

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

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

Нго Ву Нгуэн

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГИДРОСТОЕК
КРЕПЕЙ ОЧИСТНЫХ ЗАБОЕВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ВЬЕТНАМ**

Специальность 2.8.8. – «Геотехнология, горные машины»

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени кандидата технических наук

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

Москва, 2022

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Для горнодобывающих предприятий Социалистической Республики Вьетнам (СРВ) вопросы ремонта горной техники являются чрезвычайно важными, так как в данной отрасли народного хозяйства сосредоточено и эксплуатируется преимущественно оборудование зарубежного производства. Климатические особенности страны, обусловленные высокой влажностью и повышенной среднегодовой температурой воздуха, ускоряют процессы коррозии и износа ответственных элементов горных машин, что требует организации системы оперативного и качественного ремонта оборудования. Между тем в условиях роста цен на конструкционные материалы, энергоносители, продукцию металлургических компаний для ремонтных служб горных предприятий остаются актуальными вопросы поиска и разработки эффективных технологий восстановления деталей с наименьшими затратами человеческого труда, материальных и энергетических ресурсов. Последнее приводит к необходимости анализа номенклатуры, характера повреждений и степени износа деталей, вышедших из строя, для выбора рациональных методов восстановления их работоспособности.

Гидростойки крепей очистных забоев относятся к наиболее ответственным элементам горно-шахтного оборудования, представляющие собой силовые объемные гидроцилиндры поступательного движения. К гидростойкам предъявляют повышенные требования по жесткости конструкции и прочности материала контактирующих поверхностей. Анализ производственной статистики указывает на то, что большая часть отказов гидростоек происходит вследствие выхода из строя гильз и штоков. При этом наиболее характерными причинами отказов являются механический износ зеркала, коррозия и раздутие цилиндра. Отмечается также наличие на рабочей поверхности цилиндров следов фреттинга, что делает невозможным их восстановление и требует дополнительных мероприятий по его предотвращению. Рабочая часть штоков также выходит из строя преимущественно вследствие интенсивного абразивного износа.

Большая часть вышедших из строя деталей гидростоек бракуется, а запросы на приобретение к ним запасных частей из года в год возрастают, что требует колоссальных финансовых затрат. В связи с этим повышение эффективности ремонта широкой номенклатуры гидростоек и разработка современных технологических процессов восстановления ответственных деталей силовых гидроцилиндров на ремонтных предприятиях горнодобывающих регионов Вьетнама является актуальной научно-практической задачей, имеющее важное значение для экономики предприятий и страны.

Цель работы – повышение эффективности ремонта гидростоек крепей очистных забоев на основе разработки и исследования рациональных технологических методов восстановления работоспособности деталей

соединений с учетом характера повреждений и горнотехнических условий их эксплуатации.

Идея работы заключается в разработке комплекса эффективных универсальных технологических методов ремонта, направленных на оперативное восстановление работоспособности широкой номенклатуры гидростоек крепей очистных забоев угольных шахт СРВ.

Задачи диссертационного исследования.

1. Анализ конструктивных особенностей гидростоек крепей очистных забоев угольных предприятий СРВ и систематизация факторов, вызывающих потерю их работоспособности.

2. Исследование причин и механизмов развития фреттинг-процессов на поверхностях гильз гидроцилиндров при их эксплуатации в сложных горнотехнических условиях на основе анализа источников вибраций.

3. Разработка методики оценки потери массы в микрообъемах поверхностных слоев деталей соединения цилиндр-поршень с учетом развития фреттинг-процессов.

4. Обоснование метода восстановления гильз гидростоек, основанного на термопластическом деформировании изношенных поверхностей путем создания осевого температурного градиента и выявление рациональных технологических параметров процесса, обеспечивающих требуемую компенсацию размеров отверстия гильзы при ремонте.

5. Обоснование метода восстановления штоков силовых гидроцилиндров при помощи высокоскоростного газопламенного напыления с последующей обработкой износостойких покрытий поверхностным пластическим деформированием.

6. Разработка метода обеспечения точности соединений в гидроцилиндрах при переводе сопрягаемых деталей в ремонтный размер.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлены причины возникновения и механизм развития фреттинг-процессов в соединениях гидростойки, приводящих к зарождению и развитию на контактных поверхностях деталей усталостных трещин, на основе выявления и анализа источников и параметров вибраций в очистном забое.

2. Для восстановления диаметра внутренней поверхности гильзы силового гидроцилиндра в пределах 0,3...0,9 мм целесообразно применять термопластическое деформирование, реализуемое при помощи непрерывно-последовательного сквозного индукционного нагрева гильзы, в результате чего в ней возникает осевой градиент температур, вызывающий уменьшение внутреннего диаметра детали.

3. Для восстановления работоспособности изношенного штока целесообразно взамен твердого хромирования применять высокоскоростное газопламенное напыление износостойких покрытий, которое обеспечивает требуемый уровень эксплуатационных свойств детали, что выявлено при помощи цифрового моделирования и анализа напряженно-деформированного состояния штока под действием внешних нагрузок.

4. Для обеспечения требуемой точности соединения цилиндр-поршень, сопрягаемые детали которого переведены в ремонтные размеры, целесообразно применять сборку регулировкой, с использованием поршня в качестве неподвижного компенсатора.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

подтверждается достаточным количеством экспериментальных данных, применением сертифицированных программ, оборудования с высокими метрологическими характеристиками, использованием апробированных методов испытаний и обработки экспериментальных данных при проведении исследований.

Научная новизна работы заключается в решении актуальной научной задачи – раскрытие связи между характером повреждения элементов гидростоек крепей, горнотехническими условиями их эксплуатации и рациональными технологическими методами восстановления работоспособности несущих элементов, что имеет важное научное и практическое значение для горных предприятий СРВ.

Методы исследований. Теоретические исследования основываются на фундаментальных положениях теории упругопластического контакта твердых тел, теории колебаний, теории размерного анализа, теории вероятностей и математической статистики, теории пластичности. Для оценки напряженно-деформированного состояния восстанавливаемых объектов использованы методы компьютерного моделирования и конечно-элементный анализ.

Научное значение работы состоит в разработке научного подхода к обоснованию и разработке комплекса эффективных технологий ремонта ответственных деталей гидростоек крепей очистных забоев на основе привлечения современных методов исследования.

Практическая значимость результатов работы.

1. Разработана методика исследования причин возникновения и развития фреттинг-процессов в соединениях гидростойки на основе выявления и анализа источников вибраций в очистном забое.

2. Разработана методика оценки износа сопрягаемых поверхностей соединения цилиндр-поршень гидростойки учетом протекающих в зоне контакта фреттинг-процессов.

3. Выявлены рациональные технологические параметры процесса термопластического деформирования гильз гидростоек, позволяющие получить максимальную усадку внутреннего диаметра для восстановления требуемых размеров и форм детали.

4. Разработаны технологические рекомендации по выбору метода восстановления штоков гидростоек на основе анализа напряженно-деформированного состояния штока под действием эксплуатационных нагрузок.

5. Разработаны технологические рекомендации по улучшению эксплуатационных свойств поверхностного слоя штоков, восстановленных

газотермическим напылением, при помощи отделочной обработки алмазным выглаживанием.

6. Разработан подход к обеспечению точности соединений гидростоек при переводе деталей в ремонтные размеры с использованием поршня в качестве неподвижного компенсатора.

Личный вклад автора. Автором выполнены теоретические исследования механизма фреттинг-коррозии, выявлены источники колебаний в очистном забое, проведены экспериментальные исследования термопластической обработки стальных образцов, выполнено компьютерное моделирование процесса термопластического деформирования гильз при индукционном нагреве, а также напряженно-деформированного состояния штока под действием внешних нагрузок.

Реализация результатов работы.

Научные результаты работы по обоснованию технологических методов восстановления ответственных элементов гидростойки приняты для использования в АО «МЭМП», Ханойском институте горной науки и технологии, а также используются в учебном процессе Горного института НИТУ «МИСиС» при подготовке студентов машиностроительного профиля по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были доложены на международных научно-технических конференциях и симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, НИТУ «МИСиС» 2020-2022 гг.); XXXI международной научно-практической конференции Научный диалог: Молодой ученый, Санкт-Петербург, 2020 г., XIII Международной научной-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении», Томск, 2022 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ, из которых 4 - в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

Объем и структура работы. Диссертационная работа представлена на 161 странице текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 125 наименований, включает 81 рисунок, 14 таблиц, приложение.

