

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

На правах рукописи

ГОЛИНИЦКИЙ Павел Вячеславович

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ
СОЧЕТАНИЕМ ТОЧНОСТНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ СОЕДИНЕНИЯ**

Специальность 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант –
доктор технических наук, профессор
Леонов Олег Альбертович

Москва – 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	7
Глава 1. Состояние вопроса и задачи исследования	16
1.1 Надёжность соединений с зазором.....	16
1.2 Подшипники скольжения в соединениях с зазором.....	19
1.2.1 Конструктивные элементы подшипников скольжения в соединениях с зазором	20
1.2.2 Подшипники скольжения в автотракторных двигателях.....	23
1.3 Способы восстановления втулок и валов	26
1.4 Цифровые технологии для ремонтных предприятий	42
1.4.1 Процессный подход на ремонтном предприятии	43
1.4.2 Организация прослеживаемости при ремонте	43
1.4.3 Совершенствование контрольно-измерительных операций	45
Выводы по главе 1	47
Глава 2. Теоретические основы получения соединения распределительный вал – втулка и восстановления втулок.....	49
2.1 Обеспечение жидкостного трения в соединении вал – втулка	49
2.1.1 Влияние конусообразности на величину масляного слоя	50
2.1.2 Влияния отклонений от соосности на величину масляного слоя	52
2.1.3 Влияние бочкообразности, седлообразности и суммарной погрешности на величину масляного слоя	53
2.1.4 Влияние радиального биения.....	55
2.1.5 Обеспечение надёжности жидкостного трения	56
2.2 Способы обеспечения зазора в соединении распределительный вал – втулка	59
2.2.1 Влияние точности на долговечность соединения с зазором	59
2.2.2 Метод полной взаимозаменяемости.....	65

2.2.3	Метод селективной сборки	66
2.2.4	Метод цифрового подбора	69
2.3	Выбора методов восстановления с учетом допусков элементов деталей.	75
2.4	Определение оптимальных конструктивных параметров обжимной матрицы при объемном обжатии.....	77
2.4.1	Оценка влияния конструктивного параметра бронзовой втулки.....	80
2.4.2	Определение зависимости изменения внутреннего размера втулки от изменения наружного размера при ее объемном обжатии	81
2.4.3	Определение зависимости изменения наружного и внутреннего диаметров втулки от технологических параметров объемного обжатия..	82
2.4.4	Определение оптимальной длины цилиндрического пояса деформирующей матрицы.....	83
2.4.5	Определение диаметра деформирующей части матрицы для объемного деформирования втулки с различной величиной изнашивания внутренней поверхности	84
2.5	Теоретические расчёты возможности электроконтактного напекания стальных порошков на бронзовые детали	85
	Выводы по главе 2.....	90
Глава 3. Общая методика исследований влияния обжатия и параметров напекания стального порошка		92
3.1	Выбор конструкции и материала образца для проведения исследования	92
3.2	Выбор оснастки и оборудования для проведения объемного обжатия....	93
3.3	Исследования геометрических и микроструктурных изменений бронзовых втулок после проведения объёмного обжатия	94
3.3.1	Исследования геометрических изменений после обжатия.....	94
3.3.2	Исследования микроструктурных изменений после проведения объёмного обжатия	95

3.4	Определение факторов, влияющих на параметры напекания стального порошка	96
3.5	Выбор порошковых материалов для электроконтактного напекания.....	100
3.6	Выбор оборудования для проведения электроконтактного напекания...	102
3.7	Вспомогательное оборудование при электроконтактном напекании	103
3.8	Выбор основных параметров процесса электроконтактного напекания металлических порошков на бронзовые втулки и их контроль	105
3.9	Исследования физико-механических свойств напеченного металлического покрытия на бронзовую поверхность.	108
3.9.1	Определение твердости	108
3.9.3	Определение прочности сцепления напеченного слоя с поверхностью восстанавливаемой втулки	110
3.9.4	Определение плотности напеченного слоя	112
3.9.5	Определение износостойкости	113
3.10	Микроструктурные исследования после напекания	115
	Выводы по главе 3.....	116
Глава 4.	Исследования влияния технологических параметров на восстановления бронзовых втулок.	117
4.1	Исследование по определению основных технологических параметров объёмного обжатия бронзовых втулок	117
4.1.1	Исследования по определению оптимальных конструктивных параметров обжимной матрицы при объемном обжатии.	117
4.1.2	Исследования по определению зависимости изменения наружного и внутреннего диаметров втулки от технологических параметров объёмного обжатия.....	119
4.1.3	Исследования по определению оптимальной длины цилиндрического пояска деформирующей матрицы	122

4.2 Исследование по определению основных технологических параметров напекания металлических порошков на бронзовую втулку	124
4.2.1 Выбор температуры напекания.....	124
4.2.2 Определение прочности сцепления.....	132
4.2.3 Определение твёрдости	135
4.2.4 Определение плотности напечённого слоя	137
4.2.5 Определение износостойкости напечённого слоя	142
4.3 Технологические рекомендации по восстановлению втулок.....	146
Выводы по главе 4.....	148
Глава 5. Применение цифровых технологий на ремонтном предприятии	150
5.1 Применение процессного подхода	150
5.2 Обеспечение прослеживаемости	167
5.3 Применение цифровых средств измерений.....	169
5.4 Оптимизация процессов	173
5.5 Совершенствования системы принятия решений о необходимости ремонта распределительных валов.....	183
5.6 Анализ стабильности процесса обработки распределительных валов....	191
5.7 Оценка показателей точности для соединения вал – втулка после проведения ремонта	195
Выводы по главе 5.....	209
Глава 6. Техничко-экономическая оценка.....	211
6.1 Экономическая оценка технологии восстановления втулок	211
6.1.1 Экономическое обоснование технологии восстановления бронзовых втулок	211
6.1.2 Расчёт заработной платы производственных рабочих.....	212
6.1.3 Затраты на амортизационные отчисления	213
6.1.4 Расчёт стоимости ремонтных материалов и оснастки	213
6.1.5 Расчёт стоимости энергозатрат на восстановление втулки	213

6.1.6	Определение стоимости изношенной втулки	214
6.1.7	Себестоимость восстановленной втулки	214
6.2	Расчет экономической эффективности от применения цифровых средств измерений.....	215
6.3	Расчет экономической эффективности от увеличения срока службы соединения распределительный вал – втулка	223
	Выводы по главе 6.....	224
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	225
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	231
	ПРИЛОЖЕНИЕ	250

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Машиностроение и ремонтное производство являются ключевыми отраслями, от которых зависят и другие сектора экономики, в том числе и аграрный. В Российской Федерации по итогам на 10 июля 2025 г. наблюдается разнонаправленная динамика по темпам обновления парка сельскохозяйственной техники по сравнению с предыдущим годом, так тракторов зарегистрировано 387,4 тыс. ед. что на 4,1 тыс. ед. больше, зерноуборочных комбайнов 135,5 тыс. ед. (на 2,1 тыс. ед. больше), кормоуборочных комбайнов 12,3 тыс. (на 103 ед. меньше). Доля техники старше 10 лет по тракторам снизилась до 55,13% (в 2023 году - 56,02%), по зерноуборочным комбайнам - до 44,77% (в 2023 году - 45,62%), по кормоуборочным комбайнам - до 43,23% (в 2023 году - 44,73%).

Несмотря на в целом положительную динамику на темп обновления техники по-прежнему сказывается уход иностранных производителей сельскохозяйственного машиностроения и запасных частей. Данные факторы повышают важность как собственного производства техники, так и поддержания её в рабочем состоянии.

Основным элементом сельскохозяйственной техники является двигатель внутреннего сгорания, от которого зависит её производительность. Одним из крупнейших российских производителей дизельных двигателей и комплектующих является Ярославский моторный завод, имеющий в своей продуктовой линейке как рядные, так и V-образные двигатели разной мощности. Отличительной особенностью данных двигателей является их ремонтпригодность, позволяющие обеспечить длительный срок службы при соблюдении требований завода-изготовителя. Развитие техники и применение технологий «Индустрии 4.0» дает возможности ремонтным предприятиям приблизиться к параметрам новых деталей, но не предлагает технологически готовых решений, позволяющих заложить основу к переходу «Индустрии 5.0».

Данная работа посвящена совершенствованию точностных и технологических методов восстановления деталей, образующих соединение, включая использование элементов цифровой среды, с целью рационального повышения долговечности соединений в условиях мелкосерийного ремонтного производства.

Степень разработанности поставленных проблем.

Наибольший вклад в развитие теории точности машин в прошлом веке внесли В.П. Булатов, И.Г. Фридлиндер, А.П. Баталов и др. из Санкт-Петербургского института проблем машиноведения РАН. Существенный вклад в теорию и практику взаимозаменяемости деталей машин в 1970...1980-х годах внесли профессора: А.И. Якушев, И.В. Дунин-Барковский и А.И. Иванов. Несмотря на повышение точности современного металлорежущего оборудования в настоящее время не наблюдается активных научных исследований, отвечающих современным требованиям машиностроительных предприятий.

В настоящее время имеется достаточно большое количество исследований, в которых рассмотрены различные процессы восстановления изношенных поверхностей деталей. В работах ведущих ученых, занимающихся технологиями восстановления машин - Ачкасова К.А., Батищева А.Н., Воловика Е.Л., Ерохина М.Н., Згирского И.И., Литовченко Н.Н., Луневского И.Н., Лялякина В.П., Орлова Б.Н., Поляченко А.В., Потапова Т.К., Пучина Е.А., Семенова Е.И., Степанова В.А., Стрельникова В.В., Таратуты А.И., Тельнова Н.Ф., Черновола М.И., Черноиванова В.И., Шнырева А.П. и др. – в их исследованиях представлены основные теоретические и практические разработки, применение которых в ремонтном производстве сокращает затраты на производимый ремонт, а также снижает объёмы использования новых запасных частей в результате повышения износостойкости деталей.

Вопрос повышения долговечности объединением точностных и технологических методов в условиях современного производства изучен недостаточно, отсутствует единый подход к формированию цифровой среды на машиностроительных предприятиях ремонтного профиля, а также оценка её влияния на показатели точности соединений.

Цель и задачи исследования. Цель исследования состоит в разработке способов и методов обеспечения норм точности при ремонте во взаимодействии со способами восстановления, позволяющих увеличить ресурс соединения с зазором.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

выявить влияние отклонений формы и расположения сопрягаемых деталей на минимальную толщину масляного слоя, обеспечивающего несущую способность, для определения наименьшего зазора в посадке с учетом коэффициента запаса надежности;

разработать теоретическую модель выбора рациональных способов восстановления отверстия и вала, образующих соединение, при заданном ресурсе и вероятности безотказной работы с учетом параметров точности и стоимости, обеспечивающих необходимую параметрическую надёжность, на основании чего определить наиболее целесообразные способы восстановления деталей соединения с зазором;

теоретически обосновать возможность применения рационального способа восстановления бронзовых втулок путем обжатия по критерию сохранения геометрической устойчивости втулок, получить математические выражения зависимости геометрических параметров деформирующей матрицы от величины изнашивания внутренней поверхности и требуемого диаметра втулки;

провести практические эксперименты и апробировать технологию восстановления внутренней поверхности бронзовой втулки методом обжатия с последующим электроконтактным напеканием наружной поверхности втулки металлическими порошками, выбрать и рекомендовать производству виды финишной обработки получаемых поверхностей втулки;

выбрать статистические методы оценки качества и провести анализ точности обработки поверхностей валов под втулки;

разработать методику применения комплекса цифровых технологий с целью реализации цифрового подбора валов и отверстий для формирования соединений с требуемым зазором;

оценить влияние цифровых технологий на временные потери, ошибки, связанные с человеческим фактором, трудоёмкость ключевых производственных процессов;

провести сравнительную оценку аналоговых и цифровых средств измерений исходя из числа неправильно принятых и неправильно забракованных деталей; рассчитать экономическую эффективность предлагаемых решений.

Объект исследования. Параметры подвижных соединений с зазором в сборочных единицах и их влияние на долговечность.

Предмет исследования. Точностные методы и технологические способы восстановления деталей, образующих соединение «вал – втулка», позволяющие увеличить ресурс.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались моделирование, наблюдение, методы функциональной классификации, сравнительного и структурного анализа, элементы теорий: точности, жидкостного трения, пластического деформирования и спекания металлических порошков. Создание цифровой процессной модели ремонтного предприятия производилось с использованием нотаций: IDEF0, BPMN и EPC. Обработка экспериментальных данных производилась согласно методам теории вероятностей и математической статистики с применением стандартных и специально разработанных алгоритмов.

Достоверность результатов исследования.

В теоретических исследованиях достоверность результатов обеспечена изучением и анализом ранее выполненных работ в области взаимозаменяемости и нормирования точности, применения цифровых инструментов и восстановления деталей.

В экспериментальных исследованиях достоверность результатов расчетов гарантирована применением стандартных методик сбора и обработки данных и использованием современного программного обеспечения.

Научная новизна работы.

Получена математическая зависимость, позволяющая определить величину минимального зазора в подшипнике скольжения по критерию обеспечения наименьшей толщины масляного слоя с учетом микро- и макро- геометрии деталей, образующих соединение.

Разработана теоретическая модель, позволяющая осуществить рациональный выбор способов восстановления двух сопрягаемых деталей, входящих в соединение с зазором, с учетом параметров надежности, точности и стоимости обработки.

Разработан метод цифрового подбора диаметров валов и втулок, позволяющий достичь гарантированного наименьшего зазора и наибольшего запаса на износ в соединении.

Получены математические выражения по расчету геометрических параметров деформирующей матрицы в зависимости от величины изнашивания внутренней поверхности втулки без потери её геометрической устойчивости.

Разработан комплексный подход к применению цифровых инструментов на ремонтном предприятии, объединённых в единую информационную среду (ЕИС).

Определены задачи и требования к применяемым цифровым инструментам в рамках ЕИС.

Практическая значимость работы.

Разработаны и внедрены технологические решения, позволяющие осуществлять объёмное обжатие втулок с целью формирования внутреннего отверстия под вал ремонтного размера с последующим восстановлением наружной поверхности под номинальный размер методом электроконтактного напекания стальных порошков на бронзовое основание, а также реализована технология обработки внутренних поверхностей втулок заданного размера в пределах $\pm 0,002$ мм.

Разработана и внедрена цифровая маркировка деталей для применения в условиях мелкосерийного ремонтного производства, позволяющая автоматизировать подбор пар трения по критерию обеспечения наибольшего запаса на износ.

Разработаны и внедрены рекомендации по проведению имитационного моделирования процессов ремонтного производства.

Разработаны и апробированы рекомендации по замене аналоговых средств измерений на цифровые.

Разработана и внедрена система принятия решений о необходимости проведения ремонта, ориентированная на достижение наибольшего остаточного ресурса соединения.

Разработаны рекомендации по применению метода цифрового подбора.

Реализация результатов исследования.

Результаты исследований используются в учебном процессе, в частности, в разработанном автором учебнике «Проектирование процессов предприятий АПК», изложены новые подходы к организации ЕИС на ремонтном предприятии. Основные положения работы используются при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплинам «Метрология», «Методы и средства измерений», «Информационные технологии в управлении качеством и защита информации», «Цифровые технологии проектирования бизнес процессов в АПК», «Цифровая поддержка процессов испытаний и контроля качества техники» направлений 35.03.06 «Агроинженерия», 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», 35.04.06 «Агроинженерия».

Результаты исследований приняты к внедрению на: ФГУП «НАМИ», ООО «Завод Агроташ», ООО «Авангард сервис», ООО «Оптимум авто».

Результаты исследования рекомендованы Министерством сельского хозяйства Российской Федерации организациям, осуществляющим ремонт сельскохозяйственной техники и оборудования для расширения номенклатуры восстанавливаемых деталей.

Положения, выносимые на защиту:

комплексный подход к достижению наибольшей долговечности соединения с зазором, реализуемый путем сочетания точностных и технологических параметров, формируемых при восстановлении посадки двух сопрягаемых деталей;

теория расчета наименьшего зазора в подвижном соединении с учетом отклонений формы и расположения присоединяемых поверхностей;

методика цифрового подбора пар трения для обеспечения наибольшего запаса на износ в условиях ремонтного производства;

модель выбора рационального способа восстановления двух деталей, входящих в соединение, с учетом параметров надежности, точности и стоимости её обеспечения;

технологии и инструменты восстановления бронзовых втулок комбинированным методом, позволяющим сохранить характеристики внутренней и наружной поверхности втулки;

методика применения цифровой модели процессов в условиях мелкосерийного ремонтного производства;

система прослеживаемости деталей вовремя движения по производственному процессу;

система принятия решений при дефектации и контроле валов;

методика оценки влияния замены аналоговых средств измерений на цифровые.

Степень достоверности и апробации результатов.

Основные положения и результаты диссертационного исследования обсуждены и одобрены на научных конференциях Всероссийского и международного уровня. Среди них:

Семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (г. Москва, 2026 г.); Семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (г. Москва, 2025 г.); Семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (г. Москва, 2024 г.); Международная межвузовская научно-техническая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и молодых

ученых «Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов» (г. Москва, 2023 г.); Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (г. Москва, 2023 г.); Семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (г. Москва, 2023 г.); IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2023 г.); Семинар «Чтения академика В. Н. Болтинского» (г. Москва, 2022 г.); III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2022 г.); Международная научно-практическая конференция «Наука: опыт, проблемы, перспективы развития» (Красноярск, 2021 г.); VIII международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2021 г.); Международная научная конференция профессорско-преподавательского состава, посвящённая 155-летию РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева (Москва, 2020 г.); Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 160-летию В.А. Михельсона (Москва, 2020 г.); International scientific conference «Metrological support of innovative technologies - ICMSIT-2020» (Krasnoyarsk, 2020 г.); II Всероссийская научно-техническая конференция «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2020 г.); Международная научная конференция, посвящённая 125-летию со дня рождения В.С. Немчинова (Москва, 2019 г.); Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 150-летию А.В. Леонтовича (Москва, 2019 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2019 г.); Национальная научно-практическая конференция «Тенденции инженерно-технологического развития агропромышленного комплекса» (Рязань, 2019 г.); Международная научно-технической конференция, посвящённая 150 -летию факультета

«Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н. Э. Баумана. (Москва 2019 г.)

Публикации.

Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в 46 научных трудах общим объемом 43,51 п.л., в том числе, в трех учебно-методических пособиях, в 35 статьях (12 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций), имеется 8 авторских свидетельств, патентов.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 176 наименований, в том числе 8 на иностранном языке, и приложения на 15 страницах. Объем диссертации – 264 страниц машинописного текста. Диссертационная работа проиллюстрирована 132 рисунками и поясняется 48 таблицами.

Глава 1. Состояние вопроса и задачи исследования

1.1 Надёжность соединений с зазором

Одним из главных показателей техники является её надёжность, говорящая о периоде времени, в течение которого она будет способна выполнять возложенные на неё функции. На надёжность как техники в целом, так и её сборочных единиц оказывают влияние различные факторы, которые по характеру их возникновения можно разделить на: конструктивные, технологические и эксплуатационные [79, 131, 132]

К конструктивным факторам можно отнести: материалы и их свойства, применённую конструкцию, компоновку сборочных узлов и механизмов, и т.д.

Технологические – дефекты при производстве, применение при изготовлении технологии не позволяющей достичь поставленной конструктором цели, изношенное и/или оборудование и оснастка, недостаточная квалификация персонала и т.д.

Эксплуатационные – качество проведённой обкатки, соответствие материально-технической базы, соблюдение периодичности и полноты предписанных работ, соблюдение рекомендаций заводов-изготовителей по использованию горюче-смазочных и расходных материалов и т.д.

Основными свойствами надёжности является: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость. Ключевым из которых является безотказность и долговечность, в большей степени зависящие от скорости процесса изнашивания. Согласно ГОСТ 27674 и анализу литературных источников [66, 74, 77, 92, 109, 115, 125] виды изнашивания можно разделить на 3 группы: механическое; коррозионно-механическое; изнашивание при действии электрического тока.

При сельскохозяйственных и мелиоративных работах основную долю занимают земляные работы, при выполнении которых осуществляется интенсивное воздействие на детали машины частичек грунта и запылённого воздуха [59, 84, 135]. В связи с этим самым распространённым видом изнашивания основной массы

деталей применяемых машин является абразивное изнашивание и его разновидности. На скорость абразивного изнашивания в значительной степени влияет процентное содержание различных абразивных частиц в зоне трущихся поверхностей как поступивших из окружающей среды (кварц, кремний, авгит и др.), так и образовавшихся вследствие выкрашивания материала сопрягаемых пар и физико-механические свойства [125, 139, 140]. На изнашивание валов и их опор также оказывает влияние режим работы: знакопеременные нагрузки, высокие температуры и вибрация, приводящие к усталостному изнашиванию, а при простоях техники возникает заедание.

Для повышения долговечности, можно использовать методы неполной взаимозаменяемости, такие как селективная сборка и индивидуальный подбор, компенсируя их более высокую трудоёмкость применением цифровых технологий, а для сохранения исходной наработки на отказ после ремонта необходимо отдавать предпочтение технологиям восстановления, позволяющим не изменять материал деталей в сопряжении.

Применение подобного подхода предъявляет повышенные требования к стабильности процессов предприятия и их результата, для соблюдения которых требуется внедрение процессного подхода, системы прослеживаемости и совершенствование контрольно-измерительных операций.

Применение цифровых технологий, объединённых в единую информационную среду (ЕИС), обеспечивающих мониторинг и связность производственных процессов снижает трудоёмкость при использовании подобной системы, а также открывает новые возможности по совершенствованию точностных методов, что особенно важно в посадках с зазором.

Применение ЕИС позволяет реализовать комплексный подход к достижению требуемой точности и долговечности соединения с зазором (рис. 1.1).

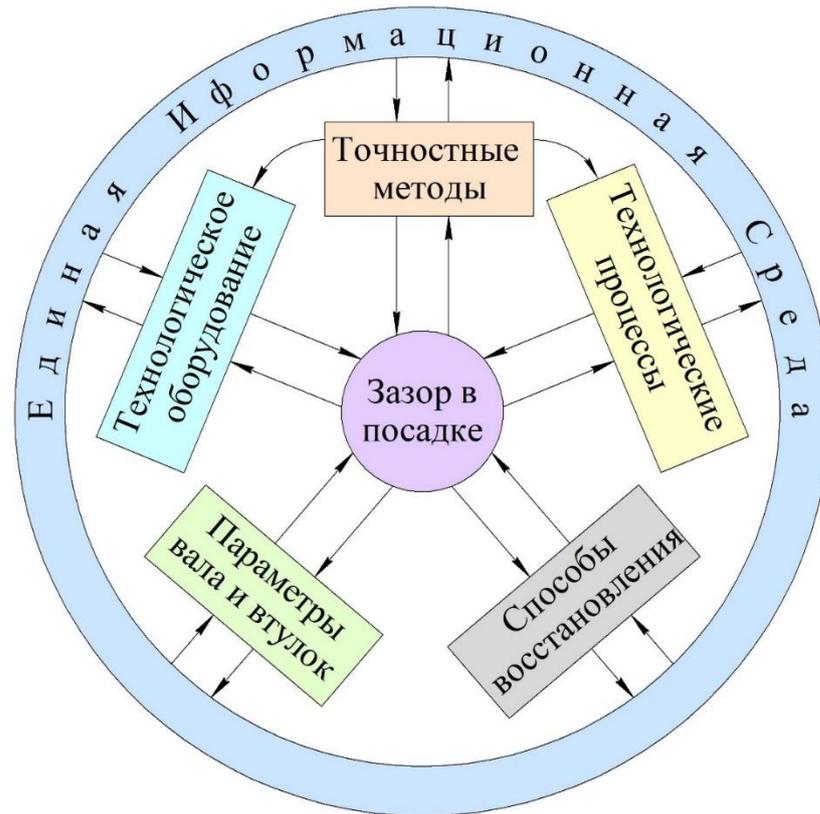


Рисунок 1.1 – Комплексный подход к достижению наибольшей долговечности соединения с зазором

Исходя из рисунка в общем виде зазор в посадке, а следовательно, и запас на износ будет описываться функцией:

$$S = f(x_m, x_t, x_s, x_p, x_o), \quad (1.1)$$

где: x_m – возможности точностного метода; x_t – точность и стабильность технологического процесса; x_s – точность способа восстановления; x_p – изменение параметров вала и втулок в процессе восстановления; x_o – точность технологического оборудования.

При этом поскольку основной задачей является повышение долговечности соединения возможности точностного метода будут диктовать требования к оборудованию и технологическим процессам.

В связи с этим требуется изучение влияния точностных методов на получение зазора, параметров деталей соединения, способов их восстановления и оценка необходимых цифровых технологий для организации ЕИС.

1.2 Подшипники скольжения в соединениях с зазором

Посадки с зазором часто используются в качестве узла подшипников скольжения, которые получили широкое распространение в машинах и механизмах благодаря возможности работать в сложных условиях, в частности, при высокой ударной и вибрационной нагрузке. Основным элементом узла подшипников скольжения, применяемым в машиностроении, являются втулки и вкладыши. Различают следующие способы установки втулок: в первом случае они с натягом устанавливаются на вал, образуя соединение с зазором «корпус – втулка» (рис. 1.2, а), во втором случае втулка устанавливается с натягом в корпус, получая соединение с зазором «втулка – вал» (рис. 1.2, б), в последнее время для улучшения характеристик в паре трения применяется установка антифрикционных втулок на вал и в корпус, образуя зазор в соединении «втулка – втулка» (рис. 1.2, в). Вкладыши в соединениях с зазором устанавливают с натягом в корпус.

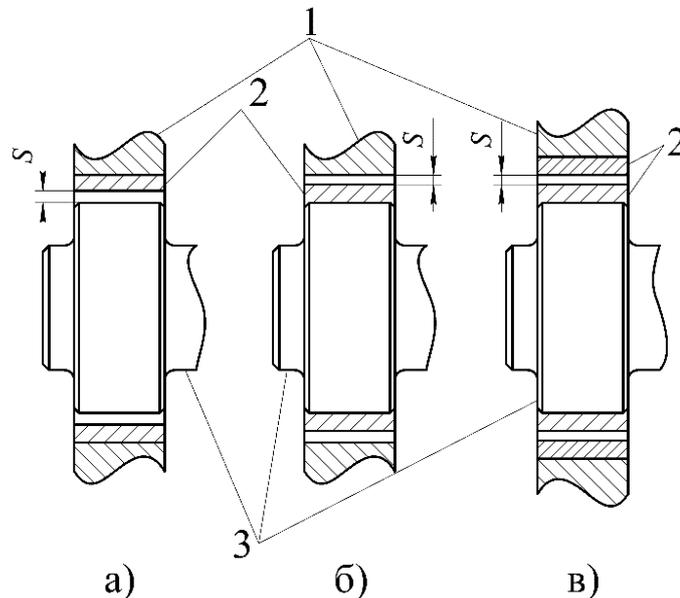


Рисунок 1.2 – Соединение с зазором: а) зазор между корпусом и втулкой; б) зазор между втулкой и валом. 1 – корпус; 2 – втулка; 3 – вал; S – зазор.

Данные пары трения работают при знакопеременных нагрузках основным условием работы, для которой является образование масляного клина, предотвращающего сухое трение. При работе на низких оборотах, а также при резкой смене

частоты вращения возникают граничное и полужидкостное трение вызывающие износ.

Основными условиями образования устойчивого масляного клина является не превышающие допустимые значения для пары трения отклонение от соосности и формы. Также на ускорение процессов износа оказывают влияние и эксплуатационные факторы такие как качество масла, запылённость, температурный режим и т.д. Данные факторы приводят к увеличению зазора в посадке выше нормативного и как следствие к потере работоспособности.

В общем виде соединение с подшипником скольжения образует систему «корпус – втулка – вал» или «корпус – втулка – втулка – вал», от параметров каждого элемента которой будет зависеть её работоспособность. Применение толстостенных втулок позволяет упростить систему до «корпус – втулка», «втулка – вал» или «втулка – втулка» в зависимости от конструкции, тем самым снизив требования к отдельным элементам.

1.2.1 Конструктивные элементы подшипников скольжения в соединениях с зазором

К корпусам в подобных соединениях предъявляются повышенные требования устойчивости геометрических форм, для чего пространственные отливки из серого легированного чугуна или алюминиевого сплава подвергаются искусственному старению, а также могут иметь ребра жесткости. Для подачи масла в зазор в корпусных деталях располагают масляные каналы. Во время эксплуатации под воздействием нагрузок и абразива в корпусных деталях возникают различные дефекты, основными из которых являются трещины, обломы, деформация плоскостей и отверстий, износы и ослабление посадок. Дефектные корпусные детали утилизируются или могут быть восстановлены, если сохраняется необходимая жёсткость конструкции.

Вкладыши и втулки подшипников скольжения изготавливают из антифрикционных материалов: медных, алюминиевых и цинковых сплавов, металлокерамических, полимерных и др. При изготовлении многослойных вкладышей (втулок)

антифрикционный материал используется только на рабочей поверхности и зачастую не превышает 2 мм. Тонкостенные вкладыши (втулки) предъявляются повышенные требования к качеству обработки посадочных мест.

Конструктивно вкладыши изготавливают с буртом или без него. Для обеспечения надёжности соединения с корпусом установку вкладышей производят с натягом. При назначении посадки также нужно учитывать температурные расширения корпуса, а также его податливость. Ослабление натяга может привести к проворачиванию вкладыша и нарушению работоспособности соединения.

Втулки подшипников скольжения, как и вкладыши, изготавливают с буртом или без него. Втулки получают из ленты путем её сгибания и замковой фиксации или литьём с последующей механической обработкой. Втулки, полученные сгибанием ленты, имеют толщину стенки до 4 мм, при использовании литья максимальная толщина стенки не ограничена, но наиболее распространёнными являются 4...8 мм.

Цельные подшипниковые втулки наиболее часто изготавливают из бронз. Марки, механические характеристики, а также применяемость некоторых из них приведены в таблице 1.1 [142].

Таблица 1.1 – Марки бронз и их механические характеристики [48]

Марка	Способ литья	Временное сопротивление б, МПа (кгс/см ²) не менее	Относительное удлинение после разрыва (%), не менее	Твёрдость по Бринеллю НВ, МПа (кгс/мм ²)	Применяемость
БрО5Ц5С5	К	176.2(18)	4	588(60)	Арматура, антифрикционные детали, вкладыши подшипников
	П	147(15)	6	588(60)	
БрО5С25	К	137.2(14)	6	588(60)	Биметаллические подшипники скольжения
	П	147(15)	5	441(45)	

Продолжение таблицы 1.1

БрО6Ц6С3	К	176.2(18)	4	588(60)	Арматура, антифрикционные детали, вкладыши подшипников
	П	147(15)	6	688(60)	
БрО10Ц2	К	225,5 (23)	10	735 (75)	Арматура, антифрикционные детали, вкладыши подшипников, детали трения и облицовки гребных валов
	П	215,5 (22)	10	637 (65)	
БрО10С10	К	196(20)	6	735(78)	Подшипники скольжения, работающие в условиях высоких удельных давлений
	П	176.2(18)	7	637(65)	

Примечание: Условное обозначение литья: К - литье в кокиль, П - литье в песчаные формы.

Вкладыши и втулки подшипников скольжения могут иметь отверстия и канавки для обеспечения поступления в зазор смазочного материала.

Согласно техническим требованиям, изношенные втулки выбраковываются при возникновении следующих дефектов: предельные линейные износы по внутренней и наружной поверхности; деформация; снижение прочности посадки (натяг втулки в сопряжении с корпусом или валом).

После обнаружения дефектов вкладыши заменяются новыми. Литые втулки, работающих в слабо нагруженных механизмах помимо замены на новые, также могут быть восстановлены.

Валы изготавливают из сталей, чугунов, алюминиевых и других сплавов, в последнее время также применяют керамику и композитные материалы. Для улучшения эксплуатационных свойств валы могут подвергаться поверхностному упрочнению. Для повышения долговечности подшипников скольжения в опорных шейках валов могут быть выполнены масляные каналы.

Вовремя эксплуатации возможно возникновение следующих дефектов: износ опорных шеек, трещины, обломы и т.д. В случае наличия износа валы могут подвергнуты восстановлению.

Одним из типовых примеров применения подшипников скольжения можно считать их установку в двигатели внутреннего сгорания.

1.2.2 Подшипники скольжения в автотракторных двигателях

Подшипники скольжения в автотракторных двигателях применяются в качестве опор коленчатого и распределительного вала. В сочетании с коленчатым валом используются вкладыши, позволяющие обеспечить разъемность соединения. В качестве опор распределительного вала наряду с вкладышами применяют втулки. Особенности восстановления работоспособности соединения «коленчатый вал – вкладыши» хорошо изучены и широко применяются на практике, при этом соединению «распределительный вал – втулка» не уделено достаточного внимания. Так, при утилизации распределительного вала при достижении первого ремонтного размера теряется до 80% его ресурса, помимо этого, проведение восстановления его работоспособности поможет увеличить загрузку ремонтных предприятий.

В большинстве отечественных V – образных дизельных автотракторных двигателях применяют установку распределительного вала между блоками цилиндров. Данная особенность приводит к образованию системы «блок цилиндров – втулка – распределительный вал» от параметров каждого элемента которой будет зависеть ресурс и правильная работа всего газораспределительного механизма. Крупнейшим производителем V – образных ДВС в России является Ярославский моторный завод (ЯМЗ) родоначальником данной серии является ЯМЗ – 236.

Блок цилиндров двигателя ЯМЗ-236 (рис. 1.3) изготавливается из серого легированного чугуна, картерное пространство которого разделено поперечными перегородками на отсеки по одному цилиндру каждого ряда. Перегородки имеют силовые ребра, повышающие жесткость конструкции в нижней части они имеют толстенные арки, являющиеся коренными опорами коленчатого вала в верхней части выполнены отверстия под установку бронзовых втулок распределительного вала [161].

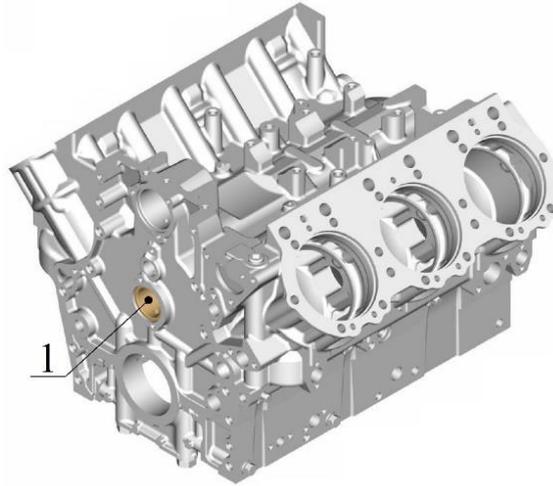


Рисунок 1.3 – Блок цилиндров двигателя ЯМЗ-236 [12]: 1 – бронзовая втулка распределительного вала

В данном двигателе используются толстостенные бронзовые втулки, позволяющие скорректировать возможные отклонения блока цилиндров и добиться нормативных показателей с учетом последующей обработки, а также перейти к упрощённой системе «втулка – распределительный вал».

Помимо этого, к втулкам применяются требования по точности установки и геометрии внутренней поверхности. Так для двигателя ЯМЗ - 236 отклонение втулок (рис. 1.4) от соосности после окончательной механической обработки не должно превышать 0,05 мм, а конусность и овальность не более 0,03 мм.

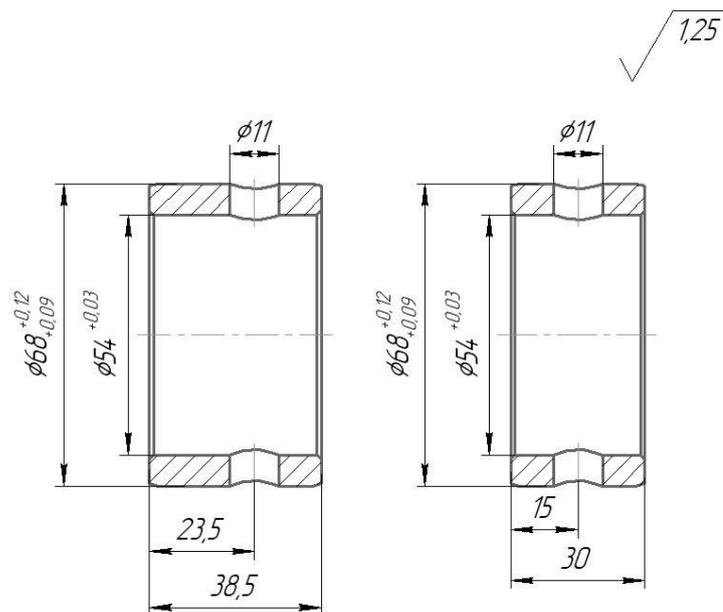


Рисунок 1.4 – Бронзовые втулки распределительного вала ЯМЗ 236

Поскольку твердость бронзовых втулок ниже, чем твердость опорных шеек распределительного вала то наибольшему износу подвергаются именно они.

В двигателе ЯМЗ - 336 предварительно охлаждённые в жидком азоте втулки устанавливаются с натягом непосредственно в блок цилиндров.

Распределительный вал двигателей ЯМЗ – 236 приводится во вращение от коленчатого вала при помощи зубчатой передачи и расположен в середине развала цилиндров. Данный вал изготовлен из отобранной стали 45 прошедшей нормализацию, для повышения ресурса кулачки и опорные шейки закаляют токами высокой частоты с последующим отпуском (рис. 1.5). Конструктивной особенностью вала является наличие двух сквозных масляных каналов на первой опорной шейке, расположенных под прямым углом относительно друг друга из-за чего данная шейка имеет увеличенную ширину расстояние между группами кулачков составляет 35,5 мм.

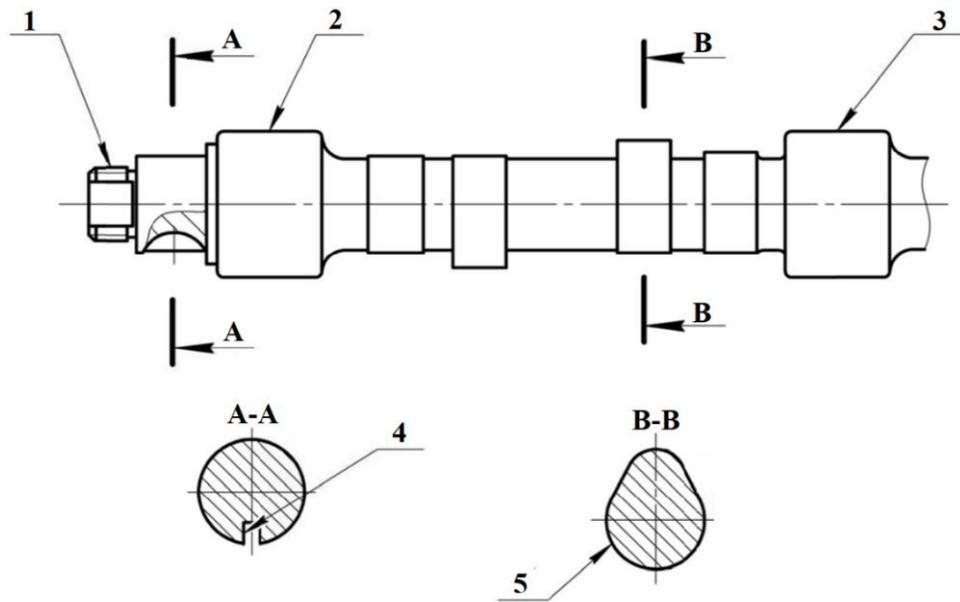


Рисунок 1.5 – Распределительный вал двигателя ЯМЗ – 236: 1– резьба М27; 2, 3 – опорные шейки; 4 – шпоночный паз; 5 – кулачок

Валы и втулки данного двигателя при наличии износа могут быть восстановлены.

1.3 Способы восстановления втулок и валов

При выходе из строя сборочной единицы из-за изнашивания бронзовой втулки, как правило, для восстановления её работоспособности в настоящее время производят замену втулки и вала на новые или обработку под ремонтный размер вала с заменой втулки на ремонтную (метод ремонтных размеров).

Метод ремонтных размеров, который основан на компенсировании размеров [115]. При применении данного метода изношенный вал механически обрабатывают для получения ближайшего ремонтного размера, предусмотренного заводом изготовителем, уменьшение диаметра вала для сохранения зазора компенсируют ремонтной втулкой, имеющей соответствующий внутренний диаметр.

Данный метод получил широкое распространение поскольку обладает высокой производительностью и сохраняет условия работы соединения близкими к первоначальному. К недостаткам можно отнести снижение взаимозаменяемости деталей и ресурса соединения, а также необходимость проведения маркировки.

Однако не всегда представляется возможным получить новые запасные части в необходимые сроки и по оптимальной стоимости. В связи с этим наряду с заменой на новые детали распространены различные способы восстановления изношенных поверхностей валов и бронзовых втулок [19, 20, 148].

Для восстановления наружных поверхностей тел вращения и внутренней поверхности бронзовых втулок применяют **электролитическое натирание** [8, 24, 79]. Данный способ позволяет восстанавливать детали с износом до 0,2 мм.

Восстановление изношенных бронзовых втулок данным способом происходит следующим образом (рис. 1.6): изношенную деталь предварительно подготавливают (обезжиривают, проводят травление, промывают), затем её помещают в держатель и приводят в контакт с анодом, в качестве которого используется графитовый стержень, покрытый абсорбирующим материалом. На абсорбирующий материал непрерывно подаётся электролит, в котором находятся ионы наносимого металла. После подключения постоянного тока ионы, находящиеся в электролите, перемещаются к катоду (восстанавливаемая деталь) и осаждаются на нём.

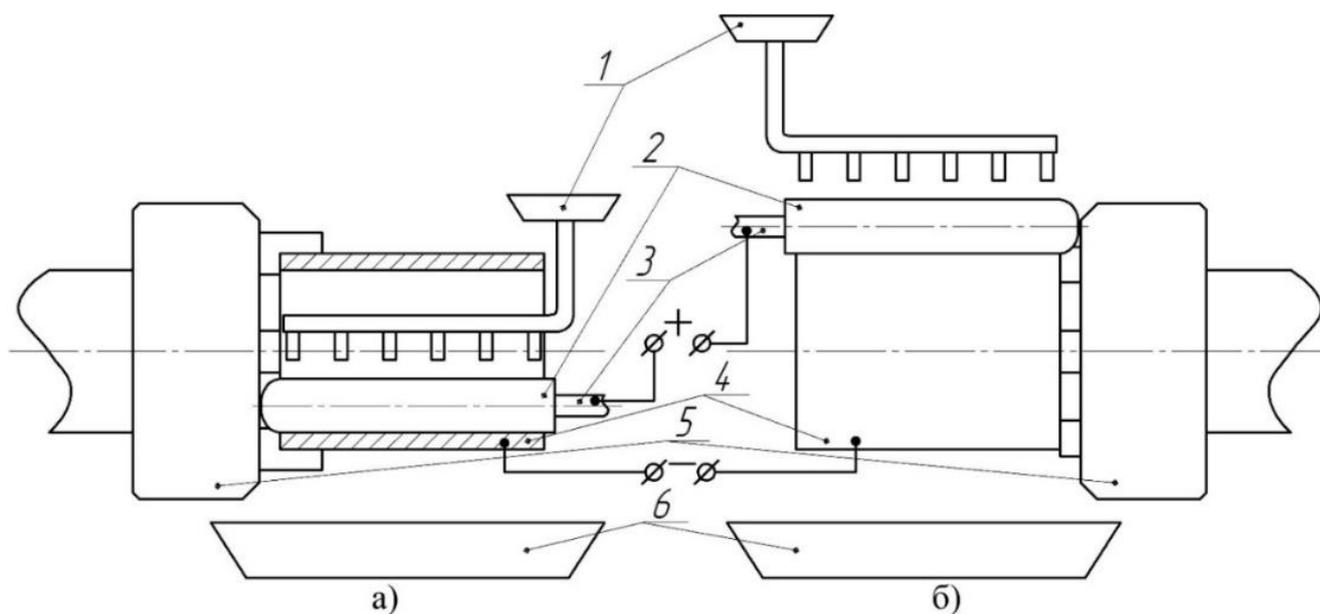


Рисунок 1.6 – Принципиальная схема электролитического натирания: а) Восстановление внутреннего диаметра, б) Восстановление наружного диаметра. 1 - резервуар с электролитом; 2 - абсорбирующий материал; 3 - графитовый стержень; 4 - изношенная деталь; 5 - держатель; 6 - резервуар с отработанным электролитом.

Данный способ также можно применять и для восстановления опорных шеек валов.

Данный способ обладает рядом преимуществ, к которым можно отнести:

- высокое качество нанесённого покрытия;
- отсутствие термического воздействия на деталь.

Несмотря на свои достоинства данный метод имеет следующие недостатки:

- из-за износа абсорбирующего материала происходит снижение качества нанесённого покрытия;
- восстановлению подлежат только втулки с малыми величинами изнашивания;
- сложности при приготовлении и корректировке электролитов;
- необходимость обезвреживания электролитов после их использования.

В последние годы были проведены исследования по восстановлению бронзовых втулок порошками из цветных сплавов с использованием графитовых компенсаторов во время проведения **электроконтактного напекания** (рис. 1.7) [10,

11, 33, 54, 89, 95, 103, 104, 133, 137]. Данный способ позволяет восстанавливать износ втулки, который находится в диапазоне 0,3 – 0,8 мм.

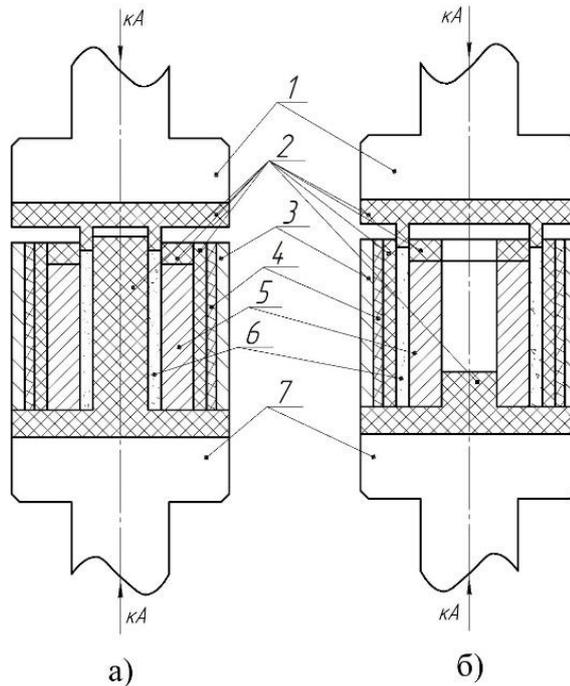


Рисунок 1.7 – Восстановление поверхности бронзовых втулок порошками из цветных сплавов с использованием графитовых компенсаторов:

а) восстановление внутреннего диаметра, б) восстановление наружного диаметра
 1 – верхний электрод; 2 – графитовые элементы; 3 – стальной кожух; 4 – асбестовая прокладка; 5 – восстанавливаемая втулка; 6 – напекаемый порошок; 7 – нижний электрод.

Напекание осуществляется следующим образом: втулка устанавливается на центрирующую графитовую вставку. Для более равномерного распределения температуры и плавного нагрева детали снаружи на неё надевают графитовое кольцо, которое дополнительно экранируют асбестом. В промежуток между графитом и втулкой засыпается напекаемый порошок, на который сверху устанавливают уплотнитель, выполненный из графита. После чего восстанавливаемую втулку в графитовом корпусе зажимают в электродах машины точечной сварки и пропускают электрический ток, под воздействием которого происходит спекание порошка.

К преимуществам данного способа относятся: возможность восстанавливать как наружные, так и внутренние поверхности, а также невысокая стоимость восстановления изношенных втулок.

К недостаткам данного способа можно отнести возможность восстановления изношенных деталей только одинаковыми по составу металлическими порошками.

В последнее время всё большее распространение получает **метод восстановления при помощи полимеров** [8, 24, 64]. При использовании данного метода предварительно подготовленную изношенную втулку или вал помещают в оправку с определённым зазором, который заполняют металлополимерным материалом (рис. 1.8). После высыхания полимера оправка снимается и втулку (вал) подвергают механической обработке.

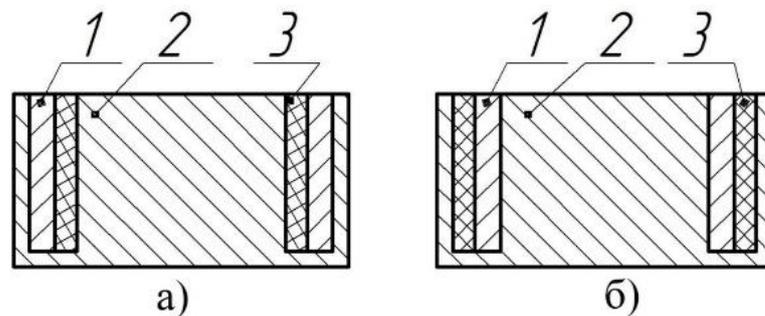


Рисунок 1.8 – Принципиальная схема восстановления втулок при помощи полимеров: а) восстановление внутреннего диаметра, б) восстановление наружного диаметра. 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – оправка; 3 – металлополимер.

При простоте используемой оснастки данный метод имеет высокую себестоимость, связанную с высокой ценой металлополимерного материала и кратким периодом его использования.

Для восстановления внутренней поверхности бронзовой втулки с износами до 0,25 мм в последние десятилетия были произведены работы по изучению восстановления втулок при помощи **диффузионной металлизации** [15, 17, 26, 28, 50, 53, 55, 58, 62, 68, 71, 80, 94, 96, 97, 98, 124, 134, 138, 145, 147, 162, 163]. Данный химико-термический метод заключается в процессе насыщения изношенной по-

верхности детали различными металлами. Поверхность детали могут насыщать одновременно или последовательно несколькими металлами. Наиболее часто для диффузионной металлизации применяют алюминий, хром, кремний и бор. В зависимости от среды (фазы), содержащей диффундирующий элемент, различают твёрдофазный, жидкофазный, газофазный и парофазный методы. Для восстановления бронзовых втулок наибольшее распространение получил газофазный метод.

При газофазном методе насыщение восстанавливаемой поверхности детали осуществляется элементом, входящим в состав газа. Различают два способа восстановления газофазным методом: контактный и неконтактный. При контактном методе диффундирующий элемент содержится в порошке, который засыпается в герметичный контейнер с деталью. Во время нагрева порошок создаёт газовую среду. При неконтактном способе готовая газовая среда подаётся к детали.

Наиболее эффективным способом газофазной металлизации является контактный метод (рис. 1.9).

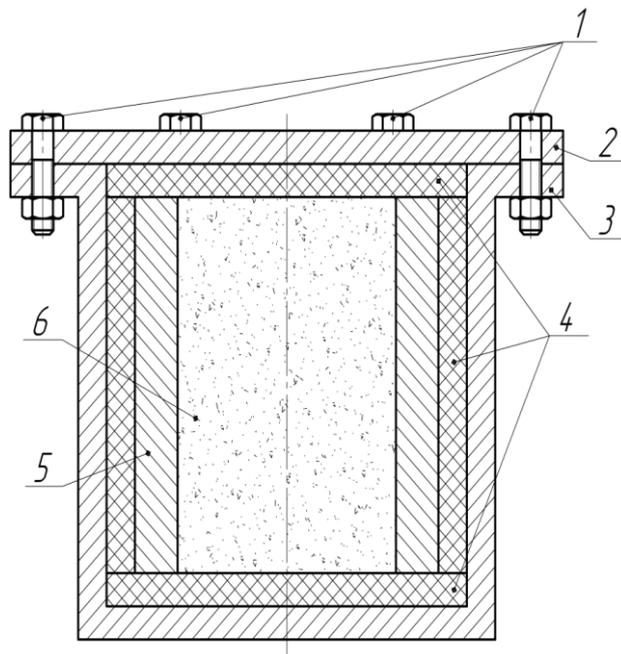


Рисунок 1.9 – Восстановление внутренней поверхности бронзовых втулок газофазной металлизацией: 1 – болт; 2 – крышка; 3 – стальной кожух; 4 – асбестовая прокладка; 5 – восстанавливаемая втулка; 6 – порошок.

Процесс металлизации происходит следующим образом: в контейнер, покрытый внутри асбестом, помещается втулка, затем засыпается смесь, состоящая

из порошков диффундирующих элементов, активатора процесса газообразования и порошка, препятствующего спеканию металлических компонентов смеси. После чего контейнер герметично закрывается и выдерживается в течение 2-6 часов при температуре 600 - 900°C.

При использовании диффузионной металлизации улучшается жаростойкость, износостойкость, коррозионная стойкость и увеличивается твердость восстанавливаемой втулки.

Главным недостатком данного метода является длительность процесса восстановления изношенных поверхностей втулок, что серьёзно затрудняет его применение.

Для восстановления бронзовых подшипниковых втулок с величиной изнашивания внутренней поверхности до 0,8 мм применяется **заливка жидким металлом**, в частности, центробежная заливка [25, 102, 122]. Сущность метода центробежной заливки заключается в том, что при вращении втулки на восстанавливаемую поверхность наносят расплавленную бронзу. Для расплавления бронзы могут применяться печи, высокочастотный ток и электродуговой нагрев. Наибольшее распространение получил способ центробежной заливки с применением электродугового нагрева при восстановлении внутренних поверхностей изношенных бронзовых втулок. Из-за высокой себестоимости и ряда других причин разновидности центробежной заливки применяются ограниченно.

Перед тем как начать восстановление центробежной заливкой с применением электродугового нагрева при восстановлении внутренних изношенных поверхностей бронзовых втулок необходимо произвести подготовительные действия:

- очистить бронзовую втулку от загрязнений, снижающих прочность сцепления жидкого металла с восстанавливаемой поверхностью втулки;
- произвести подготовку расплавляемой шихты.

От 1,5 до 2% массы шихты представляет собой флюс, в качестве которого применяют обезвоженную буру, для чего её прокаливают при температуре до 800°C; после этого производят измельчение до порошкообразного состояния.

Также в состав шихты входит бронза в виде стружки, порошка или гранул, соответствующая марке восстанавливаемой втулки.

После проведения подготовительного этапа втулку с предварительно запрессованной шихтой помещают в оправку (рис. 1.10), после чего оправку помещают на установку (рис. 1.11) и приводят во вращение.

Затем внутрь заготовки через отверстия во фланцах заводят электроды, между ними зажигают электрическую дугу, которая расплавляет шихту и подогревает поверхность восстанавливаемой втулки. Под действием центробежной силы расплавленный металл шихты равномерно распределяется по восстанавливаемой поверхности втулки, после чего подогрев прекращается, а оправка продолжает вращаться до окончания кристаллизации металла. Затем оправку снимают и помещают в песок для дальнейшего охлаждения.

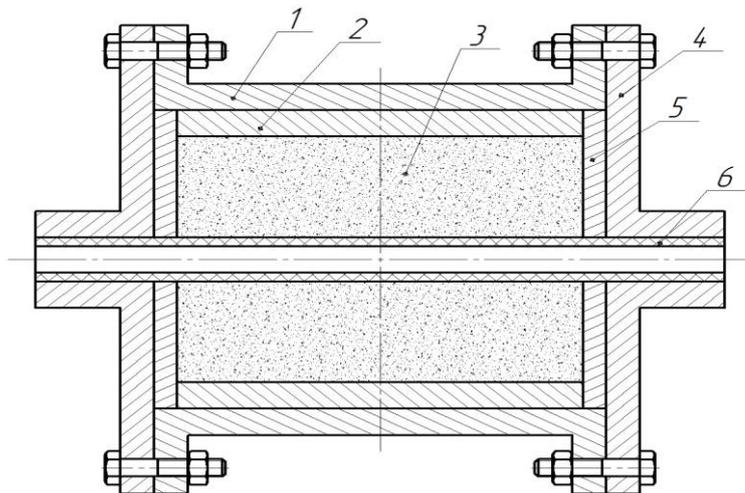


Рисунок 1.10 – Схема оправки для центробежной заливки:

1 – стенка оправки; 2 – восстанавливаемая втулка; 3 – шихта; 4 – фланец; 5 – прокладка; 6 – графитовая втулка.

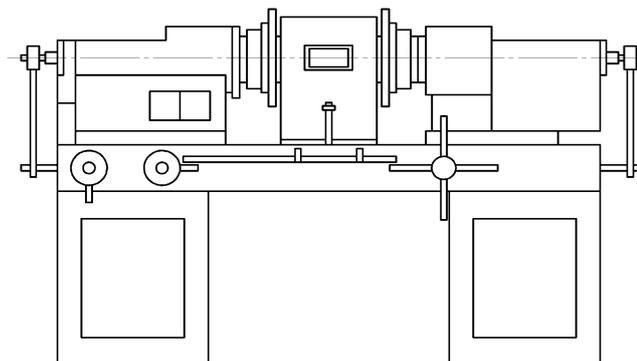


Рисунок 1.11 – Общий вид установки для электродуговой заливки.

К недостаткам данного способа можно отнести:

- неравномерность распределения компонентов жидкой бронзы;
- высокую трудоёмкость подготовительного этапа;
- сложное и дорогостоящее оборудование;
- низкую производительность данного процесса.

Наиболее распространённым способом восстановления втулок из-за своей простоты является **метод пластической деформации** [3, 31, 76, 91, 100, 107, 108]. Основными методами восстановления бронзовых подшипниковых втулок при пластической деформации являются осадка и обжатие, которые могут выполняться как в холодном, так и в горячем состоянии.

Осадку применяют для уменьшения внутреннего и увеличения внешнего диаметра втулки за счёт уменьшения её длины.

Уменьшение длины втулки приводит к уменьшению площади её рабочей поверхности, что приводит к существенному увеличению контактных давлений вала, в связи с чем возникает повышенный износ соединяемой пары и сокращается ресурс.

При осадке необходимо соблюдать следующие рекомендации:

- внутренний диаметр втулки должен быть не более 60 мм;
- величина изнашивания не должна превышать 0,2 мм;
- уменьшение первоначальной длины втулки допускается в пределах от 10 до 15% для пары, работающей при нормальных нагрузках;
- для соединений, работающих при значительных удельных нагрузках, уменьшение длины втулки должно быть не более, чем на 5-8%.

Обжатие применяют для уменьшения внутреннего диаметра за счёт уменьшения наружного. При обжатии втулку с помощью пресса продавливают через конусные оправки или фильеры. После обжатия внутренний диаметр втулки развёртывают, а наружный диаметр, который уменьшается во время обжатия, наращивают различными способами.

Для наращивания наружной поверхности втулки и вала применяют ряд методов.

Электроискровая наплавка [6, 9, 18, 22, 81, 116] позволяет наращивать до 0,2 мм. Сущность данной технологии восстановления заключается в том, что под действием импульсов электрического тока происходит разрушение материала анода (электрод), продукты эрозии переносятся на деталь (катод). Во время обработки анод перемещается вдоль восстанавливаемой детали, в результате многократного воздействия происходит увеличение толщины детали на необходимую величину. Принципиальная схема установки показана на рисунке 1.12. После обработки деталь очищается от случайно прилипших частиц металла, а также для уменьшения неровностей проводят раскатывание роликами или шариками, что приводит к образованию маслоудерживающих каналов.

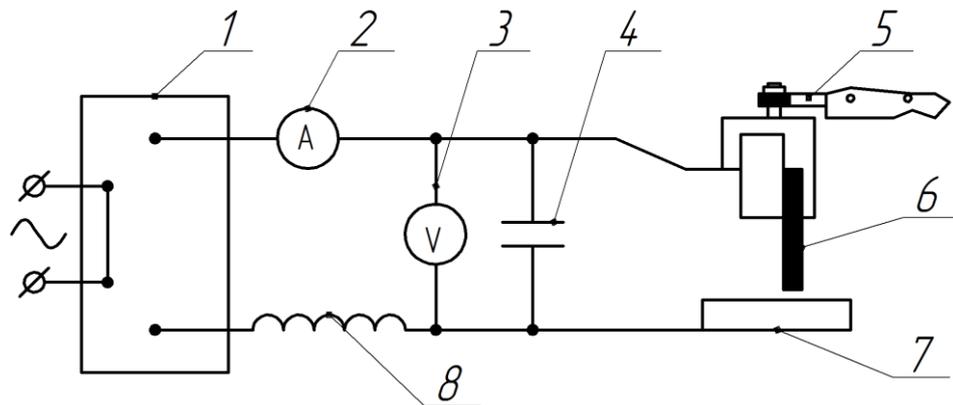


Рисунок 1.12 – Принципиальная электрическая схема установки для проведения электроискровой наплавки: 1 – источник питания; 2 – амперметр; 3 – вольтметр; 4 – емкость разрядного конденсатора; 5 – вибратор; 6 – электрод; 7 – обрабатываемая деталь; 8 – активное сопротивление.

К достоинствам данного способа можно отнести:

- небольшие зоны температурного воздействия;
- минимальные потери материала электрода на разбрызгивание;
- высокое сцепление нанесённого покрытия с восстанавливаемой поверхностью детали;
- малые габаритные размеры установок, обеспечивающие возможность транспортировки;

– возможность использования бытовой энергосети для питания установки.

Распространению данного способа препятствует ряд его недостатков, таких как небольшая толщина восстанавливаемого покрытия и высокие энергозатраты.

Одним из применяемых способов восстановления различных втулок и валов является **электроконтактная приварка** [18, 42, 118, 123]. Для восстановления деталей данным способом используются металлические ленты (стальные и спечённые ленты).

Сущность данного метода заключается в точечной приварке наносимого материала с одновременным деформированием его и поверхности восстанавливаемой детали.

Процесс осуществляется следующим образом: привариваемая лента прижимается роликом к предварительно подготовленной восстанавливаемой детали, затем между роликом и деталью пропускается ток большой плотности. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 1.13.

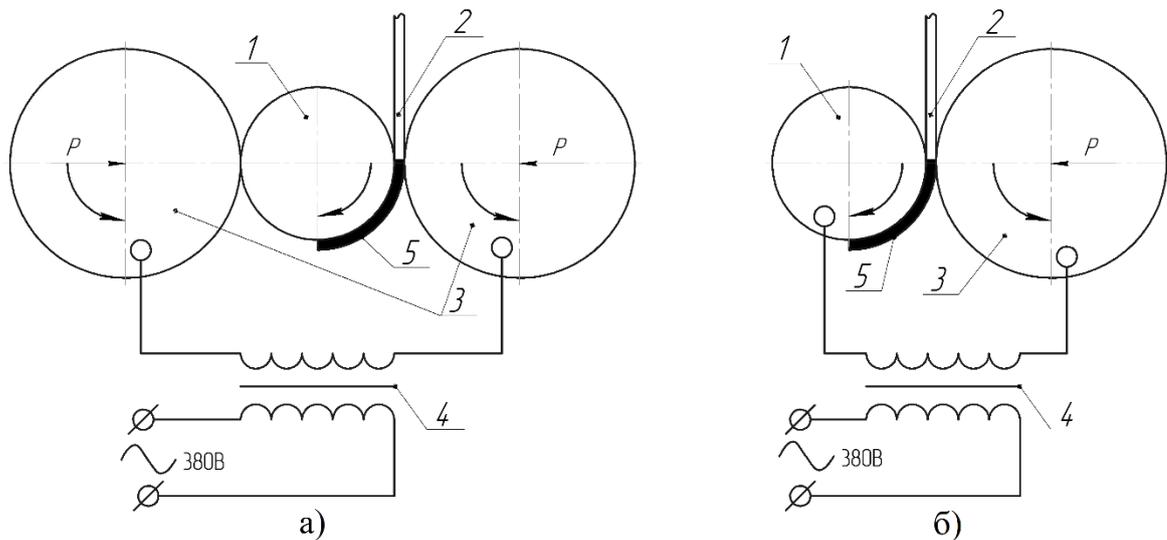


Рисунок 1.13 – Схемы установок для электроконтактной приварки металлических лент: а) приварка с двумя роликами, б) приварка с одним роликом. Р – сила прижатия роликов; 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – привариваемая лента; 3 – ролики; 4 – трансформатор; 5 – наваренный слой.

К достоинствам данного способа можно отнести:

- высокую производительность;
- минимальные потери материала;

- возможность изменения толщины привариваемого слоя;
- минимальное термическое влияние;
- возможность восстанавливать как наружные, так и внутренние диаметры.

При всех достоинствах недостатками данного способа являются:

- высокий износ роликовых электродов, в связи с этим нестабильность процесса;
- высокая трудоёмкость подготовительного процесса.

Восстановление деталей напылением. Данные способы позволяют наращивать наружную поверхность втулок и валов до 0,8 мм [13, 52].

Одним из видов восстановления деталей напылением является **дуговое напыление** [52, 79, 115]. При данном виде металлизации металл в виде двух электродных проволок расплавляется электрической дугой и под действием струи сжатого воздуха наносится на подготовленную восстанавливаемую поверхность. Схема данного процесса представлена на рисунке 1.14.

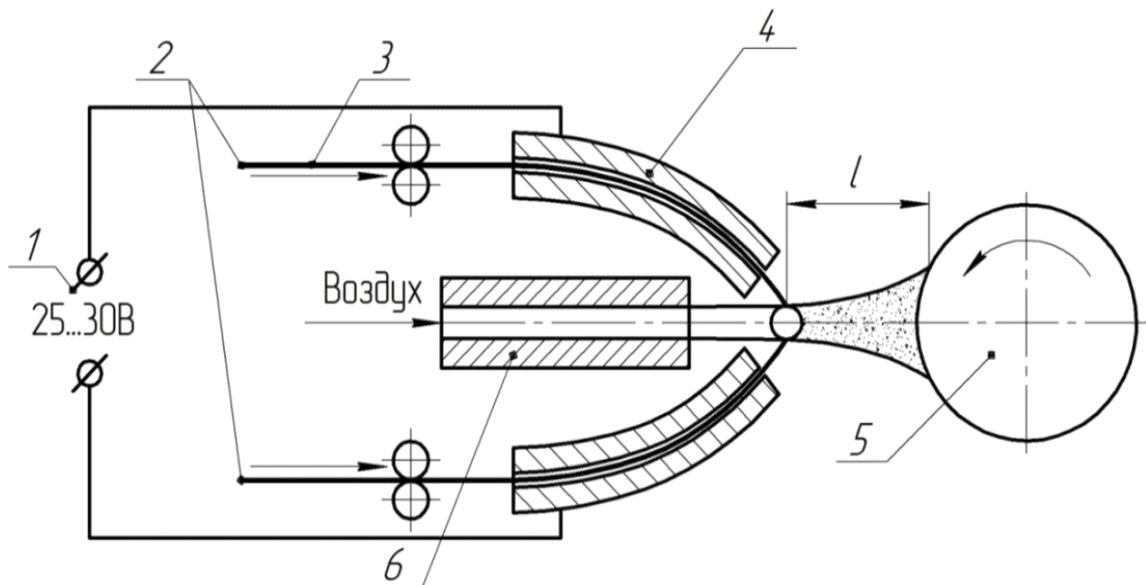


Рисунок 1.14 – Схема дуговой металлизации: 1 – источник питания, 2 – электродная проволока, 3 – изолированные ролики подачи проволоки, 4 – латунные направляющие, 5 – восстанавливаемая деталь, 6 – воздушное сопло, l – расстояние от восстанавливаемой поверхности до очага плавления дуги.

