

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

**Севагин Сергей Васильевич**

**ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ГИДРОЦИЛИНДРОВ  
ПОГРУЗОЧНО-ДОСТАВОЧНЫХ МАШИН**

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Автореферат диссертации  
на соискание учёной степени кандидата технических наук

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

Москва, 2022

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 сопряженных 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. Солад. 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. Сулова, Ю.Г. Проскуракова, В.М. Торбило, Ю.Г. Шнейдера, D.C. Mitchell, M.V. Peterson, F.I. Clauss и др. Исследованию обработки ППД деталей с металлопокрытиями посвящены работы Л.И. Бобковой, В.У. Мнацаканян, А.Р. Папоьян, 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В *первой главе* на основе анализа служебного назначения гидроцилиндров ПДМ, условий их эксплуатации и причин выхода из строя обозначена важность и актуальность задачи обеспечения качества изготовления штоков. При этом особое внимание уделяется состоянию изученности вопросов обеспечения требуемых параметров микропрофиля рабочей поверхности штока и методов достижения высокого качества рабочей поверхности, контактирующей с уплотнением.

Приведен обзор и характеристика материалов уплотнений, применяемых в гидроцилиндрах ПДМ, рассмотрены причины износа уплотнений, а также особенности механики вязкоупругого контакта пары трения «шток-уплотнение».

На основании этого анализа сформулирована цель диссертационного исследования, поставлены задачи, необходимые для обоснования методических подходов и средств для достижения поставленной цели.

Обозначена роль отечественных и зарубежных исследователей в развитии технологических методов обеспечения благоприятного микропрофиля поверхности деталей машин. Отмечен вклад известных ученых в исследование механики контактного взаимодействия твердых тел – И.Г. Горячевой, Б.В. Дерягина, Э.В. Рыжова, Д. Мур, *B.N.J. Persson, J.A. Greenwood, D. Tabor*.

**Вторая глава** посвящена обоснованию требований к микропрофилю поверхности штока для обеспечения благоприятных условий контакта с уплотнением и достижения заданного ресурса пары трения «шток-уплотнение».

Выполнен анализ принятых моделей микропрофиля поверхности штока, получаемых различными технологическими методами, а также выявлены параметры микрогеометрии поверхности в полной мере характеризующие показатели качества поверхностного слоя штока  $Ra$  ( $Rz$ ),  $Remix$ , шагово-высотный параметр  $t_p$  и радиус выступа профиля шероховатости поверхности  $\rho_m$ , (табл. 1).

Таблица 1 — Модели и параметры микропрофиля поверхности штока

Модели профиля поверхности	Профиль поверхности	$Ra$	$Rmax$	$Rmr$
модель замкнутого профиля		0,2 мкм	0,8 мкм	70 %
модель открытого профиля		0,2 мкм	1,2 мкм	15 %
модель сферического профиля		0,2 мкм	0,4 мкм	70 %

Для оценки интенсивности износа уплотнения выбраны такие параметры микропрофиля штока, как средняя высота выступов профиля ( $Rpk$ ), средняя глубина впадин профиля ( $Rvk$ ), средняя высота центральной области профиля шероховатости ( $Rk$ ), материальная составляющая ( $Mr1$ ), отделяющая выступающие пики от основного микрорельефа, материальная составляющая ( $Mr2$ ), отделяющая впадины от основного микрорельефа (рисунок 1).

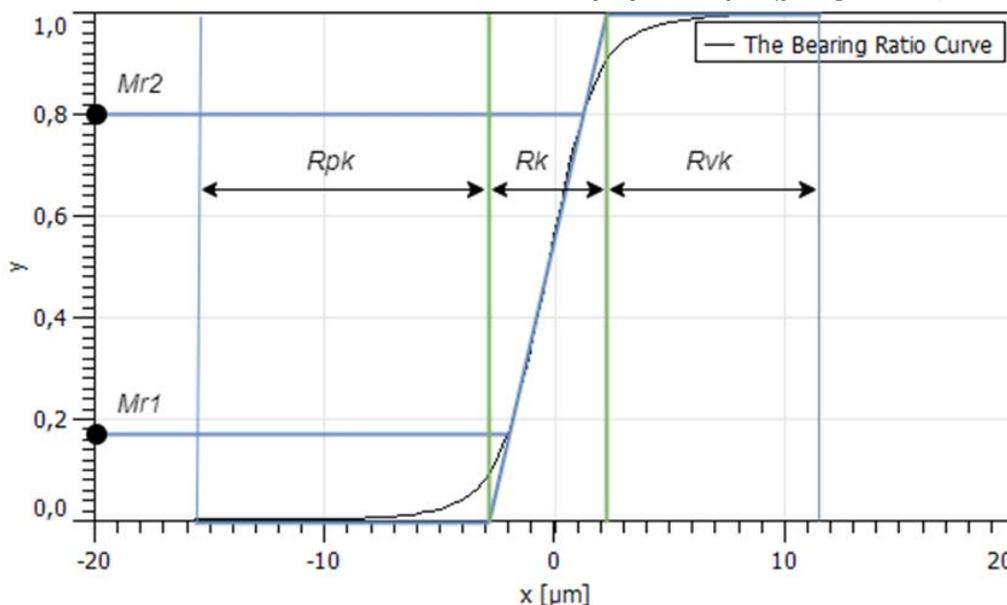


Рисунок 1 — Графическая интерпретация параметров шероховатости с использованием кривой Аббота-Файрстоуна

Для контакта штока с уплотнением выявлен рациональный диапазон шероховатости поверхности  $Ra$  штока в пределах от 0,05 мкм до 0,3 мкм. В ходе анализа микрорельефа трибосопряжений установлено, что для обеспечения высоких эксплуатационных характеристик уплотнений и штока необходимо иметь на поверхности штока форму сферического профиля или форму замкнутого профиля с материальным соотношением  $Rmr$  в пределах 70 ÷ 95%.

Для выявления благоприятных условий контакта штока с уплотнением в программном комплексе ANSYS была смоделирована и решена контактная задача взаимодействия жесткого тела с вязкоупругим полупространством, в полной мере отвечающая характеру и условиям взаимодействия единичного выступа микропрофиля поверхности с поверхностью уплотнения (рисунок 2). При помощи метода конечных элементов выполнено исследование статического напряженно-деформированного состояния (НДС) уплотнения при контакте с шероховатой поверхностью штока. При этом единичные выступы представлялись в виде объемных фигур различных профилей, принятых в соответствии с методом окончательной обработки исследуемой поверхности. Так, для традиционного полирования, применяемого после хромирования штока, микровыступы моделируются в форме усеченных конусов (рисунок 3, а), а для поверхности, обработанной алмазным выглаживанием, – в форме микросфер различных радиусов от 10 до 50 мкм (рисунок 3, б, в). Материал уплотнения (эластомер) принимался как гиперупругий.