Автор выражает искреннюю благодарность заведующему лабораторией «Гибридные наноструктурные материалы» Комиссарову А.А. и сотруднику лаборатории Мендерову А.Ю. за оказанную помощь в подготовке образцов и проведении анализа микроструктуры стали 30ХГСА.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации проанализированы условия залегания угольных пластов во Вьетнаме и их влияние на способы ведения очистных работ, а также вопросы управления горным давлением, выполнен анализ видов крепей, рассмотрены конструкции гидростоек очистных забоев, дан

сравнительный анализ ресурса механизированных крепей различных производителей, проанализированы характерные виды повреждений элементов силовых гидроцилиндров и применяемых методов восстановления деталей соединений. Представлен обзор современной научно-технической литературы по теме исследования. Выполнен обзор работ ведущих советских, российских и вьетнамских ученых, а также научных трудов зарубежных исследователей, посвященных решению задач повышения надежности, эффективности эксплуатации и ремонта соединений гидростоек.

Вопросам проектирования, изготовления и эксплуатации горно-шахтного оборудования, повышения эффективности очистных комплексов и надежности гидропривода горных машин посвящены работы выдающихся советских и известных российских ученых: А.М. Балабышко, Г.Д. Буялича, В.В. Габова, В.И. Галкина, С.М. Григорьева, В.Н. Гетопанова, В.Н. Дмитриева, В.Ф. Еленкина, В.Н. Ефимова, Л.И. Кантовича, Е.М. Кривенко, Ю.Ф. Набатникова, М.Г. Рахутина, Г.И. Солода, В.Н. Хорина, А.Л. Яблонева, и др. Исследованиям фреттинг-процессов в узлах машин и транспортных средств посвящены работы А.Н. Петухова, М.С. Островского, Л.А. Коллинза, Р.Б. Уотерхауза и др.

Для горных предприятий Вьетнама решение задач повышения эффективности технического обслуживания и ремонта оборудования очистных забоев, в частности, гидростоек крепей, имеет чрезвычайно важное значение, что и определило необходимость проведения данного исследования.

Во второй главе представлены исследования, направленные на выявление причин зарождения и протекания в гидростойках фреттинг-процессов, оказывающих негативное воздействие на ресурс соединений. В частности, выполнен анализ условий, способствующих активации данного процесса на контактных участках поршня и цилиндра, показано его влияние на характер повреждения внутренней поверхности зеркала цилиндра гидростойки механизированной крепи. Описана специфика развития фреттинга и выявлено, что данный вид разрушения обусловлен наличием относительных микросмещений контактируемых поверхностей с амплитудой колебания от 0,25 до 150 мкм.

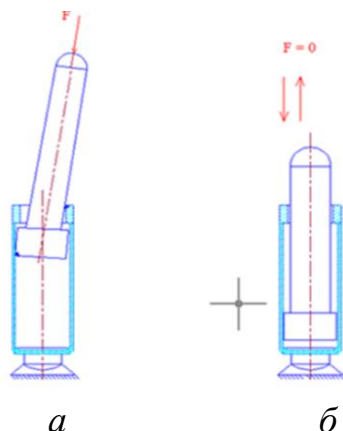
Исходя из цикла работы механизированной крепи, принимая во внимание последовательность выполняемых в процессе очистных работ переходов, с целью анализа характерных видов повреждения сопрягаемых деталей к рассмотрению были приняты две принципиальные схемы контакта поршня с цилиндром (рис. 1). Первая схема (рис. 1, а) отвечает взаимодействию поршня с гильзой в рабочем положении штока под нагрузкой при наличии перекосов. В этом случае, при выбранных зазорах, поясok поршня плотно контактирует с гильзой на ограниченном участке и воспринимает через шток основную нагрузку. При наличии внешних колебаний, сообщаемых штоку, на контактируемых площадках гильзы и поршневых колец могут возникнуть условия для развития фреттинг-процесса.

Вторая (рис. 1, б) - характеризует работу сопряжений в условиях трения скольжения, что имеет место при возвратно-поступательном перемещении

штока в процессе разгрузки-нагрузки гидроцилиндра, а также при просадке штока по причине изменения горного давления. В этом случае на поверхности цилиндра появляются следы механического изнашивания.



Следы локального износа (фреттинг-коррозии) на зеркале цилиндра



Следы абразивного износа на внутренней поверхности цилиндра

Рисунок 1 - Характер повреждения рабочей поверхности цилиндра гидростойки в процессе эксплуатации: *а* - при распоре гидроцилиндра под нагрузкой; *б* - при разгрузке штока для передвижки крепи и просадке штока из-за опускания кровли

Таким образом, плотный контакт пояска поршня с зеркалом цилиндра при наличии колебаний (рис. 1, *а*) создает предпосылки для развития фреттинг-процессов, в частности фреттинг-коррозии. Последнее для гидроцилиндров является наиболее типичным и происходит по причине разрушения оксидных пленок на поверхностях контактирующих тел при отсутствии разделяющего слоя рабочей жидкости. Это приводит к схватыванию металлических поверхностей, активации процесса фреттинг-коррозии и впоследствии появлению и развитию усталостных трещин, исключающих возможность ремонтного восстановления детали.

Были проанализированы основные источники колебаний в очистном забое, оказывающие воздействие на гидростойку через основание и перекрытие крепи (рис. 2). При этом, в соответствии с теорией микропластичности, принято допущение, что колебания поступающие через основание крепи носят затухающий характер, так как энергия механических колебаний затрачивается на преодоление внутреннего трения материалов конструкционных элементов и стыков различных соединений, располагаемых между источником колебаний и объектом исследования.

Колебания, воспринимаемые перекрытием секции крепи при разрушении блока кровли, были разделены на две категории: на колебания с достаточно большой (рис. 3, *а*) и малой амплитудой (рис. 3, *б*). Первые, воздействуя на шток, вызывают значительные перемещения штока с поршнем и, тем самым, способствуют механическому изнашиванию зеркала цилиндра в условиях трения скольжения, тогда как колебания второй категории, величины которых изменяются в пределах 10...100 мкм (рис. 3,

б), воздействуя на шток через верхнюю сферическую опору, способны вызывать микросмещения пояса поршня и могут являться причиной зарождения фреттинга.

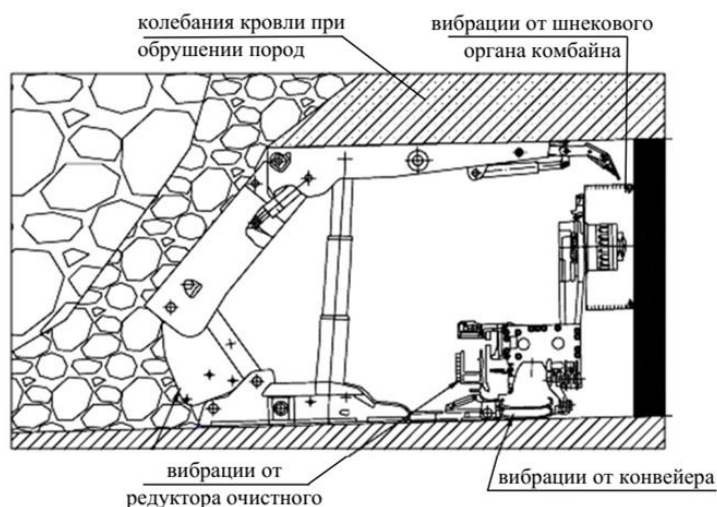
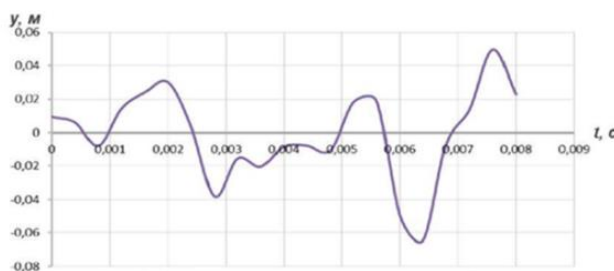
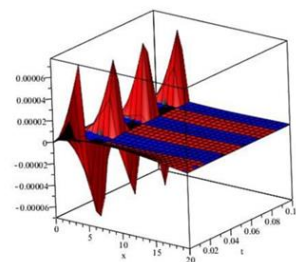


Рисунок 2 – Источники вибраций в очистном забое, влияющие на работу гидростойки



а



б

Рисунок 3 - Характер колебаний блока кровли над гидростойкой: а – с достаточно большой амплитудой колебаний от 0,01 до 0,06 м; б- с малой амплитудой колебаний от 0,00001 до 0,00008 м, частотой 25-100Гц

Оценить полную потерю массы или объема материалов контактируемых поверхностей при фреттинг-коррозии возможно лишь с учетом как коррозионной (первое слагаемое), так и механической (второе слагаемое) составляющей данного процесса, используя модель Улига:

$$W_{\text{общ}} = \left(k_0 P^{\frac{1}{2}} - k_1 P \right) \frac{N}{f} + k_2 l P N, \quad (1)$$

где N – общее число циклов нагружения (трения);

P – нормальная нагрузка; f – частота циклов; l – расстояние, проходимое единичной неровностью поверхности за полупериод цикла, характеризующее амплитуду цикла; k_0, k, k_1, k_2 – постоянные

$$k_0 = \frac{2}{\sqrt{\pi p_0}} \frac{k}{\tau} \text{ и } k_1 = \frac{4}{\pi p_0} \frac{k}{\tau}, \quad (2)$$

где p_0 – давление текучести; τ - постоянная.

