
48. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
49. Верещака А.С. Резание материалов : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» и направлению подготовки дипломированных специалистов «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» / А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – Москва: Высш. шк., 2009. – 534 с.
50. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
51. Балтер М.А. Упрочнение деталей машин / М.А. Балтер. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.
52. Маркус Л.И. Алмазное выглаживание. Обзор / Л.И. Маркус, В.М. Смелянский. – М.: НИИНАвтопром, 1971. – 117 с.
53. Hull E.H. Diamond burnishing / E.H. Hull // *Machinery*. – 1962. – Vol. 68. – № 5.

54. Догтарь И.Д. Алмазное выглаживание поверхностей деталей машин (Обзор) : Учебное пособие для машиностроительных техникумов / И.Д. Догтарь. – Кишинев: ИЭИНТИ, 1968. – 22 с.
55. Cook M. Beyond Ra. Why Surface finish matters in seal performance / M. Cook, K. Volpenhein // Fluid power journal. – 2019. – № 2. – P. 32-34.
56. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: Стандартиформ, 2018. – 7 с.
57. ГОСТ 25142-82 (СТ СЭВ 1156-78). Шероховатость поверхности. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2018. – 16 с.
58. Марутов В.А. Гидроцилиндры. Конструкции и расчет / В.А. Марутов, С.А. Павловский. – М.: Машиностроение, 1966. – 171 с.
59. Трение, изнашивание и смазка : Справочник : в 2 т. Т. 1 / И.В. Крагельский [и др.]; ред. И.В. Крагельский, В.В. Алисин. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
60. Трение, изнашивание и смазка : Справочник : в 2 т. Т. 2 / И.В. Крагельский [и др.]; ред. И.В. Крагельский, В.В. Алисин. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.
61. Мур Д. Трение и смазка эластомеров / Д. Мур. – М.: Химия, 1977. – 262 с.
62. Brinson H.F. Polymer engineering science and viscoelasticity: An introduction. Polymer engineering science and viscoelasticity / H.F. Brinson, L.C. Brinson. – Springer US, 2008.
63. Трение эластомеров. Моделирование и эксперимент / И.Г. Горячева [и др.]. – М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2017. – 204 с.
64. Lee E.H. The Contact Problem for Viscoelastic Bodies / E.H. Lee, J.R.M. Radok // Journal of Applied Mechanics. – 1960. – Vol. 27. – № 3. – P. 438-444.
65. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов [и др.]; ред. А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

66. Демкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов; ред. П.Я. Академик Кочин. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
67. Bogdanovich P.N. Micro-slip in metal-polymer friction pair / P.N. Bogdanovich, A.A. Baidak. – 2000. – Т. 21. – С. 44-48.
68. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 562 с.
69. Archard J.F. Elastic deformation and the laws of friction / J.F. Archard // Proc. Roy. Soc. – 1957. – № A243. – P. 190-205.
70. Elastohydrodynamics for Soft Solids with Surface Roughness: Transient Effects / M. Scaraggi [et al.] // Tribology Letters. – 2017. – Vol. 65. – Elastohydrodynamics for Soft Solids with Surface Roughness.
71. Influence of anisotropic surface roughness on lubricated rubber friction: Extended theory and an application to hydraulic seals / M. Scaraggi [et al.] // Wear. – 2018. – Vols. 410-411. – Influence of anisotropic surface roughness on lubricated rubber friction. – P. 43-62.
72. Julian Angerhausen. Finite element based transient elastohydrodynamic simulation of translational hydraulic seals / Julian Angerhausen, Hubertus Murrenhoff, Bo N. J. Persson // International Journal of Fluid Power. – 2019. – № 20_1. – P. 1-26.
73. Pastewka L. Contact area of rough spheres: Large scale simulations and simple scaling laws / L. Pastewka, M.O. Robbins // Applied Physics Letters. – 2016. – Vol. 108. – Contact area of rough spheres. – № 22. – P. 221601.
74. The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces - J. A. Greenwood, J. H. Tripp, 1970 [Электронный ресурс]. – URL: https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/PIME_PROC_1970_185_069_02 (дата обращения: 04.04.2022).
75. Мур Д.Ф. Трение и смазка эластомеров / Д.Ф. Мур / пер. с англ. Г. И. Бродского. – Москва: Химик, 1977. – 262 с.