Подача проволоки осуществляется при помощи изолированных парных роликов, через которые она поступает в латунные направляющие, находящиеся под

напряжением, что приводит к возникновению электрической дуги при сближении проволоки. Под действием воздуха, подаваемого под давлением 0,45-0,6 МПа, расплавленные частички металла переносятся на восстанавливаемую поверхность детали. Высокая скорость полёта частичек металла (120-130 м/с) способствует восстановлению изношенной поверхности детали.

Для обеспечения надёжной сцепляемости между деталью и нанесённым слоем с детали удаляют оксидную плёнку и придают шероховатость восстанавливаемой поверхности.

К достоинствам данного способа относятся:

- низкие температуры нагрева восстанавливаемой детали, не превышающие 150°C;
- благодаря пористости, нанесённое покрытие обладает самосмазываемостью.

Для данного способа характерны следующие недостатки:

- значительный расход металла;
- высокая трудоемкость, связанная с необходимостью производить удаление оксидной плёнки и придавать поверхности необходимую шероховатость [111].

К восстановлению изношенных поверхностей деталей напылением также относится **плазменная наплавка** [5, 90, 165]. Наибольшее распространение получила наплавка с использованием металлических порошков. Сущность данного процесса состоит в том, что в плазмотроне при обдуве плазмообразующим газом электрической дуги происходит её сужение, в связи с чем происходит повышение степени ионизации и температуры до 10000 - 30000°C. Попадая в плазменную струю, металлические порошки расплавляются и частички металла осаждаются на восстанавливаемой поверхности (рис. 1.15).

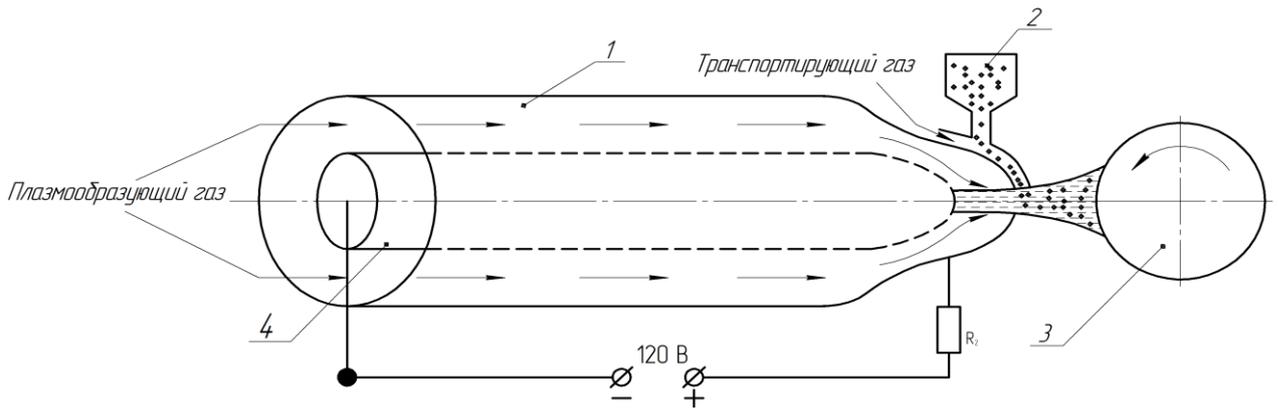


Рисунок 1.15 – Принципиальная схема плазменной металлизации:

1 – медное (водоохлаждаемое) бутылкообразное сопло, 2 – порошковый дозатор, 3 – восстанавливаемая деталь, 4 – вольфрамовый катод.

Помимо порошкового материала также применяются токоведущая или нейтральная проволока, две проволоки вместе или одновременно проволока и порошок. Наиболее перспективной из них является плазменная наплавка с присадочной токоведущей проволокой. При использовании данного способа сжатая дуга используется в большей степени для расплавления проволоки, а не подогрева поверхности детали.

Для восстановления изношенных деталей применяют закрытую плазменную дугу, когда анодом является водоохлаждаемое сопло.

К плюсам данного способа относятся:

- возможность нанесения тугоплавких порошковых материалов;
- низкие температуры нагрева восстанавливаемой детали, не превышающие 150°C;
- транспортирующий газ одновременно может выполнять и защитные функции;
- возможность восстановления тонкостенных деталей.

К сожалению, при использовании порошковых материалов разные траектория и скорость движения частиц уменьшают интенсивность и полноту расплавления, что ухудшает качество покрытия.

Наиболее распространённым способом восстановления деталей напылением является **газопламенное напыление** [23, 79, 115, 125]. Сущность данной технологии восстановления заключается в том, что на предварительно подготовленную поверхность при помощи транспортируемого газа и продуктов горения наносится предварительно расплавленный горючим газом металл.

Существует два вида газопламенного напыления:

– проволочная металлизация (рис. 1.16), при которой проволока, подающаяся в горелку, расплавляется в пламени горючего газа, а затем, распылённая на мелкие частички сжатым воздухом, наносится на восстанавливаемую деталь.

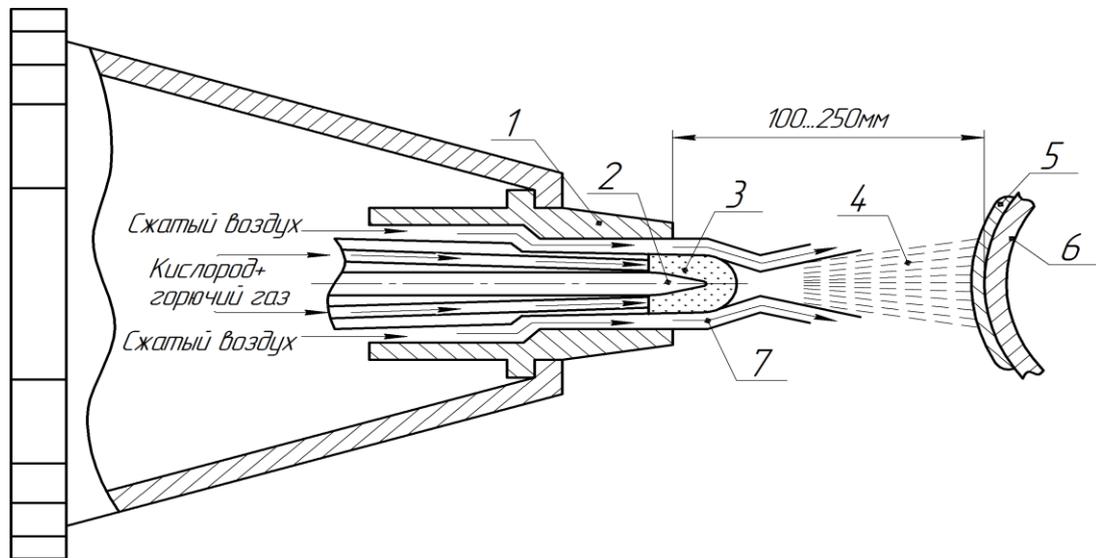


Рисунок 1.16 – Принципиальная схема проволочного газопламенного напыления: 1 – сопло; 2 – проволока; 3 – газовое пламя; 4 – диспергированные частички металла; 5 – наплавляемый слой; 6 – восстанавливаемая поверхность; 7 – воздушный поток.

Порошковое газопламенное напыление (рис. 1.17), при котором металлический порошок, поступающий из бункера, попадая в струю транспортируемого газа, переносится в газовое пламя, где расплавляется, а затем наплавляется на восстанавливаемую поверхность.

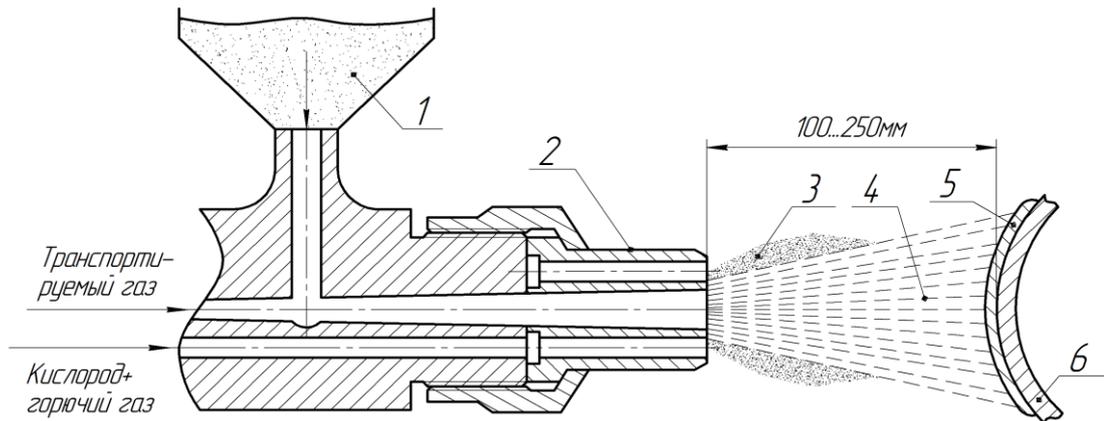


Рисунок 1.17– Принципиальная схема порошкового газопламенного напыления: 1 – наплавляемый порошок; 2 – сопло; 3 – газовое пламя; 4 – диспергированные частички металла; 5 – наплавляемый слой; 6 – восстанавливаемая поверхность.

Для проведения газопламенного напыления применяют следующие способы:

- напыление без оплавления производят в два этапа: сначала на подогретую деталь ($50\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$) наносят подслой, после чего производят напыление основного слоя. Данный способ позволяет восстанавливать детали с износом до $0,8\text{ мм}$;
- напыление с последующим оплавлением также производят в два этапа: сначала наносят восстанавливаемое покрытие, после чего его сразу же оплавливают. Данный способ позволяет нарастить $0,5\text{--}0,8\text{ мм}$;
- напыление с одновременным оплавлением.

При своей простоте и низкой себестоимости восстанавливаемых деталей данный метод требует предварительной подготовки восстанавливаемой поверхности с целью повышения сцепляемости с напыляемым порошком.

Ещё одним видом данного способа восстановления является **детонационное напыление** [8, 79, 115]. Процесс детонационного напыления происходит на специальной установке (рис. 1.18) следующим образом: в рабочую камеру поступает точное количество взрывной смеси и металлического порошка, затем с помощью запального устройства происходит воспламенение. После чего по стволу из взрывной камеры происходит распространение пламени до возникновения детона-

ционной волны, скорость распространения которой достигает 1000–3500 м/с. Частицы металла, движущиеся со скоростью 600–1000 м/с, при столкновении с восстанавливаемой втулкой покрывают её плотным слоем.

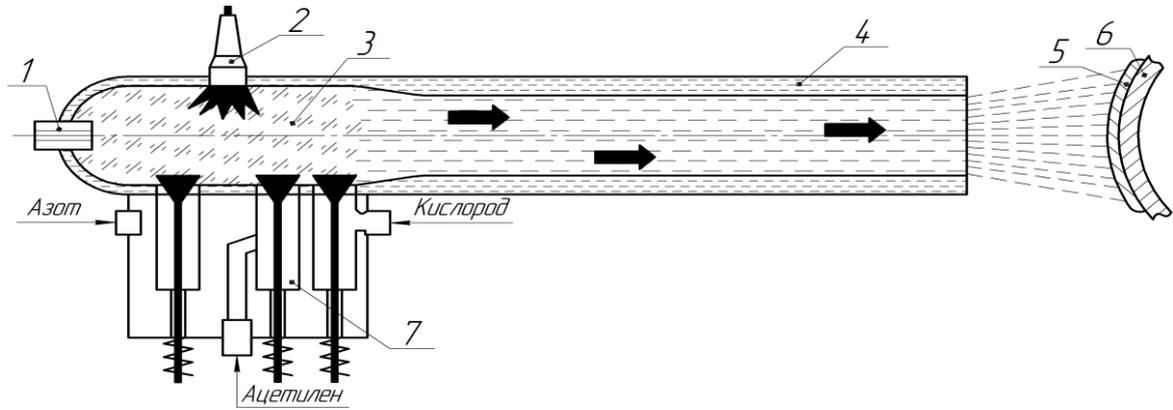


Рисунок 1.18– Принципиальная схема детонационного напыления: 1 – порошок-питатель; 2 – запальное устройство; 3 – рабочая камера; 4 – водоохлаждаемый ствол; 5 – напыляемое покрытие; 6 – восстанавливаемая деталь; 7 – смешительная камера.

Данный метод обладает рядом преимуществ:

- высокой сцепляемостью покрытия с основой;
- получением плотной структуры;
- повышением сроков службы;
- температурой нагрева детали, не превышающей 250°C.

После проведения детонационного напыления покрытие при необходимости подвергают дополнительной обработке (точению, фрезерованию, шлифованию).

Выбор способа восстановления деталей должен происходить исходя из точностных параметров соединения. Так, при использовании метода ремонтных размеров, являющегося наиболее распространённым для восстановления валов, возникают сложности с достижением стабильных показателей точности, в связи с чем сопрягаемые с ними втулки, прошедшие восстановление, должны обладать возможностью компенсации возможных отклонений (рис. 1.2, а). При соединении, представленном на рисунке 1.2, (б) подобным запасом должен обладать корпус, а при случае (в) – втулка, установленная в корпус.

1.4 Цифровые технологии для ремонтных предприятий

В настоящее время всё больше предприятий стараются повысить производительность и качество работ за счет внедрения цифровых технологий [37, 38, 60, 112, 156]. Условно, ремонтные предприятия по уровню внедрения цифровых систем можно разделить на две группы:

- предприятия с точечным применением цифровых систем (цифровой измерительный инструмент, поиск запасных частей и т.д.)
- предприятия с островным применением цифровых систем (учет рабочего времени, учет нормы часов, автоматизированный расчет затрат и т.д.)

При этом среди ремонтных предприятий не встречается примеров использования единой информационной средой (ЕИС), поскольку внедрение данных технологий требует специфических навыков [42]. Ядром подобной ЕИС выступает база данных, хранящая сведения о каждом произведенном изделии, применявшихся при этом материалах и инструментах, технологических процессов и ответственных за них лиц. Поскольку от корректности поступающих данных зависит эффективность принимаемых решений, то при их сборе особое внимание необходимо уделить снижению числа ошибок [144].

Наибольшую эффективность от применения ЕИС можно получить при полностью функционирующей системы качества (СМК) [38, 50, 51]. К сожалению, на ремонтных предприятиях это встречается не так часто, что сказывается на перечне необходимых мероприятий:

- Применение процессного подхода
- Организация прослеживаемости при ремонте
- Совершенствование контрольно-измерительных процедур

Реализация данных мероприятий способствует повышению эффективности предприятия и позволяет использовать более совершенную технологию производства продукции [38].

1.4.1 Процессный подход на ремонтном предприятии

В настоящее время любое предприятие принято рассматривать как совокупность процессов, данная концепция является многократно проверенной и устоявшейся. Впервые данный подход был реализован в третьей версии стандартов ИСО серии 9000 (2000 г.) и приход цифровых систем еще больше подчеркнул его преимущества.

Применение процессного подхода на ремонтном предприятии, в основе которого лежит ГОСТ Р ИСО 9001-2015 позволит снизить вероятность возникновения ошибок, связанных с нарушением технологии, оценивать эффективность производственной деятельности и своевременно проводить необходимые корректирующие мероприятия [38].

Ремонтные предприятия, из-за высокой конкуренции на рынке труда, испытывают трудности с высококвалифицированными сотрудниками, а разнородность ремонтируемых деталей усложняет ситуацию [44]. В связи с этим особое внимание необходимо уделять соблюдению технологий производимых ремонтных работ, и их адаптации для конкретного предприятия с назначением ответственных лиц, а для наиболее сложных процессов разработать карты в легко читаемой форме.

1.4.2 Организация прослеживаемости при ремонте

Несмотря на развитие технологий многие, производители по-прежнему используют человекочитаемую маркировку, основанную на цветовых схемах (рис. 1.19). Поскольку данный вид маркировки недостаточно информативен, то его дополняют буквенными и числовыми обозначениями, наносимыми теснением, что дополнительно усложняет идентификацию.



Рисунок 1.19 – Человекочитаемая маркировка на элементах ЦПГ

Для обеспечения прослеживаемости в рамках создания ЕИС ремонтного предприятия целесообразно использовать машиночитаемую маркировку [37, 43]. На данный момент можно выделить два вида подобной маркировки: оптически читаемую и радиочастотную [157, 158].

К первому виду относятся маркировка на основе матричных штрихкодов (QR-код и Data Matrix), радиочастотная маркировка основана на технологии беспроводной передачи данных малого радиуса действия (NFC и RFID) [38].

Цифровая маркировка деталей с помощью средств радиочастотных меток позволяет кодировать и считывать информацию без непосредственного контакта в том числе визуального. Радиочастотные метки обладают большей устойчивостью к механическим воздействиям по сравнению с штрихкодами. Однако, в случае экранирования сигнала могут возникнуть сложности со считыванием также для их использования потребуется более дорогостоящее оборудование.

Одной из особенностей ремонтного производства можно считать использование универсального оборудования и большое количество ручных операций, которые ограничивают производительность, делающей применение радиочастотной маркировки, нацеленной на высокопроизводительные автоматизированные предприятия избыточным и чрезмерно дорогостоящим [38]. В связи с этим в более рационально использовать маркировку на основе матричных штриховых кодов.

QR-код и Data Matrix являются широко распространёнными видами маркировки, что позитивно сказывается на стоимости оборудования, также стоит отметить и возможность создания избыточного кода, который позволяет обеспечить считывание даже при 30% повреждении.

1.4.3 Совершенствование контрольно-измерительных операций

Главными особенностями ремонтных предприятий является неоднородность выпускаемой продукции и неритмичность производственного процесса, что накладывает свой отпечаток на выбор средств измерений в пользу более «простых» и универсальных. Помимо этого, на ремонтных предприятиях осуществляется сплошной контроль как при поступлении на ремонт деталей, так и после проведения восстановления. Основными параметрами при измерении для такого рода предприятий будет минимизация вероятности появления ошибок первого и второго рода, а также скорость проводимых измерений [44].

Основными причинами возникновения ошибок является погрешность измерения и некорректная обработка данных. Так, рассеяние погрешности измерения накладывает на зону рассеяния действительных размеров и возникает неопределенность при принятии решения – годное изделие или бракованное. Под влияние наложения рассеяний попадают действительные размеры изделия, которые находятся около границ поля допуска. Взаимосвязь между допуском T , параметрами рассеяния действительных размеров изделия (зоной рассеяния $\omega_{\text{тех}}$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma_{\text{тех}}$) и рассеянием самой погрешности измерения Δ , при распределении их по закону нормального распределения, представлена на рисунке 1.20.

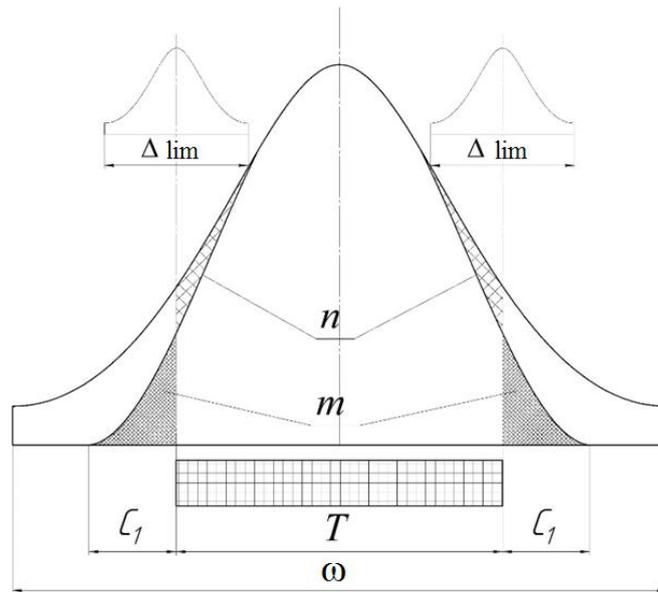


Рисунок 1.20 – Схема контроля: m (m_1) – число неправильно принятых изделий в процентах от общего числа измеренных (числа принятых); n (n_1) – число неправильно забракованных изделий в процентах от общего числа измеренных (числа годных); c (c_1) – вероятностная величина выхода измеряемого параметра за каждую границу допуска у неправильно принятых изделий (от числа принятых деталей).

Средства измерений для контроля выбирают из номенклатуры так, чтобы предельная погрешность измерения Δlim была не более допускаемой нормируемой погрешности измерения δ :

$$\Delta \text{lim} \leq \delta \quad (1.2)$$

В рамках совершенствования контрольно-измерительных операций основной задачей является снижение ошибок первого и второго рода (неверно забракованные и неверно принятые) для этого предприятия заменяют аналоговые средства измерения на цифровые, которые обладают лучшими метрологическими характеристиками и дисплеем, снижающим вероятность ошибки оператора [170]. Подключение цифровых средств измерений к ЕИС позволит организовать автоматизированный сбор измерительной информации, а также её последующий анализ и, как следствие, принятие верного решения о необходимости проведения ремонта.

Выводы по главе 1

1. Основным критерием оценки надежности машин является их долговечность, включая период после проведения ремонтных работ. Увеличение срока службы оборудования может быть достигнуто посредством различных методов, однако наиболее высокая эффективность достигается при объединении точностных методов с подходами к восстановлению, изношенных деталей, учитывающими исходные параметры сопряжений и технологические возможности производственного предприятия.
2. В большинстве отечественных V – образных дизельных автотракторных двигателях применяют установку распределительного вала между блоками цилиндров в результате образуется система «распределительный вал – втулка – блок цилиндров». В двигателе ЯМЗ – 236 распределительный вал изготовлен из стали 45 прошедшей нормализацию, а кулачки и опорные шейки закалены токами высокой частоты с последующим отпуском, втулки изготавливают из оловянистой бронзы, а блок цилиндров – из серого легированного чугуна.
3. В двигателе ЯМЗ - 236 используются толстостенные втулки, позволяющие скорректировать возможные отклонения блока цилиндров, а, следовательно, упростить образованную систему до «распределительный вал – втулка». В полученной системе «распределительный вал – втулка» наибольшему износу подвергаются бронзовые втулки.
4. Имеющиеся технологии восстановления втулок подразумевают нанесение нового материала на изношенную поверхность, что приводит к изменению характеристик в паре трения изменяя её свойства относительно новых. Поэтому при восстановлении рабочей поверхности бронзовых втулок возникает необходимость по использованию технологий позволяющей сохранить первоначальные свойства материала, например, комбинированного метода. Валы подвергаются механической обработки для получения ремонтного

размера если это невозможно проводят восстановление с нанесением нового материала.

5. Применение цифровых технологий на ремонтных промпредприятиях носит точечный характер, не позволяющий говорить о создании единой информационной среды (ЕИС). В рамках создания ЕИС на ремонтных предприятиях можно выделить три ключевых направления: применение процессного подхода, организация прослеживаемости и совершенствование контрольно – измерительных операций.

Глава 2. Теоретические основы получения соединения распределительный вал – втулка и восстановления втулок

2.1 Обеспечение жидкостного трения в соединении вал – втулка

Расчёт всех эксплуатационных показателей подшипников скольжения основан на гидродинамической теории смазки и изложенных в работах М. В. Коровчинского, Типпей Н., Чернавский С. А. и др. исследованиях [69, 70, 145, 159]. Исследованиями влияния отклонений формы и расположения вала и втулки на обеспечение жидкостного трения проводились Е. М. Гутьяром, А. К. Дьячковым, И. Н. Поздовым, А. И. Якушевым, В. Н. Плуталовым, А. И. Ивановым и др. [56, 112, 166]. И.Н. Поздов установил зависимость толщины масляного слоя от зазора в соединении (рис. 2.1) которая будет справедлива для подшипников скольжения имеющие различные размеры и параметры работы.

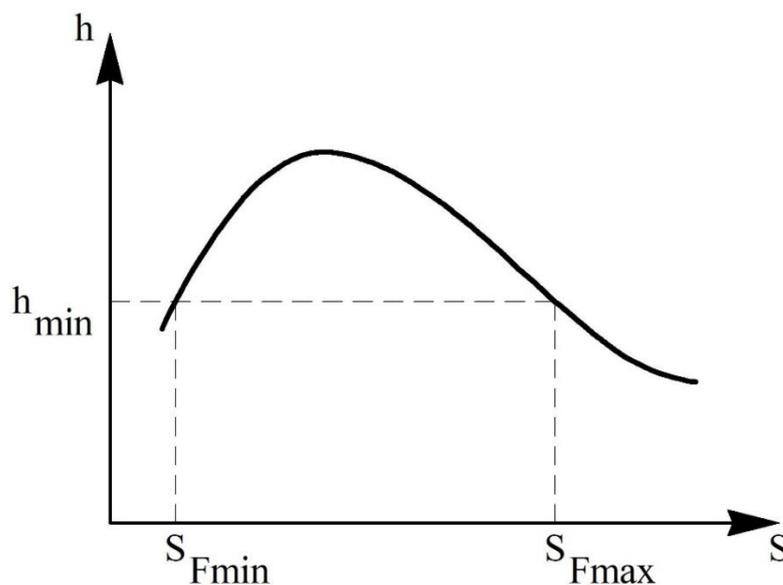


Рисунок 2.1 – Зависимость толщины масляного слоя от зазора в соединении

Исходя из этого графика видно, что необходимая для обеспечения жидкостного трения толщина масляного слоя (h) достижима при зазоре от S_{Fmin} до S_{Fmax} соответственно разность значений этих зазоров – это будет являться запасом на износ позволяющим обеспечить долговечность соединения [129]. Исходя из этого задача по обеспечению жидкостного трения сводится к нахождению минимальной толщины масляного слоя (h_{min}) с учетом возможных отклонений.

2.1.1 Влияние конусообразности на величину масляного слоя

Конусообразный вал, установленный в цилиндрическую втулку показан на рисунке 2.2

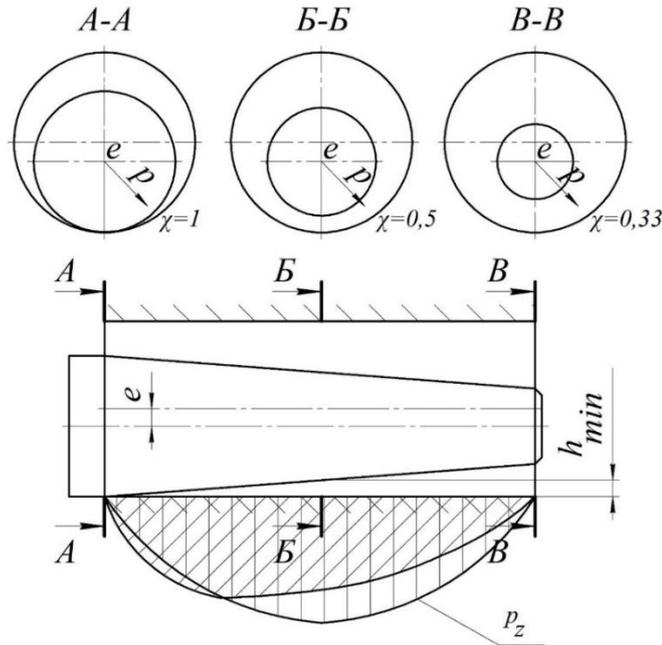


Рисунок 2.2 – Расположение конусообразного вала в цилиндрической втулке

При установившемся режиме работы вал занимает положение с эксцентриситетом e относительно эксцентриситет χ при этом будет своим для каждого сечения и определяется по формуле [166]:

$$\chi = \frac{e}{0,5 \cdot S}, \quad (2.1)$$

где e – эксцентриситет вала при установившемся режиме работы; S – зазор между втулкой и валом.

Согласно выражению (2.24), значение χ в сечении A будет больше, чем в сечении B , при этом истечение масла из сечения A будет меньше, чем из сечения B . Несущая способность для каждого сечения будет различна поскольку будет разным коэффициент несущей способности масляного слоя (C_R). Поскольку увеличение C_R в сечении B больше, чем его уменьшение его в сечении A , а зависимость $C_R = \Phi(\chi)$ не линейна, то произойдет смещение максимальной точки эпюры давления в сторону сечения A .

Примем средний зазор, с толщиной масляного слоя равным h_{min} при этом уменьшение конусообразности будет снижать возникшую ошибку расчетов. Увеличение конусообразности нарушит режим жидкостного трения в сечении A $\Delta d_{EFP} = 4 h_{min}$ (где $\Delta d_{EFP} = d_A - d_B$ – конусообразность вала).

Для обеспечения гарантированного жидкостного трения необходимо учесть коэффициент запаса надежности жидкостного трения, который определяется по формуле [166]:

$$k_{ж} = \frac{h_{min}}{h_{min} - h_{gar}}, \quad (2.2)$$

где h_{min} – толщина масляного слоя; h_{gar} – гарантированная толщина масляного слоя, определяемая как [166]:

$$h_{gar} = h_{min} - (R_{zD} + R_{zd}), \quad (2.3)$$

где R_{zD} – шероховатость рабочей поверхности втулки; R_{zd} – шероховатость рабочей поверхности вала.

Допустимая конусообразность тогда будет определяться по формуле (2.4) [166].

$$\Delta d_{EFR} = \frac{4h_{min}}{k_{ж}} \quad (2.4)$$

Из этого следует, что допустимая конусообразность зависит от толщины слоя масла и коэффициента запаса надежности жидкостного трения. При назначении более широкого поля допуска снижается допустимая величина масляного слоя h_{min} и требуется снижение конусообразности.

В реальных соединениях конусообразность может иметь место как у валов, так и у втулки (рис. 2.3).

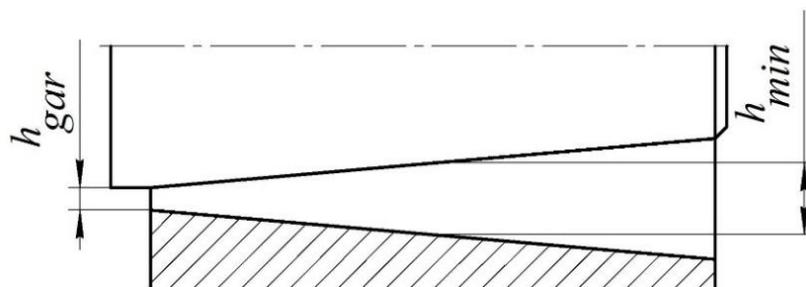


Рисунок 2.3 – Конусообразность вала и втулки

В таком случае при расчете необходимо учитывать суммарную конусообразность [166]:

$$\Delta_{\Sigma EFP} = \Delta d_{EFP} + \Delta D_{EFP}, \quad (2.5)$$

где Δd_{EFP} – конусообразность вала; ΔD_{EFP} – конусообразность подшипниковой втулки.

Также $\Delta_{\Sigma EFP}$ может быть определена по формуле (2.6) [166].

$$\Delta_{\Sigma EFP} = \frac{4h_{min}}{k_{ж}} \quad (2.6)$$

При известной точности конкретного технологического процесса, наименьшая толщина масляного слоя, обеспечивающая жидкостное трение может быть определена как [166]:

$$h_{min} = \frac{\Delta_k}{4} \cdot k_{ж} \quad (2.7)$$

2.1.2 Влияния отклонений от соосности на величину масляного слоя

Отклонение от соосности в соединении вал – втулка зачастую вызвано прогибом вала или отклонениями втулок от общей оси. Для случая, представленного на рисунке 2.4 толщина масляного слоя для обеспечения гарантированного жидкостного трения будет определяться по формуле [166]:

$$h_{min} = k_{ж} \frac{l \cdot \alpha}{2}, \quad (2.8)$$

где l – длина втулки; α – угол наклона оси вала относительно оси втулки (рис. 2.4)

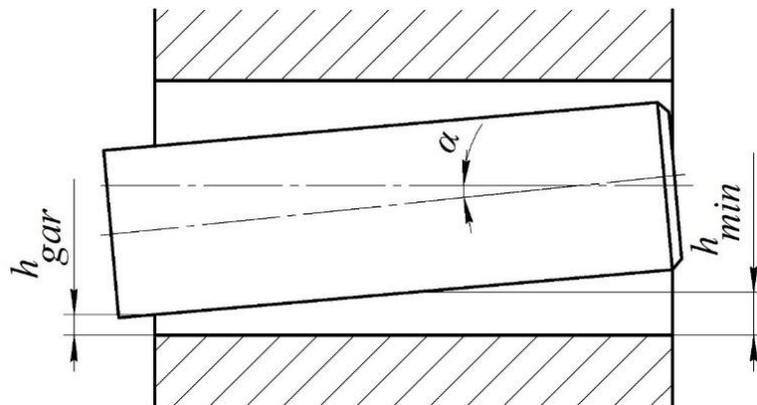


Рисунок 2.4 – Отклонение от соосности в соединении вал – втулка

2.1.3 Влияние бочкообразности, седлообразности и суммарной погрешности на величину масляного слоя

Согласно исследованиям, такое отклонение от формы как бочкообразность (рис. 2.5) не приводит к большим кромочным давлениям масла по сравнению с седлообразностью (рис. 2.6). Для данных отклонений в связи с меньшими влияниями на несущую способность по сравнению с конусообразностью и отклонением от соосности жидкостное трение будет обеспечено и дополнительной компенсации не требуется [167].

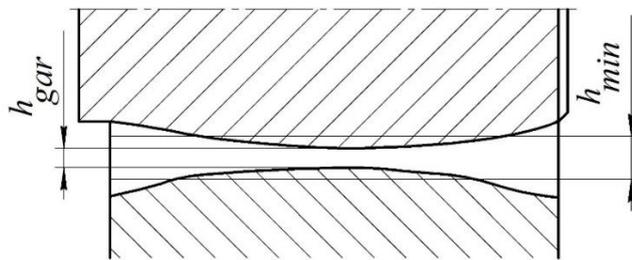


Рисунок 2.5 – Бочкообразность вала и втулки

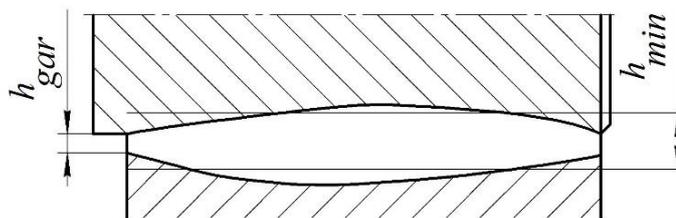


Рисунок 2.6 – Седлообразность вала и втулки

На практике особенно в изношенных соединениях встречается суммарная погрешность (рис. 2.7), при которой отсутствует как прямолинейность, так и параллельность. В данном случае закон образования жидкостного трения осложняется и не подлежит аналитическому решению поскольку зазор в соединении будет нестабильным и изменяться по неизвестному закону. Зазор, рассчитанный по фактическим диаметрам вала и втулки, будет минимальным, а действительный зазор при этом будет больше полученного в результате измерений [167]. Поэтому для такого случая наиболее целесообразным будет использование средних размеров.

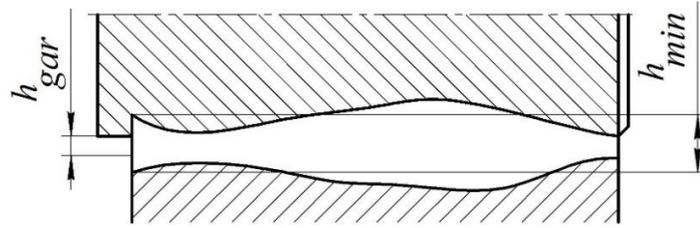


Рисунок 2.7 – Суммарная погрешность соединения вала–втулка

Размеры менее среднего на один порядок практически не окажут влияние на определение толщины масляного слоя, которая будет определяться как [156]:

$$h_{min} = \frac{0,5k \cdot \Lambda \cdot \Psi}{m\Lambda + \Psi^2} \cdot D = \frac{0,5D^2k\Lambda S}{D^2m\Lambda + S^2}, \quad (2.9)$$

где k – коэффициент теплоотдачи (табл. 2.6); Λ – характеристика режима работы определяемая по формуле (2.10) [166]; Ψ – относительный зазор для данного режима работы (2.11) [166]; m – коэффициент для определения, несущей способности (табл. 2.1); D – внутренний диаметр втулки.

Таблица 2.1 – Коэффициенты k и m для наиболее распространённых отношений размеров втулок [145]

l/D	k	m
0,4	0,263	0,423
0,5	0,365	0,554
0,6	0,463	0,654
0,7	0,55	0,714
0,8	0,633	0,782
0,9	0,696	0,747
1	0,758	0,743
1,1	0,8	0,692
1,2	0,845	0,672

$$\Lambda = \frac{\mu\omega}{p}, \quad (2.10)$$

где μ – динамическая вязкость масла; ω – угловая вязкость; p – среднее давление.

$$\Psi = \frac{S}{D} = \sqrt{\Lambda} \cdot \sqrt{C_R}, \quad (2.11)$$

где C_R – коэффициент несущей способности масляного слоя.

При этом действительная несущая способность подшипника будет несколько меньше расчетной и вал будет ближе к втулке до тех пор, пока истекающая жидкость через зазор не станет равной расчётной и не наступит равновесие сил.

При более значительных отклонениях формы даже при касании вала втулки не произойдет уравнивание сил, что приведет к режиму полужидкостного трения из-за утраты несущей способности.

2.1.4 Влияние радиального биения

На рисунке 2.8 показан несоосный вал, установленный в несоосные втулки.

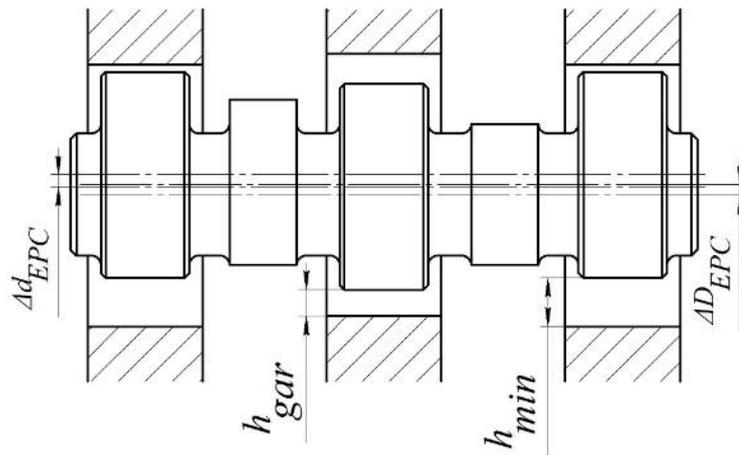


Рисунок 2.8 – Несоосность опорных шеек вала и втулок

В данном случае вал будет вращаться относительно общей оси, проходящей через оси крайних опорных шеек, при этом шейки не касаются поверхности втулок и обеспечивается жидкостное трение [166]:

$$h_{min} = k_{ж}(\Delta D_{EPC} + \Delta d_{EPC}) \quad (2.12)$$

где ΔD_{EPC} – несоосность подшипниковых втулок; Δd_{EPC} – несоосность опорных шеек вала относительно общей оси.

Тогда допускаемая сумма несоосностей отверстия и вала [166]:

$$(\Delta D_{EPC} + \Delta d_{EPC}) = \frac{2h_{min}}{k_{ж}} \quad (2.13)$$

При данных значениях радиального биения будет обеспечивать надежность соединения вал – втулка. Данное радиальное биение может вызывать колебание вала поскольку оказывает влияние на силы, действующие в средней опоре.

Помимо несоосности радиальное биение может быть вызвано и овальностью опорных шеек (рис. 2.9).

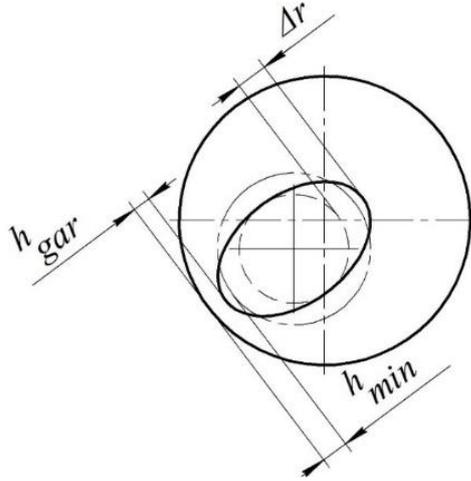


Рисунок 2.9 – Овальность опорных шеек

Примем, что частота колебания вала значительно ниже удвоенного числа оборотов в секунду тогда, минимальная толщина масляного слоя будет определяться как [166]:

$$h_{min} = k_{ж} \frac{\Delta r}{2} \quad (2.14)$$

Допускаемое радиальное биение вала тогда будет равно [166]:

$$\Delta r = \frac{2h_{min}}{k_{ж}} \quad (2.15)$$

2.1.5 Обеспечение надежности жидкостного трения

Надежность жидкостного трения между валом и втулкой определяется толщиной масляного слоя в месте их наибольшего сближения при этом должно соблюдаться следующие условие [166]:

$$h_{min} > h_{кр} \quad (2.16)$$

где $h_{кр}$ – критическая толщина масляного слоя для реальных подшипников, учитывающая влияние технологических факторов и определяемая по выражению (2.17).

$$h_{кр} = (Rz_D + Rz_d) + 0,5\Delta r + 0,25 \Delta_{\Sigma EPC} + 0,5l\alpha + (\Delta D_{EPC} + \Delta d_{EPC}) \quad (2.17)$$

Для исследований по определению оптимального зазора, позволяющего гарантировать жидкостное трение применяют относительный зазор x , который можно определить, как [166]:

$$x = \sqrt{\Lambda} [0,5(1 - \chi) \sqrt{C_R}] \quad (2.18)$$

Относительный оптимальный эксцентриситет χ учитывающий режим работы можно определять по формуле (2.19) [166].

$$\chi = \frac{\Psi^2 - \Lambda(k - m)}{\Psi^2 + \Lambda m} \quad (2.19)$$

Поскольку относительный зазор также можно определить через функцию $x=f(\Psi)$, которая получается подстановкой в уравнение (2.18) выражение оптимального эксцентриситета (2.19), а C_R выразив из выражения (2.11), получим [166]:

$$x = 0.5\sqrt{\Lambda} \left[1 - \frac{\Psi^2 - \Lambda(k - m)}{\Psi^2 + \Lambda m} \right] \sqrt{\frac{\Psi^2}{\Lambda}} = \frac{0.5k\Lambda \cdot \Psi}{\Psi^2 + \Lambda m} \quad (2.20)$$

Учитывая, что оптимальным зазором можно считать только тот, при котором гарантируется максимальная надежность жидкостного трения, согласно выражению (2.20), получим [166]:

$$\frac{dx}{d\Psi} = \frac{0,5k\Lambda(\Psi^2 + \Lambda m) - 2\Psi \cdot 0.5k\Lambda \cdot \Psi}{(\Psi^2 + \Lambda m)^2} = 0 \quad (2.21)$$

Тогда для общего случая оптимальный зазор согласно выражению (2.11), в будет определяться как [166]:

$$\Psi_{opt} = \sqrt{\Lambda} \cdot \sqrt{C_{Rz}}, \quad (2.22)$$

где C_{Rz} – коэффициент несущей способности, соответствующий относительному зазору.

В соответствии с выражениями (2.10), (2.11) и (2.22) оптимальный зазор в соединении вал–втулка можно определить, как [166]:

$$S_{opt} = \sqrt{\frac{\mu\omega}{p}} \cdot D \cdot \sqrt{C_{Rz}} \quad (2.23)$$

Из этого можно сделать вывод что для постоянной характеристики режима работы оптимальный зазор увеличивается пропорционально увеличению диаметра втулки.

Тогда максимальное значение наименьшей толщины масляного слоя можно определить, как [166]:

$$h_{\min(opt)} = \frac{S_{opt}}{2} (1 - \chi) \quad (2.24)$$

Полученное значение должно соответствовать условию (2.16) добавив в которое минимальный зазор, оно примет вид [166]:

$$S_{min} \geq h_{\min(opt)} > h_{кр} \quad (2.25)$$

Исходя из этого минимальный зазор в соединении вал – втулка должен быть не меньше максимального значения наименьшей толщины масляного слоя.

Для обеспечения наибольшей долговечности соединения необходимо обеспечить следующие равенство:

$$S_{min} = S_{Fmin} \quad (2.26)$$

Для обеспечения работоспособности многоопорного вала при различных условиях эксплуатации с учетом отклонений размеров деталей, начальный зазор реального соединения ($S_{нач}$) будет больше минимального и находится в диапазоне согласно допуску (T_S). Исходя из этого зависимость толщины масляного слоя от зазора в соединении (рис. 2.1) для реального соединения примет вид, представленный на рисунке 2.10.

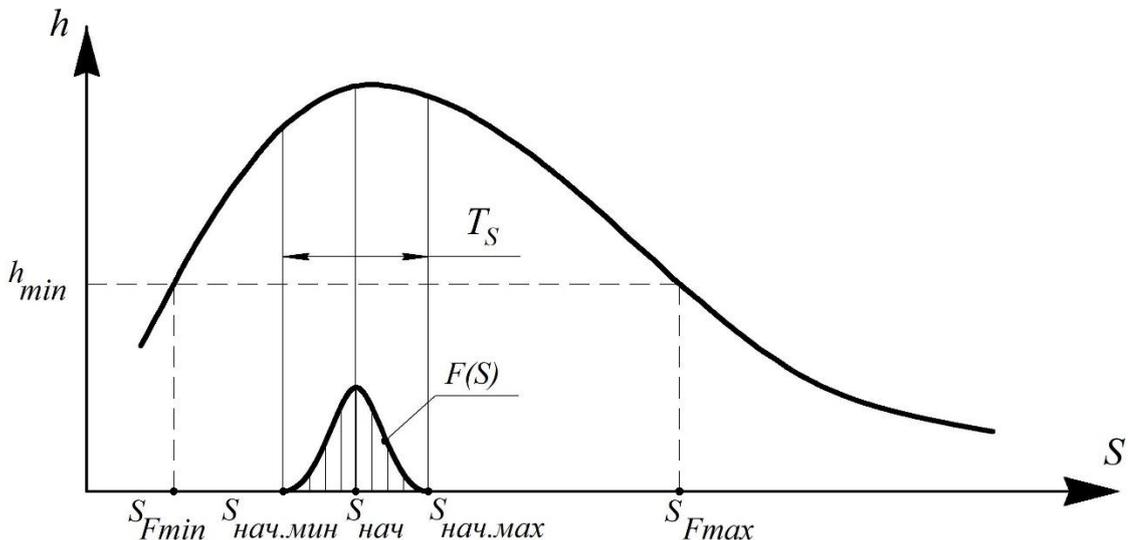


Рисунок 2.10 – Зависимость толщины масляного слоя от зазора в соединении для реального соединения: $S_{нач.мин}$ и $S_{нач.макс}$ – минимальный и максимальный начальные зазоры соединения; $S_{нач}$ – наиболее вероятный начальный зазор соединения; T_S – допуск соединения с зазором ; $F(S)$ – нормальное распределение получаемых зазоров в соединении.

Исходя из данного рисунка для получения наибольшего запаса на износ, а следовательно, и наибольшей долговечности соединения, необходимо:

- обеспечить получение наиболее вероятного зазора близкого к значению минимального;
- уменьшить рассеивание получаемых зазоров.

2.2 Способы обеспечения зазора в соединении распределительный вал – втулка

2.2.1 Влияние точности на долговечность соединения с зазором

Для получения посадок с зазором применяются точностные методы, которые делятся на полной и неполной взаимозаменяемости (рис. 2.11). В сборочном производстве наибольшее распространение получили методы полной взаимозаменяемости и селективная сборка, но наибольшей точностью обладает индивидуальный подбор, позволяющий достичь минимального зазора между сопрягаемыми деталями.



Рисунок 2.11 – Точностные методы обеспечения зазоров в посадке

При работе соединения происходит изнашивание поверхностей приводящие к уменьшению диаметра вала и увеличению размера отверстия соответственно и к увеличению зазора. Процесс увеличения зазора в подобных соединениях описывается кривой (рис. 2.12) изнашивания открытой профессором А. И. Ивановым [63].

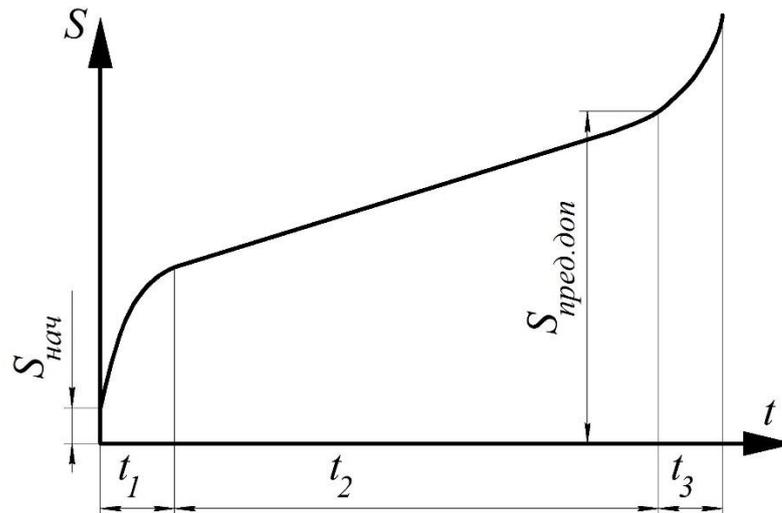


Рисунок 2.12 – Кривая изнашивания соединения с зазором

Согласно данной кривой, эксплуатация начинается с начального зазора ($S_{нач}$) как правило, не превышающего значения (S_{opt}). Также выполняется условие, при котором начальный зазор ($S_{нач}$) в соединении не должен быть меньше минимального (S_{min}).

При начале эксплуатации в первый период времени (t_1) происходит активная приработка деталей, входящих в соединение, за счет сглаживания шероховатости приводящая к резкому увеличению зазора, после чего наступает стабилизация прироста зазора и график принимает почти прямолинейный вид характерный для нормальной работы соединения (t_2). При достижении предельно допустимого зазора ($S_{пред.доп}$) происходит снижение несущей способности масляного слоя, что свидетельствует об окончании периода нормальной эксплуатации соединения, и происходит резкое увеличение зазора (t_3).

Данная кривая изнашивания соединения с зазором не учитывает допуск на производство деталей, а также отсутствие линейных зависимостей при износе. Для более полного анализа надежности соединения необходимо построение модели формирования отказа, отражающей процессы изменения параметра от начала эксплуатации до возникновения отказа [99, 114].

На рисунке 2.13 показана схема формирования параметрического отказа $F(t)$ и закона надёжности $f(t)$ параметра a относительно времени t .

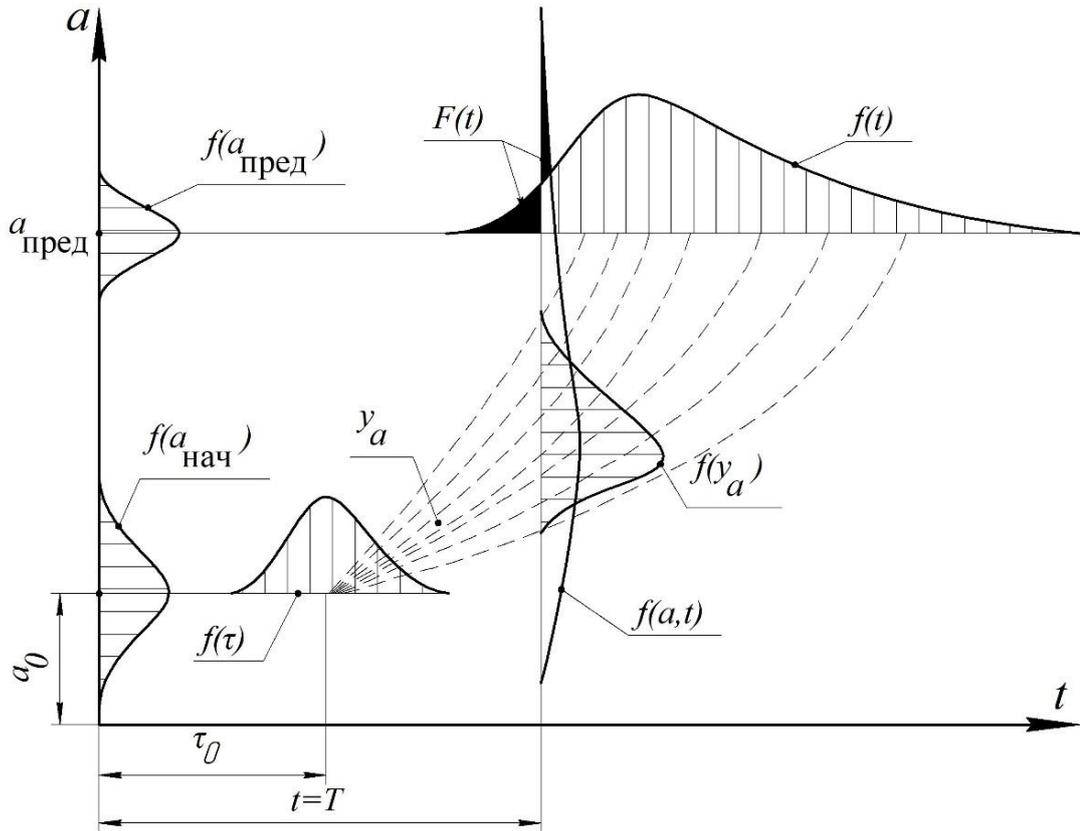


Рисунок 2.13 – Общая схема формирования параметрического отказа

Начальный параметр соединения имеет рассеивание $f(a_{\text{нач}})$ относительно математического ожидания a_0 в связи с наличием допуска. В результате начала процесса эксплуатации соединения происходит изменение его параметра через случайный промежуток времени τ_0 , связанный как процессом износа, так и с внешними факторами, в результате чего происходит формирование рассеивания $f(\tau)$, который будет определять вероятность выхода параметра за его предельные значения $a_{\text{пред}}$ и соответствующего рассеивания $f(a_{\text{пред}})$. Процесс изнашивания, характеризующий скорость изменения параметра y_a , приводит к достижению равенства между временем работы t и наработкой на отказ T и формированию рассеивания $f(a,t)$. И измерение параметра, согласно линейному закону, позволяет определить распределение скорости изменения параметра $f(y_a)$. В результате всех протекающих процессов происходит формирование закона надежности с зонами параметрического отказа, через который можно получить вероятность безотказной работы $P(t)$ как $1 - F(t)$.

В соединениях с зазором имеет место ограничение только по верхнему пределу, а модель отказов представляет собой сильно перемешанный гауссовский процесс, что позволяет для описания процесса использовать закон нормального распределения, получив модель, представленную на рисунке 2.14.

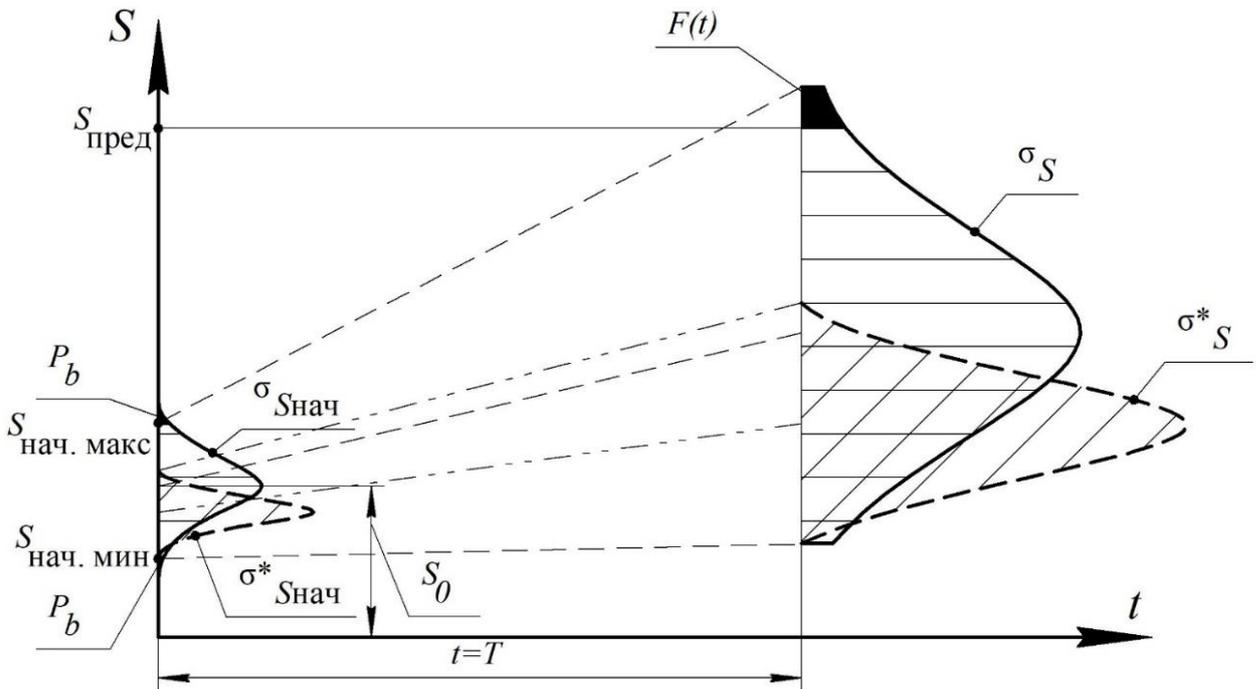


Рисунок 2.14 – Схема модели формирования параметрического отказа по одному пределу

Начальный зазор соединения распределён согласно среднеквадратическому отклонению $\sigma_{Sнач}$ с математическим ожиданием S_0 и ограниченное согласно допуску, максимальным $S_{нач.макс}$ и минимальным $S_{нач.мин}$ начальными зазорами. Зазоры, выходящие за границы допуска, образуют зоны брака P_b . При достижении времени T зазоры соединения будут распределены согласно среднеквадратическому отклонению σ_S с зоной параметрического отказа $F(t)$ при значениях, превышающих предельный зазор $S_{пред}$. При уменьшении рассеивания изначального зазора в два раза получим распределение $\sigma^*_{Sнач}$, при достижении времени t зазоры соединения для данного случая получим σ^*_S .

Поскольку начальные зазоры также распределены по нормальному закону то и их значение для каждого времени T будет иметь тоже распределение с математическим ожиданием, тогда среднее значение зазора будет определяться как:

$$\bar{S} = S_0 + \bar{V} \cdot T \quad (2.27)$$

где: S_0 – математическое ожидание; \bar{V} – средняя скорость увеличения зазора; T – время до достижения зоны параметрического отказа $F(t)$.

Среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma_S = \sqrt{\sigma_{S_{\text{нач}}}^2 + T^2 \cdot \sigma_V^2} \quad (2.28)$$

где: $\sigma_{S_{\text{нач}}}$ – среднее квадратическое отклонение начального зазора; σ –

Тогда вероятность безотказной работы для данного случая можно получить как:

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left[\frac{S_{\text{пред}} - S_0 - \bar{V} \cdot T}{\sigma_S} \right], \quad (2.29)$$

где: $S_{\text{пред}}$ – предельный зазор.

Данные модели показывают, что основополагающими факторами, влияющими на надежность соединений, является изначальное рассеивание размеров, а также время достижения наработки на отказ. Исходя из этого, для повышения долговечности соединения как элемента надежности необходимо уменьшить рассеивание размеров и увеличить запас на износ, особенно после проведения ремонта. Помимо этого, важным фактором является предсказуемость времени наработки на отказ, особенно после ремонта.

На основе модели параметрического отказа (рис. 2.14), профессором О.А. Леоновым было предложено, введя значения ресурса и вероятности безотказной работы $P(t)$, определить функцию и параметры рассеяния процесса изнашивания, позволяющие определить конструктивный допуск посадки T_K для симметричных законов распределения, определяемый как [86]:

$$T_K = \frac{2 \cdot (T_F - \varepsilon \cdot \bar{U}(t)) \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{H_{K1}^2}{H_{K3}^2} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{H_{K2} \cdot \varepsilon \cdot \sigma_u(t)}{T_F - \varepsilon \cdot \bar{U}(t)} \right)^2 \right)} \right)}{K \cdot \left(1 - \frac{H_{K1}^2}{H_{K3}^2} \right)}, \quad (2.30)$$

где: T_F – функциональный допуск посадки; $\bar{U}(t)$ – функция процесса старения (износа); H_{K1} и H_{K2} – квантили законов распределения конструктивных параметров и процесса старения при заданной $P(t)$ (верхняя оценка); H_{K3} – квантиль, характеризующая зону рассеяния конструктивных параметров от центра распределения до границы Δ_{Fmin} ; H'_{K3} – квантиль распределения (характеризует всю зону рассеяния и может складываться из квантилей сверху и снизу от центра); K – коэффициент относительного рассеяния; $k_\omega = \omega_k / T_k$ – коэффициент, в котором учтено неравенство зоны рассеяния ω_k допуску T_k ; $\sigma_u(t)$ – среднее квадратическое отклонение рассеяния параметров процесса старения.

При установлении равенства между H_{K1} и H_{K2} получим [86]:

$$T_K = \frac{\left(T_F - \varepsilon \cdot \bar{U}(t) \right)^2 - H_{K2}^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot \sigma_u^2(t)}{K \cdot \left(T_F - \varepsilon \cdot \bar{U}(t) \right)} \quad (2.31)$$

Данные зависимости позволяют определить конструктивный допуск для начального и восстановленного соединения.

Исходя из этого, а также согласно разделу 2.1 основной задачей с точки зрения обеспечения долговечности соединения при выборе точностного метода является достижение наиболее близкого значения к начальному наименьшему зазору.

Соединение распределительный вал – втулка дизельного двигателя ЯМЗ-236 имеет при сборке зазор 0,065...0,135 мм, тогда $S_{нач.мин} = 0,065$ мм, $S_{нач.макс} = 0,135$ мм потеря работоспособности, согласно ремонтной документации, происходит при превышении зазора в 0,240 мм который будет являться предельно допустимым ($S_{пред.дон}$) соответственно наибольший запас на износ составит 0,175 мм [34].

2.2.2 Метод полной взаимозаменяемости

Основой данного метода является размерный анализ, позволяющий определить номинальный размер замыкающего звена, который для соединения «распределительный вал – втулка» будет являться зазором. В общем виде выражение по определению номинальный размер замыкающего звена может быть представлено как [34, 85]:

$$A_{\Delta} = S = \sum_{i=1}^{n-1} \xi A_i , \quad (2.32)$$

где ξ – передаточное отношение, характеризующее влияние отклонений размеров составляющих звеньев на размер замыкающего звена ($\xi = +1$ для увеличивающих звеньев и $\xi = -1$ для уменьшающих звеньев в том случае, когда звенья размерной цепи расположены линейно и параллельно); A_i – размер i -го составляющего звена.

Осуществление сборки на основе взаимозаменяемости позволяет при относительной простоте обеспечить необходимую точность соединения [34]. При этом назначаемые допуски должны соответствовать возможностям применяемого оборудования по достижению требуемой точности.

Схема полей допусков соединения при применении метода полной взаимозаменяемости представлена на рисунке 2.15

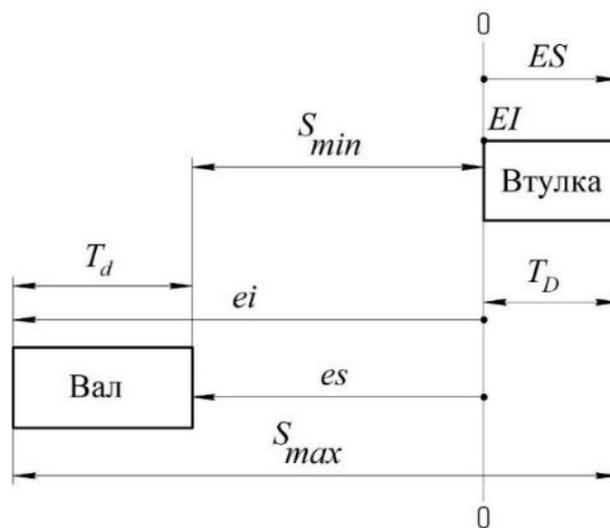


Рисунок 2.15 – Схема полей допусков соединения при применении полной взаимозаменяемости для соединения распределительный вал - втулка

Рассеяния зазоров для данного соединения будет иметь вид, представленный на рисунке 2.16 [34].