Вместе с тем рассчитать достоверно коррозионные потери материалов контактирующих поверхностей вследствие окисления не представляется возможным. В связи с этим сопротивляемость фреттингу элементов рассматриваемого соединения оценивалась без учета коррозионного фактора.

Опираясь на основные положения теории упругопластического материала А.Ю. Ишлинского, оценку сопротивляемости внутренней поверхности цилиндра фреттинг-износу предлагается выполнять с помощью критерия износостойкости:

$$W = \frac{\sigma_s}{G} \delta_\tau, \quad (3)$$

где σ_s – предел текучести материала цилиндра; G – модуль сдвига; δ_τ – декремент колебаний при действии тангенциальной нагрузки.

Для расчета ожидаемой потери массы при фреттинге с учетом колебаний в зоне контакта пояска поршня с цилиндром, было принято выражение, устанавливающее связь между коэффициентом износа Аркара K , объемом V , утраченного вследствие износа материала, и амплитудой относительного скольжения:

$$V = K \cdot L \cdot X \cdot f^n / 3 \cdot P, \quad (4)$$

где H – твердость более пластичного материала из контактируемых элементов; P - нормальная нагрузка; L - расстояние скольжения, равное при фреттинге $L=2aN$, где a - амплитуда скольжения (колебаний), а N - количество циклов нагружения; f – коэффициент трения для рассматриваемой пары материалов (табл. 1); n - показатель степени, принимаемый равным 4.

Принимая K как константу для каждой комбинации материалов опорных колец поршня и цилиндра, по формуле 2 определяли объем утраченного материала (таблица 1).

Из рис. 4 видно, что с уменьшением твердости материала опорного пояска поршня, потери объема материала снижаются, что положительно сказывается на ресурсе соединения при наличии в системе колебаний.

Таким образом, в результате проведения теоретических исследований установлено, что повысить сопротивляемость фреттингу деталей соединения цилиндр-поршень возможно за счет: 1) формирования на внутренней поверхности цилиндра износ- и коррозионностойких покрытий (например, хромированием) или диффузионных слоев путем проведения химико-термической обработки азотированием; 2) использования для поршневых колец эластомерных материалов с низким коэффициентом трения по стали, амортизирующих колебания; 3) использование в гидроцилиндрах рабочих

жидкостей с присадками, обеспечивающими надежную разделительную пленку на границе контакта.

Таблица 1 – Расчетные данные для ожидаемой потери объема с учетом свойств материала поршневых колец под влиянием фреттинг-процесса при нормальной нагрузке $P = 82000 \text{ Н}$, средней амплитуде колебаний $a=50 \text{ мкм}$ и числе циклов нагружения $N=3 \cdot 10^4$

Материалы опорных колец	Твердость мягкого материала $P \text{ (Н/мм}^2\text{)}$	Коэффициент трения по стали, K
40X	2600	0,7
СЧ18	2000	0,5
Л63	600	0,35
РОМ	130	0,17
PTFE	35	0,04

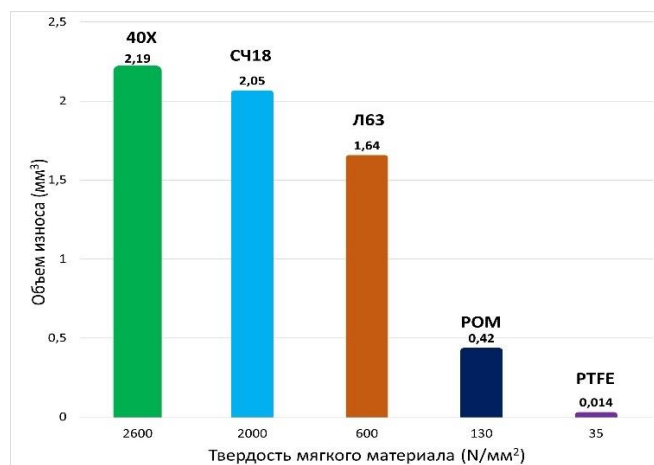


Рисунок 4 – Результаты расчета потери объема материала при фреттинге

В третьей главе представлено исследование параметров процесса восстановления внутреннего диаметра изношенных цилиндров гидростоек при помощи термопластического деформирования. Дана оценка их влияния на величину деформации восстанавливаемой поверхности. При выборе метода восстановления исходили из характерных величин износов внутреннего диаметра цилиндров, выявленных на основе анализа производственных данных.

Метод термопластического деформирования основан на создании осевого градиента температур в стенке цилиндра при его непрерывно-последовательном индукционном нагреве и охлаждении по всей длине (рис. 5). При этом создаваемый перепад температуры ΔT между нагретыми и холодными участками детали приводит к возникновению в стенке цилиндра резко изменяющихся термических напряжений. Таким образом, нагретый участок длиной ΔL , где возникают напряжения растяжения, оказывается сжатым между более холодными участками и действует на них как симметрично приложенная сила растяжения. В силу того, что с повышением температуры предел прочности металла уменьшается, в нагретом участке детали будет иметь место деформация сжатия, направленная радиально внутрь цилиндра, благодаря чему в результате пластического деформирования внутренний диаметр уменьшается на величину усадки, что в большинстве случаев достаточно для создания компенсационного припуска на отделочную обработку внутренней поверхности цилиндра, в процессе которой устраняются следы износа и обеспечиваются требуемая геометрия и

размерная точность детали. Данный метод целесообразно использовать при износах внутреннего диаметра в пределах 0,3...0,5 мм

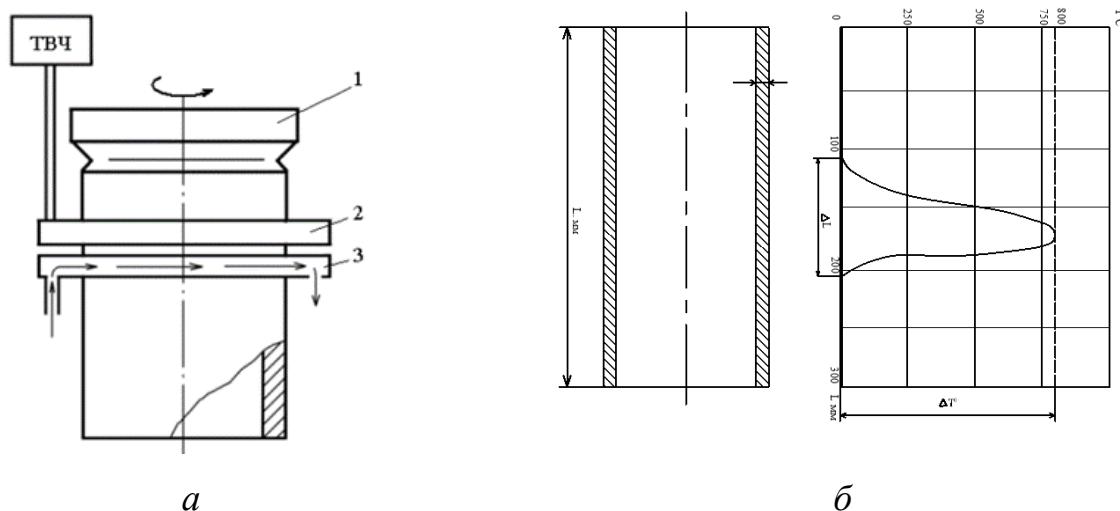


Рисунок 5 – Схема нагрева и деформации стенки восстанавливаемой гильзы цилиндра созданием градиента температур (а) и эпюра изменения температуры ΔT на участке ΔL гильзы (б): 1- гильза цилиндра; 2- индуктор ТВЧ; 3 - спрейер

В процессе проведения исследований были выявлены основные важные технологические параметры процесса, оказывающие влияние на степень деформации восстанавливаемого цилиндра за один цикл нагрева и разработана методика расчета и выбора основных режимов процесса с учетом специфики индукционного нагрева полых цилиндров – частоты индукционного тока f (Гц), удельной мощности p_o (кВт/см²), скорости нагрева V_n (°C/с), температуры нагрева t_n , скорости перемещения восстанавливаемой детали относительно индуктора $V_{ц}$ (мм/с), параметра индуктора - высота h (мм), а также параметров системы охлаждения.