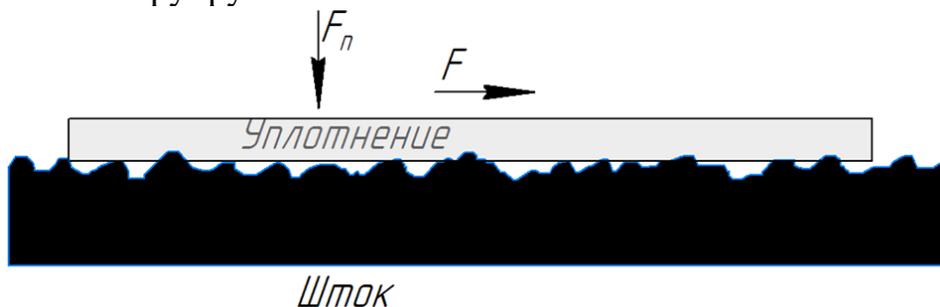


Рисунок 2 — Моделирование контакта уплотнения с шероховатой поверхностью штока

Моделирование контакта шар-плоскость выполнялось с использованием уравнения вязкоупругости в упругом решении Герца. Глубина вдавливания выступов принималась одинаковой для всех вариантов.

Радиус контакта с учетом принятых реологических моделей контактируемых тел определялся по формуле:

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

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

Для оценки силы, действующей на сферу, использовалось формула, предложенная Джонсоном, Кенделом и Робертсом (модель *JKR*):

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

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

Давление по дуге контакта определялось по формуле:

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

Распределение напряжений по глубине уплотнения из эластомера представлено на рисунке 4.

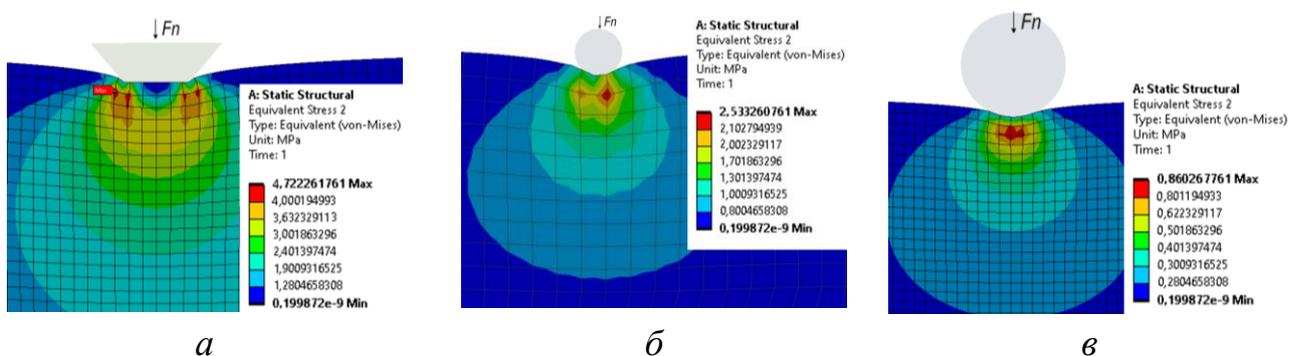


Рисунок 3 — Напряженно-деформированное состояние уплотнения при контакте с единичным выступом в форме: *а* – усеченного конуса; *б* – сферы  $R=10$  мкм, *в* – сферы  $R=50$  мкм

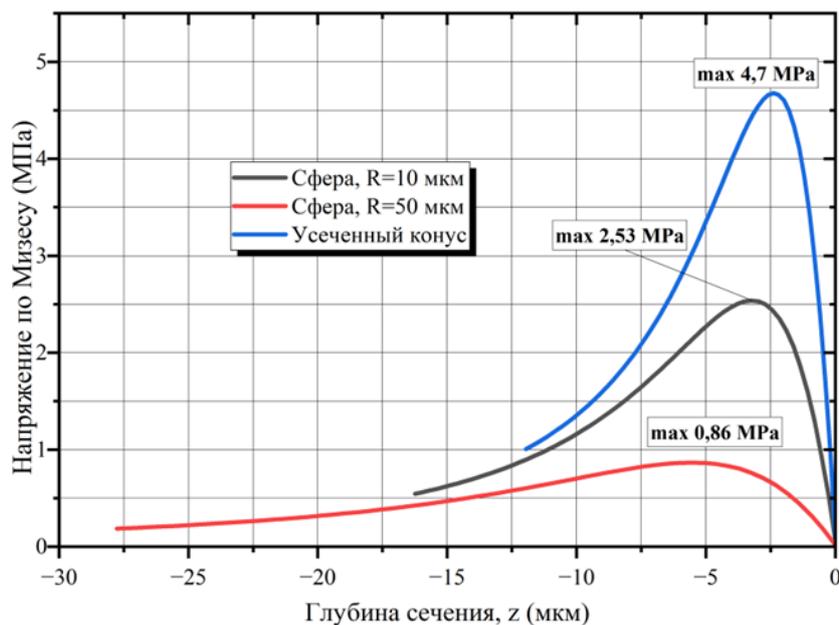


Рисунок 4 — Распределение напряжений по глубине уплотнения при внедрении единичных выступов различных профилей

Из рисунков 3, а и 4 (синий график) видно, что наибольшая концентрация напряжений в эластомере наблюдается под периферийными участками выступов в форме усеченного конуса на глубине 0,0024 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 числа цикла нагружения на этих контактных участках начнут отделяться частицы уплотнения наряду с усилением износа краевого участка микровыступа штока.

На рисунках 3, б и 4 (черный график) представлено поле напряжений для единичной неровности в форме сферы радиусом 10 мкм. Область максимальной концентрации напряжений наблюдается в данном случае под наиболее выступающей частью профиля на такой же глубине, как и в случае усеченного конуса. Максимальное напряжение здесь составляет 2,53 МПа.

На рисунках 3, в и 4 (красный график) представлена картина напряжений для единичной неровности в форме сферы радиусом 50 мкм. В этом случае, по сравнению с предыдущими, возникают напряжения, не превышающие 0,86 МПа, кривая напряжений более пологая, максимум смещен в тело на глубину 0,005 мм, что указывает на наиболее благоприятные условия контакта единичного выступа с эластомером. Последнее положительно отражается на ресурсе уплотнения.

Таким образом, на основе анализа НДС эластомера при взаимодействии с единичными выступами поверхности штока различной формы установлено, что наиболее благоприятными являются условия контакта уплотнения с поверхностью штока, микропрофиль которого описывается сферами с радиусом микропрофиля от 50 мкм и выше.

Для достоверного описания характера взаимодействия уплотнения со штоком были определены свойства эластомера путем проведения экспериментальных исследований при одноосном растяжении, а также при помощи моделирования различных испытаний в программе *MCalibration* (рисунки 5, 6, 7).