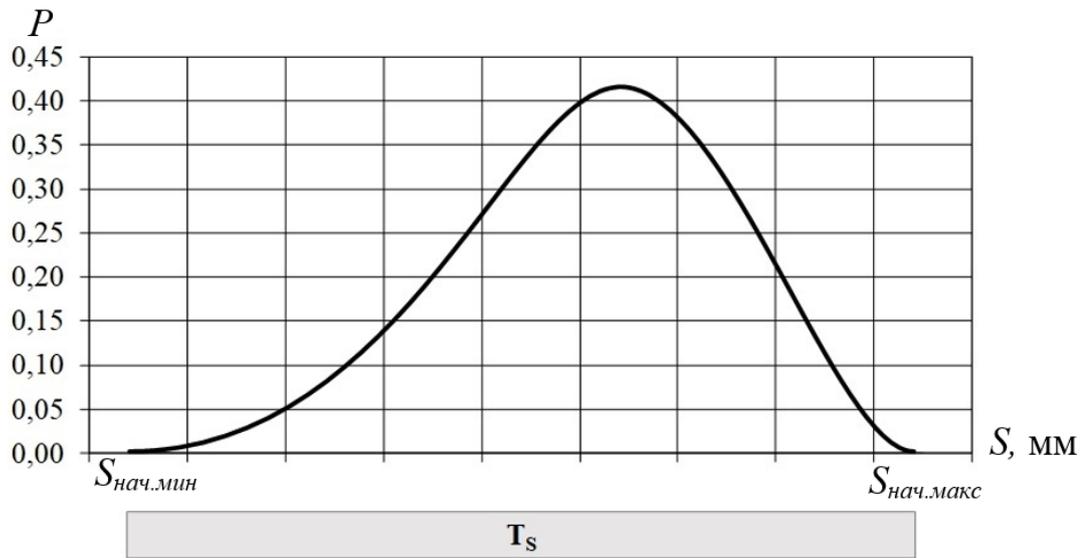


Рисунок 2.16 – Рассеяния зазоров в соединении при полной взаимозаменяемости для соединяя распределительный вал - втулка

Из рисунка видно, что наблюдается смещение в сторону большего начального зазора и, как следствие меньшего ресурса, что является основным недостатком данного метода [34].

2.2.3 Метод селективной сборки

Для уменьшения зоны рассеяния зазора без повышения требований к оборудованию и технологии обработки применяют селективную сборку. Сущность данного метода заключается в разделении изготовленных деталей на группы в зависимости от получившихся при изготовлении размеров с дальнейшей сборкой по полученным группам и как следствие повышение точности получаемого соединения.

Допуск замыкающего звена (зазор) для селективной сборки будет определяться как [16, 34]:

$$T_{zz} = \frac{1}{k_z} \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n-1} \xi_i^2 k_{gi}^2 T_{gi}^2}, \quad (2.33)$$

где k_z – коэффициент относительного рассеяния распределения для замыкающего звена; ξ_i – передаточное отношение i -го составляющего звена размерной цепи ($\xi_i = +1$ для увеличивающих звеньев и $\xi_i = -1$ для уменьшающих звеньев); k_{gi} – коэффициент относительного рассеяния распределения внутри группы i -го составляющего звена.

Поэтому важным этапом селективной сборки является сортировка деталей на группы в пределах группового допуска, и можно говорить о замещении точности изготовления точностью сортировки. При назначении групп важно следить за их парностью, если парность не соблюдается, то возникает необходимость в проведении подгонки, что осложняет взаимозаменяемость деталей. Зависимость группового допуска от количества групп представлена на рисунке 2.17.

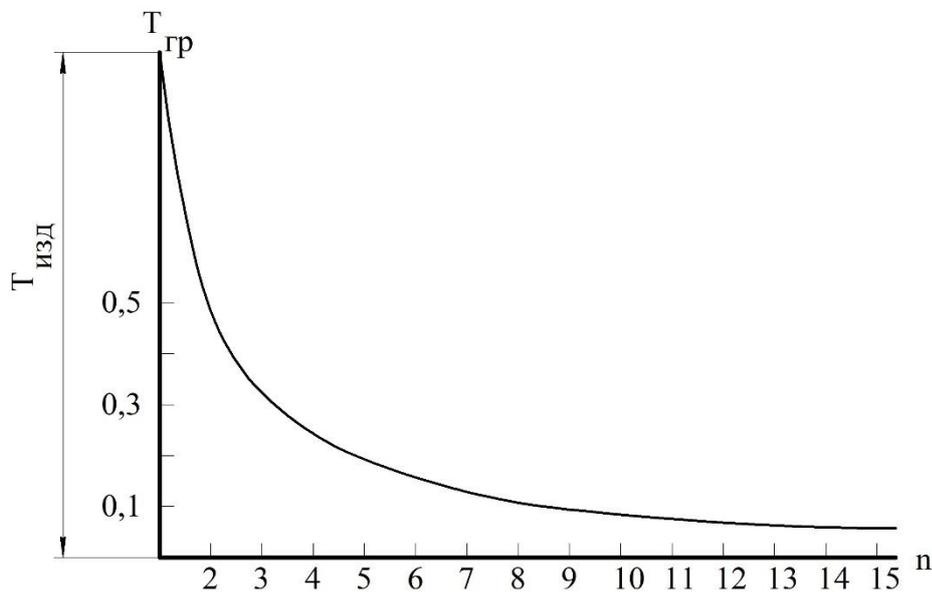


Рисунок 2.17 – Зависимость группового допуска от количества групп

Из графика, изображённого на рисунке, можно сделать вывод, что если число групп не превышает пяти, то групповой допуск составит 20...50% от среднего допуска соединения, при увеличении количества групп происходит снижение рассеяния группового допуска и он не превысит 7...8%. При увеличении количества групп также возрастает риск отсутствия подходящей пары и соответственно

незавершенного производства. Поэтому важно соблюдать баланс между желаемой точностью сборки с одной стороны, повышением трудоёмкости сортировки и риском образования незавершенного производства с другой.

Для соединя «распределительный вал – втулка» наиболее целесообразным будет использование двух групп селекции. Для реализации селективной сборки может потребоваться изменение допуска размера вала относительно метода полной взаимозаменяемости тогда схема расположения полей допусков примет вид, представленный на рисунке 2.18 [34].

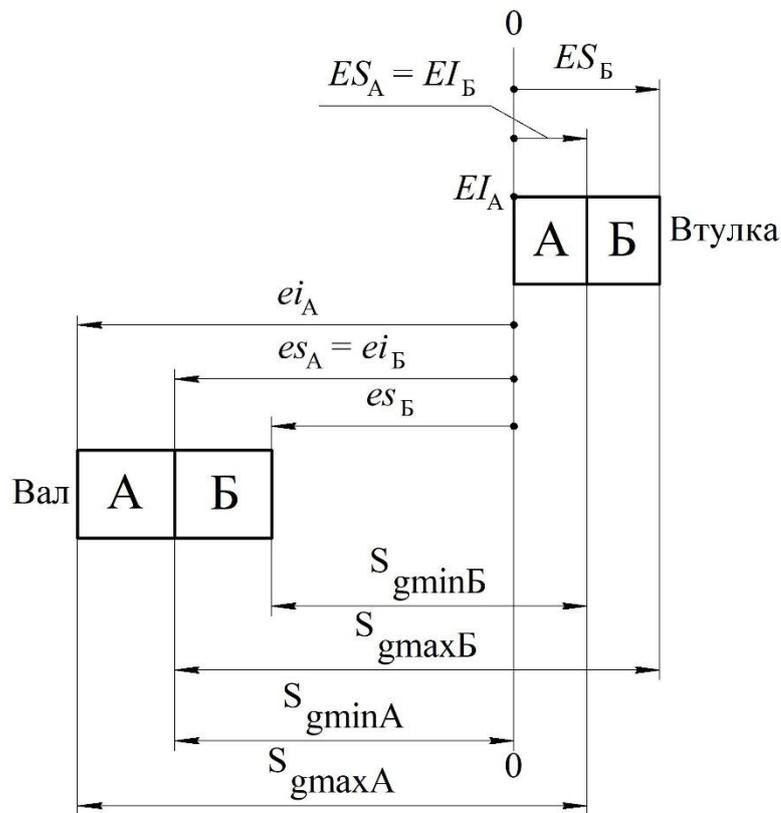


Рисунок 2.18 – Схема расположения полей допусков при селективной сборке соединя «распределительный вал – втулка»

Рассеяния зазоров для данного соединения при применении селективной сборки будет иметь вид, представленный на рисунке 2.19.

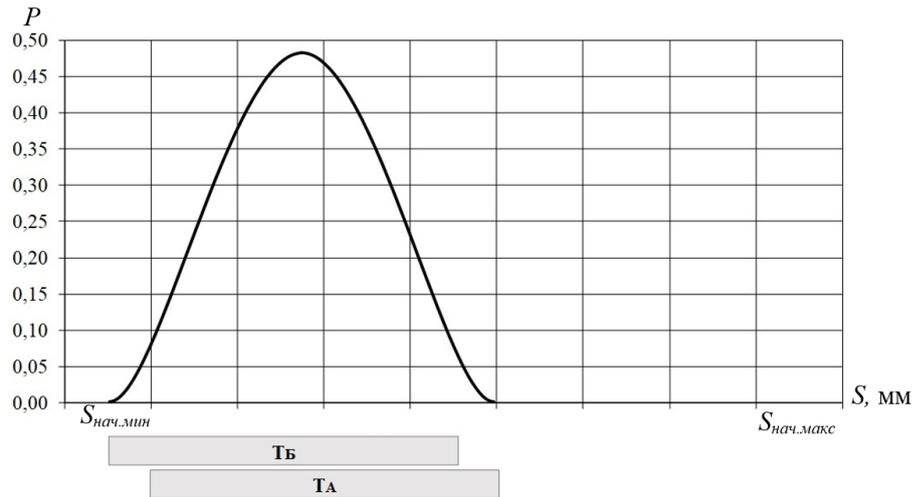


Рисунок 2.19 – Рассеяния зазоров при селективной сборке при селективной сборке соединяя «распределительный вал - втулка»

Как видно из рисунка применение метода селективной сборки приводит к уменьшению получаемого зазора.

В теоретических исследованиях используется упрощённая система втулка – вал вместо корпус – втулка – вал, на практике данный метод дополнительно будет предъявлять повышение требования к посадочным местам втулок и качеству обработки самих втулок. Для нивелирования влияния параметров корпуса можно проводить обработку уже установленных втулок, но для этого потребуется попадание всех опорных шеек распределительного в одну группу селекции. Поэтому для эффективного использования данного метода требуется применение цифровых технологий.

2.2.4 Метод цифрового подбора

Сущность данного метода заключается в изготовлении компенсирующей детали относительно базовой. В качестве базовой выбирают деталь более сложную в изготовлении для достижения требуемого уровня точности, компенсирующая деталь должна иметь меньшее рассеяния получаемых размеров и большой запас на механичную обработку [34]. На рисунке 2.20 показан случай при котором действительная зона рассеивания размеров (ω) отверстия значительно меньше его допуска (T), что позволяет использовать его в качестве компенсирующей детали.

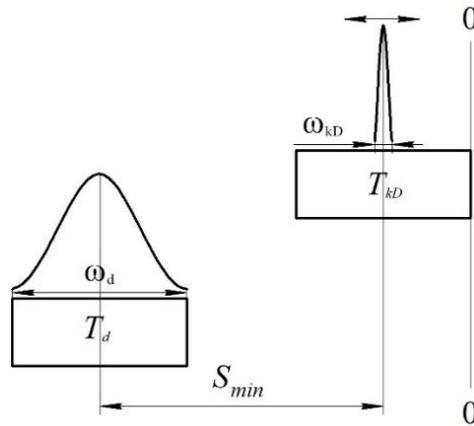


Рисунок 2.20 – Зоны рассеивания размеров и допуски отверстия и вала

Исходя из этого зона рассеивания размеров отверстия может смещаться в рамках своего допуска тем самым компенсировать отклонение вала и сохранять минимальный зазор (S_{min}). Важным этапом данного метода является определение требуемого размера компенсирующей детали относительно действительного размера базовой, который в общем виде для соединения «вал – втулка» определяется как [34]:

$$D_k = (d \pm \Delta_\Sigma) + S_{min}, \quad (2.34)$$

где: d – диаметр вала; Δ_Σ – суммарная погрешность средства измерения.

Выразив из выражения (2.34) минимальный зазор получим:

$$S_{min} = D_k - (d \pm \Delta_\Sigma), \quad (2.35)$$

Для данного случая размер замыкающего звена будет:

$$A_\Delta = S_{min} \quad (2.36)$$

Поскольку при изготовлении неизбежно возникают отклонения, а полученный зазор должен быть больше минимального то выражение (2.36) примет вид:

$$A_\Delta = S_{min} + IT_k, \quad (2.37)$$

где: IT_k – допуск на изготовления компенсирующей детали.

Учитывая равенство между начальным зазором ($S_{нач}$) и размером замыкающего звена при цифровой сборке объединив выражения (2.36) и (2.37), получим:

$$S_{нач} = D_k - (d \pm \Delta_\Sigma) + IT_k, \quad (2.38)$$

Для многоопорных валов размеру каждой опорной шейки будет соответствовать свой размер втулки (рис. 2.21).

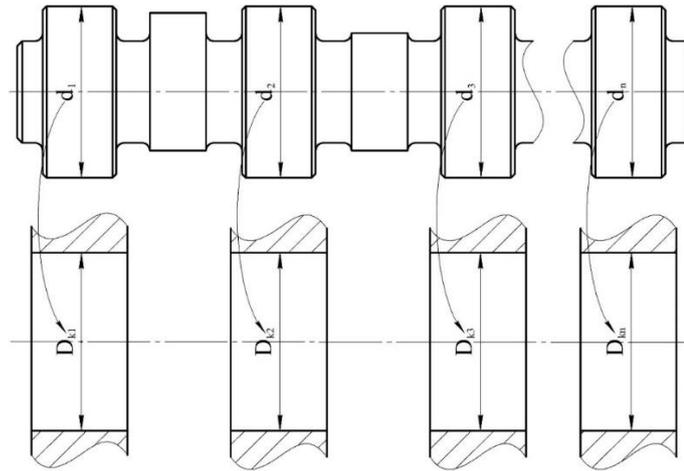


Рисунок 2.21 – Соответствие размеров базовой и компенсирующей детали многоопорного вала

В соединении «распределительный вал – втулка» двигателя компенсирующей деталью будет являться последняя поскольку за счет большой толщины стенки она позволяет осуществлять компенсацию в широком диапазоне. Более сложный с точки зрения достижения требуемой точности процесс расточки в настоящее время нивелируется за счет современного оборудования, позволяющего производить данную операцию с высокой точностью даже в сложных условиях.

Для выполнения компенсационной функции необходимо изменение допуска на размер втулки относительно метода полной взаимозаменяемости (рис. 2.15), схема расположения изменённых полей допусков представлена на рисунке 2.22.

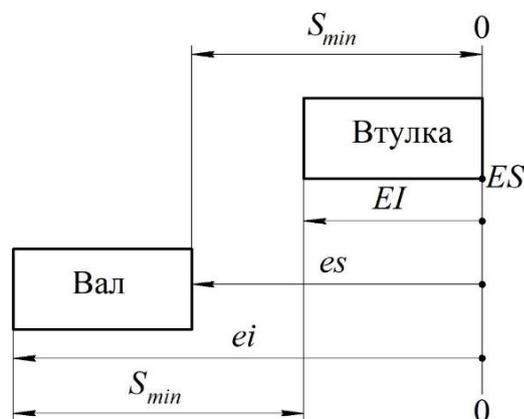


Рисунок 2.22 – Схема расположения полей допусков при цифровом подборе

Для гарантированного получения минимального зазора в соединении данный метод предъявляет повышенные требования как к производственным процессам, так и к оборудованию, реализовать которые невозможно без внедрения цифровых технологий позволяющих: организовать непрерывное прослеживание детали в процессе обработки, стабилизировать и повысить производительность процессов, производить контрольно-измерительные операции с высокой точностью, а также собирать, хранить и анализировать большие объёмы данных.

Рассеяния зазоров для данного соединения при применении цифрового подбора представлено на рисунке 2.23.

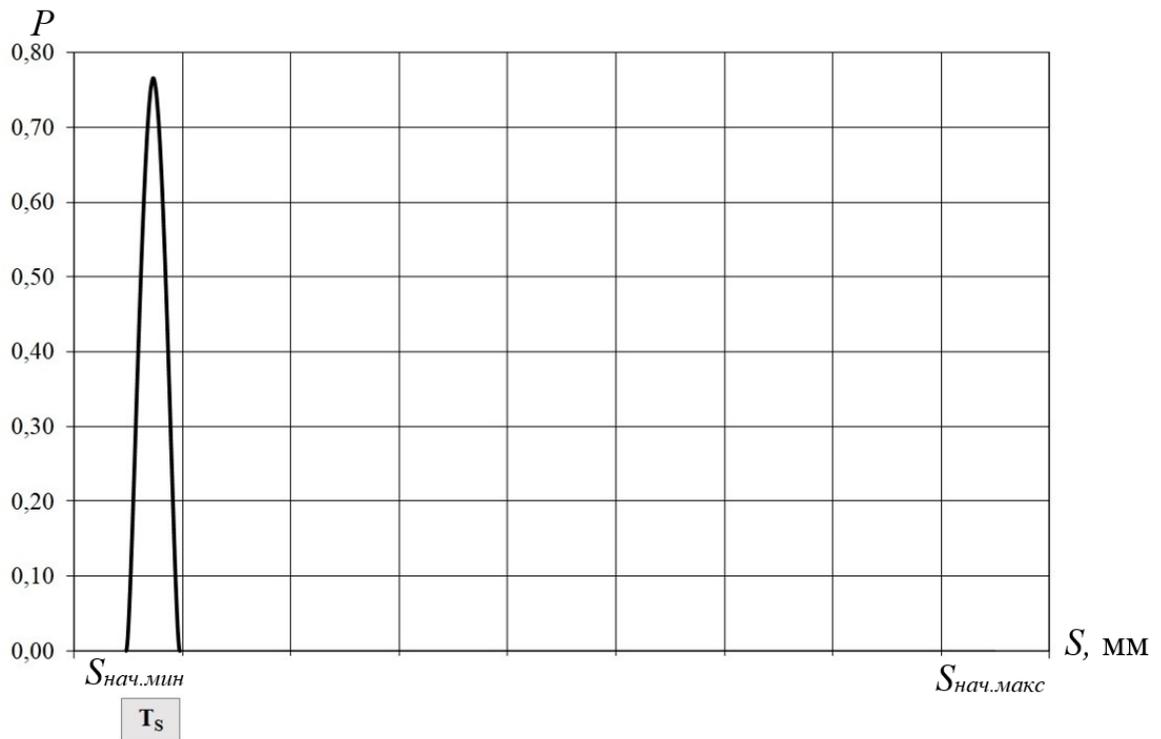


Рисунок 2.23 – Рассеяния зазоров при применении цифрового подбора

Исходя из рассеяния, представленного на рисунке данный метод позволяет приблизиться к значению минимального начального зазора.

Для установления метода позволяющего достичь наибольшего запаса на износ необходимо провести анализ получаемых зазоров (рис. 2.24).

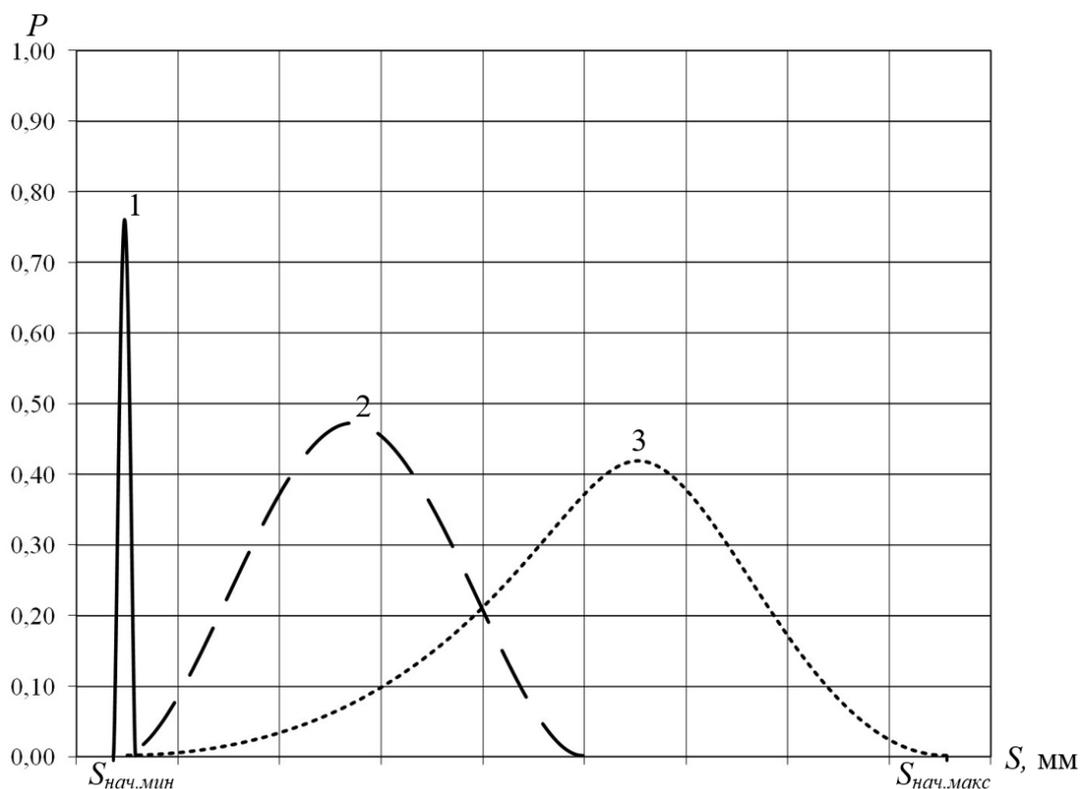


Рисунок 2.24 – Рассеяния полученных зазоров при использовании точностных методов: 1- цифрового подбора, 2- селективной сборки, 3- полной взаимозаменяемости

В результате проведённого сравнительного анализа установлено, что наименьшим рассеянием, позволяющим получить наибольший запас на износ обладает метод цифрового подбора.

Для проведения оценки надежности соединения, полученного согласно представленным точным методам, были построены модели параметрического отказа, представленные на рисунке 2.25.

Равные значения зон параметрического отказа $F(t)$ достигается при разных значениях наработки T в зависимости от методов взаимозаменяемости. Исходя из приведённого сравнения видно, что наименьшее значение наработки получается при использовании метода полной взаимозаменяемости, а небольшая при цифровом подборе.

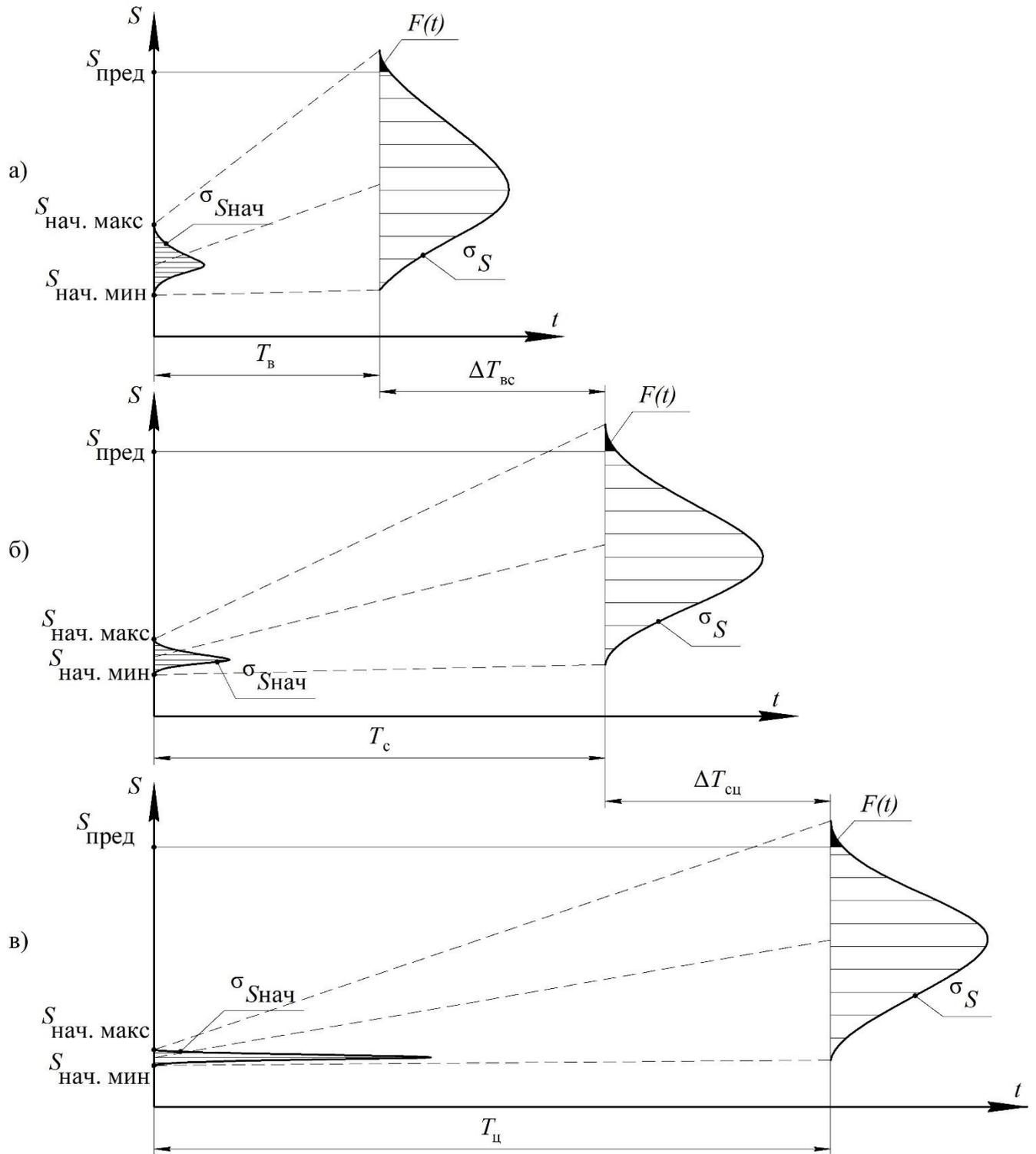


Рисунок 2.25 – Сравнение моделей формирования параметрического отказа различных точностных методов: а- полной взаимозаменяемости, б- селективной сборки, в- цифрового подбора

При использовании метода цифрового подбора для реализации компенсирующей функции втулкам требуется большой запас на механическую обработку

из-за чего невозможно использовать серийно производимые, но появляется возможность по повторному использованию изношенных и прошедших восстановления с уменьшением внутреннего диаметра.

2.3 Выбор методов восстановления с учетом допусков элементов деталей

Повышение долговечности соединения возможно повышением износостойкости трущихся поверхностей и совершенствованием технологии обработки деталей для получения наибольшего запаса на износ.

Существует большое количество способов обеспечения износостойкости поверхностей деталей, которые применяются как при изготовлении, так при ремонте техники, но повышение срока службы нескольких соединений, входящих в сборочную единицу, не приводит к увеличению его ресурса в целом, поскольку другие соединения будут являться сдерживающими факторами.

Сборочные единицы обычно поступают в ремонт с частично изношенными деталями, которые не достигли предельного износа, и имеется запас материала позволяющий провести обработку под ремонтный размер. В соединении вал – втулка наиболее износостойким является вал, который как правило имеет несколько ремонтных размеров. При восстановлении деталей особое значение приобретает точность обработки, повышение которой увеличивает долговечность соединения, но при этом могут возрасти трудовые и экономические затраты. Значительную долю затрат от себестоимости восстановления детали может занимать механическая обработка [160].

Из этого следует, при выборе способа восстановления необходимо руководствоваться получаемым ресурсом соединения относительно ресурса сборочной единицы, а также экономической целесообразностью.

Помимо восстановления изношенных деталей применяют замену одной изношенной детали, входящей в соединение. Подобный подход приводит к увеличению скорости изнашивания соединения в 1,3...1,9 раза и снижению его ресурса до 60 % [160]. Из этого следует, что для обеспечения достаточного послеремонтного ресурса необходимо проводить замену всех деталей, входящих в соединения.

Данный способ, как было указано ранее, не приведет к увеличению ресурса всей сборочной единицы и приемлем при обнаружении брака, в частности, при отзывных компаниях изготовителя или при исчерпании ресурса соединения.

Исходя из этого, при наличии достаточного ресурса соединения целесообразно применение различных способов восстановления деталей. Подвижные соединения состоят из двух деталей (вал и отверстие), для которых необходимо производить выбор рациональных способов восстановления, учитывая точностные и экономические показатели.

В общем виде стоимость восстановления элементов i -го соединения представляет собой сумму затрат на восстановление Z_{ei} и последующую обработку Z_{oi} , которая должна быть минимальной при заданной вероятности безотказной работы $P(t)$ и нормируемом ресурсе t . В общем виде данное выражение можно представить как:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(t); \\ t = const; \\ T_{Ki} = T_{di} + T_{Di} \Rightarrow Z_{oi} = Z_{doi} + Z_{Doi}; \\ Z_{ei} = Z_{dei} + Z_{Dei}; Z_i = Z_{oi} + Z_{ei}; \\ q_i = \frac{Z_i}{t} \Rightarrow min. \end{array} \right. , \quad (2.39)$$

где T_{Ki} – конструктивный допуск посадки; T_{di} и T_{Dj} – допуски на обработку вала и отверстия; Z_{oj} – затраты на обработку соединения; Z_{doi} – затраты на обработку вала; Z_{Doi} – затраты на обработку отверстия; Z_{ei} – затраты на восстановление сочетанием способов для вала и отверстия; Z_{dei} – затраты на восстановление вала; Z_{Dei} – затраты на восстановление отверстия; Z_i – затраты на ремонт соединения сочетанием способов; Z_{oi} – затраты на восстановление; Z_{ei} – затраты на последующую обработку; q_i – коэффициент минимизации затрат.

На рисунке 2.26 представлена модель определения взаимосвязи между стоимостью ремонта i -го соединения и конструктивным допуском посадки. Примем для вала количество способов восстановления – N , для отверстия – M соединений, ко-

торые соответственно, характеризуются затратами на восстановление Z_{dei} и Z_{Dei} . Сочетанием которых получится MN восстановленных соединений, которые будут иметь свои характеристики процесса старения $U_i(t)$ и $\sigma_{ui}(t)$.

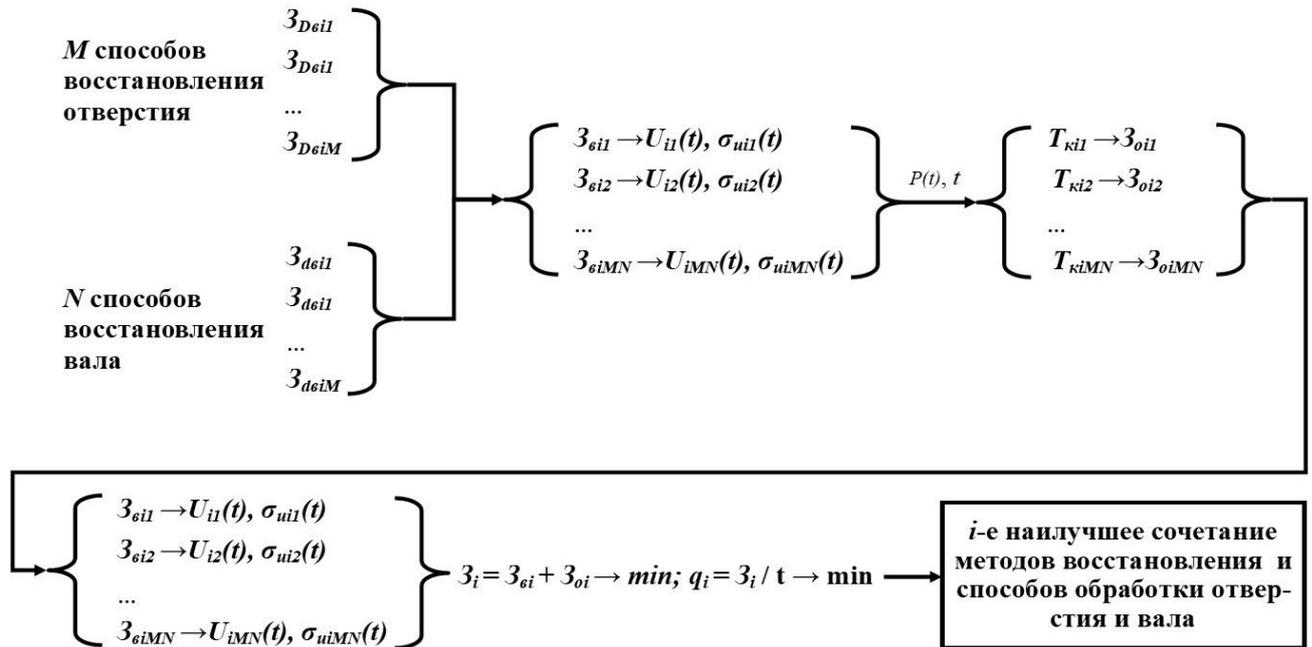


Рисунок 2.26 – Модель оптимизации стоимости восстановления и обработки отверстия и вала, образующих соединения, при заданном ресурсе и $P(t)$

Исходя из этого наилучший способ восстановления для соединения распределительный вал – втулка с точки зрения минимизации затрат при условии обеспечения нормируемого ресурса безотказной работы получается при механической обработке опорных шеек вала под ремонтный размер, а для восстановления втулок применяется комбинированный метод.

2.4 Определение оптимальных конструктивных параметров обжимной матрицы при объемном обжатии.

Рекомендации исследователей [2, 4, 91, 100, 104, 105, 110, 134, 171, 176] по восстановлению изношенных поверхностей бронзовых втулок, применяемых в качестве подшипников скольжения, методом объёмного обжатия не находят широкого практического применения из-за отсутствия конкретных конструктивных решений обжимной части приспособления, а именно обжимной матрицы.

Конструктивная схема типовой обжимной матрицы показана на рисунке 2.1.

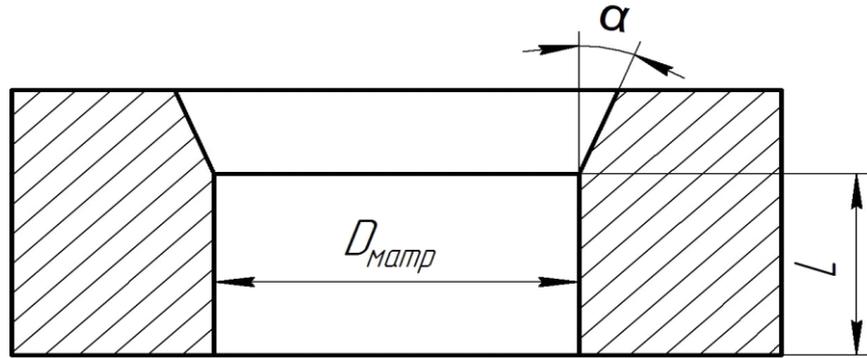


Рисунок 2.27 – Конструктивные параметры обжимной матрицы

Её основными конструктивными параметрами являются:

- угол конусности части матрицы - α , град.;
- внутренний диаметр матрицы - D , мм;
- длина цилиндрического деформирующего пояса - L , мм.

Как показывает практика, при применении такой конструктивной схемы обжимной матрицы зачастую не учитывается влияние конструктивных элементов матрицы при объёмном обжатии втулок с различными геометрическими параметрами.

Основными параметрами восстанавливаемой втулки приняты:

- Δ - отношение толщины стенки втулки S к величине её наружного диаметра – $D_{\text{нар}}$;
- длина втулки l .

Известно, что технология применения объёмного обжатия пустотелых цилиндрических деталей (втулок) ограничивается из-за образования в процессе объёмного обжатия складок по длине втулки (складкообразование) в зоне воздействия на металл пластической деформации. Данное явление называется потерей устойчивости материала детали в процессе объёмного пластического деформирования.

Исследования ряда авторов [1, 2, 4, 68] показывают, что складкообразование зависит от степени деформации металла, угла заходной части обжимной матрицы и относительной толщины стенок втулок Δ ($S/D_{\text{нар}}$). Известны некоторые экспериментальные исследования по объёмному обжатию втулок из цветных металлов, но они даны по результатам объёмного обжатия втулок из латуни, меди, алюминия.

До настоящего времени нет теоретических и экспериментальных исследований объёмного обжатия бронзовых втулок и, конкретно, бронзовых оловянистых втулок из материала Бр.О5Ц5С5.

Степень деформации при объёмном обжатии оценивается коэффициентом обжатия $K_{обж}$. Данный коэффициент представляет собой отношение средних диаметров недеформированного и деформированного образцов:

$$K_{обж} = \frac{D_{ср}}{D_{ср}^{обж}} \quad (2.40)$$

где $D_{ср}$ – средний диаметр втулки до объёмного обжатия, мм; $D_{ср}^{обж}$ – средний диаметр втулки после объёмного обжатия, мм.

Средний диаметр втулки определялся как полусумма наружного и внутреннего диаметров.

Для определения степени деформации материала втулки используется обратная величина коэффициента обжатия.

$$K_{обж.обр} = \frac{1}{K_{обж}} \quad (2.41)$$

Степень деформации материала втулки ψ определяется как:

$$\psi = (1 - K_{обж.обр}) \cdot 100\% \quad (2.42)$$

Очевидно, что степень деформации достигает своей наибольшей величины, когда коэффициент обжатия будет предельно допустимым.

Величина предельно допустимого коэффициента обжатия $K_{пред}$ зависит от целого ряда факторов, главные из которых следующие:

- механические характеристики материала детали;
- величина сил трения на поверхности контакта детали и матрицы;
- угол конусности обжимной матрицы.

Обобщение данных исследований по складкообразованию полых цилиндрических стальных деталей позволило вывести формулу определения величины максимальной степени деформации при объёмном обжатии бронзовых втулок из материала Бр.О5Ц5С5 в момент потери устойчивости. Данная формула имеет вид:

$$\Psi = \varphi \sqrt{\frac{\cos \alpha}{1 + \mu \cdot \operatorname{ctg} \alpha}} \cdot 100\% \quad (2.43)$$

где φ – коэффициент, учитывающий материал втулки, $\varphi=1,25$; α – угол заходной части обжимной матрицы, град.

2.4.1 Оценка влияния конструктивного параметра бронзовой втулки

Величина степени деформации металла при объемном обжатии зависит также от основного конструктивного параметра втулки – величины Δ - отношения толщины стенки втулки S к величине наружного диаметра $D_{\text{нар}}$. Как показал анализ конструктивных параметров бронзовых втулок, величина Δ колеблется в пределах 0,06 - 0,10 с толщиной стенки от 4-х до 8 мм. Конструкции таких бронзовых подшипников скольжения составляют до 80% всех конструкций данного типа втулок.

При изучении математических моделей, описывающих напряжения и деформации при объемном обжатии полых цилиндрических деталей типа втулок (Кочкин В.А., Перлин И.Н., Губкин С.И., Емельяненко П.Т.), была принята формула, определяющая условие устойчивости при объемном обжатии в зависимости от величины Δ и угла конусности α матрицы с учетом разности втулок не более 5%:

$$\Delta = S/D_{\text{нар}} \geq 0,125 \operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \alpha / 2 / 6 \cdot \cos \alpha \quad (2.44)$$

На основании данной формулы была построена графическая зависимость между величиной α матрицы и Δ и определены область получения складкообразования при объемном обжатии втулок и область, позволяющая производить объемное обжатие без возникновения потери устойчивости (рис. 2.28).

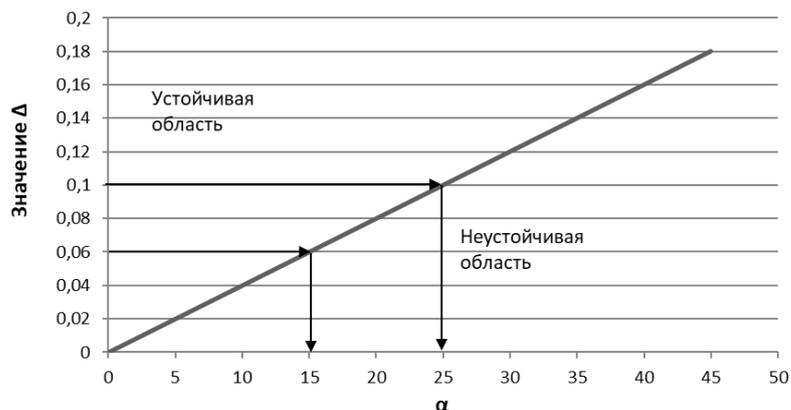


Рисунок 2.28 – Графическая интерпретация зависимости 2.43

В результате анализа данного графика можно сделать следующие выводы:

1. Для малых значений Δ успешное объемное обжатие может осуществляться при углах заборной части обжимной матрицы до 10 градусов.
2. При Δ более 0,06 объемное обжатие бронзовых втулок может осуществляться при α до 40 градусов.

2.4.2 Определение зависимости изменения внутреннего размера втулки от изменения наружного размера при ее объемном обжатии

Как известно, при объемном обжатии наружной поверхности бронзовой втулки происходит уменьшение величины наружного диаметра втулки с одновременным уменьшением величины внутреннего диаметра [35].

Характер зависимости между изменением наружного и внутреннего размеров бронзовой втулки при её объёмном обжатии с учётом величин конструктивного параметра Δ и внутреннего диаметра обжимной матрицы $D_{\text{матр}}$ до настоящего времени не исследовались.

Для определения характера такой зависимости были проведены эксперименты по объёмному обжатию бронзовых втулок из материала БрО5Ц5С5 с конструктивным параметром $\Delta = 0,06$, $\Delta = 0,08$, $\Delta = 0,01$ и толщиной стенки 4 и 6 мм.

В таблице 2.2 представлены исходные размеры втулок для проведения эксперимента.

Таблица 2.2 – Размеры втулок для объёмного обжатия

Толщина стенки S, мм	$D_{\text{нар}}$, мм	$D_{\text{вн.}}$, мм	$\Delta = S / D_{\text{нар}}$
4	40	32	0,1
	49	41	0,08
	65	57	0,06
6	60	48	0,1
	75	63	0,08
	100	88	0,06

Схема объёмного обжатия втулки и изменения ее размеров приведена на рисунке 2.29.

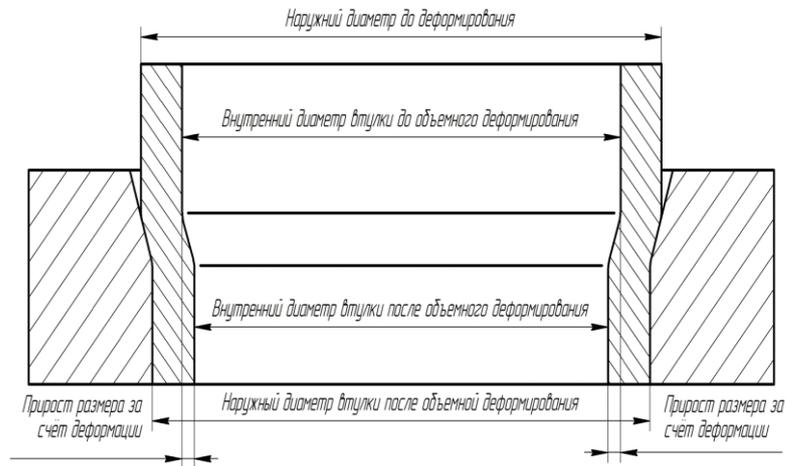


Рисунок 2.29 – Схема объёмного обжатия втулки

2.4.3 Определение зависимости изменения наружного и внутреннего диаметров втулки от технологических параметров объёмного обжатия

Для сохранения единой оценки приложения усилия на деформируемый слой металла втулки с разной величиной толщины ее стенки и ее наружного диаметра было принято постоянное соотношение размера диаметра матрицы $D_{\text{матр}}$ и размера наружного диаметра втулки $D_{\text{нар}}$. Данное соотношение обозначалось символом β .

$$\beta = \frac{D_{\text{матр}}}{D_{\text{нар}}} \quad (2.45)$$

Для экспериментов были приняты четыре величины β , которые для всех групп втулок составляли 0,92; 0,94; 0,96; 0,98.

Для опосредованной оценки степени деформации при объёмном обжатии втулок была принята величина «натяг обжатия» ΔH , которая характеризовалась как разница между размером наружного диаметра втулки и внутренним диаметром обжимной матрицы $D_{\text{матр}}$.

$$\Delta H = D_{\text{нар}} - D_{\text{матр}} \quad (2.46)$$

При проведении экспериментов были приняты следующие значения ΔH : 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 мм.

Так как характер взаимного изменения величины наружного и внутреннего диаметров втулок при их объёмном обжатии для принятых групп втулок был одинаков, то ниже представлены результаты экспериментов объёмного обжатия втулок с толщиной стенки 7 мм при $\Delta = 0,1$.

2.4.4 Определение оптимальной длины цилиндрического пояска деформирующей матрицы

При перемещении втулки через обжимную матрицу (рис. 2.30) поршень пресса преодолевает силу трения $F_{тр}$ поверхности втулки о стенку матрицы, величина которой зависит от усилия обжатия металла втулки в процессе его пластического деформирования [35].

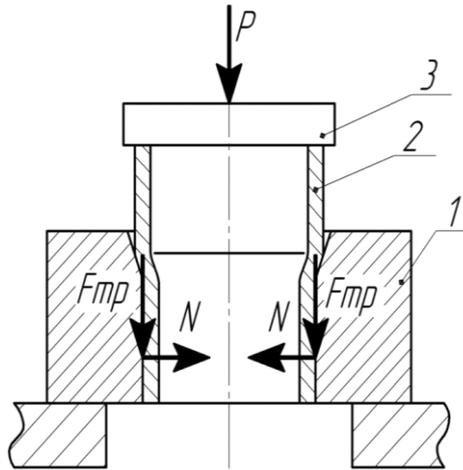


Рисунок 2.30 – Схема установки для объёмного пластического деформирования: 1 - матрица; 2 - втулка; 3 - оправка

Усилие обжатия N определяется как

$$N = \pi \cdot D_{нар} \cdot L \cdot \sigma_T \quad (2.47)$$

где L - длина цилиндрического пояска деформирующей матрицы, мм; σ_T - предел текучести, МПа.

Сила трения определяется как:

$$F_{тр} = \mu \cdot N \text{ или } \mu \cdot \pi \cdot D_{нар} \cdot L \cdot \sigma_T, \quad (2.48)$$

где μ - коэффициент трения втулки по стенке матрицы.

Отсюда длина цилиндрического пояска деформирующей матрицы:

$$L = \frac{F_{\text{тр}}}{\mu \cdot \pi \cdot D_{\text{нар}} \cdot \sigma_{\text{T}} \cdot 10^5}, \quad (2.49)$$

Усилие прессы преодолевает силу трения при проталкивании втулки через обжимную матрицу, т.е.

$$P_{\text{прес}} = F_{\text{тр}}, \quad (2.50)$$

2.4.5 Определение диаметра деформирующей части матрицы для объемного деформирования втулки с различной величиной изнашивания внутренней поверхности

Как было сказано выше, конструкция бронзовых подшипников скольжения с конструктивным параметром Δ в пределах 0,06-0,10 и с толщиной стенки от четырёх до восьми мм составляет до 80% всех конструкций данного типа втулок.

В соответствии с техническими требованиями на выбраковку таких подшипников скольжения она осуществляется при износе внутренней поверхности в пределах 0,10-1,5 мм на диаметр.

Согласно нормативным документам [7] величина припуска на механическую обработку внутренних диаметров бронзовых деталей (расточивание) составляет 0,20-0,35 мм на сторону.

Следовательно, при восстановлении изношенной внутренней поверхности бронзовой втулки необходимо уменьшение изношенного внутреннего диаметра на величину:

$$\Delta d_{\text{расч}} = U + \Pi, \quad (2.51)$$

где U – величина изнашивания внутренней поверхности бронзовой втулки, мм; Π – припуск на механическую обработку для получения чертёжного размера внутреннего диаметра втулки.

Если принять максимальную выбраковочную величину изнашивания для рассматриваемых типов гладких бронзовых подшипников скольжения равной 1,5 мм на диаметр, а припуск на механическую обработку 0,7 мм, то

$$\Delta d_{\text{расч.}} = 1,5 + 0,7 = 2,2 \text{ мм} \quad (2.52)$$

Таким образом, чтобы восстановить изношенную бронзовую втулку под чертёжный размер при максимальном износе до 1,5 мм на диаметр выше указанного их размерного диапазона, необходимо наружную поверхность втулки обжать с таким усилием, чтобы диаметр изношенной внутренней поверхности втулки уменьшился практически до 2,2 мм.

Ниже представлен график выбора величины уменьшения внутреннего диаметра втулки в зависимости от величины его изнашивания (рис. 2.31).

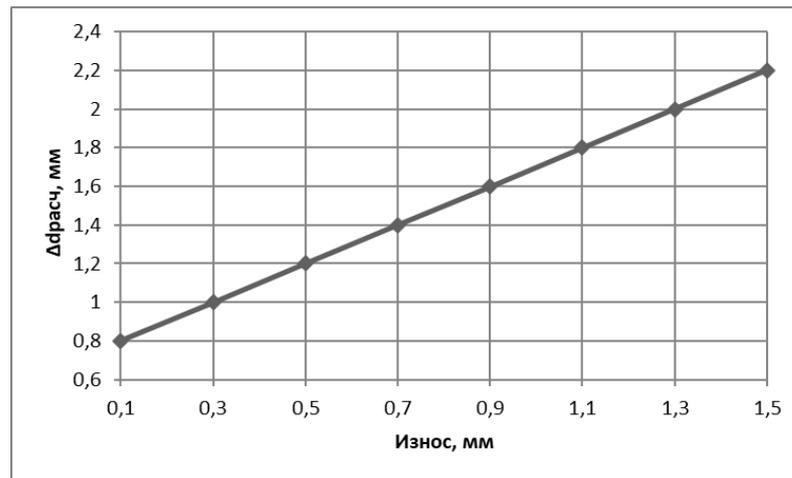


Рисунок 2.31 – Определение величины уменьшения изношенного внутреннего диаметра втулки от величины ее изнашивания

Согласно выражению 2.8 величина обжатия наружного диаметра втулки будет равна $\Delta d_{расч}$. Таким образом, не учитывая незначительное увеличение наружного диаметра втулки после объемного обжатия за счет упругих деформаций, внутренний диаметр обжимной матрицы можно определить, как:

$$D_{матр} = D_{нар} - \Delta d_{расч} \quad (2.53)$$

2.5 Теоретические расчёты возможности электроконтактного напекания стальных порошков на бронзовые детали

Проведённые исследования [10, 11, 60, 82, 117, 120, 121, 141, 168], в которых рассмотрены вопросы применения электроконтактного напекания, не позволяют теоретически обосновать применение порошков из стальных материалов при их электроконтактном напекании на бронзовую поверхность.

Во время проведения электроконтактного напекания порошковых материалов возникают трудности, связанные со следующими особенностями:

- пониженной свободной энергией компонентов порошка;
- разными диаграммами состояний компонентов напекаемого порошка;
- торможением процессов усадки в многокомпонентных системах, связанным с гетеродиффузией;
- интенсивным охлаждением из-за водоохлаждаемых электродов.

Учитывая результаты экспериментов и работы других исследователей [9,11,121,122, 152, 164] для уменьшения влияния приведённых выше особенностей на качество напечённого слоя была использована графитовая оболочка. Во время проведения электроконтактного напекания графитовая оболочка нагревалась одновременно с напекаемым порошком, обеспечивая при этом равномерность нагрева и поддержание оптимального температурного диапазона при напекании. Во время охлаждения графитовая оболочка обеспечивала плавное снижение температуры.

Для решения задачи по определению необходимого количества теплоты во время проведения электроконтактного напекания стальных порошков на изношенную поверхность бронзовой детали была принята система «порошок - деталь» как плоский слой, ограниченный в прямоугольной системе координат параллельными плоскостями $Z = 0$ и $Z = h$ (где h – расстояние между электродами сварочной машины). Тепловой поток в такой системе пространственный.

Принимая, что границы напекаемого порошка и детали не искажают теплового потока, а при применении графитовой оболочки искажения происходят, то в общем виде, согласно теории сварочных процессов при точечной сварке, количество теплоты, необходимое для осуществления процесса ЭКН, можно записать как

$$Q = T_{(R,t)} c g (4\pi a t)^{3/2} e^{-\frac{R}{4at}}, \quad (2.54)$$

где T - температура в K° (рассматриваемой точке), находящейся на расстоянии R в см от точки O (начала координат) через t (с) от момента внесения тепла; c – удельная теплоемкость тела, Дж/ K° ; g – плотность тела, г/ $см^3$; a – коэффициент температуропроводности, Вт/ K° ; e – основание натуральных логарифмов.

Распространение теплоты в системе «порошок-деталь» в выбранной системе координат можно описать уравнением теплопроводности:

$$Q(x, y, z, t) = C\gamma \frac{dT}{dt} - \lambda \left(\frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} \right) T, \quad (2.55)$$

где: $C\gamma$ - объемная теплоемкость, Дж/К°; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(см К); T - температура нагрева системы, К°.

Приведенное уравнение теплопроводности составлено с учетом, что:

1) коэффициенты λ для порошка и детали равны, так как они выполнены из одного материала и в расчетах величина его принималась в пределах 40 - 42 Вт/(см К);

2) коэффициент λ был принят постоянным независимо от температуры нагрева системы.

Учитывая известную функцию Грина для точечного источника теплоты, температурное поле для системы «порошок-деталь» будет иметь вид:

$$T(x, y, z, t) = \frac{Q}{c\gamma(4\pi a)^{\frac{3}{2}}(\pi r_0)^2} \int_{-\infty}^1 \frac{d\tau}{(t-\tau)^{2/3}} \cdot \exp\left[-\frac{z^2}{4a(t-\tau)}\right] \cdot d\xi \cdot d\eta \cdot \exp\left\{-\frac{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]}{(4a(t-\tau)) - \beta[(\xi-\xi(\tau))^2 + (\eta-\eta(\tau))^2]}\right\}, \quad (2.56)$$

где: $\xi(\tau)$ и $\eta(\tau)$ - координаты центра теплового потока.

Интегралы по ξ , и η вычисляются аналитически. В результате расчетов выражение для температуры получается в виде однократного интеграла по τ . После линейного преобразования переменной интегрирования выражение для определения температуры нагрева будет иметь вид:

$$T(x, y, z, t) = \frac{Q}{2\lambda\pi^{2/3}r_0} \cdot \int_0^\infty \frac{d\tau}{\tau^{1/2}(\tau+1)} \cdot \exp\left\{-\frac{z^2}{4a(t-\tau)}\right\} \cdot d\xi d\eta \cdot \exp\left\{-\frac{[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]}{4a(t-\tau)} - \beta[(\xi-\xi(\tau))^2 + (\eta \pm \eta(\tau))^2]\right\} \quad (2.57)$$

Данная формула служит основой для построения алгоритма вычисления температурных полей.

Для вычисления температурных полей необходимо установить величину верхнего предела интегрирования и шага интегрирования. Критерием ограничения служат значения мощности сварочной машины, которые колеблются от 3 до 16 кВт.

Как известно, при электроконтактном напекании стальных порошков с помощью сварочных машин основными параметрами процесса электроконтактного напекания для получения необходимой величины теплоты для напекания порошка на поверхность детали являются сила тока J (А) и длительность импульса протекания тока t (с.). Но электроконтактное напекание металлических порошков на поверхность детали сопровождается одновременно приложением усилий для пластического деформирования зерен порошка и их диффузии в поверхностный слой детали. Согласно теории сварочного процесса для процессов, характеризующих эти условия, необходимую величину теплоты для осуществления процесса ЭКН можно выразить как [11]:

$$Q_H = \frac{J^2 \sqrt{t_{\text{нач}}} (R_{\text{П}} + R_{\text{Д}})}{4m \sqrt{\lambda \cdot \gamma \cdot c \cdot S}} + \frac{P \cdot h}{4m \sqrt{\lambda \cdot \gamma \cdot c \cdot \sqrt{t_{\text{ос}}}}} + \frac{J^2 \cdot \rho_0 \cdot h_0 \cdot \sqrt{t}}{2m \cdot \sqrt{\lambda \gamma c}}, \quad (2.58)$$

где: J - сила тока, А; $t_{\text{нач}}$ - начальная температура «порошок-деталь», К°; $R_{\text{П}}, R_{\text{Д}}$ - изменяющиеся в процессе нагрева электрические сопротивления контакта «электрод-порошок» и «деталь-порошок», Ом; m - насыпная масса порошка, г; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м·К.

В процессе электроконтактного напекания порошкового материала происходит уплотнение порошка. В первоначальный момент электрод сварочной машины однократно прессует насыпанный слой порошка с усилием, установленным в соответствии с режимом напекания. Спрессованный слой (холодное прессование) характеризуется определенной плотностью, электрическим сопротивлением и толщиной. При протекании импульса тока слой порошка разогревается, дополнительно уплотняется под действием приложенного усилия на электрод, который под действием этого усилия перемещается на определенную величину ΔL . Одновре-

менно происходит спекание зерен порошка между собой и припекание слоя порошка к поверхности детали. Таким образом, уплотнение порошкового слоя при напекании можно оценить величиной относительной усадки [11]:

$$\Delta h = \frac{h_0 - h_k}{h_0} = 1 - \frac{h_k}{h_0}, \quad (2.59)$$

где: Δh - относительная усадка слоя; h_0 - исходная толщина порошкового слоя, мм; h_k - толщина покрытия, мм.

Величина усадки зависит от толщины наносимого покрытия, гранулометрического состава порошка, а также от режимов процесса напекания.

При воздействии электрического тока на спрессованный порошковый слой в нем меняются электрические константы (удельные сопротивления и др.), которые приводят к изменению теплового поля в сторону его увеличения в зоне напекания порошка на деталь, вследствие чего сокращается время прохождения импульса тока через систему «порошок-деталь».

Объединяя выражения и учитывая свойства спрессованного слоя, можно утверждать, что необходимое тепловое поле в зоне напекания порошка на деталь с большой степенью вероятности определяется выражением:

$$Q = \int_0^\tau \int_0^t \int_V i^2(\tau) \cdot \rho(V \cdot t) d\tau \cdot dt \cdot dV, \quad (2.60)$$

где i - плотность тока; ρ - сопротивление материала в исследуемом объеме (V); τ , t - координаты времени и температуры.

Исходя из данного выражения параметр температуры напекания будет определяться как:

$$t_1(x, \tau) = \frac{W_1}{\lambda_1 \gamma_1} \theta(\eta, \tau) \left\{ \frac{\delta^2 - x^2}{2a_1} + \frac{k_\eta k_\xi \delta l_3}{\sqrt{a_1 a_2}} \cdot \left(1 - \frac{1}{B_i} \right) + W \cos \beta k_a - k_x \cdot l^{-\beta^2 F_{01}} \right\}, \quad (2.61)$$

где: τ - длительность импульса тока; W - теплота, выделяемая в единицу времени в единице объема при прохождении тока через деталь; K - коэффициент, учитывающий отношение теплофизических свойств материала детали и напекаемого порошка.

Выводы по главе 2

1. На минимальную толщину масляного слоя между втулкой и валом оказывают влияние такие факторы как: конусообразность, отклонение от соосности, отклонение формы вала и втулки, а также величина биения вала.
2. В месте наибольшего сближения вала и втулки должно выполняться условие, что максимальное значение наименьшей толщины масляного слоя должно превышать критическое значение.
3. Минимальный зазор в соединении вал – втулка должен быть не меньше максимального значения наименьшей толщины масляного слоя.
4. Для обеспечения необходимого зазора между валом и втулкой можно использовать такие методы как полной взаимозаменяемости, селективной сборки и цифрового подбора.
5. Метод полной взаимозаменяемости позволяет обеспечить наилучшие показатели по собираемости соединения при относительно большом допуске, облегчающем производство деталей, однако отрицательно сказывается на ресурсе соединения.
6. Селективная сборка позволяет уменьшить рассеяния размеров деталей, входящих в соединение и как следствие, стабилизировать его ресурс. В то же время при практическом применении данный метод предъявляет повышенные требования к посадочным местам втулок и качеству обработки самих втулок, чтобы исключить необходимость механической обработки после их установки.
7. Предлагаемый метод цифрового подбора позволяет добиться необходимого зазора при наибольшем ресурсе соединения за счет смещения допуска компенсирующей детали относительно базовой, но предъявляет повышенные требования как к производственным процессам, так и к оборудованию которые невозможно выполнить без внедрения цифровых технологий. Применение данного метода требует значительного запаса на механическую обра-

ботку внутреннего диаметра втулки, что не позволяет использовать производимые серийно, но в то же время открывает возможности по использованию втулок, прошедших восстановление с уменьшением внутреннего диаметра.

8. Разработанная модель определения взаимосвязи между стоимостью ремонта соединения двух деталей и конструктивным допуском посадки позволила определить, что наиболее рациональным способом восстановления вала является его обработка под ремонтный размер, а для втулки – комбинированный метод.
9. В процессе обжата тонкостенных бронзовых втулок происходит потеря их устойчивости (складкообразование) при малых значениях степени деформации.
10. Значения угла α обжимной матрицы незначительно влияют на процесс пластической деформации втулок из оловянистой бронзы.
11. На выбор величины степени деформации оловянистой бронзы при её объёмном обжате существенно влияет величина коэффициента трения.
12. Диаметр обжимной матрицы определяется как разность между наружным диаметром втулки до обжата и суммой величины изнашивания внутренней поверхности бронзовой втулки и припуском на механическую обработку для получения номинального размера внутреннего диаметра втулки.
13. При напекании металлического порошка с использованием изоляционной оболочки происходит искажение температурных полей и снижаются температурные потери.
14. Помимо электрических характеристик при напекании важную роль играет и давление, оказываемое электродами на металлический порошок поскольку оно должно обеспечивать непрерывное протекание электрического тока, а также производить уплотнение расплавляемого порошка.

Глава 3. Общая методика исследований влияния обжата и параметров напекания стального порошка

Общая методика включает в себя методику получения и изучения физико-механических свойств восстанавливаемой бронзовой втулки методом объемного обжата с напечённым на наружную поверхность металлическим порошком, а также методику определения геометрических параметров втулки после обжата и изучения микроструктурных изменений бронзового оловянистого сплава после объёмного обжата и напекания металлических порошков [21]. При составлении методики рассматривались следующие вопросы:

- обоснование выбора образца;
- выбор параметров для восстановления внутреннего диаметра втулки методом объёмного обжата;
- исследование изменений геометрических параметров и микроструктурных характеристик после осуществления объёмного обжата бронзовой втулки;
- определение параметров электроконтактного напекания металлических порошков на бронзовую поверхность;
- исследование влияния параметров электроконтактного напекания на физико-механические свойства восстановленной бронзовой втулки;
- проведение лабораторных и стендовых испытаний износостойкости восстановленных бронзовых подшипников скольжения;
- определение эффективности применения разработанной технологии.

3.1 Выбор конструкции и материала образца для проведения исследования

На основании теоретических исследований для проведения экспериментов были изготовлены втулки с конструктивным параметром Δ , характеризующим отношение величины толщины втулки к величине её наружного диаметра, который был принят равным 0,08. Исходя из этого значения и учитывая, что толщина стенок рабочих втулок в основном составляет 4-8 мм, были приняты данные значения длины и соответствующие величины их наружных и внутренних диаметров.

Размеры одного из образцов приведены на рисунке 3.1.

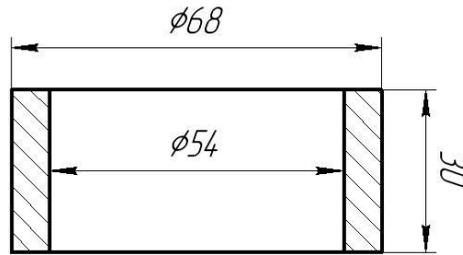


Рисунок 3.1 – Размеры образца

Образцы изготавливались на токарном станке.

3.2 Выбор оснастки и оборудования для проведения объемного обжатия

Объемное обжатие образцов проводилось в приспособлении, конструктивная схема которого представлена на рисунке 3.2. В качестве рабочей части приспособления служила сменная матрица с различными значениями её внутреннего диаметра $D_{\text{матр}}$ (рис. 3.3), установленного на основании теоретических исследований

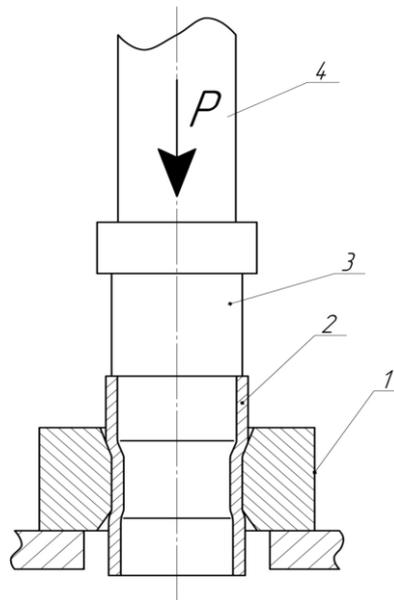


Рисунок 3.2– Схема установки для проведения объемного обжатия образцов:

1 - матрица; 2 - втулка; 3 - оправка; 4 - шток прессы

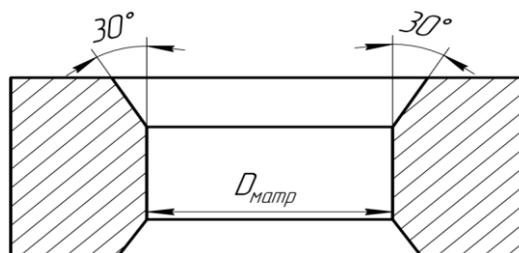


Рисунок 3.3 – Конструкция матрицы

Диаметр самой матрицы определялся из выражения

$$D_{\text{матр}} = D_{\text{нар}} \quad (3.1)$$

Исходя из проведённого анализа материалов, применяемых в конструкциях сельскохозяйственных машин, в качестве материала для проведения исследований была выбрана бронза Бр.О5Ц5С5 ГОСТ 613-79. Химический состав данного сплава приведён в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Химический состав бронзы БрО5Ц5С5

Fe	Si	P	Al	Cu	Pb	Zn	Sb	Sn	Примесей
до 0.4	до 0.05	до 0.1	до 0.05	80.7 - 88	4 - 6	4 - 6	до 0.5	4 - 6	всего 1.3

В результате по данным проведённых теоретических исследований для экспериментов были изготовлены матрицы, обеспечивающие необходимую величину натяга.