Для расчета частоты индукционного тока, обеспечивающей равномерный сквозной нагрев полого цилиндра по толщине стенки предложена формула:

$$f_{\text{опт}} = \frac{8,65 \cdot 10^7 \cdot \rho_2}{2R_{\text{ср}} h_2 k}, \quad (\text{Гц}) \quad (5)$$

где ρ – удельное сопротивление материала цилиндра, Ом·мм²/м;
 h_2 – толщина стенки гильзы, мм; $R_{\text{ср}}$ – средний радиус системы индуктор-деталь, мм, k – коэффициент Нагаока, $k = f\left(\frac{R}{l}\right)$, l – длина индуктора.

Скорость нагрева определялась из диапазона:

$$V_n \leq \frac{350}{h_2^2}, \quad ^\circ\text{C/с} \quad (6)$$

Где h – толщина стенки цилиндра, см.

Одними из важнейших параметров индукционного нагрева является температура и время нагрева восстанавливаемой детали, влияющие на

полноту протекания необходимых фазовых превращений в материале детали и получение требуемой структуры после ускоренного охлаждения. Температура нагрева определяется химическим составом сплава, из которого изготовлена деталь и критическими температурными точками фазовых превращений. Для деталей из среднеуглеродистых низколегированных сталей нагрев производится выше температурной точки A_{c3} до момента полного растворения карбидов в аустените без допущения роста зерна аустенита.

Для исследования влияния параметров обработки на величину усадки материала, получаемой при деформировании, при помощи программного комплекса QForm было выполнено моделирование термопластического деформирования гильзы. Данная программа обладает широкими возможностями визуализации различных операций по обработке металлов давлением и термической обработки материалов в формате 2D – и 3D-моделирования.

В программе QForm были смоделированы условия нагрева и получено решение для плоской задачи термопластического деформирования, благодаря чему удалось выявить зависимость степени деформации стенки цилиндра (приращения внутреннего диаметра) от технологических параметров индукционного нагрева. Созданные цифровые модели процесса восстановления позволили определить рациональные параметры индукционного нагрева с учетом требуемой компенсации внутреннего диаметра. В таблице 2 представлены принятые условия реализуемого процесса. Моделирование выполнялось для цилиндра, изготовленного из легированной стали марки 30ХГСА, после улучшения; принятый диаметр отверстия – 220 мм, наружный диаметр - 273 мм.

Исследование проводилось при помощи 2D – моделирования процесса, реализуемого в двух вариантах:

1. Термопластическое деформирование цилиндра путем создания осевого градиента температур, возникающего при нагреве и быстром охлаждении стенок (рис. 6, а).
2. Термопластическая деформация цилиндра с принудительным обжатием в матрице. Направление давления от внешних сил совпадает с направлением деформаций (рис. 6, б, в).

В двух случаях нагрев осуществляется внутренним индуктором. Исходные данные представлены в таблице 2.

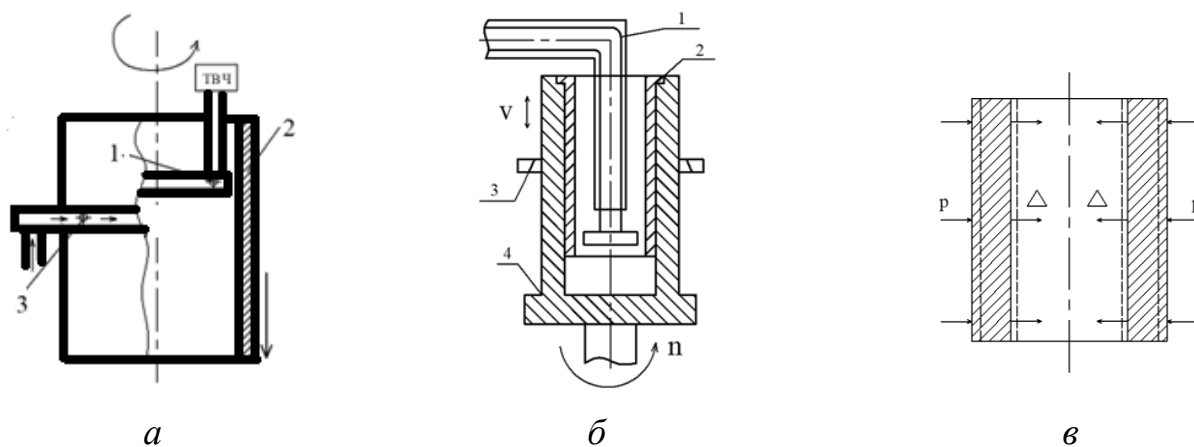


Рисунок 6 – Схема восстановления внутреннего диаметра цилиндра при помощи непрерывного-последовательного индукционного нагрева по высоте: *а* - за счет создания градиента температур; *б* – за счет обжата цилиндра в матрице; *в* – направление деформации. 1-индуктор; 2 - восстанавливаемая деталь; 3 - спрейер; 4 – матрица.

Давление p при обжати рассчитывали по формуле

$$p = 1.15 \sigma_T \ln \frac{R}{r}, \quad (7)$$

где R, r - соответственно наружный и внутренний радиусы цилиндра:
 σ_T – предел текучести материала.

Таблица 2 - Исходные данные для моделирования процесса термопластического деформирования.

Параметр обработки	Численное значение	Параметр обработки	Численное значение
Частота тока f , Гц	50 -150	Внутренний и наружный диаметры гильзы, мм	220 273
Скорость нагрева V_n , $^{\circ}\text{C}/\text{с}$	50	Высота индуктора, мм	24
Удельная мощность p_0 , $\text{кВт}/\text{см}^2$	0,06-0,07	Скорость охлаждения детали V_o , $^{\circ}\text{C}/\text{с}$	120
Длительность нагрева t_n , с	80-100	Зазор между индуктором и нагреваемой поверхностью, мм	1
Мощность, кВт	13,6	Скорость протекания воды V_v , м/с	0,38

На рисунках 7-8 представлены результаты моделирования. После нагрева и деформации при помощи спрейера производится охлаждение цилиндра в течение 10 с. На рисунке 8 показаны восстановленные размеры отверстия в двух диаметрально противоположных направлениях. Величина полученной усадки представлена в таблице 3.

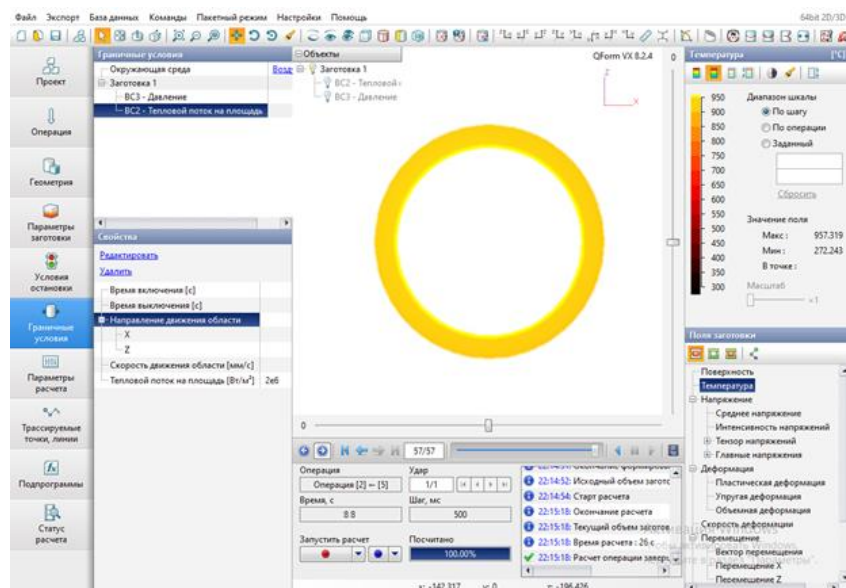


Рисунок 7 – Моделирование сквозного индукционного нагрева цилиндра до требуемой температуры 920-950 °С; частота тока 100-150 Гц

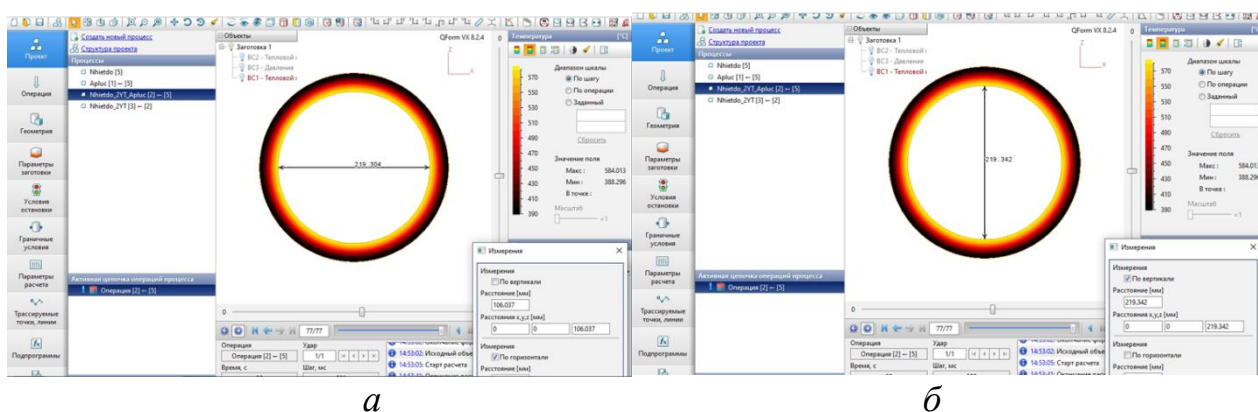


Рисунок 8 - Температурное поле по сечению и значения внутреннего диаметра цилиндра по оси x (а) и z (б), полученные в результате равномерного нагрева и последующего охлаждения