Рисунок 5 — Образцы материалов уплотнений для проведения испытаний на одноосное растяжение: а – *NBR*; б – *PTFE*

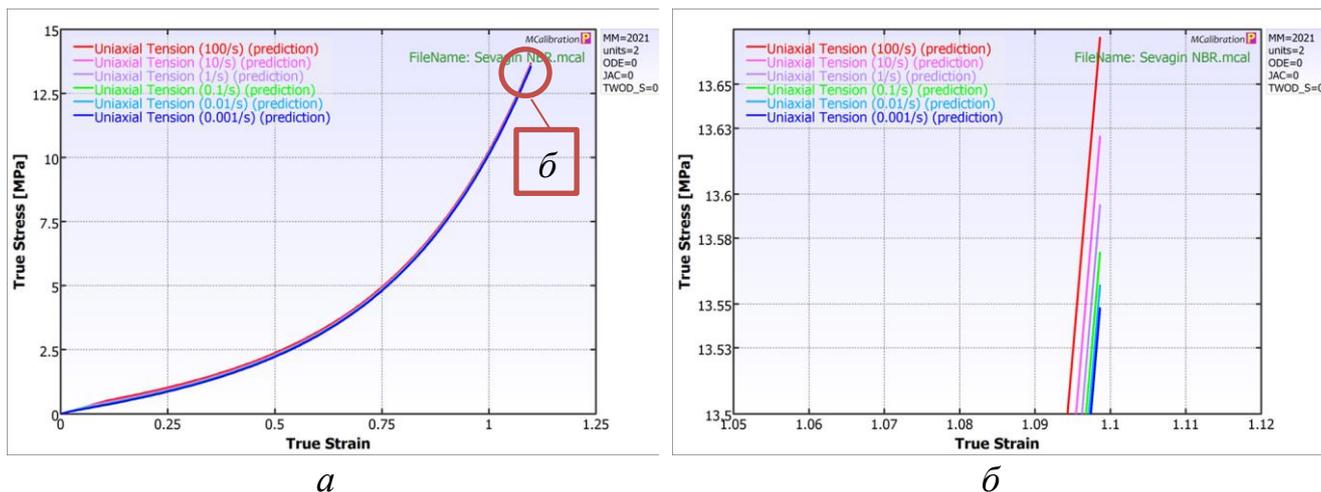


Рисунок 6 — Кривая напряжения-деформации для материала *NBR*:  
*a* – полный график; *б* – увеличенный фрагмент участка графика

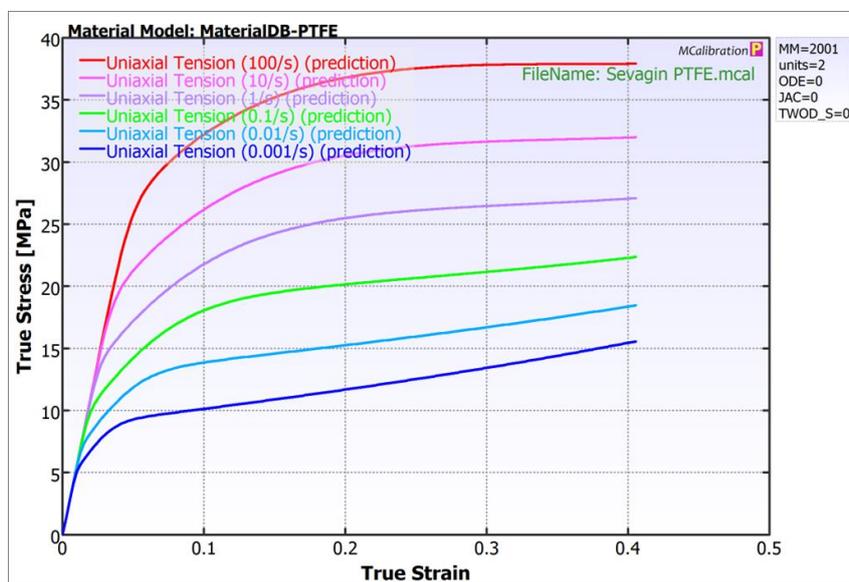


Рисунок 7 — Кривая напряжения-деформации для материала *PTFE*

После чего с помощью программы *POLYMERFEM*, для принятой модели вязкоупругого тела проводили калибровку параметров для нахождения констант  $C_{10}$ ,  $C_{01}$ ,  $C_{11}$ ,  $C_{20}$ ,  $C_{02}$ , входящих в формулу потенциальной энергии *Mooney-Rivlin*:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2, (4)$$

где,  $I_1, I_2$  – неизменяющиеся (инвариантные) значения правого тензора деформации Коши-Грина, выраженные в виде коэффициентов основного растяжения;  
 $C_{10}, C_{01}, C_{20}, C_{11}, C_{12}$  – коэффициенты модели, материальные константы;  
 $J$  – детерминант матрицы градиента деформации;  
 $D_1$  – коэффициент несжимаемости материала.

Таблица 2 — 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

В третьей главе представлены экспериментальные исследования, и технологические рекомендации по достижению требуемых макро- и микрогеометрических параметров поверхности штока, обеспечивающих наиболее благоприятные условия контакта штока с уплотнением.

На предварительном этапе исследования было выявлено, что хромирование, применяемое для упрочнения рабочей поверхности штока, приводит к появлению погрешности формы штока в виде отклонения от круглости. Это отрицательно сказывается на контактном взаимодействии с уплотнением и приводит к неравномерному распределению контактной нагрузки при работе с уплотнением и впоследствии вызывает интенсивный неравномерный износ сопрягаемых поверхностей.

Установлено, что обработка полированием, применяемая после хромирования, не устраняет данные погрешности. В связи с этим было принято решение заменить полирование на твердое точение при помощи резца, оснащенного пластиной из кубического нитрида бора (КНБ, *CBN*), что позволило устранить недопустимое отклонение от круглости (рисунок 8). Установлены параметры режима резания, в большей степени оказывающие влияние на получаемую точность формы штока (рисунок 9). В частности, выявлено доминирующее влияние глубины резания, значение которой должно быть в пределах 0,025-0,027 мм, принимая во внимание толщину хромового покрытия. Обработка твердым точением выполнялась на станке с ЧПУ модели *DMG MORI CTX 310*.