76. Бруйка В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench Часть 2 : Учеб. пособ. / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Я.В. Кураева. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.
77. Инженерный анализ в ANSYS Workbench Часть 1 : Учеб. пособ. / В.А. Бруйка [и др.]. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
78. Skowrońska J. Overview of Materials Used for the Basic Elements of Hydraulic Actuators and Sealing Systems and Their Surfaces Modification Methods / J. Skowrońska, A. Kosucki, Ł. Stawiński // Materials. – 2021. – Vol. 14. – № 6.
79. Мурина Т.А. Определение параметров гиперупругих моделей материалов в пакете ANSYS / Т.А. Мурина, В.В. Кузнецов, В.Н. Водяков // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы : сборник научных трудов международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Ф. Х. Бурумкулова / ред. П.В. Сенин. – Саранск, 2016. – С. 670.
80. Abubakar I.J. Constitutive modelling of elastomeric seal material under compressive loading / I.J. Abubakar, Myler Peter, Erping Zhou // Modeling and Numerical Simulation of Material Science. – 2016. – № 6. – P. 28-40.
81. Hyperelastic polymer material models for robust fatigue performance of automotive LED lamps : 2nd International Conference on Structural Integrity, ICSI 2017, 4-7 September 2017, Funchal, Madeira, Portugal / C.P. Okeke [et al.] // Procedia Structural Integrity. – 2017. – Vol. 5. – P. 600-607.
82. Граблин И.П. Моделирование упругих элементов в средах компьютерного инжиниринга / И.П. Граблин // Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг. – Донецк, 2012. – С. 705-709.
83. Елагина О.Ю. Технологические методы повышения стойкости деталей машин : Учебное пособие / Елагина О.Ю.
84. Технология обработки абразивным и алмазным инструментом : Учебное пособие для машиностроительных техникумов / Кремень, З.И. [и др.]; ред. З.И. Кременя. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 207 с.

