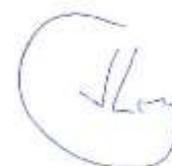


Федеральное государственное казенное
военное образовательное учреждение высшего образования
«Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени
профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Мичуринский государственный аграрный университет»

На правах рукописи



ПЕНЬКОВ НИКИТА АЛЕКСЕЕВИЧ

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГИДРОЦИЛИНДРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ
ТЕХНИКИ РАЗМЕРНЫМ КОМПОЗИЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ
НА ОСНОВЕ ХРОМА

Специальность: 05.20.03 – Технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
академик РАН,
доктор технических наук,
профессор Завражнов А.И.

Мичуринск-наукоград
2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ | 6 |
| 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ | 17 |
| 1.1 Нанесение герметичных покрытий на детали с большим износом | 17 |
| 1.2 Особенности гальванического хромирования систем гидропривода сельскохозяйственной техники | 22 |
| 1.3 Влияние механической обработки детали на качество получаемых покрытий | 28 |
| 1.4 Особенности гальванического хромирования | 29 |
| 1.5 Методы гальваномеханического осаждения, используемые при нанесении хромосодержащих покрытий | 35 |
| 1.6 Выводы по главе. Задачи исследований | 50 |
| 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ | 52 |
| 2.1 Влияние фракции наполнителя на качество получаемых покрытий | 52 |
| 2.2 Определение рациональной степени упрочнения формируемого композиционного покрытия | 64 |
| 2.3 Влияние шероховатости обрабатываемой детали на качество получаемых покрытий | 83 |
| 2.4 Выводы по главе | 86 |
| 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ | 88 |
| 3.1 Программа исследований | 88 |
| 3.2 Методика получения дисперсно-упрочненных композицион- ных гальванических покрытий | 90 |

| | |
|---|------------|
| 3.2.1 Изготовление инструмента для нанесения композиционных дисперсно-упрочненных покрытий | 90 |
| 3.2.2 Обоснование использования электролита для нанесения покрытий | 105 |
| 3.2.3 Осаждение дисперсно-упрочненных композиционных гальванических покрытий на основе хрома | 114 |
| 3.2.4 Приготовление и корректировка электролита для нанесения дисперсно-упрочненных композиционных гальванических покрытий на основе хрома | 115 |
| 3.3 Экспериментальное оборудование, приборы и методики экспериментальных исследований | 117 |
| 3.3.1 Обоснование выбора объектов исследования, обрабатываемых материалов и рабочих сред | 117 |
| 3.3.2 Экспериментальное оборудование и условия проведения исследований | 122 |
| 3.4 Стендовые испытания гидроцилиндров | 146 |
| 3.5 Эксплуатационные испытания гидроцилиндров | 153 |
| 3.6 Математическая обработка экспериментальных данных | 154 |
| 3.7 Выводы по главе | 158 |
| 4 РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ | 159 |
| 4.1 Определение размера наполнителя и состава композиционного покрытия базового и финишного слоя | 159 |
| 4.1.1 Определение качественного состава и размера наполнителя базового и финишного слоя для электролитического композиционного покрытия на основе хрома | 159 |
| 4.1.2 Определение количественного состава композиционного покрытия базового слоя | 164 |
| 4.1.3 Определение количественного состава композиционного | |

| | |
|--|-----|
| покрытия финишного слоя | 171 |
| 4.2 Определение режимов нанесения дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий на основе хрома | 179 |
| 4.2.1 Определение режимов нанесения базового слоя покрытия | 179 |
| 4.2.2 Определение режимов нанесения финишного слоя покрытия | 185 |
| 4.2.3 Определение рациональных режимов нанесения дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий на основе хрома | 189 |
| 4.2.4 Экспериментальная проверка распределения остаточных напряжений в покрытии | 192 |
| 4.3 Влияние режимов осаждения покрытия на производительность процесса | 208 |
| 4.4 Влияние режимов нанесения финишного слоя композиционного дисперсно-упрочненного покрытия на основе хрома на микрогеометрию поверхности | 215 |
| 4.5 Экспериментальная проверка качества получаемых покрытий | 227 |
| 4.5.1 Выравнивающая способность | 227 |
| 4.5.2 Исследование состава покрытий | 230 |
| 4.5.3 Исследование адгезии покрытий | 233 |
| 4.5.4 Наводораживание основы | 240 |
| 4.5.5 Определение коррозионной устойчивости | 246 |
| 4.5.6 Герметичность покрытий | 248 |
| 4.5.7 Износостойкость покрытий | 251 |
| 4.5.8 Определение коэффициента трения | 259 |
| 4.5.9 Металлографические исследования покрытий | 266 |
| 4.6 Экспериментальная проверка эксплуатационных характеристик получаемых покрытий | 271 |
| 4.6.1 Стендовые испытания гидроцилиндров | 271 |

| | |
|---|-----|
| 4.6.2 Эксплуатационные испытания гидроцилиндров | 273 |
| 4.7 Выводы по главе | 278 |
| 5 ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И СХЕМЫ НАНЕСЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ | 281 |
| 5.1 Разработка рекомендаций по особенностям применения метода | 281 |
| 5.2 Разработка рекомендаций по оптимальному сочетанию техно- логических режимов хромирования из условия получения задан- ных характеристик качества наносимого слоя | 304 |
| 5.3 Расчет экономической эффективности | 307 |
| 5.4 Выводы по главе | 310 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 311 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 317 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 336 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | 337 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б | 341 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В | 350 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г | 376 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д | 379 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е | 381 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В современных условиях рыночной экономики повышаются требования к точности и надежности машин и оборудования в агропромышленном комплексе. Для проведения ремонтно-восстановительных работ вышедших из строя узлов и агрегатов требуются значительные материальные и трудовые ресурсы, что особенно актуально при эксплуатации техники импортного производства.

Согласно национальному докладу о ходе и результатах реализации в 2020 году Государственной программы развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия, а также заседания Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации от 31.03.21 г. № 502 значительное внимание уделяется вопросу проведения ремонтных и восстановительных работ техники сельскохозяйственного назначения. В частности, представителями органов государственной власти обсуждались вопросы модернизации существующих образцов техники, восстановления деталей, механизмов и узлов с упрочнением их рабочих поверхностей путем применения новых технологических процессов.

Одной из наиболее распространенных неисправностей, являющейся причиной выхода силовых гидравлических узлов из строя является появление течи по поверхностному слою покрытия. Известные технологические приемы дают возможность повысить герметичность хромовых покрытий. Однако они не позволяют решить проблему герметичности износостойких хромовых покрытий при восстановлении изношенных деталей с толщиной наносимого покрытия свыше 100 мкм на сторону, что характерно для ремонтного производства. Причиной этому служит большая толщина наносимого покрытия, в котором возникают значительные растягивающие напряжения, появляющиеся вследствие послойного наложения микроканалов, служащих концентраторами напряжений и приводящих к появлению сквозных трещин в покрытии.

Комплексное решение описанной проблемы при восстановлении изношенных деталей хромированием возможно лишь при получении в процессе электролиза сжимающих остаточных напряжений, что исключит возможность растрескивания покрытия при эксплуатационных нагрузках.

В литературе высказывается предположение о повышении герметичности гальванических осадков [89, 154, 169]. Однако, авторы [32, 59] указывают, что это возможно при толщине покрытия до 100 мкм, что значительно меньше минимальной толщины, необходимой при восстановительных операциях.

Кроме того, остро стоит вопрос о необходимости повышения надежности и долговечности сельскохозяйственной техники для достижения её конкурентоспособности на международном рынке и внутри страны.

Существующие методы устранения негерметичности можно разделить на электрохимические, механические и термические. Большинство из них связано как с температурным, так и с силовым воздействием на изношенную поверхность, что способно привести к необратимым деформациям деталей.

Холодные методы электрохимического восстановления, как показывает практика [46, 188], способны обеспечить необходимую точность поверхности при изготовлении и ремонте деталей. Для обеспечения необходимых эксплуатационных свойств силовых систем гидропривода сельскохозяйственной техники в современном производстве используют гальваническое хромирование и железнение. Указанные методы лишены таких недостатков, как температурные напряжения и деформации, вызванные механической обработкой, присущие термическим и механическим способам. К гальваническим покрытиям, наносимым на силовые гидравлические узлы, предъявляют ряд требований: высокая степень адгезии, наличие или отсутствие пор в покрытии (в зависимости от условий работы детали), низкая шероховатость поверхности. В ремонтном производстве важное значение имеет минимизация механической обработки восстанавливаемой поверхности до и после её восстановления. Это объясняется трудоемкостью проведения таких операций, а также созданием растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое.

Для обеспечения необходимой износостойкости поверхностного слоя применяют железнение или хромирование. Такие покрытия обладают наибольшей износостойкостью. Применение железных покрытий ограничено их низкой коррозионной устойчивостью, что не позволяет применять их на контактных поверхностях силовой гидравлической техники. Хромирование лишено такого недостатка, однако оно снижает надежность узла из-за пористости покрытия при высоком давлении в системе, обладает низкой адгезией, что особенно ярко проявляется в толстослойных покрытиях, снижающих малоцикловую усталостную прочность деталей. Кроме того, для придания обрабатываемой поверхности необходимой геометрии требуется проводить механическую обработку детали до хромирования. А для обеспечения заданной чертежом шероховатости требуется финишная механическая обработка. При восстановлении изношенных деталей толщина хромового покрытия должна составлять не менее 160–180 мкм, а с учетом финишной механической обработки необходимо наносить на обрабатываемую поверхность не менее 200 мкм наращиваемого металла. Как показывает практика, получение герметичных покрытий такой величины практически невозможно [51, 83, 183]. Более того, существующие технологии нанесения толстослойных покрытий чаще всего позволяют получать покрытия низкого качества. Их использование в ответственных изделиях весьма ограничено. При получении хромовых покрытий в них создаются остаточные напряжения растяжения, что формирует на покрытии разветвленную сетку трещин, которая способствует утечке рабочей жидкости по рабочей поверхности силового гидравлического узла, а также снижает адгезию таких покрытий с основным металлом.

В настоящий момент устранить механическую обработку покрытий и деталей при нанесении герметичного осадка существующими на сегодняшний момент методами крайне затруднительно. Это связано с несколькими причинами. Во-первых, финишная механическая обработка нужна для придания внешнему слою покрытия заданных проектом свойств. Во-вторых, восстанавливаемые детали не должны иметь локальных зон повышенного износа, что достигается механической обработкой до нанесения покрытия. Однако, механическая обработка приводит к

возникновению в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений, повышению вероятности появления прижогов и шлифовочных трещин. Подобные дефекты делают невозможным дальнейшее хромирование и эксплуатацию детали. С использованием гальваномеханических методов возможно получение герметичных покрытий заданного качества лишь при хромировании новых деталей, что обусловлено возможностью нанесения покрытий небольшой толщины (до 100 мкм). Восстановление изношенных узлов и агрегатов требует осаждения хромосодержащих осадков большой толщины. В этом случае вероятность возникновения сквозных трещин в покрытии возрастает, что может привести в результате эксплуатации таких изделий к течи по хрому и выходу такого узла из строя.

В связи с этим назрела потребность в разработке метода холодного размерного нанесения гальванических покрытий на поверхности деталей, позволяющего получать герметичные износостойкие гальванические покрытия без механической обработки. Под размерным хромированием понимают нанесение покрытия, при котором его толщина и равномерность соответствуют допуску на изготовление детали, что позволяет исключить операции механической доводки. Метод должен отвечать нескольким принципиальным условиям: во-первых, обеспечивать необходимую толщину и равномерность герметичного покрытия; во-вторых, осуществлять восстановление локальных участков с разными скоростями в зависимости от степени их износа; в-третьих, получать заданные характеристики поверхностного слоя детали.

Проблема заключается в создании теоретических основ и технологии холодного размерного нанесения гальванических герметичных композиционных покрытий на детали вновь разработанным специальным инструментом без предварительной и последующей механической обработки. При этом особое внимание следует обращать на распределение фазового состава вещества в формируемом покрытии. Формирование гальванически осаждаемого поверхностного слоя происходит неравномерно. В связи с этим не представляется возможным разработать управляющую систему на основе одного выбранного управляющего фактора. Решение возникшей проблемы автором видится в разработке обобщенного критерия

управления процессом переноса многокомпонентного композиционного материала в поверхностный слой гальванически осаждаемого покрытия. Этот критерий должен учитывать технологические параметры и основные значимые факторы процесса.

Создание метода холодного размерного нанесения герметичных гальванических композиционных покрытий с заданными параметрами поверхностного слоя позволит не только вернуть в строй отслужившие свой срок детали, но и повысить срок службы вновь выпускаемых изделий.

Степень разработанности темы.

Исследованиям в области ремонта силовой гидравлической аппаратуры техники сельскохозяйственного назначения посвящены работы: С.Ю. Жачкина, С.А. Величко, В.К. Астанина, И.Н. Кравченко, В.И. Лайнера, В.П. Лялякина, В.Ф. Молчанова, Р.С. Сайфуллина, С.Н. Шарифуллина, И.И. Габитова и др.

Большинство ученых при нанесении гальванических покрытий применяли механическую обработку детали перед началом процесса осаждения металла или покрытия после его осаждения [87, 94, 160]. Однако перспективным представляется нанесение функциональных герметичных дисперсно-упрочненных гальванических покрытий, поскольку они позволяют отказаться от механической обработки детали как до нанесения покрытия, так и после него, а также создавать внутренние сжимающие напряжения в формируемой осадке, повышая износостойкость восстанавливаемых узлов [48, 49]. Влияние структуры формируемых композиционных покрытий на свойства гальванических осадков в настоящее время остаётся малоизученным и представляет большой научно-практический интерес.

В связи с вышеизложенным сформулирована и обоснована следующая **научная гипотеза**: упрочнение и восстановление поверхностей металлических деталей типа тел вращения размерным износостойким герметичным композиционным гальваническим покрытием без предварительного выравнивания припуска и финишной механической обработки.

Цель работы: повышение надежности и качества восстановленных деталей гидроцилиндров сельскохозяйственной техники при одновременном сокращении затрат на технологическую подготовку производства.

В соответствии с вышеуказанной целью поставлены следующие основные **задачи работы:**

1. Изучить закономерности формообразования слоя покрытия в зависимости от степени износа различных участков поверхности и проанализировать существующие процессы размерного наращивания металла на детали методом гальванического осаждения.
2. Выяснить границы возможной концентрации наполнителя в покрытии, позволяющего получать гальванические защитные слои заданного качества. Теоретически обосновать возможность получения композиционных покрытий со сжимающими остаточными напряжениями.
3. Определить закономерности управления точностью обработки, формирования шероховатости поверхности, границы возможного увеличения производительности процесса при нанесении композиционных гальванических покрытий. Выработать технологические рекомендации по применению метода нанесения дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий (ДУГКП) для различных типов конструкционных материалов.
4. Установить зависимость роста толщины покрытия гальванического композиционного осадка от режимных параметров его нанесения и разработать технологические рекомендации по нанесению покрытий требуемого качества с использованием разработанного метода. Исследовать влияние параметров осаждения композиционных покрытий на их физико-механические и эксплуатационные характеристики.
5. Разработать состав композиционного гальванического покрытия базового слоя с включениями карбида титана и оксида алюминия, служащего для устранения износа рабочих поверхностей деталей, и финишного слоя, непосредственно контактирующего с рабочими поверхно-

стями контртела (сопрягаемых деталей) на основе упрочненной хромовой матрицы с включениями дисульфида молибдена, который введен с целью снижения хрупкости покрытия и коэффициента трения.

6. Обосновать рациональные параметры оборудования, средств технологического оснащения для осуществления предлагаемого метода.
7. Разработать технологию применения метода холодного гальванического наращивания композиционных покрытий в производстве силовых гидравлических узлов сельскохозяйственной техники и оценить ее эффективность.

Объект исследований. Процесс получения размерных износостойких дисперсно-упрочненных композиционных покрытий на основе хрома при восстановлении и упрочнении деталей силовой гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники.

Предмет исследований. Закономерности влияния режимных параметров осажденных покрытий, типа и состава композиции на повышение надежности и качества восстановления силовых гидроцилиндров сельскохозяйственной техники.

Научная новизна работы:

1. Предложено новое направление холодного восстановления профиля изношенных поверхностей с локальным выравниванием припуска.
2. Разработаны научные основы процесса нанесения размерного дисперсно-упрочненного композиционного гальванического покрытия на основе хрома со сжимающими остаточными напряжениями.
3. Подтверждено повышение физико-механических и эксплуатационных свойств покрытий, наносимых разработанным методом, за счет внедрения мелкодисперсного наполнителя в гальваническую матрицу с последующим послойным упрочнением наносимого слоя инструментом, работающим по методу обкатки, что исключает образование концентраторов напряжений.

4. Теоретически и экспериментально обоснованы и получены рациональные технологические режимы нанесения дисперсно-упрочненных композиционных гальванических хромовых покрытий заданного качества и требуемой толщины.

5. Определены закономерности взаимосвязей режимов осаждения композиционных гальванических хромовых покрытий с их физико-механическими свойствами.

6. Определены рациональные параметры оборудования, средств технологического оснащения для осуществления предлагаемого метода.

Практическая значимость работы заключается:

1. В разработке нового способа осаждения функциональных герметичных гальванических покрытий, позволяющего решать крупную народно-хозяйственную проблему повышения надёжности силовых гидравлических устройств холодным восстановлением силовых деталей гидравлических узлов с получением эксплуатационных характеристик не ниже, чем у новых изделий, и в выявлении технологических возможностей использования нового метода. Это продляет срок эксплуатации восстановленных деталей, снижает простои и приносит значительную прибыль народному хозяйству.

2. В разработке нового инструмента, необходимого для реализации предлагаемого способа.

3. В разработке методики проектирования технологических процессов, на основе которой создано технологическое оснащение для реализации метода нанесения размерных износостойких герметичных композиционных покрытий на основе хромовой матрицы инструментом из многофазного композиционного материала в промышленности, позволяющее значительно расширить область применения гальванических покрытий в сельхозмашиностроении.

Методология и методика исследования.

Теоретические исследования проведены с использованием методов механико-математического моделирования напряженно-деформированного состояния. Они базируются на основных положениях механики сплошных сред, электродинамики и технологии машиностроения. Построение математической модели и оп-

тимизация уравнений для определения режимов обработки проведены на основе теории вероятности, математической статистики и теории оптимизации.

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием современных приборов и установок. Спекание инструмента проводили в вакуумно-компрессорной печи MEAPFORNI. Полученные инструментальные заготовки шлифовали на плоскошлифовальном станке с ЧПУ АВА-S-FPE-60-30. Испытания наносимых покрытий на герметичность проводили на гидростенде № ИГ032. Контрольное измерение остаточных напряжений в них осуществляли на рентгеноструктурном дифрактометре ДРОН-3. Измерение толщины наносимого покрытия проводили при помощи микроскопа МИМ-8. Шероховатость поверхности определяли на профилографе-профилометре модели 252 и контролировали на профилометре модели 283. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3. Испытания износостойкости проводили на модернизированной машине трения МИ-1М. Состав полученных покрытий проверяли с использованием атомно-эмиссионного спектрометра «Искролайн-300». При эксплуатационных испытаниях использовалась сельскохозяйственная техника, выполняющая различные виды работ. Экспериментальные данные обрабатывались с помощью программы Statistica, графические построения получаемых зависимостей проводились с использованием программы MathCad.

Основные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

- метод холодного восстановления профиля изношенных поверхностей с локальным выравниванием припуска;
- научные основы процесса нанесения размерного дисперсно-упрочненного композиционного гальванического покрытия на основе хрома со сжимающими остаточными напряжениями;
- зависимости физико-механических и эксплуатационных свойств композиционных покрытий от режимов их нанесения, размеров и количественного состава наполнителя;

- технологические показатели процесса, зависящие от режимов нанесения размерных износостойких герметичных дисперсно-упрочненных композиционных гальванических покрытий на основе хрома;
- закономерности взаимосвязей режимов осаждения композиционных гальванических хромовых покрытий с их физико-механическими свойствами;
- параметры оборудования и средства технологического оснащения для осуществления предлагаемого метода.

Апробация. Материалы диссертации заслушаны, обсуждены и одобрены на международных научно-практических конференциях ВУНЦ ВВС «ВВА» (2009-2021 гг.), ВГТУ (2010, 2016, 2017, 2018, 2021 гг.), ВИМ (2016, 2018, 2019 гг.), ВИВТ (2013 г.), ВГАУ (2017, 2018, 2019, 2020 гг.), Тамбовский ГТУ (2017 г.), КНИТУ-КАИ (2018 г.), МАИ (2019 г.), Ставропольский ГАУ (2019 г.).

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 48 научных работах, в том числе 20 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 14 статей в изданиях, включенных в базы Web of Science, Scopus и Agris, 3 патента РФ на изобретения. Общий объем публикаций – 115,6 печ. л., из которых 61,4 печ. л. принадлежит соискателю.

Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту академику РАН, профессору А.И. Завражнову за оказанную всестороннюю помощь при подготовке диссертации, а также академику РАПК, профессору С.Ю. Жачкину, профессору М.А. Артёмову, кандидатам технических наук К.Ч. Колбая, О.А. Сидоркину и инженеру Г.В. Кудрявцеву за оказанную помощь в проведении исследований и подготовке диссертации.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем 388 страниц, в том числе приложений на 53 страницах, 131 рисунков, 24 таблиц. Список литературы содержит 192 наименования, в том числе 23 на иностранных языках.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

1.1 Нанесение герметичных покрытий на детали с износом

Современное сельхозмашиностроение предъявляет высокие требования к силовым агрегатам и гидрорегулирующей аппаратуре. Такого рода детали подвергаются нанесению холодных размерных гальванических покрытий при их изготовлении и ремонте [1, 16, 167]. В этом случае обычно поступают следующим образом: детали покрываются гальваническим покрытием заранее завышенной толщины, а затем посредством механической обработки доводятся до размеров, заданных чертежом с вполне определенной шероховатостью. Такой подход заставляет столкнуться с двумя техническими проблемами:

1. механическая обработка покрытий высокой толщины является сложной технологической задачей со значительной степенью брака [16, 18];

2. дефекты поверхности, подвергаемой нанесению покрытий, делают расстояние от анода до внешней поверхности детали различной в разных точках, что негативно сказывается на качестве получаемых осадков [23, 58].

Это приводит к снижению рассеивающей способности гальванической ванны [4, 43], причем для покрытий на основе хромовой матрицы этот эффект проявляется в наибольшей степени [38, 61].

Под рассеивающей способностью следует понимать количественное соотношение металла выделенного в различных местах покрываемого предмета, имеющего неравномерный профиль в сравнении с деталью без изъянов в геометрии. В случае, когда рассеивающая способность мала, глубоко расположенные зоны поверхности детали, лежащие в разных плоскостях и, вследствие этого, частично экранируемые, могут вовсе не иметь металлического покрытия [13, 54].

На рассеивающую способность влияет: первичное распределение линий тока, катодная поляризация и зависимость выхода по току от плотности

последнего [21, 41].

При нанесении покрытий на изделия сложной конфигурации, а также для деталей, подвергаемых восстановлению, необходимо учитывать высокую степень неравномерности толщины хромовых покрытий. Особая опасность заключается в том, что в глубоко лежащих или экранированных местах изделия не имеют гальванических покрытий, а на выступающих острых частях и краях могут образовываться утолщения и игольчатые кристаллы. Для предупреждения брака эту особенность необходимо учитывать. Помимо этого, необходимо принять во внимание влияние состава ванны и условий её работы на величину рассеивающей способности.

С целью недопущения негативных последствий, вызванных дефектами изношенных поверхностей деталей, подвергаемых восстановлению и вызывающих ухудшение рассеивающей способности гальванических ванн, в ремонтном производстве применяют различные технологические приемы, позволяющие повысить эффективность ванны.

К примеру, при концентрации CrO_3 ниже 250 г/л, в ваннах, содержащих в качестве катализатора смесь плавиковой и кремнефтористой кислот, рассеивающая способность значительно выше, чем у сульфатсодержащих ванн; с повышением концентрации хромовой кислоты рассеивающая способность уменьшается. Если содержание сульфатов составляет порядка 1 % от концентрации хромовой кислоты, то получают оптимальную рассеивающую способность, которая при снижении концентрации сульфатов сначала плавно снижается, а затем быстро падает до нуля. Повышение концентрации посторонних анионов также вызывает снижение рассеивающей способности [101].

Наличие трехвалентного хрома или железа значительно улучшает рассеивающую способность ванны. Вредное влияние этих элементов, однако, значительно ограничивает область их применения [143].

Целесообразно для получения хорошей рассеивающей способности использовать по возможности высокие плотности тока, поддерживая при этом

концентрацию сульфата в 1 % от содержания Cr_2O_3 . Существуют и другие способы влияния на рассеивающую способность, но их использование приводит к повышению напряжения на электродах и, как следствие, повышению температуры в контактах, а значит и снижению надёжности токоподводов. Наиболее действенным оказалось применение вспомогательных или фигурных анодов, при которых достигается наилучшая равномерность распределения напряженности электрического поля между электродами. Кроме того, для защиты катода от чрезмерного отложения гальванических осадков применяют экранирование отдельных участков детали [75]. Но использование таких методов приводит к удорожанию процесса восстановления и повышению его трудоёмкости.