Соответствие величины натяга и внутреннего диаметра матрицы представлено в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Соответствие величины натяга и внутреннего диаметра матрицы ($D_{\text{матр}}$)

Величина натяга ΔH , мм	$D_{\text{матр}}$, мм
2	64
1,5	65
1	66
0,5	67

3.3 Исследования геометрических и микроструктурных изменений бронзовых втулок после проведения объёмного обжатия

3.3.1 Исследования геометрических изменений после обжатия

Для оценки изменений геометрических параметров бронзовых втулок после объёмного обжатия проводились измерения длины (в 6 сечениях), наружных и внутренних диаметров (в шести сечениях по окружности, на разной высоте - в трёх сечениях) [32, 153]. Места измерений выбирались в перекрестьях точек сечений. Схема измерений представлена на рисунке 3.4.

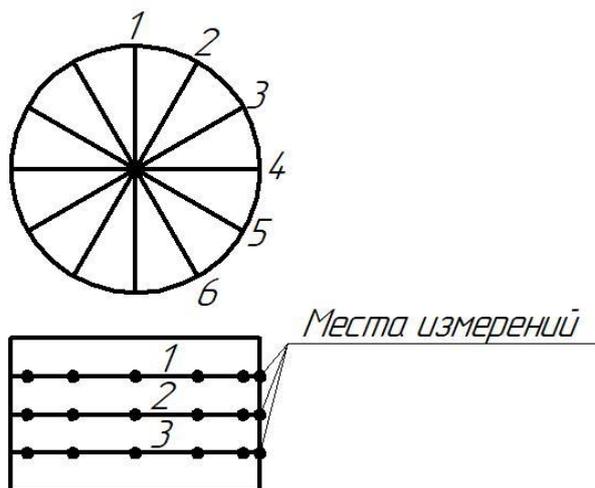


Рисунок 3.4 – Схема измерений

Измерение высоты проводилось в 6 точках по окружности с помощью микрометра серии 331 (номер в Госреестре 74240-19), для измерений внутренних диаметров применялся нутромер НИ-ПТ (номер в Госреестре 93443-24), измерение наружных диаметров осуществлялось с помощью микрометра серии 331 (номер в Госреестре 74240-19).

3.3.2 Исследования микроструктурных изменений после проведения объёмного обжата

Для анализа структурных изменений после проведения объёмного обжата бронзовых втулок проведены микроструктурные исследования [14, 39]. Для проведения микроструктурных исследований были изготовлены микрошлифы по стандартной методике.

Травление проводилось реактивом в составе: 30 мл 10% HCl и 5 гр. FeCl₃. После травления образцы помещались на несколько секунд в 10% HCl, а затем промывались дистиллированной водой и высушивались.

Микроструктурные исследования проводились на металлографическом микроскопе МИМ-6 с цифровым окуляром met-1300 при увеличении в 400 раз (рис. 3.5).

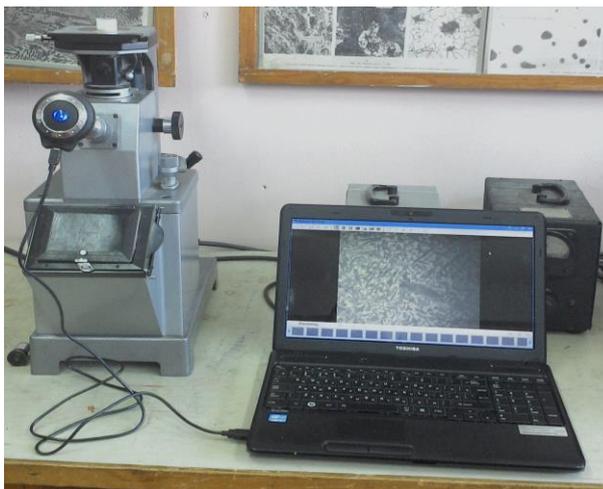


Рисунок 3.5 – Металлографический микроскоп МММ-6 с цифровым окуляром мет-1300

3.4 Определение факторов, влияющих на параметры напекания стального порошка

Для более глубокого понимания изучаемых процессов необходимо установить характерные параметры и факторы, влияющие на них [49, 71, 73, 74].

При восстановлении бронзовых подшипников втулок необходимо получить качественный напечённый слой при наименьших затратах и высокой производительности труда. Для подобного типа задач наиболее целесообразно применить метод многофакторного эксперимента [65, 66, 71, 75, 149]. Данный метод позволяет определить зависимость основного параметра от факторов, которые возникают на разных этапах эксперимента.

Параметрами оценки качества восстановленных втулок являются такие, как поверхностная твёрдость и усилие на срез напечённого слоя. Во время проведения исследований было выявлено, что на данные параметры оказывают влияние факторы, представленные в таблице 3.3. Диапазоны и интервалы изменения факторов представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.3 – Факторы, влияющие на качество напекания

№	Факторы
X ₁	Усилие сжатия электродов (МПа)
X ₂	Температура напекания (°C)
X ₃	Время напекания (с)

Таблица 3.4 – Диапазоны и интервалы изменения факторов

Уровни	Факторы при напекании ПР-Н80Х13С2Р			Факторы при напекании ПХ-30		
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃
Основной	20	1150	70	25	1250	240
Интервал изменения	5	50	10	5	50	10
Верхний	30	1250	90	30	1350	270
Нижний	10	900	40	10	1000	220

За параметры оптимизации (Y) были приняты:

- поверхностная твердость;
- усилие на срез напеченного слоя.

Функциональная зависимость для исследований поверхностной твердости Y₁ и усилия на срез напеченного слоя Y₂ имеет вид:

$$Y_i = (X_1; X_2; X_3), \quad (3.2)$$

где: Y_i - параметр оптимизации.

Каждый опыт проводился с трехкратной повторностью. Применение реплики 2³ позволяло сократить число опытов с 16 до 8, т.е. в два раза.

Для удобства записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных уровни факторов кодировались. В кодированном виде верхний уровень обозначался +1, нижний –1, а основной 0. Кодирование значения факторов X_i определяли по выражению:

$$X_i = \frac{\tilde{X}_i - \tilde{X}_{i0}}{\varepsilon_i}, \quad (3.3)$$

где: X_i – кодированное значение i-го фактора; \tilde{X}_i – натуральное значение i-го фактора; \tilde{X}_{i0} – натуральное значение основного уровня i-го фактора; ε_i – интервал варьирования i-го фактора.

Для получения уравнения регрессии, адекватно описывающего исследуемый процесс, проводилась статистическая обработка результатов параллельных опытов. Находили среднее арифметическое значение функции отклика:

$$Y_i = \frac{\sum_{u=1}^m Y_{iu}}{m}, \quad (3.4)$$

где: $i = 1, 2, \dots, N$ - порядковый номер опыта ($N = 8$); $u = 1, 2, \dots, m$ - повторность опытов ($m = 3$); Y_{iu} - значение функции отклика в u - том параллельном опыте i - той строки матрицы.

Дисперсия каждой горизонтальной строки матрицы определялась по формуле:

$$S_i^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (Y_{iu} - \bar{Y}_i)^2}{m - 1} \quad (3.5)$$

Проверка односторонности дисперсии проводилась с помощью критерия Кохрена.

$$G_p = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2} \quad (3.6)$$

Дисперсии однородны, если расчетное значение G_p не превышает табличного значения G_T для выбранного уровня значимости $\alpha = 0.05$, числа степеней свободы числителя $m - 1 + 2$ и знаменателя $N = 8$. Оценка дисперсией воспроизводимости результатов вычислялась по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^m (y_{iu} - \bar{y}_i)^2}{N(m - 1)}, \quad (3.7)$$

где: N - число степеней свободы, связанное с этой оценкой, - равно:

$$N(m - 1) = 16$$

Коэффициенты регрессии определялись методом наименьших квадратов по следующим формулам:

b_0 - свободный член;

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{Y}_i}{N} \quad (3.8)$$

b_i - коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты;

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i Y_{ij}}{N} \quad (3.9)$$

b_{ij} - коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия;

$$b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i Y_{ij} Y_{ie}}{N}, \quad (3.10)$$

где: X_{ij} , X_{ie} - кодированные значения (\pm) факторов j и e в i – том опыте.

Для оценки значимости коэффициентов регрессии определялся доверительный интервал коэффициентов регрессии:

$$\Delta b_i = \pm t \sqrt{\frac{S_y^2}{N}}, \quad (3.11)$$

где: t - табличное значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы, с которыми определялась S_y^2 .

$$N(m - l) = 16$$

Для уровня значимости $\alpha = 0,05$ ($t=2,12$).

Коэффициенты регрессии значимы, если $b_i > \Delta b_i$.

Дисперсия адекватности модели определялась по формуле:

$$S_{ag}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2}{f}, \quad (3.12)$$

где: \bar{Y}_i – среднее арифметическое значение функции отклика в i - том опыте.

\hat{Y}_i – значение функции отклика, вычисленное по моделям для условий i -го опыта;

f – число степеней свободы дисперсии адекватности;

$$f = N - (K + 1), \quad (3.13)$$

где: K - число варьируемых факторов.

Адекватность найденной модели определялась по критерию Фишера.

$$F_p = \frac{S_{ag}^2}{S_y^2}, \quad (3.14)$$

Расчетные значения критерия F сравнивались с табличными для числа степеней свободы знаменателя и числителя.

3.5 Выбор порошковых материалов для электроконтактного напекания

Металлические порошки находят широкое применение в различных ремонтных технологиях [51, 87, 150, 151]. Благодаря нанесению их на восстанавливаемую поверхность детали можно не только нарастить поверхность на необходимую величину, но и улучшить различные физико-механические свойства детали, такие как износо- и коррозионная стойкость; улучшить жаростойкость и другие характеристики.

Современная металлургическая промышленность выпускает широкую гамму металлических порошков. В ГОСТе 28377-89 приведена классификация порошков по размеру частиц (табл. 3.5), в соответствии с которой для определенного типа нанесения рекомендуются различные классы порошков. Например, для напыления предпочтительно использовать порошки с 1-го по 9-й класс по размерам частиц; для наплавки - с 8-го по 18-й.

Таблица 3.5 – Классификация порошков по размеру частиц [47]

Обозначение класса	Размер частиц (фракция), мкм	Обозначение класса	Размер частиц (фракция), мкм
1	5-20	10	100-140
2	5-45	11	400-280
3	20-45	12	100-400
4	Менее 45	13	100-630
5	20-63	14	160-280
6	Менее 63	15	280-400
7	40-100	16	Менее 400
8	Менее 125	17	Менее 630
9	90-100	18	Менее 800

В зависимости от химического состава металлические порошки подразделяют на подгруппы (табл. 3.6). В зависимости от элементов, входящих в состав порошка, определяется их область применения.

Таблица 3.6 – Классификация по химическому составу металлических порошков на основе железа [47]

Группа и подгруппа по химическому составу	Обозначение подгруппы	Условное обозначение типа порошка	Область применения
Углеродистые и низколегированные стали	СТ	ПР	2, 3
Хроммолибденовые и вольфрамхроммолибденовые стали	ХМ, ВХМ	ПР	2, 3
Кобальтхромовые, кобальтхроммолибденовые	КХ, КХМ	ПР	2
Хромистые, хромоникелевые, фосфористые стали и сплавы	Х, ХН, ХП, ХНП	ПР, ПВ, ПФ	3, 4
Хромалюминиевые сплавы	ХЮ	ПР	4
Высокомарганцевые стали	Г	ПР	1, 2, 3
Никельмедьалюминиевые сплавы	НДЮ	ПР, ПВ	2
Хромванадиевые и хромванадийникелевые эвтектоидные стали	ХФ, ХФН	ПР	2
Хромникельалюминиевые эвтектоидные стали	ХНЮ	ПР	1

Обозначения подгрупп порошков: Ст - сталь, В - вольфрам, Г - марганец, Д - медь, М - молибден, Н - никель, П - фосфор, Ф - ванадий, Х - хром, Ю - алюминий.

Обозначения области применения для создания износостойких покрытий, подверженных: 1 - абразивному износу; 2 - механическому износу и усталостному разрушению; 3 - износу в парах скольжения; 4 - разрушению при высоких температурах в окислительных и других агрессивных средах.

При обозначении металлического порошка первым указывают тип порошка, затем через тире марку в зависимости от химического состава и обозначения класса или минимальный и максимальный размеры частиц, разделенные дробью.

В обозначения марок порошков по химическому составу включают буквенные обозначения элементов (компонентов) и номинальное содержание одного - трех легирующих элементов в процентах, указанных после соответствующей буквы [47].

Опираясь на успешные исследования по приварке спечённой ленты на бронзовые втулки, в состав которых входило до 60% никеля, был выбран порошок на основе никеля [119].

С целью уменьшения изнашивания также был выбран порошок на основе железа.

Марки и химический состав порошков, используемых при напекании, приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Марки и химический состав напекаемых порошков

Марка порошка	Fe	Cr	Ni	C	O	S	Ca	Si	B
ПХ-30	Основа	30	≤0,30	≤0,30	≤0,30	≤0,01	≤0.20	-	-
ПР-Н80Х13С2Р	≤3	12-14	Основа	0,2-0,4	-	-	-	2,0-2,8	1,2-1,8

3.6 Выбор оборудования для проведения электроконтактного напекания

Для напекания металлических порошков в ремонтном производстве с целью уменьшения затрат на оборудование используются машины для контактной сварки [82, 106, 121]. Машины для контактной сварки классифицируют по следующим признакам:

- По производимому виду сварки - точечные, шовные и рельефные.
- По способу использования - специализированные и универсальные.
- По источнику напряжения - конденсаторные, переменного или постоянного тока, низко- или высокочастотные.
- По направлению прохождения тока - одно- и двухсторонние.
- По количеству одновременно производимых соединений - одношовные или многошовные, для точечных - одно- и многоточечные.
- По принципу установки машин - стационарные, передвижные, а также подвесные.
- По траектории движения электродов - прямолинейные или радиальные типы движения.

- По характеру силы сжатия - постоянное или переменное приложение силы.

Из-за простоты конструкции и универсальности большое распространение получили машины переменного тока, которые применяются во всех способах сварки. В зависимости от механических и электрических характеристик определяются технологические возможности напекания различных по составу металлических порошков на восстанавливаемые поверхности деталей для получения необходимых свойств напеченного покрытия.

Для электроконтактного напекания металлических порошков на изношенную наружную поверхность бронзовой втулки использовалась сварочная установка МТ-1618 УХЛ4, технические характеристики которой приведены в таблице 3.8

Таблица 3.8 – Технические характеристики сварочной установки МТ-1618 УХЛ4

Параметры	Величина параметра
Номинальный сварочный ток, кА	16
Номинальная мощность, кВа	100
Усилие сжатия электродов, МПа	
- минимальное	13,3
- номинальное	64,2
- максимальное	71,4
Раствор, мм	500
Ход электрода, мм	
- максимальный	320
- рабочий	80

Использование импульсного тока позволяет производить, нагрев до температуры напекания порошка за короткий промежуток времени и поддерживать её необходимое время при помощи автоматики.

3.7 Вспомогательное оборудование при электроконтактном напекании

Для обеспечения необходимых условий во время напекания использована токопроводящая графитовая оболочка (рис 3.6). Использование токопроводящей графитовой оболочки позволило:

- сделать процесс нагрева и охлаждения плавным, что, как показали исследования, улучшило прочность соединения напекаемого порошка с восстанавливаемой поверхностью втулки;

- достичь равномерного распределения тепла по всей площади напекаемого порошка, благодаря чему происходит образование однородной структуры в напеченном слое;

- обеспечить поддержание необходимой температуры спекания длительное время.

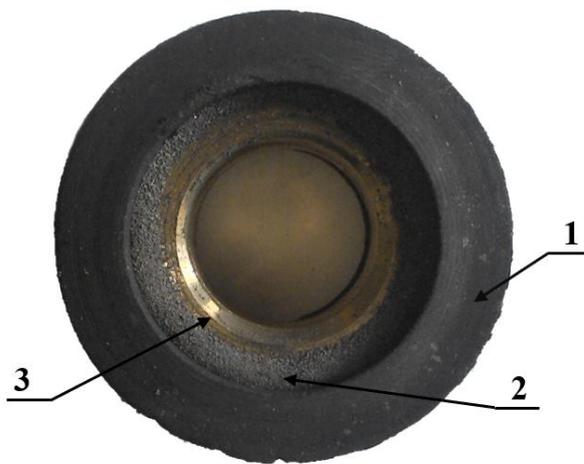


Рисунок 3.6 – Бронзовая втулка в токопроводящей графитовой оболочке:

1 - графитовая оболочка, 2 - стальной порошок, 3 - бронзовая втулка

Из-за высокой температуры плавления металлических порошков, значительно превышающей температуру плавления бронзы происходит оплавление втулки [21, 120]. Для предотвращения расплавления поверхности восстанавливаемой бронзовой детали был использован специальный электрод (Рисунок 3.7), что позволило производить напекание металлических порошков на бронзовую поверхность без расплавления восстанавливаемой детали.

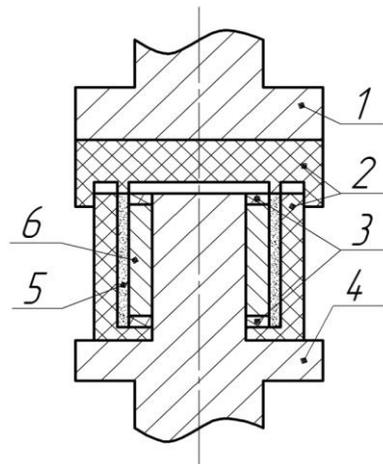


Рисунок 3.7 – Схема напекания: 1 - верхний электрод; 2 - графит; 3 - асбест; 4 - нижний электрод; 5 - стальной порошок; 6 - бронзовая втулка

3.8 Выбор основных параметров процесса электроконтактного напекания металлических порошков на бронзовые втулки и их контроль

При проведении электроконтактного напекания основными параметрами являются:

- сила тока;
- время протекания тока;
- температура напекания;
- усилие сжатия электродов.

Для сварочных машин данные параметры определяются при помощи критерия подобия, который рассчитывается по следующей формуле:

$$K = \frac{J^2 \cdot P_t \cdot h \cdot \sqrt{t} \cdot G_t}{d_t \cdot T_{пл} \sqrt{\lambda r c \delta \cdot P}} \quad (3.15)$$

где: P_t - среднее удельное сопротивление порошка, Ом; h - высота порошка до напекания, мм; t - время протекания тока, с; G_t - характеристика прочности покрытия; d_t - диаметр образца, мм; $T_{пл}$ - тепловая способность порошка; δ - толщина порошка после напекания, мм; P - усилие сжатия электродов, Н.

Использование критерия подобия позволяет нам определить достаточно точно режимы электроконтактного напекания металлических порошков для восстанавливаемых деталей и марок напекаемых порошков. Исходя из анализа лите-

ратурных источников, критерий подобия для современных сварочных машин находится в пределах 25-50, а при электроконтактном напекании металлических порошков данная величина будет находиться в диапазоне от 40 до 46. Для нашего эксперимента критерий подобия был принят равным 43.

Величина сварочного тока определялась при помощи измерителя сварочного тока с датчиком типа "пояс Роговского" ИСП-01.

Значения сварочного тока определялись исходя из температуры, необходимой для проведения напекания стального порошка на восстанавливаемую деталь.

Для контроля температуры на поверхности использовался предварительно тарированный пирометр Кельвин Компакт 1300 с диапазоном измерения от 400 до 1300°С, который устанавливался на штатив (Рисунок 3.8)



Рисунок 3.8 – Контроль температуры на поверхности во время напекания

Контроль температуры в зоне напекания осуществлялся при помощи предварительно тарированного термометра ТК-5.11, экранированными термопарами типа ТПР с диапазоном измерений от 400 до 1400°С. Схема установки термопар представлена на рисунке 3.9.

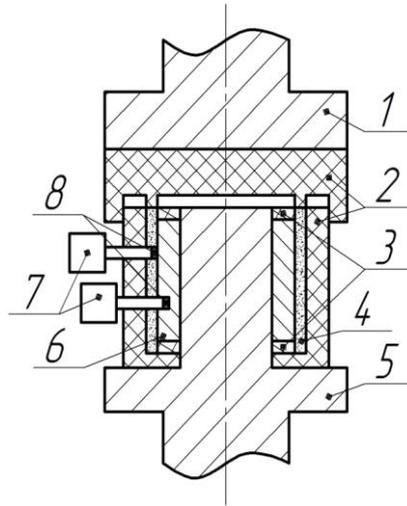


Рисунок 3.9 – Схема установки термопар:

1 - верхний электрод, 2 - графит, 3 - асбест, 4 - стальной порошок, 5 - нижний электрод, 6 - бронзовая втулка, 7 - термопара; 8 - чувствительный элемент термопары

Для контроля и изменения величины импульсов сварочного тока во время напекания использовались показания на приборной панели, установленной на сварочной установке. Величина импульсов задавалась в секундах от 0,5 до 60 с шагом 0,5 с.

Температура охлаждающей жидкости регистрировалась на входе и выходе из сварочной установки посредством предварительно тарированных цифровых термометров, оснащённых термопарой с возможностью измерений от -50 до $+250^{\circ}\text{C}$.

Тарирование манометра, определяющего усилие сжатия электродов, проводилось при помощи динамометра ДОС-3-1 (рис 3.10).

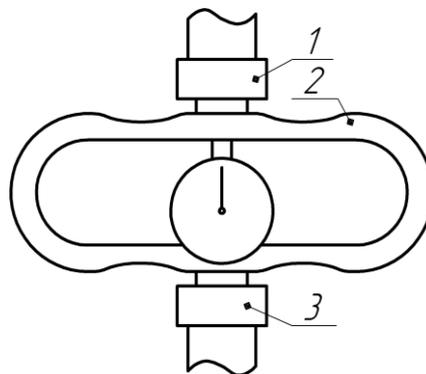


Рисунок 3.10 – Схема установки динамометра: 1 - верхний электрод; 2 - динамометр ДОС-3-1; 3 - нижний электрод

3.9 Исследования физико-механических свойств напеченного металлического покрытия на бронзовую поверхность.

В исследования физико-механических свойств напеченного покрытия входило:

- определение твердости;
- определение прочности сцепления напеченного слоя с поверхностью образца;
- определение плотности напеченного слоя;
- определение износостойкости внутренних поверхностей бронзовых втулок после механической обработки точением.

3.9.1 Определение твердости

Измерение твёрдости после проведения напекания проводилось по методу Роквелла путём вдавливания алмазного конуса с углом 120° при вершине и нагрузкой $0,15\text{кН}$ [31, 154].

Для проведения измерений поверхностной твёрдости напечённого слоя образец подвергался обработке на токарном станке с целью получения шероховатости R_a от 6 до 12 мкм, что соответствует величине шероховатости наружной поверхности втулок, используемых в сельскохозяйственных машинах.

В связи с большой площадью поверхности напечённого слоя для получения достоверных результатов измерения твёрдости поверхности исследования проводились с повторяемостью, равной пяти. Окончательная величина поверхностной твёрдости определялась как среднее арифметическое.

Также были проведены измерения твердости напечённого слоя бронзовой втулки и граничного слоя в продольных и поперечных сечениях восстановленной втулки (рис 3.11).

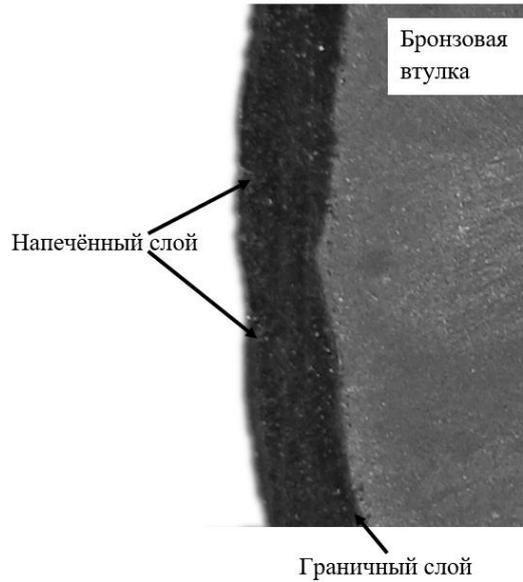


Рисунок 3.11 – Зоны измерения твёрдости

Измерения твёрдости по методу Роквелла при помощи ультразвукового твердомера МЕТ–У1А (Рисунок 3.12) с датчиком (Рисунок 3.13) производились следующим образом:

датчик устанавливался перпендикулярно зоне измерения, затем осуществлялось плавное нажатие на корпус датчика с усилием не менее 0,15кН (при большем усилии срабатывал ограничитель). После чего датчик удерживался без изменения положения и усилия до звукового сигнала окончания измерения.



Рисунок 3.12 – Ультразвуковой твердомер МЕТ–У1А:

1 - ультразвуковой датчик; 2 - электронный блок

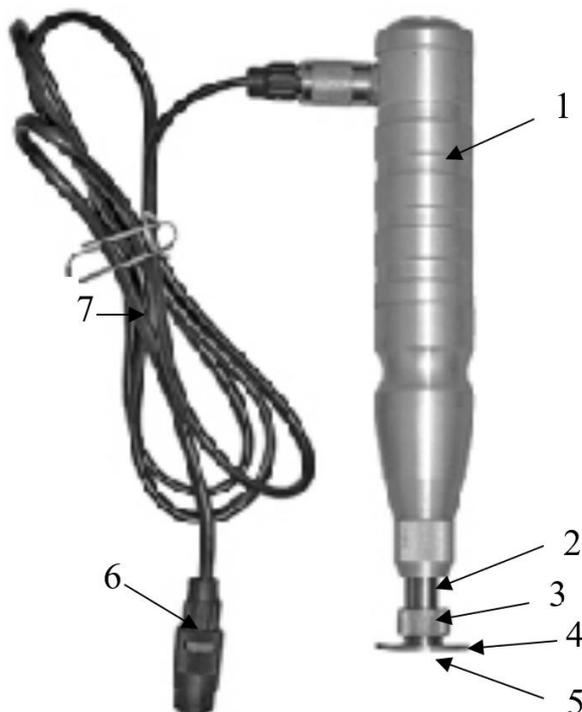


Рисунок 3.13 – Ультразвуковой датчик: 1 - корпус датчика; 2 - втулка; 3 - прижимное кольцо насадки; 4 - нижняя плоскость насадки; 5 - торец втулки; 6 - штекер разъёма электронного блока; 7 - соединительный кабель

3.9.3 Определение прочности сцепления напеченного слоя с поверхностью восстанавливаемой втулки

Одним из главных критериев качества напеченного слоя является его сцепление с поверхностью восстановленной втулки.

В результате анализа литературных источников для определения прочности соединения покрытия был выбран метод сдвига [5]. Для предотвращения среза металла бронзовой втулки вместо напеченного слоя и для обеспечения соосности образца была выбрана схема нагружения винт-гайка и изготовлено специальное устройство, изображённое на рисунке 3.14.

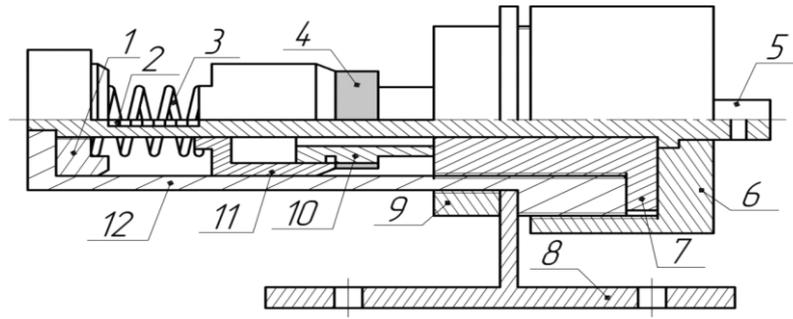


Рисунок 3.14 – Схема устройства для определения прочности сцепления напеченного слоя с поверхностью втулки: 1 - опорная чашка; 2 - шкала; 3 - пружина; 4 - напеченное покрытие; 5 - винт нагрузки; 6 - крышка; 7 - матрица; 8 - опора; 9 -фиксатор; 10 - втулка; 11 - оправка; 12 - корпус

Исследования прочности сцепления происходили следующим образом: втулку с нанесённым покрытием надевали на винт нагрузки с матрицей до упора. Далее винт нагрузки вворачивался в опорную чашку таким образом, чтобы пружина прижала оправку к напечённому покрытию без зазора. Затем собранная конструкция помещалась в корпус, после чего завинчивали матрицу и крышку. При вращении нагрузочного винта происходило вдавливание втулки в оправку и под действием касательных напряжений отделялся напечённый слой от втулки. Усилие среза определялось по перемещению пружины вдоль шкалы. После проведения испытания образец осматривали и, если покрытие отделялось по всей поверхности втулки, считалось, что испытание достоверно.

Величина прочности сцепления определялась по следующей формуле:

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{Q}{A_{\text{ср}}}, \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2} \quad (3.16)$$

где: Q - сила, действующая на соединение (Н); $A_{\text{ср}}$ - площадь напеченного слоя, (мм^2).

Погрешность при определении прочности сцепления определялась по следующей формуле:

$$\varepsilon_{\sigma} = \sqrt{\varepsilon_{\text{р}}^2 + \varepsilon_{\text{д}}^2 + \varepsilon_{\text{Л}}^2}, \quad (3.17)$$

Погрешность не превышала 10%.

3.9.4 Определение плотности напеченного слоя

Одной из основных характеристик напечённого слоя является его плотность. Малая плотность слоя приводит к снижению ресурса восстановленной детали.

Для определения плотности напечённого слоя использовалась следующая формула:

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{v_{д1} - v_{д2}} \text{ кг/м}^3, \quad (3.18)$$

где: m_1 - масса детали с восстановленным слоем; m_2 - масса детали до восстановления; $v_{д1}$ - объём детали с восстановленным слоем; $v_{д2}$ - объём детали до восстановления.

Объём определялся по методике, основанной на гидростатическом взвешивании. В связи с тем, что точность определения данного метода зависит от примесей воды, для повышения точности измерений использовалась дистиллированная вода.

Для взвешивания деталей использовались весы модели АД-200 с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-5}$, переоборудованные для гидростатического взвешивания (Рисунок 3.15).

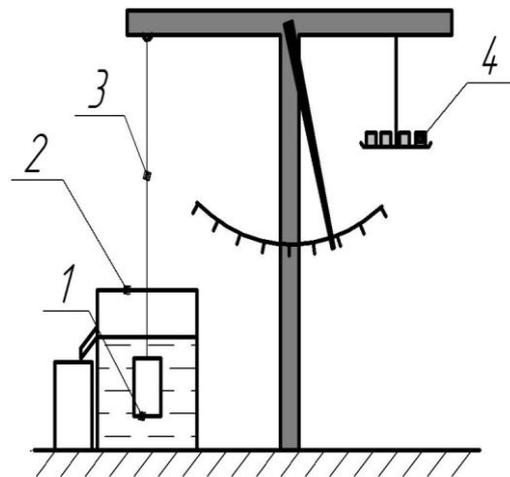


Рисунок 3.15 – Схема установки для гидростатического взвешивания: 1 - втулка; 2 - сосуд с дистиллированной водой; 3 - проволока; 4 - гири

Гидростатическое взвешивание производилось следующим образом:

предварительно взвешенная деталь подвешивалась на проволоке и погружалась в сосуд с водой. Масса детали уравнивалась массой гирь.

Объём детали рассчитывался следующим образом:

$$V_{\text{дет}} = \frac{M - Q}{\gamma_{\text{в}}}, \quad (3.19)$$

где: М - масса детали на воздухе, кг; Q - масса детали в воде, кг;

$\gamma_{\text{в}}$ - плотность дистиллированной воды, кг/м³.

Данная методика позволила установить влияние следующих параметров на плотность напечённого слоя:

- температуры напекания;
- времени напекания;
- давления электродов на напекаемый порошок.

Для оценки плотности проводилось сравнение плотности напечённого слоя с плотностью восстанавливаемой детали, изготовленной из бронзы

Бр. О5Ц5С5. Плотность бронзы была принята равной 8800 кг/м³.

3.9.5 Определение износостойкости

Износостойкость восстановленных втулок проверялась на установке гидроабразивного изнашивания при наличии в жидкости абразивных частиц - песка, глины и др. [19, 23, 27, 36, 57, 69, 72, 73, 142].

Установка (рис. 3.16) состояла из асинхронного электродвигателя АИР71А4 с мощностью 0,55 кВт и частотой вращения 1500; редуктора, позволяющего получать на выходе следующие частоты вращения: 500, 1000, 1500, что позволяло получить скорость натекания жидкости 1,27; 2,54 и 3,81 м/с. К выходному валу редуктора подсоединялся трехкулачковый патрон, в котором зажимался держатель образцов, позволявший одновременно испытывать до четырёх образцов, среди которых всегда были образцы втулок, не прошедших восстановления.

Держатели образцов находились на расстоянии 60 мм от оси вращения штока.

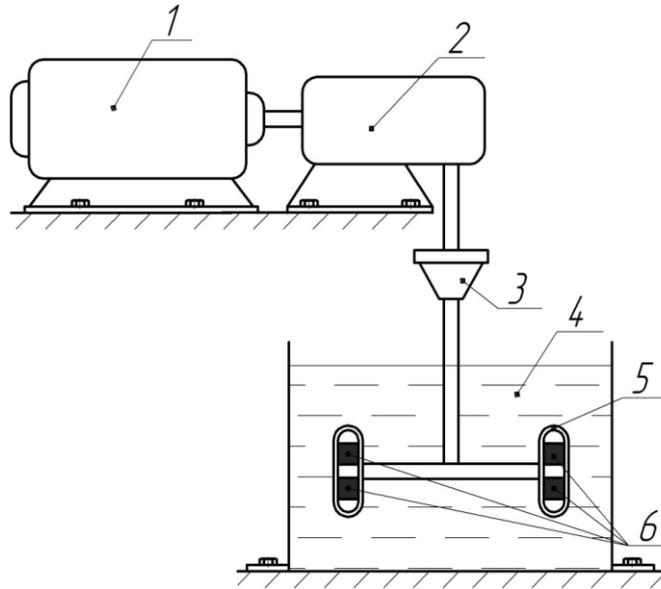


Рисунок 3.16 – Схема установки для проведения гидроабразивных испытаний: 1 - электродвигатель; 2 - редуктор; 3 - трехкулачковый патрон; 4 - гидроабразивная среда; 5 - держатель образцов; 6 - образцы

Для проведения испытаний образцы готовились следующим образом: из втулки после растачивания под чертёжный размер вырезался образец шириной 10 мм и высотой 10 мм, после чего образец промывался в этиловом спирте и высушивался в течение 30 минут при температуре 110 °С. Образцы для сравнения готовились аналогичным образом. Перед началом испытаний образцы взвешивались на весах ВСЛ-200/0.1 А с точностью до 0,0001 г.

Во время испытания на износостойкость поверхности образца, кроме рабочей части, закрывались резиновыми прокладками, что позволяло защитить их от воздействия абразивной среды.

В качестве абразивной среды использовалась водопроводная вода с добавлением абразива с размером частиц не более 0,5 мм. Концентрация абразива составляла 250 г/дм³. Каждые 8 часов абразив меняли с целью удаления разрушившихся частиц.

При вращении возникало, кроме отмеченного, и осевое перемещение частиц, связанное с отсутствием балансировки массы образцов, что приводило к ра-

диальному биению. Из-за образования воронки жидкости возникало дополнительное радиальное перемещение. Образование воронки также способствовало подъёму песка со дна ёмкости, что обеспечивало обновление абразивных частиц.

Испытания проводились в течение 72 часов, после чего образцы извлекались из обойм, промывались в этиловом спирте и высушивались в течение 10 минут при температуре 110 °С.

После повторного взвешивания удельная скорость изнашивания определяется как:

$$v_{уд} = \frac{m_1 - m_2}{St}, \quad (3.20)$$

где: m_1 - масса детали до проведения испытания, мг; m_2 - масса детали после проведения испытания, мг; S - площадь поверхности образца, подвергавшегося износу, мм²; t - продолжительность испытания, ч.

Поскольку образцы обладали одинаковой площадью, а испытания производилась одновременно то величина изнашивания определялась как:

$$g_n = m_1 - m_2, \quad (3.21)$$

В дальнейшем проводилось сравнение величины изнашивания образцов втулок, не прошедших восстановление и с напечёнными порошками.

3.10 Микроструктурные исследования после напекания

Микроструктурные исследования после напекания и толщина слоя производились по методике, представленной в разделе 3.3.2 [88].

Выводы по главе 3

1. В качестве образцов для проведения обжатия были выбраны втулки, изготовленные из Бр.О5Ц5С5 в соответствии с ГОСТ 613-79, толщиной стенки 4...8 мм, величина натяга на радиус при обжатии 0,5...2 мм.
2. Для осуществления контроля изменения высоты и наружного использовался микрометр серии 331, для измерений внутренних диаметров применялся нутромер НИ-ПТ. Контроль осуществлялся в шести сечениях по диаметру и трёх по высоте. Микроструктурные исследования обжатых втулок производились после контроля геометрических параметров для чего образцы подвергались травлению в составе: 30 мл 10 %HCl и 5 гр. FeCl₃. После травления образцы помещались на несколько секунд в 10% HCl, а затем промывались дистиллированной водой, высушивались и изучались при помощи металлографического микроскопа.
3. На качество получаемого в результате напекания слоя оказывают влияние такие факторы как: усилие сжатия электродов, время и температура.
4. Втулки, прошедшие обжатие, при помощи сварочной установки подвергались напеканию металлических порошков ПР-Н80Х13С2Р и ПХ-30. Контроль температуры осуществлялся как в зоне напекания с помощью термопар, так и поверхности графитовой оболочки с помощью пирометра. Величина сварочного тока определялась при помощи измерителя сварочного тока с датчиком типа «пояс Роговского». Давление при напекании контролировалось по манометру сварочной установки предварительно тарированного по динамометру.
5. После проведения напекания производилось определение; твердости, прочности сцепления напеченного слоя с поверхностью образца, плотности напеченного слоя, износостойкости внутренних поверхностей бронзовых втулки после механической обработки. Микроструктурные исследования после напекания производились с такими же параметрами, как и для обжатых втулок.

Глава 4. Исследования влияния технологических параметров на восстановление бронзовых втулок.

4.1 Исследование по определению основных технологических параметров объёмного обжатия бронзовых втулок

4.1.1 Исследования по определению оптимальных конструктивных параметров обжимной матрицы при объёмном обжатии.

На основании данных приведённых в главе 2 были проведены исследования по определению значений максимальной степени деформации и величины предельного коэффициента обжатия для различных углов α обжимной матрицы при коэффициентах трения $\mu=0,05$ (касторовое масло), $\mu=0,075$ (машинное масло), вызывающих складкообразование (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Значение максимальной степени деформации и величины предельного коэффициента обжатия

α , град	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30
μ	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Ψ	12	13	13,5	13,5	1,35	1,35	10,5	12,5	13	13,2	13,2	13,2
$K_{\text{пред}}$	1,36	1,37	1,38	1,38	1,38	1,38	1,35	1,36	1,37	1,37	1,37	1,37

На рисунке 4.1 представлены полученные зависимости по данным таблицы 4.1.

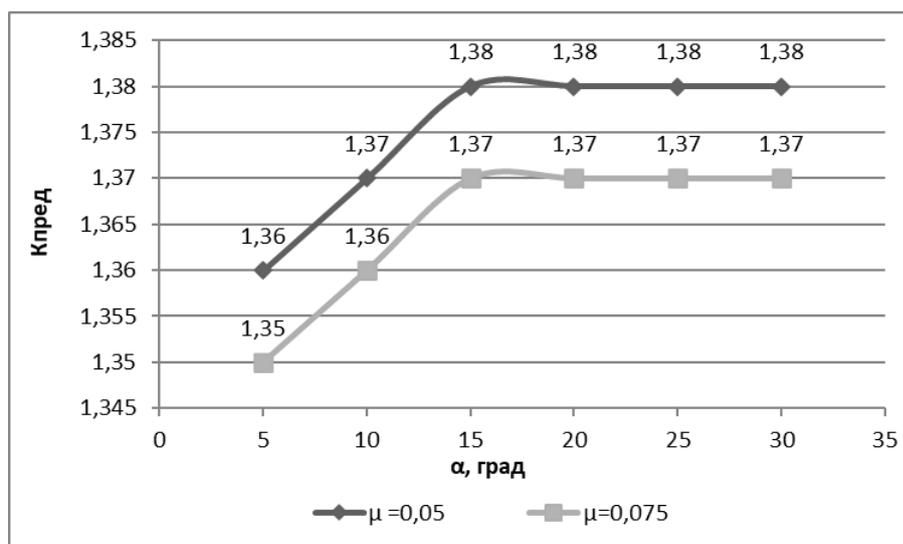


Рисунок 4.1 – Зависимость предельно допустимого коэффициента обжатия от угла заходной части обжимной матрицы

Результаты исследований показали, что:

1. Увеличение угла более 15° заходной части обжимной матрицы мало влияет на величину предельного коэффициента обжатия оловянистой бронзы, при которой происходит потеря устойчивости втулки (складкообразование).

2. Большая величина коэффициента трения приводит к снижению величины максимальной степени деформации, но несущественно.

3. Для успешного осуществления технологического процесса объемного обжатия бронзовых втулок необходимо, чтобы величина пластической деформации составляла до 10-15 % при минимальном коэффициенте трения.

Для подтверждения правильности предлагаемой формулы (2.34) были проведены эксперименты по объёмному обжатию втулок из материала Бр. О5Ц5С5 при следующих параметрах втулки: $D_{\text{нар}} = 68$ мм, $D_{\text{внутр}} = 54$ мм, $l = 30$ мм.

Внутренний диаметр обжимной матрицы определялся расчетным путём с тем, чтобы обеспечить получение коэффициента обжатия бронзовой втулки в пределах 1,2-1,5 с шагом значения коэффициента обжатия в 0,1; угол заходной части матрицы был равен 5° ; 15° ; 20° ; 30° . В качестве смазочного материала использовались касторовое и машинное масла.

Полученные результаты по объёмному обжатию втулок приведены на рисунке 4.2, на котором показаны экспериментальные и теоретические кривые.

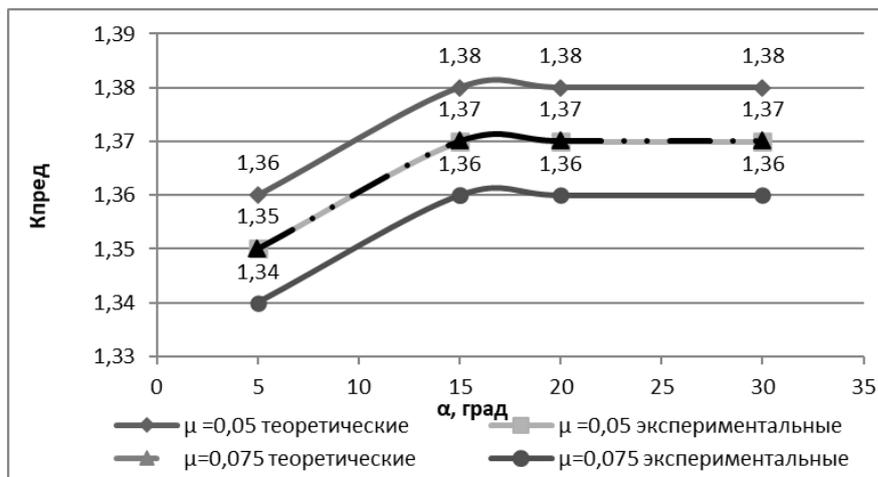


Рисунок 4.2 – Экспериментальные и теоретические кривые зависимостей предельно допустимого коэффициента обжатия от угла заходной части обжимной матрицы

Как показали эксперименты, предельное значение коэффициента объёмного обжатия бронзовой втулки из Бр.О5Ц5С5, при котором возникает складкообразование, отличается от теоретической формулы (2.34) не более 8-10%

4.1.2 Исследования по определению зависимости изменения наружного и внутреннего диаметров втулки от технологических параметров объёмного обжатия

Исходя из теоретических расчетов, были проведены эксперименты по объёмному обжатию втулок, которые представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты экспериментов

Наружный диаметр втулки до обжатия, $D_{нар}$, мм	68	68	68	68
Внутренний диаметр втулки до обжатия, $d_{вн}$, мм	54	54	54	54
Значения β	0,92	0,94	0,96	0,98
Диаметр матрицы $D_{матр}$, мм	64	65	66	67
Величина натяга ΔH , мм	2,0	1,5	1,0	0,5
Наружный диаметр втулки после обжатия	64,5	65,4	66,3	67,2
Уменьшение наружного диаметра втулки, ΔD , мм	3,5	2,6	1,7	0,8
Внутренний диаметр втулки после обжатия, $d_{обж}$, мм	50,3	51,3	52,3	53,2
Уменьшение внутреннего размера втулки, Δd , мм	3,7	2,7	1,7	0,8
Коэффициент обжатия $K_{обж}$	1,07	1,05	1,03	1,01
Величина степени деформации Ψ . %	6,5	4,8	2,9	1

Изменение наружного и внутреннего диаметров втулок от значения β представлены на рисунках 4.3 и 4.5, а от значения ΔH на рисунках 4.4 и 4.6

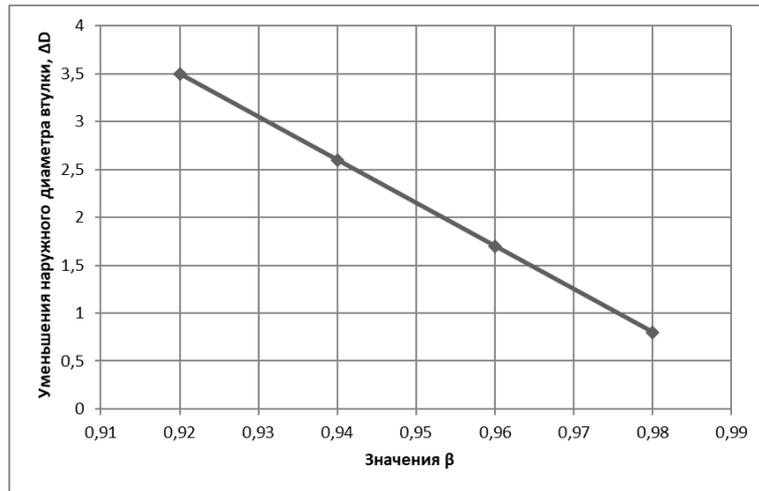


Рисунок 4.3 – Характер изменения наружного диаметра втулки от значения β

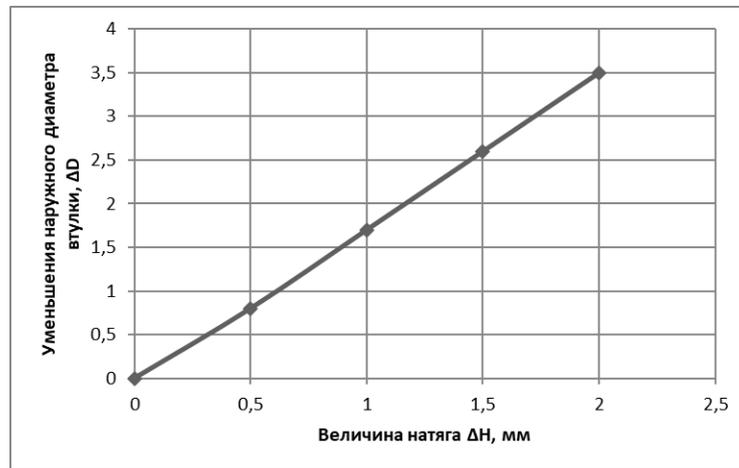


Рисунок 4.4 – Характер изменения наружного диаметра втулки от значения ΔH

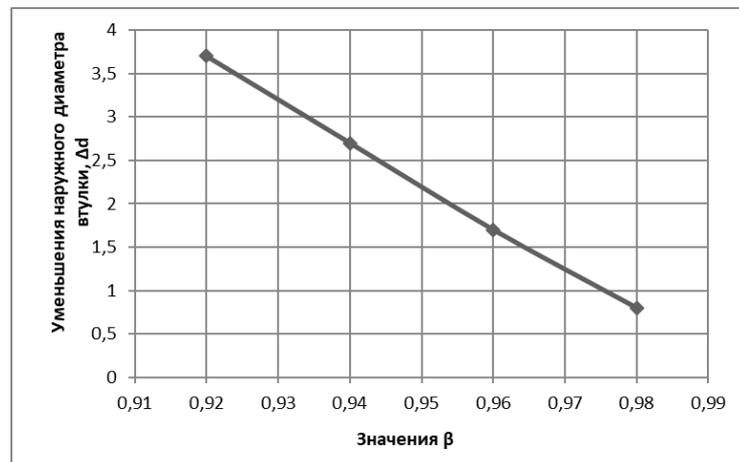


Рисунок 4.5 – Характер изменения внутреннего диаметра втулки от значения β

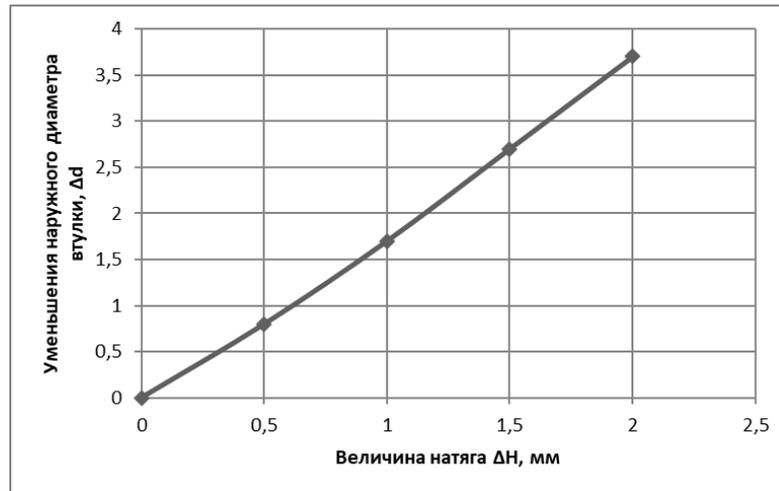


Рисунок 4.6 – Характер изменения наружного диаметра втулки от значения ΔH

Анализ этих графиков показывает прямолинейную зависимость изменения наружного и внутреннего диаметров втулок при их объемном обжатии от соотношения внутреннего диаметра матрицы к наружному диаметру обжимаемой втулки.

Такая же зависимость подтверждается между коэффициентом обжатия $K_{обж}$ и значением β (Рисунок 4.7).

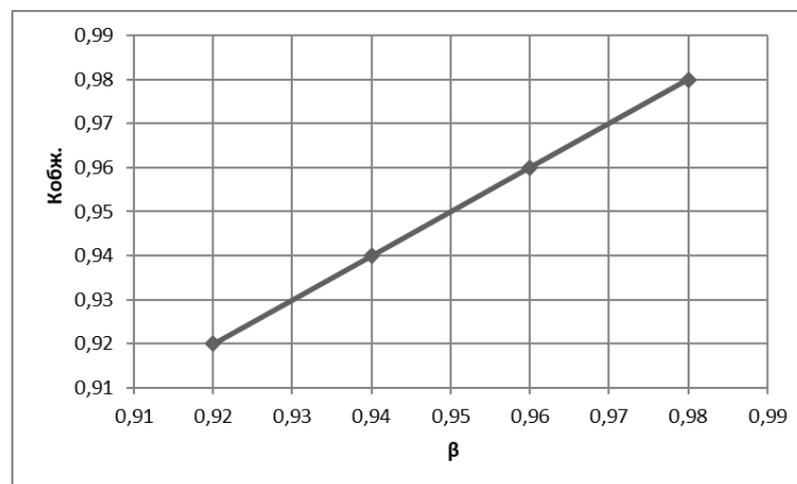


Рисунок 4.7 – Характер зависимости между $K_{обж}$ и значением β

Характер изменения наружного и внутреннего диаметра втулок при объемном обжатии представлен на рисунке 5.8.

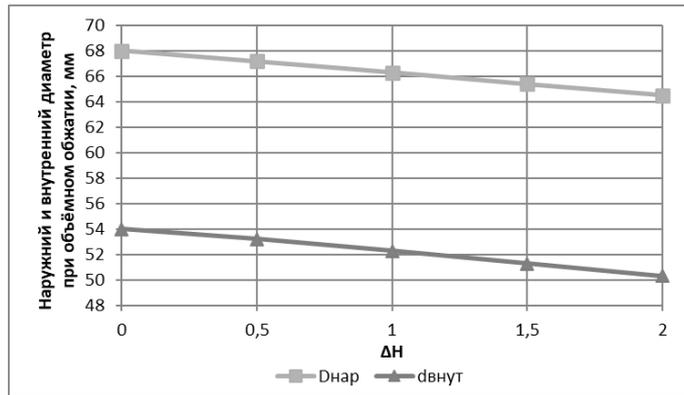


Рисунок 4.8 – Характер изменения наружного и внутреннего диаметров втулок при объемном обжатии

Анализ данных таблицы 4.2 и графика 4.8 указывает на практически прямую пропорциональную зависимость изменения наружного и внутреннего диаметров втулок при объемном обжатии.

Аналогичная картина изменения наружного размера втулок после прохождения через матрицу наблюдалась и для других значений Δ при толщине стенки 4 мм и для образцов с толщиной стенки 7 мм.

Анализ данных экспериментов показывает, что внутренний диаметр изношенной втулки уменьшается прямо пропорционально уменьшению наружного диаметра при ее объемном обжатии с помощью деформирующей матрицы.

4.1.3 Исследования по определению оптимальной длины цилиндрического пояска деформирующей матрицы

В таблице 4.3. представлены результаты экспериментов по объемному обжиму втулок наружным диаметром 68 мм, толщиной стенки 4 мм и с величиной натяга обжима 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 мм. Коэффициент $\mu = 0,075$ (машинное масло), угол заходной части матрицы 15° , величина предела текучести бронзы Бр.05Ц5С5 = 130 МПа.

Таблица 4.3 – Результаты экспериментов по объемному обжиму втулок

Усилие прессы Р, кг	Величина натяга ΔН, мм	Длина пояска L, мм
1650	2,0	11
1520	1,5	10
1250	1,0	8,3
950	0,5	6,3

Результаты экспериментов по объемному обжиму втулок конструктивным параметром $\Delta = 0,08$ представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты экспериментов по объемному обжиму втулок конструктивным параметром $\Delta = 0,08$, угол заходной части матрицы 15°

Толщина стенки втулки, мм	Усилие прессы Р, кг	Величина натяга ΔH , мм	Длина пояска L, мм
4	1650	2,0	11
	1520	1,5	10
	1250	1,0	8,3
	950	0,5	6,3
6	2830	2,0	18,8
	2410	1,5	16,1
	2080	1,0	13,8
	1660	0,5	11,0
8	4780	2,0	31,8
	4320	1,5	28,8
	3870	1,0	25,8
	3120	0,5	20,8

На рисунке 4.9 представлен график выбора длины цилиндрического пояска обжимной матрицы в зависимости от толщины стенки.

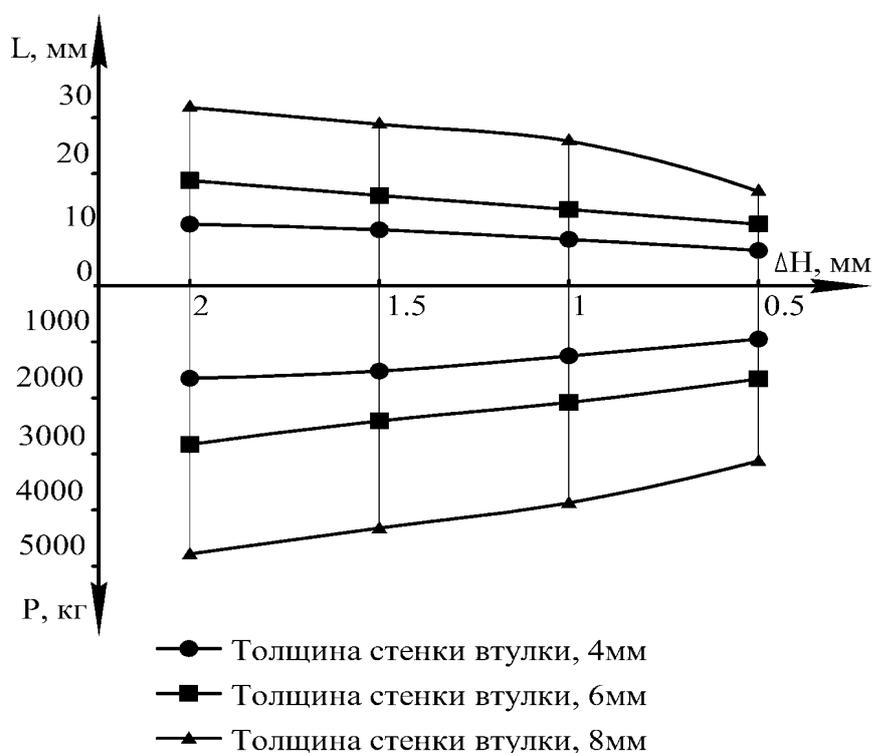


Рисунок 4.9 – График выбора длины цилиндрического пояска обжимной матрицы

4.2 Исследование по определению основных технологических параметров напекания металлических порошков на бронзовую втулку

4.2.1 Выбор температуры напекания

Решение уравнений, представленных в главе 2, позволило установить, что температура напекания для ПР-Н80Х13С2Р должна превышать 1000 °С, а для ПХ-30 – 1100 °С. Для уточнения теоретических данных были проведены эксперименты по напеканию. Контроль температуры во время напекания осуществлялся по схеме, представленной на рисунке 3.7.

Исходя из процессов, происходящих при стыковой сварке, необходимая температура для проведения напекания определялась из выражения [18]:

$$Q = \frac{c \cdot G \cdot T}{h}, \quad (5.1)$$

где c - удельная теплоёмкость частиц порошка и материала образца, Дж/кг; G - масса порошка, кг; h - высота напечённого слоя, мм.

Также количество теплоты можно определить по выражению:

$$Q = I^2 \cdot R_{\text{ээ}} \cdot \tau, \quad (5.2)$$

где I - сварочный ток, А; $R_{\text{ээ}}$ - сопротивление между электродами, Ом; τ - время импульса сварочного тока, с.

При совместном решении уравнений 5.1 и 4.5 температура напекания определяется как

$$T = \frac{h \cdot R_{\text{ээ}} \cdot I^2 \cdot \tau}{c \cdot G} \quad (5.3)$$

Температура напекания для ПР-Н80Х13С2Р была выбрана от 1000 °С до 1300 °С. Температура изменялась с шагом в 50 °С, при этом время напекания варьировалось от 40 с до 120 с, сила тока при этом выбиралась таким образом, чтобы за заданное время достичь необходимой температуры. Величина сопротивления между электродами составляла 0,0006 Ом. Удельная теплоёмкость порошка составляла 440 Дж/кг°С, а материала восстанавливаемых деталей 370 Дж/кг°С. Насыпная масса порошка составляла около 6 г. Толщина напекаемого слоя составляла 2 мм.

Шероховатость восстанавливаемой поверхности после обработки на токарном станке находилась в пределах от 10 до 15 мкм.

В результате проведённых исследований по напеканию порошка ПР-Н80Х13С2Р к поверхности втулки, изготовленной из Бр.О5Ц5С5, было выяснено, что при температуре в зоне спекания, не превышавшей 1100 °С, происходит неполное по площади припекание порошка к поверхности втулки. С увеличением температуры напекания данный дефект устраняется (рис 4.10). Возникновение неполного напекания обуславливается наличием специального электрода (рис. 3.7).

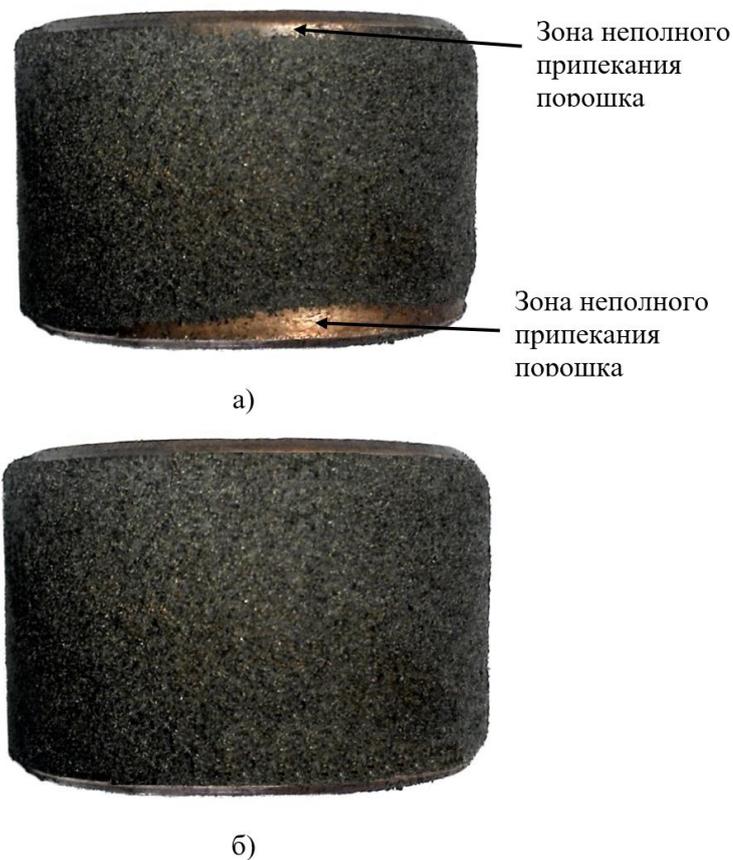


Рисунок 4.10 – Втулка с напечённым порошком: а) при температурном интервале от 1000 °С до 1100 °С; б) при температурном интервале выше 1100 °С

Проведённые микроструктурные исследования, представленные на рисунках 4.11 и 4.12, показали следующее: при напекании никелевого порошка ПР-Н80Х13С2Р на оловянистую бронзовую поверхность в интервале 1100 – 1200 °С происходит хорошая взаимная сцепляемость элементов порошка и бронзы, что

подтвердили результаты по определению усилия на срез напеченного железистого порошка.

Во время напекания никелевого порошка в зоне спекания происходит образование лигатурного сплава Cu-Ni. При температуре, превышающей 1200 °С, происходит выгорание лигатурного сплава, что приводит к образованию пор, уменьшению твёрдости и сцепляемости.

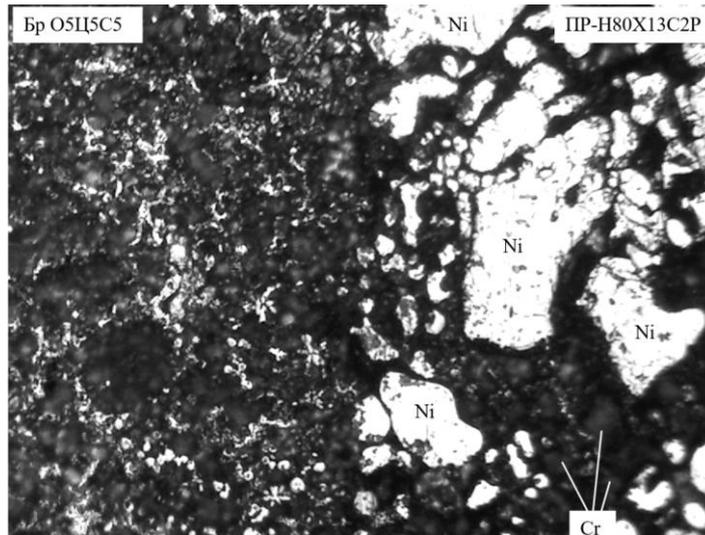


Рисунок 4.11 – Микроструктура граничного слоя восстановленной втулки при напекании порошка в диапазоне температур от 1100 °С до 1200 °С

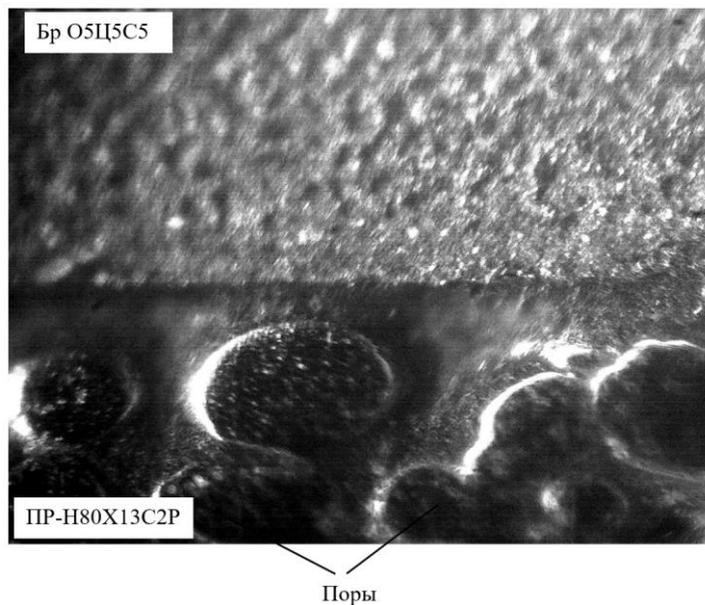


Рисунок 4.12 – Микроструктура граничного слоя восстановленной втулки при напекании порошка в диапазоне температур от 1200 °С до 1300 °С

С целью поиска оптимального режима напекания никелевого порошка ПР-Н80Х13С2Р на бронзовую втулку, изготовленную из Бр. О5Ц5С5, проведены дополнительные исследования в диапазоне от 1100 °С до 1200 °С. Температура изменялась с шагом в 20 °С, остальные параметры не изменялись.

В результате проведённых исследований было установлено, что наилучшее качество напечённого слоя достигается при температуре поверхности графитовой оболочки 1055 ± 5 °С, а температура напекаемого слоя достигает 1160 ± 5 °С. При данной максимальной температуре нагрева не происходит активного выгорания лигатурного сплава Cu - Ni и обеспечивается максимальное сцепление металлического порошка с бронзовой втулкой.

При данном температурном режиме не возникает структурных изменений в материале бронзовой втулки, так как общая температура втулки за счёт её интенсивного охлаждения (рис. 4.13) во время напекания ниже 400 °С, что подтверждается микроструктурами до и после напекания, которые представлены на рисунке 4.14.