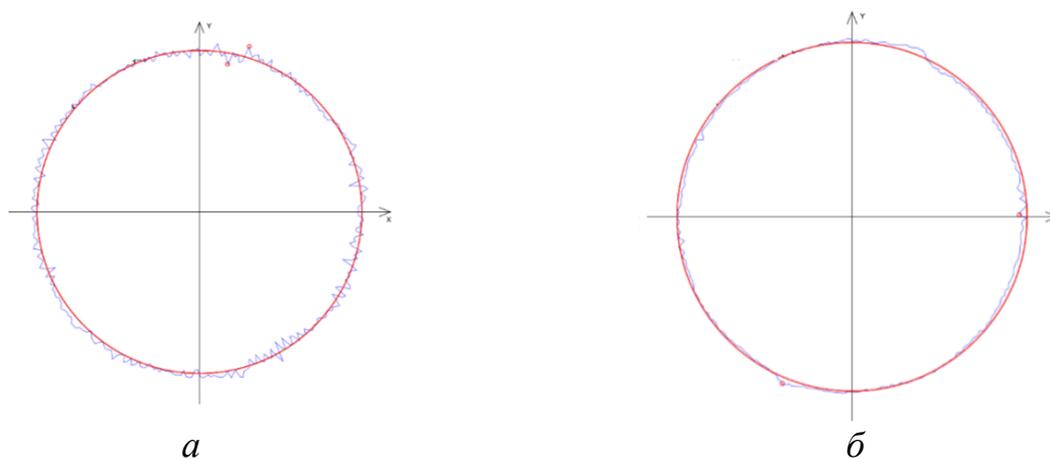


Рисунок 8 — Круглограммы поперечных сечений образцов:  
*a* – до твердого точения; *б* – после твердого точения

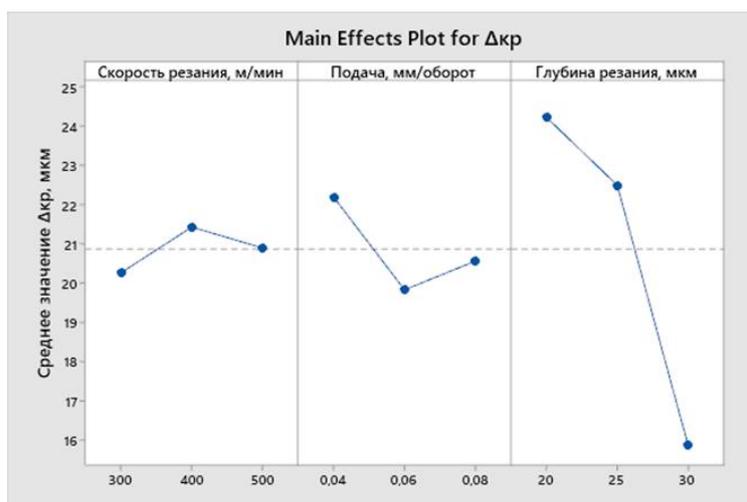


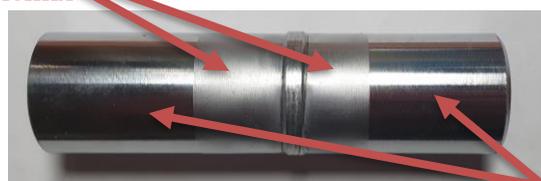
Рисунок 9 — График влияния режимов обработки на отклонение от круглости  $\Delta_{кр}$

В качестве отделочной обработки хромированной поверхности штока предложено алмазное выглаживание. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по определению режимов обработки, экспериментальные образцы и специально сконструированная для этих целей технологическая оснастка (рисунок 10). Обработка выполнялась на том же станке, на котором было реализовано твердое точение. В ходе проведения многофакторного эксперимента были выявлены оптимальные режимы обработки хромированной поверхности штока, позволяющие получить требуемый микропрофиль поверхности с шероховатостью  $Ra = 0,28 \dots 0,32$  мкм (рисунки 11, 12) и с радиусом скругления 50 мкм. При этом степень упрочнения поверхностного слоя составила  $\Delta H \approx 28 \dots 30\%$ , что положительно сказывается на эксплуатационных характеристиках штока.



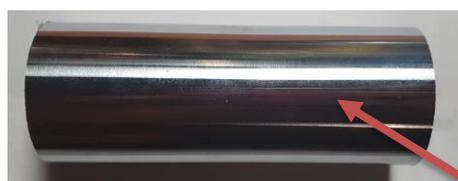
после  
твердого  
точения

Рисунок 10 — Разработанная оснастка для алмазного выглаживания



а

после  
алмазного  
выглаживания



б

после полирования

Рисунок 11 — Фото образцов после финишной обработки:  
а – алмазным выглаживанием; б – полированием

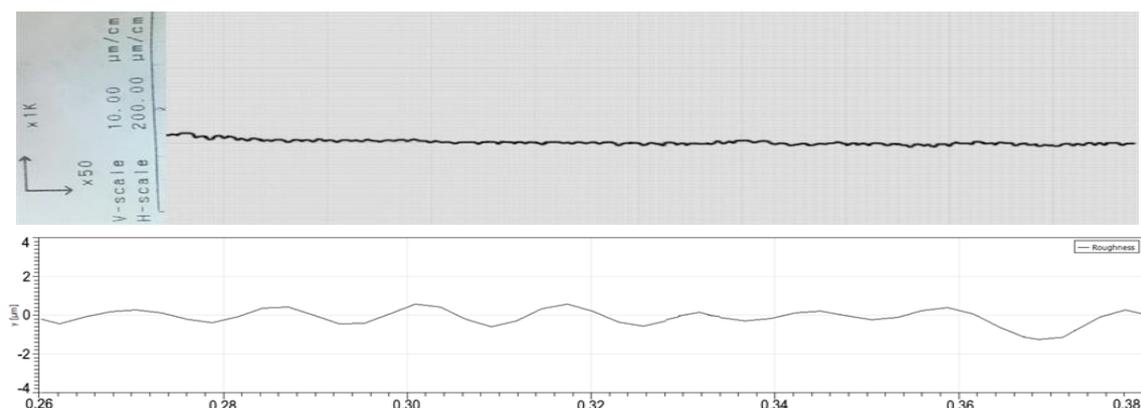


Рисунок 12 — Профилограмма шероховатости поверхности после алмазного выглаживания

При обработке тонких покрытий алмазным выглаживанием важно регламентировать усилие деформирования для исключения отрыва покрытия от основы. Из рисунка 13 видно, что при выглаживании поверхности инструментом с радиусом  $R_{\text{алм}}=1,5\text{мм}$  снижение шероховатости при увеличении усилия деформирования происходит более активно, чем в случае обработки инструментом с радиусом  $R_{\text{алм}}=3,0\text{ мм}$ , что имеет существенное значение для проведения бездефектной обработки тонких и твердых металлопокрытий. Дальнейшее увеличение усилия деформирования после достижения минимальной шероховатости приводит к ее росту и может вызвать нарушение целостности покрытия и его отслоение от подложки. В результате проведенных экспериментальных исследований и обработки экспериментальных данных, была получена квадратичная модель (5), устанавливающая связь между шероховатостью обработанной поверхности и основными параметрами режимов выглаживания — усилием деформирования  $P$  и подачей  $S$  (рисунок 14). При этом установлено, что глубина внедрения алмазного индентора не должна превышать 20-25 мкм.