При осаждении гальванических покрытий рассматривают также и кроющую способность гальванической ванны. Она сильно зависит от механической обработки поверхности основного металла; на поверхностях с большим блеском она значительно лучше, чем на матовых или шероховатых. Это связано с тем, что эффективная плотность тока на полированной поверхности значительно выше, чем на матовой [47].

Особо стоит проблема нанесения гальванического покрытия с большим перепадом толщины при осаждении металла на гидравлическую аппаратуру, а также в ремонтном производстве при восстановлении деталей твёрдым герметичным хромированием, так как этот способ холодного восстановления деталей наиболее широко применяется в настоящее время.

Преимущество осаждения хромосодержащих покрытий на рабочие поверхности деталей и восстановления деталей твёрдым хромированием заключается, прежде всего, в сочетании некоторых положительных свойств, которыми обладают гальванические хромовые покрытия. При выборе хромирования в качестве метода восстановления деталей часто за основу берут одно из его преимуществ, однако в каждом конкретном случае возможно сочетание нескольких положительных сторон процесса гальванического осаждения.

Нанесённые гальванические покрытия на основе хрома при восстановлении деталей позволяют использовать более дешёвые материалы, в сравнении с теми, которые использовались бы при отсутствии хромирования. Довольно часто в этих случаях углеродистые стали используют вместо дорогих специальных. Экономия в этом случае проявляется не только в стоимости материала, но и в затратах на его обработку. Однако, значительный слой осажденного гальванического покрытия не позволяет полностью использовать его защитные свойства вследствие наличия разветвленной сетки трещин и пор, присущих хромированию износостойкими покрытиями.

При определении толщины наносимого покрытия руководствуются, в первую очередь, его назначением, а затем типом воспринимаемой нагрузки. При обработке изделий с малыми допусками на износ рабочих поверхностей, не рационально наносить покрытия с толщиной, превышающей допуск.

Для деталей всех видов поверхностная твердость и износостойкость имеют особое значение. Это связано с тем, что при восприятии больших механических нагрузок в них может внедряться гальванический хром из осколков деформированного покрытия.

Коленчатые или кулачковые валы целесообразно подвергать хромированию лишь в опорных местах. Остальные поверхности изолируют. Каждое отдельное опорное место должно быть концентрически охвачено круговым анодом с инструментом.

В таблице 1.1 представлены результаты статистического анализа деталей, подвергаемых хромированию в сельскохозяйственном машиностроении [84].

В случае нанесения хромосодержащих покрытий на большие валы их подвергают нагреву до температуры хромовой ванны, во избежание недопустимого охлаждения электролита.

Нанесение герметичных покрытий на основе хрома часто применяется для увеличения срока службы типографских плит и печатных валов для текстильной промышленности. Это обусловлено как большой твердостью хрома, так и его химической стойкостью, краскоотталкивающим действием. Поскольку в случае с

типографскими плитами важна точность передачи рисунка, то нанесение покрытий большой толщины недопустимо. Толщина наносимого покрытия варьируется обычно в пределах от 2 до 5 мкм. Кроме того внешний слой полученного покрытия должен быть гладким и блестящим, для обеспечения качественной печати. Информация о нанесении герметичных покрытий большей толщины в литературе отсутствует.

Таблица 1.1 – Нанесение хромосодержащих покрытий при производстве и ремонте деталей машин

| Наименование машин | В процессе изготовления | | | | При ремонте | | | |
|----------------------------------|-------------------------|---------|-----------|-------|-------------|---------|-----------|------|
| | 1 | 2 | Кол-во, % | | 1 | 2 | Кол-во, % | |
| | | | 3 | 4 | | | 3 | 4 |
| Грузовые автомобили | 40-50 | 50-100 | 30-40 | 60-70 | 60-80 | 180-850 | 90-95 | 5-10 |
| Тракторы (гусеничные и колесные) | 18-22 | 50-150 | 95-99 | 1-5 | 24-52 | 150-850 | 95-99 | 1-5 |
| Сельскохозяйственные машины | 10-12 | 100-300 | 95-99 | 1-5 | 12-17 | 150-850 | 95-99 | 1-5 |

Примечание: 1 – количество деталей;
 2 – толщина покрытия, мкм;
 3 – износостойких покрытий;
 4 – декоративных покрытий.

Гальванические покрытия на основе хрома обладают низким показателем смачиваемости. Это имеет особенную ценность при хромировании пресс-форм и штампов, а также инструментов, предназначенных для обработки стекла, твердой и мягкой резины, металла, различного искусственного волокна. Такие изделия, воспринимающие значительные давления, необходимо изготавливать из твёрдого металла. В этом случае дорогостоящую специальную сталь можно заменить закаленной углеродистой.

В случае нанесения хромосодержащих покрытий на поверхности скольжения цилиндров двигателей внутреннего сгорания, а также сопрягаемых поверхностей деталей систем гидропривода с одной стороны улучшаются условия скольжения контактирующих пар, а с другой – уменьшается коррозия, особенно ярко выраженная при использовании серосодержащего топлива.

Обычно толщина осаждаемого гальванического покрытия при

восстановлении цилиндров двигателей внутреннего сгорания составляет 50–90 мкм [69, 83, 84, 89], а для систем гидропривода и судовых дизелей большой мощности – достигает значений более 100 мкм [94, 139]. Для таких случаев в основном и восстановительном производстве срок службы обрабатываемых деталей увеличивается в несколько раз [88, 92, 124, 126, 128, 163].

Следует учитывать, что для деталей силовой гидравлической аппаратуры одним из центральных показателей, характеризующих качество восстановленной детали, является герметичность наносимых покрытий. При нанесении покрытий низкого качества есть риск получить распространенный дефект таких агрегатов – течь по хрому, которая проявляется в неконтролируемом падении давления при утечке рабочей жидкости из силовых цилиндров при исправных уплотнителях.

Достоинством износостойкого хромирования является способность восстанавливать заданный чертежом размер деталей. Для новых механизмов это актуально при ошибочном уменьшении размеров во время изготовления, а при восстановлении это позволяет устранять такие дефекты как конусность, эллипсность и локальные износы.

Такой эффект достигается благодаря особым свойствам хрома. В случае повторного восстановления старый хром полностью удаляют электрохимически или механически, а изделие повторно подвергают хромированию. Однако, при многократном хромировании величина адгезии наносимого гальванического покрытия с основным металлом снижается из-за его усталости и наклёпа в ходе длительной эксплуатации [129, 132].

1.2 Особенности гальванического хромирования систем гидропривода сельскохозяйственной техники

Как показывает практика, при изготовлении деталей систем гидропривода различной техники широкое распространение получил метод нанесения гальванического хрома гальваноконтактным методом (ГКО). Он позволяет получать заданные чертежом размеры и геометрию сопрягаемых поверхностей

путем наращивания композиционного покрытия на основе хромовой матрицы [44, 137, 138, 142].

Известно, что не каждое гальваническое покрытие может использоваться в основном и восстановительном производстве для обеспечения работоспособности систем гидропривода. Это связано с высокими давлениями, создаваемыми гидравлическими жидкостями в рабочих органах и блоках управления различной гидрозарпорной арматуры. Типичной неисправностью в данном случае является утечка рабочей жидкости по слою гальванического покрытия, которая приводит к потере работоспособности узла в целом.

Анализ состояния деталей, с нанесёнными на них хромосодержащими покрытиями, и литературные данные [77, 126, 163] позволяют сделать вывод: основными причинами, вызывающими необходимость нанесения гальванических осадков, являются:

- повышенный износ контактируемых поверхностей, работающих в условиях высокого давления;
- износ посадочных мест сопрягаемых поверхностей;
- нарушение целостности износостойких покрытий и коррозия основного металла.

Решение задачи восстановления деталей, утративших герметичность, с использованием хромирования возможно при разработке технологии, позволяющей получать размерные композиционные покрытия на основе хрома без пор и трещин. Это позволит осаждать металл со сжимающими напряжениями, что исключит его растрескивание в процессе эксплуатации.

Толщина покрытия существенно влияет на получение беспористых осадков. Уже при толщинах гальванических осадков свыше 120 мкм получить хромосодержащее покрытие без пор невозможно [81]. Причина этого: высокие растягивающие напряжения, возникающие в осадке, и растягивающие напряжения в подложке из основного металла, возникающие на этапе механической обработки детали под восстановительные операции по гальваническому наращиванию металла.

В отдельных случаях удается получить беспористые хромовые покрытия толщиной до 8 мкм с использованием реверсивного тока при гальваническом восстановлении [75, 93]. Но проблему нанесения герметичных покрытий в основном и восстановительном производстве деталей гидропривода сельскохозяйственной техники нельзя считать решенной. Для нормального функционирования изношенных узлов и агрегатов необходимо нанесение на рабочие поверхности защитных покрытий толщиной не менее 170 мкм [147, 153]. Получение беспористых осадков такой толщины крайне затруднительно. Это связано с необходимостью механической обработки поверхности с целью устранения геометрического дефекта (ремонт) или пригонки контактирующих пар по месту в основном производстве [87].

При нанесении покрытия по существующим технологиям, часто возникает утечка рабочих сред по слою хромового покрытия, деталь выходит из строя и поступает на дальнейшую доработку [15, 69, 75]. Это является причиной не менее 45% отбракованных деталей среди готовых изделий, а при ремонте процент брака достигает величины 98 % [131]. Такие детали возвращаются на дополнительную обработку и перехромирование. Это вызывает усложнение производства, снижение качества деталей и узлов в целом, повышение трудоемкости и сдерживание выпуска в нужные сроки. Следует иметь в виду: на отдельные виды сталей, применяемых для изготовления деталей гидропривода и склонных к коррозионному растрескиванию и чувствительных к наводораживанию, вводят ограничение на количество восстановлений [129]. Введение таких ограничений уменьшает срок службы деталей в несколько раз [133].

Традиционные способы получения гальванических покрытий имеют и другие недостатки: низкая производительность процесса, отрицательное влияние на усталостные характеристики деталей [128].

Эксплуатационный опыт использования деталей с покрытиями толщиной свыше 120 мкм показал, что у таких узлов и агрегатов существенно ниже показатель сопротивления усталости. Это обусловлено низкой пластичностью и прочностью хрома, а также наводораживанием восстанавливаемых поверхностей

[133]. Исследования, проведенные [135, 141] показывают, что после такого нанесения покрытий снижается предел прочности стали из-за негативного влияния внутренних напряжений в покрытии. В отдельных случаях, сопротивление усталости может снижаться на 30 % и больше [44, 75].

В литературе представлен большой спектр исследований влияния толщины хромосодержащего покрытия на усталостные характеристики деталей. Авторы [18] говорят, что усталость определяется толщиной наносимого покрытия, схемой нагружения и свойствами самого металла. Кроме того, указывается что предел выносливости при толщине покрытия 140 мкм снижается в два раза до величины 280–350 МПа. В работе [143] определено влияние толщины покрытия и температуры окружающей среды на выносливость различных сталей с заданным уровнем прочности. Приводятся данные, указывающие, что основным фактором, определяющим качество восстанавливаемых деталей, при многоцикловых испытаниях служит температура электролита.

При восстановлении деталей хромированием малоцикловая усталость снижается в 4 и более раз по сравнению со стандартными образцами. Это вызвано наличием разветвленной сетки трещин, выступающих в роли концентраторов напряжения при действии внешних нагрузок [145].

В [135] указывается, что с увеличением толщины защитного покрытия внутренние напряжения в нем снижаются. При толщине покрытия 30 мкм их величина равна 75,5 МПа. Дальнейшее возрастание толщины сохраняет тенденцию к уменьшению напряжений [91, 123]. Авторы [85] уменьшение внутренних напряжений объясняют его растрескиванием. Хотя в [2] отмечают возрастание внутренних напряжений по мере увеличения толщины нанесенного хромосодержащего покрытия.

Существует ограниченное число литературных источников, описывающих качественные ремонтные хромовые покрытия. Целый ряд авторов получил в ходе исследований размерные хромовые покрытия толщиной до 100 мкм [5, 8, 10, 16, 76, 122]. Отдельные работы указывают на возможность нанесения подобных покрытий толщиной до 200 мкм [148, 166]. Автор [101] получил и исследовал

размерные износостойкие хромовые покрытия толщиной до 650 мкм. Однако, вопрос герметичности получаемых при этом осадков не был исследован.

Авторы [166, 170, 175] исследовали распределение напряжений в покрытиях толщиной до 200 мкм. В исследованиях [83] также указывается, что максимальная толщина исследуемых покрытий – 200 мкм. В [177] авторы получили покрытия толщиной 0,25мм, а в [180] – 1,5мм. Однако такие покрытия не были размерными и получены на новых образцах в лабораторной установке без контроля шероховатости внешнего слоя и остаточных напряжений во всем покрытии. Такие покрытия обладали низкой адгезией с основным металлом. Авторы [133, 138] объясняют это отрицательным влиянием механической обработки поверхностных слоёв деталей, подвергаемых гальваническому осаждению хромосодержащих покрытий.

При осаждении гальванических покрытий на основе хрома в последних возникают растягивающие напряжения, достигающие значений 80 кгс/мм² [135]. Такие напряжения реализуются в виде разветвленной сетки трещин, что связано с низкой пластичностью хрома. Из-за этого детали, восстановленные гальваническим хромосодержащим покрытием, часто непригодны к эксплуатации. Это проявляется в утечке рабочей жидкости по хромовому покрытию вследствие его пористости. Геометрия детали при этом может полностью соответствовать требованиям по эксплуатации [128, 147].

В [3, 24, 73, 147] указывается, что механическая обработка и толщина наносимого покрытия являются основными фактором, влияющими на пористость покрытия.

В связи с тем, что известными способами гальванического нанесения покрытий не удастся устранить течь рабочих сред в системах гидропривода, вопрос размерного нанесения герметичных толстослойных покрытий на детали и узлы гидравлических систем остается открытым.

Принципиально возможно несколько причин утечки рабочих жидкостей в системах гидропривода сельскохозяйственной техники. Во-первых, это может произойти из-за износа уплотнений. В этом случае течь легко устранить путем

замены соответствующих изделий. Однако, в некоторых устройствах, работающих при высоких давлениях, уплотнения не применяются. В этом случае течь рабочих сред наблюдается через хромовое покрытие, что является второй причиной потери герметичности силовой гидравлической аппаратуры. Причиной этого дефекта является наличие в поверхностном слое хромового покрытия сетки трещин с широкими каналами, по которым и происходит утечка рабочей среды [146, 166].

Как следует из литературы, течь по хромовому покрытию является результатом сразу нескольких факторов, а именно неправильных условий электролиза (11%), механической обработки детали перед нанесением покрытий или восстановлением (67%), механической обработки покрытия после гальванического осаждения (19%) [147].

Величина рабочего давления в система гидропривода достигает значений 20–30 МН/м² [146]. В то же время известно, что утечка газов по слою хрома наблюдается при давлении в системе 5–15 МН/м² [147], а утечка жидкостей — при давлении менее 1 МН/м² [132].

Причиной пор в осадках, как установлено, являются остаточные напряжения в хромовых покрытиях и основном металле [20]. Это вызвано механической обработкой поверхности для гальванического нанесения покрытий и уже осажденного покрытия [29, 66, 87]. В [87] выявлена зависимость напряжения от пористости: чем выше растягивающие напряжения, тем больше пористость покрытия.

Взгляды на природу образования остаточных напряжений в современной науке в хромовых покрытиях различны. В [95] рассмотрена дислокационно-сорбционная модель формирования механических напряжений; в [144, 161] предполагают, что кроме структурных превращений на распределение напряжений оказывает влияние выделяемый в процессе электролиза водород.

Авторы [36, 84, 140] утверждают: причиной возникновения остаточных напряжений растяжения для покрытий толщиной свыше 100 мкм является превращение гексагональной модификации хрома в кубическую. Такая форма

крайне нестабильна. Общее сокращение объема осадка составляет 15-16%. Это вызывает возникновение растягивающих остаточных напряжений в гальваническом осадке и, как следствие, растрескивание покрытия при эксплуатационных нагрузках.

Все вышеизложенное дает основание считать, что при восстановлении деталей хромированием, с нанесением покрытия толщиной свыше 100 мкм, основной причиной повышенной пористости служат растягивающие напряжения в покрытии, механическая обработка деталей перед гальваническим нанесением покрытия [147] и механическая обработка покрытия [87], что вызывает дополнительное растрескивание покрытия.

1.3 Влияние механической обработки детали на качество получаемых покрытий

Механическая обработка покрытия является обязательной почти для любого технологического процесса обеспечения требуемых эксплуатационных свойств поверхностного слоя деталей нанесением гальванического хрома. Её целью является придание поверхности требуемой микрогеометрии, необходимой для обеспечения возможности качественного гальванического наращивания металла, правильной геометрической формы и доведение ее до нужных размеров с учетом припуска на покрытие [107]. В зависимости от назначения покрытия и от операций, предшествующих восстановлению методом гальванического нанесения покрытия, предъявляют различные требования к поверхности покрываемых изделий. Механическая подготовка поверхности под нанесение беспористого толстослойного хромового покрытия является наиболее трудоемкой и дорогостоящей операцией.

Сложность такой операции связана с возникновением в ходе механической обработки высоких растягивающих напряжений в подложке. В этой связи необходимо обеспечить высокую адгезию покрытия с основным металлом. Она должна превышать величину адгезии, требуемой при остальных гальванических

покрытиях [86]. В процессе механической обработки возникает изменение структуры поверхностного слоя. Для повышения адгезии его обычно удаляют путем анодной обработки, однако это вызывает частичное разрушение самой детали, что крайне негативно сказывается на процессе гальванического осаждения [87]. При восстановлении некоторых отдельных видов легированных сталей гальваническим осаждением металлов ряд авторов отмечает невозможность получения качественных покрытий после применения предварительной механической обработки поверхности основного металла [72, 95, 139]. По мнению [28, 33, 166] это связано с изменением структуры поверхностного слоя металла, повышением его хрупкости.

Кроме того, механическая подготовка поверхности — дорогостоящая операция, превышающая по стоимости непосредственное восстановление гальваническим покрытием. Такое воздействие обеспечивает качественный внешний вид детали, но приводит к появлению растягивающих остаточных напряжений в осаждаемом слое хрома, вызывающих его растрескивание [87].

Несмотря на все негативные стороны механической обработки деталей, ее нельзя полностью исключить из процесса восстановления деталей нанесением герметичного гальванического покрытия, поскольку гальваническое нанесение покрытий не может в процессе электролиза изменять форму поверхности детали в заданном направлении.

1.4 Особенности гальванического хромирования

Гальваническое хромирование отличается от обычных гальванических процессов не только составом ванны, но и свойством нанесенного металлического покрытия. При очень тонких слоях хрома, толщиной до 0,5 мкм, удаётся получать покрытия с низкой степенью пористости. При большей толщине не происходит прогрессирующего роста пор, но налицо беспорядочное растрескивание хромового покрытия по всем направлениям. В этом случае металл получается покрытым тонкой сеткой трещин, достигающих до основного металла [169].

Наличие сетки трещин зависит во многом от концентрации и вида находящихся в хромовой ванне посторонних анионов. Фторсодержащие ванны дают, как показывает практика, тонкую сетку трещин; сульфатсодержащие – крупную сетку. При смешанных электролитах, содержащих сульфат и фторид, получается сетка трещин, занимающая промежуточное положение [73, 93].

Происхождение трещин отдельные исследователи объясняют действием нестабильного гидрида хрома, возникающего на начальной стадии электролиза. Он имеет гексагональную структуру и при его разложении образуются металлический хром с кубической объемно-центрированной решеткой, а также водород, частично удаляющийся в виде газа. Следствием этого является усадка объема покрытия примерно на 15%. Ввиду большой прочности сцепления хрома с основным металлом усадка происходит параллельно основанию и вызывает растрескивание хромового покрытия [92, 95].

В обычных ваннах удастся получать хромовые покрытия без трещин. Такие покрытия обладают повышенными антикоррозионными свойствами в сравнении с осадками, покрытыми сеткой трещин. Однако, их толщина не превышает величины 3–15 мкм [3, 11, 94]. При получении беспористых покрытий толщиной превышающей 150 мкм, проблема возникает одновременно в двух направлениях. Во-первых, проблематично получить беспористые покрытия гальваническими способами. Во-вторых, осажденный хром почти невозможно сохранить без трещин. С течением времени порядка 40–45 суток [8], даже при отсутствии эксплуатации детали, происходит трансформация гексагональной структуры в кубическую и покрытие растрескивается [16, 166, 167].

Гальванически осажденный хром, как показывают рентгенографические исследования, имеет кубическую объемно-центрированную решетку, обладающую повышенной хрупкостью. При низких температурах, такие покрытия имеют гексагональную решетку.

Размер зерен гальванического хрома составляет порядка $1,4 \times 10^{-6}$ см [70]. Для сравнения, наименьшая величина зерен металлов, подвергнутых холодной обработке, равна примерно 10^{-4} см. Образование зерен столь мелкой фракции

приводит к распаду первоначально образованного гидрида. При более высокой температуре электроосаждения гидриды встречаются меньше или являются недолговечными. Как результат – в хромосодержащих покрытиях уменьшаются внутренние напряжения, что положительно сказывается на устойчивости покрытия к трещинообразованию. Такие покрытия обладают большей пластичностью в сравнении с осадками, полученными при более низких температурах [59].

Наиболее тонкой зернистой структурой с ориентацией кристаллов параллельно поверхности обладают блестящие хромовые покрытия. Они имеют сильно развитую сетку трещин и включения. Блестящие покрытия отличаются меньшей коррозионной стойкостью в сравнении с матовыми покрытиями, обладающими более грубыми слабо ориентированными зернами, содержащими меньшее количество трещин и включений. Сквозные трещины в покрытии в таких случаях являются следствием дефектов поверхности основного металла. [16, 116].

Восстановление деталей гальваническим способом, несмотря на трудоемкость и дороговизну процесса [66, 70], широко применяется в сельхозмашиностроении благодаря возможности получения высокой твердости и износостойкости поверхностного слоя восстанавливаемой детали. В отдельных случаях твердость гальванических хромосодержащих покрытий достигает твердости корунда и превышает в 2-3 раза этот показатель для твердых металлов (железо, кобальт, никель). Такие покрытия имеют более высокую твердость, в сравнении с азотированной или поверхностно цементованной сталью. Твердость хрома по Виккерсу для хромосодержащих гальванических покрытий, определяемая путем вдавливания алмазной пирамиды, имеет значения от 1000 до 1200 кг/мм² [163].

Получаемые покрытия обладают высокими твердостью, жаростойкостью, химической стойкостью и низким коэффициентом трения, что обеспечивает деталям высокую износостойкость даже в тяжелых условиях эксплуатации. Наибольшая износостойкость хромового покрытия достигается при твердости 7000–9200 МПа [163].

Недостатками хромовых гальванических покрытий являются повышенная хрупкость, напряженность и пористость, снижающие до 45% их защитные свойства и предел выносливости восстановленных деталей [110].

Твердость хромовых покрытий варьируется в широких диапазонах. Это объясняется сильной зависимостью качества получаемых покрытий от условий их осаждения, что следует принимать во внимание при снятии показаний твердости. Кроме того, провести точное определение слишком тонких или твердых покрытий, пронизанных плотной сеткой трещин, довольно затруднительно. В этой связи идентичные покрытия, исследованные различными методами, могут иметь неодинаковые значения твердости [68, 113].

Большое количество ошибок допускается при определении твердости поверхности методом вдавливания из-за непосредственного заключения по результатам эксперимента об износостойкости поверхности. На износостойкость металла влияет не только его твердость, но также вязкость и пластичность [65, 89, 113]. Кроме того, нужно учитывать соответствие условий работы деталей, вызывающих их истирание, и физических принципов, на которых основаны методы определения твердости покрытий.

Ввиду широкого использования гальванических покрытий в промышленности вопрос измерения твердости и износостойкости представляет особый интерес. Необходимо иметь ввиду, что ни показания измерения твердости, ни показания измерения износостойкости не могут быть выражены однозначно. Эти свойства покрытий должны определяться вполне конкретными методами, поскольку при различных методах измерения получаются различные значения. Такие показания можно сравнивать между собой лишь условно.

Для измерения твердости существуют строго нормированные методы, проводимые с одинаковой точностью. При определении износостойкости общепринятых методов не существует. Её определяют, замеряя уменьшение толщины, веса, объема, расхода шлифующих материалов, время шлифования до съема определенной толщины и т. д. Для этих целей используют следующие методы: шлифование кругом, смачивание поверхности истирающим материалом

и т. д.

Известно, что пленки твердого хрома оказывают наибольшее сопротивление истиранию в связи с благоприятным соотношением значений твердости и вязкости таких покрытий [84]. В этом случае говорить о зависимости между твердостью и износостойкостью можно лишь с определенными допущениями оговаривая конкретные случаи.