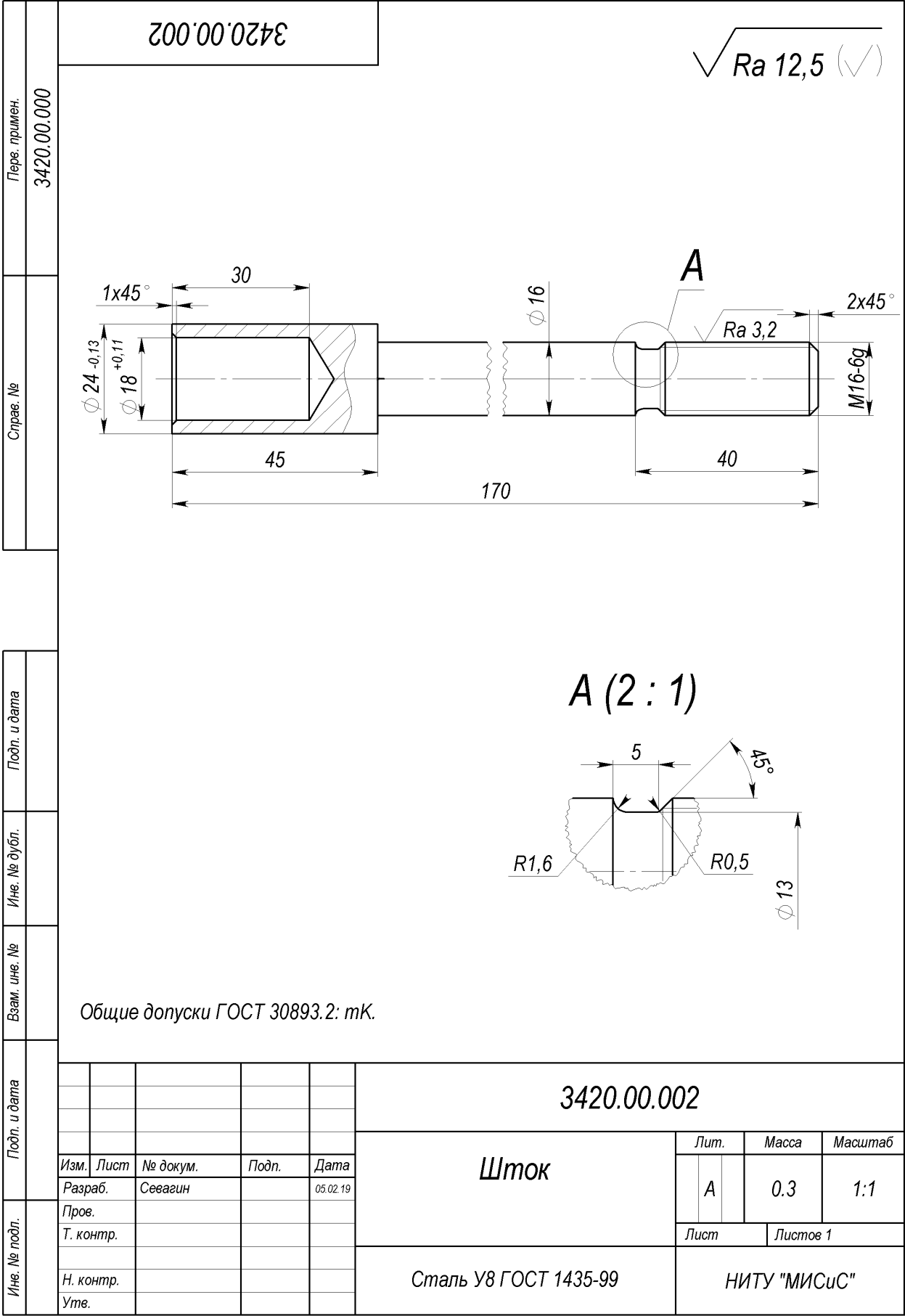
85. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
86. Блащук Е.Ф. Гальванотехника / Е.Ф. Блащук, П.К. Лаворко. – М.: Машгиз, 1961. – 246 с.
87. Севагин С.В. Разработка и исследование технологических методов обеспечения качества поверхностного слоя деталей гидропривода : Магистерская диссертация / С.В. Севагин. – Москва: НИТУ «МИСиС», 2018. – 69 с.
88. Sevagin S.V. Ensuring the required manufacturing quality of hydraulic-cylinder rods in mining machines / S.V. Sevagin, V.U. Mnatsakanyan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709. – № 4. – P. 044095.
89. Influence of low-plasticity ball burnishing on the high-cycle fatigue strength of medium carbon AISI 1045 steel / R. Avilés [et al.] // International Journal of Fatigue. – 2013. – Vol. 55. – P. 230-244.
90. Hankare A.V. Effect of Diamond Burnishing Process on Surface Roughness of AISI 4140 Alloy Steel / A.V. Hankare, A.A. Sapkal, A.A. Dounde // Journal of Advances in Science and Technology. – 2017. – Vol. 13. – № 1. – P. 405-410.
91. Дубров А.М. Многомерные статистические методы / А.М. Дубров, В.С. Мхитарян, Л.И. Трошин. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 352 с.
92. Обработка металлопокрытий выглаживанием / Л.А. Хворостухин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1980. – 63 с.
93. Вишневский А.С. Исследования поверхности алмаза, образующейся при микрорезании металлов / А.С. Вишневский, В.Г. Делеви, А.Ф. Никитюк // Синтетические алмазы. – 1970. – № 1. – С. 12-15.
94. Торбило В.М. Алмазное выглаживание / В.М. Торбило. – М.: Машиностроение, 1972. – 105 с.
95. Ершов А.А. Экспериментальная оценка методов улучшения свойств титановых сплавов перед алмазным выглаживанием / А.А. Ершов, А.А. Михайлов, А.В. Никифоров // Вестник машиностроения. – 1981. – № 1. – С. 42-43.