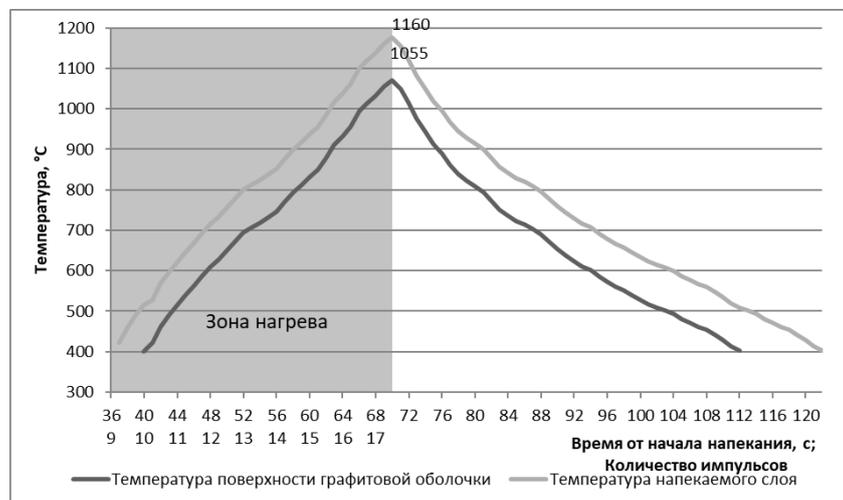
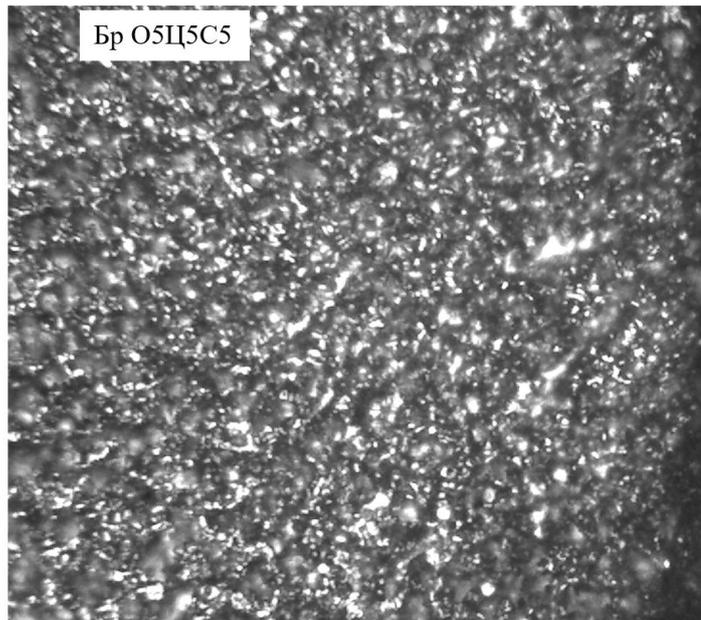
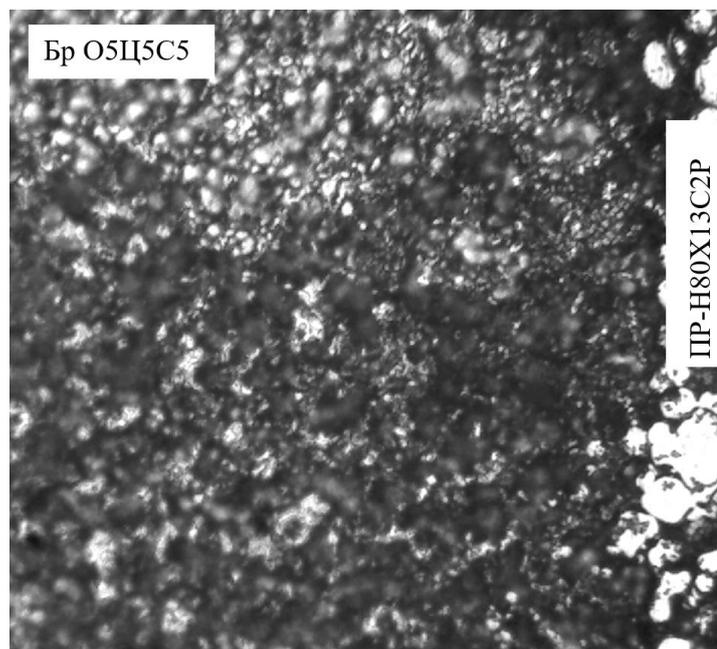


Рисунок 4.13 – Режим напекания порошка ПР-Н80Х13С2Р на бронзовую поверхность



а)



б)

Рисунок 4.14 – Микроструктуры бронзы до и после напекания: а - структура до напекания; б - структура после напекания

Для ПХ-30 температура напекания была выбрана от 1100 °С до 1400 °С. Температура изменялась с шагом в 50 с, при этом время напекания варьировалось от 120 с до 250 с, сила тока при этом выбиралась таким образом, чтобы за заданное время достичь необходимой температуры. Величина сопротивления между электродами составляла 0,0006 Ом. Удельная теплоёмкость порошка составляла 470

ДЖ/кг^{°С}, а материала восстанавливаемых деталей 370 ДЖ/кг^{°С}. Насыпная масса порошка составляла около 8 г. Толщина напекаемого слоя составляла 2 мм. Шероховатость восстанавливаемой поверхности после обработки на токарном станке находилась в пределах от 10 до 15 мкм.

В результате проведённых исследований по напеканию порошка ПХ-30 к втулкам, изготовленным из Бр О5Ц5С5, было выяснено:

при температурах в зоне спекания, находящихся в интервале от 1100 °С до 1200 °С, происходит неполное припекание порошка к бронзовой поверхности, а также образование локальных зон спекания (рис 4.15).



Рисунок 4.15– Спечённый порошок при температуре 1100 °С до 1200 °С

При напекании порошка в диапазоне температур от 1200 °С до 1300 °С образуется качественный напечённый слой (рис 4.16).

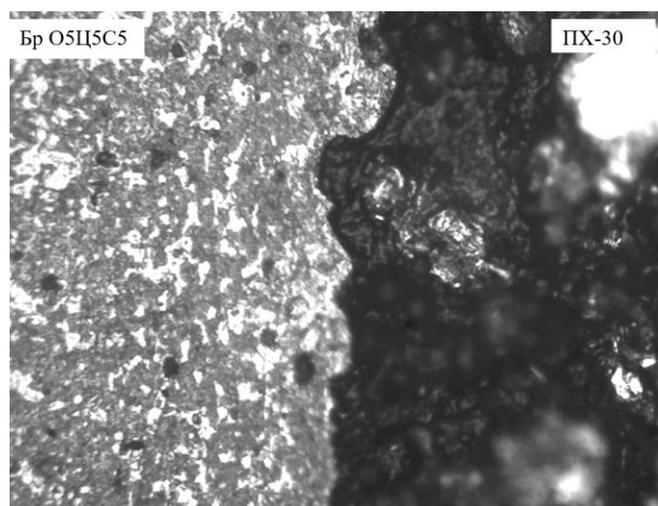


Рисунок 4.16 – Микроструктура граничного слоя восстановленной втулки при напекании порошка в диапазоне температур от 1200 °С до 1300 °С

Во время напекания порошка при температурах от 1300 °С до 1400 °С происходит значительное оплавление бронзовой втулки, несмотря на максимальную интенсивность её охлаждения (рис. 4.17)



Рисунок 4.17 – Оплавленная втулка в результате напекания порошка в диапазоне температур от 1300 °С до 1400 °С

Дальнейшие исследования проводились с целью уточнения оптимальной температуры в диапазоне от 1200 °С до 1300 °С. Температура изменялась с шагом в 20 °С, остальные параметры не изменялись.

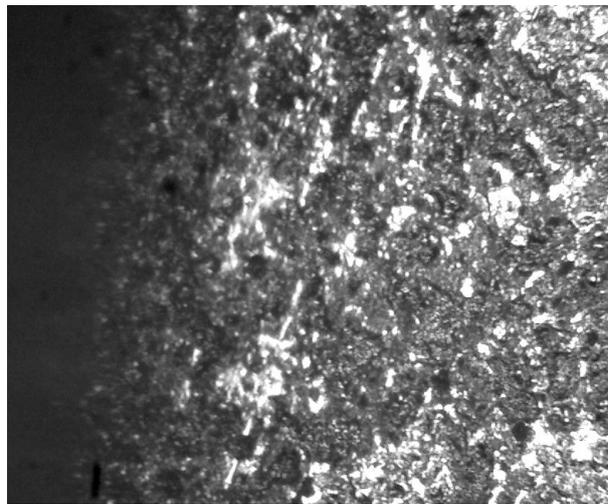
В результате исследований было установлено, что наилучшее качество напечённого слоя достигается при температуре поверхности оболочки 1172 ± 5 °С, при этом температура напекаемого слоя достигает 1285 ± 5 °С. Общая картина исследований представлена на рисунке 4.18.



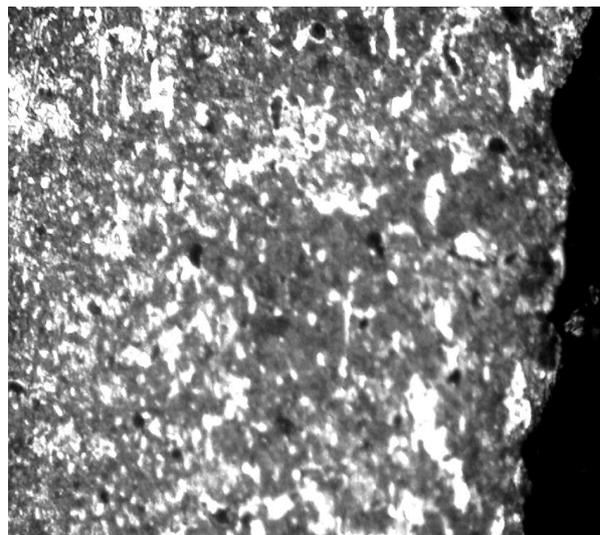
Рисунок 4.18 – Режим напекания порошка ПХ-30 на восстанавливаемую втулку

Как видно из представленного графика, во время напекания осуществлялась выдержка при температуре около 1100 ± 5 °С в течение 110 с, что способствовало более равномерному прогреву напекаемого порошка и повышению качества напечённого слоя.

При данном температурном режиме также не возникает структурных изменений в бронзовой втулке, так как температура втулки во время напекания ниже 400 °С, что подтверждается микроструктурами бронзы до и после напекания, представленными на рисунке 4.19.



а)



б)

Рисунок 4.19 – Микроструктуры бронзы до и после напекания: а - структура до напекания; б - структура после напекания

4.2.2 Определение прочности сцепления

Исследования с целью изучения влияния температуры напекания на прочность сцепления напечённого слоя с бронзовой втулкой проводились в соответствии с методикой, приведённой в третьей главе.

Для измерения прочности сцепления порошка ПР-Н80Х13С2Р с бронзовой втулкой выбраны образцы с температурой напекания 1100 ± 5 °С, 1160 ± 5 °С, 1200 ± 5 °С. Время напекания составляло 70 с, а давление электродов 25 МПа.

Результаты экспериментов по определению прочности сцепления представлены на рисунке 4.20.

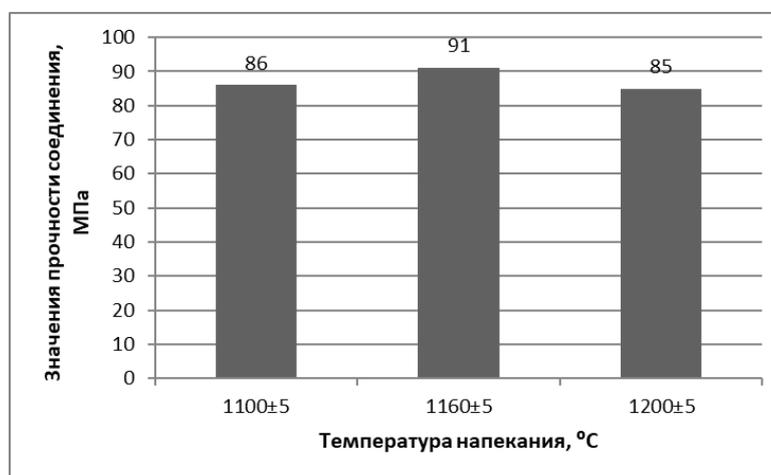


Рисунок 4.20 – Изменение значения прочности сцепления в зависимости от температуры напекания порошка ПР-Н80Х13С2Р

В результате проведённых исследований было определено, что:

- наибольшее значение прочности сцепления достигается при температуре 1160 ± 5 °С, что подтверждает правильность выбранной температуры напекания.
- Температура напекания в диапазоне от 1100 ± 5 °С до 1160 ± 5 °С не является существенным фактором изменения физико-механических свойств при восстановлении бронзовых втулок методом напекания металлических порошков никелево-хромистого состава. Колебание величины прочности сцепления напечённого слоя с оловянистой бронзовой втулкой не превышает 7%.

- Снижение прочности сцепления на 15% при температуре 1200 ± 5 °С объясняется возникновением пористости, связанной с выгоранием лигатурного сплава Cu-Ni.

Для измерения прочности сцепления порошка ПХ-30 с бронзовой втулкой выбраны образцы с температурой напекания 1220 ± 5 °С, 1285 ± 5 °С, 1320 ± 5 °С. Время напекания составляло 250 с, а давление электродов 25 МПа.

Результаты экспериментов по определению прочности сцепления напечённого порошка ПХ-30 с бронзовой втулкой представлены на рисунке 4.21.

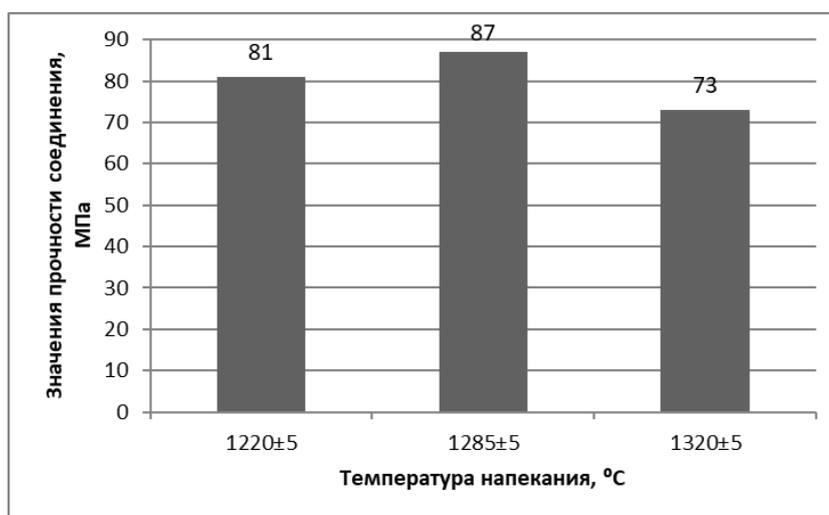


Рисунок 4.21 – Изменение значения прочности сцепления в зависимости от температуры напекания порошка ПХ-30

В результате проведённых исследований было выяснено следующее:

- Наибольшее значение прочности сцепления достигается при температуре 1285 ± 5 °С, что подтверждает правильность выбранного режима напекания.
- При увеличении температуры наблюдается снижение прочности сцепления на 16%, связанное с тем, что в результате напекания происходит испарение легкоплавких компонентов бронзы (олова, свинца).

Исследования по определению времени напекания проводились при оптимальных температурах.

Время напекания для порошка ПР-Н80Х13С2Р варьировалось в диапазоне от 40 до 90 секунд (Рисунок 4.22).

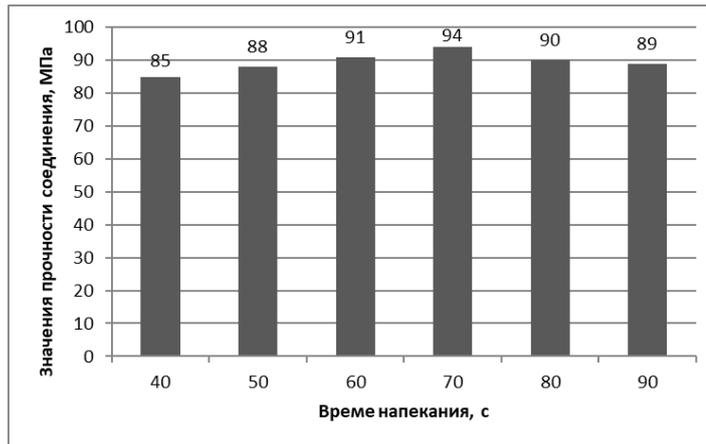


Рисунок 4.22– Изменение значения прочности сцепления в зависимости от времени напекания порошка ПР-Н80Х13С2Р

Во время исследований установлено, что наиболее высокие значения прочности сцепления достигаются при времени напекания 70 с, более длительное время напекания не приводит к увеличению прочности сцепления.

Для порошка ПХ-30 время напекания варьировалось в диапазоне от 220 до 270 секунд (Рисунок 4.23).

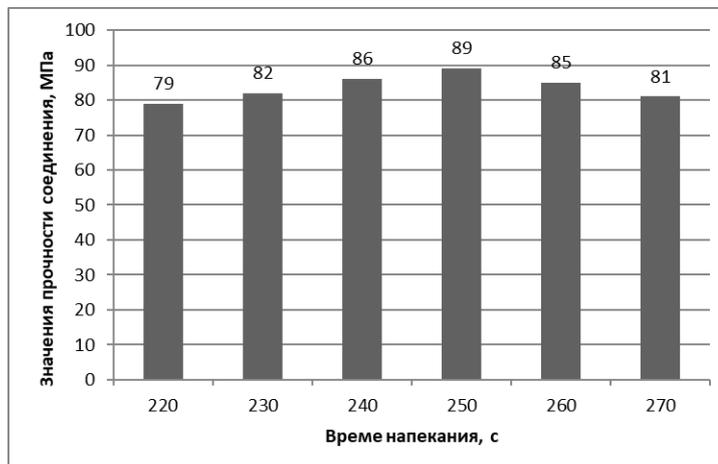


Рисунок 4.23 – Изменение значения прочности сцепления в зависимости от времени напекания порошка ПХ-30

В результате проведенных исследований было установлено, что наиболее оптимальным временем напекания является 250 с. При этом стоит отметить уменьшение прочности сцепления при времени напекания до 250 с, что связано с наличием в порошке ПХ-30 железа и хрома. Увеличение времени напекания не оказывает серьезного воздействия на прочность сцепления. Наблюдаемое снижение

прочности сцепления, составляющее не более 3,5%, вызвано увеличением в зоне спекания соединений лигатуры Cu-Fe.

4.2.3 Определение твёрдости

Для подтверждения правильности выбора оптимальной температуры напекания металлических порошков проведены исследования по определению твердости.

Для проведения исследований по определению твёрдости выбраны образцы с температурой напекания 1160 ± 5 °C и 1180 ± 5 °C для порошка ПР-Н80Х13С2Р, а для порошка ПХ-30 – 1285 ± 5 °C и 1300 ± 5 °C.

Перед началом исследований образцы обрабатывались на токарном станке с частотой вращения 630 мин^{-1} , глубиной резания 0,25 мм и подачей 0,07 мм/об. Для уменьшения влияния температуры во время обработки образец обильно охлаждался.

Измерения твердости проводились в соответствии с методикой, приведенной в третьей главе.

Результаты измерений твердости восстановленных втулок при помощи напекания порошка ПР-Н80Х13С2Р представлены на рисунке 4.24.

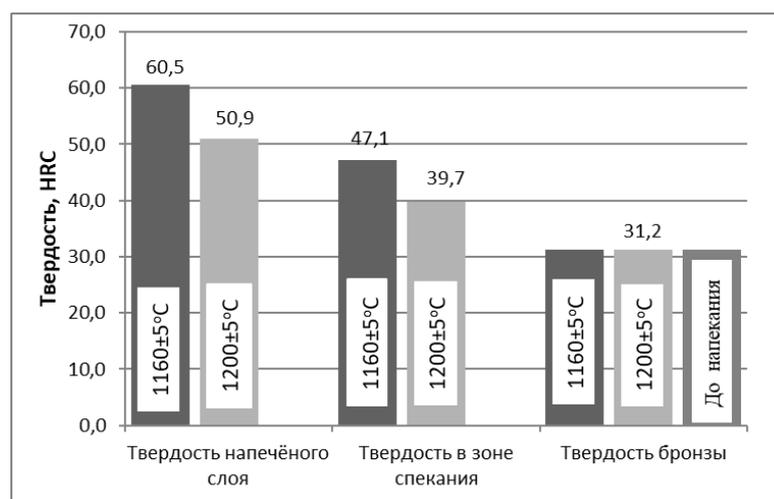


Рисунок 4.24 – Изменение твердости в зависимости от температуры напекания порошка ПР-Н80Х13С2Р

Как следует из результатов исследований, представленных на рисунке 4.15, увеличение температуры напекания порошка ПР-Н80Х13С2Р приводит к уменьшению твёрдости. Это связано с тем, что при высоких температурах возникает пористость, связанная с выгоранием лигатурного сплава Cu-Ni, что отрицательно влияет на твёрдость. Также при температуре в $1160 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ твёрдость в зоне спекания приближается к твёрдости напечённого слоя при температуре $1200 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, что также свидетельствует о правильности выбора температуры напекания. При этом стоит отметить, что твёрдость бронзы после проведения напекания не изменилась. Это объясняется использованием специального охлаждаемого электрода, предотвращающего структурные изменения бронзовой втулки во время проведения напекания.

Результаты измерений твёрдости восстановленных втулок при помощи нанесения порошка ПХ-30 представлены на рисунке 4.25.

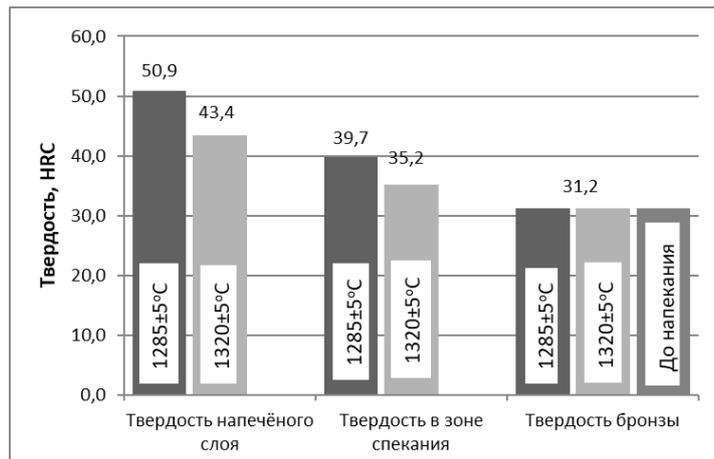


Рисунок 4.25 – Изменение твёрдости в зависимости от температуры напекания порошка ПХ-30

Как следует из результатов исследований, представленных на рисунке 4.16, увеличение температуры напекания порошка ПХ-30 приводит к уменьшению твёрдости. Это связано с тем, что при высоких температурах происходит более интенсивное испарение лигатурного сплава Cu-Fe наплавляемого порошка, что приводит к возникновению пористости, которая отрицательно влияет на твёрдость. Также при температуре в $1285 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ твёрдость в зоне спекания приближается к твёрдости напечённого слоя при температуре $1320 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, что также свидетельствует о правильности выбора температуры напекания. При этом стоит отметить, что твёрдость

бронзы не изменилась. Это объясняется использованием специального охлаждаемого электрода, предотвращающего структурные изменения бронзовой втулки во время проведения напекания.

4.2.4 Определение плотности напечённого слоя

Плотность напечённого слоя определялась в соответствии с методикой, приведённой в третьей главе.

Первоначальные исследования проводились с целью определения воздействия температуры на плотность напекаемого слоя. Для порошка

ПР-Н80Х13С2Р диапазон температур изменялся от 1060 °С до 1210 °С с интервалом 50 °С, давление электродов составляло 20 МПа, время напекания при этом составляло 70 с.

Результаты проведённого эксперимента представлены на рисунке 4.26.

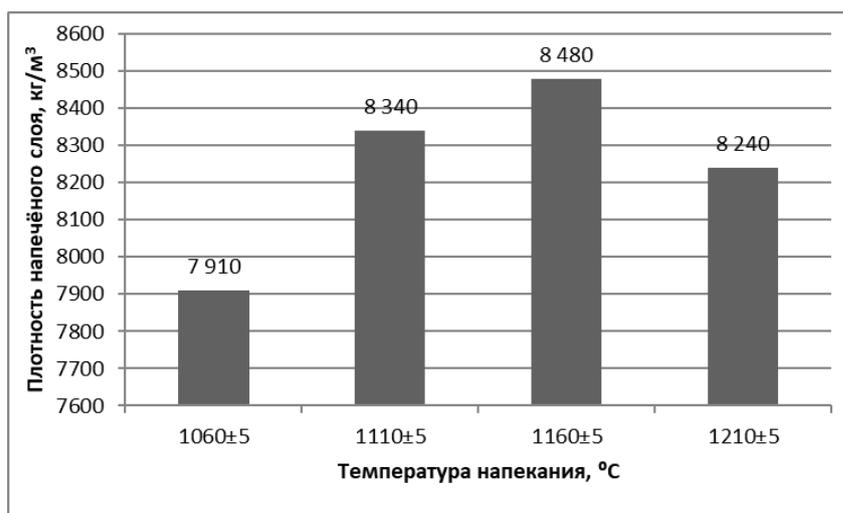


Рисунок 4.26 – Зависимость плотности напечённого слоя порошка ПР-Н80Х13С2Р от температуры напекания

Из анализа данных, полученных в результате эксперимента, следует, что существует зависимость между плотностью и температурой напекания. Более низкая плотность напечённого слоя при температуре напекания менее 1160 ± 2 °С очевидно обуславливается более рыхлым состоянием слоя, связанным с недостаточной спекаемостью частиц порошка. Падение плотности при превышении 1160 ± 2 °С связано с частичным выгоранием лигатурного сплава Cu-Ni.

Исследования по определению воздействия температуры на плотность напекаемого слоя для порошка ПХ-30 проводились со следующими параметрами напекания:

- диапазон температур составлял от 1185 °С до 1325 °С с интервалом 50 °С;
- усилие сжатия электродов 25 МПа;
- время напекания 250 с.

Результаты проведенного эксперимента представлены на рисунке 4.27.

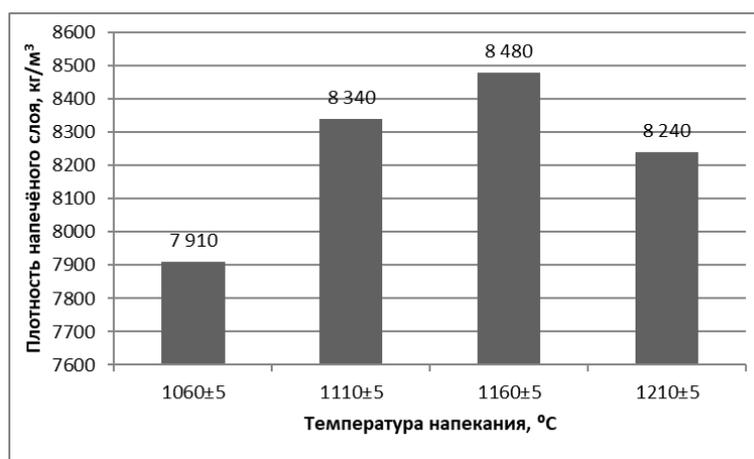


Рисунок 4.27 – Зависимость плотности напечённого слоя порошка ПХ-30 от температуры напекания

В результате проведенных исследований было установлено, что наибольшая плотность напечённого слоя достигается при диапазоне температур от 1285 ± 5 °С до 1325 ± 5 °С. При меньшей температуре напекания наблюдается незначительное падение плотности покрытия, очевидно, связанное с недостаточной спекаемостью порошка.

Второй этап исследований проводился с целью установления зависимости между плотностью напечённого слоя и давлением электродов во время напекания.

Для порошка ПР-Н80Х13С2Р температура напекания равнялась 1160 ± 2 °С, давление электродов при этом изменялось от 10 до 30 МПа с шагом в 5 МПа, время напекания составляло 70 с.

Результаты приведенного эксперимента представлены на рисунке 4.28.

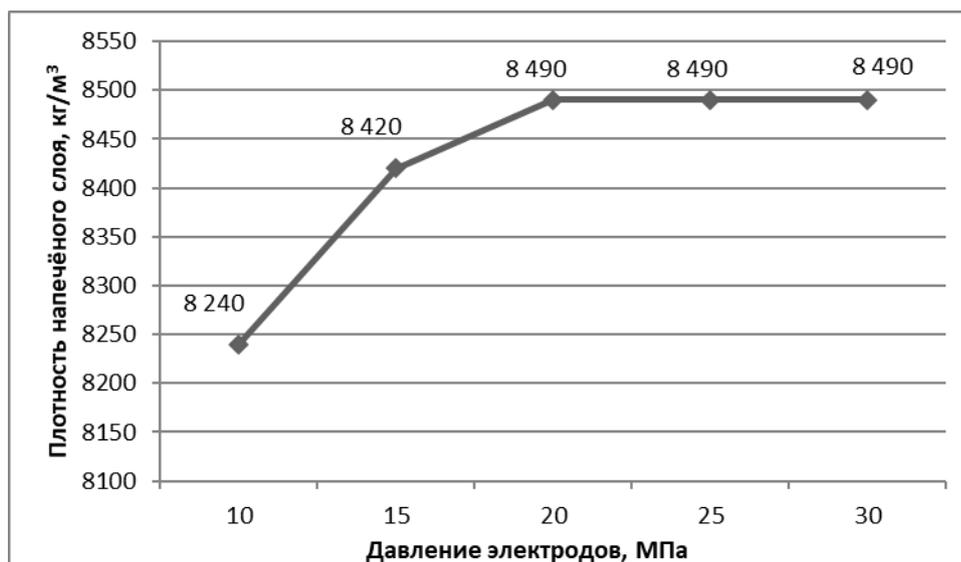


Рисунок 4.28 – Зависимость плотности напечённого слоя порошка ПР-Н80Х13С2Р от давления электродов

Как видно из представленного графика, при увеличении давления электродов до 25 МПа происходит увеличение плотности напечённого слоя. Следует отметить, что при дальнейшем увеличении давления плотность напечённого слоя не возрастает.

Для порошка ПХ-30 температура напекания равнялась 1285 ± 2 °С, давление электродов при этом изменялось от 10 до 30 МПа с шагом в 5 МПа, время напекания при этом составляло 250 с.

Результаты приведённого эксперимента представлены на рисунке 4.29.

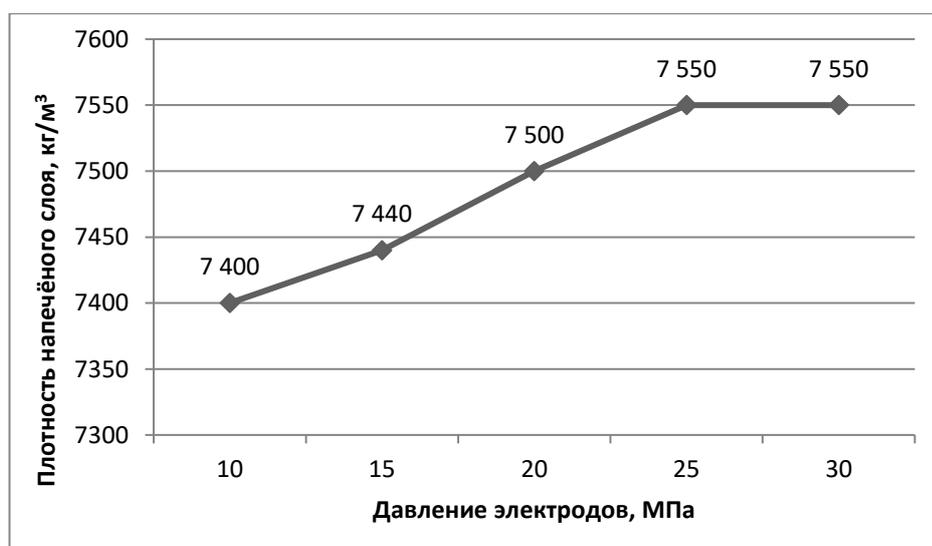


Рисунок 4.29 – Зависимость плотности напечённого слоя порошка ПХ-30 от давления электродов

Как видно из представленного графика, при увеличении давления электродов 20 МПа происходит увеличение плотности напечённого слоя. При этом следует отметить, что при дальнейшем увеличении давления плотность напечённого слоя не возрастает.

Третий этап исследований проводился с целью установления зависимости между плотностью напечённого слоя и временем напекания.

Для порошка ПР-Н80Х13С2Р температура напекания равнялась $1160 \pm 2^\circ\text{C}$, давление электродов 20 МПа, время напекания при этом изменялось от 40 с. до 90 с. с интервалом 10 с.

Результаты проведённого эксперимента представлены на рисунке 4.30

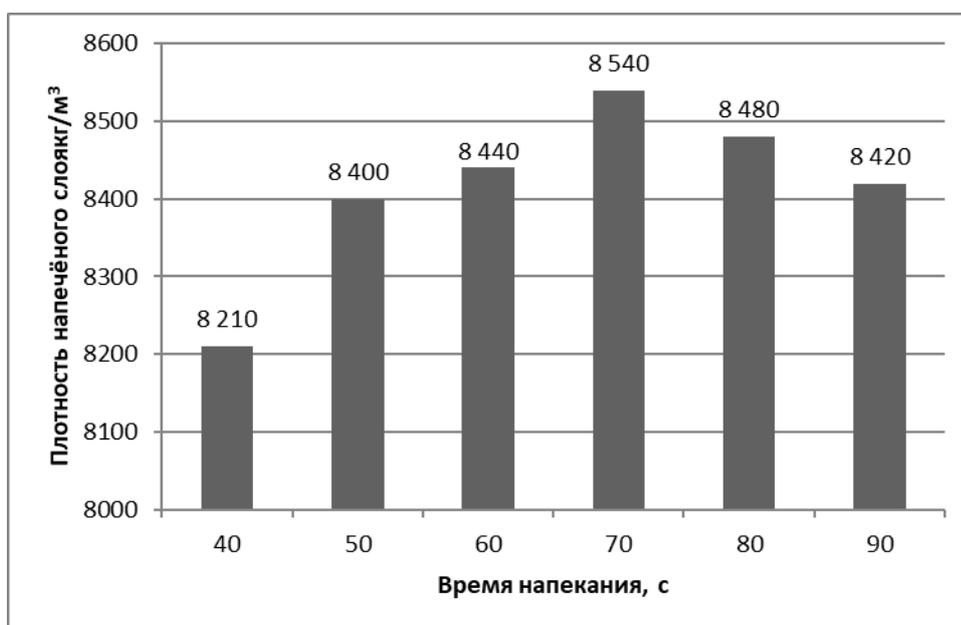


Рисунок 4.30 – Зависимость плотности напечённого слоя порошка ПР-Н80Х13С2Р от времени напекания

В результате проведённых исследований выяснено, что при увеличении времени напекания порошка Н80Х13С2Р происходит возрастание плотности напечённого слоя, при этом максимальное значение плотности достигается при времени напекания в диапазоне 70 с. Дальнейшее увеличение времени напекания приводит к уменьшению плотности напечённого слоя, связанному с выгоранием лигатурного сплава Cu-Ni.

Для порошка ПХ-30 температура напекания равнялась 1285 ± 2 °С, давление электродов 25 МПа, время напекания при этом изменялось от 220 с. до 270 с. с интервалом 10 с.

Результаты проведённого эксперимента представлены на рисунке 4.31.

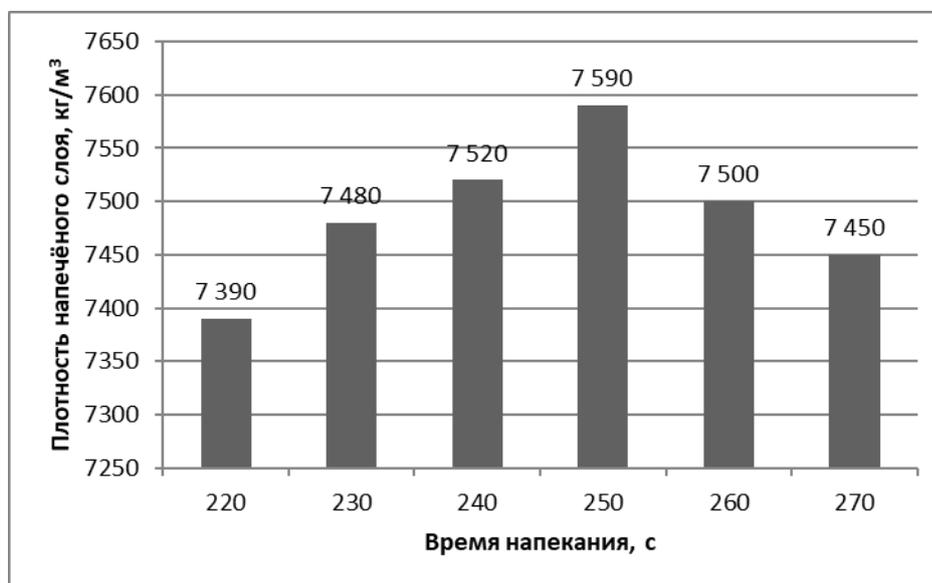


Рисунок 4.31 – Зависимость плотности напечённого слоя порошка ПХ-30 от времени напекания

В результате проведённых исследований было выяснено, что наилучшие показания плотности порошка ПХ-30 достигаются при времени напекания 250 с. Дальнейшее увеличение времени напекания приводит к уменьшению плотности напечённого слоя, связанному с выгоранием лигатурного сплава Cu-Fe.

В результате проведённых экспериментов было выяснено, что наибольшие показания плотности для порошка H80X13C2P достигаются при следующих параметрах:

- температура напекания 1160 ± 5 °С;
- давление электродов 20 МПа;
- время напекания 70 с.

Для порошка ПХ-30 данные значения составляли:

- температура напекания 1285 ± 5 °С;
- давление электродов 25 МПа;
- время напекания 250 с.

4.2.5 Определение износостойкости напечённого слоя

Для сравнения износостойкости были взяты новые втулки, изготовленные из бронзы Бр.О5Ц5С5, а также втулки после проведения обжата и напекания.

Напекание металлических порошков происходило при следующих показателях:

для порошка Н80Х13С2Р:

- температура напекания 1160 ± 5 °С;
- давление электродов 20 МПа;
- время напекания 70 с.

для порошка ПХ-30:

- температура напекания 1285 ± 5 °С;
- давление электродов 25 МПа;
- время напекания 250 с.

После проведения напекания образцы обрабатывались на токарном станке с частотой вращения 630 мин^{-1} , глубиной резания 0,25 мм и подачей 0,07 мм/об. Для уменьшения влияния температуры во время обработки образец обильно охлаждался.

Исследования проводились согласно методике, представленной в разделе 3.9.

По результатам проведённых исследований построены графики, представленные на рисунках 4.32, 5.33, 5.34.

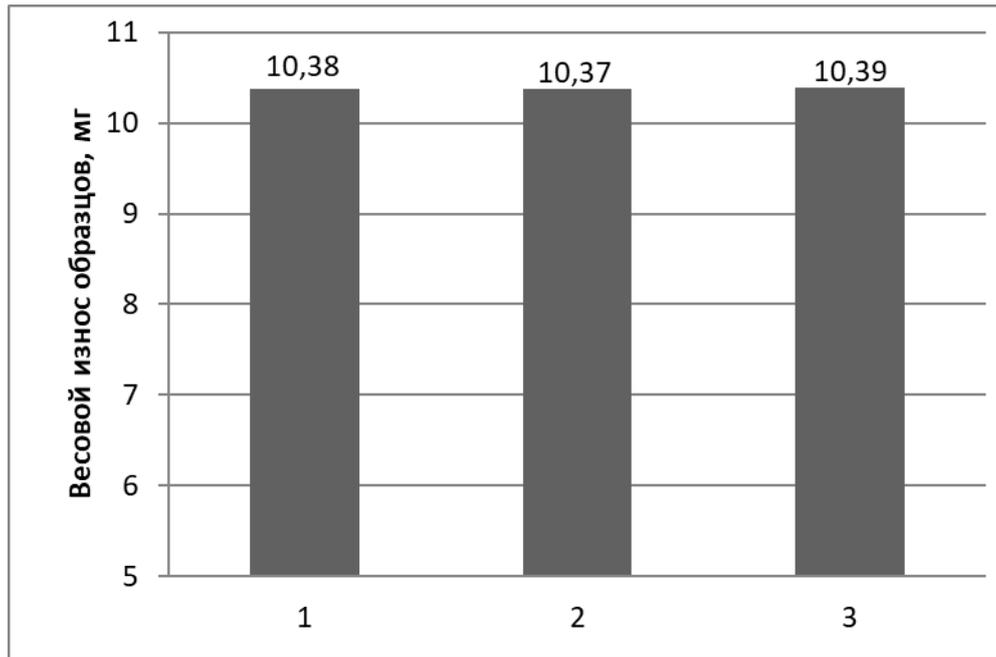


Рисунок 4.32 – Износ восстановленных втулок при частоте вращения образцов 500 мин^{-1} . 1 - до обжаривания; 2 - после напекания ПР-Н80Х13С2Р и механической обработки; 3 - после напекания ПХ-30 и механической обработки

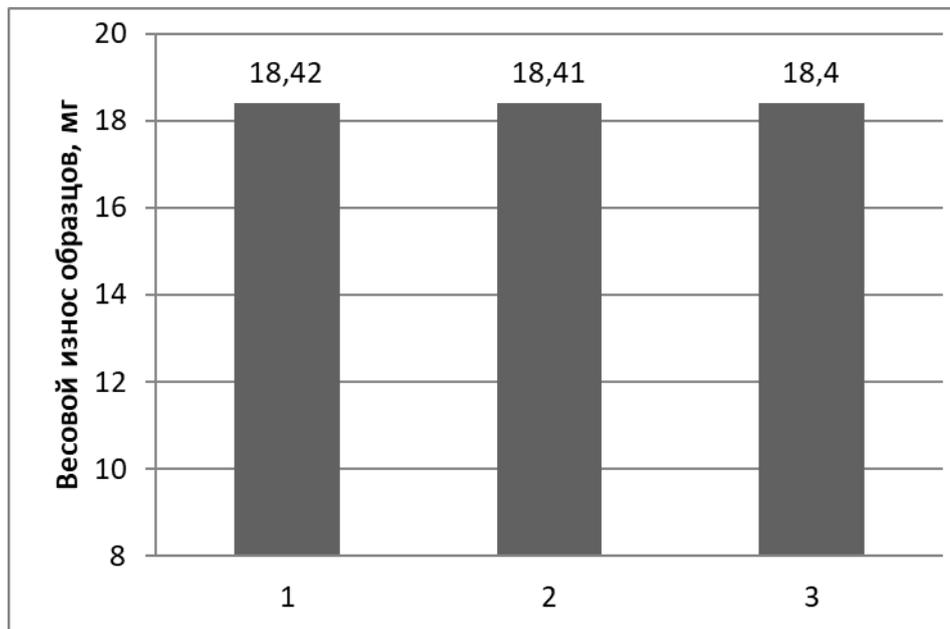


Рисунок 4.33 – Износ восстановленных втулок при частоте вращения образцов 1000 мин^{-1} . 1 - до обжаривания; 2 - после напекания ПР-Н80Х13С2Р и механической обработки; 3 - после напекания ПХ-30 и механической обработки

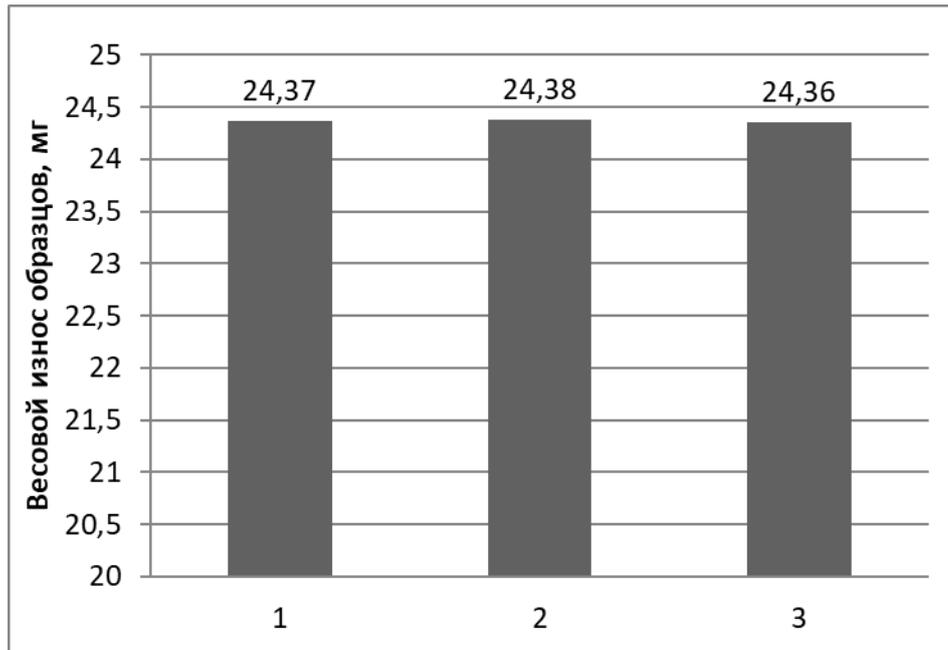


Рисунок 4.34 – Износ восстановленных втулок при частоте вращения образцов 1500 мин^{-1} . 1 - до обжата; 2 - после напекания ПР-Н80Х13С2Р и механической обработки; 3 - после напекания ПХ-30 и механической обработки

В результате проведённого эксперимента установлено, что разность показателей изнашивания при одной и той же частоте вращения не превышает 1% и не зависит от марки напекаемого порошка. Это объясняется тем, что использование во время напекания охлаждающего электрода препятствовало структурным изменениям в рабочем слое поверхности втулки на глубину до 3 мм, а незначительные зоны упрочнения, возникшие в результате обжата, были удалены во время растачивания под чертёжный размер, что также подтверждается микроструктурами образцов, представленных на рисунках 4.35 и 4.36



а)



б)

Рисунок 4.35– Микроструктуры рабочих поверхностей деталей после напекания и растачивания под чертёжный размер: а) при использовании порошка ПР-Н80Х13С2Р; б) при использовании порошка ПХ-30



Рисунок 4.36 – Микроструктура рабочих поверхностей втулки до проведения восстановления

4.3 Технологические рекомендации по восстановлению втулок

В результате проведённых теоретических и экспериментальных исследований разработана технология восстановления внутренних поверхностей подшипников скольжения из оловянистых бронз путём объёмного обжатия с последующим электроконтактным напеканием стальных порошков на наружную поверхность.

Технология включает в себя следующие операции:

1. Контроль износа и подбор геометрии обжимной матрицы, согласно зависимостям представленным на рисунке 4.9.
2. Проведение объёмного обжатия.
3. Контроль размеров детали после проведения объёмного обжатия - изменение наружного и внутреннего диаметров.
4. Подготовка детали к проведению электроконтактного напекания - очистка от масла (обезжиривание не требуется) и покрытие внутренней поверхности втулки высокотемпературной токонепроводящей краской.

5. Сборка графитовой оболочки - установка асбеста в нижней части графитовой оболочки, установка детали, засыпка стального порошка, установка верхней асбестовой прокладки, установка верхней части графитовой оболочки.
6. Монтирование графитовой оболочки на сварочную установку, состоявшее в установке графитовой оболочки на нижний электрод и плотном ее зажатии.
7. Производство нагрева деталей согласно следующим рекомендациям:
для порошка H80X13C2P:
 - температура напекания 1160 ± 5 °C;
 - давление электродов 20 МПа;
 - время напекания 70 с;для порошка ПХ-30:
 - температура напекания 1285 ± 5 °C (выдержка при температуре 1100 ± 5 °C в течение 110 с);
 - давление электродов 25 МПа;
 - время напекания 250 с.
8. Охлаждение графитовой оболочки до температуры менее 400 °C и производство ее разборки.
9. Осуществить контроль качества напечённого слоя.
10. Провести механическую обработку наружной поверхности втулки и отверстий для подачи масла.
11. Установить втулки в блок цилиндров согласно ремонтной документации на двигатель.
12. Провести обработку внутренней поверхности установленных втулок под требуемый диаметр.
13. Провести контроль параметров втулок после.

Выводы по главе 4

1. Увеличение угла заходной части обжимной матрицы мало влияет на величину предельного коэффициента обжатия оловянистой бронзы, при которой происходит потеря устойчивости втулки (складкообразование).
2. Рост величины коэффициента трения приводит к незначительному снижению величины максимальной степени деформации.
3. Для успешного осуществления технологического процесса объемного обжатия бронзовых втулок необходимо, чтобы величина пластической деформации составляла до 10-15 % при минимальном коэффициенте трения.
4. При обжатии наблюдается практически прямо пропорциональная зависимость изменения наружного и внутреннего диаметров втулок при объемном обжатии для образцов с толщиной стенки 4...7 мм
5. Проведённые исследования показывают возможность проводить обжатие без структурных изменений в рабочем слое до половины толщины стенки, соответственно для втулки распределительного вала ЯМЗ - 236.
6. Наилучшее качество напечённого слоя для порошка H80X13C2P достигается при температуре 1160 ± 5 °С, для порошка ПХ-30 температура напекания равняется 1285 ± 5 °С при этом необходимо произвести выдержку при температуре 1100 ± 5 °С в течение 110 с
7. В результате проведённых исследований было установлено, что наиболее оптимальным временем напекания для порошка H80X13C2P составляет 70 с, а для порошка ПХ-30 – 250 с, полученные значения прочности сцепления втулки и напечённого позволяют проводить установку втулки в корпус обеспечивая надежное соединение с натягом.
8. Напечённый слой имеет в два раза большую твёрдость, чем бронзовая втулка, при этом в зоне спекания твёрдость усредняется. Твёрдость бронзы до напекания и после осталось неизменной, что свидетельствует о эффективном применении специального водоохлаждаемого электрода.

9. В результате проведённых исследований было установлено, что наибольшая плотность напечённого слоя достигается при давлении электродов 20 МПа для порошка H80X13C2P, для порошка ПХ-30 – 25 МПа
10. Показатели износостойкости рабочей поверхности втулки не зависят от марки напекаемого порошка, что объясняется отсутствием температурного воздействия во время напекания из-за применения специального охлаждаемого электрода, а также последующей механической обработки под требуемый диаметр.
11. В результате проведенных исследований установлено, что наиболее оптимальные показатели имеют втулки, восстановленные при режиме напекания для порошка H80X13C2P: температура напекания 1160 ± 5 °С; давление электродов 20 МПа; время напекания 70 с. Для порошка ПХ-30: температура напекания равнялась 1285 ± 5 °С; давление электродов 25 МПа; время напекания 250 с.

Глава 5. Применение цифровых технологий на ремонтном предприятии

Для повышения эффективности процессов на ремонтных предприятиях необходимо применять комплексный подход к внедрению цифровых технологий способных образовать ЕИС при этом необязательно соблюдать предложенную последовательность мероприятий проводя внедрение по мере готовности подразделений.

5.1 Применение процессного подхода

Поскольку основной деятельностью предприятий является осуществление ремонта, то применение процессного подхода нужно начинать именно с неё.

Наибольшую эффективность данный подход демонстрирует при использовании специализированного программного обеспечения, хранящего процессы в цифровом виде. В рамках проведения оцифровки необходимо определить начальное и конечное событие процесса, установить связи с другими процессами и границы ответственности. Использование специализированного программного обеспечения и стандартизированных нотаций для описания процессов позволяет не только повысить понимание сотрудников, но и облегчить интеграцию с компонентами ЕИС, обеспечив формирование реестра процессов [39, 45].

Для создания моделей процессов верхнего уровня наилучшим образом подходит методология структурного анализа и проектирования (SADT) формализацией которой является нотация описания интегрированного автоматизированного производства для функционального моделирования (IDEF0).

При описании процесса согласно SADT должны выполняться следующие правила:

1. В соответствии с методологией функционального моделирования IDEF0 функций (процессов) на диаграмме должно быть не более 6.
2. Владелец должен быть назначен для каждой единицы деятельности.
3. Если единице деятельности назначено несколько владельцев, то для каждого владельца в свойствах роли должен быть определен объект деятельности.

4. Исполнитель должен быть назначен для каждой единицы деятельности.
5. Для каждой организационной единицы, присвоенной деятельности, должен быть определен тип связи.
6. В соответствии с методологией функционального моделирования IDEF0 к каждой функции должна быть присоединена хотя бы одна стрелка типа «управление».
7. К каждой единице деятельности должна быть присоединена хотя бы одна стрелка типа «выход».
8. На диаграмме не должны присутствовать неименованные стрелки.
9. На диаграмме не должны присутствовать стрелки, не присоединенные ни к одной фигуре диаграммы.
10. На диаграмме не должны присутствовать стрелки, для которых не определена единица деятельности, откуда стрелка приходит, или единица деятельности, куда она передается.
11. К каждой именованной стрелке диаграммы должен быть прикреплен хотя бы один объект.
12. Поток объектов при ветвлении стрелок не должен прерываться.

При построении процесса в нотацию IDEF0 также заложен принцип доминирования, согласно которому функции должны располагаться от верхнего левого угла до правого нижнего. Чем левее и выше расположен блок процесса, тем он старше в иерархии и, тем ниже у него порядковый номер [39, 45].

Поскольку методология SADT была разработана в 1960-х годах, а IDEF0 в 1981 г. требование о количестве функций на одной диаграмме признано устаревшим и от него разрешено отступать. Это требование было вызвано в первую очередь ограничениями вычислительной техники и в настоящее время утратило актуальность. Также претерпел корректировку и принцип доминирования теперь разрешено добавлять дополнительные блоки, не участвующие непосредственно в процессе, но оказывающие на него влияние, их располагают в верхнем правом углу

или в нижнем левом. Данное дополнение призвано повысить читаемость диаграммы и сократить количество необходимых для понимания процесса переходов между ними.

Процесс ремонта ДВС в нотации IDEF0 приведен на рисунке 5.1, описание процесса в таблице 5.1

Как видно из рисунка 5.1 диаграмма процесса, построенного в IDEF0 включает только самые важные элементы, не погружаясь в нюансы эта особенность позволяет повысить её читаемость предоставив необходимую информацию для руководящего состава.

Поскольку данный подход не удобен для низкоуровневых процессов на базе подхода SADT были созданы нотации потока работ (workflow) базовая блок-схема (Basic Flowchart), часто называемая процессом и кросс-функциональная блок-схема (Cross Functional Flowchart) известная как процедура.

Нотация процесс включает в себя дополнительные элементы такие как: события, поток управления и передачи объектов, а также контрольные точки, в которых принимаются решения.

Нотация процедура наследует наборы элементов от нотации процесс, но разделяет процесс на колодцы (Swimlane - дорожки) обозначение границы ответственности должностных лиц.

К преимуществам данных нотаций можно отнести их простоту для понимания изучения, недостатки происходят из их достоинств, а именно скудность элементов и отсутствие реализации как исполняемой модели. Недостатки данных нотаций не позволяют рекомендовать их для описания низкоуровневых процессов.

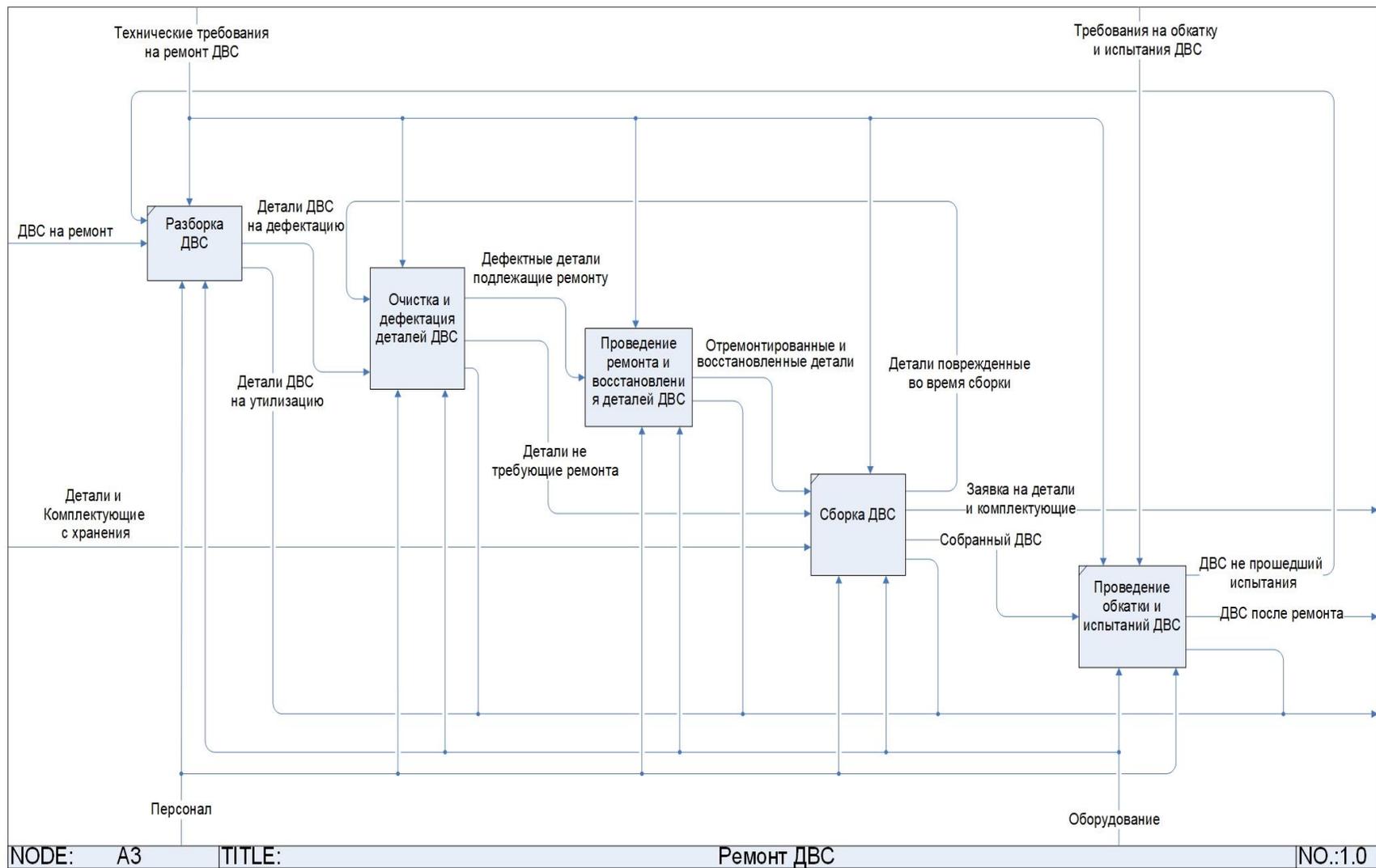


Рисунок 5.1 – Процесс ремонта ДВС в нотации IDEF0

Таблица 5.1 – Описание процесса ремонта ДВС

№	Функция	Владелец	Исполнители	Входы			Выходы	
				Тип	Название	Объекты	Название	Объекты
1.	А3.1 Разборка ДВС	Начальник участка разборки и сборки ДВС	Мастер участка Рабочий	Вход	ДВС на ремонт	ДВС на ремонт	Детали ДВС на дефектацию	Детали ДВС на дефектацию
					ДВС не прошедший испытания	ДВС не прошедший испытания		
				Управление	Технические требования на ремонт ДВС	Технические требования на ремонт ДВС	Детали ДВС на утилизацию	Детали ДВС на утилизацию
				Механизм	Оборудование	Оборудование		
	Персонал	Штатные сотрудники согласно должностным обязанностям						

№	Функция	Владелец	Исполнители	Входы			Выходы	
				Тип	Название	Объекты	Название	Объекты
2.	А3.2 Очистка и дефектация деталей ДВС	Начальник участка дефектовки ДВС	Мастер участка Рабочий	Вход	Детали ДВС на дефектацию	Детали ДВС на дефектацию	Детали ДВС на утилизацию	Детали ДВС на утилизацию
					Детали поврежденные во время сборки	Детали ДВС на дефектацию	Детали не требующие ремонта	Годные детали
				Управление	Технические требования на ремонт ДВС	Технические требования на ремонт ДВС	Дефектные детали подлежащие ремонту	Детали на ремонт
				Механизм	Оборудование	Оборудование		
3.	А3.3 Проведение ремонта и восстановления деталей ДВС	Начальник участка ремонта деталей ДВС	Мастер участка Рабочий	Вход	Дефектные детали подлежащие ремонту	Детали на ремонт	Детали ДВС на утилизацию	Детали ДВС на утилизацию
					Управление	Технические требования на ремонт ДВС	Технические требования на ремонт ДВС	Отремонтированные и восстановленные детали
				Механизм	Оборудование	Оборудование		
					Персонал	Штатные сотрудники согласно должностным обязанностям		

Продолжение таблицы 5.1

№	Функция	Владелец	Исполнители	Входы			Выходы	
				Тип	Название	№	Функция	Владелец
4.	А3.4 Сборка ДВС	Начальник участка разборки и сборки ДВС	Мастер участка Рабочий	Вход	Детали и комплектующие с хранения	Детали и комплектующие	Детали ДВС на утилизацию	Детали ДВС на утилизацию
					Детали, не требующие ремонта	Годные детали	Детали, поврежденные во время сборки	Детали ДВС на дефектацию
					Отремонтированные и восстановленные детали	Годные детали	Заявка на детали и комплектующие	Заявка на детали и комплектующие
				Управление	Технические требования на ремонт ДВС	Технические требования на ремонт ДВС	Собранный ДВС	Собранный ДВС
				Механизм	Оборудование	Оборудование		
						Персонал	Штатные сотрудники согласно должностным обязанностям	

Продолжение таблицы 5.1

№	Функция	Владелец	Исполнители	Входы			Выходы	
				Тип	Название	№	Функция	Владелец
5.	А3.5 Проведение обкатки и испытаний ДВС	Начальник участка испытаний ДВС	Мастер участка Рабочий	Вход	Собранный ДВС	Собранный ДВС	ДВС не прошедший испытания	ДВС не прошедший испытания
				Управление	Технические требования на ремонт ДВС	Технические требования на ремонт ДВС	ДВС после ремонта	Отремонтированный ДВС
					Требования на обкатку и испытания ДВС	Требования на обкатку и испытания ДВС	ДВС на утилизацию	Детали ДВС на утилизацию
				Механизм	Оборудование	Оборудование		
					Персонал	Штатные сотрудники согласно должностным обязанностям		

В последние годы получили распространения нотации, позволяющие не только графически отобразить процесс, но и провести его имитационное моделирование для выявления узких мест. Многие программные продукты поддерживают двухстороннюю связь с реальным процессом, позволяющую собирать данные в автоматизированном режиме, и быстро внедрять оптимизированный процесс. К числу таких нотаций можно отнести BPMN (Business Process Model and Notation) и EPC (Event-Driven Process Chain) [45].

BPMN можно считать альтернативой нотации «Процедура», но отвечающей современным требованиям. Данная нотация была разработана консорциумом Business Process Management Initiative (в настоящее время OMG), первая версия стандарта опубликована в 2004 году и на текущий момент насчитывает пять поколений последнее из которых (2.0.2) выпущено в 2014 году. При этом стоит отметить, что в стандарте ISO/IEC 19510 закреплена версия BPMN 2.0.1.

При описании процесса согласно BPMN должны выполняться следующие правила:

1. Если на диаграмме присутствует стартовое событие, то диаграмма должна содержать хотя бы одно конечное событие и наоборот.
2. Стартовое событие диаграммы должно иметь исходящую связь категории «поток управления».
3. Стартовое событие диаграммы не должно иметь исходящих связей категории «поток сообщений».
4. Каждое промежуточное событие диаграммы должно иметь хотя бы одну входящую и одну исходящую связь категории «поток управления» (исключение составляют только граничные события и события с типом триггера «ссылка»).
5. Граничное событие не должно иметь входящих связей.
6. Граничное событие (за исключением событий с типом триггера «компенсация») должно иметь исходящую связь категории «поток управления».

7. Событие-инициатор с типом триггера «сообщение» должно иметь исходящую связь категории «поток сообщений».
8. Событие-обработчик с типом триггера «сообщение» должно иметь входящую связь категории «поток сообщений».
9. Конечное событие диаграммы должно иметь входящую связь категории «поток управления».
10. Конечное событие диаграммы не должно иметь входящих связей категории «поток сообщений».
11. К каждой фигуре диаграммы должна быть присоединена хотя бы одна связь (за исключением фигур, для которых отсутствие связей предусмотрено правилами нотации).
12. На диаграмме не должны присутствовать связи, имеющие хотя бы один конец, не присоединенный к фигуре диаграммы.
13. Несколько потоков управления, исходящих из одной и той же задачи или подпроцесса, должны быть типа «условный поток управления» или «поток управления по умолчанию».
14. Событийный подпроцесс должен иметь только одно стартовое событие.
15. Промежуточное событие с типом триггера «ссылка» должно иметь либо только входящую связь категории «поток управления», либо только исходящую, но не одновременно и входящую, и исходящую связи.

Помимо элементов необходимых для описания процессов BPMN поддерживает автоматизированное описание в формате XPD (BPMN XML) позволяющее передавать модель в неизменном виде между различным программным обеспечением.