Исследованию физико-механических и эксплуатационных характеристик хромового покрытия посвящено много работ [3, 23, 31, 40, 50, 63, 74, 90, 92, 173]. В них указано, что износостойкость пористых хромовых покрытий зависит от концентрации пор и каналов в покрытии, что определяется режимами электролиза.

Стойкость хромосодержащих покрытий к атмосферному влиянию определяется наличием невидимой, благодаря своей прозрачности, тончайшей пленки окиси хрома, защищающей металл от дальнейшего окисления.

При невысоких температурах хромосодержащие покрытия не подвержены окислению. А при нагревании до температуры 300 °С и более наблюдается возрастающее потемнение таких покрытий, возникающее в результате постепенного уплотнения окисной пленки. Значительное окисление наблюдается лишь при температуре около 500 °С [88].

Окисная пленка защищает хромосодержащие покрытия от различных химических воздействий, благодаря чему они показывают хорошую устойчивость к различным видам химической коррозии. Однако, наличие окисной пленки на пористом хромовом покрытии вызывает коррозию основного металла из-за образования сквозных каналов, доходящих до основного металла. На практике этому факту незаслуженно мало уделяется внимания [78, 94, 139].

Несмотря на высокую химическую стойкость хромосодержащих покрытий, стальные изделия покрываются ими от коррозии только при отсутствии пористости покрытия. Но, как известно, получение беспористых хромовых покрытий является нетривиальной задачей [137, 145, 147, 149].

Для защиты против газовой коррозии хромовые покрытия должны иметь

толщину не менее 30 мкм. Для защиты от более сильных химических реагентов требуется, чтобы толщина покрытия составляла 50 мкм и более. Однако, условия, предъявляемые к покрытиям обоих типов различны и в этом случае нельзя установить какие-либо общие для них свойства ввиду того, что при увеличении толщины покрытия оно подвергается растрескиванию [87].

Поскольку режим осаждения хромовых покрытий оказывает решающее влияние на их структуру, то такое же влияние этот режим оказывает и на коррозионную стойкость.

При гальваническом осаждении покрытий от качества основного металла непосредственно зависит качество получаемых осадков и их коррозионные свойства. Особо благоприятное действие в этом случае оказывает анодное полирование основного металла [87, 91].

При хромировании деталей на поверхность металла наносится покрытие с уже существующими микроканалами и трещинами [87, 111], поэтому существует угроза возникновения сквозных трещин по слою хрома и потеря коррозионной стойкости покрытия при его эксплуатации [58, 132]. На современном этапе решение этой проблемы видится в двух направлениях. Либо устраняются уже имеющиеся поры и трещины в осажденном осадке, что значительно увеличивает себестоимость деталей; либо подбираются такие режимы и способы осаждения, при которых возможно получение герметичных осадков [59, 73].

Вышеперечисленные свойства хромосодержащих покрытий определяют их спектр применения для повышения ресурса следующих технологических групп:

- увеличение отражающей способности при восстановлении различного вида зеркал и рефлекторов автотракторной и сельскохозяйственной техники;
- увеличение износостойкости и срока службы топливной аппаратуры дизельных двигателей, а также систем гидropневмоприводов рабочих органов тракторов и сельскохозяйственной техники;
- при изготовлении и восстановлении трущихся поверхностей деталей машин (цилиндры двигателей, поршневые кольца, штоки гидроцилиндров, плунжера топливных насосов);

- при восстановлении деталей различного назначения сельскохозяйственной техники.

Из проведенного анализа существующей литературы видно, что получение качественных покрытий для восстановления систем гидропривода рабочих органов сельскохозяйственной техники существующими способами затруднительно. Неплохой износостойкостью обладают композиционные покрытия, получаемые гальваническим осаждением их из электролитов-суспензий [89]. Однако, в этом случае получаемые осадки имеют неравномерное распределение наполнителя в хромовой матрице. Сам наполнитель при этом склонен к агрегатированию и появлению конгломератов. При длительном процессе осаждения происходит падение концентрации наполнителя в электролите, что приводит к потере контроля над физико-механическими и, как следствие, эксплуатационными характеристиками композиционного покрытия [89, 149]. Кроме того, в литературе указывается, что данные покрытия не являются герметичными [36, 50].

Для достижения цели исследования предпочтительным является выбор метода нанесения защитных покрытий с использованием механической активации обрабатываемой поверхности во время осаждения покрытия.

1.5 Методы гальваномеханического осаждения, используемые при нанесении хромосодержащих покрытий

Сущность процесса холодного гальванического наращивания хромосодержащих покрытий на детали с одновременным механическим воздействием на деталь заключается в наложении процессов гальванического осаждения покрытия и механической обработки его в процессе осаждения. Такие способы характеризуются высокой производительностью и возможностью получения покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками. В современном машиностроении существует множество видов гальванического осаждения покрытий на детали машин (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Методы гальванического осаждения покрытий

В главе 1.2 был подробно рассмотрен способ стандартного гальванического восстановления. Ниже приведен сравнительный анализ методов восстановления, использующих одновременное гальваническое нанесение покрытия с механической обработкой получаемых осадков.

Выделяют 4 основные группы покрытий, полученных гальваномеханическим способом:

1. электрохимическое натирание покрытий;
2. гальваномеханическое осаждение с использованием абразивного инструмента;
3. гальваномеханическое осаждение покрытий с инструментом из керамики;
4. гальваноконтактное осаждение композиционных покрытий.

Электрохимическое натирание покрытий.

Для получения покрытий заданного качества при нанесении гальванических покрытий их подвергают одновременной механической обработке мягким инструментом: кистью, тампоном. Процесс восстановления протекает в зоне контакта инструмента с деталью (рисунок 1.2). Наличие гальванической ванны не обязательно.

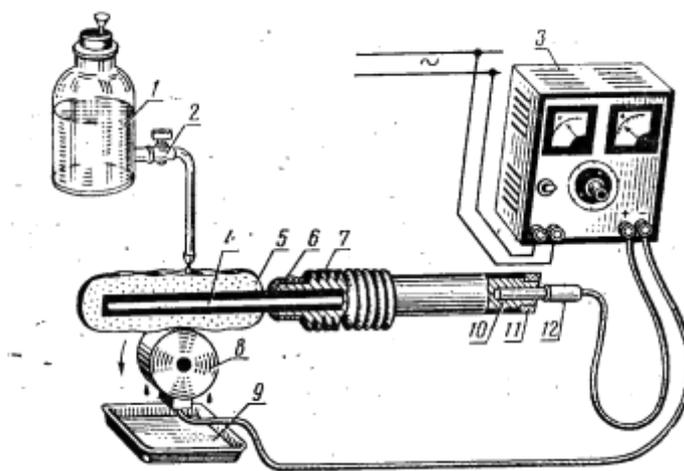


Рисунок 1.2 – Схема электрохимического натирания покрытия

Электроосаждение металла происходит при прохождении постоянного тока через маленькую ванночку, образующуюся в зоне контакта восстанавливаемой детали 8 с анодом 4, обернутым адсорбирующим материалом, при этом деталь и анод перемещаются относительно друг друга. На рисунке 1.2 цифрами обозначены: 1 – сосуд с электролитом, 2 – кран, 3 – выпрямитель, 4 – анод, 5 – тампон, 6 – пластмассовый колпачок, 7 – корпус с ребрами для охлаждения, 8 – деталь, 9 – ванна для электролита, 10 – гнездо для клеммы, 11 – крепежная гайка, 12 – клемма кабеля. В [5, 61, 167] приводится ряд устройств и приспособлений для осуществления предлагаемого технологического процесса.

Получаемые покрытия имеют значительные внутренние напряжения, в сравнении с покрытиями, полученными по стандартной технологии бесконтактного гальванического осаждения. Кроме того, они обладают высокой концентрацией пор [8]. Исследование качества полученных покрытий показали, что они обладают низкой микротвердостью, составляющей 5,0–7,9 ГПа.

Шероховатость составляет величину не менее 0,63 мкм. Скорость осаждения покрытий составляла 1,5–2,0 мкм/мин при плотности тока $i = 10\text{--}15 \text{ кА/м}^2$, а износостойкость покрытий оказалась в 1,5 раза выше, чем у закаленной стали [20, 73]. Величина адгезии находится на одном уровне с хромовыми покрытиями, полученными по стандартной технологии.

Гальваномеханическая обработка с абразивным инструментом (ГМО).

Другим видом контактного нанесения хромовых покрытий на деталь является гальваномеханическое наращивание металла с использованием абразивного инструмента, активирующего поверхность катода. Этот процесс также называют гальваническим хонингованием (Hone forming) [174, 175].

Укрупненно рассматриваемую технологию можно представить в виде трех основных этапов [176, 181]:

1. Механическая обработка поверхности детали, подготовленной для дальнейшего осаждения покрытия.
2. Осаждение гальванического покрытия при одновременном воздействии на него хонинговальных брусков с пониженным давлением.
3. Хонингование поверхности нанесенного покрытия с повышенным давлением инструмента для обеспечения требуемой шероховатости нанесенного покрытия.

Схема осуществления метода представлена на рисунке 1.3.

В [181] используется метод, описанный выше, с добавлением на первом и последнем этапах электрохимического хонингования. В [176, 177, 178, 179] предлагается модернизация рассматриваемой технологии. Анод в этом случае является трубчатым элементом, а коаксиально с ним осуществляется движение хонинговальных брусков.

В настоящее время в промышленности используется целый ряд оборудования и средств технологического оснащения для проведения процесса осаждения покрытий на детали методом гальваномеханического осаждения с использованием абразивных инструментов [15, 122, 167]. Однако, при нанесении

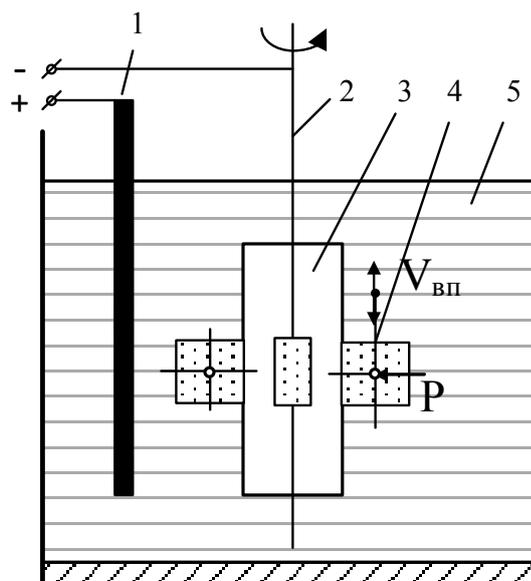


Рисунок 1.3 – Схема осуществления метода ГМО

1 – анод; 2 – катод; 3 – деталь; 4 – абразивный инструмент;

5 – ванна с электролитом

покрытий на различные типы поверхностей нет единого алгоритма по подготовке оборудования для нанесения покрытий заданного качества. В частности, гальваническое покрытие наружных поверхностей деталей типа тел вращения рекомендуется проводить в стационарных электролизных ваннах хромирования. В этих случаях используют навесное оборудование [94]. Кроме того, есть возможность активации поверхности катода свободно движущимися частицами в ванне или нанесенными на гибкие круги и ленты [149]. В [74, 89] есть информация о возможности использования различных электролитов для восстановления стальных деталей.

Рассматриваемый способ гальваномеханического осаждения широко представлен в различной литературе. Авторы [8, 9, 17, 74, 78] указывают, что скорость осаждения покрытий более чем в 20 раз превосходит аналогичный показатель для стандартного метода и достигает величины от 18 мкм/мин до 41 мкм/мин. Это объясняется возможностью увеличения производительности процесса за счёт механической активации поверхности катода в процессе осаждения покрытия. В [9, 29, 39, 94] проводились исследования выхода по току

при различных режимах осаждения в стандартном и универсальном электролитах хромирования, в результате которых удалось получить выход по току увеличенным до 136–165% от стандартного. В [88] показано: диапазон плотностей тока, в которых возможно получение качественных хромовых покрытий, лежит в интервале от 10 до 70 кА/м². В тоже время авторы [142] утверждают, что изменение плотности тока в диапазоне от 0,89 до 88,3 кА/м² ведет к увеличению выхода по току с 15,6 до 65%, но качественные хромовые покрытия получаются при плотностях тока не превышающих 50 кА/м². Это явление объясняется бурно выделяющимся водородом, не успевающим удаляться из зоны обработки. В [148] в ходе экспериментальных исследований для саморегулирующихся электролитов установлено, что при увеличением плотности тока наблюдается уменьшение выхода по току процесса осаждения гальванических покрытий. В [148] исследовались режимные параметры оборудования на предмет влияния на интенсификацию процесса осаждения покрытия. В результате было установлено, что увеличение числа оборотов шпинделя снижает, а увеличение числа двойных ходов инструмента повышает скорость осаждения покрытия. При этом было установлено, что уменьшение межэлектродного зазора приводит к увеличению производительности процесса.

Следует отметить, что наряду с согласованными данными литературные источники содержат ряд противоречий. В [124] показано, что для универсального электролита увеличение его температуры с 303 до 343 К приводит к снижению скорости осаждения покрытия, а в [138] утверждается, что увеличение температуры рабочей среды с 323 до 343 К не оказывает влияния на скорость осаждения хрома. Анализируя данные, приведенные в [144], можно прийти к выводу: все покрытия, получаемые гальваномеханическим осаждением, отличаются от стандартных сжимающими остаточными напряжениями. Автор объясняет причину получения сжимающих остаточных напряжений нарушением структуры кристаллов осаждаемого покрытия в процессе обработки. Однако, в литературе [89] указывается, что сжимающие остаточные напряжения удавалось получать при толщинах наносимого покрытия не превышающих 100 мкм. Теория

о нарушении структуры кристаллов осаждаемого покрытия разработана в [71]. Там показано: что механическая обработка осаждаемого гальванического покрытия в процессе его нанесения вызывает пластическую деформацию наносимых слоев осадка. Процесс гальваномеханической обработки нуждается в строгом контроле за степенью прижима инструмента, потому что избыточное давление на осаждаемое покрытие может привести к его разрушению [87].

Авторами [122, 123, 127] проводились исследования по определению качества гальваномеханических хромовых покрытий. В процессе осаждения использовался абразивный инструмент с давлением на растущие слои покрытия 0,02–1,2 МПа. В [81, 84, 144] исследовались физико-механические свойства различных покрытий, полученных гальваномеханическим способом. В результате этого было показано, что получаемые покрытия позволяют повысить микротвердость никелевого покрытия в 1,9–2,7 раза, медного – в 2,2 раза, хромового – в 1,4–1,6 раза в сравнении с покрытиями, полученными бесконтактным способом. Повышение микротвердости полученных покрытий авторы видят в механическом упрочнении осадков в процессе электролиза, приводящим к формированию мелкокристаллической структуры осадков.

В [122] описывается понижение микротвердости меди в 1,6 раза при увеличении плотности тока до 216 А/дм². В [147] утверждается, что изменение плотности тока и температуры электролита в процессе осаждения не оказывает существенного влияния на микротвердость хромовых покрытий. Кроме того, авторы указывают, что для хромовых покрытий, получаемых из саморегулирующихся электролитов, микротвердость с увеличением плотности тока растет с 8,25 до 10,50 ГПа. Авторы [89] указывают на возможность повышения микротвердости хромовых покрытий в сравнении со стандартными способами путем внедрения мелкодисперсных частиц в покрытие. Однако в [57] отмечается, что вопрос внедрения посторонних включений в формируемое гальваническое покрытие недостаточно проработан. В ходе исследований не удалось получить качественные хромовые покрытия с одинаковой микротвердостью по всей хромируемой поверхности при внедрении

мелкодисперсных частиц в покрытие. Никельсодержащие осадки, как показано в [122], характеризуются увеличением микротвердости покрытия с 3 до 6 ГПа при повышении скорости протекания электролита в межэлектродном пространстве. Причем структура покрытий, полученная гальваномеханическим методом, была плотной и мелкокристаллической [8, 59, 84, 137, 147]. Отмечено, что зернистость никелевых покрытий, осажденных гальваномеханическим способом на два порядка меньше, чем у стандартных гальванических осадков, и не превышают 1,5 мкм [123]. Причем отдельно отмечается сильная деформация кристаллов покрытия в направлении нормальном к обрабатываемой поверхности. При исследовании свойств хромосодержащих покрытий отмечается наличие микротрещин и высокая плотность дислокаций [151]. Исследования шероховатости поверхности в [16, 68, 124, 127] дали следующие результаты: для хромовых покрытий шероховатость покрытий лежит в пределах 0,16–0,63 мкм; для железных – 0,3–0,63 мкм [125]; никелевых – 0,8–3,0 мкм [122, 123]. Исходная шероховатость деталей подвергаемых нанесению покрытий была в диапазоне 0,32–1,25 мкм. При изучении физико-механических свойств покрытий, полученных методом гальвано-механического хромирования (ГМХ), выяснилось: все покрытия имели высокую степень адгезии с основой и повышенную прочность самого покрытия [137]. Улучшение адгезионных свойств покрытий при осаждении гальваномеханическим способом отмечены также в работах [15, 124, 145]. В [137] приведены результаты анализа степени сцепления покрытия с основой, проводимые методом крацевания и методом нанесения сетки пересекающихся царапин. Исследователи [144] отмечают высокую равномерность покрытий, которая достигает 92,16%. Кроме того, указывается на неравномерность осадка, которая может колебаться в зависимости от толщины покрытия и достигать 2,5 мкм при толщине покрытия в 445 мкм. Литературные данные указывают на возможность улучшения равномерности покрытия при использовании специальных добавок и повышении скорости осаждения [124, 144].

Отдельно рассматривается вопрос получения покрытий заданной толщины.

В [137] доказывається можливість осаждения гальванічних осадков практично будь-якої товщини. Автори [94] показують, що для хромодержущих покриттів, із саморегулюючого електроліта, максимальна товщина осадков складає 0,7–1,5 мкм. В той же час, в [138] приводяться дані про те, що максимальна товщина хромового покриття при методі гальваномеханічної обробки складає 20 мкм незалежно від часу осаждения. Автори пояснюють це недосконалістю лабораторного обладнання. В перерахованих літературних джерелах інформація про можливу товщину безпористого герметичного зносостійкого хромового покриття відсутня.

Корозійна стійкість покриттів отриманих методом ГМХ знаходиться на рівні покриттів, осаджуваних за стандартної гальванічної технології. Для нікелевих покриттів, однак, відзначається деяке збільшення корозійної стійкості [123].

В роботах [9, 53, 110] відзначається: покриття, отримані за технології ГМХ з використанням абразивного інструмента мають підвищену зносостійкість, в порівнянні зі стандартними безконтактними гальванічними покриттями. Вказаний показник досягає 150%.

Таким чином, в літературі відзначається висока продуктивність гальваномеханічної обробки з використанням абразивного інструмента. Однак, немає вичерпуючої інформації про вплив гальваномеханічної обробки на фізико-механічні та зокрема експлуатаційні властивості відрінованих деталей. Крім того, відсутні дослідження пористості покриттів, осаджених за технології ГМХ. Відзначається наявність тріщин та розтягуючих залишкових напружень в формуваних покриттях, що в свою чергу не дозволяє рекомендувати розглядану технологію для рішення проблеми герметичних покриттів, особливо великої товщини, яка має місце при вістановивельних операціях.

ГМО с инструментом из керамики.

Схема реализации метода представлена на рисунке 1.4.

Метод осаждения покрытий гальваномеханическим способом с использованием инструмента из керамики для восстановления деталей описан в [44, 53]. Отличительной особенностью данного метода является механическая обработка покрытия в процессе его осаждения с применением инструмента из минералокерамики ВОК-60 и В-3 [63, 166].

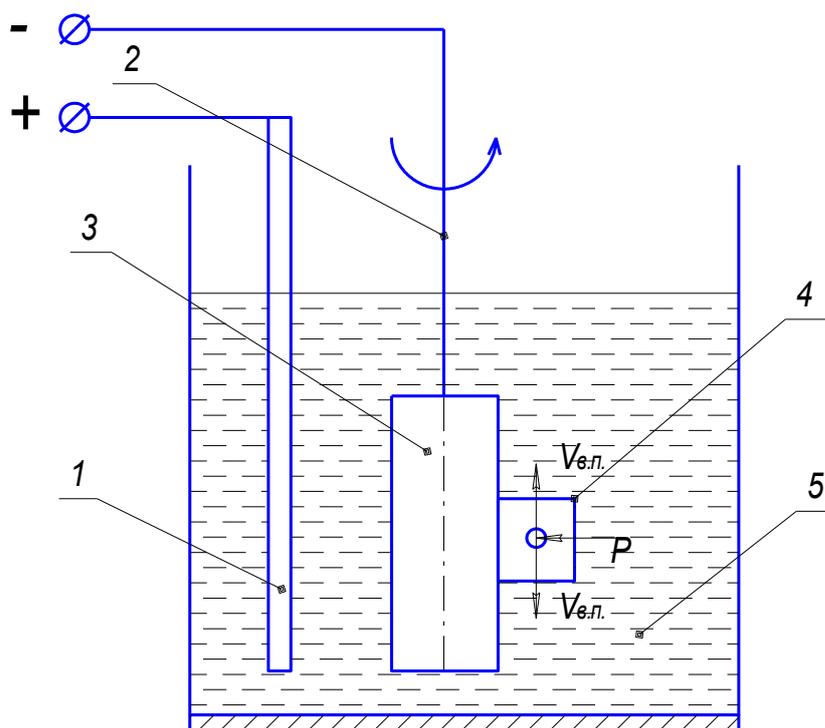


Рисунок 1.4 – Схема осуществления метода ГМО

1 – анод; 2 – катод; 3 – деталь; 4 – керамический инструмент;

5 – ванна с электролитом

Рядом авторов проводились исследования производительности процесса ГМО. В результате чего было определено, что метод позволяет обеспечить скорость осаждения покрытий в 3–5 раз выше скорости стандартного осаждения [15, 166].

Существуют различные исследования влияния давления инструмента на скорость осаждения покрытия. Так в [15] отмечается: давление инструмента

изначально влияет на скорость осаждения покрытия, а в [166] указывается, что такая зависимость незначительна. При этом шероховатость поверхности получаемых покрытий составляла величину порядка 0,03 мкм при исходной шероховатости детали 1,25 мкм [15, 84, 166]. Авторы [84, 166] отмечают снижение отрицательного воздействия хромирования деталей по технологии гальваномеханического осаждения в сравнении с технологией стандартного нанесения покрытий. Это оказывает положительное влияние на физико-механические и эксплуатационные характеристики агрегатов в целом. При нанесении покрытий по технологии гальваномеханического хромирования с инструментом из керамики, как правило, получаются покрытия со сжимающими остаточными напряжениями [5, 16, 68, 125, 147, 153, 177], достигающими значений 300–400 МПа. Авторы [84] объясняют это механической активацией катода в процессе осаждения покрытия. В результате чего происходит разрушение катодной пленки инструментом, а также деформация внутреннего слоя. Следствием этого служит изменение кристаллической структуры формируемого покрытия.

Однако такой механизм не объясняет трудность в получении сжимающих остаточных напряжений в формируемом покрытии [166]. Такие напряжения удается получать на любых покрытиях за исключением хромовых [123, 127].

Авторами [15, 147, 166] при осаждении покрытий методом ГМО были получены мелкозернистые покрытия, в которых отсутствовала сетка трещин. В таких осадках была выявлена объемно-центрированная кристаллическая решетка. Но указано, что покрытия с заданными физико-механическими характеристиками можно получить лишь ограниченной толщины (до 120 мкм), что накладывает определенные ограничения на использовании их в ремонтном производстве.

Отмечается, что такая технология незначительно влияет на усталостную прочность хромируемых деталей. Для стали марки 40X усталостная прочность при хромировании по серийной технологии снижается на величину до 40%, а при использовании технологии ГМО – лишь на 20–25% [128]. Кроме того, в таких покрытиях отмечается повышение износостойкости до 30 раз [9, 15, 124, 147].

Нанесение покрытий методом ГМО не только увеличивает срок службы самой детали, но и продляет ресурс резиновых уплотнений до 40% [137]. В различной литературе [84, 147] приводятся рекомендации по подбору оптимальных параметров нанесения покрытий с заданными характеристиками. Однако, это пригодно лишь для новых деталей. Для восстановления изношенной аппаратуры такая методика не пригодна в связи с перегревом токоподводов и самих деталей. Это связано с большими токами в цепи и длительностью протекания процесса. Такого тока на современных источниках достигнуть довольно проблематично. Однако, в [149, 166] указаны приемлемые режимы нанесения хромового покрытия с ограничениями по плотности тока 10–15 кА/м².