Таблица 3 – Величина усадки, полученная в процессе термопластического деформирования путем создания градиента температур

Радиальный градиент температур по толщине стенки, °С	Диаметр после термопластической обработки, мм		Абсолютная средняя величина усадки, мм
	по горизонтали	по вертикали	
$\Delta T=200$	219,304	219,342	0,677
$\Delta T=100$	219,107	219,22	0,837
$\Delta T=50$	218,927	219,147	0,969

На рисунке 9 представлены условия моделирования цилиндра в матрице.

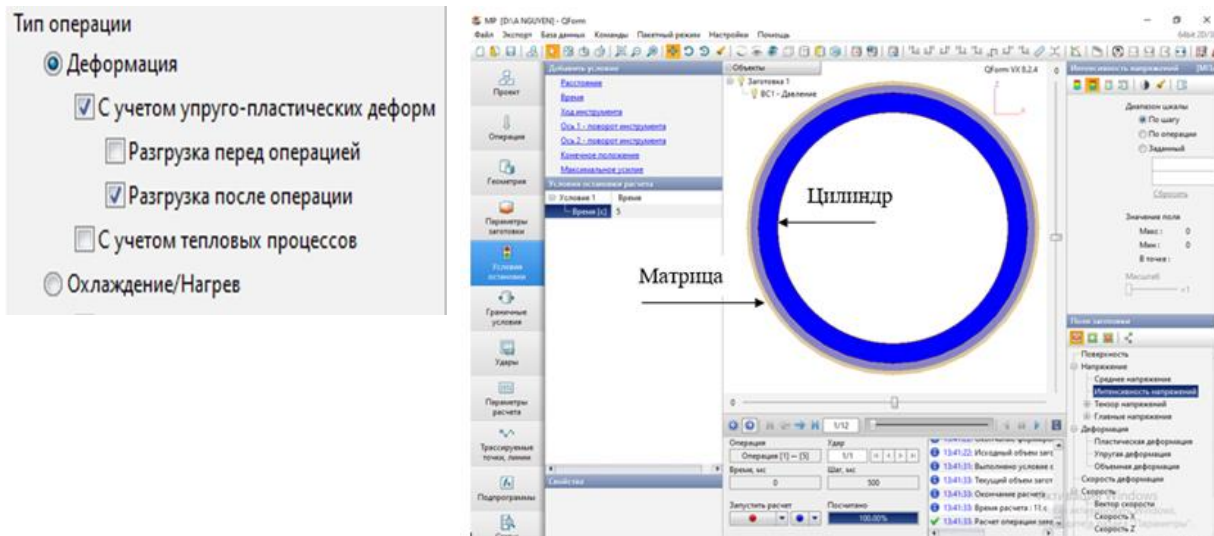


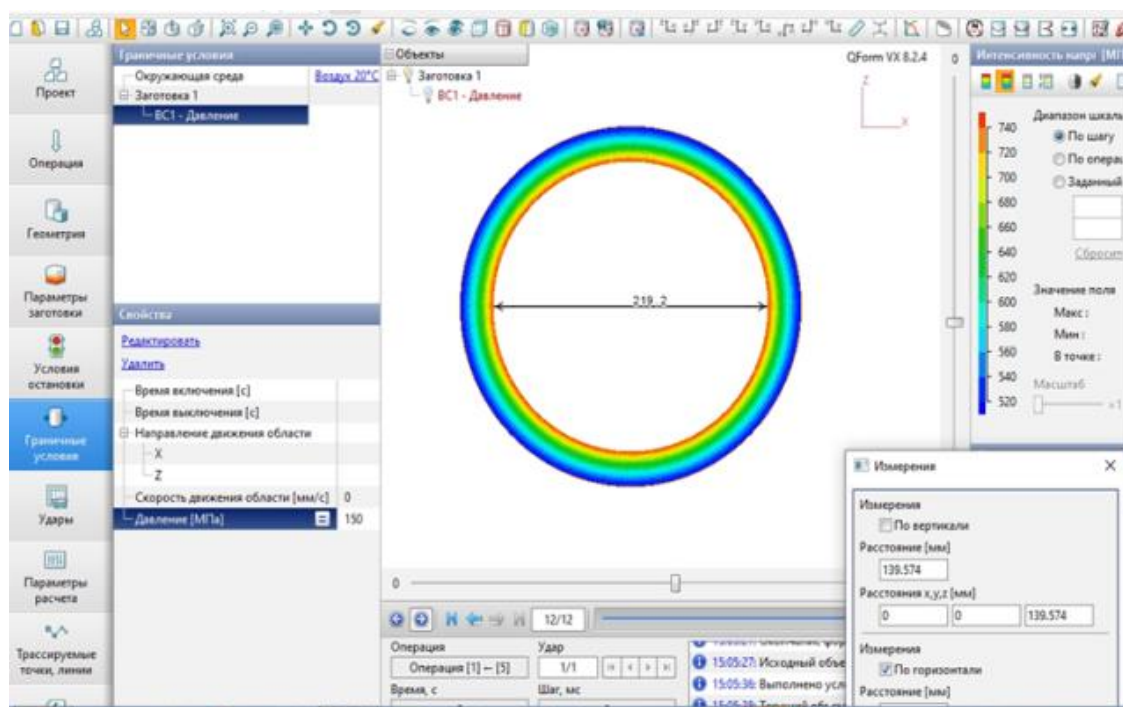
Рисунок 9 – Условия и принятые ограничения при моделировании термопластической обработки обжатием в матрице

Результаты моделирования и полученные величины диаметра по осям x и z представлены на рисунке 10.

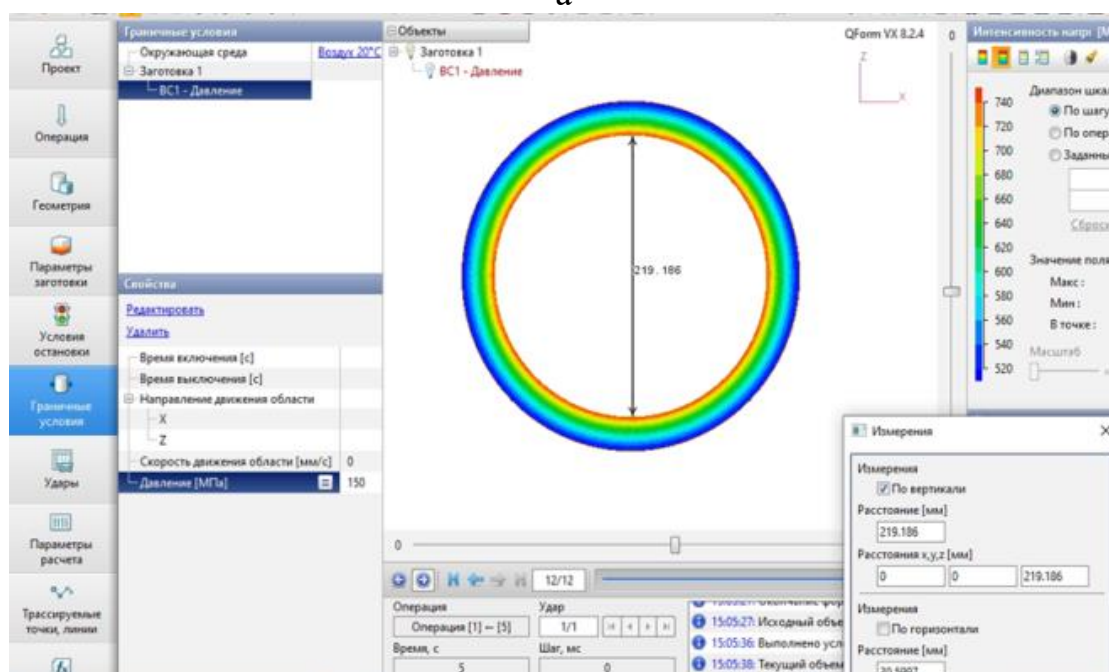
Из полученного графика (рис. 11) следует, что деформирование цилиндра в матрице следует проводить до величины абсолютной усадки, равной 2,32мм (относительная усадка – 1,05%) во избежание нарушения геометрической формы детали, что может привести к неисправимому браку.