Отличительной особенностью BPMN является возможность расположения дорожек как вертикально, так и горизонтально. Процесс дефектации распределительного вала в BPMN приведен на рисунке 5.2, описание процесса в таблице 5.2

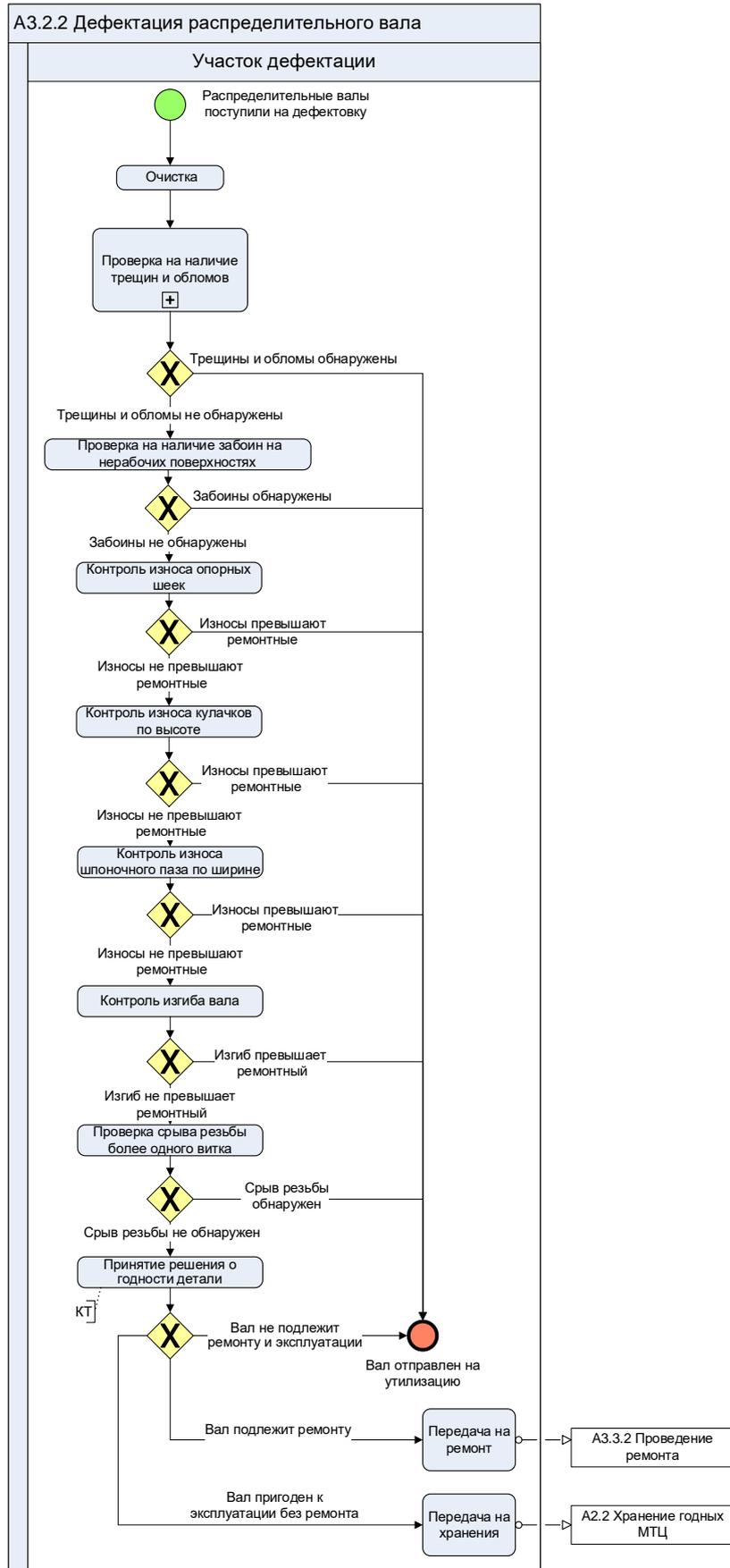


Рисунок 5.2 – Процесс дефектации распределительного вала

Таблица 5.2 – Описание процесса дефектации распределительного вала

№	Процесс	Исполнители	Входы		Выходы	
			Объект	Поступает от	Объект	Передается
1.	А3.2.2.1 Очистка	Участок дефектации	Распределительный вал на дефектацию	Мастер участка разборки и сборки ДВС	Распределительный вал, прошедший очистку	Контролер
2.	А3.2.2.2 Проверка на наличие трещин и обломов	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший очистку	Рабочий	Распределительный вал, прошедший проверку на наличие трещин и обломов	Контролер
3.	А3.2.2.3 Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший проверку на наличие трещин и обломов	Контролер	Распределительный вал, прошедший проверку на наличие забоин на нерабочих поверхностях	Контролер
4.	А3.2.2.4 Контроль износа опорных шеек	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший проверку на наличие забоин на нерабочих поверхностях	Контролер	Распределительный вал, прошедший контроль износа опорных шеек	Контролер
5.	А3.2.2.5 Контроль износа кулачков по высоте	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший контроль износа опорных шеек	Контролер	Распределительный вал, прошедший контроль износа кулачков по высоте	Контролер

Продолжение таблицы 5.2

№	Процесс	Исполнители	Входы		Выходы	
			Объект	Поступает от	Объект	Поступает от
6.	А3.2.2.6 Контроль износа шпоночного паза по ширине	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший контроль износа кулачков по высоте	Контролер	Распределительный вал, прошедший контроль износа шпоночного паза по ширине	Контролер
7.	А3.2.2.7 Контроль изгиба вала	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший контроль износа шпоночного паза по ширине	Контролер	Распределительный вал, прошедший контроль изгиба вала	Контролер
8.	А3.2.2.8 Проверка срыва резьбы более одного витка	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший контроль изгиба вала	Контролер	Распределительный вал прошедший дефектацию	Начальник участка дефектации ДВС
9.	А3.2.2.9 Принятие решения о годности детали	Участок дефектации	Распределительный вал прошедший дефектацию	Контролер	Распределительный вал прошедший дефектацию и подлежащий ремонту Распределительный вал прошедший дефектацию и пригодный для дальнейшей эксплуатации	Начальник участка дефектации ДВС
10.	А3.2.2.10 Передача на ремонт	Участок дефектации	Распределительный вал прошедший дефектацию и подлежащий ремонту	Контролер	Дефектный распределительный вал, подлежащий ремонту	Начальник участка ремонта деталей ДВС

№	Процесс	Исполнители	Входы		Выходы	
			Объект	Поступает от	Объект	Поступает от
11.	А3.2.2.11 Передача на хранения	Участок дефектации	Распределительный вал прошедший дефектацию и пригодный для дальнейшей эксплуатации	Контролер	Распределительный вал пригодный для дальнейшей эксплуатации	Заведующий складом

Событийная цепочка процессов (event-driven process chain- EPC) современный аналог нотации процесс, обладающий расширенным функционалом. Нотация EPC была разработана на основе IDEF3 в 1990-х в рамках создания концепции архитектуры интегрированных информационных систем (architecture of integrated information systems – ARIS) являясь в ней основным методом моделирования [45].

При описании процесса в нотации EPC должны выполняться следующие правила:

1. Диаграмма EPC всегда начинается и завершается событием.
2. В ходе процесса должно происходить чередование событий и функций.
3. Действие может выполняться только элементом функция.
4. Рекомендуется не размещать на одной диаграмме более 20 функций.
5. В блок событие или функция должна входить только одна связь.
6. Из блока событие или функция должна выходить только одна связь.
7. Начальное и конечное событие окружающие функцию на вышестоящей диаграмме, при декомпозиции переходят на нижнюю.
8. На диаграмме должны отсутствовать объекты связей.
9. Оператор слияния должен иметь минимум две входящие связи и не более одной исходящей

10. Операторы ветвления должны иметь только одну входящую связь и более двух исходящих
11. Операторы не должны обладать одновременно несколькими входящими и исходящими связями.
12. Чередование функций и событий сохраняется в независимости от нахождения между ними оператора.
13. После одиночного события не могут идти операторы ветвления.
14. Операторы могут объединять и разветвлять только однотипные элементы.
15. Операторы ветвления и объединения одного потока процесса должны совпадать.
16. Допускается при использовании для ветвления оператора «И», производить объединённые оператором «ИЛИ».

В настоящее время, говоря о ЕРС подразумевается и расширенная нотация eЕРС (extended Event-driven Process Chain), позволяющая создавать свои элементы. Данная нотация была создана в первую очередь для описания бизнес-процессов, и получила широкое распространение среди проектов по реинжинирингу и оптимизации компаний. Нотация ЕРС изначально применялась совместно с SAP R/3, но в дальнейшем получила распространение и в других ERP-системах (enterprise resource planning - планирование ресурсов предприятия) [45].

Диаграмма процесса, построенного согласно нотации ЕРС, всегда располагается вертикально с ветвлением в стороны относительно основного потока. Процесс проверки на наличие трещин и обломов при дефектации распределительного вала приведен на рисунке 5.3, описание – в таблице 5.3.

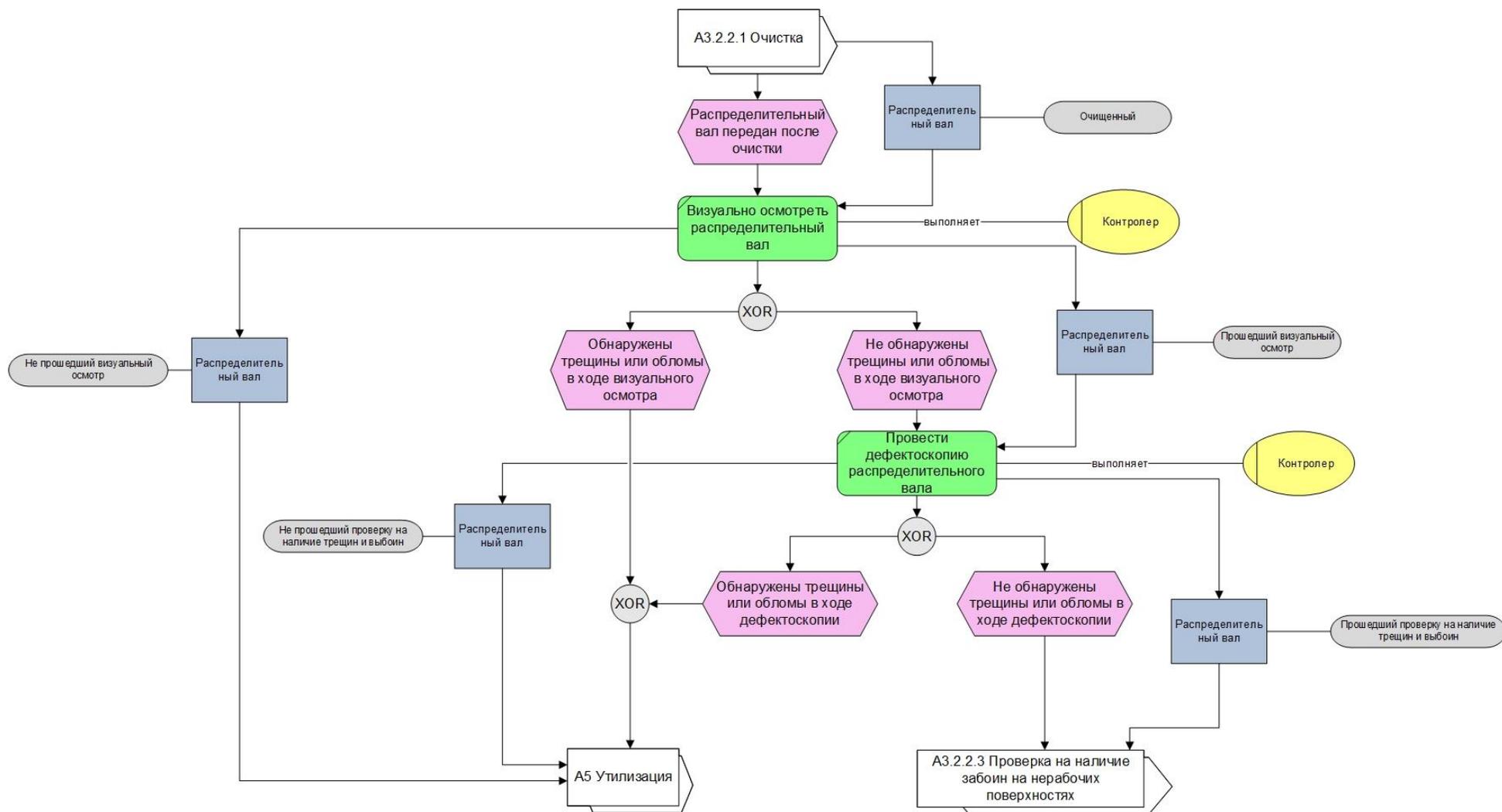


Рисунок 5.3 – Процесс проверки на наличие трещин и обломов при дефектации распределительного вала

Таблица 5.3 – Описание процесса проверки на наличие трещин и обломов при дефектации распределительного вала

№	Процесс	Исполнители	Входы		Выходы	
			Объект	Поступает от	Объект	Передается
1.	А3.2.2.2.1 Визуально осмотреть распределительный вал	Контролер	Распределительный вал	Рабочий	Распределительный вал	Контролер
2.	А3.2.2.2.2 Провести дефектоскопию распределительного вала	Контролер	Распределительный вал	Контролер	Распределительный вал	Участок дефектации

VRMN и EPC нотации, обладают равными возможностями при описании и моделировании процессов при этом есть возможность осуществления конвертации, так диаграмма VRMN при преобразовании в EPC сохранит все атрибуты, в обратном направлении возможна незначительная потеря информации [172, 174]. Проведённые сравнения нотаций также показали, что при описании процесса для модели в VRMN потребуется на 40% меньше элементов в сравнении с EPC, но потребуется большее число артефактов [45, 175].

Исходя из этого диаграмма процесса в VRMN более проста для восприятия, но менее подробна поэтому она хорошо подходит для описания низкоуровневых технологических процессов с большим числом подпроцессов и четкими границами ответственности.

Благодаря своей подробности нотация EPC, позволяет на высоком уровне детализации описывать ответственные процессы с малым числом задействованных лиц фактически являясь отражением операционной карты.

Применение процессного подхода на базе цифровых технологий позволяет идентифицировать входы, выходы, разработать процедуры и показатели эффективности, но этого недостаточно для перехода от описания процесса к его управлению, поскольку необходимо обеспечить мониторинг, снижающий влияние человеческого фактора.

5.2 Обеспечение прослеживаемости

Для организации эффективного мониторинга необходимо обеспечить прослеживаемость деталей во время движения по производственному процессу, для чего необходимо введение их индивидуальной маркировки.

Операцию по маркировке необходимо осуществлять после очистки, именно с неё можно начинать проведение дефектации деталей. Для маркировки можно использовать бирки, наклейки или наносить при помощи лазерной гравировки на нерабочие поверхности. Использование последнего метода позволяет сохранить маркировку после сборки, что положительно скажется на работе с рекламациями, а также позволит уточнить остаточный ресурс деталей.

В зависимости от уровня развития цифровых технологий на предприятии существует два метода кодирования метки рассмотрим их ниже.

При низком уровне развития цифровых технологий наиболее целесообразно всю информацию по детали хранить непосредственно в метке, создавая максимально избыточный код чтобы производить считывание даже в случае повреждения. В данном случае метка выступает в роли одноразового носителя информации (табл. 5.4)

Таблица 5.4 – Закодированная метка с информацией

Закодированная метка	Закодированная информация
Метка, созданная при входном контроле	
	Распределительный вал ЯМЗ -236 №21975 Входной контроль 21.02.2023 11:36 Контролёр Иванов Иван Николаевич Опорные Шейки I 53,713 II 53,711 III 53,719 IV 53,716
Метка, созданная при выходном контроле	
	Распределительный вал ЯМЗ -236 №21975 Входной контроль 21.02.2023 11:36 Контролёр Иванов Иван Николаевич Опорные Шейки I 53,713 II 53,711 III 53,719 IV 53,716 Механическую обработку произвел Петров Николай Иванович Выходной контроль 21.02.2023 14:30 Контролёр Иванов Иван Николаевич Опорные Шейки I 53,620 II 53,616 III 53,624 IV 53,623

Как видно из таблицы при данном виде размер метки пропорционален хранящейся в ней информации, что может затруднить её размещение на детали, а также повышает вероятность её повреждения. При применении данного варианта не происходит непрерывного обновления информации поэтому нельзя говорить о полноценной системе прослеживаемости внутри предприятия. При этом стоит отметить относительную простоту внедрения поскольку нужно ограниченное число специализированного оборудования в первую очередь, направленного на печать меток.

Для решения задачи непрерывного прослеживания пути деталей, и изменения её параметров необходимо более широкое использование цифровых технологий на предприятии. Основой подобной системы выступает база данных, которая будет накапливать информацию и обновляется в режиме реального времени. В таком случае код маркировки будет выступать в виде точки входа содержащей адрес внутренней интернет-странице.

Наровне с QR-кодом можно использовать метки с кодом Data Matrix преимуществом которых можно считать меньший размер, возможность создания прямоугольных меток (рис. 5.4), а также относительную простоту нанесения метки на

деталь при помощи гравировки, что может быть удобно на ремонтных предприятиях. К преимуществам использования QR-кодов можно отнести более высокую скорость считывания.



а)



б)



в)

Рисунок 5.4 – Закодированные метки (<http://10.50.2.10/info/21975>):

а – QR-код, б – квадратный код Data Matrix, в – прямоугольный код Data Matrix

Поскольку современное оборудование поддерживает оба метода кодирования стоимость внедрения будет одинаковой.

5.3 Применение цифровых средств измерений

Поскольку главной целью применения цифровых технологий является повышение качества выпускаемой продукции то возникает потребность в снижении рисков, связанных с человеческим фактором при сборе данных.

Согласно ремонтной документации двигателя ЯМЗ-236 контроль опорных шеек осуществляется при помощи рычажной скобы СР-75 с ценой деления 0,002 мм. Но она не имеет возможности подключения к компьютеру, что не позволяет гарантировать корректный сбор данных поэтому её необходимо заменить на цифровое средство измерения, например, на цифровой микрометр.

Несмотря на одинаковый диапазон измерений метрологические характеристики данных средств отличаются поэтому необходимо провести оценку неправильно принятых и неправильно забракованных распределительных валов, обработанных под первый ремонтный размер. Результаты проведённого сравнения приведены в таблице 5.5

Таблица 5.5 – Результаты расчета неправильно принятых и неправильно забракованных опорных шеек распределительных валов двигателей ЯМЗ-236 при обработке под первый ремонтный размер

Параметр	Средство измерений	
	ЦСИ	АСИ
Контролируемый размер, d, мм	53,7 ^{-0,065} _{-0,105}	
Предельная погрешность СИ, Δ_{lim} , мкм	±2	±3,5
СКО погрешности измерения, σ_{met} , мкм	1	1,75
Коэффициент точности измерения, A_{met} , %	2,50	4,58
Количество неправильно принятых опорных шеек, m, %	0,4	0,8
Количество неправильно забракованных опорных шеек, n, %	0,8	1,1
Итого брака, %	1,2	2,9

ЦСИ – Цифровой микрометр dasqua 4410; АСИ – Скоба рычажная CP-75 с ценой деления 0,002 мм.

Для контроля износа кулачков рекомендуется использовать штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1-1. Результаты сравнения с цифровым штангенциркулем приведены в таблице 5.6

Таблица 5.6 – Результаты расчета неправильно принятых и неправильно забракованных изношенных кулачков распределительных валов двигателей ЯМЗ-236

Параметр	Средство измерений	
	ЦСИ	АСИ
Контролируемый размер, мм	42,0 ^{+0,05} _{-0,05}	
Предельная погрешность СИ, Δ_{lim} , мкм	±20	±100
СКО погрешности измерения, σ_{met} , мкм	10	50
Коэффициент точности измерения, A_{met} , %	10	50
Количество неправильно принятых кулачков, m, %	1,8	>2,8
Количество неправильно забракованных кулачков, n, %	3,8	>7,8
Итого брака, %	2,26	3,9

ЦСИ – Цифровой штангенциркуль dasqua 2000; АСИ – Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1-1.

Для более корректного сравнения изменим отклонения размера исходя из метрологических характеристик рекомендуемого измерительного инструмента и проведем повторное сравнение (табл. 5.7).

Таблица 5.7 – Результаты расчета неправильно принятых и неправильно забракованных изношенных кулачков распределительных валов двигателей ЯМЗ-236 для скорректированных отклонений

Параметр	Средство измерений	
	ЦСИ	АСИ
Контролируемый размер, мм	42,0 ^{+0,15} _{-0,15}	
Предельная погрешность СИ, Δ_{lim} , мкм	±20	±100
СКО погрешности измерения, σ_{met} , мкм	6,7	16
Коэффициент точности измерения, A_{met} , %	5	25
Количество неправильно принятых кулачков, m, %	1,4	4,1
Количество неправильно забракованных кулачков, n, %	2,2	9,1
Итого брака, %	3,6	13,2

ЦСИ – Цифровой штангенциркуль dasqua 2000; АСИ – Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1-1.

Полученный коэффициент точности для аналогового штангенциркуля говорит несколько о неправильности выбора средства измерения сколько о широких возможностях по регулировки зазоров клапанного механизма.

Контроль изгиба вала, согласно официальной ремонтной документации, осуществляется с помощью индикатора часового типа ИЧ02 кл.0. Результаты сравнения с цифровым индикатором приведены в таблице 5.8

Таблица 5.8 – Результаты расчета неправильно принятых и неправильно забракованных распределительных валов двигателей ЯМЗ-236 из-за превышения изгиба

Параметр	Средство измерений	
	ЦСИ	АСИ
Допуск радиального биения, мм	0,04	
Предельная погрешность СИ, Δ_{lim} , мкм	± 3	± 4
СКО погрешности измерения, σ_{met} , мкм	1,5	2
Коэффициент точности измерения, A_{met} , %	7,5	10
Количество неправильно принятых валов, m , %	1,1	1,5
Количество неправильно забракованных валов, n , %	2,6	3,5
Итого брака, %	3,7	5

ЦСИ – Цифровой индикатор dasqua 5900; АСИ – Индикатор часового типа ИЧ02 кл.0.

Контроль величины износа бронзовых втулок распределительного валы, рекомендуется осуществлять с помощью нутромера НИ 50-100. Результаты сравнения с цифровым нутромером приведены в таблице 5.9

Таблица 5.9 – Результаты расчета неправильно принятых и неправильно забракованных изношенных втулок распределительных валов двигателей ЯМЗ-236

Параметр	Средство измерений	
	ЦСИ	АСИ
Контролируемый размер, D , мм	$53,7^{+0,03}$	
Предельная погрешность СИ, Δ_{lim} , мкм	± 5	± 10
СКО погрешности измерения, σ_{met} , мкм	2,5	5
Коэффициент точности измерения, A_{met} , %	8,3	16,7
Количество неправильно принятых втулок, m , %	1,6	2,8
Количество неправильно забракованных втулок, n , %	3,4	7,8
Итого брака, %	5	10,6

ЦСИ – Нутромер микрометрический трехточечный dasqua серии 4511; АСИ – Нутромер НИ 50-100.

Таким образом, замена аналоговых средств измерений на цифровые не только позволяет автоматизировать сбор данных, но и за счет улучшенных метрологических характеристик позволяет снизить количество неправильно принятых деталей на 26...66%, а неправильно забракованных – 25...75%.

5.4 Оптимизация процессов

Организация ЕИС на предприятии позволяет собирать статистику по каждой проводимой операции, что делает возможным производить оценку эффективности процессов, и при необходимости вносить проверенные в цифровой модели изменения [114].

Проведение имитационного моделирования для машиностроительного производства не представляет больших трудностей поскольку процессы зачастую стабильны, что позволяет с высокой точностью прогнозировать результат, в то же время на деятельность ремонтных предприятий оказывает влияния высокая степень неопределённости особенно при дефектации изношенных деталей [36].

Нормативное время проведения операций контроля при дефектации изношенных деталей, представленное в таблице 5.10 определялось после внедрения маркировки и замены средств измерений на цифровые.

Таблица 5.10 – Нормативное время проведения операций контроля

№ п/п	Вид контроля	Время проведения, с
1.	Проверка на наличие трещин и обломов	173
2.	Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях	162
3.	Контроль износа опорных шеек	23
4.	Контроль износа кулачков по высоте	9
5.	Контроль износа шпоночного паза по ширине	3
6.	Контроль изгиба вала	36
7.	Проверка срыва резьбы более одного витка	3
Всего		409

Данные в приведённой выше таблице не учитывают операции не относящиеся непосредственно к контролю.

В результате исследований установлено, что внедрение цифровых средств измерений позволило сократить затрачиваемое время, но введение дополнительной операции по маркировки нивелировало это преимущество.

Согласно исследованиям, до 35% распределительных валов выбраковываются во время дефектации как не подлежащие ремонту из них 50% из-за износа кулачков (2/3) и опорных шеек (1/3), вероятность выбраковки по остальным причинам распределена относительно равномерно [78, 157]. Данная статистика собрана на основе обработки большого массива данных и может не соответствовать конкретному предприятию поэтому создание однозначной модели не представляется возможным. Для решения данной проблемы было создано две модели:

- Равномерное распределение по операциям вероятности обнаружения брака.
- Неравномерное распределение вероятности в соответствии со статистикой.

Имитационное моделирование процесса дефектации распределительного вала в соответствии с приведенными в таблице 5.10 операциями, проводилось в программе Business Studio согласно базовому процессу, представленному на рисунке 5.2.

Для получения более объективных результатов имитационное моделирование проводилось для ста валов, также были введены следующие ограничения:

- Количество проверенных валов равно целому числу.
- Количество валов, поступивших на проверку, равняется 100.
- Сумма валов, отправленных на ремонт и в утилизацию равна 100.
- Процент брака стремится к 35.
- Вероятность обнаружения дефекта снижается по мере прохождения операций.

Результаты моделирования базового процесса представлены в таблицах 5.11 и 5.12

Таблица 5.11 – Результаты моделирования базового процесса при равномерном распределении

№ п/п	Вид контроля	Кол-во проверенных валов	Кол-во забракованных валов	Затраченное время, с
1.	Проверка на наличие трещин и обломов	100	8	17300
2.	Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях	92	6	14904
3.	Контроль износа опорных шеек	86	5	1978
4.	Контроль износа кулачков по высоте	81	5	729
5.	Контроль износа шпоночного паза по ширине	76	4	228
6.	Контроль изгиба вала	72	4	2592
7.	Проверка срыва резьбы более одного витка	67	3	201
Брак, %		35		
Время дефектации 100 валов, с		37932		

Таблица 5.12 – Результаты моделирования базового процесса при неравномерном распределении

№ п/п	Вид контроля	Кол-во проверенных валов	Кол-во забракованных валов	Затраченное время, с
1.	Проверка на наличие трещин и обломов	100	4	17300
2.	Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях	96	4	15552
3.	Контроль износа опорных шеек	92	6	2116
4.	Контроль износа кулачков по высоте	86	12	774
5.	Контроль износа шпоночного паза по ширине	74	4	222
6.	Контроль изгиба вала	70	3	2520
7.	Проверка срыва резьбы более одного витка	67	2	201
Брак в %		35		
Время дефектации 100 валов, с		38685		

В результате проведенного моделирования было определено, что дефектация 100 валов осуществляется быстрее при равномерном распределении.

На рисунке 5.5 представлена диаграмма сравнения времени, полученного во время моделирования с реальным процессом дефектации.

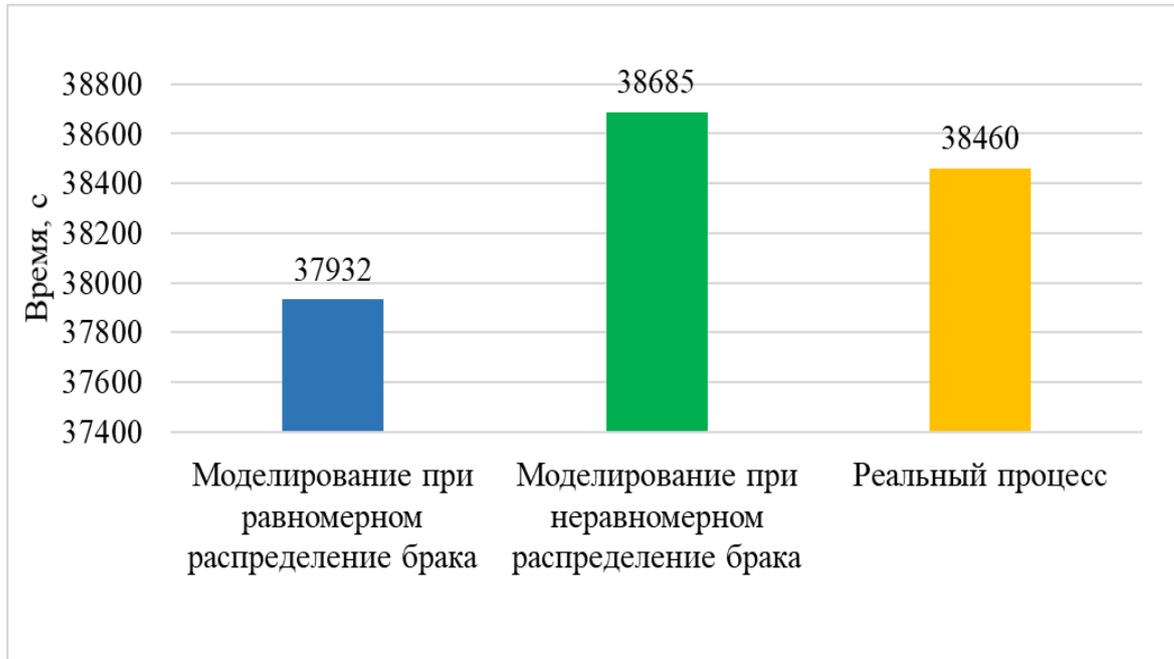


Рисунок 5.5 – Сравнение времени дефектации 100 валов базового процесса

В результате сравнения полученных данных более близкие результаты к реальному получены при неравномерном распределении.

Оптимизация процесса производилась исходя из процента выбракованных изделий и затрачиваемого времени на проведение операции.

Оптимизированный процесс представлен на рисунке 5.6, а его описание в таблице 5.13.

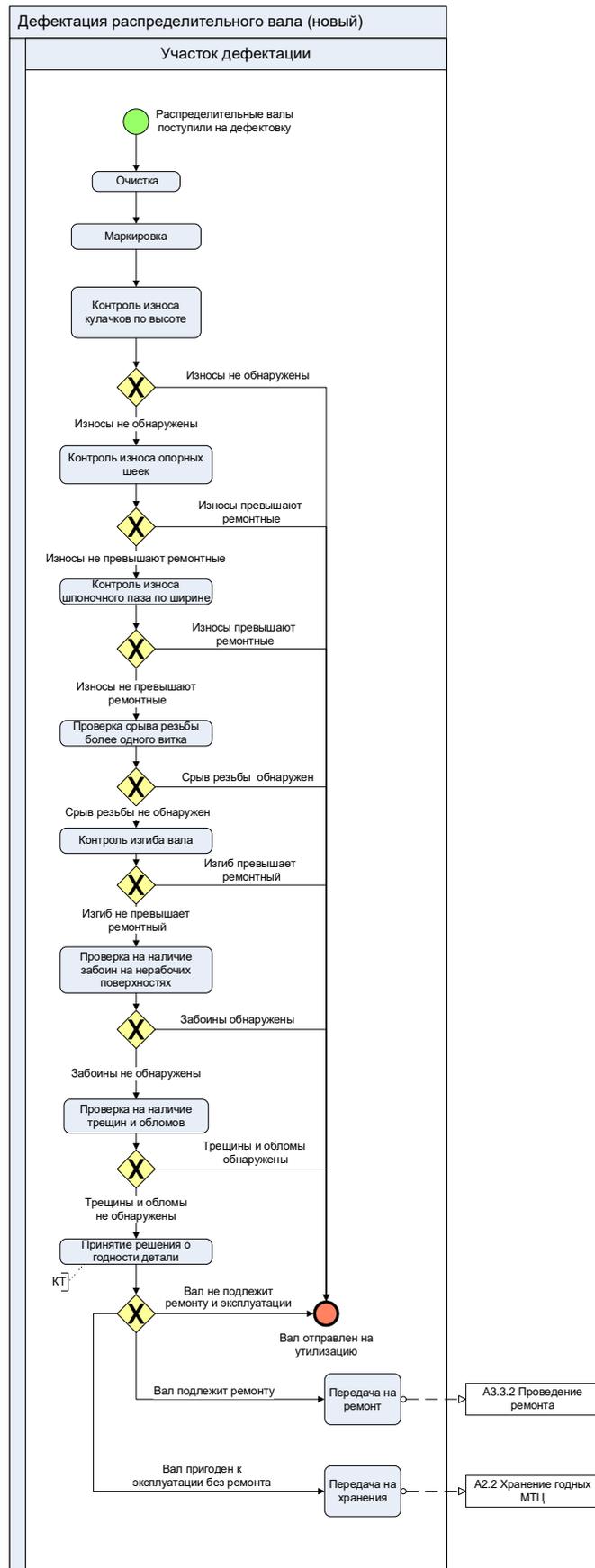


Рисунок 5.6 – Оптимизированный процесс дефектации распределительного вала

Таблица – 5.13 Описание оптимизированного процесса дефектации распределительного вала

№	Процесс	Исполнители	Входы		Выходы	
			Объект	Поступает от	Объект	Передается
1.	А3.2.2.1 Очистка	Участок дефектации	Участок дефектации	Распределительный вал на дефектацию	Мастер участка сборки и сборки ДВС	Распределительный вал, прошедший очистку
2.	А3.2.2.2 Маркировка	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший очистку	Рабочий	Контролер	Распределительный вал, прошедший маркировку
3.	А3.2.2.3 Контроль износа кулачков по высоте	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший маркировку	Контролер	Распределительный вал, прошедший контроль износа кулачков по высоте	Контролер
4.	А3.2.2.4 Контроль износа опорных шеек	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший контроль износа кулачков по высоте	Контролер	Распределительный вал, прошедший контроль износа опорных шеек	Контролер
5.	А3.2.2.5 Контроль износа шпоночного паза по ширине	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший контроль износа опорных шеек	Контролер	Распределительный вал, прошедший контроль износа шпоночного паза по ширине	Контролер

Продолжение таблицы 5.13

№	Процесс	Исполнители	Входы		Выходы	
			Объект	Поступает от	Объект	Передается
6.	А3.2.2.6 Проверка срыва резьбы более одного витка	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший контроль износа шпоночного паза по ширине	Контролер	Распределительный вал, прошедший контроль срыва резьбы	Контролер
7.	А3.2.2.7 Контроль изгиба вала	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший контроль срыва резьбы	Контролер	Распределительный вал, прошедший контроль изгиба вала	Контролер
8.	А3.2.2.8 Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший контроль изгиба вала	Контролер	Распределительный вал, прошедший проверку на наличие забоин на нерабочих поверхностях	Контролер
9.	А3.2.2.9 Проверка на наличие трещин и обломов	Участок дефектации	Распределительный вал, прошедший проверку на наличие забоин на нерабочих поверхностях	Контролер	Распределительный вал прошедший дефектацию	Контролер

Продолжение таблицы 5.13

№	Процесс	Исполнители	Входы		Выходы	
			Объект	Поступает от	Объект	Передается
10.	А3.2.2.10 Принятие решения о годности детали	Участок дефектации	Распределительный вал прошедший дефектацию	Контролер	Распределительный вал прошедший дефектацию и подлежащий ремонту	Начальник участка дефектации ДВС
					Распределительный вал прошедший дефектацию и пригодный для дальнейшей эксплуатации	
11.	А3.2.2.11 Передача на ремонт	Участок дефектации	Распределительный вал прошедший дефектацию и подлежащий ремонту	Контролер	Дефектный распределительный вал, подлежащий ремонту	Начальник участка ремонта деталей ДВС
12.	А3.2.2.12 Передача на хранения	Участок дефектации	Распределительный вал прошедший дефектацию и пригодный для дальнейшей эксплуатации	Контролер	Распределительный вал пригодный для дальнейшей эксплуатации	Заведующий складом

Результаты моделирования оптимизированного процесса при равномерном распределении приведены в таблице 5.14 , а при неравномерном распределении в таблице 5.15.

Таблица – 5.14 Результаты моделирования оптимизированного процесса при равномерном распределении

№ п/п	Вид контроля	Кол-во проверенных валов	Кол-во забракованных валов	Затраченное время, с
1.	Контроль износа кулачков по высоте	100	8	900
2.	Контроль износа опорных шеек	92	6	2116
3.	Контроль износа шпоночного паза по ширине	86	5	258
4.	Проверка срыва резьбы более одного витка	81	5	243
5.	Контроль изгиба вала	76	4	2736
6.	Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях	72	4	11664
7.	Проверка на наличие трещин и обломов	67	3	11591
Брак, %		35		
Время дефектации 100 валов, с		29508		

Таблица – 5.15 Результаты моделирования оптимизированного процесса при неравномерном распределении

№ п/п	Вид контроля	Кол-во проверенных валов	Кол-во забракованных валов	Затраченное время, с
1.	Контроль износа кулачков по высоте	100	12	900
2.	Контроль износа опорных шеек	88	7	2024
3.	Контроль износа шпоночного паза по ширине	81	6	243
4.	Проверка срыва резьбы более одного витка	75	3	225
5.	Контроль изгиба вала	72	3	2592
6.	Проверка на наличие забоин на нерабочих поверхностях	69	3	11178
7.	Проверка на наличие трещин и обломов	66	1	11418
Брак, %		35		
Время дефектации 100 валов, с		28580		

Моделирование показало снижение времени на проведение дефектации:

- При равномерном распределении на 22%
- При равномерном не распределении на 26%

Данные реального процесса для сравнения с полученными в результате моделирования снимались через 6 месяцев после внедрения. Этот промежуток времени необходим для адаптации сотрудников к новому процессу.

Диаграммы сравнения времени, полученного во время моделирования с реальным временем проведения дефектации представлены на рисунке 5.7.

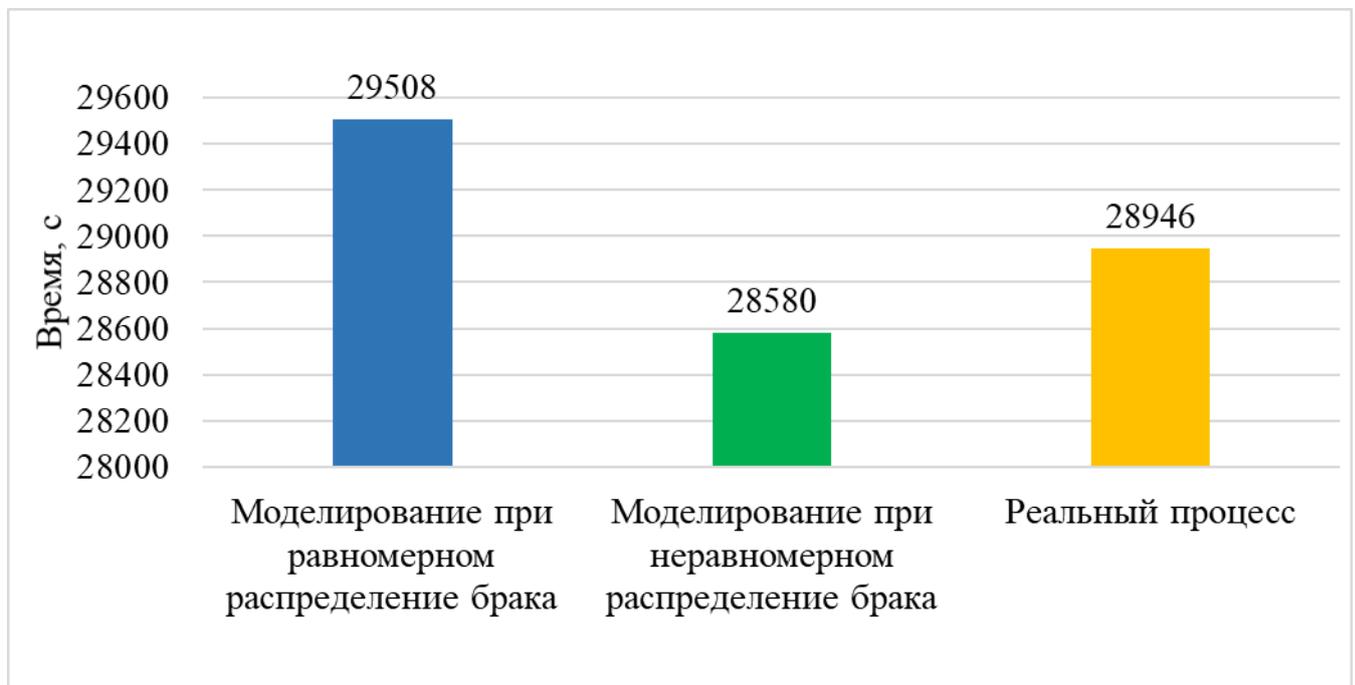


Рисунок 5.7 – Сравнение времени дефектации 100 валов оптимизированного процесса

Поскольку расхождение между моделями и реальными данными процесса не превысила 5%, можно утверждать, что при правильном подходе к моделированию необходимая точность достижима даже при процессах, связанных с высокой степенью неопределённости.

Правильность использования двух моделей процесса подтверждается реальным затраченным временем, находящимся в интервале между полученными при равномерном и неравномерном распределении. Применение данного подхода позволило провести оптимизацию процесса сократив затрачиваемое время в 1,32 раза.

5.5 Совершенствования системы принятия решений о необходимости ремонта распределительных валов

Валы дизельных V-образных двигателей ЯМЗ имеют несколько ремонтных размеров, поэтому важно достоверно определить, к какому ремонтному размеру (РР) отнести изношенный вал. Еще одним фактором является востребованность валов РР у потребителя. Снижение номенклатуры деталей позволит уменьшить нагрузку на персонал участков дефектовки и ремонта деталей ДВС, что положительно скажется на качестве работ.

Для преобразования ожиданий потребителя в технические требования наилучшим образом подходит метод QFD (Quality Function Deployment) – анализа, в результате проведения которого происходит построение «Дома качества».

Проведение QFD – анализа состоит из следующих этапов: определение ожиданий потребителя; определение сравнительной ценности продукции; установление целей; описание технических характеристик продукции; заполнение матрицы связей; технический анализ; определение целевых значений технических характеристик продукции.

На основе полученных целевых значений производится расчет степени улучшения по следующей формуле:

$$С. у. = \frac{Ц. з.}{О. п.}, \quad (5.1)$$

где С.у. – степень улучшения, Ц.з. – целевое значение, О.п. – оценка продукции.

Весомость для каждого потребительского ожидания определяется как:

$$\text{Вес. о. п.} = \text{Важ. о. п.} \cdot С. у., \quad (5.2)$$

где Вес.о.п. – весомость ожидания потребителей, Важ.о.п. – важность ожиданий потребителей, С.у. – степень улучшения.

Взаимосвязи между ожиданиями потребителей и техническими характеристиками обозначались символами в зависимости от силы этой связи (табл. 5.16).

Таблица – 5.16 Символы и коэффициенты, используемые для описания силы взаимосвязи

Символ	Сила взаимосвязи	Весовой коэффициент
●	Высокая	9
○	Средняя	3
▲	Низкая	1

Числовые оценки важности связи между каждой технической характеристикой рассчитывается по формуле:

$$З.в. = С.в. \cdot В., \% \quad (5.3)$$

где З.в. – значимость взаимосвязи, С.в. – сила взаимосвязи, В. – весомость.

Для проведения анализа QFD, было опрошено 100 потребителей позволивших определить их ожидания и установить связи с техническими характеристиками распределительного вала в зависимости от РР (рис. 5.8).

В результате проведенного анализа установлено, что наибольшим ожиданиям потребителя соответствуют новые распределительные валы, но более высокая стоимость снижает их привлекательность. Валы, обработанные под РР-2, обладают экономической привлекательностью, но их значительно меньший ресурс приводит к отсутствию спроса у потребителя. Наилучшим сочетанием цена – качество обладают валы, обработанные под РР-1, что позволяет им пользоваться стабильным спросом у потребителей. Исходя из этого дальнейшие исследования проводились только для валов, прошедших обработку под первый ремонтный размер.

При проведении дефектации наиболее важным этапом является принятие решения о годности детали в рамках которого устанавливается целесообразность проведения ремонта [173].

При ремонте распределительных валов возникает необходимость в механической обработке трущихся поверхностей таких как опорные шейки, поэтому на этапе дефектации нужно достоверно определить категорию ремонтного размера после обработки.

Ожидания потребителя	Технические характеристики																Целевое значение			
	Важность	Размер высоты кулачка	Размер опорной шейки	Ресурс шпоночного паза	Целостность резьбы	Изгиб вала	Остаточный ресурс	1	2	3	4	5	Целевое значение	Степень улучшения	Весомость	Весомость, %				
Отсутствие шумов в ГРМ	3	●	●	○	○	●		○			●	▲	4	1,25	3,8	5				
Отсутствие потери мощности двигателя	4	●	▲	○	○	●			○	●	▲	5	1,25	5	11					
Отсутствие повышенного расхода топлива	5	●	▲	○	○	●		○	●		▲	5	1	5	11					
Равномерная работа двигателя	5	●	○	○	○	●			○	●	▲	5	1	5	11					
Стабильный запуск двигателя	5	●	●	○	○	●			○	●	▲	5	1	5	11					
Минимальный расход масла	4	●	▲	○	○	●			○	●	▲	4	1	4	9					
Устойчивая работа ДВС на холостом ходу	5	●	●	○	○	●		○	●		▲	5	1	5	11					
Отсутствие проблем с запуском	5	●	●	○	○	●			○	●	▲	5	1	5	11					
Долгий срок службы	4	●	●	○	○	●		○		●	▲	4	1	4	9					
Низкие экономические затраты на ремонт	5	○	○	●	●	○	●		▲	●	○	5	1	5	11					
Суммарная оценка		384	250	312	312	384	81							47	100					
Приоритетность		22	15	18	18	22	5													
Единицы измерения		мм	мм	%	%	мм	%													
Новый вал		42,2	53,895 – 53,935	100	100	0	100													
Вал – 1 ремонтный размер		41,9	53,335 – 53,295	80	90	0,05	90													
Вал – 2 ремонтный размер		41,6	53,635 – 53,595	60	90	0,05	60													
Целевое значение		42,2	53,935 – 53,895	100	100	0 – 0,05	100													

Рисунок 5.8 – Дома качества распределительного вала ЯМЗ – 236

Для назначения припуска технологи зачастую прибегают к использованию требований на механическую обработку которые учитывают диаметр и длину обрабатываемой детали, а также материал её изготовления. Расчётные методы позволяют определить припуск более точно, но требуют проведения дополнительных

трудоёмких операций при входном контроле. Также на фактический величину припуска оказывают влияние такие факторы как наличие и техническое состояние оборудования, квалификация оператора и качество режущего инструмента, последний фактор особенно важен при операциях шлифования.

Помимо этого, на фактический припуск влияют недостаточная внимательность персонала, допускающего ошибки при настройке оборудования, так и ошибки технолога при назначении глубины резания опорных шеек.

Выходом из данной ситуации является определение припуска на основе данных о размерах шеек, до и после механической обработки. Поскольку применение цифровых измерительных инструментов позволяет значительно снизить влияние человеческого фактора на полученные данные, то фактический припуск будет являться достоверным. Применение объединённых в рамках ЕИС цифровых технологий позволяет определять фактический припуск в автоматизированном режиме.

Для определения фактического припуска на механическую обработку было выбрано 20 распределительных валов двигателя ЯМЗ-236 размеры опорных шеек, которых до и после обработки под первый ремонтный размер представлены на рисунке 5.8 и 5.9 соответственно.

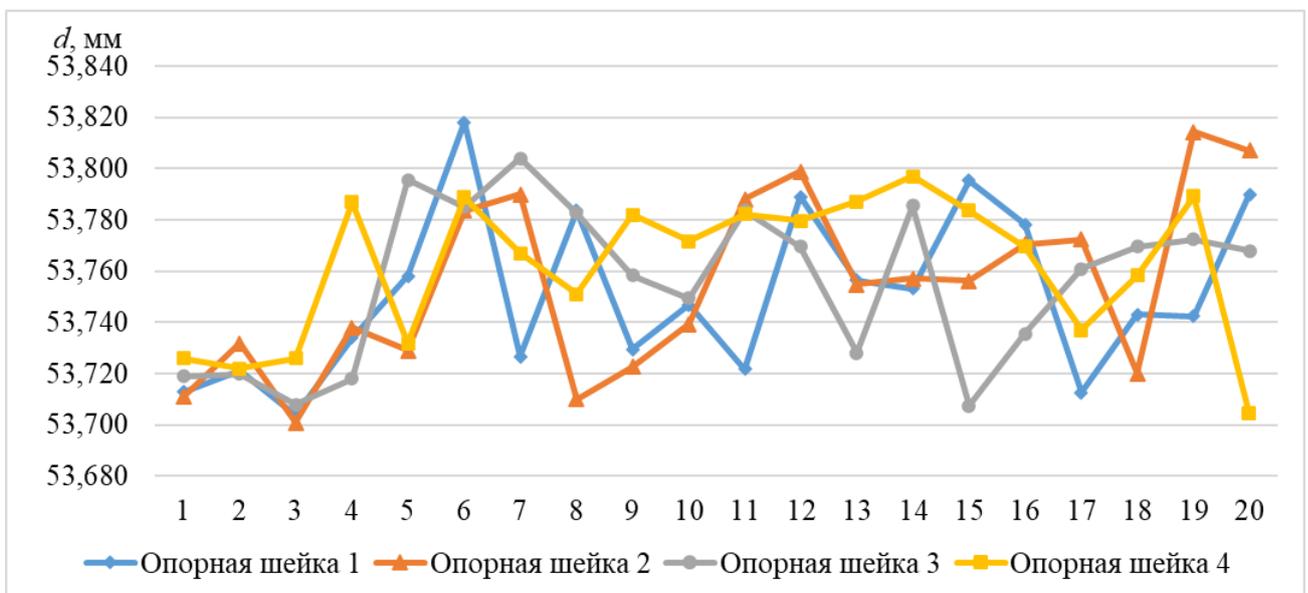


Рисунок 5.9 – Размеры опорных шеек распределительных валов до обработки под первый ремонтный размер

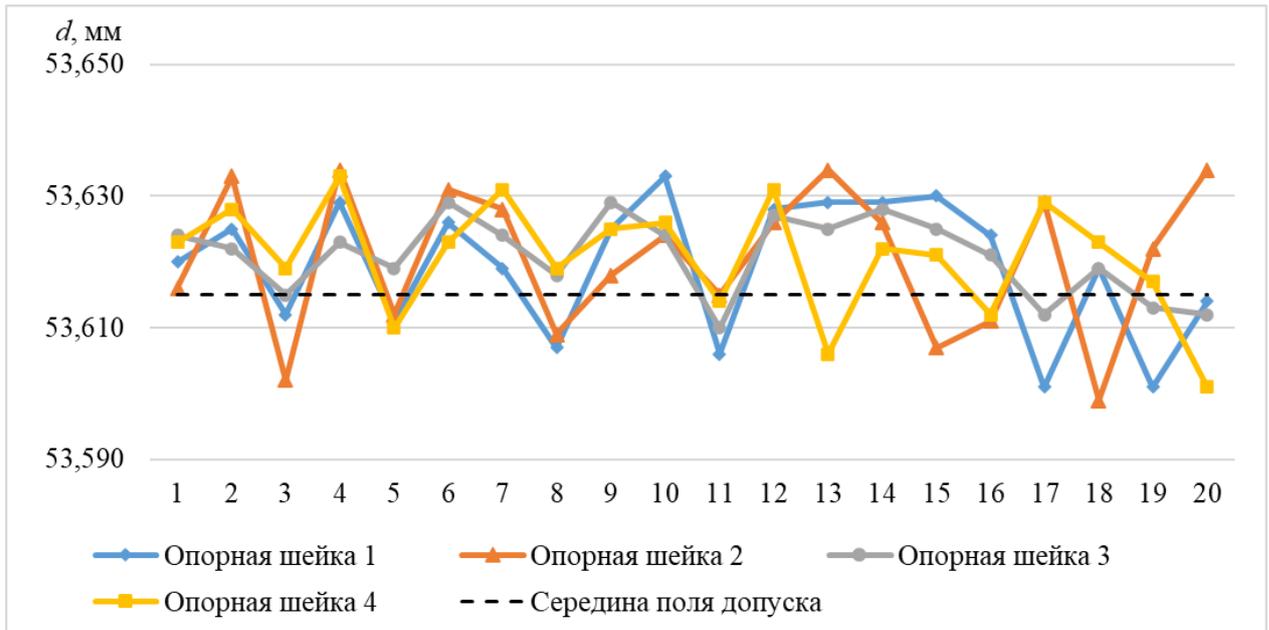


Рисунок 5.10 – Размеры опорных шеек распределительных валов после обработки под первый ремонтный размер

Исходя из полученных данных наибольший фактический припуск составил 0,192 мм для исключения вероятности перехода во второй ремонтный размер прием его равным 0,200 мм.

Таким образом можно производить уточнение и других параметров, позволяющих установить реальные возможности предприятия, после чего можно переходить к совершенствованию системы принятия решений.

На начальном этапе применения цифровых технологий или при их недостаточном развитии организация полностью автоматизированной системы затруднительна поэтому целесообразно использовать бальную систему позволяющую решить возложенную задачу.

Для снижения вероятности ошибочного принятия решения введём коэффициент весомости степени дефектности K_d :

$$K_d = \frac{(\sum k_{id})}{n}, \quad (5.4)$$

где k_{id} – коэффициент влияния дефекта на результат ремонта; n – количество обнаруженных дефектов.

Значения k_{id} выбирались таким образом, чтобы исключить промежуточное состояние в принятии решения.

В таблице 5.17 приведены значения k_{id} исходя из фактических данных конкретного предприятия.

Таблица 5.17 – Дефекты распределительного вала и значение k_{id}

Дефект	Значение k_{id}			
	2	4	8	16
Минимальный размер высоты кулачка	от 41,800 мм до 42,200 мм	от 41,400 мм до 41,799 мм	от 41,000 мм до 41,399 мм	Менее 41 мм
Минимальный размер опорной шейки	–	от 53,695 мм до 53,895 мм	от 53,395 мм до 53,694 мм	до 53,394 мм
Ширина шпоночного паза	–	–	–	Более 6,020 мм
Срыв резьбы M27x2 – 6g	–	1 виток	–	2 витка и более
Изгиб вала	до 0,05 мм	–	–	Более 0,05 мм
Забоины на нерабочих поверхностях	–	–	–	Наличие
Трещин или обломы	–	–	–	Наличие

При $K_d \leq 4$ остаточный ресурс распределительного вала не менее 80% и проведение ремонта целесообразно, при $K_d \geq 5$ остаточный ресурс составит 50%, и ремонт будет не целесообразен, если $K_d \geq 8$, то вал находится в критическом состоянии ремонту не подлежит.

Помимо этого, необходимо учитывать себестоимость ремонта и новой детали. Если себестоимость ремонта превысит 30% от новой детали, а остаточный ресурс менее 80% то выполнять ремонт экономически нецелесообразно.

Применение балльной системы оценки целесообразности проведения ремонта позволит в значительной степени исключить влияние человеческого фактора, снизить трудоёмкость процесса дефектации, что положительно скажется на его эффективности.

Данный метод принятия решений не удобен для предприятий с более высокой степенью применения цифровых систем. Вместо балльной системы оценки возможно использование программного обеспечения на основе алгоритма, приведённого на рисунке 5.10, интерфейсом данного программного обеспечения является

человеко-читаемая форма контрольного листка, пример которого приведён в таблице 5.18 [42, 130].

Таблица 5.18 – Человеко-читаемая форма контрольного листка

Цех: ремонта ДВС Участок: дефектации	Изделие: Распределительный вал ЯМЗ -236 №28135 Операция: входной контроль Контроллер: Иванов Иван Николаевич	
Дефект	Данные контроля	Уровень дефектности
Трещин или обломы	Отсутствует	-
Забойны на нерабочих поверхностях	Отсутствует	-
Минимальный размер опорной шейки	53,892	1 PP
Минимальная высота кулачка	42,198	-
Износ шпоночного паза по ширине	Отсутствует	-
Изгиб вала	Отсутствует	-
Срыв резьбы М27х2 – 6g	Отсутствует	-
Затраты на проведение механической обработки		
Время механической обработки	45	мин
Стоимость восстановления	1200	Р
Стоимость новой детали	8000	Р
Остаточный ресурс	Не менее 80%	
Рекомендация	Обработка - 1PP	

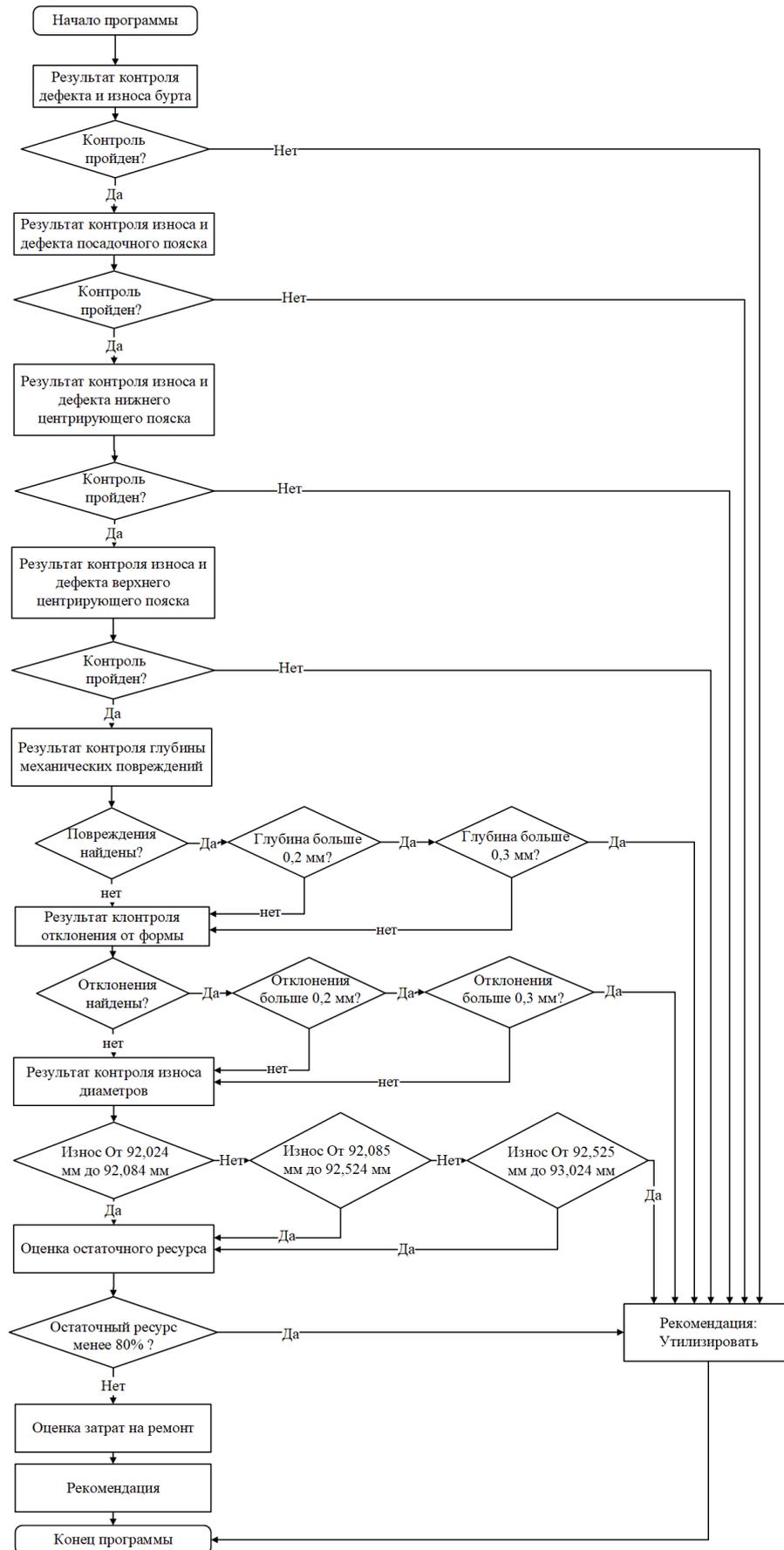


Рисунок 5.11 – Алгоритм программного обеспечения

Несмотря на рекомендацию программного обеспечения окончательное решение остаётся за сотрудником организации, поскольку помимо целесообразности проведения механической обработки значительную роль играют сроки проведения ремонта техники. При высоких потерях от простоя техники и длительном сроке ожидания новых комплектующих, ремонт необходимо проводить и при более низком остаточном ресурсе.

Помимо преимуществ балльной системы применение программного обеспечения, опирающегося на уже имеющиеся на предприятии, цифровые системы позволит спрогнозировать и затраты.

5.6 Анализ стабильности процесса обработки распределительных валов

Применение цифровых технологий позволяет организовать сбор и хранение информации о показателях выпускаемой продукции, что позволяет проводить оценку стабильности процесса. Для оценки и контроля стабильности процесса, а также его управления применяют контрольные карты [29, 126, 127, 128]. Учитывая особенности ремонтных предприятий следует использовать X и R карты, ориентированные на малое количество одинаковых изделий и сплошной контроль.

Контрольные карты опорных шеек двадцати распределительных валов (80 опорных шеек) двигателя ЯМЗ-236 представлены на рисунке 5.11. Размеры опорных шеек распределительного вала контролировались цифровым микрометром dasqua до внедрения системы принятия решений.

Анализируя контрольную X -карту (рис. 5.11, а), на которой четыре из пяти последовательных точек расположены в одной зоне односигмовых границ позволяют сделать вывод, что на процесс обработки опорных шеек действуют неслучайные причины изменчивости, при этом данный процесс находится в статистически неуправляемом (нестабильном) состоянии (рис. 5.11, б).

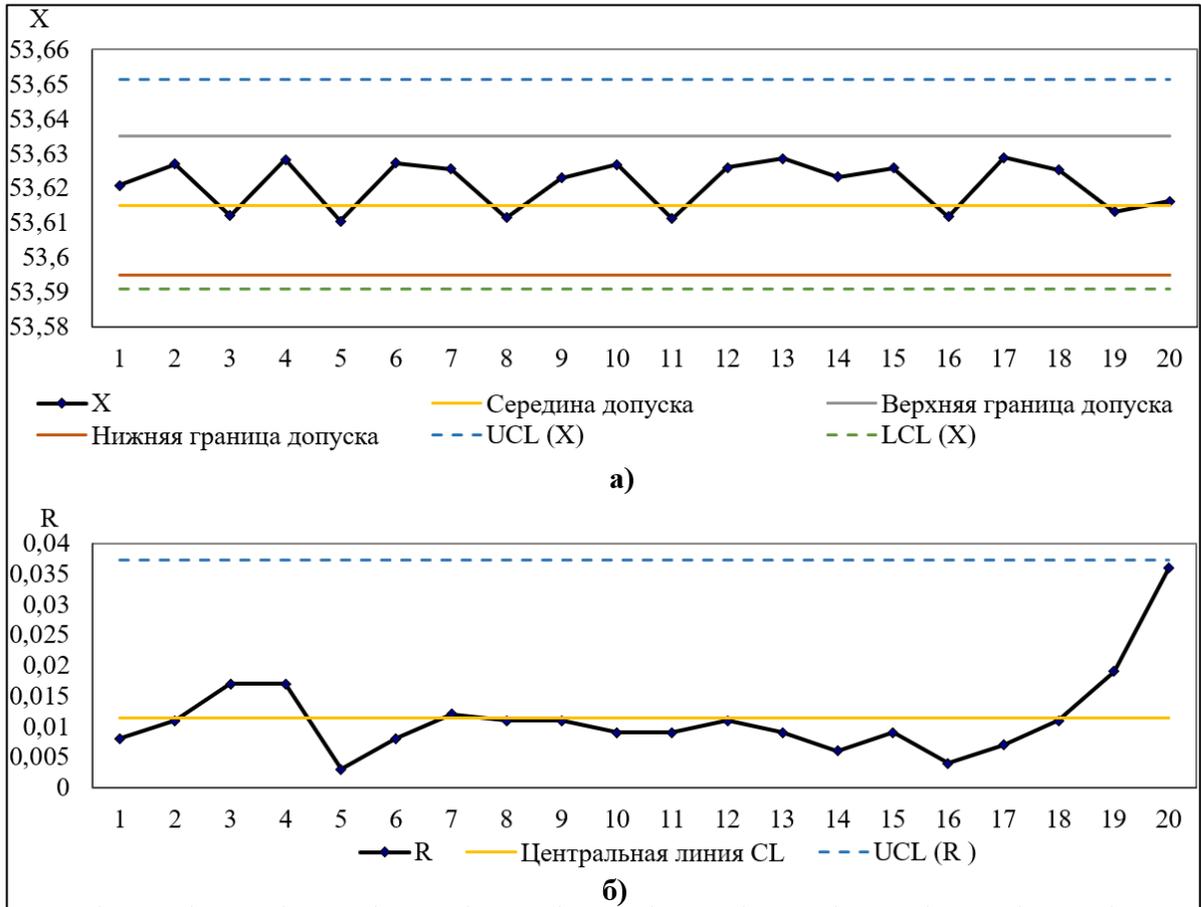


Рисунок 5.12 – Контрольные карты для обработанных под первый ремонтный размер опорных шеек распределительных валов двигателя ЯМЗ-236:

а) \bar{X} - карта; б) R - карта

К ранее указанным факторам влияющих на разнородность результатов обработки также добавляется то, что глубина резанья для всех опорных шеек назначается исходя из показателей самой изношенной, а не индивидуально для каждой. Стоит отметить, что у новых распределительных валов разноразмерность опорных шеек отсутствует, соответственно, её не должно быть и у прошедших механическую обработку под ремонтный размер.

Для более глубокого анализа построим диаграммы размаха (рис. 5.12 и 5.13).