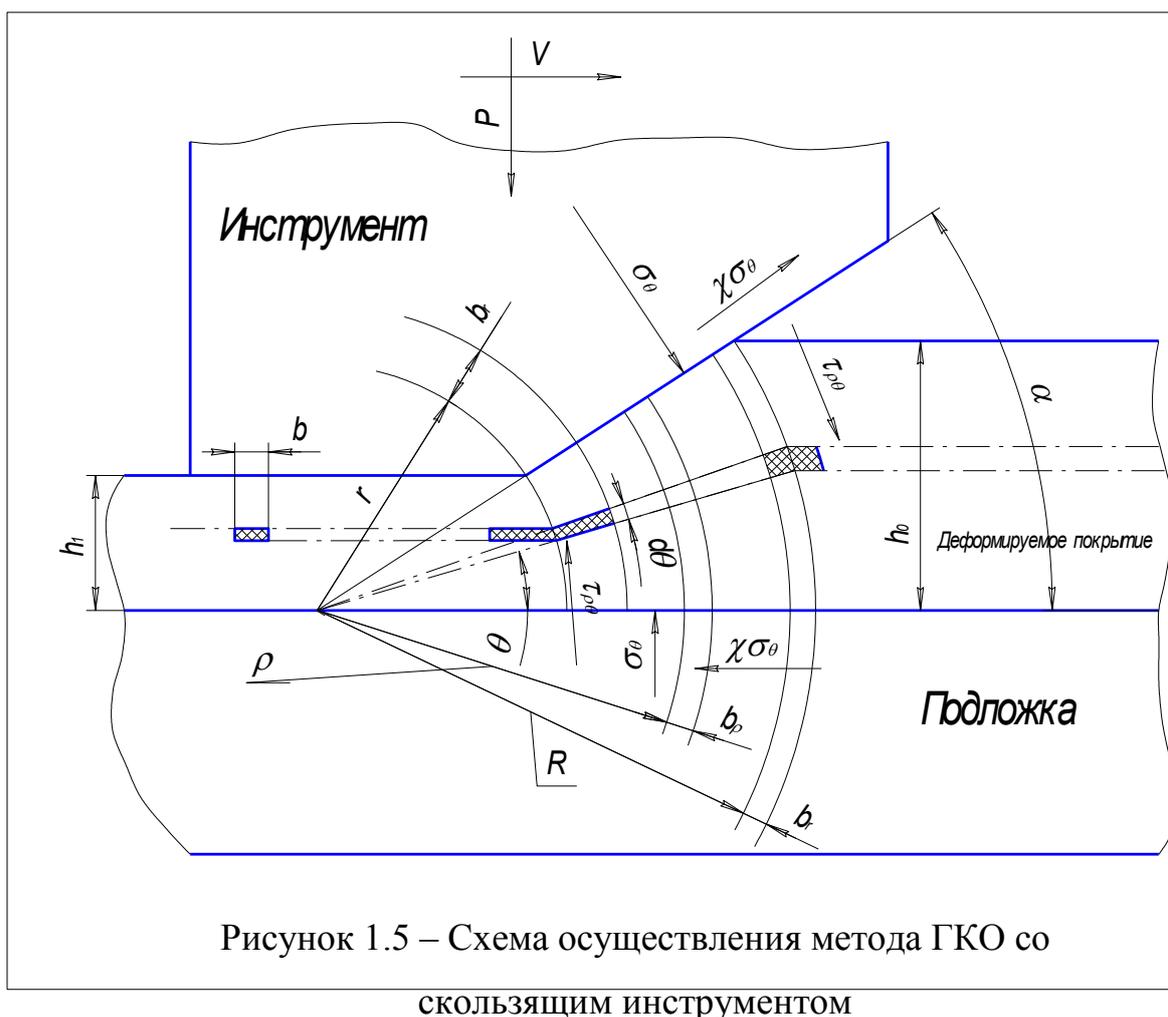
В литературе, посвященной нанесению покрытий на детали методом ГМО, отсутствуют исследования влияния режимов нанесения на пористость, а также рекомендации по получению сжимающих остаточных напряжений в толстослойных покрытиях. Не приводится исследований влияния восстановления деталей толстослойным хромированием на микротвердость и наводораживание. В [84, 147, 166] лишь показано, что гальваномеханическим способом можно получать беспористые покрытия. Кроме того, там говорится о возможности повышения надежности отремонтированных гидropневмоагрегатов путем нанесения беспористых хромовых покрытий.

Следует, однако, учитывать, что все перечисленные способы подразумевают механическую обработку восстанавливаемой поверхности. Такие операции отличаются высокой трудоемкостью (в особенности алмазное выглаживание) и значительным процентом брака, достигающим при обработке толстослойных покрытий до 98% [128]. Кроме того, неизбежным следствием такой обработки является появление микротрещин на обрабатываемой поверхности [20, 66, 81, 87]. Это негативно влияет на коррозионную устойчивость покрытия и его герметичность [115].

ГКО со скользящим инструментом.

Принципиальная схема реализации метода гальваноконтактного осаждения

(ГКО) композиционных гальванических покрытий представлена на рисунке 1.5.



Отличительной особенностью рассматриваемого метода является использование инструмента, обеспечивающего регулируемый массовый перенос наполнителя в осаждаемое покрытие. Это позволяет получить ряд преимуществ. Во-первых, появляется возможность изменять скорость осаждения покрытия на различных участках восстанавливаемой поверхности детали, что позволяет устранять геометрические погрешности деталей такие как эллипсность, конусность и др., вызванные износом. При этом отпадает необходимость проводить механическую обработку детали как во время подготовки поверхности к нанесению покрытия, так и после процесса хромирования для придания ей требуемых проектной документацией свойств. Во-вторых, благодаря регулируемому внедрению инструментального материала в виде

мелкодисперсных частиц в покрытие появляется возможность повысить его микротвердость и, как следствие, износоустойчивость по сравнению с покрытиями, полученными по стандартной технологии или технологии гальваномеханической обработки с абразивным или керамическим инструментом [59, 101].

Авторами [45, 51, 98, 102] были проведены исследования по производительности процесса ГКО. Выбран типовой состав электролита, содержащий от 200 до 250 г/л CrO_3 и от 2,0 до 2,5 г/л H_2SO_4 , и определены значения режимных параметров, при которых удалось получить износостойкие покрытия с заданной шероховатостью поверхности и макрогеометрией. Экспериментальные данные показали, что в сравнении с вышеперечисленными методами осаждения покрытий производительность процесса восстановления деталей возросла на порядок, а скорость осаждения выросла до двух раз.

Однако, для обеспечения герметичности нанесенного слоя гальванического покрытия на поверхности гидравлической аппаратуры требуется получение износостойкого герметичного хромосодержащего покрытия с внутренними напряжениями сжатия, препятствующими трещинообразованию в процессе эксплуатации. Получение такого рода покрытий методом гальваноконтактного осаждения затруднительно [112, 114]. Это связано с неравномерным износом инструмента, приводящим к внедрению в хромовую матрицу инструментальных частиц различных фракций. Учитывая особенность нанесения дисперсно-упрочненных покрытий посредством воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность, необходимо отметить, что толщина наносимого гальванического слоя между двумя последовательными ходами инструмента должна составлять как минимум половину диаметра средней фракции наполнителя (рисунок 1.6). Это позволяет управлять наносимым покрытием. В случае необеспечения вышеуказанного условия частицы наполнителя будут вырываться инструментом из осажденного слоя хрома. Соблюдение указанного условия требует такой скорости нанесения покрытия, при которой затруднительно получение сжимающих остаточных напряжений в осадке.

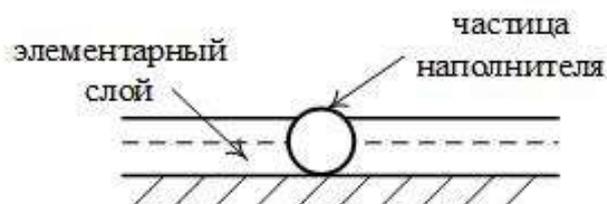


Рисунок 1.6 – Схема расположения наполнителя в формируемом слое

В литературе [102, 186] нет исчерпывающих данных о негативном влиянии зон перекрытия смежных инструментов на пористость осадка, что является необходимым технологическим условием нанесения дисперсноупрочненных композиционных покрытий. Для получения качественных покрытий необходимо обеспечить согласованное движение инструмента с вращением восстанавливаемой детали, исключая возможность возникновения переупрочненных зон, причем нанесение покрытий необходимо проводить в два слоя. В этом случае базовый слой позволяет придать обрабатываемой детали заданные проектом свойства, а финишный – получить поверхность детали с требуемыми антифрикционными свойствами. В противном случае это ведет к повышенному силовому воздействию на определенные участки восстанавливаемой поверхности, вызывающему в них эффект переупрочнения. Это может привести к сколу покрытия и его шелушению.

Кроме того, скользящее движение инструментального бруска по нанесённому покрытию способно вызывать деформацию формируемого слоя частицами композиционного материала. Это приводит к возникновению дополнительных центров неровности формируемого покрытия, повышающих шероховатость и пористость гальванического осадка.

В этой связи исследования автора были направлены на теоретическое обоснование, а также разработку технологии и средств технологического оснащения, создание математических моделей, реализующих заданное качество обработки деталей и узлов. К покрытиям, нанесенным по предлагаемой технологии, предъявляются особые требования по износостойкости и герметичности поверхностного слоя.

1.6 Выводы по главе. Задачи исследований

1. При хромировании деталей на поверхность металла наносится покрытие с уже существующими микроканалами и трещинами, поэтому существует угроза возникновения сквозных трещин по слою хрома и потеря коррозионной стойкости покрытия при его эксплуатации.

2. Причина невозможности получения герметичных размерных функциональных хромовых покрытий на деталях сельхозмашин – неконтролируемые растягивающие остаточные напряжения, возникающие в процессе электролиза.

3. При хромировании в электролитах-суспензиях возможно снижение остаточных напряжений в хромовых покрытиях.

4. При хромировании в электролитах-суспензиях существенно затруднено получение хромовых покрытий равномерной толщины.

5. Покрытия, полученные в электролитах-суспензиях, характеризуются крайне неоднородной структурой, вызванной неконтролируемым массовым переносом наполнителя в осадок при электролизе, что ведёт к неравномерному распределению остаточных напряжений в нём и, как следствие, не позволяет использовать их для получения герметичных износостойких покрытий на деталях сельхозмашин.

6. Гальваномеханическими способами возможно получение герметичных хромовых покрытий ограниченной толщины (до 120 мкм на сторону) с управляемыми остаточными напряжениями поверхностного слоя.

7. Механическая обработка детали до восстановления или покрытия, нанесенного гальваническими методами, после осаждения существенно снижает эксплуатационные характеристики изделия, формирует растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое и металлической подложке, что не позволяет получить герметичные осадки.

8. Все методы, использующие холодное нанесение гальванических покрытий, требуют обязательной механической обработки поверхности детали или покрытия.

9. Метод нанесения гальванических покрытий гальваноконтактным осаждением позволяет получать толстые (до 650 мкм на сторону) износостойкие осадки. Однако задача получения герметичных покрытий этим методом не была решена.

На основании вышеизложенного в работе поставлены следующие задачи исследования:

– Изучить закономерности формообразования слоя покрытия в зависимости от степени износа различных участков поверхности и проанализировать существующие процессы размерного наращивания металла на детали методом гальванического осаждения.

– Выяснить границы возможной концентрации наполнителя в покрытии, позволяющего получать гальванические защитные слои заданного качества. Теоретически обосновать возможность получения композиционных покрытий со сжимающими остаточными напряжениями.

– Определить закономерности управления точностью обработки, формирования шероховатости поверхности, границы возможного увеличения производительности процесса при нанесении композиционных гальванических покрытий. Выработать технологические рекомендации по применению метода нанесения дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий (ДУГКП) для различных типов конструкционных материалов.

– Установить зависимость роста толщины покрытия гальванического композиционного осадка от режимных параметров его нанесения и разработать технологические рекомендации по нанесению покрытий требуемого качества с использованием разработанного метода. Исследовать влияние параметров осаждения композиционных покрытий на их физико-механические и эксплуатационные характеристики.

– Разработать состав композиционного гальванического покрытия базового слоя с включениями карбида титана и оксида алюминия, служащего для устранения износа рабочих поверхностей деталей, и финишного слоя, непосредственно контактирующего с рабочими поверхностями контртела (сопрягаемых деталей) на основе упрочненной хромовой матрицы с включениями дисульфида молибдена, который введен с целью снижения хрупкости покрытия и коэффициента трения.

– Обосновать рациональные параметры оборудования, средств технологического оснащения для осуществления предлагаемого метода.

– Разработать технологию применения метода холодного гальванического наращивания композиционных покрытий в производстве силовых гидравлических узлов сельскохозяйственной техники и оценить ее эффективность.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ

2.1 Влияние фракции наполнителя на качество получаемых покрытий

Анализ состояния вопроса позволил сформулировать направления решения научной проблемы в следующем виде: повышение прочностных и эксплуатационных свойств поверхностного слоя деталей, восстанавливаемых путем создания средств и способов нанесения гальванического износостойкого герметичного композиционного покрытия под механическим воздействием на формируемые слои.

В ходе предварительных исследований, проведенных на ряде промышленных узлов, была выдвинута научная концепция: путем управления гальванической и механической составляющей процесса осаждения дисперсно-упрочненных композиционных гальванических покрытий возможно получение качественных герметичных, износостойких размерных осадков с толщиной до 650 мкм повышенной коррозионной стойкости, с возможностью управления их физико-механическими и, как следствие, эксплуатационными свойствами. При этом повышение прочностных и эксплуатационных свойств восстанавливаемых деталей осуществляется путем управляемого внедрения наполнителя в гальваническую матрицу с одновременной упругопластической деформацией каждого слоя покрытия при его осаждении. Это позволяет управлять величиной и знаком остаточных напряжений по всей толщине покрытия с обеспечением точности геометрии по 6–8 качеству. При этом контактное воздействие инструмента с деталью должно обеспечивать определенную степень деформации покрытия и концентрацию внедрения инструментального материала в гальванический осадок.

Нанесение дисперсно-упрочнённых гальванических композиционных покрытий состоит из двух составляющих, энергии электрического поля, сформированного в межэлектродном промежутке и осуществляющего осаждение

положительно заряженных ионов на катод и диффузии инструментального материала в покрытие. Размерное нанесение покрытий на поверхность детали возможно при условии строгого соответствия скорости главного движения шпинделя оборудования и плотности тока, обеспечиваемого электрооборудованием установки, сочетание которых определяет временные интервалы формирования локальных участков поверхности с обеспечением требуемых характеристик и качества наносимых покрытий [53].

Инструмент, используемый для механического воздействия на растущие слои осадка, представляет собой состав, основой которого является материал с явно выраженными диэлектрическими свойствами. В работах В.Ф. Молчанова, А.Т. Ваграмяна и др. [19, 23, 92] имеются сведения по многообразию применяемых электролитов – суспензий. Дальнейшее развитие теории нанесения покрытий в электролитах – суспензиях позволило создать метод, в котором в качестве инструмента используется материал, обеспечивающий регулируемый массовый перенос инструментального материала в осаждаемое покрытие. Это позволило получить совершенно новую технологию нанесения композитных гальванических покрытий, которая, по сравнению с известными методами холодных нанесений покрытий, имеет ряд преимуществ. Во-первых, метод обеспечивает разную скорость осаждения покрытия на различные участки обрабатываемой поверхности в зависимости от их износа, что позволяет устранять геометрические погрешности деталей, вызванные износом или дефектом изготовления, не прибегая к традиционной механической обработке деталей. Во-вторых, регулируемое внедрение инструментального материала в виде мелкодисперсных частиц позволяет повысить микротвердость и износостойчивость получаемого покрытия. Это дает возможность управлять остаточными напряжениями в осаждаемом слое, в отличие от покрытий, полученных по стандартной технологии и технологии гальваномеханической обработки с абразивным и керамическим инструментом. Благодаря этому появляется возможность получения размерных износостойких герметичных

покрытий с повышенной коррозионной устойчивостью и толщиной до 650 мкм на сторону.

Взаимодействие инструмента с осаждаемым покрытием, представленное на рисунке 2.1, заключается в упругопластическом деформировании обрабатываемой поверхности прокатывающимся по ней выглаживателем, который обладает высокой твердостью, низким коэффициентом трения, высокой степенью чистоты поверхности. При этом относительная траектория инструмента контактирующего с поверхностью детали формируется совокупностью главного движения V_2 (возвратно-поступательное движение детали) и вспомогательного движения V_6 , реализуемого качением композиционных инструментальных головок по восстанавливаемой поверхности.

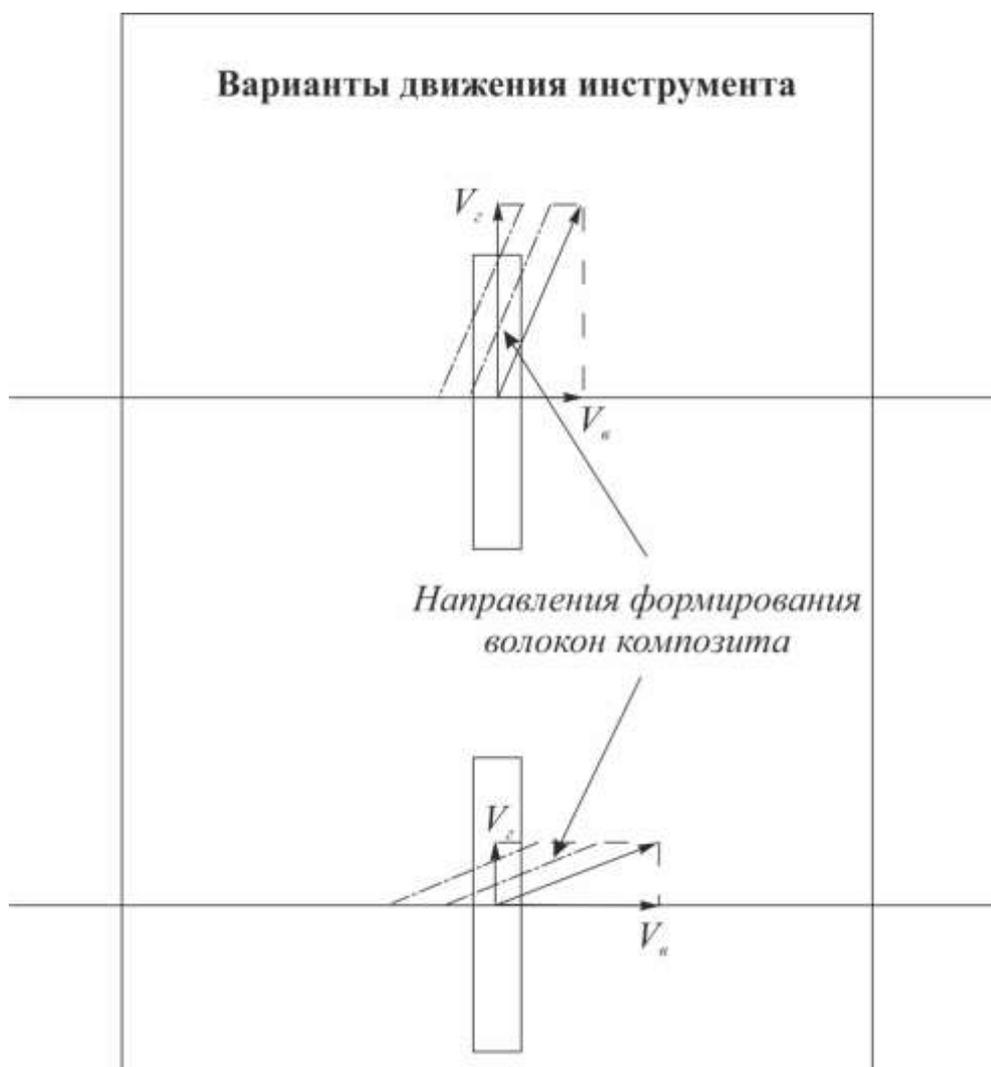


Рисунок 2.1 – Траектория движения инструмента

В направлении главного движения прижатый к обрабатываемой поверхности с силой инструмент внедряется в нее на глубину $R_{зисх}$, что характерно для метода гальваноконтактного осаждения со скользящим инструментом, и при движении сглаживает исходные неровности (рисунок 2.2). Высота шероховатости в направлении скорости (продольная шероховатость) обычно значительно меньше, чем высота поперечной шероховатости (в направлении подачи). После прохода инструмента происходит частичное упругое восстановление поверхности $\Delta_{упр}$. Впереди инструмента образуется валик пластически деформированного металла, передняя поверхность инструмента нагружается гораздо больше, чем задняя. По этой причине, а также вследствие адгезионного взаимодействия между деталью и инструментом, в процессе обработки покрытия инструментом возникает тангенциальная составляющая силы взаимодействия, которая стремится развернуть инструмент. Это приводит к тому, что в технологической системе возникают вибрации, приводящие к значительным колебаниям силы прижима инструмента и, соответственно к переупрочнению покрытия. Это вызывает его отслоение и шелушение. Кроме этого при вибрации возникает вероятность разрушения инструмента и нарушается контроль над введением наполнителя второй фазы в покрытие, что также негативно сказывается на качестве осадка.

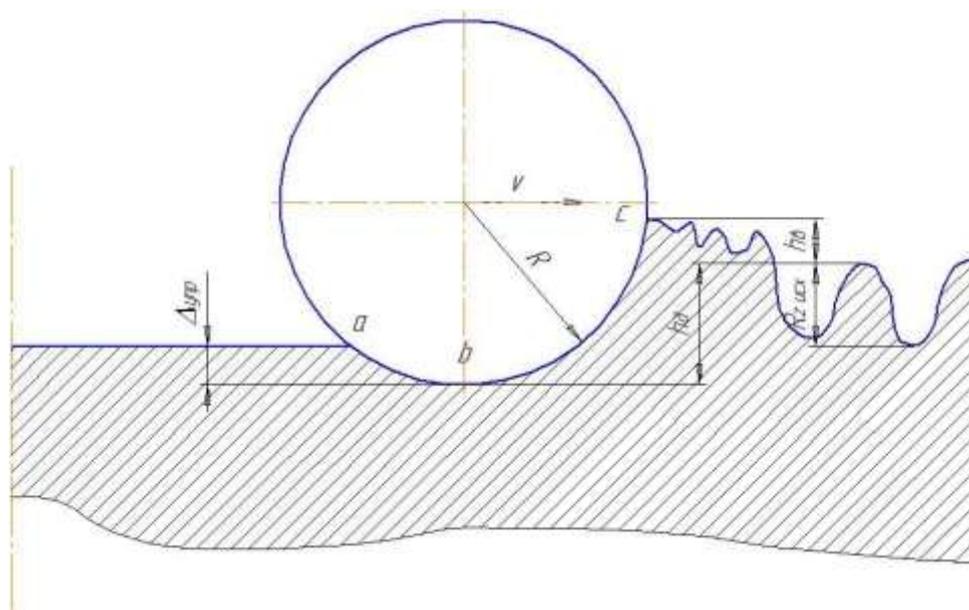


Рисунок 2.2 – Сглаживание исходных неровностей прокатным инструментом

С целью устранения негативных явлений, вызванных скольжением инструмента по поверхности, предлагается технология нанесения двухслойного композиционного электролитического дисперсно-упрочненного покрытия. Особенность нанесения каждого слоя заключается в периодической упруго-пластической деформации растущих микрослоев покрытия в процессе их осаждения посредством инструмента, совершающего движение качения с радиальным усилием на обрабатываемую поверхность. В этом случае инструментальный ролик внедряет частицы наполнителя в гальваническую матрицу, причем внедрение происходит не из-за трения скольжения, при котором неизбежны бороздки, получаемые от протаскивания твердых частиц наполнителя инструментом по осажденному покрытию, препятствующие получению герметичных осадков, а от трения качения, при котором внедряемые в гальваническую матрицу частицы остаются на месте внедрения и подвергаются заращению материалом матрицы. К этому необходимо добавить, что периодическое механическое воздействие на растущие кристаллы гальванического хрома вызывает временную остановку их роста в момент прохождения зоны механической активации инструментом. Это формирует слой композитного покрытия. После прохождения инструмента рост кристаллов хрома возобновляется до следующего их контакта с инструментом, что формирует последующий слой гальванического композиционного покрытия. Данный процесс повторяется периодически во время проведения процесса. Учитывая данную особенность способа, ясно, что на поверхности детали получается слоистый композит. Необходимо отметить, что периодическое прерывание роста кристаллов формирует мелкозернистую структуру осадка, которая способствует формированию износостойкого покрытия. Схема метода показана на рисунке 2.3, где под номером 1 показана деталь, а под номером 2 инструмент.

Следует отметить, что применение обкатки покрытия по схеме качения позволит существенно расширить технологические возможности метода, сделав возможным получение дисперсно-упрочненных композиционных гальванических

покрытий на фасонных поверхностях тел вращения, что было невозможно при использовании деформирования покрытия по схеме трения (рисунок 2.2) [71].