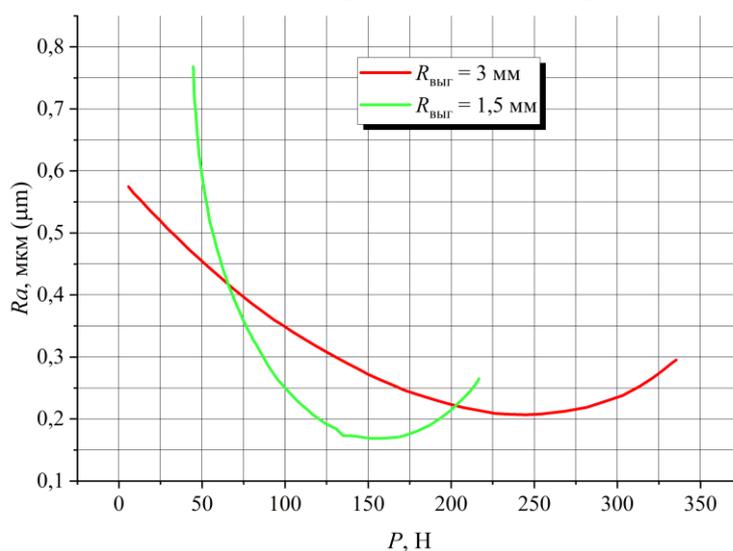


Рисунок 13 — Зависимость шероховатости от усилия деформирования  $P$  и радиуса алмазного выглаживателя  $R_{\text{алм}}$

$$Ra = 0,412 - 0,0019P - 1,734S + 0,00001P^2 + 15,79S^2 - 0,007PS, \quad (5)$$

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

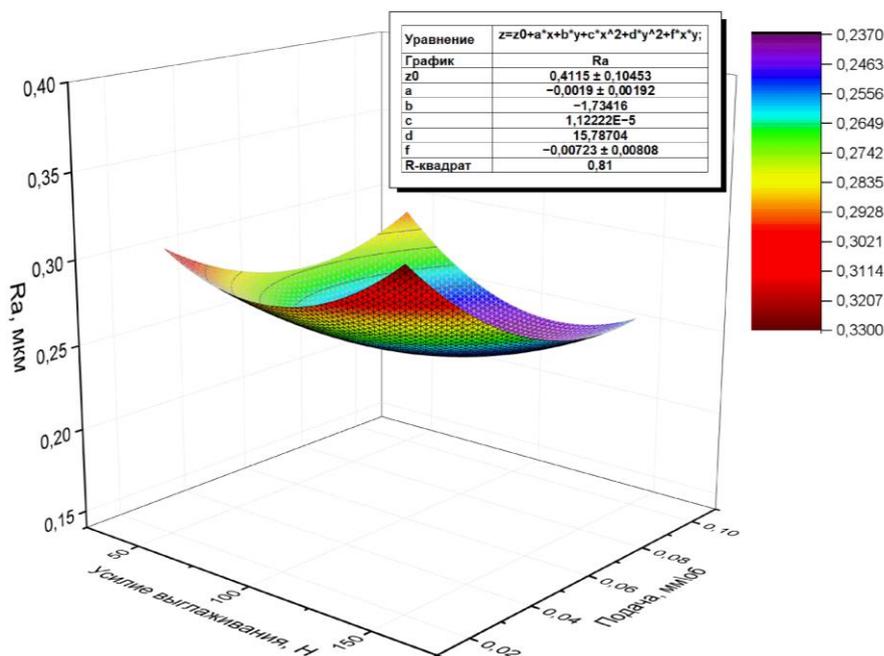


Рисунок 14 — Зависимость шероховатости от усилия выглаживания и подачи

**В четвертой главе** представлен сравнительный анализ параметров контакта, трибологических характеристик и эксплуатационных свойств пары трения шток-уплотнение для хромированных образцов, обработанных полированием и алмазным выглаживанием, в контакте с уплотнениями из различных материалов – *NBR* и *PTFE* (таблица 3).

Таблица 3 – Характеристики образцов уплотнения из материалов *NBR* и *PTFE*

Свойство	<i>NBR</i>	<i>PTFE</i>
Плотность, г/см <sup>3</sup>	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

Экспериментальные исследования по оценке эксплуатационных свойств и типологических характеристик трибосопряжения проводились на сертифицированном оборудовании без применения смазочных материалов.

Фактическая площадь контакта образцов на первом этапе определялась оптическим методом при помощи светового микроскопа *Keyence VHX-600*

(Япония). Схема установки для определения фактической площади контакта представлена на рисунке 15.

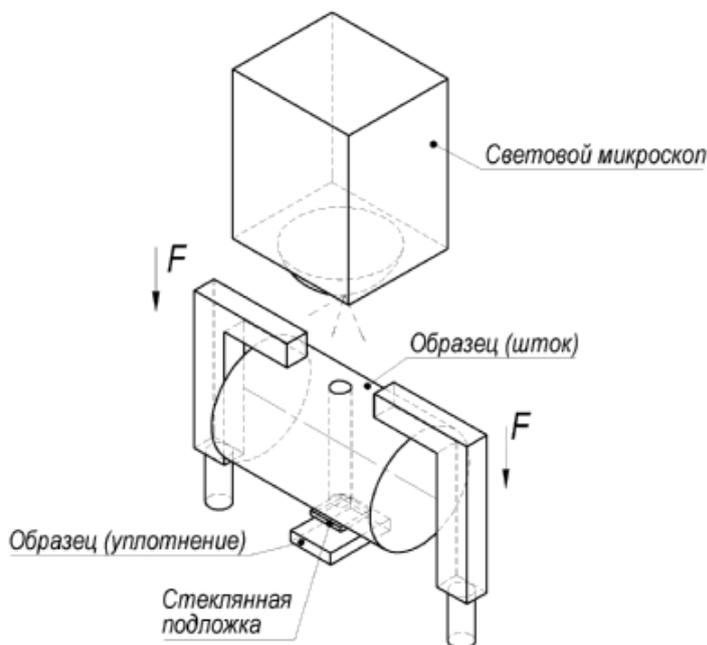


Рисунок 10 — Схема установки для определения фактической площади контакта

В результате было установлено, что образцы, обработанные алмазным выглаживанием, имеют большую по сравнению с полированными образцами, фактическую площадь контакта с поверхностью уплотнения, что приводит к уменьшению удельного давления на единицу площади контртела и благоприятно сказывается на условиях контактного взаимодействия (таблице 4).

Таблица 4 — Пятна контакта при взаимодействии с уплотнением полированных и выглаженных образцов

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

Установлено, что при одном и том же значении усилия, оказываемого на пару шток-уплотнение, фактическая площадь контакта для образцов, обработанных алмазным выглаживанием больше, чем при контакте с полированными образцами,

соответственно на 61% для уплотнения марки *NBR* и на 31% для уплотнений из материала *PTFE* (рисунки 16, 17).