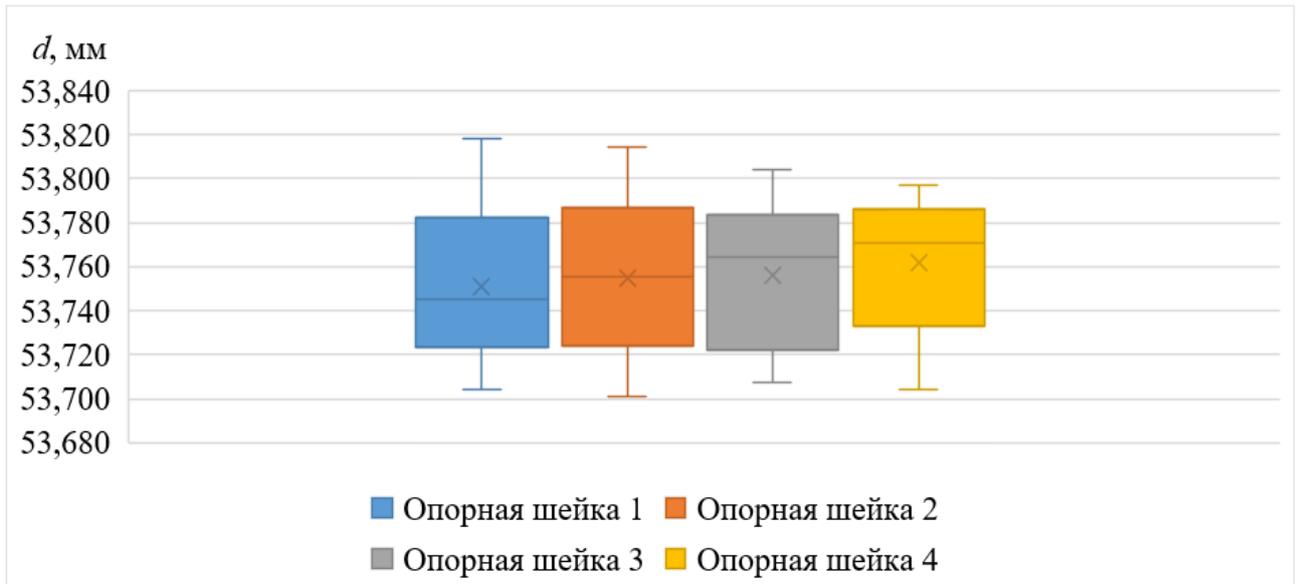


Рисунок 5.13 – Диаграммы размаха размеров опорных шеек распределительных валов до ремонта

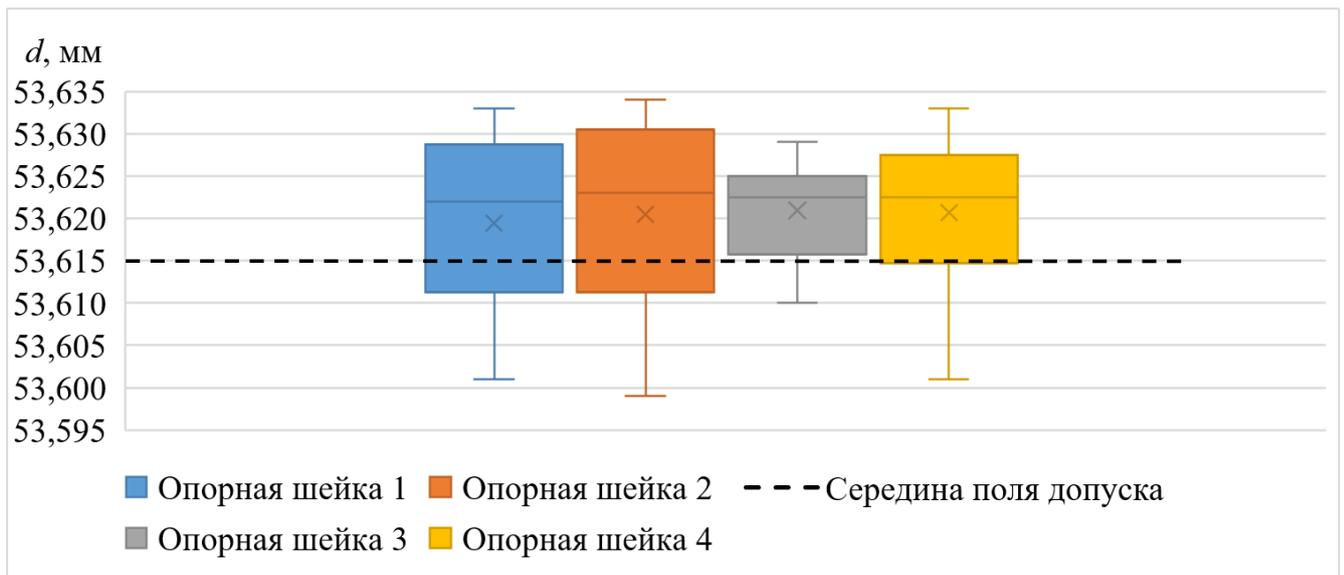


Рисунок 5.14 – Диаграммы размаха размеров опорных шеек распределительных валов после ремонта

В результате проведённого анализа размеров опорных шеек распределительных валов выявлено, что их износ имеет случайный характер, не позволяющий выявить какую-либо закономерность. Проведение механической обработки уменьшает рассеивание размеров шеек валов при этом меняя их относительно случайным образом также необходимо отметить, что медиана выборки лежит ближе к верхней границе допуска при этом происходит её выравнивание между опорными шейками.

Данная тенденция говорит о стремлении избежать неисправимого брака в результате механической обработки, но повышает вероятность появления исправимого брака. Использование в качестве опор подшипников скольжение позволяет несколько снизить влияние возникающих в том числе и случайно отклонений, тем не менее это снижает послеремонтный ресурс системы ГРМ.

Согласно полученным данным, была скорректирована технология механической обработки и внедрена система оценки целесообразности проведения ремонта. Контрольные карты после проведения указанных мероприятий представлены на рисунке 5.15.

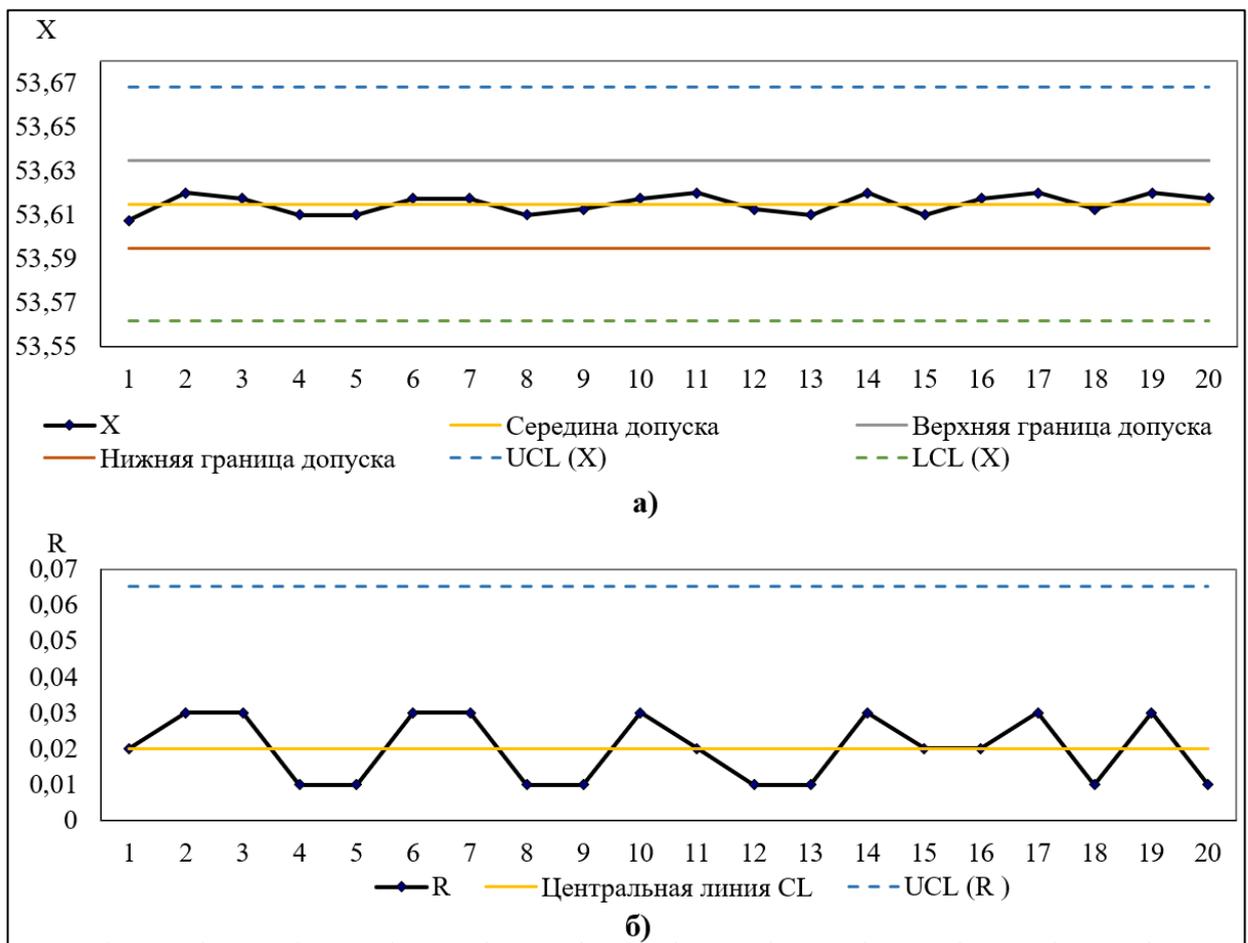


Рисунок 5.15 – Контрольные карты для обработанных под первый ремонтный размер опорных шеек распределительных валов двигателя ЯМЗ-236 после корректировки процесса: а) X -карта; б) R – карта

Согласно полученным картам, процесс механической обработки находится в стабильном управляемом состоянии, что говорит о правильности и эффективности принятых мер.

5.7 Оценка показателей точности для соединения вал – втулка после проведения ремонта

Поскольку опорные шейки распределительного вала образуют пару трения с втулкой то их размеры стандартизированы (таблица 5.19).

Таблица 5.19 Диаметры втулок и шеек распределительных валов двигателя ЯМЗ-236

Категории	Диаметр втулки, мм		Диаметр опорных шеек распределительного вала, мм	Зазор, мм
	Внутренний	Наружный		
Номинальный	$54^{+0,03}$	$68^{+0,12}_{+0,09}$	$54^{-0,065}_{-0,105}$	0,065...0,135
1 ремонтный	$53,6^{+0,03}$		$53,7^{-0,065}_{-0,105}$	
2 ремонтный	$53,3^{+0,03}$		$53,4^{-0,065}_{-0,105}$	

Исходя из данных таблицы ремонтные втулки предполагают запас на финишную механическую обработку в 0,1 мм поэтому основной задачей на пути получения характеристик схожих с изначальными является проблема соблюдения точности в соединении блок цилиндров – втулка – распределительный вал. При производстве данная задача решается применением высокоточного специализированного оборудования, что затруднительно для ремонтных предприятий.

Официальная ремонтная документация подразумевает, что во время сборки происходит самоцентрирование, за счёт пластичности, предварительно охлаждённой в жидком азоте бронзовой втулки и твердости чугуновых опор блока цилиндров, а приведение распределительного вала в нормативное положение происходит под действием гидродинамических сил. Данная технология подразумевает отсутствие значительных отклонений втулок и параллельность сопрягаемых поверхностей поэтому допуски на финишную механическую обработку в 0,1 мм будет достаточно.

Качество запасных частей включая и втулки не всегда соответствует необходимым параметрам, а при проведении ремонта тяжело соблюдать соосность и параллельность поэтому на практике возникает необходимость в более серьёзной механической обработке рабочих поверхностей установленных втулок с базированием относительно отверстий блока цилиндров, для компенсации возникших погрешностей. Подобная обработка возможна благодаря тому, что наименьшее давление в посадке превышает 145 кПа и позволяет предотвратить проворачивание при операциях резанья.

Дополнительная механическая обработка требует большего допуска и как следствие меньшего внутреннего диаметра, но позволяет использовать не только новые нестандартные бронзовые втулки, но и прошедшие восстановление.

Стоит отметить, что вышеприведённые технологии не требуют высокоточного оборудования и доступны для большинства ремонтных мастерских, при этом они не учитывают размеры опорных шеек после ремонта предполагая компенсацию отклонений посредством гидродинамических сил. Данные особенности приводят к повышенному износу трущихся поверхностей во время пуска двигателя из-за отсутствия жидкостного трения. Для улучшения сложившейся ситуации необходимо определять глубину резанья для каждой опоры индивидуально, стремясь получить минимальные отклонения.

Для получения работоспособного соединения согласно представленным точностным методам требуется определить поля допусков для вала и отверстия. Схема полей допусков соединения при применении полной взаимозаменяемости представлена на рисунке 5.16.

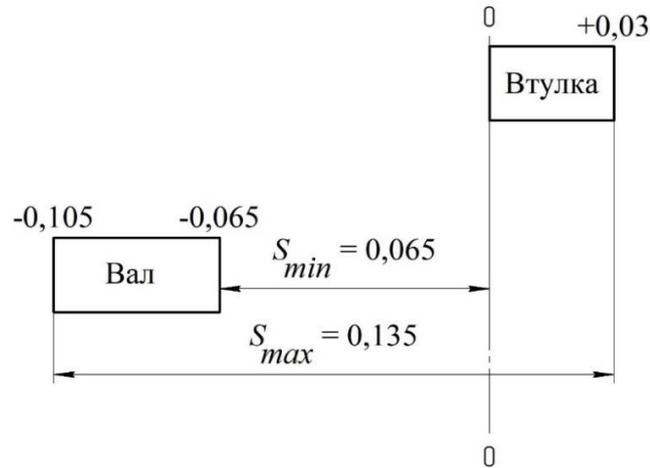


Рисунок 5.16 – Схема расположения полей допусков соединения распределительный вал - втулка двигателя ЯМЗ-236 при применении полной взаимозаменяемости

Для реализации селективной сборки требуется изменить допуск размера вала тогда схема расположения полей допусков примет вид, представленный на рисунке 2.18.

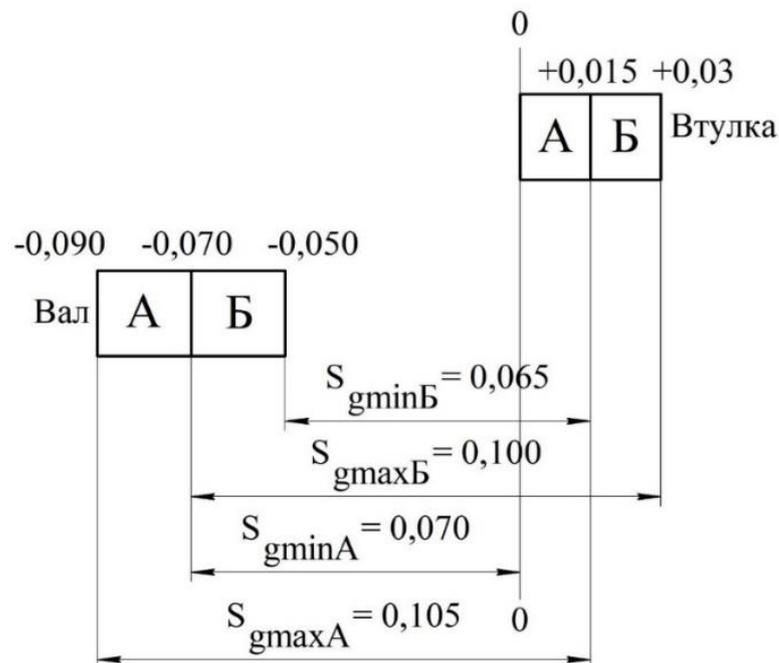


Рисунок 5.17 – Схема расположения полей допусков при селективной сборке соединения распределительный вал - втулка двигателя ЯМЗ-236

Для выполнения компенсационной функции при применении цифрового подбора необходимо изменить допуск на размер втулки, схема расположения изменённых полей допусков представлена на рисунке 5.18.

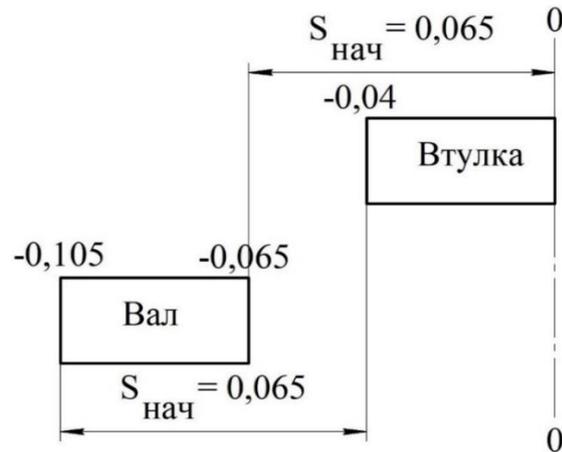


Рисунок 5.18 – Схема расположения полей допусков при цифровом подборе соединения «распределительный вал – втулка» двигателя ЯМЗ-236

Для оценки влияния применения цифровых технологий на процесс механической обработки опорных шеек были отобраны двадцать пять распределительных валов (100 шеек) двигателя ЯМЗ – 236, обработка производилась на шлифовальном станке класса точности П. Контроль размеров проводился ранее предложенными цифровыми средствами измерений.

Рассеяние размеров опорных шеек распределительных валов, обработанных под первый ремонтный размер ЯМЗ - 236 до внедрения цифровых технологий представлено на рисунке 5.19

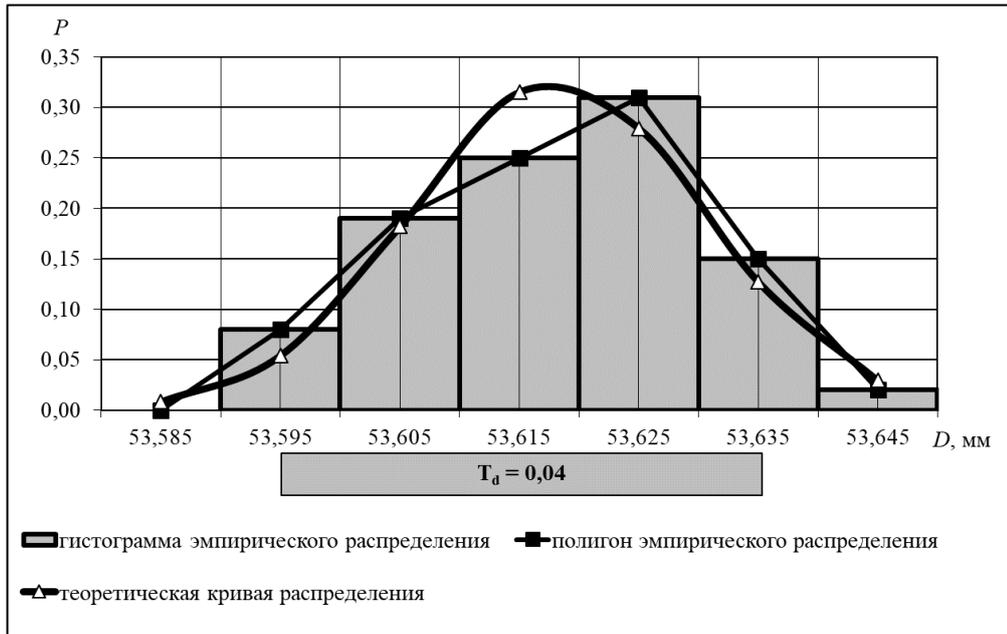


Рисунок 5.19 – Рассеяние размеров опорных шеек распределительных валов, обработанных под первый ремонтный размер двигателя ЯМЗ - 236 до внедрения цифровых технологий

Возникновение исправимого брака при анализе обработанных распределительных валов в первую очередь связано с применением при контроле более точного средства измерения.

Рассеяние размеров опорных шеек распределительных валов, обработанных под первый ремонтный размер ЯМЗ - 236 после внедрения цифровых технологий представлено на рисунке 5.20

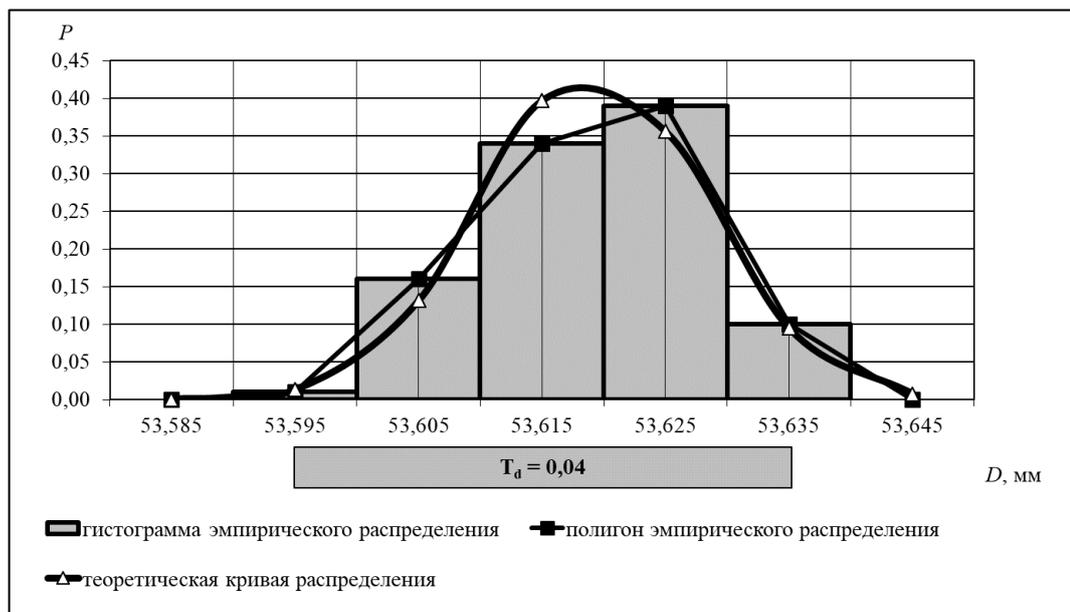


Рисунок 5.20 – Рассеяние размеров опорных шеек распределительных валов, обработанных под первый ремонтный размер двигателя ЯМЗ -236 после внедрения цифровых технологий

Из рисунка 5.19 видно, отсутствие как исправимого, так и неисправимого брака, при этом большая часть обработанных шеек валов находится в диапазоне 53,605...53,625 мм. Изменение в рассеивании в первую очередь вызваны совершенствованием процесса дефектации, позволяющим отсеять распределительные валы нецелесообразные для проведения ремонта.

Поскольку для реализации метода селективной сборки необходимо изменение поля допуска вала то рассеяния размеров опорных шеек вала 236 после внедрения цифровых технологий примет вид, показанный на рисунке 5.21.

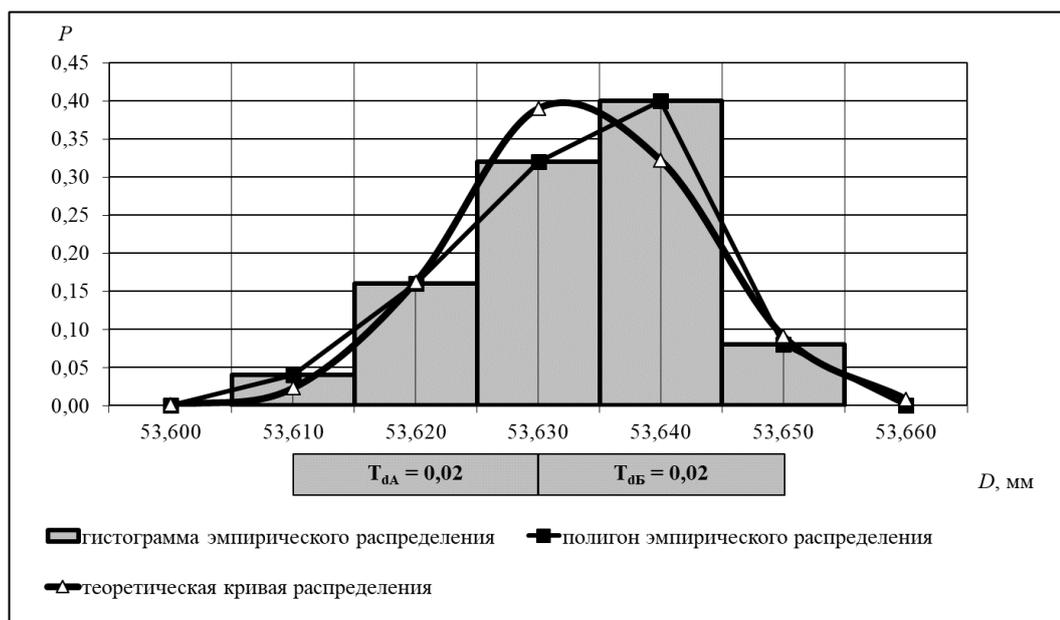


Рисунок 5.21 – Рассеяние размеров опорных шеек распределительных валов, обработанных под первый ремонтный размер ЯМЗ -236 после внедрения цифровых технологий согласно методу селективной сборки.

Внедрение цифровых технологий позволило избежать возникновения брака при обработке, а также разделить распределительные валы согласно полученным размерам опорных шеек на две группы селекции.

В дальнейшем для исследования получаемых зазоров в соединении распределительный вал – втулка использовались валы, полученные после внедрения цифровых технологий.

Для исследования получаемых внутренних диаметров для каждого метода было отобрано сто втулок. Обработка втулок согласно методам полной взаимозаменяемости и селективной сборки, производилась на горизонтально-расточном станке с точностью 0,01 мм, для метода цифрового подбора использовался многоцелевой обрабатывающий центр с точностью 0,002 мм.

Рассеяние внутренних диаметров втулок, обработанных под первый ремонтный размер распределительного вала ЯМЗ - 236 согласно методу полной взаимозаменяемости представлено на рисунке 5.22



Рисунок 5.22 – Рассеяние внутренних диаметров втулок, обработанных под первый ремонтный размер распределительного вала ЯМЗ - 236 согласно методу полной взаимозаменяемости

При обработке втулок отсутствует как исправимый, так и неисправимый брак, что позволяет сделать вывод об эффективности применяемой технологии.

Для применения методов селективной сборки и цифрового подбора требуется использование цифровых технологий, а также адаптация сотрудников под изменённые процессы, поэтому оценка полученных внутренних диаметров проводилась спустя 6 месяцев после полного внедрения ЕИС.

Для метода селективной сборки обработка внутреннего диаметра втулок (рис. 5.23) происходила согласно группе селекции, полученной в результате обработки опорных шеек распределительного вала.

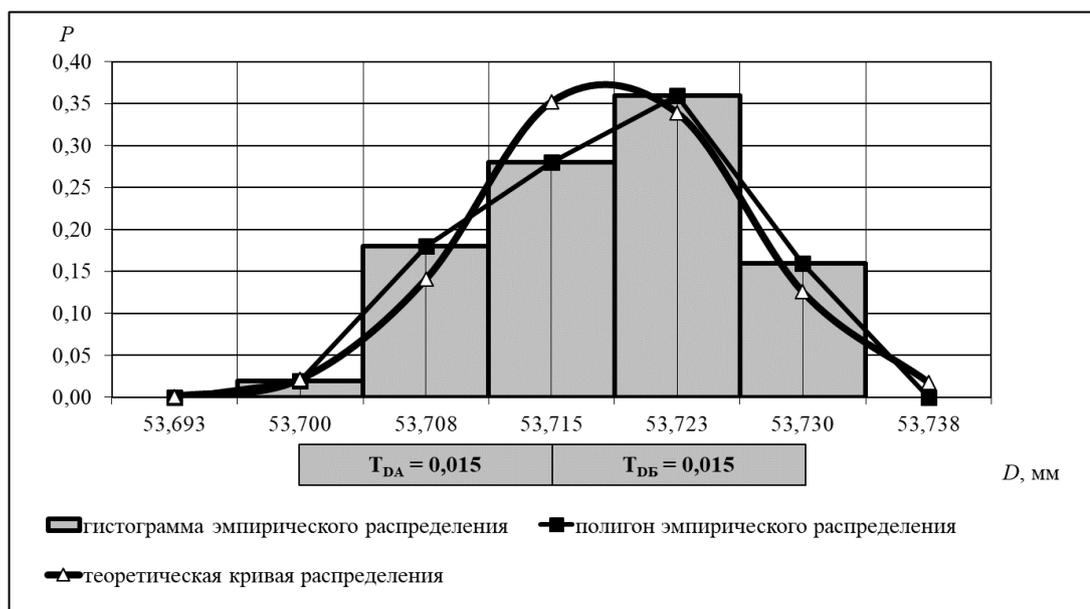


Рисунок 5.23 – Рассеяние внутренних диаметров втулок, обработанных под первый ремонтный размер распределительного вала ЯМЗ - 236 согласно методу селективной сборки

Применение цифровых технологий позволило обеспечить однозначное отнесение к группе селекции, а также предотвратить появление незавершённого производства, поскольку количество втулок соответствует количеству шеек в каждой группе селекции.

Внедрение цифровых технологий на предприятие позволяет эффективно использовать современные МОЦ, оснащённые числовым программным обеспечением и угловым приводом рабочего органа, делающим возможным проводить обработку с точностью 0,002 мм ($\omega_S = 0,004$ мм) деталей установленных внутри блока цилиндров. Данные центры также оснащены устройствами цифровой индикации, позволяющим не только контролировать положение рабочего органа, но и при установке измерительной головки использовать её в качестве координатно-измерительной машины. Несмотря на то, что МОЦ не является средством измерения, данная особенность позволяет, единожды установив блок цилиндров на стол, создать модель взаимного расположения поверхностей и провести их обработку избегав возможных ошибок при переустановке. При обработке установленных подшипниковых втулок на МОЦ можно не только проводить их обработку исходя из фактического размера опорных шеек отремонтированного распределительного

вала, но и при необходимости «копировать» поверхность шейки на внутреннюю поверхность втулки тем самым обеспечить их наилучшее сочетание. Применение МОЦ позволяет для получения требуемого зазора использовать метод цифрового подбора.

Рассеяние внутренних диаметров втулок, обработанных под первый ремонтный размер распределительного вала ЯМЗ - 236 при применении метода цифрового подбора представлено на рисунке 5.24

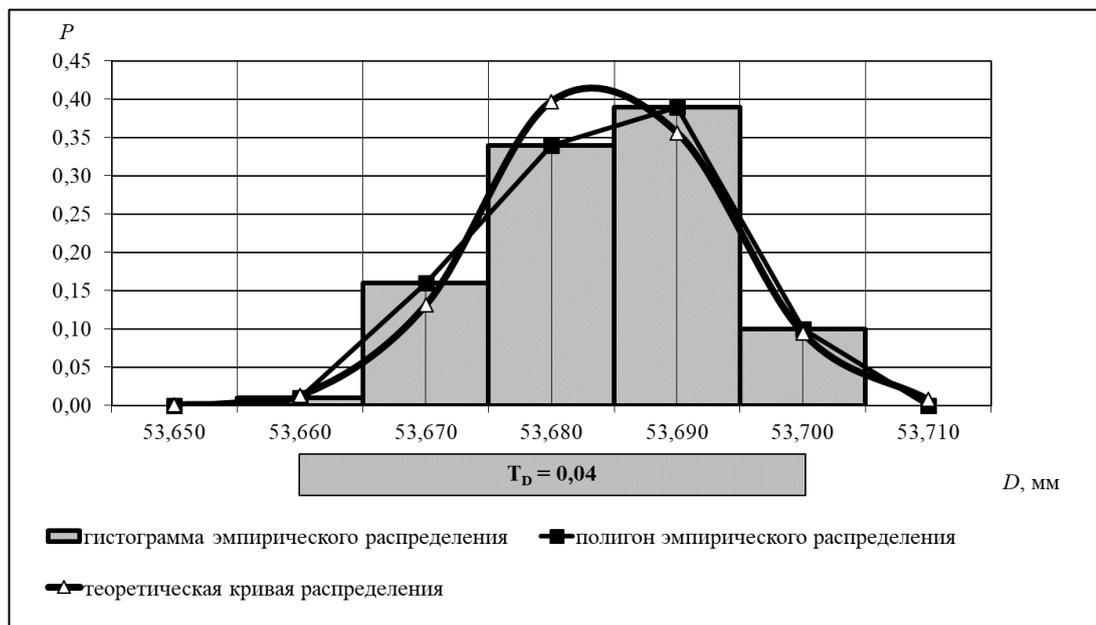


Рисунок 5.24 – Рассеяние внутренних диаметров втулок, обработанных под первый ремонтный размер распределительного вала ЯМЗ - 236 при использовании цифрового подбора

Поскольку при использовании метода цифрового подбора базовым является размер опорных шеек распределительного вала, то рассеяния размеров втулок (рис. 5.17) соответствует рассеиванию шеек валов (рис. 5.18) подтверждая справедливость теоретических расчетов.

Основным параметром работоспособности и долговечности соединения распределительный вал – втулка является величина полученного зазора рассеяния для методов полной взаимозаменяемости, селективной сборки и цифрового подбора представлено на рисунках 5.25, 5.26 и 5.27.

Поскольку отклонение от соосности втулок и вала не превышает допустимого то его можно не учитывать при анализе зазоров.

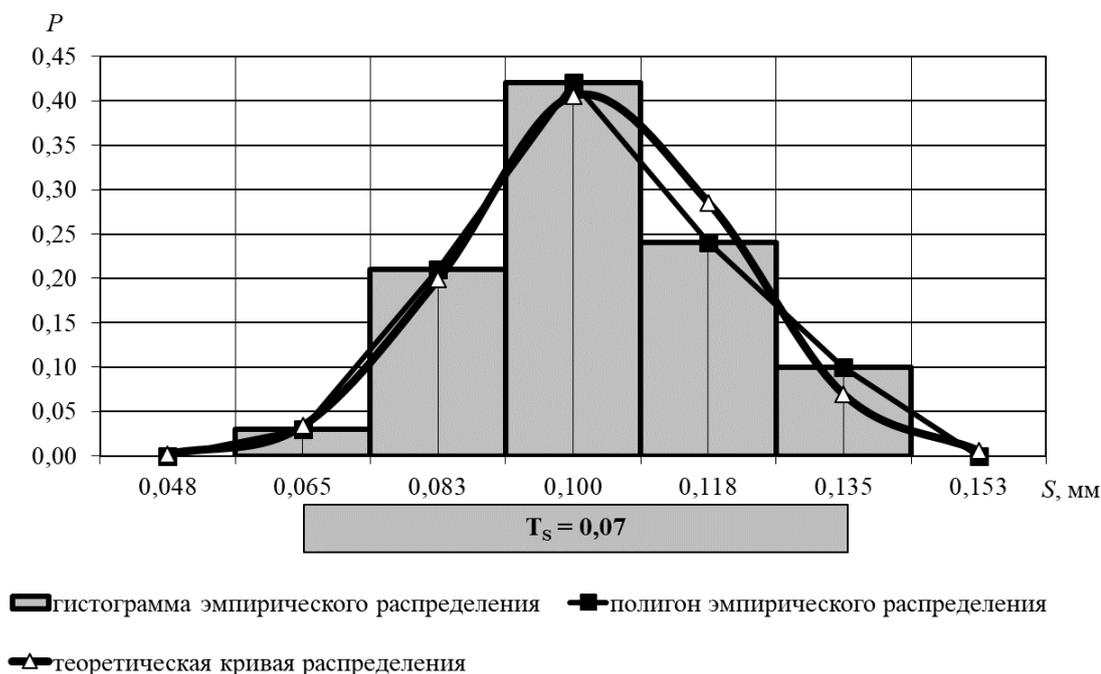


Рисунок 5.25 – Рассеяния зазоров, полученных при использовании метода полной взаимозаменяемости

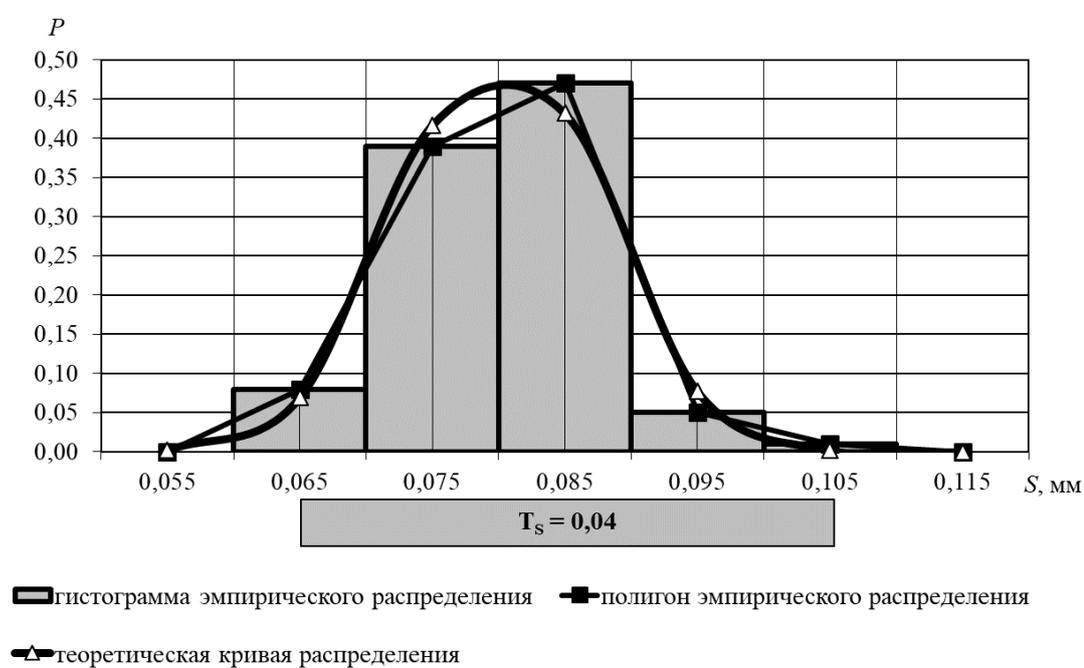


Рисунок 5.26 – Рассеяния зазоров, полученных при использовании метода селективной сборки

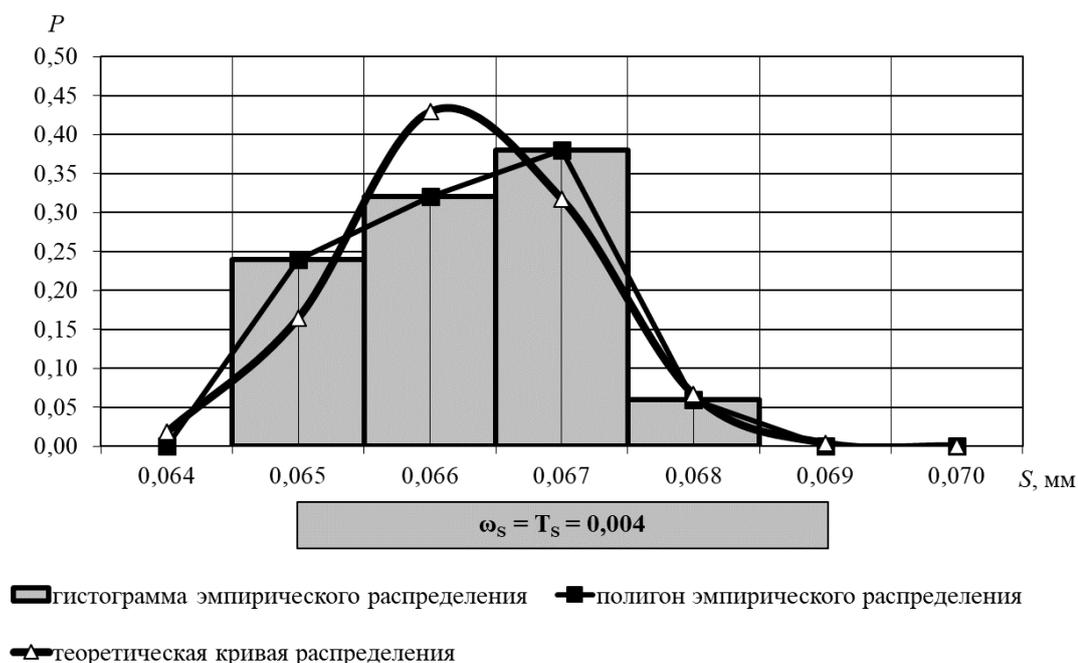


Рисунок 5.27 – Рассеяния зазоров, полученных при использовании метода цифрового подбора

Как видно из рисунка 5.25, все зазоры находятся в диапазоне 0,065...0,135 мм, что соответствует допуску при этом запас на износ составит 0,105...0,175 мм. Разница в 70 мкм (40%) не позволит с высокой точностью прогнозировать остаточный ресурс соединения.

Фактически полученные зазоры при селективной сборке находятся в диапазоне 0,065...0,105 мм, уменьшение рассеяния свидетельствует об эффективности применения селективной сборки при полном внедрении ЕИС и проведении оптимизации. Применение данного метода позволило в 2 раза повысить минимальный запас на износ по сравнению с методом полной взаимозаменяемости, реальный запас находится в диапазоне 0,135...0,175 мм.

При применении цифрового подбора наблюдается равенство между зоной рассеяния зазора и допуском на обработку (рис. 5.27.) разница при этом между наибольшим и наименьшим значением не более 5%, она же сохранится и между значениями запаса на износ (0,172...0,175 мм).

Исходя из этого можно сделать вывод, что метод цифрового подбора позволяет обеспечить минимальный зазор вне зависимости от размера опорной шейки

распределительного вала при наличии должного запаса на обработку втулки. Для применения данного метода достаточно использования цифровых средств измерения для контроля опорных шеек распределительного вала и МОЦ, но тогда ресурс соединения будет зависеть не от зазора, а от не обнаруженных дефектов и ошибок при механической обработке, что делает его прогнозирование недостоверным.

Принципиальная схема взаимодействия в рамках комплексного подхода к достижению наибольшей долговечности соединения с зазором независимо от выбранного метода показана на рисунке 5.28.

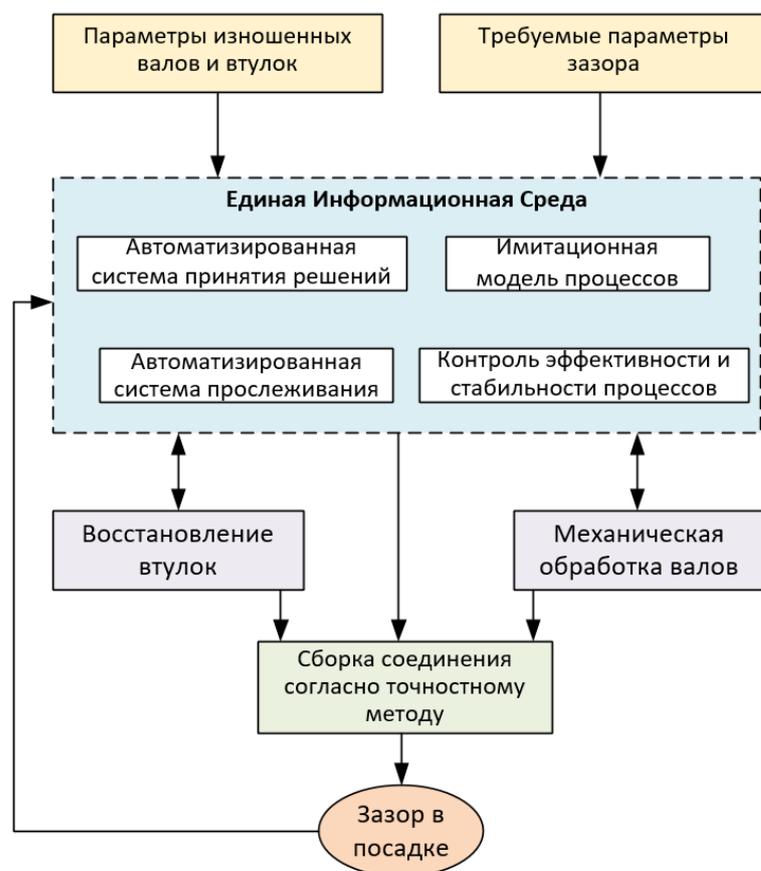


Рисунок 5.28 – Принципиальная схема взаимодействия в рамках комплексного подхода к достижению наибольшей долговечности соединения с зазором

Метод цифрового подбора предъявляет повышенные требования к сбору и обработке данных, полученных при контроле (рис. 5.29), поскольку от их качества будет зависеть конечный результат.

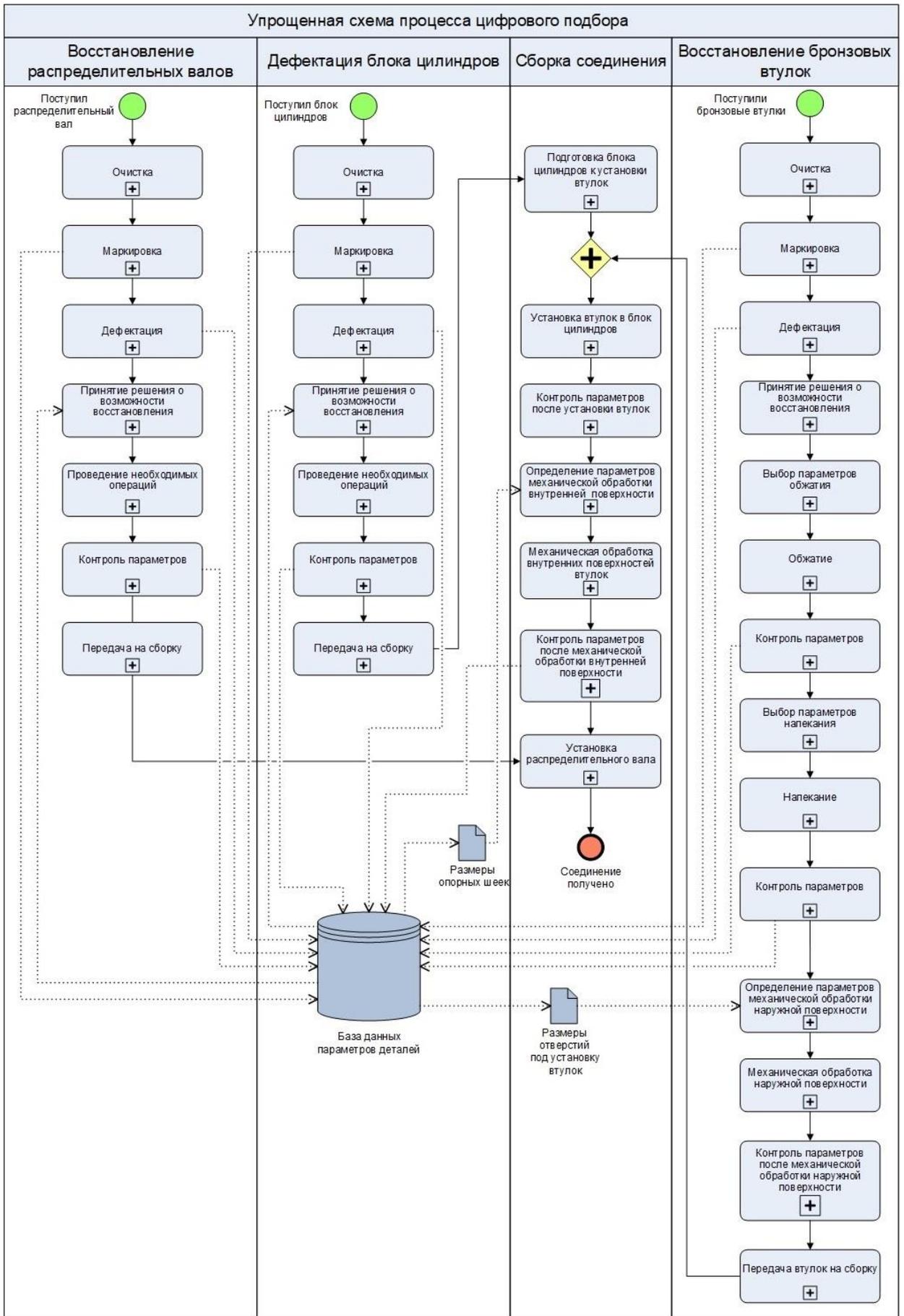


Рисунок 5.29 – Упрощенная схема процесса цифрового подбора

Выводы по главе 5

1. Применение процессного подхода на базе цифровых технологий позволяет идентифицировать входы, выходы, разработать процедуры и показатели эффективности, но этого недостаточно для перехода от описания процесса к его управлению, поскольку необходимо обеспечить мониторинг, снижающий влияние человеческого фактора. Для описания процессов верхнего уровня наиболее подходит нотация IDEF0, для нижнего уровня – BPMN, нотация EPC позволяет на высоком уровне детализации описывать ответственные процессы с малым числом задействованных лиц фактически являясь отражением операционной карты.
2. Для организации эффективной системы прослеживания необходимо использовать маркировку типа QR-код и Data Matrix в которых будет закодирован адрес внутренней интернет-страницы.
3. Замена аналоговых средств измерений на цифровые позволяет автоматизировать сбор данных, снизить влияние человеческого фактора, а также за счет улучшенных метрологических характеристик снизить количество неправильно принятых и неправильно забракованных деталей на 25...75%.
4. Моделирование с дальнейшей оптимизацией производственных процессов на основе собираемых данных позволяет снизить временные потери на их выполнение даже при высокой степени неопределённости.
5. Внедрение цифровых технологий на этапе принятия решения позволяет в значительной степени исключить влияние человеческого фактора, снизить трудоёмкость процесса дефектации, а также спрогнозировать затраты на осуществления ремонта тем самым повысив его эффективность.
6. Применение статистических методов, на основе собираемых данных в рамках единой цифровой среды позволяет осуществлять эффективный мониторинг производственных процессов осуществляя их корректировку в случае выявления отклонений.

7. Проведённая оценка точности обработки опорных шеек распределительных валов показала, что при применении цифровых технологий отсутствует как исправимый, так и неисправимый брак, а также уменьшается полученная зона рассеяния.
8. При использовании рекомендуемой технологии (полная взаимозаменяемость) наблюдается рассеяния зазора, не превышающее допуск при этом разница между наименьшим и наибольшим показателем составила 40%, что негативно сказывается на стабильности послеремонтных показателей.
9. Применение селективной сборки после полного внедрения ЕИС позволило в 2 раза повысить минимальный запас на износ по сравнению с методом полной взаимозаменяемости.
10. При применении метода цифрового подбора наблюдается равенство между зоной рассеяния зазора и допуском на обработку разница при этом между наибольшим и наименьшим значением составила не более 5%, она же сохранится и между значениями запаса на износ.
11. Метод цифрового подбора позволяет обеспечить минимальный зазор вне зависимости от размера опорной шейки распределительного вала при наличии должного запаса на обработку втулки. Для применения данного метода достаточно использования цифровых средств измерения для контроля опорных шеек распределительного вала и многофункционального обрабатывающего центра, позволяющего проводить обработку с высокой степенью точности (не больше 0,002), но тогда ресурс соединения будет зависеть не от зазора, а от не обнаруженных дефектов и ошибок при механической обработке, что делает его прогнозирование недостоверным.

Глава 6. Техничко-экономическая оценка

6.1 Экономическая оценка технологии восстановления втулок

Экономическая оценка производилась для технологии, представленной в главе 5.

6.1.1 Экономическое обоснование технологии восстановления бронзовых втулок

Для определения экономической целесообразности восстановления втулки произведён расчёт экономической эффективности по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{вс}} = \left(\frac{C_{\text{нд}}}{P_{\text{нд}}} - \frac{C_{\text{вд}}}{P_{\text{вд}}} \right) \cdot P_{\text{вд}}, \quad (6.1)$$

где: $C_{\text{нд}}$ - стоимость новой втулки, руб/ед; $C_{\text{вд}}$ - себестоимость восстановленной втулки, руб/ед; $P_{\text{нд}}$ - ресурс новой втулки, км; $P_{\text{вд}}$ - ресурс восстановленной втулки, км.

Себестоимость восстановленной втулки определялась по формуле:

$$C_{\text{вд}} = \text{ЗП} + C_{\text{а}} + C_{\text{рм}} + C_{\text{из}} + \mathcal{E}_{\text{з}} + \text{ОПР} + \text{ОПУ}, \quad (6.2)$$

где: ЗП - заработная плата производственных рабочих, руб.; $C_{\text{а}}$ - сумма амортизационных отчислений, руб.; $C_{\text{рм}}$ - стоимость ремонтных материалов, руб.; $C_{\text{из}}$ - стоимость изношенной втулки, руб.; $\mathcal{E}_{\text{з}}$ - стоимость энергозатрат на восстановление втулки, руб., ОПР - общепроизводственные расходы, ОПУ - общехозяйственные управленческие расходы, связанные с организацией управления, руб.

Расчёт заработной платы производился по формуле:

$$\text{ЗП} = \frac{T_{\text{н1}} \cdot C_{\text{р1}}}{60} + \frac{T_{\text{н2}} \cdot C_{\text{р2}}}{60} + \frac{T_{\text{н3}} \cdot C_{\text{р3}}}{60}, \quad (6.3)$$

где: $T_{\text{н1}}$, $T_{\text{н2}}$, $T_{\text{н3}}$ - норма времени на выполнение технологических операций, мин.; $C_{\text{р1}}$, $C_{\text{р2}}$, $C_{\text{р3}}$ - часовые тарифные ставки соответствующих разрядов на выполнение операций, руб/час; 60 - количество минут в часе.

Для расчёта амортизационных отчислений использовалась формула:

$$C_a = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{BC_i \cdot ai}{\Phi_{\text{раб.вр.}i}} \cdot TP_i, \quad (6.4)$$

где: BC_i - балансовая стоимость единицы оборудования, руб.; TP_i - время работы оборудования i -го вида, необходимое для изготовления оригинального узла, втулки, час.; ai - норма амортизационных отчислений, руб.; $\Phi_{\text{раб.вр.}i}$ - годовой фонд рабочего времени всех видов оборудования, час.

Стоимость всех ремонтных материалов рассчитывалась по следующей формуле:

$$C_{\text{рм}} = \sum_{i=1}^n PM_i \cdot Ц_i, \quad (6.5)$$

где PM_i - расход i -го материала на одну восстановленную втулку, кг/дет; $Ц_i$ - цена 1 кг i -го материала, руб/кг.

Стоимость изношенной втулки определялась по цене металлолома по формуле:

$$C_{\text{из}} = Ц_{\text{л}} \cdot В, \quad (6.6)$$

где: $Ц_{\text{л}}$ - цена 1 кг лома, руб/кг; $В$ - масса изношенной втулки, кг.

6.1.2 Расчёт заработной платы производственных рабочих

Для расчёта заработной платы рабочее время без учета вынужденного простоя принималось равным 6,4 часа.

Заработная плата и затраты на одну втулку представлены в таблице 6.1

Таблица 6.1 – Заработная плата и затраты на одну втулку

Должность	Заработная плата за месяц, руб.	Норма времени на выполнение технологических операций, мин.	Норма производства деталей за одну смену, шт.	Затраты на производство одной втулки, руб.
Рабочий участка подготовки	80000	1	384	9,47
Рабочий пресса	85000	3	128	30,19
Сварщик	90000	8	48	85,23
Токарь	100000	6	60	75,76

Затраты на выплаты заработной платы за одну втулку составили 200,65 руб.

6.1.3 Затраты на амортизационные отчисления

Затраты на амортизационные отчисления представлены в таблице 6.2

Таблица 6.2 – Затраты на амортизационные отчисления

Оборудование	Балансовая стоимость, руб.	Амортизационные отчисления за год, руб.	Затраты на производство одной втулки, руб.
Пресс	149960	18748	0,56
Сварочный станок	422400	42240	3,29
Токарный станок	311156	31116	3,64

Затраты на амортизационные отчисления на одну втулку составили 7,49 руб.

6.1.4 Расчёт стоимости ремонтных материалов и оснастки

Затраты на ремонтные материалы и оснастку представлены в таблице 6.3

Таблица 6.3 – Затраты на ремонтные материалы и оснастку

Материал	Единицы материала	Стоимость одной единицы материала	Затраты на производство одной втулки, руб
ПР-Н80Х13С2Р	1 кг	3632 руб.	36,32
ПХ-30	1 кг	2318 руб.	23,18
Матрица	1 шт	211,2 руб.	10,56
Графитовая обло- лочка	1 шт	96,34 руб.	19,26
Резец	2 шт	1182,96 руб.	23,67

Затраты на ремонтные материалы и оснастку одной втулки при использовании ПР-Н80Х13С2Р составили 89,81 руб., а при использовании ПХ-30 составили 76,65 руб.

6.1.5 Расчёт стоимости энергозатрат на восстановление втулки

Стоимость энергозатрат на восстановление втулки представлена в таблице 6.4

Таблица 6.4 – Стоимость энергозатрат на восстановление втулки

Показатель	Расход на одну втулку	Стоимость, руб.	Затраты на производство одной втулки, руб.
Электроэнергия	7,1 кВт.ч.	6,48	45,69
Вода	0,024	58,25	1,40
Водоотведение	0,024	40,24	0,96

Энергозатраты на одну втулку составили 48,05 руб.

6.1.6 Определение стоимости изношенной втулки

Стоимость изношенной втулки приведена в таблице 6.5

Таблица 6.5 – Стоимость изношенной втулки

Материал	Стоимость одного кило-грамма, руб.	Стоимость одной втулки, руб.
Бронзовый лом	360	144

6.1.7 Себестоимость восстановленной втулки

Себестоимость восстановленной втулки приведена в таблице 6.5

Таблица 6.5 – Себестоимость восстановленной втулки

Вид затрат	Затраты на изготовление одной втулки, руб.
Затраты на выплаты заработной платы	200,65
Затраты на амортизационные отчисления	7,49
Затраты на ремонтные материалы и оснастку при напекании ПР-Н80Х13С2Р	89,81
Затраты на ремонтные материалы и оснастку при напекании ПХ-30	76,65
Энергозатраты	48,05
Стоимость изношенной втулки	144
Общепроизводственные расходы	6,36
Общехозяйственные и управленческие расходы	174,84
Себестоимость одной восстановленной втулки при использовании:	
ПР-Н80Х13С2Р	777,69
ПХ-30	758,53

Стоимость новой втулки в официальном магазине составляет 1650 руб., что делает восстановление втулки целесообразным.

6.2 Расчет экономической эффективности от применения цифровых средств измерений

Расчет экономической эффективности от применения цифровых средств измерений при дефектации распределительного вала проводился по стандартной методике с учетом полученных данных в 4-й главе [85].

Потери от исправимого брака определяются как:

$$П_{ИБ} = З_{ИБ} \cdot P_{ИБ} \cdot B, \quad (6.7)$$

где: $Z_{ИБ}$ – затраты на исправление брака; $P_{ИБ}$ – вероятность появления исправимого брака; B – количество деталей.

Выражение для определения потерь от неисправимого брака:

$$П_{НБ} = (C_d - C_l) \cdot P_{НБ} \cdot B, \quad (6.8)$$

где: C_d – стоимость детали; C_l – стоимость лома; $P_{НБ}$ – вероятность появления неисправимого брака.

Вероятный процент годных деталей вычисляется согласно формуле:

$$Q_{Г} = 100 \% - (Q_{ИБ} + Q_{НБ}), \quad (6.9)$$

где: $Q_{ИБ}$ и $Q_{НБ}$ – вероятностный процент исправимого и неисправимого брака соответственно, вычисляемые согласно выражению (6.10):

$$Q = (0,5 - \Phi(t)) \cdot 100 \% \quad (6.10)$$

Уменьшение экономических потерь, связанных с сокращением неправильно принятых и неправильно забракованных деталей вычисляется как:

для неправильно забракованных деталей:

$$Э_n = N \cdot C_d \cdot (n_{(1)} - n_{(2)}) \cdot 0,01, \quad (6.11)$$

где: N – число измеренных деталей; $n_{(1)}$ и $n_{(2)}$ – количество неправильно забракованных деталей для менее и более точного средства измерения.

для неправильно принятых деталей формула (6.11) будет иметь вид:

$$Э_m = B \cdot Z_y \cdot (m_{(1)} - m_{(2)}) \cdot 0,01, \quad (6.12)$$

где: Z_y – затраты на устранение; $m_{(1)}$ и $m_{(2)}$ – количество неправильно принятых деталей для менее и более точного средства измерения.

Потери от неправильно принятых и неправильно забракованных деталей для каждого средства измерения определяются согласно выражению:

$$P_{\text{пи}} = N \cdot (n \cdot C_{\text{д}} + m \cdot Z_{\text{y}}) \cdot 0,01 \quad (6.13)$$

Годовые потери вызванные использованием средства измерения при контроле параметра определяется как:

$$P_{\text{си}} = A_{\text{ск}} \cdot [K \cdot (R_{\text{р}} + E_{\text{н}}) + I + P_{\text{пи}}], \quad (6.14)$$

где: $A_{\text{ск}}$ – количество средств измерений, необходимых для контроля параметра; K – затраты на приобретение и введение в эксплуатацию средства измерения; $R_{\text{р}}$ – норма реновации; $E_{\text{н}}$ – норматив приведения единовременных затрат; I – годовые издержки на эксплуатацию средства измерения.

Потери при введении контроля на производстве определяется через сумму следующих потерь:

$$P_{\text{к}} = P_{\text{си}} + P_{\text{иб}} + P_{\text{нб}} \quad (6.14)$$

Экономия за весь срок эксплуатации более точного средства измерения определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{P_{\text{си1}} \cdot \frac{T_2}{T_1} - P_{\text{си2}}}{R_{\text{р}} + E_{\text{н}}}, \quad (6.15)$$

где T_1 и T_2 – срок службы соответствующего средства измерения.

Произведем расчет экономической эффективности от применения цифровых средств измерений при дефектации распределительного вала и его сопряжения с втулкой, на 1000 единиц выпускаемой продукции.

Исходные данные и результаты проведенного расчета по определению вероятного процента годных опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 приведены в таблице 6.6 [29].

Таблица 6.6 – Исходные данные и результаты расчета по определению вероятного процента годных опорных шеек распределительного вала двигателя

Параметр	Обозначение	Значение
Коэффициенты риска исправимого брака	$T_{ИБ}$	2,03
Коэффициенты риска неисправимого брака	$T_{НБ}$	3,38
Вероятный процент бракованных деталей исправимого брака	$Q_{ИБ}$	2,13%
Вероятный процент бракованных деталей неисправимого брака	$Q_{НБ}$	0,038%
Вероятность того, что деталь будет являться исправимым браком после контроля	$P_{ИБ}$	0,0212
Вероятность того, что деталь будет являться неисправимым браком после контроля	$P_{НБ}$	0,00038
Вероятный процент годных деталей	$Q_{Г}$	97,84%.
Вероятность того, что деталь годная,	$P_{Г}$	0,9784

В таблице 6.7 представлены исходные данные и результаты расчета экономической целесообразности применения цифрового средства измерения опорных шеек распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 при контроле результатов обработки под первый ремонтный размер.

Таблица 6.7 – Исходные данные и результаты расчета экономической целесообразности применения цифрового средства измерения опорных шеек распределительного вала

Показатели	Средство измерения	
	Цифровой микрометр dasqua	Скоба рычажная СР-75
Контролируемый размер, d, мм	53,7 ^{-0,065} _{-0,105}	
Предельная погрешность СИ, Δ_{lim} , мкм	±2	±3,5
СКО погрешности измерения, σ_{met} , мкм	1	1,75
Коэффициент точности измерения, A_{met} , %	2,50	4,58
Количество неправильно принятых опорных шеек с исправимым браком, m, %	0,4	0,8
Количество неправильно забракованных опорных шеек от количества годных, n, %	0,8	1,1
Потери от исправимого брака, $\Pi_{иб}$, руб.	2026,93	

Продолжение таблицы 6.7

Показатели	Средство измерения	
	Цифровой микрометр dasqua	Скоба рычажная СР-75
Потери от неисправимого брака, $P_{нб}$, руб.	171,50	
Потери от неправильно принятых и неправильно забракованных деталей, $P_{пи}$, руб.	23 210	43 234
Годовые потери вызванные использованием средства измерения при контроле параметра, $P_{си}$, руб.	33 433,20	54 836,04
Потери при введении контроля на производстве, $P_{к}$, руб.	25 408,43	57 034,47
Экономия за весь срок эксплуатации более точного средства измерения, \mathcal{E} , руб	535 071	

Исходные данные и результаты проведенного расчета по определению вероятного процента годных кулачков распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 после механической обработки приведены в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Исходные данные и результаты расчета по определению вероятного процента годных кулачков распределительного вала двигателя

Параметр	Обозначение	Значение
Коэффициенты риска исправимого брака	$T_{иб}$	2,52
Коэффициенты риска неисправимого брака	$T_{нб}$	2,88
Вероятный процент бракованных деталей исправимого брака	$Q_{иб}$	0,59 %
Вероятный процент бракованных деталей неисправимого брака	$Q_{нб}$	0,2 %
Вероятность того, что деталь будет являться исправимым браком после контроля	$P_{иб}$	0,0059
Вероятность того, что деталь будет являться неисправимым браком после контроля	$P_{нб}$	0,002
Вероятный процент годных деталей	$Q_{г}$	99,21%.
Вероятность того, что деталь годная,	$P_{г}$	0,9921

Исходные данные и результаты расчета экономической целесообразности применения цифрового средства измерения при контроле изношенных кулачков распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 представлены в таблице 6.9

Таблица 6.9 – Исходные данные и результаты расчета экономической целесообразности применения цифрового средства измерения при контроле изношенных кулачков распределительного вала

Показатели	Средство измерения	
	Цифровой штангенциркуль dasqua	Штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1-1
Контролируемый размер, d, мм	42,0 ^{+0,15} _{-0,15}	
Предельная погрешность СИ, Δlim, мкм	±20	±100
СКО погрешности измерения, σ _{мет} , мкм	6,7	16
Коэффициент точности измерения, A _{мет} , %	5	25
Количество неправильно принятых опорных шеек с исправимым браком, m, %	1,4	4,1
Количество неправильно забракованных опорных шеек от количества годных, n, %	2,2	9,1
Потери от исправимого брака, П _{иб} , руб.	638,44	
Потери от неисправимого брака, П _{нб} , руб.	904,62	
Потери от неправильно принятых и неправильно забракованных деталей, П _{пи} , руб.	77 412,82	243 643,21
Годовые потери вызванные использованием средства измерения при контроле параметра, П _{си} , руб.	81 379,10	244 656,04
Потери при введении контроля на производстве, П _к , руб.	82 922,16	246 199,10
Экономия за весь срок эксплуатации более точного средства измерения, Э, руб	3 080 696,98	

Исходные данные и результаты проведенного расчета по определению вероятного процента годных распределительных валов двигателя ЯМЗ-236 после прохождения контроля изгиба приведены в таблице 6.10.