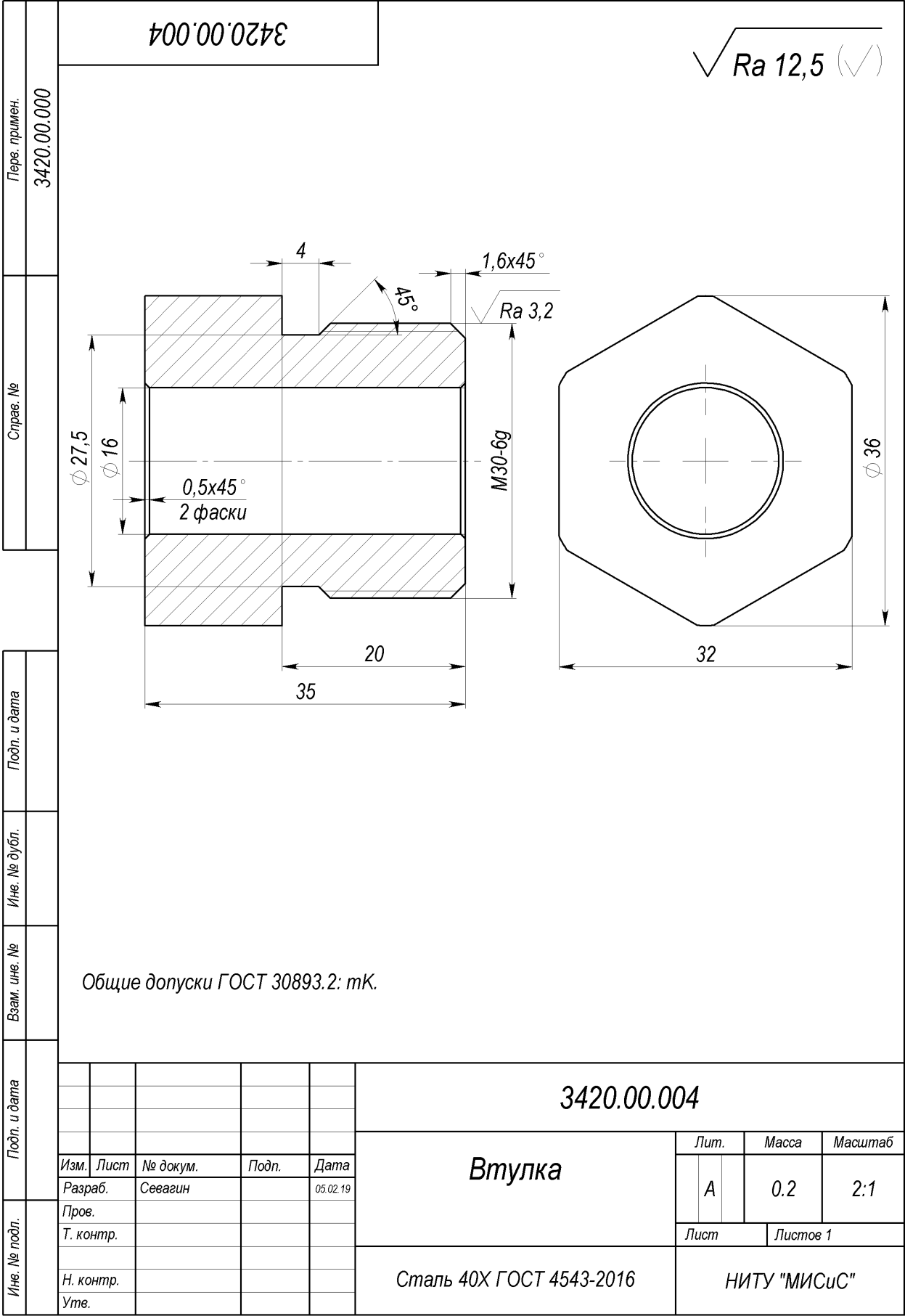
96. Чиченев Н.А. Автоматизация экспериментальных исследований / Н.А. Чиченев. – М.: Металлургия, 1963. – 256 с.
97. Одинцов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
98. Ермаков Ю.М. Перспективы алмазного выглаживания / Ю.М. Ермаков, А.А. Ершов. – М.: НИИМАШ, 1984. – 64 с.
99. Губанов В.Ф. Параметры качества поверхностного слоя при выглаживании специальным инструментом с минералокерамическими инденторами / В.Ф. Губанов // Технология машиностроения. – 2009. – № 6. – С. 15-17.
100. Бартенев Г.М. О законе трения при упругом контакте поверхностей : ДАН СССР / Г.М. Бартенев, В.В. Лаврентьев. – 1961. – Т. 141. – № 2. – С. 334-337.
101. Бартенев Г.М. О законе трения высокоэластичных материалов по твердым гладким поверхностям : ДАН СССР / Г.М. Бартенев. – 1955. – Т. 103. – № 6. – С. 1017-1020.
102. Bush A.W. The elastic contact of a rough surface / A.W. Bush, R.D. Gibson, T.R. Thomas // Wear. – 1975. – Vol. 35. – № 1. – P. 87-111.
103. Friction of flat and micropatterned interfaces with nanoscale roughness / S.B. Jaber [et al.] // Tribology International. – 2021. – Vol. 153. – P. 106563.
104. Harsha A. Friction and wear of two polyethylenes under different tribological contact conditions / A. Harsha, R. Wäsche, T. Joyce // Polymers and Polymer Composites. – 2021. – № June. – P. 393-404.
105. Klaffke D. On the influence of test parameters on friction and wear of ceramics in oscillating sliding contacts / D. Klaffke // Tribotest. – 1995. – Vol. 1. – P. 311-320.
106. Осипов В.Н. Износ и коэффициент трения супермодифицированного заэвтектического сплава алюминия с кремнием / В.Н. Осипов, Ю.А. Фадин, С.П. Никаноров // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90. – № 12. – С. 2072-2077.