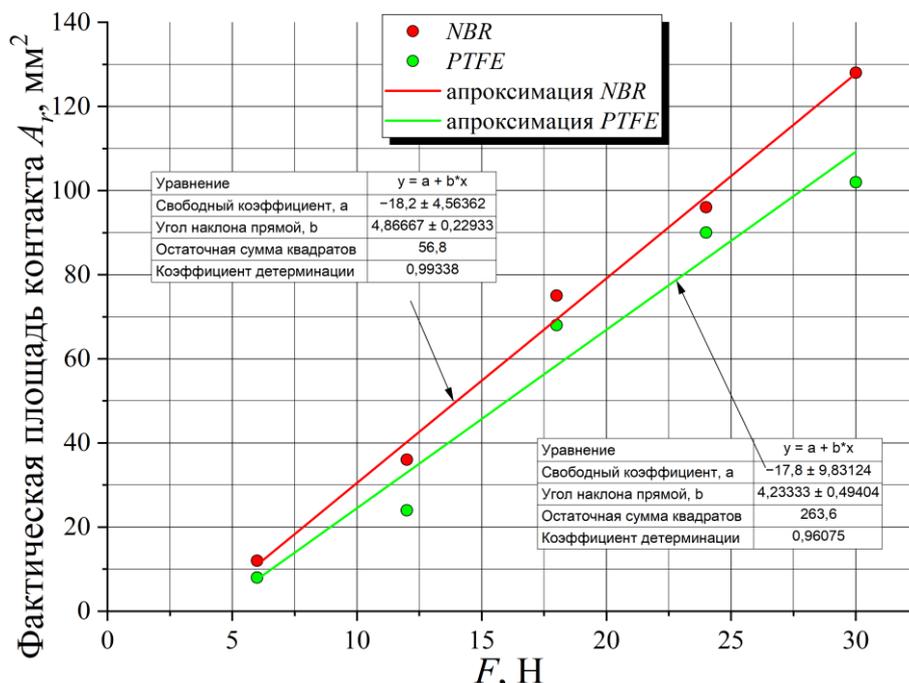


Рисунок 11 — Зависимость фактической площади контакта от внешней нагрузки (образцы после полирования)

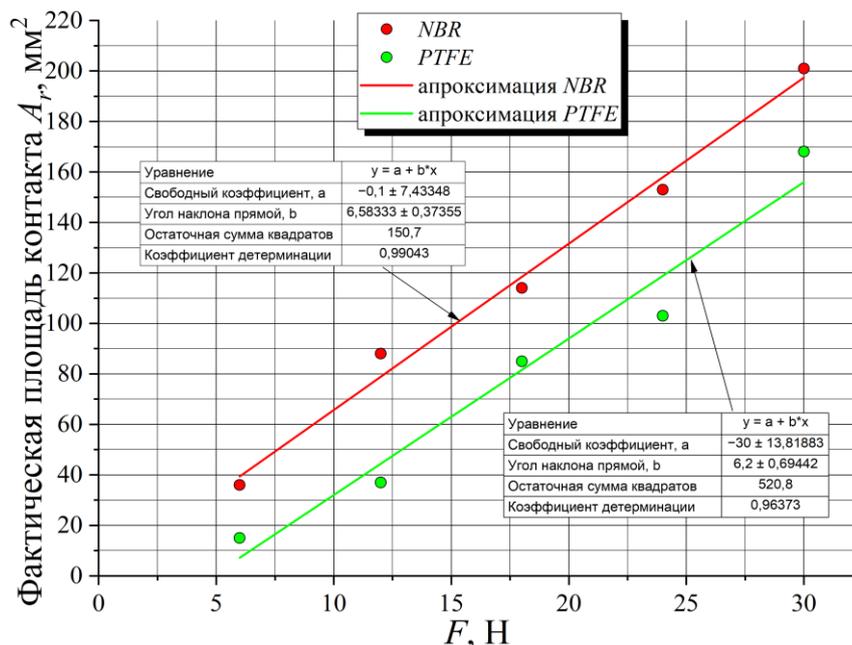


Рисунок 12 — Зависимость фактической площади контакта от внешней нагрузки (образцы после алмазного выглаживания)

Также проведены экспериментальные исследования по оценке коэффициента трения образцов, обработанных полированием и алмазным выглаживанием, в контакте с уплотнением и удельной скорости изнашивания уплотнений. Испытания

проводились при помощи трибометра с возвратно-поступательным скользящим движением (рисунок 18), условия эксперимента представлены в таблице 5.

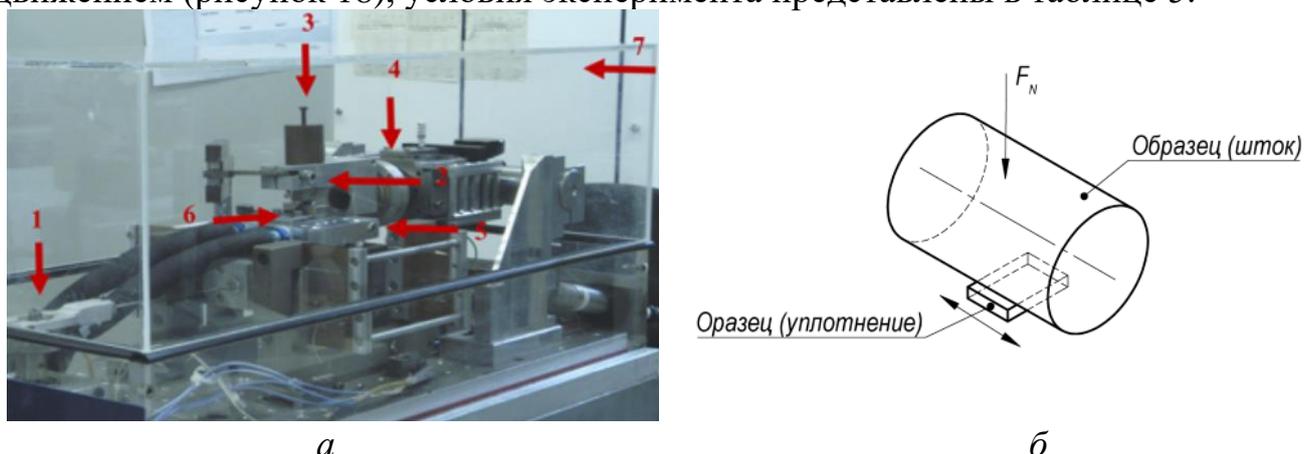


Рисунок 13 — Трибометр (а) и схема испытания (б)

- (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

Таблица 5 - Условия трибологических испытаний

Параметры теста	Трибологическая система №1	Трибологическая система №2
Образец (шток)	Хромированный образец после полирования (трапециевидная форма микропрофиля); Хромированный образец после алмазного выглаживания (сферическая форма микропрофиля)	
Контртело	<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	

Полученные результаты по коэффициенту трения представлены на рисунках 19, 20.