Таким образом, в результате моделирования процесса установлено, что термопластическое деформирование путем создания градиента температур рекомендуется применять для восстановления внутренних диаметров с износом в пределах 0,4...0,9 мм, тогда как деформированием обжатием в матрице представляется возможным компенсировать большие износы - до 2 мм на диаметр.

Сочетание термопластического восстановления цилиндра с последующим высоким отпуском при температуре 630-650°C с охлаждением в воде позволяет получить для стали 30ХГСА структуру тонкодисперсного сорбита (рис.12), что положительно сказывается на эксплуатационных свойствах восстановленной детали и ресурсе цилиндра.



а



б

Рисунок 10- Диаметры отверстия по осям *x* (а) и *z* (б) и интенсивность напряжений в стенке цилиндра после индукционного нагрева и деформирования с приложением внешнего давления от матрицы 150 МПа.

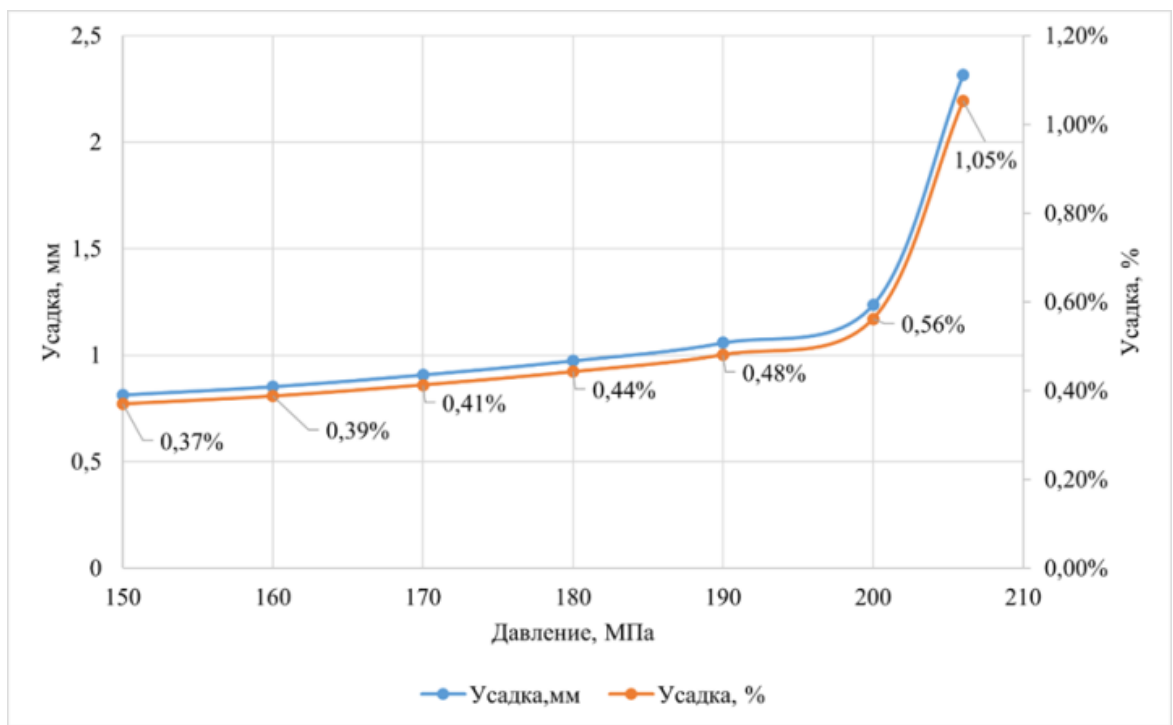
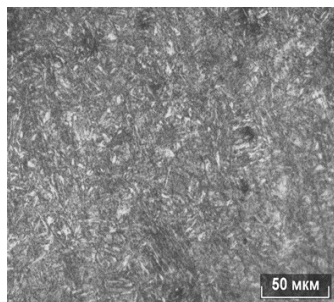
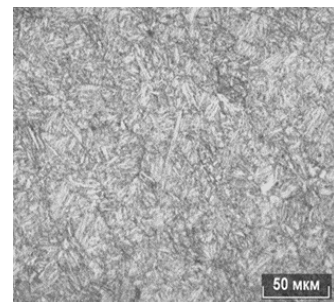


Рисунок 11 - Изменение величины усадки в зависимости от внешнего давления при обжате гильзы в матрице



а



б

Рисунок 12 - Микроструктура улучшенной стали 30ХГСА: *а* - исходная до термопластической обработки (твердость 244 НВ); *б* - полученная в результате высокого отпуска после термопластического деформирования (твердость 266 НВ)

В четвертой главе исследованы эффективные ресурсосберегающие, экологически безопасные технологии восстановления штоков гидростоек механизированных крепей, основанные с целью замены гальванической технологии поверхностного упрочнения штока на газотермические. Последние обеспечивают получение требуемых функциональных характеристик детали при рациональном использовании материальных и энергетических ресурсов ремонтных подразделений горно-шахтных предприятий.

С целью выявления возможности использования технологии газотермического напыления для восстановления и упрочнения штоков на начальном этапе было проанализировано изменение микротвердости штока по

глубине сечения после выполнения ряда операций термообработки и заключительного гальванического хромирования. (рис.13). Из рисунка отчетливо видно, что на глубине 2,1 мм микротвердость изменяется с 900 HV на поверхности до 200 HV в сердцевине детали, что необходимо знать для правильного выбора материала покрытия.

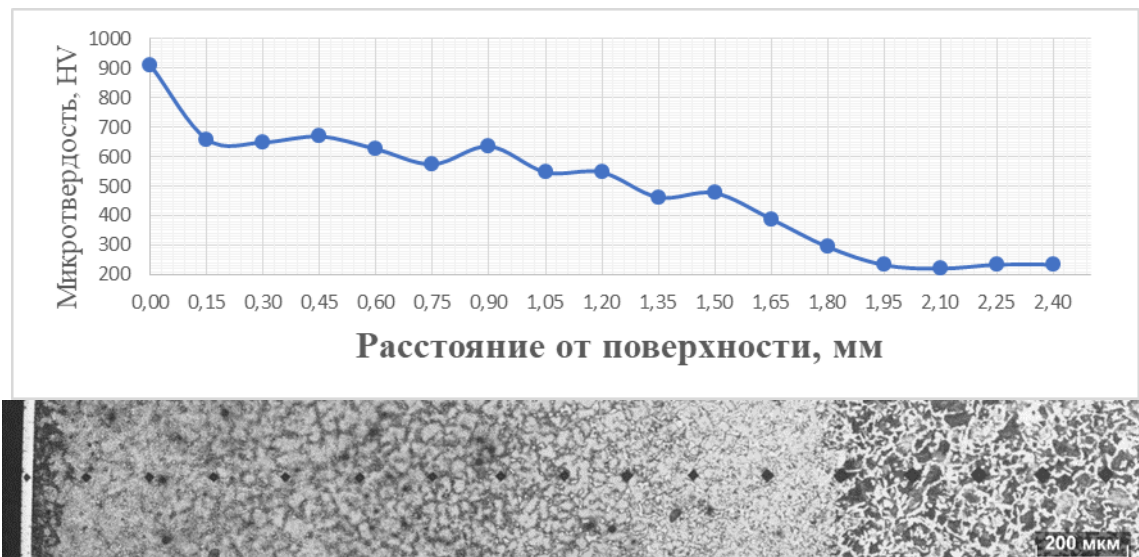


Рисунок 13 - Распределение микротвердости по глубине хромированного штока из стали 40Х и микроструктура сплава

Было исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) контактных участков грундбуксы и штока. Исследование проводилось путем моделирования в среде Ansys процесса нагружения элементов соединения при самой неблагоприятной схеме перегиба оси штока. Расчет напряжений выполнялся методом конечно-элементного анализа при условии нагружения гидроцилиндра внешней эксцентрично приложенной к штоку силой $F = 82000$ кг (820 кН) и давлении рабочей жидкости 40 МПа.

На рисунках 14-16 соответственно показаны напряженные участки штока и грундбуксы.

Моделирование напряженного состояния соединения грундбукса-шток позволило выявить максимальные контактные напряжения в штоке из стали 40Х, возникающие при неблагоприятной схеме его перегиба. Так, напряжения возникающие от сил трения скольжения (напряжения сдвига) при должном значении конструктивных зазоров, лежат в пределах 70...85 МПа. На рис. 15 показано распределение напряжений сдвига по глубине поверхностного слоя. Это обстоятельство позволяет обосновать выбор высокоскоростного газопламенного напыления в качестве способа восстановления и упрочнения рабочей поверхности штока в условиях ремонтных подразделений горных предприятий. Газотермический метод предлагается взамен гальванического хромирования, реализовать который в условиях ремонтного участка достаточно

проблематично. Этот метод обеспечивает прочность сцепления с основой 80-100 МПа и поэтому может быть использован для штоков гидростоек.