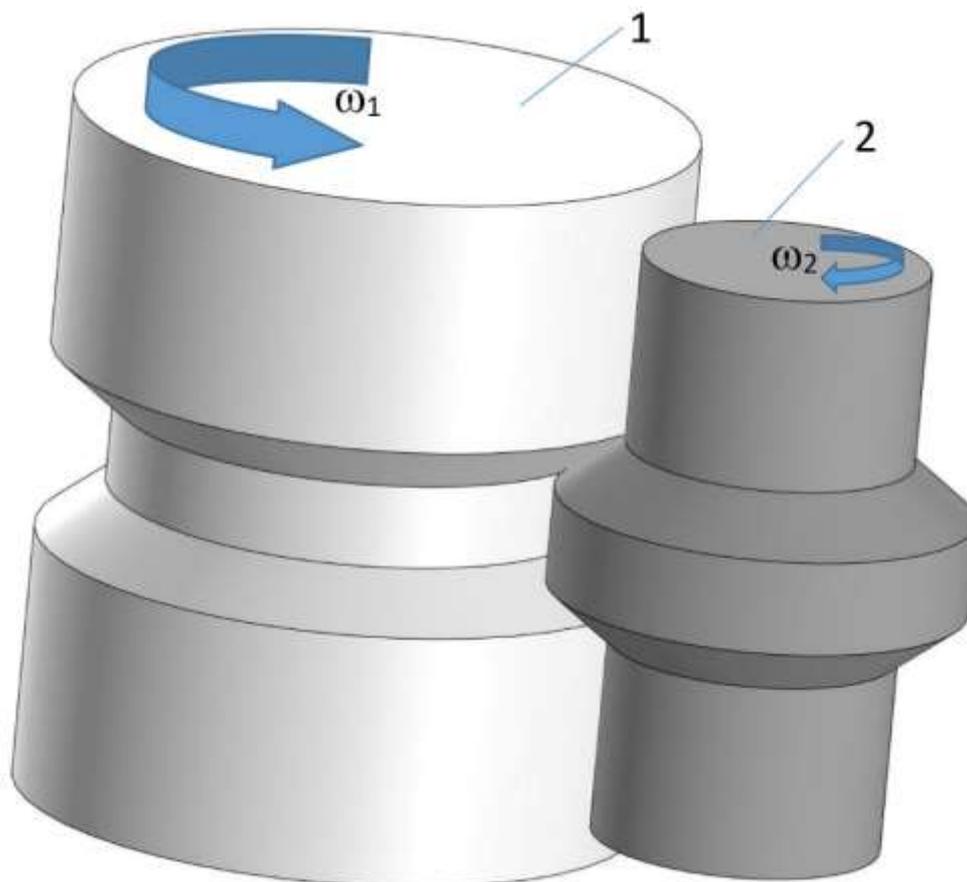


Рисунок 2.3 – Схема обработки методом качения

Выравнивание профиля поверхности будет происходить за счет разности скоростей осаждения хромового покрытия на локальных участках в зависимости от их износа. Согласно исследованиям, проведенным в [26, 158] наличие дисперсных частиц второй фазы может вызывать снижение скорости осаждения покрытия. Рассмотрим процесс формирования композиционного гальванического покрытия на локальном участке детали, имеющем износ (рисунок 2.4). Для восстановления погрешности формы, как указывалось ранее, применяется базовый слой покрытия, в котором в качестве материала второй фазы наряду с карбидом титана используется корунд. Инструмент при прохождении зоны обработки внедряет в покрытие карбид титана и оксид алюминия, являющиеся изоляторами. На участках поверхности, характеризующихся различными

износами и дефектами, где инструмент развивает слабое усилие, внедряется меньшее количество изолирующего наполнителя в осаждаемое покрытие (зона 2 на рисунке 2.4), тем самым обеспечивая меньшую его концентрацию. Таким образом, зона 2 обладает большей активной площадью электролизера по сравнению с зоной 1, что способствует более высокой скорости роста осадка на этом участке. Из-за разности скоростей происходит выравнивание профиля детали.

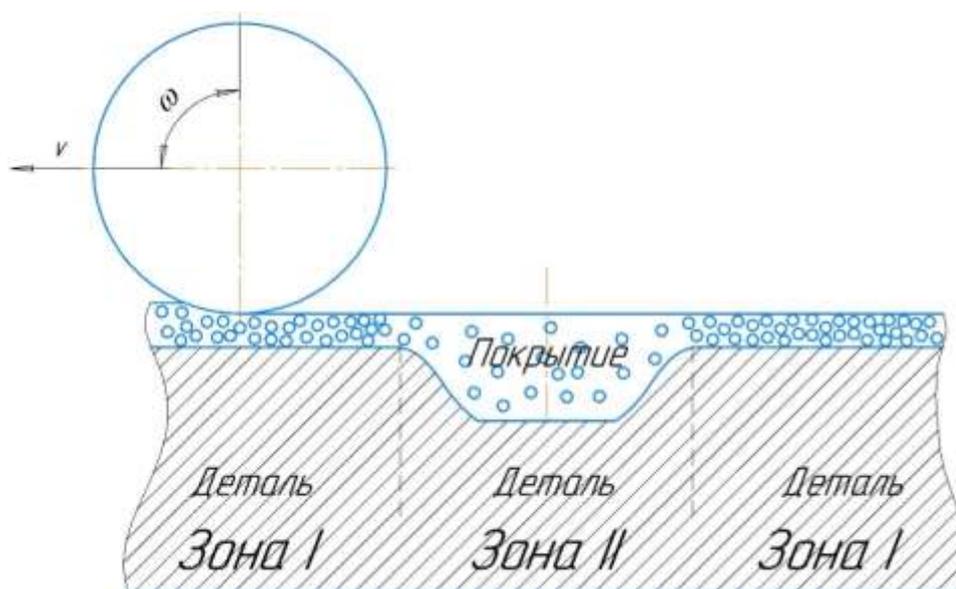


Рисунок 2.4 – Формирование композиционного покрытия

Кроме механической составляющей процесса в формировании покрытия принимает участие и гальваническая составляющая. Рассмотрим далее формирование покрытия при его активации инструментом и деформировании слоев при наличии исходной шероховатости поверхности. В начальный момент обработки инструмент не соприкасается со всей поверхностью детали в зоне контакта из-за наличия дефектов поверхности. Необходимо учитывать, что участки покрытия, с которыми осуществляется периодический контакт инструмента деформируются, а кристаллы, зародившиеся во впадинах микронеровностей, растут в режиме обычного гальванического осаждения.

В соответствии с гипотезой, предложенной в [19], механическое воздействие способствует практически мгновенному переходу хрома из

гексагональной модификации в устойчивую кубическую, поэтому, вследствие разного удельного веса и объема осаждаемого хрома, будем иметь различные скорости осаждения покрытия на вершинах и впадинах микронеровностей поверхности обрабатываемой детали а, следовательно, будет изменяться с течением времени и количество зон контакта, т.е. с течением времени будет происходить выравнивание профиля детали с одновременным уменьшением шероховатости нанесенного покрытия.

Пластическая деформация в реальных кристаллах осуществляется путем последовательного перемещения дислокаций (рисунок 2.5).

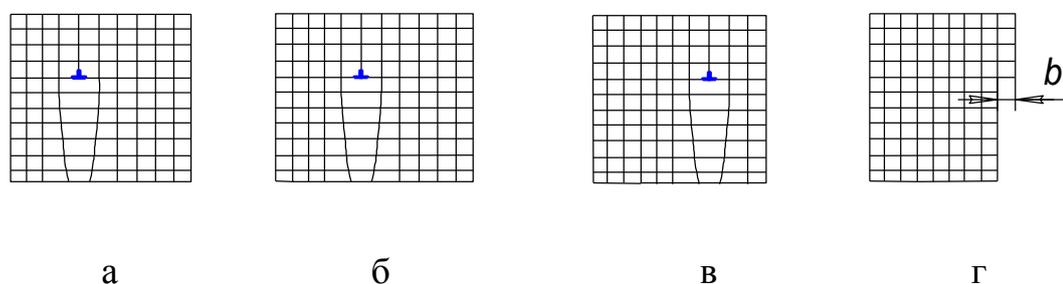


Рисунок 2.5 – Перемещение дислокации в кристалле

Дислокация легко движется в той плоскости, в которой находятся дислокационная линия и ее вектор Бюргерса [162]. Под действием касательного напряжения избыточная полуплоскость в верхней части кристалла соединяется в одну атомную плоскость с расположенной ниже частью соседней атомной плоскости. Оставшаяся ее часть становится новой полуплоскостью, которая заканчивается краевой дислокацией. Незначительного смещения небольшой группы атомов оказывается достаточно для перемещения дислокации на одно межатомное расстояние (рисунок 2.5 а, б). При постоянно действующем напряжении дислокация как бы по эстафете передается от одной атомной плоскости к другой, последовательно вытесняя при этом каждый соседний «правильный» ряд атомов. Процесс повторяется до тех пор пока дислокация не выйдет на поверхность кристалла (рисунок 2.5 в) и его верхняя часть сдвинется

относительно нижней на одно межатомное расстояние (рисунок 2.5 г). При этом на поверхности кристалла образуется ступенька величиной в вектор Бюргерса.

В плоскости скольжения обычно расположены десятки дислокации. Их последовательное перемещение вдоль плоскости скольжения развивает процесс пластического течения. Высота ступеньки при этом увеличивается пропорционально числу дислокаций, выходящих на поверхность кристалла. Деформация развивается неоднородно, линии скольжения располагаются на различном расстоянии друг от друга. Группы близко расположенных линий скольжения образуют полосы скольжения. Пластическая деформация развивается, в первую очередь, по той системе скольжения, где касательные напряжения раньше достигают критической величины. Начальную стадию деформации называют стадией легкого скольжения; деформация кристалла на этой стадии может достигать десятков процентов. С ростом деформации скольжение распространяется на другие системы, и возникает множественное скольжение. На этой стадии дислокации перемещаются в пересекающихся плоскостях, возрастает сопротивление их движению, и образуется сложная дислокационная структура.

Скольжение дислокации не связано с диффузией, так как происходит без переноса массы. Этим объясняется сравнительная легкость такого передвижения дислокации.

Упрочнение покрытия также заключается в образовании мелких выделений второй фазы в матрице основного металла. Эти выделения создают поля напряжений, являются перерезаемыми или непроходимыми для дислокаций. Поэтому они создают дополнительные препятствия для движения дислокаций и их применение значительно повышает сопротивление изнашиванию и хрупкому разрушению материала.

Уровень прочности зависит от объемного содержания упрочняющей фазы, равномерности ее распределения, степени дисперсности и расстояния между частицами. Согласно гипотезе Орована [162], сопротивление сдвигу увеличивается с уменьшением расстояния между частицами. В силу этого для композитного материала можно записать:

$$\sigma = \frac{Gb}{l} \quad (2.1)$$

где G – модуль сдвига;

b – межатомное расстояние;

l – расстояние между частицами.

Упрочнение частицами достигается в том случае, если они тормозят пластическую деформацию или разрушение материала. При дисперсном упрочнении металлической матрицы частицы блокируют скольжение в ней. При этом эффективность упрочнения зависит от расстояния между частицами D_p . Эта величина связана с диаметром частиц d_B и их объемной концентрацией V_B геометрическим соотношением [26]:

$$D_p = \left(\frac{2d_B^2}{3V_B} \right)^{0,5} (1 - V_B) \quad (2.2)$$

Частицы фазы-упрочнителя окружены полями внутренних напряжений в матрице. Когда скользящая дислокация подходит достаточно близко к этим полям, она изгибается (рисунок 2.6).

Наименьший радиус изгиба дислокации под действием поля внутренних напряжений τ_i выражается формулой [22]:

$$R_u = \frac{G_M b}{2\tau_i}, \quad (2.3)$$

где G_M — модуль сдвига матрицы; b — вектор Бюргера.

Так как $2R = D_p$, то напряжение, необходимое для выгибания дислокаций вокруг частиц, выражается равенством:

$$\tau_i = \frac{G_M b}{D_p} \quad (2.4)$$

Дальнейшее расширение дислокационной петли происходит самопроизвольно без повышения напряжения. В итоге дислокации огибают частицы и смыкаются за ними. Смыкающиеся дислокации в точке встречи имеют разные знаки и аннигилируют. Таким образом, вокруг частиц образуются дислокационные петли, а дислокации за ними принимают форму прямой линии и

перемещаются далее в матрице до следующего препятствия. Такой способ преодоления дислокациями частиц второй фазы называется обходом. Если по плоскости скольжения перемещается несколько дислокаций, то вокруг частиц образуется несколько замкнутых дислокационных колец. Эти кольца окружены

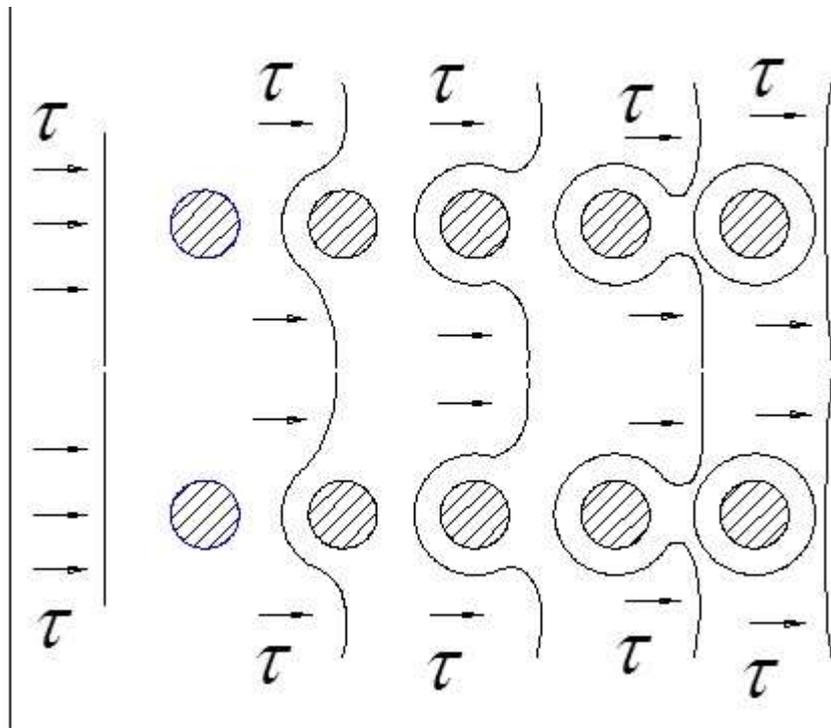


Рисунок 2.6 – Схема преодоления движущимися дислокациями частиц фазы-упрочнителя путем обхода

полями напряжений, и с увеличением их числа существенно уменьшается свободное расстояние между частицами D_p и повышается сопротивление проталкиванию новых скользящих дислокаций. Для прохождения каждой следующей дислокации требуется все большее напряжение. В этом заключается основной механизм деформационного упрочнения композиций с дисперсными частицами фазы-упрочнителя.

Дислокации могут также преодолевать частицы фазы-упрочнителя путем перерезания последних по схеме, представленной на рисунке 2.7.

Плоскости скольжения в матрице и частице обычно не совпадают, и поэтому перемещение дислокации через частицу вызывает в ней сильное искажение кристаллической структуры. При перерезании частиц возникают также

ступеньки сдвига и накапливается дополнительная поверхностная энергия. Поэтому перерезание частиц дислокациями требует затраты большой энергии, что обуславливает значительное дополнительное упрочнение материала.

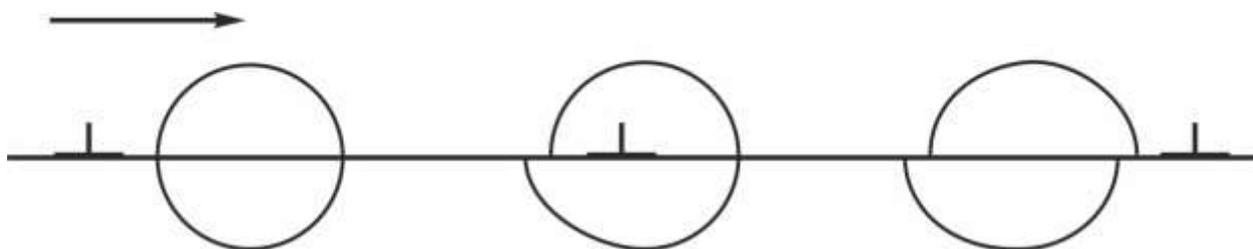


Рисунок 2.7 – Схема преодоления движущимися дислокациями частиц фазы-упрочнителя путем перерезания

«Выбор» дислокациями способа преодоления частиц-упрочнителей зависит от ряда факторов. Преодоление путем обхода при прочих одинаковых условиях реализуется легче, как менее энергоемкий способ, однако если расстояние между частицами D_p настолько мало, что дислокации не могут пройти между ними при достигаемых критических напряжениях сдвига, то частицы преодолеваются путем перерезания. Нетрудно определить расчетом верхний и нижний пределы расстояния между частицами, когда при деформационном упрочнении скользящие дислокации преодолевают частицы путем обхода. Возьмем в качестве нижнего предела напряжения, необходимого для расширения петли вокруг частиц, предел текучести матрицы, равный $G_M/1000$, а в качестве верхнего предела — теоретическую прочность при сдвиге, равную $G_M/30$ [3-2]. Подставив эти значения в уравнение (2.4) и приняв модуль вектора Бюргерса $b=18 \text{ \AA}$ [158], получим, что для эффективного упрочнения расстояния между частицами должны быть в пределах $D_p = 0,01 \dots 1,8 \text{ мкм}$, и тогда равенство (2.1) удовлетворяется при $V_B = 0,15 \dots 0,01$, когда размер дисперсных частиц $d_B \leq 1 \text{ мкм}$.

Таким образом, в дисперсно-упрочненных композиционных материалах реализуется механизм деформационного упрочнения, когда в матрице равномерно распределены частицы фазы-упрочнителя размером не более 1 мкм, составляющие от 1 до 15% объема материала.

Для недопущения переупрочнения формируемого покрытия необходимо контролировать глубину зарождения пластической области в процессе гальваноконтактного осаждения. Поскольку при контакте инструмента с восстанавливаемой поверхностью деформации подвергается не только верхний слой покрытия, но и нижележащие слои, то необходимо определить на какой глубине происходит зарождение наклепа. Это позволит контролировать степень упрочнения формируемых гальванических осадков при заранее заданной силе прижима инструмента.

2.2 Определение рациональной степени упрочнения формируемого композиционного покрытия

Моделью деформирования наносимого композиционного покрытия инструментом будет контактная задача, рассматривающая взаимодействие бесконечно длинного цилиндра с полупространством. Это будет справедливым, когда радиус кривизны инструмента много меньше радиуса кривизны восстанавливаемой детали. Краевыми эффектами контакта кромок инструмента с поверхностью детали можно пренебречь в связи с перекрытием соседними траекториями движения друг друга. Восстанавливаемая поверхность детали много больше площади контакта инструмента. Такая постановка вопроса приводит к трехмерной задаче теории упруго-пластического деформирования. При этом рассматриваемые тела можно считать телами вращения, а возникающие напряжения будут иметь осесимметричный характер.

Вводится цилиндрическая система координат r, θ, z с соответствующими компонентами перемещения u, v, w . При этом перемещение v обращается в ноль, а остальные составляющие являются функциями r . В связи с этим компоненты напряжений не зависят от θ , а компоненты касательных напряжений $\tau_{r\theta}$ и $\tau_{\theta z}$ равны нулю.

Компоненты деформаций определяются следующим образом:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \quad (2.5)$$

Вместо определяющих соотношений оказывается удобным ввести функцию напряжений φ , удовлетворяющую, тем не менее, требованиям этих соотношений. В этом случае функция напряжений справедлива для уравнения:

$$\nabla^2 \nabla^2 \varphi = 0 \quad (2.6)$$

А компоненты напряжения определяются как [157]:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right); & \sigma_\theta &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \nabla^2 \varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right); \\ \sigma_z &= \frac{\partial}{\partial z} \left((2-\nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right); & \tau_{rz} &= \frac{\partial}{\partial r} \left((1-\nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right); \end{aligned} \quad (2.7)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

В сферических координатах R, θ, ψ выражение (2.6) запишется в виде:

$$\begin{aligned} &\left(\frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \operatorname{ctg} \psi \frac{\partial}{\partial \psi} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \psi^2} \right) \times \\ &\times \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial \varphi}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \operatorname{ctg} \psi \frac{\partial \varphi}{\partial \psi} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \psi^2} \right) = 0, \end{aligned} \quad (2.8)$$

где связь между введенными системами координат устанавливается следующими соотношениями:

$$R = \sqrt{r^2 + z^2}; \quad \psi = \arccos \frac{r}{\sqrt{r^2 + z^2}}. \quad (2.9)$$

Нетрудно заметить, что решение уравнения Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial \varphi}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \operatorname{ctg} \psi \frac{\partial \varphi}{\partial \psi} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \psi^2} = 0 \quad (2.10)$$

также будет решением (2.8). При этом частное решение (2.10) надо искать в виде [134, 159]:

$$\varphi_n = R^n \Psi_n, \quad (2.11)$$

причем Ψ_n – некоторая функция одной переменной ψ , а n – некоторое натуральное число.

Подставляя (2.11) в (2.10) и производя замену переменной $x = \cos\psi$ получим уравнение, решение которого позволит определить вид функции Ψ_n :

$$(1-x^2)\frac{d^2\Psi_n}{dx^2} - 2x\frac{d\Psi_n}{dx} + n(n+1)\Psi_n = 0. \quad (2.12)$$

Полученное уравнение является уравнением Лежандра [134]. Из теории многочленов Лежандра [159] известно, что выражения вида:

$$X_n(x) = c_n \frac{d^n(x^2-1)^n}{dx^n} \quad (2.13)$$

при значении постоянного коэффициента $c_n = \frac{1}{2^n \cdot n!}$, (обозначаются в этом случае – $P_n(x)$) имеют специальный вид: в точках $x = \pm 1$ принимают значения соответственно 1 и $(-1)^n$, что при вычислении значений n -ого элемента последовательности (2.13) даёт ряд преимуществ. Для цели исследования наиболее существенным является тот факт, что полиномы вида:

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n \cdot n!} \frac{d^n(x^2-1)^n}{dx^n} \quad (2.14)$$

удовлетворяют соотношению (2.12).

Каждое из выражений (2.13) можно умножить на произвольную константу A_n без умаления общности. Переходя к цилиндрическим координатами решение (2.14) запишется в виде:

$$P_n(x) = \frac{A_n}{2^n \cdot n!} \frac{d^n \left[(-1)^n \sin^{2n} \left(\arccos \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right) \right]}{d \left(\frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right)^n} \quad (2.15)$$

Нетрудно показать, что выражение $R^{n+2}\Psi_n$ также будет являться решением уравнения (2.8), т.к. оператор слева в нём преобразует выражение R^2 в

постоянную величину. Применяя этот оператор ко всему выражению $R^{n+2}\Psi_n$, будем иметь:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \operatorname{ctg} \psi \frac{\partial}{\partial \psi} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2}{\partial \psi^2} \right) R^{n+2} \Psi_n = 2(2n+3) R^n \Psi_n \quad (2.16)$$

Тогда второе фундаментальное решение (функция Лежандра второго рода) будет иметь вид:

$$Q_n(x) = \frac{B_n}{2^n \cdot n!} \cdot R^2 \cdot \frac{d^n (x^2 - 1)^n}{dx^n} \quad (2.17)$$

А в цилиндрических координатах:

$$Q_n(x) = \frac{B_n}{2^n \cdot n!} \cdot (r^2 + z^2) \cdot \frac{d^n \left[(-1)^n \sin^{2n} \left(\arccos \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right) \right]}{d \left(\frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right)^n} \quad (2.18)$$

Теперь можем определить распределение напряжений в случае действия силы, приложенной в произвольной точке бесконечного тела.

Для начала заметим, что функция напряжения вида:

$$\varphi_{-n-1} = R^{-n-1} \Psi_{-n-1}$$

для уравнения (2.10) также является решением и может быть записана в виде:

$$\varphi_{-n-1} = R^{-n-1} \Psi_n \quad (2.19)$$

Тогда первое семейство решений:

$$\varphi_k = \frac{A_n}{2^n \cdot n!} \cdot (r^2 + z^2)^{-\frac{n+1}{2}} \cdot \frac{d^n \left[(-1)^n \sin^{2n} \left(\arccos \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right) \right]}{d \left(\frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right)^n}, k \in \square \quad (2.20)$$

а второе семейство:

$$\varphi_k = \frac{B_n}{2^n \cdot n!} \cdot (r^2 + z^2)^{-\frac{n-1}{2}} \cdot \frac{d^n \left[(-1)^n \sin^{2n} \left(\arccos \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right) \right]}{d \left(\frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right)^n}, k \in \square \quad (2.21)$$

Взяв первое решение из (2.21) и, опуская индексы для констант интегрирования и функций напряжения, запишем:

$$\varphi = \frac{B}{\sqrt{r^2 + z^2}} \quad (2.22)$$

В этом случае компоненты напряжений согласно (2.7) будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= B \left((1-2\nu) \frac{z}{\sqrt{(r^2 + z^2)^3}} - \frac{3r^2 z}{\sqrt{(r^2 + z^2)^5}} \right); \\ \sigma_\theta &= B(1-2\nu) \frac{z}{\sqrt{(r^2 + z^2)^3}}; \\ \sigma_z &= -B \left((1-2\nu) \frac{z}{\sqrt{(r^2 + z^2)^3}} + \frac{3z^3}{\sqrt{(r^2 + z^2)^5}} \right); \\ \tau_{rz} &= -B \left((1-2\nu) \frac{r}{\sqrt{(r^2 + z^2)^3}} + \frac{3rz^2}{\sqrt{(r^2 + z^2)^5}} \right). \end{aligned} \quad (2.23)$$

Для определения неизвестной величины B поместим начало координат в центр действия сосредоточенной силы. Однако ввиду того, что в этой точке значения напряжений не определены, будем рассматривать начало координат как центр малой сферической полости, рассматривая усилия (2.23) действующими на её поверхности. Это связано с тем, что сосредоточенная сила в заданной точке пространства создает значительные напряжения, вызывающие пластическую деформацию вокруг точки приложения силы. Благодаря этому действие сосредоточенной силы можно заменить на распределенное давление по внутренней поверхности полусферы.