Приложение А

Рабочие чертежи оснастки для алмазного выглаживания

Перв. примен.		Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
						Документация		
		A3			3420.00.000СБ	Сборочный чертеж		
						Детали		
Справ. №		A3	1		3420.00.001	Корпус	1	
		A4	2		3420.00.002	Шток	1	
		A4	3		3420.00.003	Втулка	1	
		A4	4		3420.00.004	Втулка	1	
		A3	5		3420.00.005	Пружина	1	
						Стандартные изделия		
			6			Гайка М16-6Н.8.019 ГОСТ 5915-70	1	
Подп. и дата						Прочие изделия		
			7			Алмазный выглаживатель ИС290.00.05	1	
		</						





Приложение Б

Документы о практическом использовании результатов



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «НППЦподземмаш», к.т.н.
Д.Я. Соловых
« 14 » 11/2022 г.

АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы **Севагина С.В.** на тему: «**Повышение ресурса гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин, используемых при освоении рудных месторождений**», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук

Техническая комиссия в составе: Генеральный директор, к.т.н. Соловых Д.Я., члены комиссии: Начальник конструкторского отдела Пузыревский В.В., технический директор Вавилов Д.А. констатирует, что результаты диссертационной работы «Повышение ресурса гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин, используемых при комплексном освоении недр», посвященная повышению ресурса гидроцилиндров, путем обеспечения благоприятных условий контакта штока с уплотнением. По своему содержанию Севагин Сергей Васильевич рассматривает вопросы научного и производственного характера, соответствующие одному из направлений работы ООО «НППЦподземмаш».

Результаты проведенной работы способствовали решению важных задач: исследование влияния микрогеометрии поверхности штока на эксплуатационные свойства и ресурс детали, а также разработка технологических методов обеспечения рациональных параметров микропрофиля штока, отвечающих заданным требованиям по условиям контакта и ресурсу деталей сопряжения (шток-уплотнение). В результате получены штоки гидроцилиндров, применяемые в горных машинах, со значительным повышением износостойкости контактной пары «шток-уплотнение» и, как следствие, увеличению ресурса всего гидропривода машины.

Апробирование приведенных в диссертационной работе теоретических и практических исследований показало положительный эффект при изготовлении гидроцилиндров горных машин по предложенной технологии. Так была выпущена опытная партия гидроцилиндров, предназначенная для погрузочно-доставочных машин *Sandvik LH410* с положительным испытаниями.

Результаты исследований, выполненных в диссертационной работе Севагина С.В., представляют практический интерес для ООО «НППЦподземмаш» и будут использованы для совершенствования производственного процесса гидроцилиндров, а также для повышения ресурса гидропривода горных машин.

Начальник
конструкторского
отдела

Технический директор




(Пузыревский В.В.)

(Вавилов Д.А.)



гидравлические цилиндры
ГИДРОФОРС

Общество с Ограниченной Ответственностью
"ПТК ГИДРОФОРС"
ИНН 7703379473/ КПП 504301001
info@hydro-force.ru ; www.hydro-force.ru
Телефон: +7(495) 663-37-02
142281, Московская область, г.о. Протвино,
г. Протвино, ш. Кременковское, д.2.

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
ООО «ПТК ГИДРОФОРС»
Акесоло-Алонсо А.В.
«26» октябрь 2022 г.



Справка

о внедрении результатов диссертационной работы Севагина С.В. на тему: «Повышение ресурса гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты диссертационного исследования, выполненные аспирантом кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения Горного института Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» Севагиным Сергеем Васильевичем, являются практически значимыми, а приведенные в диссертационной работе рекомендации успешно реализованы и применяются в ООО «ПТК ГИДРОФОРС»

Предложенные оптимальные технологические режимы обработки хромированных штоков твердым точением и алмазным выглаживанием, позволяющие получить благоприятный микропрофиль поверхности штока при работе с уплотнением, были успешно апробированы и приняты к использованию в конструкторско-технологическом отделе ООО «ПТК ГИДРОФОРС»



Акционерное общество
Можайское экспериментально-механическое
предприятие

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «МЭМП»

Бергер В.И.

2022 г.



Справка

о внедрении результатов диссертационной работы **Севагина С.В.** на тему:
«Повышение ресурса гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин»,
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты диссертационного исследования, выполненные аспирантом кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения Горного института Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» Севагиным Сергеем Васильевичем, являются практически значимыми, а приведенные в диссертационной работе рекомендации успешно реализованы и применяются в АО «МЭМП».

Предложенные оптимальные технологические режимы обработки хромированных штоков твердым точением и алмазным выглаживанием, позволяющие получить благоприятный микропрофиль поверхности штока при работе с уплотнением, были успешно апробированы и приняты к использованию в конструкторско-технологическом отделе АО «МЭМП».

Начальник конструкторско-
технологического отдела

В.Д. Зыбенко