Таблица 6.10 – Исходные данные и результаты расчета по определению вероятного процента годных распределительных валов после контроля изгиба

Параметр	Обозначение	Значение
Коэффициенты риска исправимого брака	$T_{ИБ}$	2,02
Коэффициенты риска неисправимого брака	$T_{НБ}$	3,37
Вероятный процент бракованных деталей исправимого брака	$Q_{ИБ}$	2,17 %
Вероятный процент бракованных деталей неисправимого брака	$Q_{НБ}$	0,043 %
Вероятность того, что деталь будет являться исправимым браком после контроля	$P_{ИБ}$	0,0217
Вероятность того, что деталь будет являться неисправимым браком после контроля	$P_{НБ}$	0,00043
Вероятный процент годных деталей	$Q_{Г}$	97,87%.
Вероятность того, что деталь годная	$P_{Г}$	0,9787

В таблице 6.11 представлены исходные данные и результаты расчета экономической целесообразности применения цифрового средства измерения при контроле изгиба распределительного вала двигателя ЯМЗ-236.

Таблица 6.11 – Исходные данные и результаты расчета экономической целесообразности применения цифрового средства измерения при контроле изгиба распределительного вала

Показатели	Средство измерения	
	Цифровой индикатор dasqua	Индикатор часового типа ИЧ02 кл.0
Допуск радиального биения, мм	0,04	
Предельная погрешность СИ, Δ_{lim} , мкм	±3	± 4
СКО погрешности измерения, σ_{met} , мкм	1,5	2
Коэффициент точности измерения, A_{met} , %	7,5	10
Количество неправильно принятых опорных шеек с исправимым браком, m , %	1,1	1,5
Количество неправильно забракованных опорных шеек от количества годных, n , %	2,6	3,5
Потери от исправимого брака, $\Pi_{ИБ}$, руб.	2096,22	
Потери от неисправимого брака, $\Pi_{НБ}$, руб.	194,06	

Продолжение таблицы 6.11

Показатели	Средство измерения	
	Цифровой индикатор dasqua	Индикатор часового типа ИЧ02 кл.0
Потери от неправильно принятых и неправильно забракованных деталей, $P_{\text{пи}}$, руб.	66 378,06	90 225,85
Годовые потери вызванные использованием средства измерения при контроле параметра, $P_{\text{си}}$, руб.	72 701,91	91 682,85
Потери при введении контроля на производстве, $P_{\text{к}}$, руб.	74 992,19	93 973,13
Экономия за весь срок эксплуатации более точного средства измерения, Δ , руб.	542 312,57	

Исходные данные и результаты проведённого расчета по определению вероятного процента годных втулок распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 представлены в таблице 6.12.

Таблица 6.12 – Исходные данные и результаты расчета по определению вероятного процента годных втулок распределительного вала

Параметр	Обозначение	Значение
Коэффициенты риска исправимого брака	$T_{\text{ИБ}}$	1,92
Коэффициенты риска неисправимого брака	$T_{\text{НБ}}$	1,68
Вероятный процент бракованных деталей исправимого брака	$Q_{\text{ИБ}}$	2,74 %
Вероятный процент бракованных деталей неисправимого брака	$Q_{\text{НБ}}$	4,65 %
Вероятность того, что деталь будет являться исправимым браком после контроля	$P_{\text{ИБ}}$	0,0274
Вероятность того, что деталь будет являться неисправимым браком после контроля	$P_{\text{НБ}}$	0,0465
Вероятный процент годных деталей	$Q_{\text{Г}}$	92,61%.
Вероятность того, что деталь годная,	$P_{\text{Г}}$	0,09261

Исходные данные и результаты расчета экономической целесообразности применения цифрового средства измерения при контроле втулок распределительного вала двигателя ЯМЗ-236 представлены в таблице 6.13.

Таблица 6.13 – Исходные данные и результаты расчета экономической целесообразности применения цифрового средства измерения при контроле втулок распределительного вала

Показатели	Средство измерения	
	Нутромер микрометрический трехточечный dasqua	Нутромер НИ 50-100
Контролируемый размер, D, мм	54 ^{+0,03}	
Предельная погрешность СИ, Δ_{lim} , мкм	±5	±10
СКО погрешности измерения, $\sigma_{мет}$, мкм	2,5	5
Коэффициент точности измерения, $A_{мет}$, %	8,3	16,7
Количество неправильно принятых опорных шеек с исправимым браком, m, %	1,6	2,8
Количество неправильно забракованных опорных шеек от количества годных, n, %	3,4	7,8
Потери от исправимого брака, $\Pi_{иб}$, руб.	3 193,47	
Потери от неисправимого брака, $\Pi_{нб}$, руб.	29 434,50	
Потери от неправильно принятых и неправильно забракованных деталей, $\Pi_{пи}$, руб.	50 958	74 802
Годовые потери вызванные использованием средства измерения при контроле параметра, $\Pi_{си}$, руб.	67 777,44	81 400,24
Потери при введении контроля на производстве, $\Pi_{к}$, руб.	100 405,41	114 028,21
Экономия за весь срок эксплуатации более точного средства измерения, Э, руб	257 033,96	

Из проведенных расчетов можно сделать вывод о целесообразности применения цифровых средств измерений, поскольку экономия за срок эксплуатации превосходит потери от внедрения. При комплексном внедрении всех предложенных цифровых средств измерений экономия за срок эксплуатации достигнет 4 415 114,51 руб.

6.3 Расчет экономической эффективности от увеличения срока службы соединения распределительный вал – втулка

Оценка экономической эффективности от увеличения срока службы рассчитывают по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{сл}} = \left(\text{СТ}_1 \cdot \frac{\text{ЗИ}_2}{\text{ЗИ}_1} - \text{СТ}_2 \right) \cdot \text{ОП} \quad (6.16)$$

где: СТ_1 и СТ_2 – себестоимость получения соединения с заданной точностью; ЗИ_1 и ЗИ_2 – запас на износ соединения; ОП – объём выпускаемой продукции.

Более большой запас на износ позволяет продлить срок службы и снизить амортизационные отчисления, экономия будет определяться как:

$$\mathcal{E}_a = \left(\frac{\text{ЦД}_1}{\text{ЗИ}_1} - \frac{\text{ЦД}_2}{\text{ЗИ}_2} \right) \cdot \text{ОП} \quad (6.17)$$

где: ЦД_1 и ЦД_2 – цена деталей, образующих соединения с заданной точностью.

Для экономических расчетов примем, что $\text{СТ}_1 = \text{СТ}_2$, $\text{ЦД}_1 = \text{ЦД}_2$, ОП=1000 шт. Исходные данные и результаты расчёта по оценке экономической эффективности от увеличения срока службы соединения распределительный вал – втулка приведены в таблице 6.14.

Таблица 6. 14 – Исходные данные и результаты расчёта по оценке экономической эффективности от увеличения срока службы соединения распределительный вал – втулка

Показатель	Обозначение	Значение параметра
Себестоимость получения соединения*	СТ_1 и СТ_2	4523 руб.
Цена деталей*	ЦД_1 и ЦД_2	6350 руб.
Запас на износ соединения (полная взаимозаменяемость)	ЗИ_1	105 мкм
Запас на износ соединения (цифровой подбор)	ЗИ_2	175 мкм
Экономической эффективности от увеличения срока службы	$\mathcal{E}_{\text{сл}}$	3 015 333,35 руб.
Экономия на амортизационных отчислениях	\mathcal{E}_a	24 192,47 руб.

* На один комплект, состоящий из одного распределительного вала, прошедшего ремонт и пяти восстановленных втулок.

По данным, полученным в результате проведенного расчета видно, что использование предлагаемого цифрового подбора позволяет получить экономический эффект как от увеличения срока службы, так и от снижения амортизационных отчислений.

Выводы по главе 6

1. Себестоимость одной восстановленной втулки при использовании металлического порошка ПР-Н80Х13С2Р составляет 777,69 руб. для ПХ-30 – 758,53 руб. учитывая одинаковый ресурс новой и восстановленной втулки, а также то, что стоимость новой втулки – 1650 руб. можно говорить об экономической целесообразности применения технологии восстановления.
2. В результате расчета экономической эффективности от применения цифровых средств измерений при дефектации распределительного вала и его сопряжения с втулкой было выявлено, что снижаются потери, вызванные исправимым и неисправимым браком позволяющие компенсировать потери от их внедрения. При комплексном внедрении всех предложенных цифровых средств измерений экономия за срок эксплуатации достигнет 4 415 тыс.руб.
3. В результате проведенного расчета экономической эффективности от увеличения срока службы соединения распределительный вал – втулка для 1000 двигателей было выявлено, что увеличение срока службы соединения позволит снизить затраты на 3 015 тыс.руб., а амортизационные отчисления – 24 тыс.руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая проведенные исследования, можно сделать следующие выводы:

1. На основании анализа отклонений формы и расположения сопрягаемых деталей, образующих соединение в подшипнике скольжения, получена теоретическая зависимость для расчета минимальной толщины масляного слоя с целью обеспечения несущей способности. Также получено математическое выражение для определения наименьшего зазора в посадке в зависимости от минимальной толщины масляного слоя с учетом коэффициента запаса надежности несущей способности в подшипнике скольжения.

2. Разработана теоретическая модель выбора рациональных способов восстановления двух деталей, входящих в соединение, с учетом параметров точности и стоимости ее обеспечения. На основе анализа модели параметрического отказа соединения показано, что применение метода цифрового подбора пар трения, нацеленного на обеспечение гарантированного наименьшего зазора, позволяет достигнуть наибольшего запаса материалов на износ для условий мелкосерийного ремонтного производства. Наиболее целесообразно использовать данный метод при формировании соединений валов с втулками подшипников скольжения, в частности – для опорных шеек распределительных валов, где имеется возможность обрабатывать валы под ремонтный размер, а втулку восстанавливать путем обжатия с восстановлением наружного диаметра и последующей обработки внутреннего и наружного диаметров до требуемых размеров.

3. Теоретически обосновано использование метода обжатия при восстановлении бронзовых втулок по критерию сохранения геометрической устойчивости. Получены математические выражения и составлены рекомендации по расчету и выбору геометрических параметров деформирующей матрицы в зависимости от величины изнашивания внутренней поверхности и требуемого диаметра втулки.

4. Проведены практические эксперименты и разработана технология восстановления внутренних поверхностей подшипников скольжения с износом до 0,8

мм, изготовленных из Бр.О5Ц5С5, путём объёмного обжата с последующим электроконтактным напеканием наружной поверхности втулки металлическими порошками ПХ-30 и ПР-Н80Х13С2Р с использованием охлаждаемого электрода и графитовой оболочки для предотвращения влияния высокой температуры на твердость и износостойкость внутренней поверхности бронзовой втулки. Финишную обработку внутреннего диаметра втулки с целью получения заданного размера рекомендовано проводить на многоцелевом обрабатывающем центре с зоной рассеяния $\pm 0,002$ мм.

5. Проведена оценка точности обработки опорных шеек распределительных валов под ремонтный размер с помощью диаграмм размаха, контрольных карт и графиков до и после применения элементов цифровизации, показано, что применение цифровых технологий приводит к значительному снижению исправимого и неисправимого брака, а также уменьшению реальной зоны рассеяния размеров после контроля.

6. Метод цифрового подбора пар трения – опорных шеек распределительных валов с втулками – реализован на базе процессной модели в нотациях IDEF0, BPMN и EPC. Применена машиночитаемая цифровая маркировка в виде QR-кода и Data Matrix, что позволило автоматизировать сбор данных и проводить мониторинг эффективности процессов. Анализ зазоров, полученных путем цифрового подбора в соединениях опорных шеек распределительных валов с втулками, показал, что формируется почти двукратный запас материала на износ по сравнению с методом полной взаимозаменяемости и прослеживается равенство между зоной рассеяния зазоров в посадке и допуском на обработку шеек вала.

7. Использование цифровых технологий при выполнении операций дефектации и контроля позволяет снизить временные потери благодаря систематизации и моделированию собираемых данных, а на этапе принятия решения о целесообразности ремонта в значительной степени исключается влияние человеческого фактора, снижается трудоёмкость процесса дефектации, осуществляется эффективный мониторинг производственных процессов.

8. Проведена замена аналоговых средств измерений на цифровые, снизившая количество неправильно принятых и неправильно забракованных деталей на 25...75%.

9. В результате расчета экономической эффективности использования комбинированного метода восстановления втулок под опорные шейки распределительных валов выявлено, что себестоимость восстановления одной втулки будет в 2 раза ниже стоимости новой втулки. Экономическая эффективность от применения цифровых средств измерений будет равна 4 415 тыс. руб. Экономическая эффективность от увеличения срока службы исследуемых соединений за счет цифрового подбора пар трения составит 3 015 тыс. руб.

Рекомендации к производству

1. Для снижения вероятности возникновения ошибок при внедрении цифровых технологий необходима действующая система менеджмента качества на основе ГОСТ Р ИСО 9001.

2. На основе действующей системы менеджмента качества произвести оцифровку процессов, начиная с ключевых, непосредственно влияющих на качество отремонтированных сборочных единиц. Для оцифровки процессов необходимо использовать специализированное программное обеспечение, например, Business Studio. Для процессов верхнего уровня целесообразно использовать нотацию IDEF0, нижнего уровня BPMN, операционные карты – EPC.

3. Для контроля эффективности процессов необходимо организовать прослеживание деталей на предприятии произведя их маркировку при помощи машиночитаемых меток Data Matrix или QR-кода.

4. В рамках совершенствования контрольно-измерительных операций необходимо произвести замену аналоговых средств измерений на цифровые имеющие лучшие (желательно на порядок) метрологические характеристики и внесённые в реестр средств измерений, а также имеющие возможность передачи данных напрямую в компьютер.

5. Используя собранные данные, полученные в результате реализации этапов 2-4, можно приступить к созданию имитационной модели процесса путем добавления в оцифрованный процесс фактических параметров. Для избежания получения ошибочной информации в результате имитационного моделирования его нужно проводить для наилучшего и наихудшего случая как для базового процесса, так и для оптимизированного.

6. При внедрении системы принятия решений на первом этапе целесообразно применить бальную оценку с развитием цифровых технологий на предприятии перейдя к программному решению.

7. На основе контрольных карт необходимо организовать постоянный мониторинг стабильности процессов. В случае если процесс является в неуправляемом (нестабильном) состоянии необходимо принять меры по его стабилизации.

8. Для снижения рассеяния величины зазора в соединении, а следовательно, и запаса на износ необходимо использовать метод селективной сборки или цифрового подбора. Метод селективной сборки применяется при низкой точности оборудования (0,01 мм), цифровой подбор требует применение как минимум для одной детали высокоточного оборудования (0,002 и точнее).

9. Для применения селективной сборки и цифрового подбора можно использовать втулки, прошедшие восстановление комбинированным методом согласно следующим рекомендациям:

- Контроль износа и подбор геометрии обжимной матрицы, согласно рисунку 4.9.
- Проведение объёмного обжата.
- Контроль размеров детали после проведения объёмного обжата - изменение наружного и внутреннего диаметров.
- Подготовка детали к проведению электроконтактного напекания - очистка от масла (обезжиривание не требуется) и покрытие внутренней поверхности втулки высокотемпературной токонепроводящей краской.

- Сборка графитовой оболочки - установка асбеста в нижней части графитовой оболочки, установка детали, засыпка стального порошка, установка верхней асбестовой прокладки, установка верхней части графитовой оболочки.
- Монтирование графитовой оболочки на сварочную установку, состоявшее в установке графитовой оболочки на нижний электрод и плотном ее зажатии.
- Производство нагрева деталей согласно следующим рекомендациям:
 - для порошка Н80Х13С2Р:
 - температура напекания $1160 \pm 5^\circ\text{C}$;
 - давление электродов 20 МПа;
 - время напекания 70 с;
 - для порошка ПХ-30:
 - температура напекания $1285 \pm 5^\circ\text{C}$ (выдержка при температуре $1100 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 110 с);
 - давление электродов 25 МПа;
 - время напекания 250 с.
- Охлаждение графитовой оболочки до температуры менее 400°C и производство ее разборки.
- Осуществить контроль качества напечённого слоя.
- Провести механическую обработку наружной поверхности втулки и отверстий для подачи масла.
- Установить втулки в блок цилиндров согласно ремонтной документации на двигатель.
- Провести обработку внутренней поверхности установленных втулок под требуемый диаметр согласно выбранному точностному методу.
- Повести контроль параметров втулок после обработки.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Проведенные диссертационные исследования могут служить основой для дальнейшего развития системы управления производственными процессами предприятий технического сервиса на основе применения цифровых технологий.

Перспективными направлениями данной темы является:

1. Разработка системы управления предприятия технического сервиса на основе собираемых данных.
2. Адаптация и апробация технологии нанесения металлического порошка на бронзовую втулку методом селективного лазерного плавления (SLM).
3. Адаптация и апробация технологии нанесения металлического порошка на бронзовую втулку методом и прямого лазерного спекания металла (DMLS).
4. Адаптация и апробация предложенной методики для соединений «втулка – втулка».
5. Адаптация и апробация предложенной методики для соединений «корпус – втулка».
6. Адаптация и апробация предложенной методики по применению цифровых технологий для соединений с натягом.
7. Адаптация и апробация предложенной методики по применению цифровых технологий для переходных посадок.
8. Адаптация и апробация предложенной методики по применению цифровых технологий при подборе деталей по их весу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкиев, Ю.А. Об определении наибольшей степени деформации при обжиге пустотелых цилиндрических заготовок в конической матрице / Ю.А. Аверкин // Кузнечно–штамповочное производство. 1966. – №11. – С.19–22.
2. Аверкин, Ю.А. Анализ обжима полых цилиндрических заготовок конической матрицей / Ю.А. Аверкин //Сборник трудов МВТУ им. Н.Э. Баумана Мишины и технология обработки металлов давлением. 1955. – №42. – С. 21–37
3. Аверкин, Ю.А. Исследования обжима полых цилиндрических заготовок / Ю.А. Аверкин // Инженерные методы расчёта процессов обработки металлов давлением: Сборник научных трудов – М.:Машгиз. 1957. – С. 167–190.
4. Агеев, Н.П. Анализ условий устойчивости тонкостенных заготовок при обжиге в конической матрице / Н.П. Агеев, Б.А. Кривицкий // Известия высших учебных заведений. – М.: Машиностроение. 1980. – №1. – С. 96–100
5. Акиньшин, С.И. Исследование процессов и создание технологии воздушно–плазменного напыления с аэрозольным охлаждением крупногабаритных деталей: Диссертация кандидата технических наук 05.03.01 / С.И. Акиньшин – Воронеж: 2000. – 180с.
6. Амелин, Д. В. Новые способы восстановления и упрочнения деталей машин электроконтактной наваркой./ Амелин Д. В., Рымов Е. В. – М.: ВО «Агропромиздат». 1987.– 151 с.
7. Артемьев, Ю.Н. Качество ремонта и надежность машин в сельском хозяйстве / Ю.Н. Артемьев – М.: Колос. 1981. – 239с.
8. Ачкасов, К.А. Прогрессивные способы ремонта сельскохозяйственной техники / К.А. Ачкасов – М.: Колос. 1984. – 271с.
9. Бевз, И.И. Разработка технологии электроконтактной обработки наплавленных деталей сельскохозяйственной техники: – диссертация кандидата технических наук 05.20.03. / И.И. Бевз – Челябинск. 1984. – 249с.

10. Бирюков, В.В. Восстановление бронзовых деталей машин порошками из цветных сплавов электроконтактным напеканием: диссертация кандидата технических наук 05.20.03 / В.В. Бирюков – М.: 2005. – 144с.
11. Бирюков, В.В. Восстановление бронзовых деталей сельскохозяйственных машин методом электроконтактного напекания бронзовых порошков на железистой основе: диссертация кандидата технических наук 05.20.03 / В.В. Бирюков – М.: 2008. – 186с.
12. Блок цилиндров. Для запасных частей - Обновляется в течение суток – URL: <https://ymzmarket.ru/catalog/blok-tsilindrov-yamz-236/656-1002012-31-blok-tsilindrov-dlya-zapasnykh-chastey> (дата обращения: 16.01.2025). - Текст : электронный.
13. Бобоюдо, Л.М. Восстановление поршневых пальцев / Л.М. Бобоюдо // Техника в сельском хозяйстве. 1976. – № 1. С. 89 – 90.
14. Богомолова, Н.А. Практическая металлография / Н.А. Богомолова –М.: Высшая школа, 1983. – 78 с.
15. Бокштейн, С.З. Диффузия и структура металлов / С.З. Бокштейн – М.: Металлургия. 1973. – 205 с.
16. Бонч-Осмоловский, М.А. Селективная сборка / М.А. Бонч-Осмоловский. – М.: Машиностроение, 1973. – 145 с.
17. Бугаев, В.Н. Восстановление деталей и повышение ресурса топливной аппаратуры тракторных и комбайновых дизелей диффузионной металлизацией: автореферат диссертации доктора технических наук 05.20.03. / В.Н. Бугаев – М.: 1987. – 32 с.
18. Бурак, П.И. Интенсификация электроконтактной приварки лент при восстановлении деталей / П.И. Бурак – М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2012. – 330с.
19. Бурмаков, Ф.Х. Работоспособность и долговечность восстановленных деталей и сборочных единиц машин / Бурмаков Ф.Х., Лезин П.П. – Йошкар–Ола: Мордовский университет, 1993. – 120 с.

20. Варнаков, В. В. Технический сервис машин сельскохозяйственного назначения / В. В. Варнаков, В. В. Стрельцов, В. Н. Попов, В. Ф. Карпецков – М.: Колос, 2000. – 256с.
21. Веденягин, Г.Б. Общая методика экспериментальных исследований и обработка опытных данных / Г.Б. Веденягин – М.: Колос, 1973. – 199 с.
22. Величко, С. А. Формирование толстослойных электроискровых покрытий повышенной контактной сплошности / С. А. Величко, И. Н. Кравченко, А. В. Мартынов, Е. Г. Мартынова // СТИН. – 2021. – № 4. – С. 29-32.
23. Власов, В.М. Работоспособность упроченных трущихся поверхностей / В.М. Власов – М.: Машиностроение, 1987. – 306 с.
24. Воловик, Е.Л. Справочник по восстановлению деталей / Е.Л. Воловик – М.: Колос, 1981. – 351 с.
25. Волошенко, Ю.И. Изготовление биметаллических втулок / Ю.И. Волошенко, А.А. Анбиндер – М.: Машиностроение, 1961. – 37 с.
26. Галанцев, В.А. Восстановление деталей трансмиссии трактора класса 3,0 контактным электролитическим способом: диссертация кандидата технических наук / В.А. Галанцев – М.: 1995. – 226 с.
27. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (трение, износ, смазка машин, эффект безизносности.) учебное пособие. / Д.Н. Гаркунов, М.Н. Ерохин, П.К. Потапов, В.А. Оськин – М.: МИИСП, 1991. – 36 с.
28. Герцрикен, С.Д. Диффузия в металлах и сплавах в твёрдой фазе / С.Д. Герцрикен, И.Я. Дехтяр – М.: Физматгиз, 1960. – 646 с.
29. Голиницкий, П. В. Анализ стабильности процесса обработки опорных шеек распределительных валов / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова // Чтения академика В. Н. Болтинского : сборник статей, Москва, 22–23 января 2025 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2025. – С. 153-157.
30. Голиницкий, П. В. Влияние цифровизации на эффективность технологических процессов современного производства / П. В. Голиницкий, Э. И.

Черкасова, Ю. Г. Вергазова, У. Ю. Антонова // Компетентность. – 2021. – № 8. – С. 48–54.

31. Голиницкий, П. В. Восстановление подшипников скольжения из цветных сплавов комбинированным методом : специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Голиницкий Павел Вячеславович. – Москва, 2016. – 22 с.

32. Голиницкий, П. В. Восстановление подшипников скольжения из цветных сплавов комбинированным методом : дис. ... канд. тех. наук : 05.20.03 : защищена 19.05.2016 / П. В. Голиницкий ; ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева – Москва, 2015. – 129 с.

33. Голиницкий, П. В. Выбор режимов напекания металлических порошков на основе никеля и железа при комбинированном методе восстановления бронзовых втулок / П. В. Голиницкий, И. Л. Приходько // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2018. – № 5(87). – С. 40–45.

34. Голиницкий, П. В. Использование цифровых технологий в обеспечении максимального запаса на изнашивание соединений с зазором / П. В. Голиницкий, О. А. Леонов, У. Ю. Антонова // Вестник машиностроения. – 2025. – Т. 104, № 8. – С. 650-656. – DOI 10.36652/0042-4633-2025-104-8-650-656. – EDN JDKASE.

35. Голиницкий, П. В. Определение геометрических параметров матрицы при объемном обжати втулок из оловянистых бронз / П. В. Голиницкий, О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, У. Ю. Антонова // Вестник машиностроения. – 2021. – № 7. – С. 27-30.

36. Голиницкий, П. В. Оптимизация процесса входного контроля распределительных валов при помощи имитационного моделирования / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова [и др.] // Агроинженерия. – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 81-89.

37. Голиницкий, П. В. Применение IT-технологий при маркировке запасных частей сельскохозяйственной техники / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, К. И. Ханжиян // Компетентность. – 2019. – № 5. – С. 36–39.

38. Голиницкий, П. В. Применение цифровых систем на ремонтных предприятиях / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2025. – № 3. – С. 64-70.

39. Голиницкий, П. В. Проектирование процессов предприятий АПК : Учебник / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова. – Саратов : Амирит, 2024. – 193 с.

40. Голиницкий, П. В. Разработка процедуры управления внутренней документацией для промышленного предприятия / П. В. Голиницкий, Ю. Г. Вергазова, У. Ю. Антонова // Компетентность. – 2018. – № 7(158). – С. 20–25.

41. Голиницкий, П. В. Совершенствование менеджмента качества на предприятиях АПК / П. В. Голиницкий, Ю. Г. Вергазова, У. Ю. Антонова // Компетентность. – 2018. – № 9–10(160–161). – С. 63–68.

42. Голиницкий, П. В. Совершенствование системы принятия решений при дефектации гильз цилиндров / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова, Л. А. Гринченко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2024. – № 6. – С. 108-114.

43. Голиницкий, П. В. Цифровая маркировка запасных частей / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 44–50.

44. Голиницкий, П. В. Цифровизация процесса дефектации коленчатых валов / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Г. Н. Темасова [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2024. – № 3. – С. 76-84.

45. Голиницкий, П. В. Цифровые технологии проектирования процессов в АПК / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова [и др.]. – Москва : Российский государственный аграрный университет- Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2023. – 172 с.

46. Государственный стандарт 23.225–99. Обеспечение износостойкости изделий.
47. Государственный стандарт 28377–89 Порошки для газотермического напыления и наплавки
48. Государственный стандарт 613–79. Бронзы оловянные литейные.
49. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев – М.: Металлургия, 1978. – 648 с.
50. Гусейнов, А.Г. Восстановление плунжерных пар топливного насоса УТН – 5 парофазным диффузионным хромированием в вакууме с последующей механической обработкой: диссертация кандидата технических наук / А.Г. Гусейнов – М.: 1987 – 260 с.
51. Джонс, В.Д. Основы порошковой металлургии. Свойства и применение порошковых материалов / В.Д. Джонс – М.: Мир, 1965. – 390 с.
52. Дорожкин, Н.Н. Восстановление деталей сельскохозяйственных машин / Н.Н. Дорожкин, В.Н. Гимельфарб – Минск: Урожай, 1987. – 143 с.
53. Дорожкин, Н.Н. Термодиффузионное припекание порошка 1ПХ / Н.Н. Дорожкин, И.М. Зуев // Порошковая металлургия. 1968. – № 5. – С.18–30.
54. Дорожкин, Н.Н. Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками / Н.Н. Дорожкин – Минск: Наука и техника, 1975. – 148 с.
55. Дубинин, Г.Н. Диффузионное насыщение поверхности сплавов металлами: автореферат: диссертация доктора технических наук / Г.Н. Дубинин – М.: 1967. – 35 с.
56. Дьячков, А. К. Исследование в области динамически нагруженных подшипников / А. К. Дьячков // Трение и износ в машинах. 1949. – IV. – С. 158
57. Евдокимов, Ю.А. Метод ускоренных испытаний материалов, деталей и узлов машин на износостойкость / Ю. А. Евдокимов // Трение и износ. 1984. – №1. – С. 54–58.

58. Евграфов, В.А. Исследование процесса восстановления деталей тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин нанесением медно–свинцового сплава контактным электролитическим методом: диссертация кандидата технических наук / В.А. Евграфов – М.: 1974. – 150 с.

59. Ермолов, Л.С. Основы надежности сельскохозяйственной техники / Л.С. Ермолов, В.М. Кряжков, В.Е. Черкун – М.: Колос, 1982. – 271 с.

60. Ерофеев, М. Н. Разработка моделей управления технологическими процессами производства изделий машиностроения / М. Н. Ерофеев, И. Н. Кравченко, М. В. Крюков, С. И. Некрасов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2025. – № 1. – С. 9-14. – DOI 10.52261/02346206_2025_1_9. – EDN ЕПУГТ.

61. Жуковский, В.М. Термодинамика и кинетика реакций в твёрдых телах / В.М. Жуковский – Свердловск: Уральский Университет, 1987. – 134с.

62. Земсков, Г.В. Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов / Г.В. Земсков, Р.Л. Коган – М.: Металлургия, 1987. – 207 с.

63. Иванов, А.И. Основы взаимозаменяемости и технические измерения / А.И. Иванов. – М.: Колос, 1975. – 496 с.

64. Ищенко, А.А. Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами / А.А. Ищенко – Мариуполь: ПГТУ, 2007. – 250с.

65. Калоша, В.К. Математическая обработка результатов эксперимента / В.К. Калоша, С.И. Лобко, Т.С. Чикова – М.: Высшая школа, 1982. – 103с.

66. Каплун, В.Г. Исследование износостойкости покрытия из оловянистой бронзы / В.Г. Каплун, В.Л. Козлов, В.С. Неслих, Н.М. Рукина, В.А. Носова // Трение и износ, том 9 1988. – №1. С. 168 – 172.

67. Капралов, А.Д. Восстановление бронзовых втулок ходовой части сельскохозяйственной техники методом диффузионной металлизации: диссертация кандидата технических наук / А.Д. Капралов – М.: 1992. – 175с.

68. Колачев, Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. М.: Металлургия, 1981.–416 с.
69. Конвисаров, Д.В. Трение и износ металлов / Д.В. Конвисаров – М.: Машгиз, 1947. – 182с.
70. Коровчинский, М. В. Теоретические основы работы подшипников скольжения / М. В. Коровчинский – М.: Машгиз, 1959. – 402 с.
71. Корольков, И.Т., Ручкин В.И. Термодиффузионное восстановление изношенных бронзовых деталей / И.Т. Корольков, В.И. Ручкин // Техника в сельском хозяйстве 1985.– № 12, С. 44–48.
72. Костецкий, Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов – Киев: Техніка, – 1976. – 296 с.
73. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и износ в машинах / Б.И. Костецкий – Киев: Техніка, 1970. – 396с.
74. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М. Н. Добычин, В.С. Комбалов – М.: Машиностроение, 1977. – 526с.
75. Красовский, Г.И. Планирование экспериментов / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов – Минск: БГУ, 1982. – 302 с.
76. Кривошеин, В.А. Интенсификация обжима трубной заготовки выбором геометрии поверхности её контакта с матрицей: диссертация кандидата технических наук 05.02.09 / В.А Кривошеин – М.: 2011. – 131с.
77. Кряжков, В.М. Надёжность и качество сельскохозяйственной техники / В.М. Кряжков – М.: Агропромиздат, 1989. – 335с.
78. Кулько, П. А. Долговечность газораспределительного механизма двигателя ЯМЗ 238 / П. А. Кулько // АТ. 1985. – № 7 – С. 52 – 53.
79. Курчаткин, В.В. Надежность и ремонт машин / В.В. Курчаткин, Н.Ф. Тельнов, К.А. Ачкасов – М.: Колосс, 2000. – 776с.
80. Лапкина, Л.А. Исследование процесса диффузионного детонирования применительно к упрочнению деталей при ремонте сельскохозяйственной техники.

Диссертация кандидата технических наук 05.20.03 / Л.А. Лапкина – М.: 1976. – 147с.

81. Латыпов, Р.А. Оптимизация процесса электроконтактной наплавки цилиндрических деталей. Автореферат диссертации кандидата технических наук / Р.А. Латыпов – М.: 1983. – 18с.

82. Лахтин, Ю.М. Химико–термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов – М.; Металлургия, 1985. – 256 с.

83. Левин, Э.Л. Термомеханическое упрочнение деталей при восстановлении наплавкой / Э.Л. Левин, И.С. Синяговский, С.Г. Трофимов – М.: Колос, 1974. – 43с.

84. Лезин, П.П. Формирование надежности мобильной сельскохозяйственной техники при ее ремонте./ П.П. Лезин // Долговечность и эксплуатационная надежность материалов. Мордовский университет, Саранск, 1987. – С. 47–48.

85. Леонов, О. А. Взаимозаменяемость / О. А. Леонов, Ю. Г. Вергазова. – Санкт–Петербург : Изд-во "Лань", 2020. – 208 с.

86. Леонов, О. А. Модель параметрического отказа для расчета точностных параметров соединения с зазором / О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба // Трение и износ. - 2019. - Т. 40, № 4. - С. 424-430.

87. Либесон, Г.А. Основы порошкообразной металлургии. Изд. 2–е переработанное и дополненное / Г.А. Либесон – М.: Металлургия, 1987. – 240с.

88. Макаров, В.П. Исследование толщины при электроконтактном напекании порошков / В.П. Макаров // Труды ЧИМЭСХ. – 1975. – Вып.96. – С. 84 – 87.

89. Макаров, В.П. К вопросу напекания металлических порошков роликом–электродом по винтовой линии / В.П. Макаров, Ю.С. Тарасов //Труды ЧИМЭСХ. 1975. – Вып. 96. – С.82 – 83

90. Малаховский, В.А. Плазменные процессы в сварочном производстве / В.А. Малаховский – М.: Высшая школа, 1988. – 72 с.

91. Малевич, Н. А. Исследование моделей напряженно – деформированного состояния металла при волочении труб и разработка методики определения силовых параметров волочения на самоустанавливающейся оправке: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.03.05 / Н.А. Малевич – М.: 2007. – 201с.
92. Михлин, В.М. Прогнозирование технического состояния машин / В.М. Михлин – М.: Колос, 1976 – 287с.
93. Мишин, И.А. Долговечность двигателей / И.А. Мишин – Л.: Машиностроение, 1976. – 288с.
94. Мокров, А.П. Диффузионные процессы в металлах / А.П. Мокров, П.Н. Захаров – Тула: ТПИ, 1973. – 238с.
95. Мошков, А.Д. Пористые антифрикционные материалы / А.Д. Мошков – М.: Машгиз, 1968. – 37с.
96. Мудрова, А.Г. Диффузионные титаножелезные покрытия большой толщины на меди и её сплавах / А.Г. Мудрова, Н.С. Горбунов, Е.К. Медко, И.И. Силаев // Защитные покрытия на металлах. 1974. – Выпуск 8. – С. 97 – 99.
97. Мудрова, А.Г. Исследование процесса диффузионного титанирования латуней / А.Г. Мудрова, Н.С. Горбунов, А.А. Маринин // Защитные покрытия на металлах. 1973. – Выпуск 7. – С. 119 –121.
98. Мудрова, А.Г. Экспериментальные исследования диффузионного титанирования и области его применения: диссертация кандидата технических наук / А.Г. Мудрова – М.: 1974. – 168с.
99. Надежность и эффективность в технике. [В 10 т.]. Т. 5: Проектный анализ надежности / редакционный совет: В. С. Авдеевский [и др.]. - М. Машиностроение, 1988. - 320 с.
100. Непершин, Р.И. Моделирование процесса обжима тонкостенной трубной заготовки сферическими матрицами / Р.И. Непершин, Б.А. Кривицкий // Кузнечно–штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2007. – №11. – С. 32–38

101. О ходе и результатах реализации в 2023 году Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия [Электронный ресурс]: нац. доклад утв. 04.06.2024 № 1755-р // – Режим доступа: <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/2e7/274gki20f8y3v18pbvoms1wixv0j8dh4.pdf>, свободный.

102. Орлов, Б.Н. Восстановление работоспособности бронзовых подшипниковых втулок мелиоративных, строительных и с. х. машин методом центробежной заливки: с применением электродугового нагрева: диссертация кандидата технических наук 05.20.03 / Б.Н. Орлов – М.: 1985. – 160с.

103. Оськин, В.А. Восстановление деталей типа «вал» электроконтактным напеканием порошковых сплавов в условиях ремонтных предприятий Госагропрома: диссертация кандидата технических наук / В.А. Оськин – М.: 1987. – 168 с.

104. Пат. 2751387 С1 Российская Федерация, МПК В23Р 6/02, В22F 7/00. Устройство для восстановления изношенных втулок скольжения из цветных сплавов / С. К. Тойгамбаев, О. Н. Дидманидзе, П. В. Голиницкий [и др.]; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева". – № 2020138831 заявл. 26.11.2020; опубл. 13.07.2021

105. Пат. № 2750899 С1 Российская Федерация, МПК В23Р 6/02, В22F 7/00. Устройство для восстановления изношенных втулок скольжения из цветных сплавов / С. К. Тойгамбаев, О. Н. Дидманидзе, П. В. Голиницкий [и др.]; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева". – № 2020138833 : заявл. 26.11.2020 : опубл. 05.07.2021

106. Патон, Б.Е. Электрооборудование для контактной сварки: элементы теории / Б.Е. Патон, В.К. Лебедев – М.: Машиностроение, 1969. – 440с.

107. Пахомов, Е.В. Восстановление бронзовых втулок / Е.В. Пахомов, С.Ф. Андропов // Техника в сельском хозяйстве. 1987. – № 1. – С. 40 – 41.
108. Пашкевич, А.Г. Интенсификация процесса обжима полых цилиндрических заготовок / А.Г. Пашкевич, В.И. Глазков, В.И. Ершов, М.Ф. Каширин // Кузнечно–штамповочное производство. 1976.–№3.– С.36–39.
109. Пенкин, Н.С. Основы трибологии и триботехники / Н.С. Пенкин, А.Н. Пенкин, В.М. Сербин– М.: Машиностроение, 2008. – 206с.
110. Пиявский, Р.С. Восстановление втулок верхней головки шатуна / Р.С. Пиявский // Техника в сельском хозяйстве. 1987. – № 1. – С. 39 – 40.
111. Плетнев, Д.В. Основы технологии износостойких и антифрикционных покрытий / Д.В. Плетнев, В.И. Брусенцев – М.: Машиностроение, 1968. – 272с.
112. Поздов, С.Н. Новое в расчете подвижных посадок / С.Н. Поздов // Известия вузов. Машиностроение – 1969. – № 10 – С. 158 – 160.
113. Применение цифровых инструментов для совершенствования производственного процесса / П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова, Л. А. Гринченко, С. Ю. Видникевич // Компетентность. – 2023. – № 5. – С. 32–37.
114. Проников, А. С. Параметрическая надежность машин/ Проников. - Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. - 559 с.
115. Пучин, Е.А. Технология ремонта машин / Е. А. Пучин, В. С. Новиков, Н. А. Очковский, В. М. Корнеев, И. Н. Кравченко, А. С. Кононенко, А. А. Гаджиев, А. В. Чепурин – М.: Колосс, 2007. – 488с.
116. Пушкин, И.А. Восстановление изношенных деталей из бронзы способом электроискровой наплавки электродами из медных сплавов и никеля: диссертация кандидата технических наук / И.А. Пушкин – Саранск: 2001. – 175с.
117. Райченко, А.И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А.И. Райченко – М.: Metallurg, 1987. – 128с.
118. Рамос Родригес, Леонидас Дуилио Восстановление бронзовых втулок пластической деформацией с электроконтактной приваркой стальной ленты:

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.22.03 / Леонидас Дуилио Рамос Родригес – М.: 1995. – 180с.

119. Рейш, А.К. Повышение износостойкости строительных и дорожных машин / А.К. Рейш – М.: Машиностроение, 1986. – 182 с.

120. Рожкова, Т.В. Формирование структуры и свойств материалов на основе меди с карбидом кремния при электроконтактном спекании: диссертация кандидата технических наук: 05.02.01, 05.16.06 / Т.В. Рожкова – Тюмень: 2004. – 127с.

121. Романов, Д.И. Электроконтактный нагрев металлов / Д.И. Романов – М.: Машиностроение, 1981. – 168с.

122. Рубаков, Е.Л. Измерение температур при центробежной заливке биметаллических деталей с электродуговым нагревом / Е.Л. Рубаков, Б.Б. Суруханов, Б.Н. Киприянов // Труды КПИ. 1971. – № 37. – С. 11 – 16.

123. Сайфуллин, Р. Н. Восстановление деталей электроконтактной приваркой композиционных материалов сантифрикционными присадками: диссертация кандидата технических наук: 05.20.03 / Р. Н. Сайфуллин – Уфа: 2001. – 154с.

124. Самсонов, Г.В. Состояние и перспектива создания многокомпонентных диффузионных покрытий на металлах и сплавах/ Г.В. Самсонов, Н.Г. Кайдаш // Защитные покрытия на металлах. 1976. – №10. – С. 5 –12.

125. Саньков, В.М. Эксплуатация и ремонт мелиоративных и строительных машин. – М: Колос, 1986. – 319с.

126. Свид. 2021621718 Российская Федерация Свидетельство о государственной регистрации базы данных. Статистическое управление процессами / Г. Н. Темасова, О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю.Г. Вергазова, П.В. Голиницкий, [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». –№ 2021621604 рег. 12.08.2021

127. Свид. 2022621345 Российская Федерация Свидетельство о государственной регистрации базы данных. Методы оценки качества / Г. Н. Темасова, О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю.Г. Вергазова, П.В. Голиницкий, [и др.] ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». – : № 2022621222 : рег. 08.06.2022

128. Свид. 2022621385 Российская Федерация Свидетельство о государственной регистрации базы данных. Контрольные карты для анализа процесса / Г. Н. Темасова, О. А. Леонов, Н. Ж. Шкаруба, Ю.Г. Вергазова, П.В. Голиницкий [и др.] ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева». – № 2022621193 : рег. 14.06.2022

129. Свид. 2023668303 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Расчет предельных функциональных зазоров, обеспечивающих жидкостное трение в соединении / О. А. Леонов, П. В. Голиницкий, У. Ю. Антонова [и др.] ; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». – : № 2023667455 : рег. 25.08.2023

130. Свид. 2024663185 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Цифровой контрольный листок / П. В. Голиницкий, В. К. Зимогорский, У. Ю. Антонова, Э. И. Черкасова; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». – : № 2024661663 : рег. 05.06.2024, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

131. Селиванов, А.И. и Артемьев Теоретические основы ремонта и надежности сельскохозяйственной техники / А.И. Селиванов, Ю.Н. Артемьев – М.: Колос, 1978 – 248с.

132. Селиванов, А.И. Теоретические основы ремонта и надёжности сельскохозяйственной техники / А.И. Селиванов, Ю.Н. Артемьев – М.: Колос, 1982 – 271с.

133. Семченков, В. П. Разработка технологии горячей штамповки биметалла типа сталь–бронза с порошковым рабочим слоем: диссертация кандидата технических наук: 05.16.06 / В.П. Семченков – Новочеркасск: 2000. – 221с.

134. Сергеев, В.З. Восстановление плунжерных пар топливных насосов распределительного типа диффузионным хромотитанированием: диссертация кандидата технических наук 05.20.03 / Н.И. Сергеев – М.: 1985. – 220с.

135. Слабов, Е.П., Антропов Б.С. Еще раз о пылевом износе. Автомобильный транспорт. 1981, № 9 – 35с.

136. Смирнов, Н.А. Математическое моделирование и автоматизированное проектирование технологических процессов производства холоднодеформированных труб: диссертация кандидата технических наук: 05.16.05 / Н.А. Смирнов – Екатеринбург: 2004. – 175с.

137. Соколов, К.С. Восстановление бронзовых подшипниковых втулок центробежным электродуговым напеканием бронзовых порошков: диссертация кандидата технических наук / К.С. Соколов – М.: 1989.– 175с.

138. Сосновский, Л.А., Эпик А.П., Деркач В.Д. Применение активаторов в процессах диффузионного контактного насыщения металлов в порошках. Защитые высокотемпературные покрытия. Труды 5–го Всесоюзного совещания по жаростойким покрытиям, Харьков, 12–16 мая 1970 / Л.А. Сосновский, А.П. Эпик, В.Д. Деркач – Л.: Наука, 1972. – 368с.

139. Старосельский, А.А. Долговечность трущихся деталей машин / А.А. Старосельский, Д.Н. Гаркунов. – М., Машиностроение, 1967. – 395 с.

140. Суранов, Г.И. Уменьшение износа автотракторных двигателей при пуске / Г.И. Суранов – М.: Колос, 1982. – 139с.

141. Сухих, Н.И. Восстановление размеров изношенных втулок / Н.И. Сухих //Техника в сельском хозяйстве. 1968. – № 9. С. 70–74.

142. Сучков, Д.И. Медь и ее сплавы / Д.И. Сучков – М.: Metallurgy, 1967. – 248с.
143. Тененбаум, М.М. О видах, процессах и механизмах абразивного изнашивания / М.М. Тененбаум // Долговечность трущихся деталей машин. 1990. – С. 202 – 215.
144. Тимашов, Е. П. Цифровой регистратор неисправности трансмиссии / Е. П. Тимашов // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2022. – № 1(33). – С. 110-116.
145. Типей, Н. Подшипники скольжения. Расчет, проектирование, смазка / Н. Типей, В. Н. Константиnescу, Ал. Ника, О. Бицэ – Бухарест : Акад. Румынской Народной Республики, 1964. – 457 с.
146. Тоигамбаев, С.К. Повышение долговечности деталей сельскохозяйственных и мелиоративных машин при применении процесса термоциклической диффузионной металлизации: диссертация кандидата технических наук 05.20.04 / С.К. Тоигамбаев – М.: 2000. – 136с.
147. Удовицкий, В.И. Долговечность диффузионно–насыщенных кремнием деталей машин / В.И. Удовицкий – М.: Машиностроение, 1983. – 240с.
148. Ульман, И.Е. Ремонт машин / И.Е. Ульман – М.: Колос, 1976. – 504с.
149. Феденко, Л.Г., Кеженцев В.В. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента. – М.: Изд. – во МГУ, 1977. – 112с.
150. Федоренко, И.М. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения / И.М.Федоренко, Н. К. Францевич, И. Д. Радомысельский – Киев: Наукова Думка, 1985. – 624с.
151. Федорченко, И.М. Антифрикционные и фрикционные металлокерамические материалы / И.М. Федорченко // Современные проблемы порошковой металлургии. 1970. – С. 35 – 38.
152. Федорченко, И.М. Основы порошковой металлургии / И.М. Федорченко, Р.А. Андриевский – Киев: Изд. АН УССР, 1961. – 84с.

153. Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов. Часть 1 . Деформация и разрушение / Я.Б. Фридман – М.: Машиностроение, 1974. – 472с.

154. Харитонов, Л.Г. Определение микротвердости. Методика испытаний. Измерение отпечатков. Номограмма и таблица для определения микротвердости / Л.Г. Харитонов – М.: Металлургия, 1967. – 46с.

155. Хасанов, Р. Х. Повышение эксплуатационных свойств распределительных валов автомобильных двигателей на основе конструктивно–технологических методов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10 / Хасанов Р. Х. – Оренбург, 2003. – 165 с.

156. Цифровизация в сфере технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники : Аналитический обзор / И. Г. Голубев, Н. П. Мишуров, В. Ф. Федоренко [и др.]. – Москва : Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2023. – 80 с.

157. Черкасова, Э. И. Организация процесса прослеживаемости качества пшеничной муки / Э. И. Черкасова, П. В. Голиницкий // Компетентность. – 2018. – № 4(155). – С. 43–47.

158. Черкасова, Э. И. Современные методы маркировки кондитерских изделий / Э. И. Черкасова, П. В. Голиницкий // Компетентность. – 2020. – № 2. – С. 34–38.

159. Чернавский, С. А. Подшипники скольжения / С. А. Чернавский – М.: Машгиз, 1963. – 245 с.

160. Черноиванов, В. И. Восстановление деталей машин / В. И. Черноиванов, И. Г. Голубев. - М. : Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2010. - 374 с.

161. Чернышев, Г. Д. Двигатели ЯМЗ–236, ЯМЗ–238 / Г. Д. Чернышев, М. В. Ершов, Д. Н. Крашенинников и др. – Москва : Машиностроение 1968. – 231 с.

162. Шаповалов, В.П. Диффузионное титанирование металлов и сплавов. Химико–термическая обработка металлов и сплавов. Тезисы II Всесоюзной научной конференции по химико–термической обработке металлов и сплавов, 22–23 мая / В.П. Шаповалов, Н.С. Горбунов, Г.Н.Ковальчук, Н.П. Байдак – Минск: 1974.– 89с.

163. Шатинский, В.Ф. Получение диффузионных покрытий в среде легкоплавких металлов. / В.Ф. Шатинский, О.М. Збожная, Г.Г. Максимович – Киев: Науко ва думка, 1976. – 197с.

164. Щербединский, Г.В. Распределение элементов в трехкомпонентной системе при одновременном насыщении и выгорании двух компонентов и при последовательной диффузии двух компонентов в третий / Г.В. Щербединский, Л.А. Кондраченко // Защитные покрытия на металлах .1971. – вып. 4. – С. 27 – 38.

165. Юдин, В. М. Восстановление изношенных деталей наплавкой / В. М. Юдин, А. Н. Шиповалов, Г. А. Храпков // Сварочное производство. – 2017. – № 7. – С. 35-37.

166. Якушев, А. И. Допуски и посадки ЕСДП СЭВ для гладких цилиндрических деталей (расчет и выбор) / А. И. Якушев, Е. Ф. Бежелукова, В. Н. Плуталов – М.: Издательство стандартов, 1978. – 255 с.

167. Якушев, А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А.И. Якушев – М.: Машиностроение 1975. – 471с.

168. Ярошевич, В.К. Электроконтактное упрочнение / В.К. Ярошевич, Я. С Генкин, В.А. Верещагин – Минск: Наука и техника 1982. – 256 с.

169. Calculation of Fit Tolerance with Clearance to Increase Relative Wear Resistance of Joints / O. A. Leonov, N. Zh. Shkaruba, G. N. Temasova, Vergazova YU.G., Golnitsky P.V.// Journal of Friction and Wear. – 2023. – Vol. 44, No. 3. – P. 171–177. – DOI 10.3103/S1068366623030054.

170. Digitalization of Fault Detection in Crankshafts / P. V. Golnitskii, U. Yu. Antonova, G. N. Temasova [et al.] // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2024. – Vol. 53, No. 3. – P. 263–270. – DOI 10.1134/S1052618824700031.

171. Golinitzky, P. V. Improving the Compression of Tin Bronze Bushes in Repair / P. V. Golinitzky, O. A. Leonov, N. Zh. Shkaruba // Russian Engineering Research. – 2022. – Vol. 42, No. 12. – P. 1234–1238.

172. Grigorova, K. Comparison of business process modeling standards / K. Grigorova, K. Mironov // Int. J. Eng. Sci. Manag. Res. – 2014. – 1(3) – P. 1–8.

173. Improvement of the Decision–Making System for Fault Detection of Cylinder Liners / P. V. Golinitzskii, U. Yu. Antonova, E. I. Cherkasova, L. A. Grinchenko // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2024. – Vol. 53, No. 6. – P. 656–661. – DOI 10.1134/S1052618824701280. – EDN CRZEVZ.

174. Kotsev, V. BPMN-EPC-BPMN Converter/ V. Kotsev, I. Stanev, K. Grigorova // НАУЧНИ ТРУДОВЕ НА РУСЕНСКИЯ УНИВЕРСИТЕТ – 2011. – 50(6.1) – P. 54–59.

175. Levina, O. Assessing Information Loss in EPC to BPMN Business Process Model Transformation / O. Levina // IEEE – 2012. – December – P. 51-55.

176. Matrix Geometry in Crimping of Bronze Bushings / P. V. Golinitzskii, O. A. Leonov, N. Z. Shkaruba, U. Y. Antonova // Russian Engineering Research. – 2021. – Vol. 41, No. 10. – P. 892–895.

ПРИЛОЖЕНИЕ

И.о. директора института механики
и энергетики имени В.П. Горячкина
А.Г. Арженовский
« 17 » февраля 2026 г.

**АКТ**

об использовании в учебном процессе результатов
научно-исследовательской работы к.т.н., доцента П.В. Голиницкого
на тему «Повышение долговечности опор скольжения сочетанием
точностных и технологических методов восстановления деталей соединения»

Теоретические и практические разработки, представленные в научно-исследовательской работе Голиницкого П.В., широко используются в учебном процессе, а именно:

1. Голиницкий П.В. в 2023-2024 г.г. в соавторстве разработал учебник «Системный анализ в управлении качеством» и учебные пособия «Цифровые технологии проектирования процессов в АПК», «Проектирование процессов предприятий АПК», в которых изложены новые подходы по применению цифровых технологий на предприятиях, в том числе при дефектации и контроле ответственных деталей двигателей.

2. Основные положения работы Голиницкий П.В. используются при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплинам «Метрология», «Методы и средства измерений», «Информационные технологии в управлении качеством и защита информации», «Цифровые технологии проектирования бизнес процессов в АПК», «Цифровая поддержка процессов испытаний и контроля качества техники» со студентами, обучающимися по направлениям 35.03.06 «Агроинженерия», 35.04.06 «Агроинженерия», 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства»

Заведующий кафедрой метрологии,
стандартизации и управления качеством
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева,
доктор технических наук, профессор

О.А. Леонов

АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

Настоящий акт составлен о внедрении результатов законченной научно-исследовательской работы «Повышение долговечности опор скольжения сочетанием точностных и технологических методов восстановления деталей соединения», выполненной в ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева. Автор работы – к.т.н., доцент Голиницкий П.В.

Результатами законченной научно-исследовательской работы являются разработанные методические рекомендации, включающие в себя:

1. Метод цифрового подбора пар трения в соединениях с зазором, позволяющий получить больший запас материала на износ по сравнению с методом полной взаимозаменяемости.
2. Применение цифровых технологий при выполнении операций контроля, позволяющие снизить временные потери благодаря систематизации и моделированию собираемых данных и осуществления эффективного мониторинга производственных процессов.
3. Применение машиночитаемой цифровой маркировки в виде QR-кода и Data Matrix совместно с процессной моделью предприятия в нотациях IDEF0, BPMN и EPC, позволяющего реализовать автоматизацию сбора данных и ведения мониторинга эффективности процессов.
4. Обоснование замены аналоговых средств измерений на цифровые, что позволяет снизить количество неправильно принятых и неправильно забракованных деталей.

Результаты исследований рекомендованы к внедрению при ремонте деталей и соединений для двигателей, узлов и агрегатов, ремонтируемых в ООО «Оптимум авто».

Директор

Синев С.А.





www.agromh.com

Общество с ограниченной
ответственностью «Завод «АГРОМАШ»
(ООО «Завод «АГРОМАШ»)

ИНН 2456012447
КПП 213001001
ОГРН 1082456000461

428028, г. Чебоксары,
пр. Тракторостроителей,
д.101, кабинет 114А

Тел.: +7 8352 30-43-33
8 800 700 10 89
info@agromh.com

13.02.2026 № АМ-исх/62

на № _____ от _____

АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

Настоящий акт составлен о внедрении результатов законченной научно-исследовательской работы «Повышение долговечности опор скольжения сочетанием точностных и технологических методов восстановления деталей соединения», выполненной в ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева. Автор работы – к.т.н., доцент Голиницкий П.В.

Результатами законченной научно-исследовательской работы являются разработанные методические рекомендации, включающие в себя:

1. Метод цифрового подбора пар трения в соединениях с зазором, позволяющий получить больший запас материала на износ по сравнению с методом полной взаимозаменяемости.
2. Применение цифровых технологий при выполнении операций контроля, позволяющие снизить временные потери благодаря систематизации и моделированию собираемых данных и осуществления эффективного мониторинга производственных процессов.
3. Применение машиночитаемой цифровой маркировки в виде QR-кода и Data Matrix совместно с процессной моделью предприятия в нотациях IDEF0, BPMN и EPC, позволяющего реализовать автоматизацию сбора данных и ведения мониторинга эффективности процессов.
4. Обоснование замены аналоговых средств измерений на цифровые, что позволяет снизить количество неправильно принятых и неправильно забракованных деталей.

Результаты исследований рекомендованы к использованию в производстве и при ремонте соединений с зазором для сборочных единиц и агрегатов сельхозмашин, выпускаемых на ООО «Завод «АГРОМАШ».

Генеральный директор

И.В. Дроздов



Общество с ограниченной ответственностью
«Авангард сервис»
141446 МО, г.о. Химки мкр. Подрезково кв-л
Кириловка влд.31
ОГРН 1245000061459

АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

Настоящий акт составлен о внедрении результатов законченной научно-исследовательской работы «Повышение долговечности опор скольжения сочетанием точностных и технологических методов восстановления деталей соединения», выполненной в ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева. Автор работы – к.т.н., доцент Голиницкий П.В.

Результатами законченной научно-исследовательской работы являются разработанные методические рекомендации, включающие в себя:

1. Модель выбора рациональных способов восстановления двух деталей, входящих в соединение, с учетом параметров точности и стоимости ее обеспечения;
2. Технологию восстановления внутренних поверхностей подшипников скольжения;
3. Подход к комплексному применению цифровых технологий на машиностроительных предприятиях ремонтного профиля;
4. Метод цифрового подбора пар трения вал – втулка;
5. Машиночитаемую цифровую маркировку в виде QR-кода и Data Matrix, для автоматизации сбора данных и проведения мониторинг эффективности процессов ремонта;
6. Систему принятия решений позволяющую при дефектации определить целесообразность ремонта.

Результаты исследований рекомендованы к использованию при ремонте сборочных единиц машин и оборудования для соединений с зазором на предприятии ООО «Авангард сервис».

Генеральный директор



/Смирнов Г.М./



-НАМИ-

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (ФГУП «НАМИ»)
ИНН/КПП 7711000924/774301001, ОКПО 00234703, ОГРН 1027739228406

ул. Автомоторная, д. 2, г. Москва, 125438
info@nami.ru; nami.ru

Тел.: +7 495 456-57-00
Факс: +7 495 456-57-00, доб. 305

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора по науке
ФГУП "НАМИ"
Д.Т.Н.
И.И. Надарейшвили
2026г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ

Настоящий акт составлен о внедрении результатов законченной научно-исследовательской работы Голиницкого Павла Вячеславовича «Повышение долговечности опор скольжения сочетанием точностных и технологических методов восстановления деталей соединения», выполненной в ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 4.3.1.

Результатами законченной научно-исследовательской работы являются разработанные методические рекомендации, включающие в себя:

1. Создание цифровой процессной модели предприятия в нотации IDEF0 для верхнего уровня и в BPMN, EPC для нижнего;
2. Применение машиночитаемой цифровой маркировки в виде QR-кода и Data Matrix позволяющего организовать прослеживание прогнозирование фактического ресурса;
3. Подход к моделированию нестабильных процессов на предприятии;
4. Применение цифровых технологий при выполнении операций контроля, позволяющие снизить временные потери и влияние человеческого фактора;
5. Метод цифрового подбора пар трения в соединениях с зазором, позволяющий получить стабильный и прогнозируемый запас на износ по сравнению с методом полной взаимозаменяемости.

Результаты исследований рекомендованы к использованию в производстве для соединений с зазором в конструируемых и выпускаемых сборочных единицах.

Председатель комиссии:

Начальник управления перспективных технологий, к.т.н.

С.Б. Карякин

Члены комиссии:

Директор научно-образовательного центра, к.т.н.

Р.Х. Курмаев

Начальник управления компоновки
функционального оборудования специальных
транспортных средств, к.т.н.

М.А. Малкин



**МИНИСТЕРСТВО
СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(Минсельхоз России)**

**ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева**

**Департамент растениеводства,
механизации, химизации
и защиты растений
(Депрастениеводство)**

Орликов пер., 1/11, Москва, 107996
Для телеграмм: Москва 84 Минроссельхоз
тел: (495) 607-85-75; факс: (495) 608-72-57,
E-mail: pr.deprasten@mcx.gov.ru
<http://www.mcx.gov.ru>

25.02.2026 19/692

В соответствии с письмом от 24.02.2026 года № 59/26 ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в адрес Депрастениеводство о рассмотрении результатов исследований, приведённых в диссертации Голиницкого П.В. «Повышение долговечности опор скольжения сочетанием точностных и технологических методов восстановления деталей соединений» (далее – письмо) сообщаем.

По информации органов управления АПК регионов на 1 января 2026 года доля техники, с года выпуска которой прошло более 10 лет, по тракторам составила 55,03%, по зерноуборочным комбайнам - 44,72% и по кормоуборочным комбайнам - до 42,18% соответственно.

Учитывая изложенное Депрастениеводство считает актуальным проведение исследований и разработку новых технологических методов повышения надёжности сельскохозяйственной техники и оборудования, а также энергообеспеченности АПК.

По оценке Депрастениеводства результаты исследований, представленные в письме, могут рекомендоваться организациям, осуществляющим ремонт сельскохозяйственной техники и оборудования для расширения номенклатуры восстанавливаемых деталей.

Заместитель директора
Депрастениеводства

Г.А. Гоголев
8 495 607 87 80 (39 95)



П.И. Бурак

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025619436

**«Программа для автоматизации подбора пар соединения
«поршень – гильза»»**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (RU)**

Авторы: **Голиницкий Павел Вячеславович (RU), Антонова Ульяна Юрьевна (RU), Черкасова Эльмира Исламовна (RU), Зимогорский Владислав Кириллович (RU), Темасова Галина Николаевна (RU)**

Заявка № **2025615791**Дата поступления **14 марта 2025 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **16 апреля 2025 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат 0892e7c1e43300164240670bca2026

Выдан: **Зубов Юлий Сергеевич**

Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2022621385

«Контрольные карты для анализа процесса»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Темасова Галина Николаевна (RU), Леонов Олег Альбертович (RU), Шкаруба Нина Жоровна (RU), Вергазова Юлия Геннадьевна (RU), Голиницкий Павел Вячеславович (RU), Антонова Ульяна Юрьевна (RU), Черкасова Эльмира Исламовна (RU), Боголюбова Дарья Александровна (RU)*

Заявка № 2022621193

Дата поступления 27 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 14 июня 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023668303

**«Расчет предельных функциональных зазоров,
обеспечивающих жидкостное трение в соединении»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Леонов Олег Альбертович (RU), Голиницкий Павел Вячеславович (RU), Антонова Ульяна Юрьевна (RU), Черкасова Эльмира Исламовна (RU), Пупкова Дарья Александровна (RU), Петухов Александр Евгеньевич (RU), Чепурин Александр Васильевич (RU), Гринченко Лаврентий Александрович (RU)*

Заявка № 2023667455

Дата поступления 21 августа 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 25 августа 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2022621345

«Методы оценки качества»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Темасова Галина Николаевна (RU), Леонов Олег Альбертович (RU), Шкаруба Нина Жоровна (RU), Вергазова Юлия Геннадьевна (RU), Голиницкий Павел Вячеславович (RU), Антонова Ульяна Юрьевна (RU), Черкасова Эльмира Исламовна (RU), Боголюбова Дарья Александровна (RU), Петухов Александр Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2022621222

Дата поступления 27 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 08 июня 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2022621385

«Контрольные карты для анализа процесса»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Темасова Галина Николаевна (RU), Леонов Олег Альбертович (RU), Шкаруба Нина Жоровна (RU), Вергазова Юлия Геннадьевна (RU), Голиницкий Павел Вячеславович (RU), Антонова Ульяна Юрьевна (RU), Черкасова Эльмира Исламовна (RU), Боголюбова Дарья Александровна (RU)*

Заявка № 2022621193

Дата поступления 27 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 14 июня 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2750899

**Устройство для восстановления изношенных втулок
скольжения из цветных сплавов**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева" (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Тойгамбаев Серик Кокибаевич (RU), Дидманидзе Отари Назирович (RU), Голиницкий Павел Вячеславович (RU), Омаров Темирхан Серикович (RU), Апатенко Алексей Сергеевич (RU), Парлюк Екатерина Петровна (RU), Нукешев Саяхат Оразович (KZ)*

Заявка № **2020138833**

Приоритет изобретения **26 ноября 2020 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **05 июля 2021 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **26 ноября 2040 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Исхов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2021621718

«Статистическое управление процессами»

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева» (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)**

Авторы: **Темасова Галина Николаевна (RU), Леонов Олег Альбертович (RU), Шкаруба Нина Жоровна (RU), Вергазова Юлия Геннадьевна (RU), Голиницкий Павел Вячеславович (RU), Антонова Ульяна Юрьевна (RU), Черкасова Эльмира Исламовна (RU)**

Заявка № 2021621604

Дата поступления 30 июля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 12 августа 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 2021037

о регистрации в качестве ноу-хау
результата интеллектуальной деятельности

Инструменты контроля и управления качеством

Зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау при ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева на основании решения Научно-технического совета РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева от 17.06.2021 г.

Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Авторы: Темасова Галина Николаевна, Леонов Олег Альбертович, Шкаруба Нина Жоровна, Вергазова Юлия Геннадьевна, Голиницкий Павел Вячеславович, Черкасова Эльмира Исламовна, Антонова Ульяна Юрьевна

Проректор по науке



И.С. Константинов

Срок действия свидетельства прекращается в результате:

- прекращения действия мер, предпринимаемых правообладателем по сохранению информации в конфиденциальном режиме
- в момент раскрытия информации третьим лицом независимо от способа получения им этой информации

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2751387

**Устройство для восстановления изношенных втулок
скольжения из цветных сплавов**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева" (ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева) (RU)*

Авторы: *Тойгамбаев Серик Кокибаевич (RU), Дидманидзе Отари Назирович (RU), Голиницкий Павел Вячеславович (RU), Омаров Темирхан Серикович (RU), Апатенко Алексей Сергеевич (RU), Парлюк Екатерина Петровна (RU), Нукешев Саяхат Оразович (KZ)*

Заявка № 2020138831

Приоритет изобретения 26 ноября 2020 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 13 июля 2021 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 26 ноября 2040 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