Из условия равновесия кольцевого элемента (рисунок 2.8) составляющая поверхностной силы в направлении оси Oz :

$$\bar{Z} = -(\tau_{rz} \sin \psi + \sigma_z \cos \psi). \quad (2.24)$$

Подставляя значения напряжений из (2.23) и переходя к цилиндрическим координатам в соответствии с (2.9) запишем:

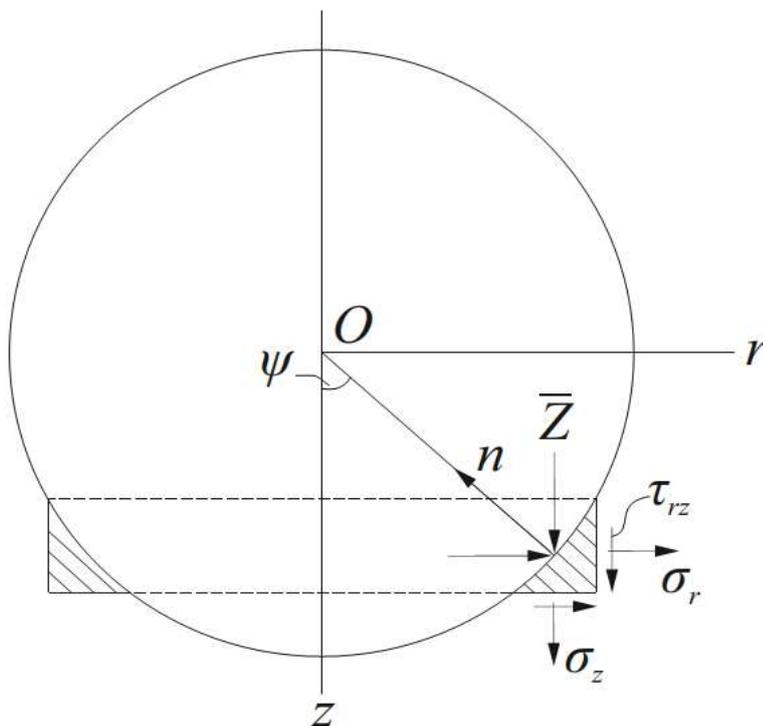


Рисунок 2.8 – Сила, приложенная в некоторой точке пространства

$$Z = B \left(\frac{1-2\nu}{r^2+z^2} + \frac{3z^2}{(r^2+z^2)^2} \right). \quad (2.25)$$

Результирующая этих сил по всей поверхности полости:

$$2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} Z \sqrt{r^2+z^2} \cdot 2\pi r \cdot d\psi = 8B\pi(1-\nu).$$

В пределе такая результирующая будет равна сосредоточенной силе P , действующей в данной точке пространства. Тогда для неизвестной константы будем иметь:

$$B = \frac{P}{8\pi(1-\nu)}. \quad (2.26)$$

Окончательно компоненты напряжений в рассматриваемом случае будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{P}{8\pi(1-\nu)} \left((1-2\nu) \frac{z}{\sqrt{(r^2+z^2)^3}} - \frac{3r^2z}{\sqrt{(r^2+z^2)^5}} \right); \\ \sigma_\theta &= \frac{P}{8\pi(1-\nu)} (1-2\nu) \frac{z}{\sqrt{(r^2+z^2)^3}}; \\ \sigma_z &= -\frac{P}{8\pi(1-\nu)} \left((1-2\nu) \frac{z}{\sqrt{(r^2+z^2)^3}} + \frac{3z^3}{\sqrt{(r^2+z^2)^5}} \right); \\ \tau_{rz} &= -\frac{P}{8\pi(1-\nu)} \left((1-2\nu) \frac{r}{\sqrt{(r^2+z^2)^3}} + \frac{3rz^2}{\sqrt{(r^2+z^2)^5}} \right). \end{aligned} \quad (2.27)$$

Рассчитаем распределение напряжений в случае действия двух сил, равных по величине и противоположных по знаку, находящихся на малом расстоянии друг от друга (d), приложенных к бесконечному упругому телу.

Действие первой силы в этом случае определяется совокупностью компонент напряжения, определяемых (2.27). Для вычисления результата влияния второй силы необходимо заменить всякую функцию вида $f(r,z)$ в (2.23) на $-f(r,z) + f'_z(r,z) \cdot d$.

Совокупное действие сил создаст следующие напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{Pd}{8\pi(1-\nu)} \frac{\partial}{\partial z} \left((1-2\nu) \frac{z}{\sqrt{(r^2+z^2)^3}} - \frac{3r^2z}{\sqrt{(r^2+z^2)^5}} \right); \\ \sigma_\theta &= -\frac{Pd}{8\pi(1-\nu)} \frac{\partial}{\partial z} \left((1-2\nu) \frac{z}{\sqrt{(r^2+z^2)^3}} \right); \\ \sigma_z &= \frac{Pd}{8\pi(1-\nu)} \frac{\partial}{\partial z} \left((1-2\nu) \frac{z}{\sqrt{(r^2+z^2)^3}} + \frac{3z^3}{\sqrt{(r^2+z^2)^5}} \right); \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\tau_{rz} = \frac{Pd}{8\pi(1-\nu)} \frac{\partial}{\partial z} \left((1-2\nu) \frac{r}{\sqrt{(r^2+z^2)^3}} + \frac{3rz^2}{\sqrt{(r^2+z^2)^5}} \right);$$

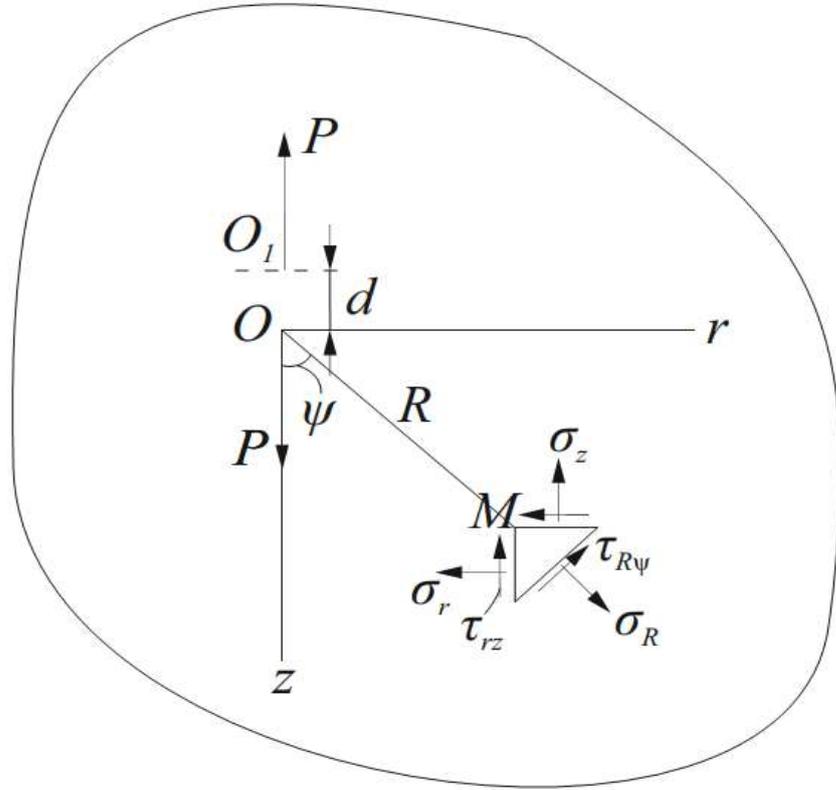


Рисунок 2.9 – Действие двух сил, достаточно близко расположенных друг к другу, на упругое тело

Для определения компонент напряжения в произвольно ориентированной площадке, перпендикулярной радиусу OM , перейдем к сферической системе координат (рисунок 2.9) и рассмотрим равновесие достаточно малого треугольного элемента.

$$\begin{aligned} \sigma_R &= \sigma_r \sin^2 \psi + \sigma_z \cos^2 \psi + 2\tau_{rz} \sin \psi \cos \psi, \\ \tau_{R\psi} &= (\sigma_r - \sigma_z) \sin \psi \cos \psi - \tau_{rz} (\sin^2 \psi - \cos^2 \psi). \end{aligned} \quad (2.29)$$

Учитывая формулы перехода от сферических к цилиндрическим координатам:

$$r = R \cos \psi; \quad z = R \sin \psi. \quad (2.30)$$

для компонент напряжений окончательно получим:

$$\sigma_R = -\frac{Pd(1+\nu)}{4\pi R^3(1-\nu)} \left[-\sin^2 \psi + \frac{2(2-\nu)}{1+\nu} \cos^2 \psi \right], \quad (2.31)$$

$$\tau_{R\psi} = -\frac{Pd(1+\nu)}{8\pi R^3(1-\nu)} \sin 2\psi.$$

Полученное распределение напряжений в сферических координатах будет симметричным как по отношению к оси z , так и по отношению к плоскости, нормальной ей.

Если видоизменить постановку задачи, добавив системы двух сил вдоль оси Or и вдоль оси перпендикулярной плоскости $r\theta z$, то получим распределение напряжений симметричное относительно начала координат. Рассмотрев сферу с центром в начале координат и радиусом R получим для радиального нормального напряжения:

$$\sigma_R = \frac{C_1}{R^3} + C_2, \quad (2.32)$$

где значения постоянных C_1 и C_2 определяются из начальных условий.

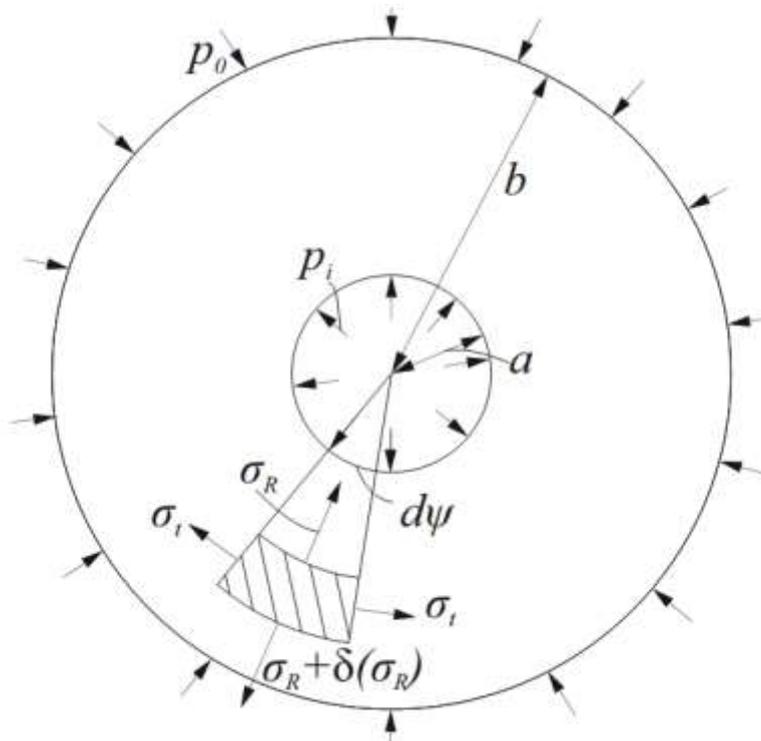


Рисунок 2.10 – Сила, приложенная в некоторой точке упругого тела

Возникающие в сфере нормальные напряжения σ_t определяются из равновесия малого элемента (заштрихованная часть сектора на рисунке 2.10):

$$\sigma_t = \frac{d\sigma_R}{dR} \frac{R}{2} + \sigma_R = -\frac{C_1}{2R^3} + C_2. \quad (2.33)$$

Определим теперь характер распределения напряжений в случае действия силы, приложенной на границе полубесконечного тела.

Пусть плоскость $z=0$ является границей такого тела (рисунок 2.11), а действие сосредоточенной силы P направлено вдоль оси $0z$. Распределение напряжений, определенное для действия силы в бесконечном теле (2.23), характеризует также случай полубесконечного тела, подверженного внешнему воздействию сосредоточенной силы в начале координат и касательных усилий на граничной плоскости $z=0$, определяемых согласно (2.27) выражением:

$$\tau_{rz} = -\frac{B(1-2\nu)}{r^2}. \quad (2.34)$$

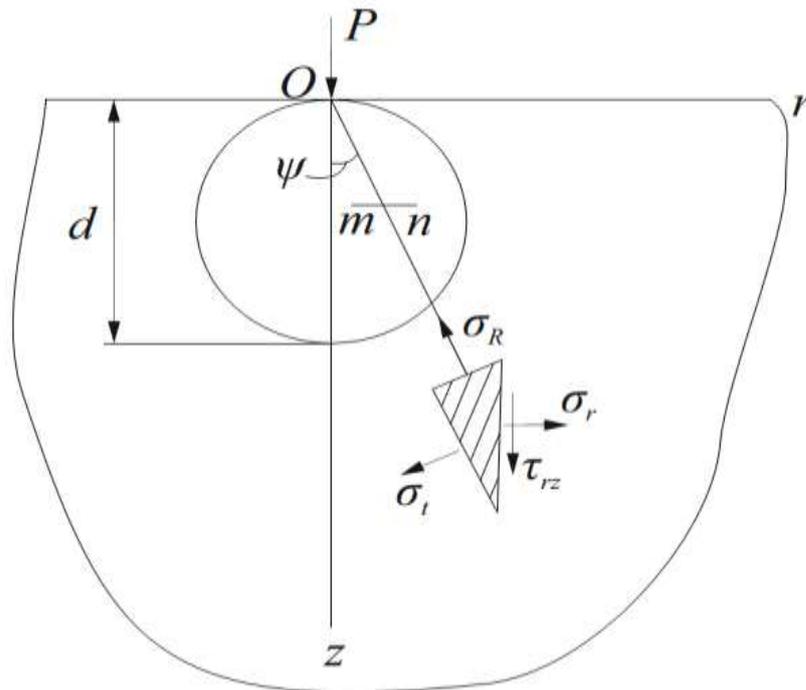


Рисунок 2.11 – Сила, приложенная на границе восстанавливаемой поверхности

Для того чтобы можно было компенсировать касательную составляющую тензора напряжений в рассматриваемом случае, воспользуемся распределением напряжений, отвечающих центру сжатия, рассмотренному выше (2.32), (2.33). В цилиндрических координатах указанные компоненты напряжения:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= A \frac{2r^2 - z^2}{2\sqrt{(r^2 + z^2)^5}}; & \tau_{rz} &= \frac{3Arz}{2\sqrt{(r^2 + z^2)^5}}; \\ \sigma_z &= A \frac{2z^2 - r^2}{2\sqrt{(r^2 + z^2)^5}}; & \sigma_\theta = \sigma_t &= -\frac{A}{2\sqrt{(r^2 + z^2)^5}}.\end{aligned}\quad (2.35)$$

Положим, что центры сжатия, определяемые (2.35), равномерно распределены вдоль всей оси $0z$ от 0 до ∞ . Тогда интегрируя их в указанном промежутке получим значения компонент напряжений в полубесконечном теле:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{A_1}{2} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2\sqrt{r^2 + z^2}} - \frac{z}{\sqrt{(r^2 + z^2)^3}} \right]; \\ \sigma_z &= \frac{A_1}{2} \frac{z}{\sqrt{(r^2 + z^2)^3}}; & \tau_{rz} &= \frac{A_1}{2} \frac{r}{\sqrt{(r^2 + z^2)^3}}; \\ \sigma_\theta &= -\frac{A_1}{2} \left[\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2\sqrt{r^2 + z^2}} \right].\end{aligned}\quad (2.36)$$

В плоскости $z=0$ согласно соотношению (2.36) касательное напряжение определяется формулой:

$$\tau_{rz} = -\frac{A_1}{2r^2}.\quad (2.37)$$

Комбинируя решения (2.23) и (2.37) константы A_1 и B можно подобрать таким образом, чтобы выполнялись два требуемых условия: плоскость $z=0$ была свободна от напряжений, в начале координат действовала сосредоточенная сила P .

Первое условие выполняется при равенстве правых частей (2.34), (2.37), откуда:

$$A_1 = 2B(1 - 2\nu). \quad (2.38)$$

Складывая соответствующие компоненты напряжений (2.23) и (2.36) с учетом (2.38), получаем распределение напряжений, удовлетворяющее первому граничному условию:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= B \left[(1 - 2\nu) \left(\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2 \sqrt{r^2 + z^2}} \right) - \frac{3r^2 z}{\sqrt{(r^2 + z^2)^5}} \right]; \\ \sigma_\theta &= B(1 - 2\nu) \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{z}{r^2 \sqrt{r^2 + z^2}} + \frac{z}{\sqrt{(r^2 + z^2)^3}} \right]; \\ \sigma_z &= -\frac{3Bz^3}{\sqrt{(r^2 + z^2)^5}}; \quad \tau_{rz} = -\frac{3Brz^2}{\sqrt{(r^2 + z^2)^5}}; \end{aligned} \quad (2.39)$$

Для определения константы B , рассмотрим равновесие элемента, представленного на рисунке 2.8. Компонента суммарных усилий в направлении оси Oz будет:

$$\bar{Z} = -(\tau_{rz} \sin \psi + \sigma_z \cos \psi). \quad (2.40)$$

Тогда для сосредоточенной силы можем записать:

$$P = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\bar{Z}r}{\sqrt{r^2 + z^2}} d\psi. \quad (2.41)$$

Вычисляя полученный интеграл, получим:

$$B = \frac{P}{2\pi}.$$

Подставим значение полученной постоянной в (2.39) и получим окончательно закон распределения напряжений, вызванных сосредоточенной силой, действующей на плоской границе полубесконечного тела:

$$\begin{aligned}
\sigma_r &= \frac{P}{2\pi} \left[(1-2\nu) \left(\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2 \sqrt{r^2+z^2}} \right) - \frac{3r^2 z}{\sqrt{(r^2+z^2)^5}} \right]; \\
\sigma_\theta &= \frac{P}{2\pi} (1-2\nu) \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{z}{r^2 \sqrt{r^2+z^2}} + \frac{z}{\sqrt{(r^2+z^2)^3}} \right]; \\
\sigma_z &= -\frac{3Pz^3}{2\pi \sqrt{(r^2+z^2)^5}}; \quad \tau_{rz} = -\frac{3Prz^2}{2\pi \sqrt{(r^2+z^2)^5}}.
\end{aligned} \tag{2.42}$$

Для определения деформаций, вызываемых найденными компонентами напряжений, запишем для горизонтального перемещения:

$$u = \frac{r}{E} (\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)),$$

откуда

$$u = \frac{(1-2\nu)(1+\nu)P}{2\pi Er} \left[\frac{z}{\sqrt{r^2+z^2}} - 1 + \frac{r^2 z}{(1-2\nu)\sqrt{(r^2+z^2)^3}} \right]. \tag{2.43}$$

Для вертикального перемещения:

$$\frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)); \quad \frac{\partial w}{\partial r} = \frac{2(1+\nu)\tau_{rz}}{E} - \frac{\partial u}{\partial z};$$

подставляя компоненты напряжений получим:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial w}{\partial z} &= \frac{P}{2\pi E} \left[\frac{3(1+\nu)r^2 z}{\sqrt{(r^2+z^2)^5}} - \frac{(3+\nu(1-2\nu))z}{\sqrt{(r^2+z^2)^3}} \right]; \\
\frac{\partial w}{\partial r} &= -\frac{P(1+\nu)}{2\pi E} \left[\frac{2(1-\nu)r}{\sqrt{(r^2+z^2)^3}} + \frac{3rz^2}{\sqrt{(r^2+z^2)^5}} \right].
\end{aligned}$$

Интегрируя полученные соотношения и принимая постоянную интегрирования равной нулю, окончательно для вертикального перемещения получим:

$$w = \frac{P}{2\pi E} \left(\frac{(1+\nu)z^2}{\sqrt{(r^2+z^2)^3}} + \frac{2(1-\nu^2)}{\sqrt{r^2+z^2}} \right). \quad (2.44)$$

Имея решение для перемещений в случае действия сосредоточенной силы (2.44), можно расширить его для случая равномерно распределенной нагрузки.

Рассмотрим случай равномерной нагрузки, распределенной по внутренней поверхности круга радиуса a (рисунок 2.12). Для начала определим перемещения в направлении действия нагрузки произвольной точки M , расположенной вне круга. Выбрав малый элемент (заштрихован на рисунке) нагруженной площади, получим, что нагрузка на него составляет $qsdsd\psi$. Тогда, проводя суммирование по всем таким элементам в пределах круга, согласно (2.44) соответствующее

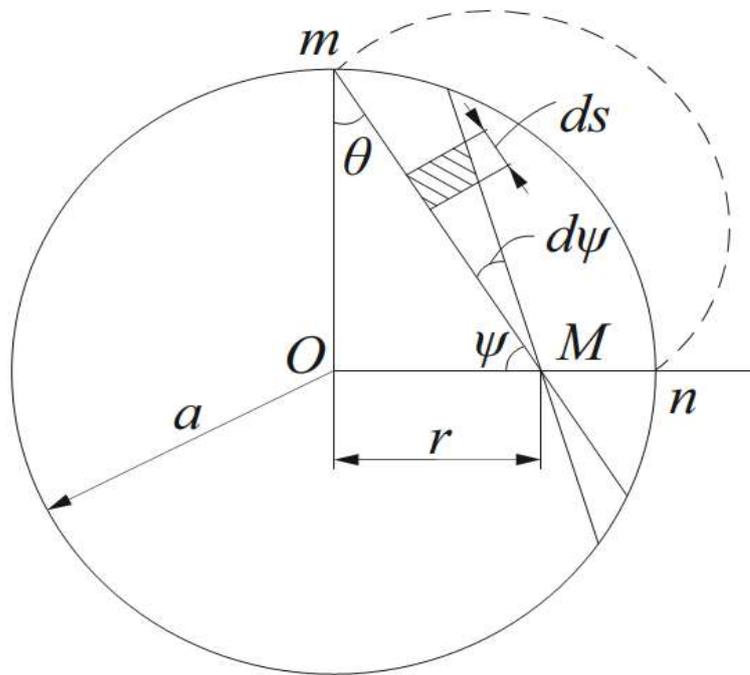


Рисунок 2.12 – Равномерная нагрузка, действующая на границу восстанавливаемой поверхности детали

перемещение точки M на поверхности детали будет:

$$w = \frac{(1-\nu^2)q}{\pi E} \iint ds d\psi.$$

Длина хорды mn равна $2a\cos\theta$, а ψ меняется в пределах от 0 до $\pi/2$. Кроме того, имеет место соотношение: $a\sin\theta = r\sin\psi$. С учётом этого для перемещения будем иметь:

$$w = \frac{4(1-\nu^2)qa}{\pi E} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\sin\psi\right)^2} d\psi. \quad (2.45)$$

Используя таблицы эллиптических интегралов, можно определить значение (2.45) для конкретных значений отношений r/a .

Наконец, пусть теперь имеем контакт цилиндрического тела с восстанавливаемой деталью. Радиус кривизны инструмента – R_2 . В случае, когда между соприкасающимися телами не действует давление, касание происходит по прямой.

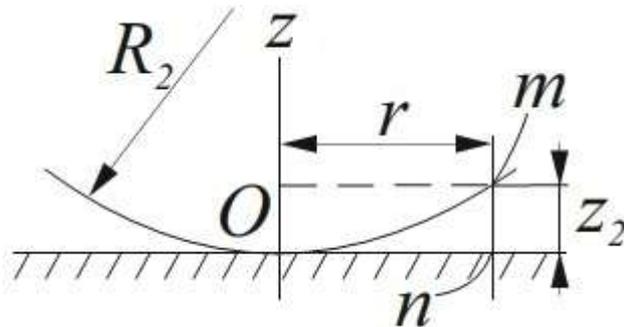


Рисунок 2.13 – Контакт цилиндра с полупространством

Расстояние mn можно с достаточной точностью представить в виде (рисунок 2.13):

$$z_2 = \frac{r^2}{2R_2}. \quad (2.46)$$

Отрезок On будет определять половину поверхности контакта инструментального бруска в рассматриваемом сечении. Принимая условие $r \ll R_2$,

где r – радиус пятна контакта, можем воспользоваться приближением (2.46) для дальнейших расчетов.