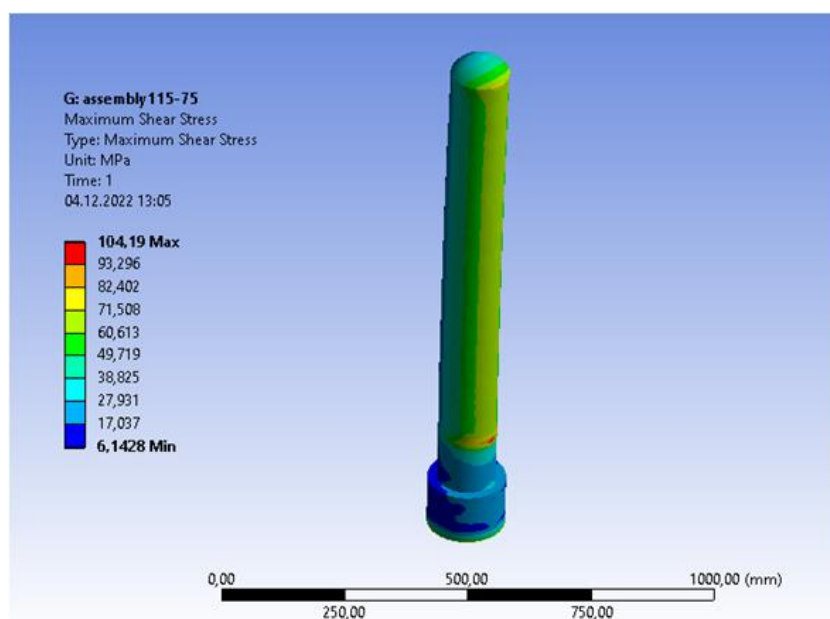


Рисунок 14 – Напряжённые участки на поверхности штока вблизи поршня при изгибе.

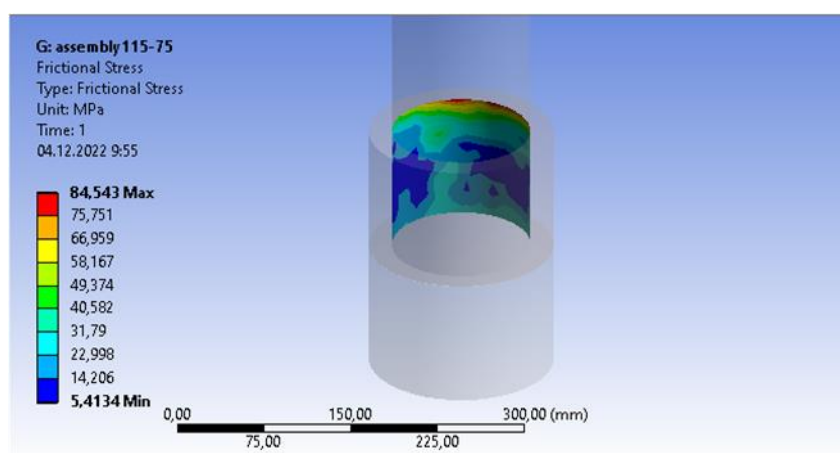


Рисунок 15 - Напряжения в соединении штока с грундбуксой

Для восстановления штоков предлагается два варианта покрытий высокоскоростное напыление покрытия из твердого сплава на основе WC-Co, Cr с последующим шлифованием и высокоскоростное напыление самофлюсующегося материала с последующим оплавлением, шлифованием и сглаживающе-упрочняющей обработкой поверхностным пластическим деформированием алмазным выглаживанием. Высокоскоростной метод обеспечивает должный уровень прочности сцепления покрытий с материалом основы (коэффициент запаса по прочности сцепления $K_{п.с} \geq 1,15$), а также предоставляет возможность напыления широкого спектра износостойких

материалов, обеспечивающих требуемый уровень механических и эксплуатационных характеристик поверхностного слоя штока.

Установлено, что в результате обработки алмазным выглаживанием износостойкость самофлюсующегося покрытия увеличивается за счет создания благоприятного микропрофиля поверхности покрытия, уменьшения шероховатости до 0,1...0,2 мкм (рис. 17) и дополнительного упрочнения материала покрытия до 40 %.

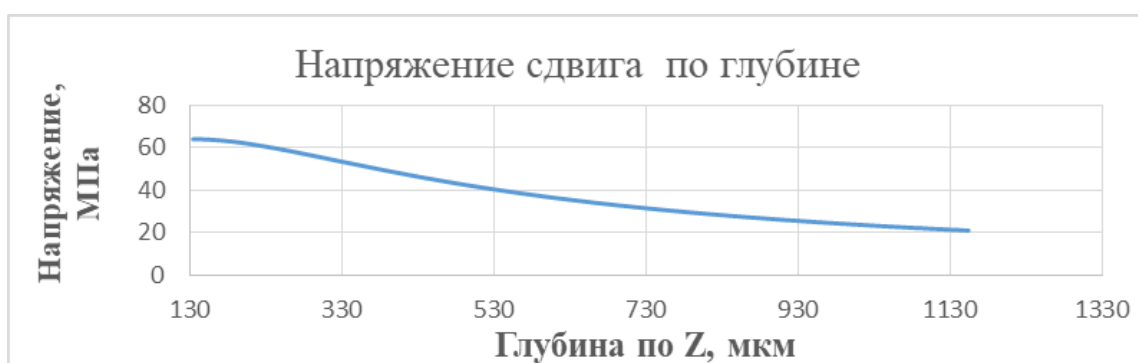
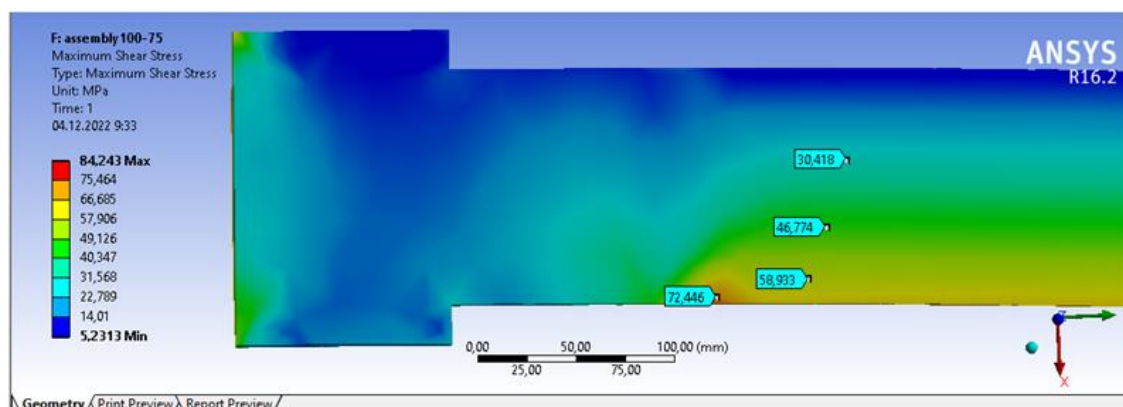


Рисунок 16 – Распределение напряжений сдвига по глубине штока при его максимальном перекосе



Параметры шероховатости поверхности, мкм					
R _a	R _q	R _z	R _t	R _p	R _v
0,159	0,200	0,868	1,200	0,440	0,427

Рисунок 17 – Шероховатость поверхности покрытия после алмазного выглаживания, полученная при обработке с усилием деформирования 165-170 Н; радиус выглаживателя 3,0 мм.

Наряду с вопросами восстановительного ремонта штоков в данной главе рассмотрен метод обеспечения точности сборки силовых гидроцилиндров механизированных крепей при переводе деталей в ремонтный размер. Установлено, что при ремонте гидростоек целесообразно применять метод регулировки с использованием поршня в качестве неподвижного компенсатора. При этом для деталей соединения с назначенными расширенными допусками возможно повышение точности сборки за счет уменьшения в соединении конструктивного зазора.

При этом величина компенсации T_k , определяющая наибольший требуемый размер регулировки, рассчитывается по формуле:

$$T_k = \sum_{i=1}^{i=m-1} T'_i - T_{\Delta} \quad (7)$$

где T_{Δ} - допуск на замыкающем звене,

T'_i - расширенные допуски на звенья.