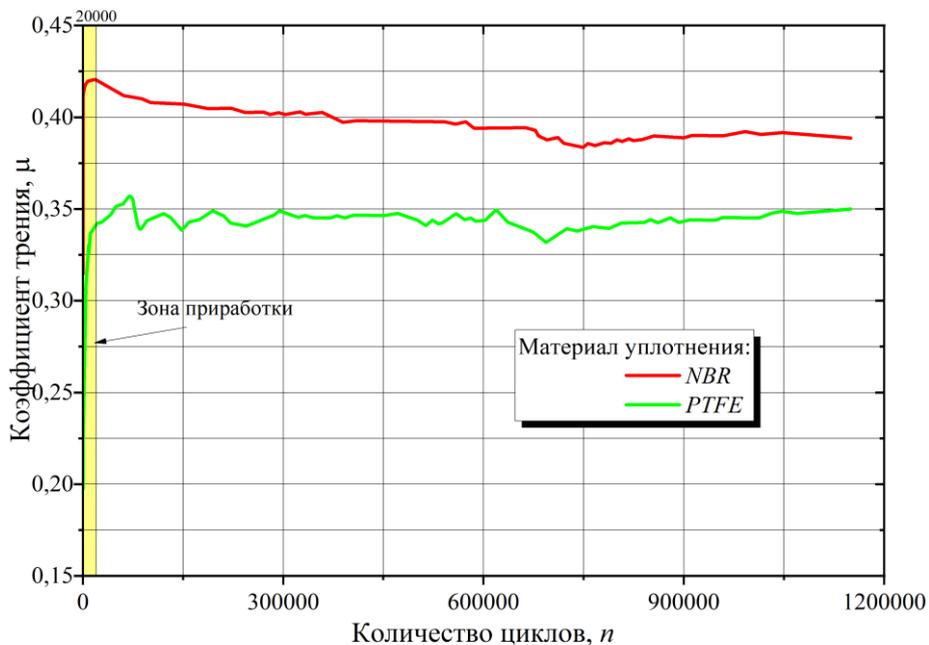


Рисунок 14 — Коэффициент трения при контакте с уплотнением образца, обработанного полированием

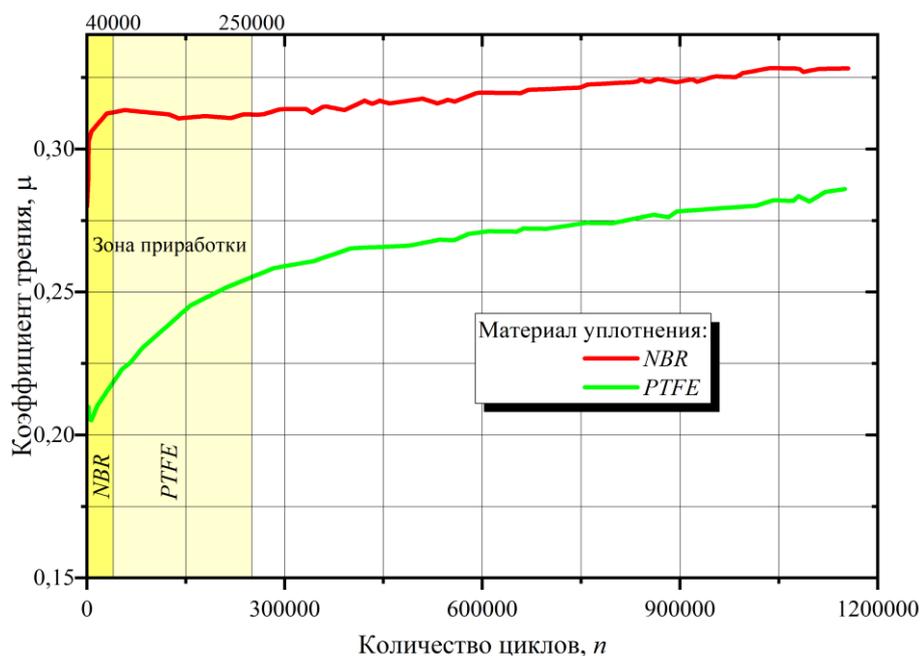


Рисунок 15 — Коэффициент трения при контакте с уплотнением образца, обработанного алмазным выглаживанием

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при одинаковом числе циклов относительного перемещения коэффициент трения для выглаженных образцов меньше, чем для полированных (рисунок 21). Так, для пары трения «шток полированный-уплотнение *PTFE*» в условиях сухого трения среднее значение коэффициента трения составляет 0,34, тогда как для пары «шток выглаженный-уплотнение *PTFE*», оно составляет 0,25, что на 26% меньше. Таким образом

доказано, что отделочная обработка хромированного штока алмазным выглаживанием способствует улучшению условий контактного взаимодействия с уплотнением при сухом трении. При этом удельная скорость изнашивания  $W_s$  уплотнения из материала *PTFE* при контакте с выглаженным образцом также уменьшается (рисунок 22) с  $1,2 \cdot 10^{-6}$  до  $3,12 \cdot 10^{-7}$  мм<sup>3</sup>/Нм, а для уплотнения *NBR* при этом контакте  $W_s$  уменьшается с  $2,6 \cdot 10^{-5}$  до  $4,25 \cdot 10^{-6}$  мм<sup>3</sup>/Нм.

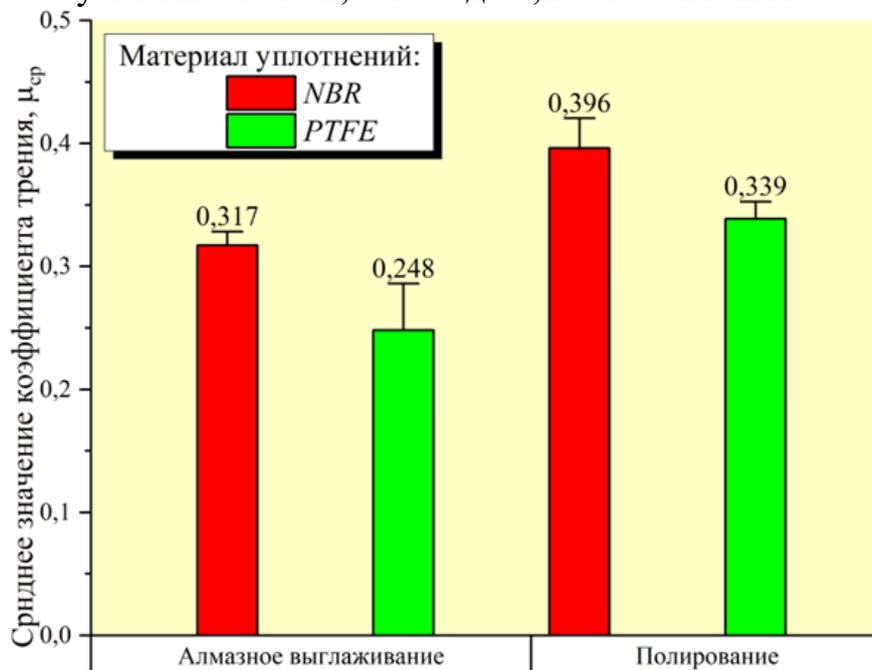


Рисунок 16 — Средний коэффициент трения в контакте с полированными и выглаженными образцами