Пусть w_2 – перемещение точек поверхности детали в зоне контакта, вызванное местной деформацией в направлении z_2 для точки m цилиндра. Полагая, что в процессе местного сжатия плоскость касания остается неподвижной, можно сказать, что точки m и n сблизятся друг с другом на некоторую величину α , а расстояние между ними станет: $\alpha - w_2$. Когда же они войдут в область контакта, то

$$\alpha - w_2 = z_2. \quad (2.47)$$

Теперь рассмотрим местные деформации. Давление инструмента на обрабатываемую поверхность q из соображений симметрии совпадает с обеих сторон относительно точки O . Тогда, принимая точку M (рисунок 2.12) за точку на поверхности контакта, перемещения w_2 этой точки запишутся в виде (2.45). А с учетом (2.47), можем записать:

$$\frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \iint q ds d\psi = \alpha - \frac{r^2}{2R_2}. \quad (2.48)$$

Для определения перемещений в зоне контакта необходимо найти такое выражения для q , которое удовлетворяло бы соотношению (2.48). Можно показать, что это соотношение выполняется, когда распределение давления по поверхности контакта определяется координатами радиуса цилиндрического инструмента – a , построенного на этой поверхности. Распределение давления по поверхности контакта происходит также, как представлено на рисунке 2.12 пунктирной линией. В этом случае выражение (2.48) принимает вид:

$$\frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[\frac{q_0}{a} \cdot (a^2 - r^2 \sin^2 \psi) \right] d\psi = \alpha - \frac{r^2}{2R_2}, \quad (2.49)$$

где q_0 – давление в центре поверхности контакта. Производя интегрирование, окончательно получим:

$$\frac{1-\nu_2^2}{E_2} \cdot \frac{q_0 \pi}{4a} (2a^2 - r^2) = \alpha - \frac{r^2}{2R_2}. \quad (2.50)$$

Поскольку выражение (2.50) должно выполняться при любых значениях радиуса пятна контакта r , то принятое распределение давления корректно лишь в том случае, когда искомые перемещение и радиус поверхности контакта определяются следующими выражениями:

$$\alpha = \left[q_0 \cdot \frac{(1-\nu_2^2)\pi}{2E_2} \right]^2 R_2, \quad a = q_0 \cdot \frac{(1-\nu_2^2)\pi R_2}{2E_2}. \quad (2.51)$$

Значение максимального давления можно получить, приравняв сумму давлений по площади контакта к давлению цилиндра, определяемому величиной давления инструмента на восстанавливаемую поверхность:

$$\frac{q_0}{a} \cdot \frac{1}{2} \pi a^2 H = P,$$

где H – высота цилиндра.

Тогда

$$q_0 = \frac{2\sqrt{E_2 P}}{\pi \sqrt{R_2 H (1-\nu_2^2)}}. \quad (2.52)$$

Подставляя выражение для q_0 из (2.52) в (2.51) для контакта цилиндра с обрабатываемой поверхностью окончательно получим:

$$\alpha = \frac{P(1-\nu_2^2)}{E_2 H}, \quad a = \sqrt{\frac{PR_2(1-\nu_2^2)}{E_2 H}}. \quad (2.53)$$

Для определения возникающих в этом случае компонент напряжений воспользуемся принципом суперпозиции уже полученных решений. Определим напряжения в точке, лежащей на оси $0z$ (рисунок 2.11). Напряжение σ_z , возникающее в такой точке, распределено по поверхности контакта цилиндра с поверхностью детали. Его можно получить, подставляя в соответствующее

значение компоненты напряжения из (2.42) вместо P величины $Hdrq$. Тогда напряжение σ_z , вызываемое равномерной нагрузкой, будет:

$$\sigma_z = -\frac{3Hz^3q}{2\pi} \int_{-a}^a \frac{dr}{\sqrt{(r^2 + z^2)^5}}.$$

Интегрируя, для σ_z окончательно получим:

$$\sigma_z = -\frac{Hq}{\pi} \cdot \frac{a(2a^2 + 3z^2)}{z\sqrt{(a^2 + z^2)^3}}. \quad (2.54)$$

Аналогично для остальных компонент напряжений будем иметь:

$$\sigma_r = \int_{-a}^a \frac{Hq}{2\pi} \left((1-2\nu) \left(\frac{1}{r^2} - \frac{z}{r^2\sqrt{r^2 + z^2}} \right) - \frac{3r^2z}{\sqrt{(r^2 + z^2)^5}} \right) dr;$$

$$\sigma_\theta = \int_{-a}^a \frac{Hq(1-2\nu)}{2\pi} \left(\frac{z}{r^2\sqrt{r^2 + z^2}} - \frac{1}{r^2} + \frac{z}{\sqrt{(r^2 + z^2)^3}} \right) dr.$$

После интегрирования получим:

$$\sigma_r = \frac{Hq}{\pi} \cdot \frac{(1-2\nu)\sqrt{(a^2 + z^2)^3}(\sqrt{a^2 + z^2} - z) - a^4}{az\sqrt{a^2 + z^2}};$$

$$\sigma_\theta = \frac{(1-2\nu)Hq}{\pi} \cdot \frac{a^2 + z\sqrt{a^2 + z^2} - z^2}{az\sqrt{a^2 + z^2}};$$
(2.55)

Предполагая, что течение материала определяется условием пластичности Треска – Сен-Венана, определим точку зарождения пластической области на оси $0z$. Нетрудно проверить из (2.54) и (2.55), что компоненты напряжений в данном случае будут распределены следующим образом:

$$\sigma_z < \sigma_r < \sigma_\theta. \quad (2.56)$$

Условие пластичности примет вид:

$$\frac{(1-2\nu)Hq_0}{\pi} \cdot \frac{a^2 + z\sqrt{a^2 + z^2} - z^2}{az\sqrt{a^2 + z^2}} + \frac{Hq_0a}{\pi} \cdot \frac{2a^2 + 3z^2}{z\sqrt{(a^2 + z^2)^3}} = k. \quad (2.57)$$

Вводя обозначение:

$$K_1 = \frac{ak\pi}{Hq_0}, \quad (2.58)$$

выражение (2.57) можно переписать в виде:

$$(1-2\nu - K_1)z\sqrt{(a^2 + z^2)^3} = (1-2\nu)z^4 - 3a^2z^2 - (3-2\nu)a^4.$$

В связи с громоздкостью дальнейших вычислений подставляем значения известных постоянных величин в последнее выражение. После преобразований получим:

$$\sqrt{z^2(8.95 \cdot 10^{-7} + z^2)}(0.3z^2 + 2.68 \cdot 10^{-7}) = 0.3z^4 - 2.69 \cdot 10^{-6}z^2 - 1.84 \cdot 10^{-12}.$$

Вводя замену переменной $z^2 = \zeta$, окончательно будем иметь:

$$0.81\zeta^3 - 5.92 \cdot 10^{-12}\zeta^2 - 9.84 \cdot 10^{-18}\zeta - 3.39 \cdot 10^{-24} = 0. \quad (2.59)$$

Полученное уравнение имеет один вещественный корень: $\zeta = 1.64 \cdot 10^{-8}$. Переходя к исходной переменной, получим окончательно для глубины зарождения пластичности в формируемом покрытии: $z = 127$ мкм.

Таким образом, установлено, что давление инструмента вызывает в покрытии пластические деформации. Причем граница пластической области зарождается не на поверхности покрытия, а на определенной глубине z , создавая разветвленную сетку трещин. Поэтому в процессе нанесения композиционного покрытия необходимо корректировать давление инструмента до получения необходимой степени упрочнения формируемых слоёв.

Поставленная в работе цель повышения надёжности гидроприводов сельскохозяйственной техники путем нанесения на их контактные поверхности износостойких композиционных герметичных покрытий с высокой коррозионной защитой и минимальным наводораживанием в процессе обработки достижима при применении способов, создающих стабильную деформацию наносимых слоев

и контролируемый массовый перенос частиц второй фазы в гальваническую матрицу. Это в совокупности обеспечивает необходимую степень деформации покрытия, позволяющую создать напряжения сжатия и, одновременно, не допускающую его переупрочнение и, как следствие, разрушение.

Предлагаемая концепция позволяет реализовать возможности процесса нанесения ДУГКП и получать детали с покрытиями при высокой производительности, а также физико-механическими и, как следствие, эксплуатационными свойствами, недостижимыми ни одним из известных методов получения покрытий. При этом не требуются дополнительные площади, расширяется область применения процесса не только в основном, но и в ремонтном производстве. Устраняются такие недостатки традиционной технологии, как брак из-за негерметичности по хрому, повышается усталостная прочность и другие физико-механические и эксплуатационные свойства деталей с покрытиями. Кроме того, существенно снижается трудоемкость их изготовления за счет устранения из технологического процесса ряда подготовительных и финишных операций.

На базе научной концепции возможна разработка и применение системы физических и математических критериев и моделей, позволяющих локализовать выбор режимов для различных технологических применений метода.

2.3 Влияние шероховатости обрабатываемой детали на качество получаемых покрытий

Рассмотрим контакт двух шероховатых поверхностей, при котором взаимодействуют разнородные тела с различными физико-механическими свойствами: двухкомпонентный композиционный инструмент и металлическая подложка. Шероховатость контактирующих тел по высотным параметрам отличается от 1,5 до 10 раз. Контакт происходит при качении в широком диапазоне скоростей. Градиент температур в инструменте и детали различный,

шероховатость взаимодействующих тел, а также их микрогеометрия изменяются в пределах цикла обработки одной детали.

В общем случае имеет место упруго-пластический контакт. Однако в каждом конкретном случае преобладает либо упругая, либо пластическая деформация. Контроль выбора расчётной схемы контакта производится экспериментальным путём по величине остаточной деформации.

В начальный период контактирование может происходить по контурной площади ввиду макроотклонений детали и инструмента, их несоосности, вибраций. В процессе обработки контурная площадь приближается к номинальной и становится равной ей.

При взаимодействии инструмента с деталью происходит контактирование шероховатой (инструмент) и волнистой (деталь) поверхностей. Инструмент представляет собой композицию оксида алюминия и карбида титана. Вследствие случайного расположения различных фаз композиционных материалов в инструменте их можно рассматривать как дополнительную шероховатость.

Контакт инструмента с деталью будем считать статическим, а динамику процесса впоследствии учтем введением коэффициентов динамики, определяемых экспериментально. Примем микронеровности поверхности в качестве сферических сегментов с радиусом $\rho_{св}$ для связки инструмента и $\rho_{д}$ для детали, имеющими случайную высоту. Зерна композиционного материала моделируются сферами с радиусом $\rho_{а}$, выступающая часть которых имеет случайную высоту. Волны на поверхности детали моделируются сферическими сегментами с радиусом $R_{и}$ для инструмента и $R_{д}$ для детали.

Рассмотрим произвольную шероховатую поверхность. Выберем определенный участок на этой поверхности с площадью A_c , называемой контурной площадью данного участка поверхности. Поверхность детали назовем базовой поверхностью. Проведем поверхность, параллельную базовой и отстоящую от неё на расстоянии h . Обозначим сумму площадей сечений микронеровностей на уровне h через A_s , а максимальную высоту микронеровностей – через R_{max} .

В этом случае относительное сближение поверхностей определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{R_{\max} - h}{R_{\max}}, \quad (2.60)$$

а относительная площадь сечения профиля:

$$t_p = \frac{A_s}{A_c}. \quad (2.61)$$

Обозначим y – расстояние от некоторой точки шероховатой границы поверхности до базовой поверхности. Тогда вероятность выполнения неравенства $y \geq h$ будет определяться:

$$P_r(y \geq h) = t_p.$$

Предполагая закон распределения композиционного материала в шероховатом слое нормальным и вводя обозначение:

$$\Theta = \frac{y}{R_{\max}},$$

при выполнении неравенства:

$$0 \leq t_p \leq 0,5S_m,$$

выражение для относительной площади сечения аппроксимируется степенной зависимостью:

$$t_p = b\varepsilon^v, \quad (2.62)$$

где S_m – отношение суммарной площади оснований микронеровностей к контурной площади;

b и v – параметры кривой опорной поверхности, определяемые по профиллограммам (для нормального закона распределения $b=4$, $v=3$).

При

$$t_p > 0,5S_m,$$

кривая опорной поверхности аппроксимируется такой же зависимостью, но с другими параметрами b' и v' , которые для случая:

$$0,5S_m < t_p \leq 0,75S_m,$$

определяются:

$$\begin{aligned} v' &= 2tg\beta_1\varepsilon_{0,5}, \\ b' &= \frac{0,5}{\varepsilon_{0,5}^{v'}}, \end{aligned} \quad (2.63)$$

где β_1 – угол наклона опорной кривой в средней части ($t_p=0$),

$\varepsilon_{0,5}$ – относительное сближение в этом случае.

Относительная опорная длина профиля выше уровня средней линии на основании [155, 168] может быть определена:

$$T_{p1} = t_m \left(\frac{pR_{\max}}{100R_m} \right)^{\left(\frac{t_m R_m - 1}{50R_a} \right)}, \quad (2.64)$$

а для уровня ниже средней линии:

$$T_{p2} = 100 - t_m \left(\frac{R_{\max}(100 - p)}{100(R_{\max} - R_m)} \right)^{\left(\frac{50R_a - t_m R_m}{50R_a} \right)}, \quad (2.65)$$

где t_m – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии, мм;

R_m – расстояние между линией выступов и средней линией, мм;

R_a – расстояние сближения контактируемых тел, мм.

Зная относительную площадь сечения контактируемых поверхностей и учитывая опорную длину профиля, можно проводить корректировку усилий прижима инструмента к обрабатываемой детали с учетом её истинной шероховатости, создавая требуемую степень упрочнения.

2.4 Выводы по главе

1. Предложена модель для расчета размеров наполнителя композиционного материала с целью обеспечения заданных физико-механических свойств получаемых покрытий.

2. Представлен алгоритм прогнозирования напряжений, полученных в

композиционном покрытии при определенных условиях осаждения.

3. Построена модель, описывающая характер взаимодействия инструмента с покрытием, учитывающая дислокационную структуру осаждаемого композиционного гальванического слоя.

4. Определена глубина зарождения пластической деформации в покрытии, что позволило спроектировать технологическое оборудование с возможностью корректировки давления инструмента на поверхность осадка.

5. Построена модель, определяющая площадь контакта инструмента с деталью и учитывающая микронеровности обоих тел, что позволило корректно определять величину прижима композиционного инструмента для создания необходимой степени упрочнения формируемого дисперсно-упрочненного покрытия.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа исследований

Программа исследований в представленной работе состояла из нескольких этапов, посвящённых решению цели работы. Общий вид программы исследований представлен на рисунке 3.1.

При проведении исследований с целью уменьшения статистической ошибки эксперимента соблюдались следующие условия процесса:

- поддержание постоянного давления инструмента во время нанесения финишного слоя покрытия на восстанавливаемую деталь;
- соблюдение соответствия величины режимных параметров (плотности тока, температуры электролита, давления инструмента, скорости вращения шпинделя установки) со значениями, определяемыми технологией;
- контроль степени износа инструмента.

Одним из наиболее важных моментов при нанесении гальванических покрытий является качество подготовки восстанавливаемой поверхности для нанесения хрома и последующая финишная обработка нанесенного слоя [23, 55, 56]. В связи с этим, все детали, подлежащие нанесению покрытия, проходили одинаковую предварительную подготовку. Систематическая погрешность представляет собой определенную функцию влияющих факторов, состав которых зависит от физических, конструктивных и технологических особенностей средств измерений, условий их применения, а также индивидуальных качеств наблюдателя. Для устранения постоянных систематических погрешностей применяли следующие методы:

- метод замещения, представляющий собой разновидность метода сравнения, когда сравнение осуществляется заменой измеряемой величины известной величиной, причем так, что при этом в состоянии и действии всех используемых средств измерений не происходит никаких изменений;

- метод противопоставления, являющийся разновидностью метода сравнения, при котором измерение выполняется дважды и проводится так, чтобы в обоих случаях причина постоянной погрешности оказывала разные, но известные по закономерности воздействия на результаты наблюдений [23];

- метод компенсации погрешности по знаку (метод изменения знака систематической погрешности), предусматривающий измерение с двумя наблюдателями, выполняемыми так, чтобы постоянная систематическая погрешность входила в результат каждого из них с разными знаками слоя [56];

- метод рандомизации - наиболее универсальный способ исключения неизвестных постоянных систематических погрешностей. Суть его состоит в том, что одна и та же величина измеряется различными методами (приборами). Систематическая погрешность каждого из них для всей совокупности являются разными случайными величинами. Вследствие этого при увеличении числа используемых методов (приборов) систематические погрешности взаимно компенсируются [56].

Для устранения переменных и монотонно изменяющихся систематических погрешностей применялись следующие приемы и методы.

- Анализ знаков неисправленных случайных погрешностей. Если знаки неисправленных случайных погрешностей чередуются с какой-либо закономерностью, то наблюдается переменная систематическая погрешность. Если последовательность знаков «+» у случайных погрешностей сменяется последовательностью знаков «-» или наоборот, то присутствует монотонно изменяющаяся систематическая погрешность. Если группы знаков «+» и «-» у случайных погрешностей чередуются, то присутствует периодическая систематическая погрешность [23];

- Графический метод. Заключается в построении графика последовательности неисправленных значений результатов наблюдений. На графике через построенные точки проводят плавную кривую, которая выражает тенденцию результата измерения, если она существует. Если тенденция не

прослеживается, то переменную систематическую погрешность считают практически отсутствующей [56].

- Метод симметричных наблюдений. Сводится к рассмотрению измерительного преобразователя, передаточная функция которого имеет вид $y=kx+b$; где x , y – входная и выходная величина преобразователя соответственно; k – коэффициент, погрешность которого изменяется во времени по линейному закону; b – постоянная [56].

3.2 Методика получения дисперсно-упрочненных композиционных гальванических покрытий

3.2.1 Изготовление инструмента для нанесения композиционных дисперсно-упрочненных покрытий

Процесс создания инструментов для получения дисперсно-упрочненных композиционных покрытий предусматривает приобретение порошков оксида алюминия (Al_2O_3 ГОСТ 28818-90) и карбида титана (TiC ГОСТ 28377-89), измельчение порошка до необходимого размера, приготовление смеси карбидов в необходимой пропорции, прессование заготовок из этих смесей и последующее их спекание, механическую обработку пластин, мойку.

Для размола применяли атриторную мельницу фирмы Netzsch Attritor, модель PRK 32-S.

Барабан атриторной мельницы представлен на рисунке 3.3, а его схема на рисунке 3.4. Это неподвижный водоохлаждаемый стальной барабан, футерованный изнутри твердосплавными пластинами. В барабан загружают размалываемую смесь – пульпу и размалывающие тела – твердосплавные шары диаметром 5...15 мм. Последние приводятся в движение лопастной крестовиной (мешалкой), также армированной твердым сплавом.



Рисунок 3.1 – Программа научных исследований



Рисунок 3.2 – Атриторная мельница
фирмы Netzsch Attritor, модель PRK 32-S



Рисунок 3.3 – Барабан атриторной мельницы
фирмы Netzsch Attritor, модель PRK 32-S

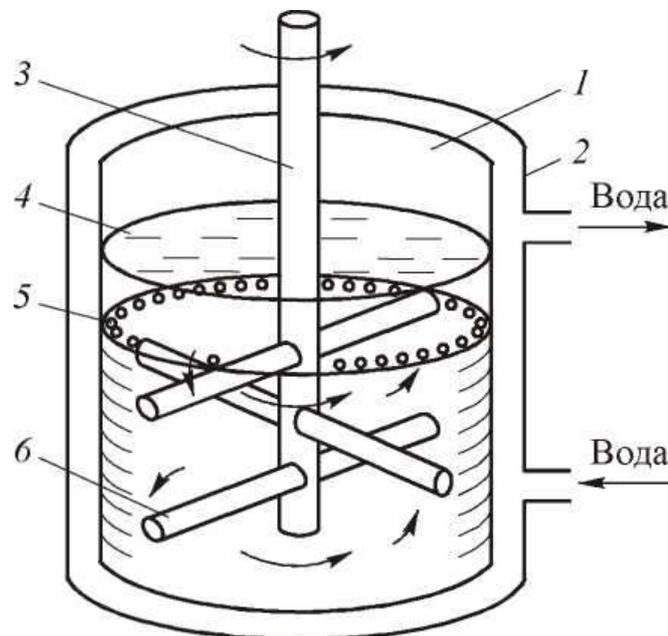
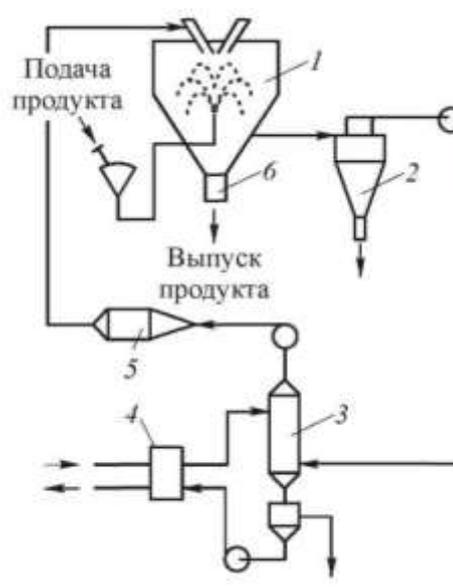


Рисунок 3.4 – Схема атриторной мельницы

- 1 - размольная емкость; 2 - рубашка водоохлаждаемого кожуха; 3 - вал мешалки;
4 - размалываемая смесь-пульпа; 5 - размалывающие тела; 6 - лопасти мешалки



а)



б)

Рисунок 3.5 – Установка (а) модели НС-120 фирмы Niro Atomizer (Дания) для сушки распылением пульпы твердосплавной смеси после размола компонентов в спирте и ее схема (б)

- 1 - сушильная камера; 2 - циклон; 3 - скруббер-конденсатор; 4 - холодильник;
5 - подогреватель; 6 - разгрузочный бункер

При пластифицировании полученной смеси важно обеспечить равномерное распределение пластификатора в смеси, а также удалить из смеси воздух, который вызывает появление вздутий на поверхности и раковин внутри прессованных пластин. Для борьбы с этим явлением пластифицирование осуществляют в вакуумной установке с подогревом смеси до температуры 38...42 °С горячей водой. Внешний вид которой изображен на рисунке 3.6 а, а принципиальная схема на рисунке 3.6 б.

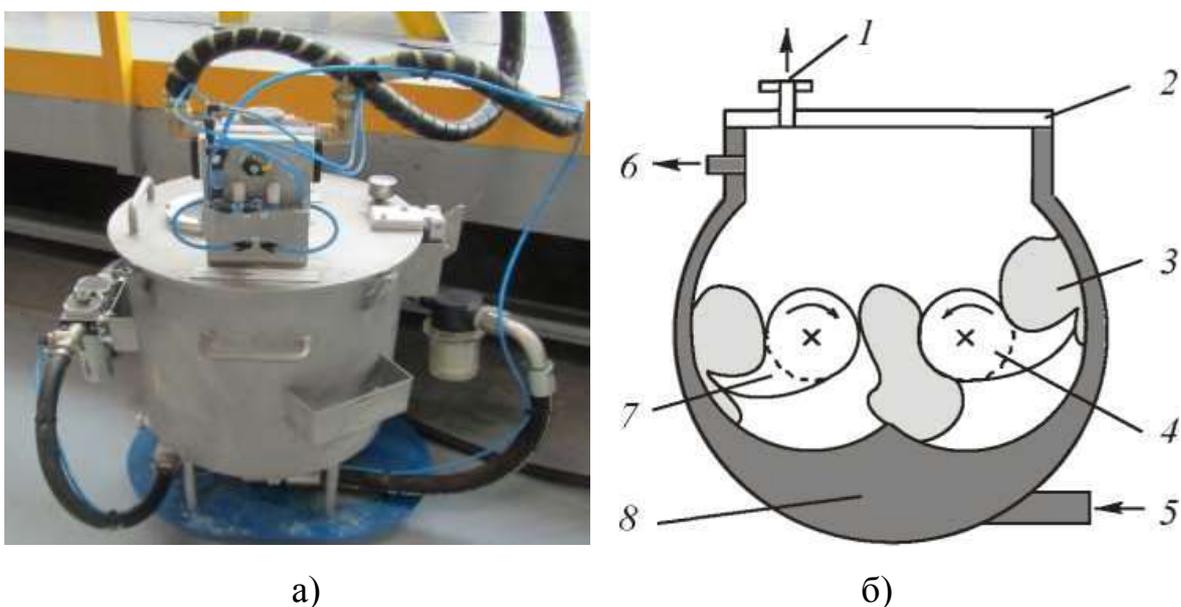


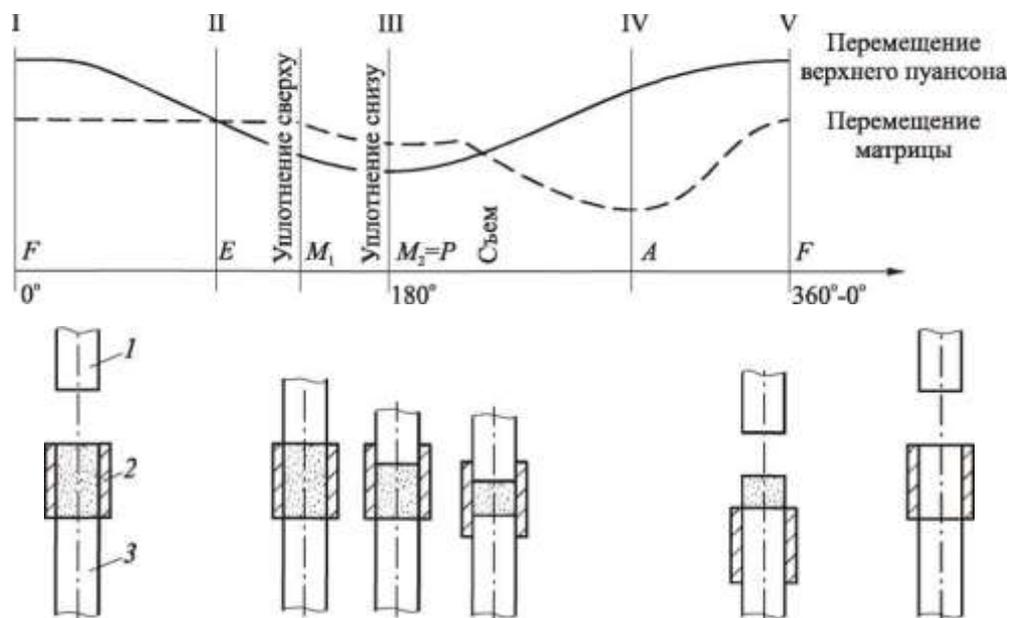
Рисунок 3.6 – Вакуумная установка для пластифицирования смеси порошков (а) и ее схема (б)

1 - к вакуумному насосу; 2 - крышка; 3 - перемешиваемая масса; 4, 7 - лопасти;
5 - вход горячей воды, 6 - выход горячей воды; 8 - фасонный корпус

Прессование заготовок инструмента выполняли на пресс-автомате КА 0624, внешний вид которого показан на рисунке 3.7 а.