Затем определяется число групп поршней-компенсаторов N :

$$N = \frac{T_k}{T_{\Delta} - T_{ком}} + 1 \quad (8)$$

где $T_{ком}$ - допуск на звено компенсатор

Величина ступени компенсации P , представляющая собой перепад размеров компенсатора, определяется выражением:

$$P = \frac{\Delta_1^{'B} - \Delta_1^{'H}}{N}, \quad (9)$$

где $\Delta_1^{'B}, \Delta_1^{'H}$ - предельные отклонения ремонтного размера отверстия в цилиндре.

Проверка правильности предложенной методики и проведенного расчета ремонтных размеров поршней-компенсаторов выполняется при помощи выражений:

$$\begin{aligned} \Delta_{\Delta}^B &= \Delta_{\Sigma}^B - \Delta_K^H \\ \Delta_{\Delta}^H &= \Delta_{\Sigma}^H - \Delta_K^B \end{aligned} \quad (10)$$

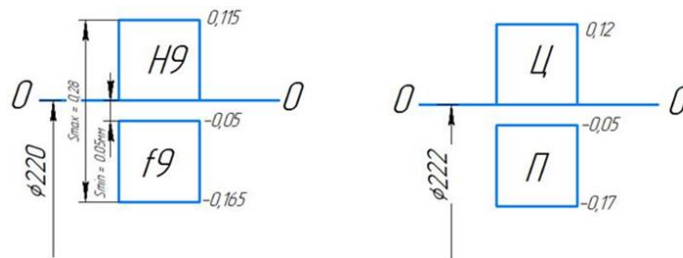


Рисунок 18 - Поля допусков для отверстия в цилиндре и поршня новых деталей (а) и при переводе в ремонтный размер (б). Ц-цилиндр, П-поршень

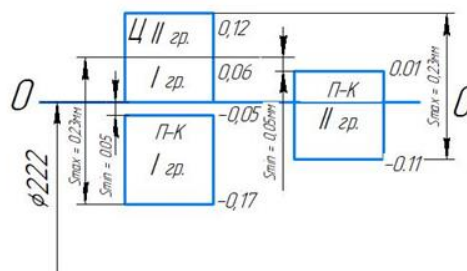


Рисунок 19 - Схема соответствия отклонений отверстия цилиндра Δ_1 и применяемых поршней-компенсаторов. Ц – цилиндр, П-К – поршень-компенсатор

Заключение

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе теоретических и экспериментальных исследований дано решение актуальной научной задачи, заключающейся в повышении эффективности ремонта гидростоек крепей очистных забоев на основе раскрытия связи между характером повреждения элементов гидростоек крепей, горно-техническими условиями их эксплуатации и рациональными технологическими методами восстановления работоспособности несущих элементов, что имеет важное практическое значение для горных предприятий СРВ.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Проанализированы требования, предъявляемые к конструкции гидравлических стоек, горно-технические условия их эксплуатации, а также систематизированы факторы, вызывающие потерю работоспособности, и методы ремонта деталей гидростоек очистных угольных забоев СРВ.

2. Выявлены источники вибраций в очистном забое, генерирующие колебания, негативно влияющие на работоспособность несущих элементов секции механизированной крепи. Установлено, что возникающие при обрушении кровли колебания изменяются в диапазоне от 20 до 80 мкм с частотой 25-100 Гц, воздействуя через сферическую опору на шток, могут вызвать микросмещения на сопрягаемых поверхностях пояска поршня и цилиндра при перекосах штока и стать причиной активации на малых контактируемых участках фреттинг-процессов.

3. Получены математические модели, устанавливающие взаимосвязь между параметрами поверхностного слоя зеркала цилиндра гидростойки, условиями ее эксплуатации, параметрами колебаний, воспринимаемых штоком, и величиной износа поверхности с учетом специфики протекания фреттинг-процессов на контактируемых участках цилиндра и поршня. Оценку сопротивляемости внутренней поверхности цилиндра фреттинг-износу предлагается выполнять с помощью критерия износостойкости W в

зависимости от предела текучести материала цилиндра и декремента колебаний от тангенциальных нагрузок.

4. Установлено влияние свойств материала опорных колец поршня на интенсивность износа контактируемых поверхностей цилиндр-поршень при фреттинг-износе. Так, при использовании уплотняющих колец из гиперупругого эластомера марки PTFE объем утраченного вследствие фреттинг-износа материала уменьшается с $1,14 \text{ мм}^3$ (для латунных поясков) до значений $0,014 \text{ мм}^3$.

5. На основе анализа характерных дефектов и величины износа внутренней поверхности цилиндров гидравлических стоек предложен эффективный метод их восстановительного ремонта, основанный на термопластическом деформировании путем создания осевого градиента температур в процессе непрерывно-последовательного индукционного нагрева поврежденных износом гильз.

6. На основе проведения теоретических исследований определены основные схемы термопластического деформирования полых цилиндров, а также зависимости, с помощью которых представляется возможным рассчитать и назначить основные технологические параметры процесса, определяющие степень деформации восстанавливаемого объекта.

7. С целью исследования процесса термопластического деформирования в программном комплексе QForm созданы цифровые модели технологических операций, с помощью которых были визуализированы полученные результаты и определены рациональные значения технологических параметров. Установлено, что при реализации данного метода абсолютная величина усадки для внутреннего диаметра цилиндра изменяется в пределах $0,6 \dots 0,9 \text{ мм}$, что вполне достаточно для создания компенсационного припуска на отделочную обработку отверстия гильзы при проведении восстановительных работ. При частоте индукционного тока $f = 100\text{--}150 \text{ Гц}$, скорости нагрева $V_n = 50 \text{ }^\circ\text{C/с}$ и длительности нагрева t_n в пределах $80\text{--}100 \text{ с}$, усадка достигает максимального значения. Для компенсации больших износов внутреннего диаметра цилиндра - от $0,9$ до 2 мм , следует применять термопластическое деформирование с дополнительным обжатием в матрице.

8. В результате моделирования и анализа напряженно-деформированного состояния штока при контакте с грундебуксой под действием эксцентрично приложенной внешней нагрузки получены значения контактных напряжений и деформаций, уровень которых позволяет обосновать целесообразность применения высокоскоростного газопламенного напыления для восстановления эксплуатационных характеристик рабочей поверхности штока путем нанесения износостойких твердосплавных покрытий систем $WC-Co, Cr$ и $Ni-Cr-B-Si$. Установлено, что напряжения сдвига в поверхностном слое штока на глубине $0,3\text{--}0,5 \text{ мм}$ составляют $40\text{--}60 \text{ МПа}$, при этом коэффициент запаса $K_{п.с.}$ по прочности сцепления покрытия для высокоскоростного напыления составляет $1,45\text{--}1,55$. Дополнительная отделочная обработка самофлюсующихся покрытий алмазным выглаживанием, позволяет улучшить

эксплуатационные свойства поверхностного слоя за счет получения благоприятного микропрофиля и упрочнения поверхности до 40%.

9. Разработанная и предложенная для условий ремонтного производства технология сборки соединения цилиндр-поршень с использованием поршня в качестве неподвижного компенсатора позволяет повысить точность сборки сопрягаемых деталей, переведенных в ремонтные размеры, за счет уменьшения допуска на зазор ITS на 18-20%, что положительно влияет на ресурс данного соединения.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Нго Ву Нгуэн, Нго Ван Туан, Нгуен Тхэ Винь, Нгуен Суан Хынг. Обоснование метода восстановления работоспособности штоков гидростоек крепей очистных забоев. // ТГиСМ НиП. - 2022. - №16 - с.146-154. DOI: 10.26160/2658-3305-2022-16-146-154.

2. Мнацаканян В. У., Нго Ву Нгуэн, Нгуен Тхэ Винь, Нгуен Суан Хынг. Достижение требуемой точности соединения цилиндр-поршень при ремонте гидростоек механизированных крепей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5 (S4). — С. 3–11. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_4_3.

3. Мнацаканян 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.

4. Ю.Ф. Набатников, Нго Ван Туан, Нго Ву Нгуэн. Обеспечение заданного ресурса силовых гидроцилиндров механизированных крепей селективной сборкой их соединений. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – №12 (S45) – с. 3 – 17. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-45-3-18.

Статьи в других изданиях:

5. Нго Ван Туан, Севагин С.В., Нго Ву Нгуэн. Закономерности изнашивания сопряженных поверхностей цилиндра и поршня гидроцилиндров горных машин. // Сборник научных трудов по материалам XXXI международной научно-практической конференции Научный диалог: Молодой ученый, 22 августа 2020 г. Изд. ЦНК МОАН, 2020. – с.8-10

6. Нгуен Суан Хынг, Нго Ву Нгуэн, Нгуен Тхэ Винь. Ресурсосберегающие технологии восстановления работоспособности горного оборудования. // Сборник трудов XIII Международной научной-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении»/ Юргинский технологический институт. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2022. – с.106 – 109.