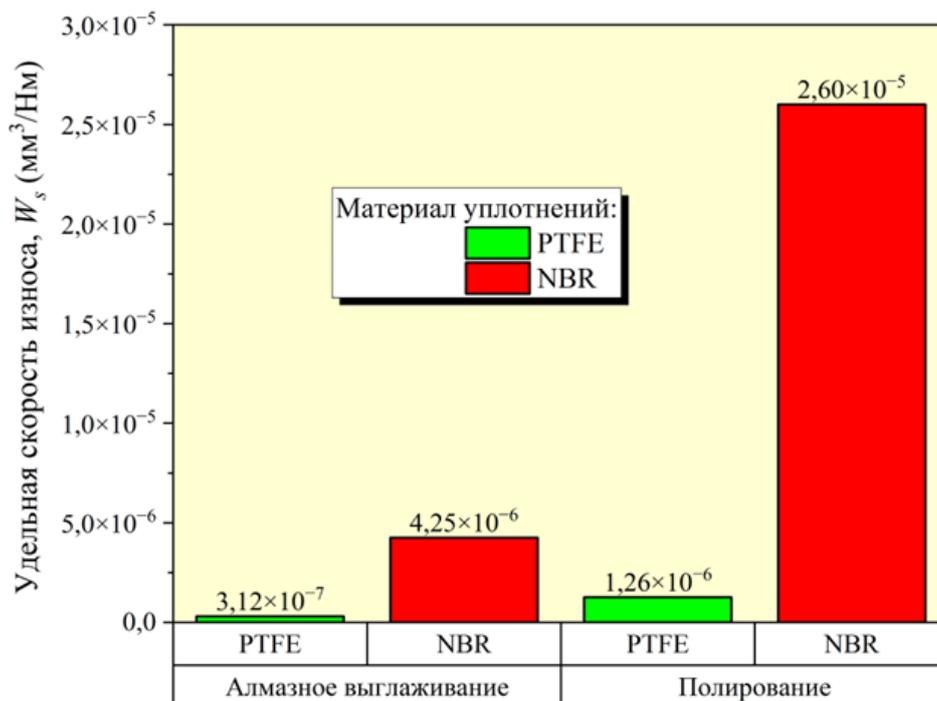


Рисунок 17 — Удельная скорость износа ( $W_s$ ) для материалов уплотнений *NBR* и *PTFE* в контакте с полированными и выглаженными образцами

Была произведена оценка ресурса трибосопряжения штоков-уплотнение, результаты которой представлены на рисунке 23.

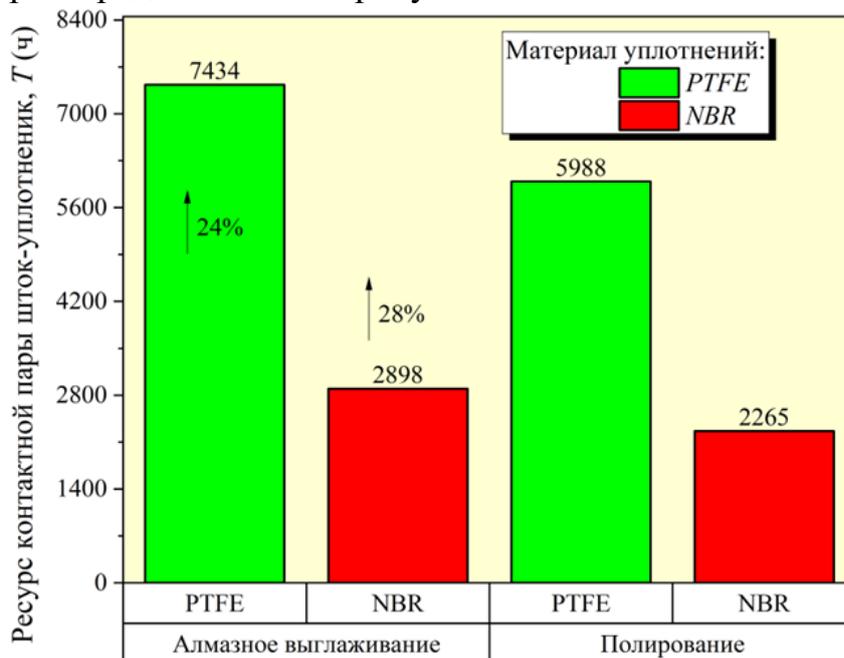


Рисунок 18 — Оценка ресурса трибосопряжения в зависимости от метода отделки поверхности хромированных штоков

Из рисунка 23 видно, что ресурс пары трения «шток-уплотнение» при контакте уплотнений с выглаженными образцами увеличился на 24% для материала марки *PTFE* и на 28% для уплотнения из материала *NBR* по сравнению с аналогичными испытаниями в контакте с хромированными образцами после полирования. Поставленная в работе цель достигнута.

## 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 штоков-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 «штоков-

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  $Ra$  ( $Rz$ ),  $Rmax$ ,  $Rmr$ , 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* составляют соответственно 0,4 и 0,32.

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

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих изданиях:**

##### *Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ*

1. Севагин, С. В. Выявление и обеспечение требований к качеству поверхности штока гидроцилиндра при контакте с уплотнением / С. В. Севагин, Д. Я. Соловых, В. У. Мнацакян // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – № 15. – С. 142–150. DOI: 10.26160/2658–3305-2022-15-142-150

2. Мнацакян В.У., Севагин С.В., Нго Ву Нгуэн, Мартюшова А. А. Эффективные технологии восстановления штоков гидроцилиндров горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5 (S4). — С. 12–19. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_5\_4\_12.

3. Севагин С.В., Вержанский А.П. Обеспечение требуемого качества изготовления штоков гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5. – С. 35–44. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-5-0-35;

##### *Статьи в изданиях из базы данных Scopus*

4. 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: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019, ICMTME 2019, Sevastopol, 09–13 сентября 2019 года. – Sevastopol: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 044095. – DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044095.

*Результаты изобретательской деятельности*

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022618491 Российская Федерация. Базовая управляющая программа для достижения требуемых характеристик качества поверхности хромированного штока гидроцилиндра с помощью применения технологии алмазного выглаживания: № 2022618004: заявл. 21.04.2022: опубл. 11.05.2022 / С. В. Севагин.

*Публикации в других изданиях*

6. Севагин, С. В. Исследование эффективных методов отделочной обработки с целью повышения износостойкости штоков гидроцилиндров горных машин / С. В. Севагин // Актуальные проблемы недропользования : Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов, Санкт-Петербург, 12–16 апреля 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 155.