а)



б)

Рисунок 3.7 – Внешний вид (а) и циклограмма работы пресс-автомата модели КА 0624 (б)

1 - верхний пуансон; 2 - матрица; 3 - нижний пуансон



Рисунок 3.8 – Общий вид вакуумно-компрессионной печи MEAPFORNI (Италия)

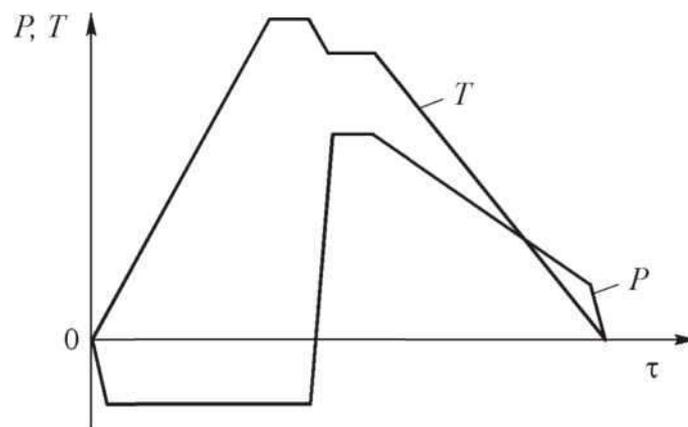


Рисунок 3.9 – Рабочий цикл совмещенного процесса спекания и газостатической обработки твердосплавной заготовки

P - давление, T - температура, τ - время

После спекания инструментальные заготовки шлифовали по опорным поверхностям, радиусам и фаскам на передних поверхностях (плоскошлифовальный станок ELB Star 2). Это делалось в связи с тем, что надежность спеченного инструмента сильно зависит от качества их опорных поверхностей, а также точности пластин и особенно от точности расположения их задних поверхностей и вершин.



Рисунок. 3.10 – Двухсторонний плоскошлифовальный станок ELB Star 2

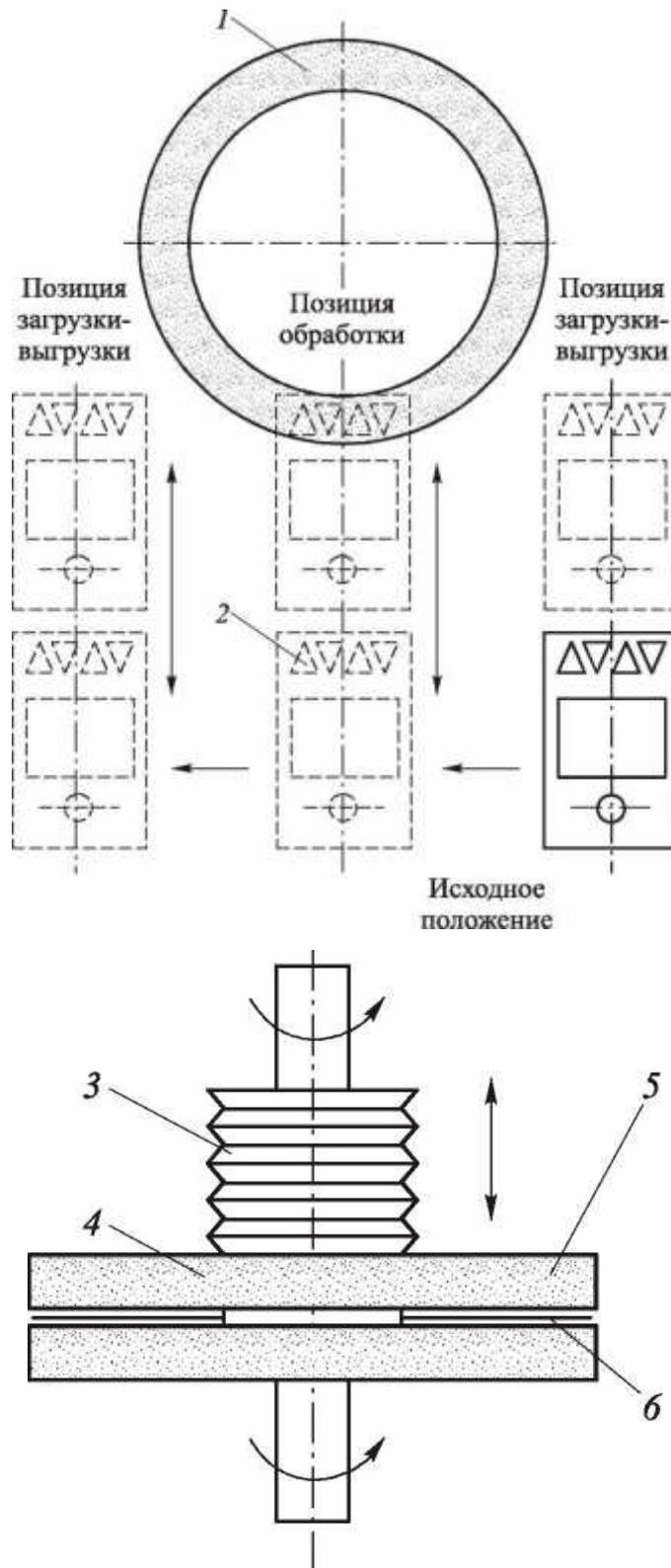


Рисунок 3.11 – Схема двухстороннего алмазного шлифования на двухстороннем плоскошлифовальном станке ELB Star 2

1 - нижний алмазный круг; 2 - твердосплавная пластина; 3 - эластичный кожух;
4 - толкатель; 5 - верхний алмазный круг; 6 - сепаратор



Рисунок 3.12 – Плоскошлифовальный станок с ЧПУ АВА-S-FPE-60-30

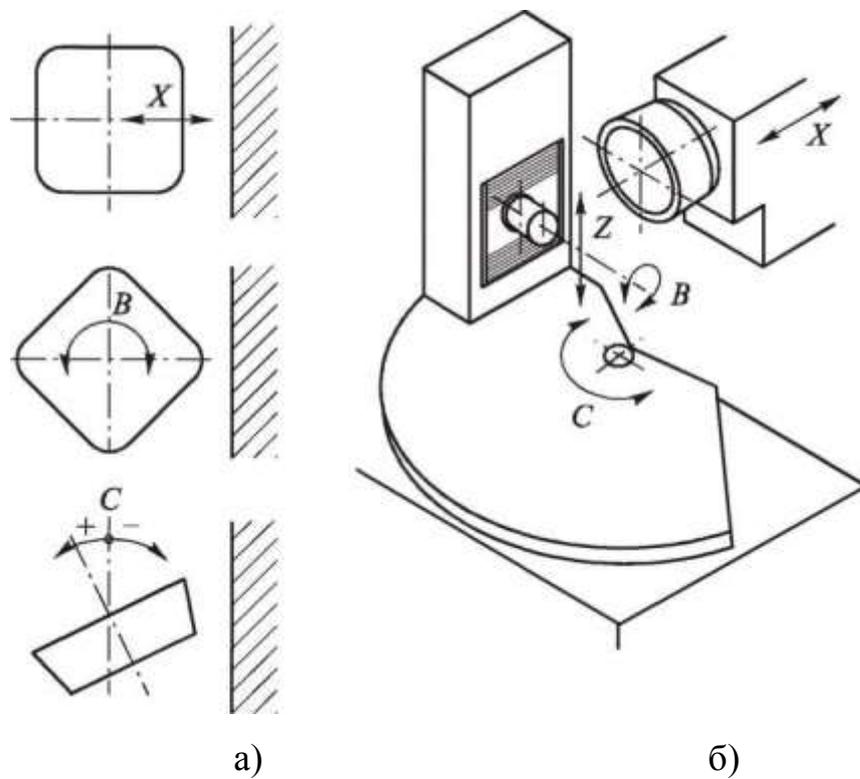


Рисунок 3.13 – Схема шлифования задних поверхностей СМП на станке с ЧПУ

а) - главные формообразующие движения; б) - эти же движения на станке

При обработке задних поверхностей пластин применяли два способа их базирования:

1. По наружной поверхности пластин.

а) в центрирующей призме (рисунок 3.14 а) - совмещение оси пластины 1 с осью шпинделя изделия производилось путем регулирования положения центрирующей призмы 2 в направлении осей X и Z (рисунок 3.13 б) вручную или автоматически с помощью специального измерительного устройства и системы ЧПУ;

б) в центрирующей втулке с конусным отверстием (рисунок 3.14 б) - совмещение оси пластины 1 с осью изделия производится благодаря тому, что центрирующая втулка 2 автоматически устанавливается соосно шпинделю изделия.

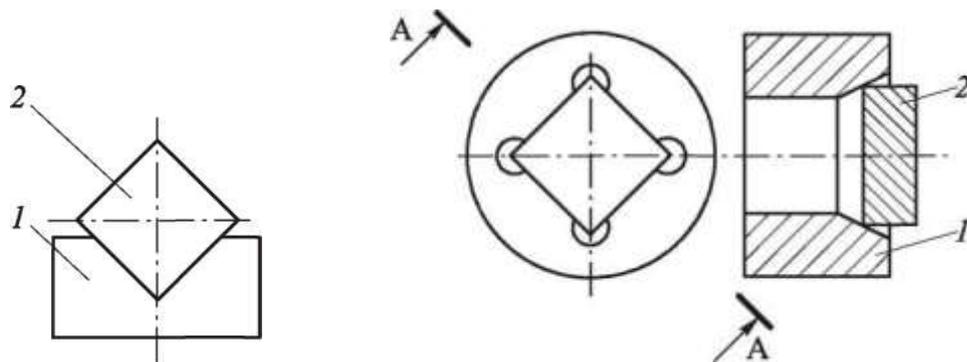


Рисунок 3.14 – Способы базирования пластин на станке с ЧПУ

а – в центрирующей призме (1 – призма, 2 – пластина);

б – в центрирующей втулке (1 – втулка, 2 – пластина)

2. По отверстию в пластине.

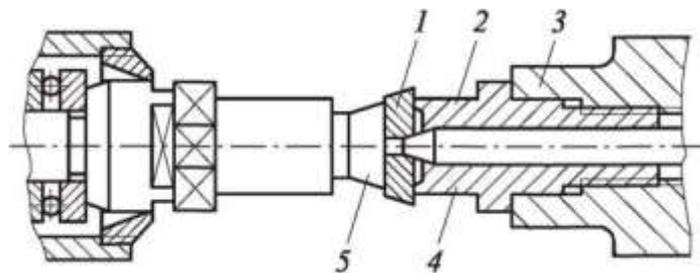


Рисунок 3.15 – Схема базирования пластины по отверстию

1 – пластина; 2 – шток; 3 – шпиндель изделия; 4, 5 – зажимные цапфы

Базирование производится с помощью конической поверхности штока 2, расположенного внутри шпинделя 3 изделия (рисунок 3.15). Пластины с помощью центрирующей призмы устанавливают между зажимными цапфами 4, 5, которые с помощью гидроцилиндра зажимают пластину 1 предварительно и с небольшим усилием. Шток 2 перемещается и своей конической поверхностью выходит в отверстие пластины 1. После этого зажимные цапфы прижимают пластину окончательно с требуемым усилием, а шток 2 возвращается в исходное положение (рисунок 3.16).

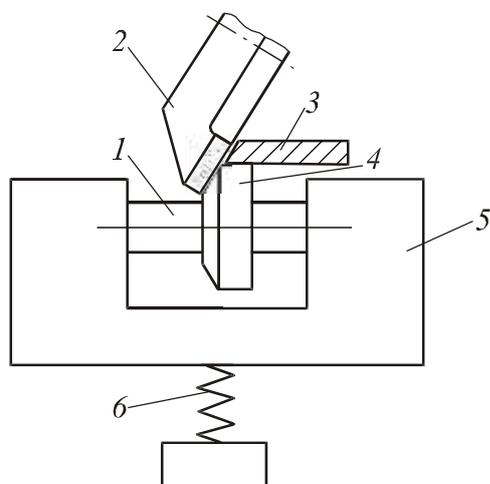


Рисунок 3.16 – Схема шлифования фасок на передних поверхностях пластин

1 – цапфа; 2 – алмазный круг; 3 – копирная линейка; 4 – пластина;
5 – бабка изделия; 6 – пружина

Далее пластины полировали на щеточно-полировальном станке FORMAQSG-1300R6 представленном на рисунке 3.17 а, у которого полировальные щетки совершают сложное планетарное движение. Схема обработки представлена на рисунке 3.17 б.

После полирования пластины протирали этиловым спиртом и направляли на мойку в ультразвуковую ванну.

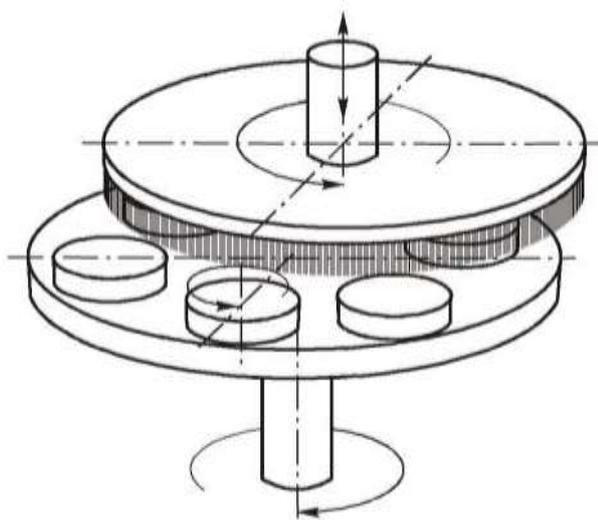
Для мойки инструментальных пластин использовали ультразвуковую линию 1100x450x150 «ВЗПС» производительностью 30000 пластин в смену, внешний вид которой изображен на рисунке 3.18.

Параметры моющих растворов представлены в

таблице 3.1.



а)



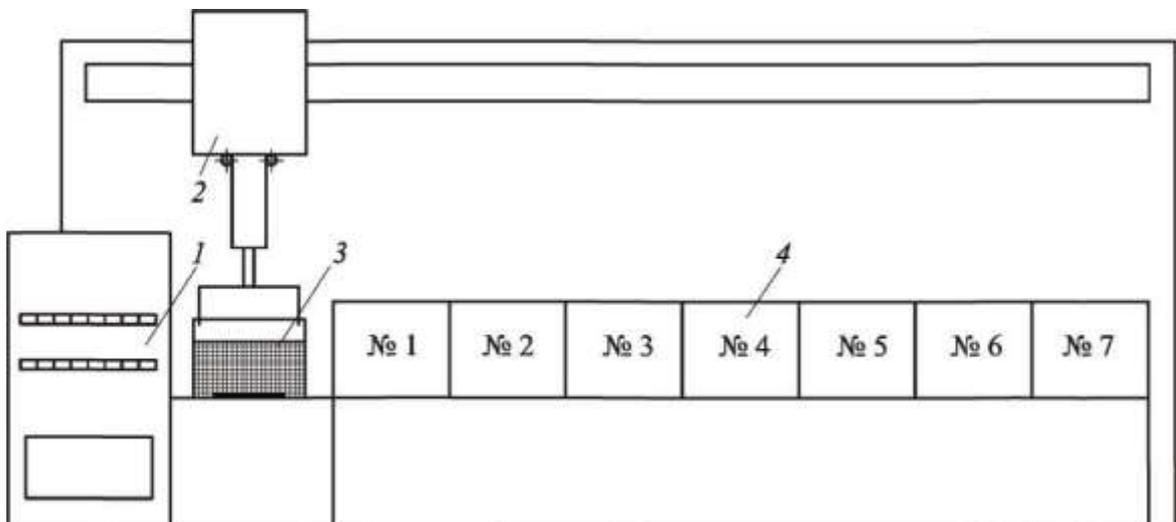
б)

Рисунок 3.17 – Щеточно-полировальный станок модели FORMAQSG-1300R6

а – общий вид; б – схема полирования



а)



б)

Рисунок 3.18 – Автоматическая ультразвуковая моечная линия
1100x450x150 «ВЗПС»

а - общий вид; б - схема работы (1 - пульт управления; 2 - транспортная система; 3 - приспособление для загрузки СМП; 4 - ванны)

Таблица 3.1 – Состав ванн ультразвуковой моечной линии 1100x450x150 «ВЗПС»

| № ванны | Моющие растворы фирмы Finn Sonic | Концентрация, % | Температура, °С | Время обработки, с |
|---------|----------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| 1 | Кависан-Карбон S (pH13) | 6,5 | 80 | 300 |
| 2 | Кависан-Ультра (pH9) | 5,0 | 60 | 120 |
| 3 | Деионизированная вода | — | 20 | 50 |
| 4 | Кависан-Карбон (pH<2) | 10,0 | 55 | 90 |
| 5 | Деионизированная вода | — | 20 | 50 |
| 6 | Свежая деионизированная вода | — | 20 | 50 |
| 7 | Сушка горячим воздухом | — | 80 – 110 | 260 |

После мойки и сушки инструментальные цилиндры готовы к применению.

3.2.2 Обоснование использования электролита для нанесения покрытий

Для получения хромовых покрытий в настоящее время применяются исключительно растворы окиси шестивалентного хрома, называемой также трехокись хрома, хромовый ангидрид или просто хромовая кислота. Все ванны хромирования, без исключения, работают с нерастворимыми анодами, вследствие чего весь выделяемый металл забирается из раствора, что вызывает необходимость текущей корректировки электролита путем добавления хромового ангидрида.

Так как из совершенно чистых растворов хромовой кислоты не происходит выделение металла, то необходимо присутствие незначительных количеств посторонних анионов (так называемых катализаторов), чаще всего сульфатов, фторидов или кремнефторидов. Ввиду того, что содержание посторонних анионов очень ограничено (примерно только 1 % от общего содержания, хромового ангидрида), а количество их оказывает решающее влияние на работу ванны, необходимо употреблять при составлении ванны совершенно чистый хромовый ангидрид. В том случае, когда в хромовом ангидриде находятся даже очень незначительные количества сульфатов, они должны быть определены и учтены

при составлении электролита. Как правило, допустимое содержание сульфата в хромовом ангидриде составляет максимально 0,2% [74].

Концентрация хромового ангидрида в электролитах для хромирования может колебаться в пределах 180–600 г/л. Однако крайние значения пределов, и в особенности верхнее, редко применяют на практике. Обычно концентрация хромового ангидрида находится в пределах 200 – 400 г/л [61]. Можно считать, что разбавленные растворы большей частью дают лучший выход по току, а концентрированные растворы лучше проводят ток, причем при электролизе требуется меньшее напряжение [32]. Концентрированные растворы имеют еще то преимущество, что они менее чувствительны к загрязнениям и колебаниям в составе ванны. Разбавленные растворы дают чаще несколько более твердые хромовые покрытия; концентрированные растворы обладают лучшей рассеивающей способностью. Однако различие это невелико, поэтому, оно не может оказать решающее влияние на выбор электролита.

В основном, свойства электроосажденного хрома зависят не только от содержания хромовой кислоты, но и от вида и количества катализаторов, а также и от общих условий работы ванны во время электролиза. Поэтому изменение одного единственного условия влияет на качество покрытия. Этим объясняется также часто противоречивое толкование отдельных изменений в составе ванны [35, 89].

В качестве катализаторов применяют сульфаты, фториды, кремнефториды или их смеси. При отсутствии катализатора и при обычной плотности тока хром на катоде не осаждается [74, 144]. При низких катодных потенциалах ток отсутствует. При более высокой катодной поляризации выделяется водород без осаждения хрома, и только при очень высокой плотности тока и соответственно повышенной поляризации на катоде осаждается хром, содержащий окисные включения [86, 94].

Таким образом, при малом количестве катализатора возможны следующие варианты: а) электрический ток не проходит; б) электрический ток проходит, но металлический хром на катоде не выделяется, а если и выделяется, то только в

виде окисла (коричневого цвета), подобного металлическому хрому, или в виде хрома, но с большим содержанием окисных включений [74, 75, 89, 93].

Вредно также и повышенное содержание катализатора. При повышенном содержании катализатора значительно ухудшается рассеивающая способность ванны, а при большем количестве его сильно падает выход по току и может прекратиться осаждение металла. Некоторые исследователи полагают, что при очень высоком содержании серной кислоты, например, 20 % от содержания хромовой кислоты, осаждение хрома с удовлетворительным выходом по току возможно только при сильно повышенной плотности тока [74].

Посторонние анионы могут быть добавлены в электролит в виде свободной кислоты, или любой растворимой соли, чаще всего соли щелочных или щелочно-земельных металлов. Обычно применяют сульфат, который добавляют в таких количествах, чтобы соотношение CrO_3 к SO_4^{2-} находилось в пределах 120:1 и 80:1 [96]. Приводимые в литературных источниках крайние соотношения 50:1 и 250:1 на практике почти не применяют [32, 91]. Чаще всего количество серной кислоты составляет 1 % от употребляемого количества хромового ангидрида [10, 23, 90]. Концентрация посторонних анионов в электролите всегда должна определяться в зависимости от содержания хромового ангидрида.

Вместо сульфата или наряду с ним в ванну добавляют фториды, или кремнефториды, или оба эти соединения. Наиболее благоприятной концентрацией для фторид-ионов является 1,5–2,5% от общего содержания хромового ангидрида, а для кремнефторид-ионов 1,2–4% [165]. При добавлении фторидов создается некоторое преимущество при добавлении сульфатов. Например, заметно повышается выход по току, увеличивается твердость хромового покрытия, особенно если хром выделяется из растворов, содержащих только кремнефтористоводородную кислоту. С другой стороны, при таких добавках возникают и существенные недостатки. Прежде всего фторидсодержащие ванны более чувствительны к колебаниям в составе электролита и его загрязнению, особенно железом. В результате этой чувствительности такие ванны требуют более тщательного корректирования и наблюдения, чем сульфатсодержащие

ванны, причем аналитический контроль содержания фторидов соответственно сложнее.

В литературе отмечается высокая агрессивность фторсодержащих ванн по отношению к стеклу и керамическим материалам (а также по отношению к анодному и катодному материалу). Все это затрудняет широкое внедрение этих ванн, поэтому их применяют только для специальных целей [165].

В настоящее время анионы сульфата и кремнефторида добавляют одновременно в виде труднорастворимых солей, например, SrSO_4 и K_2SiF_6 . Растворимость этих солей в хромовой кислоте такова, что при насыщенном растворе их получают желаемую концентрацию посторонних анионов. При этом учитывают зависимость растворимости от температуры электролита. Характерной особенностью приготовленных таким образом хромовых ванн является то, что при колебаниях температуры, а также при изменении концентрации хромовой кислоты в ваннах автоматически восстанавливается правильная концентрация анионов; поэтому эти ванны называются саморегулирующимися. При избытке твердой соли катализатора также создается запас катализатора на случай непредвиденных потерь или снижения концентрации его в результате нормального уноса электролита. Восстановление правильной концентрации посторонних анионов в ваннах наступает не сразу, т. е. не одновременно с изменением, других констант ванны, например, температуры, поэтому перед началом работы требуется некоторое время для восстановления электролита. Для этих ванн целесообразно избегать вообще колебаний температуры и прежде всего сильных кратковременных изменений ее, а при простоях (например, в ночное время) надо поддерживать у саморегулирующихся ванн постоянную температуру, чтобы при возобновлении работы не терять много времени на восстановление концентрации электролита [160].

Наряду с хромовой кислотой и посторонними анионами хромовые ванны всегда содержат некоторое небольшое количество трехвалентного хрома. Он может быть введен в ванну с самого начала работы, или получен из хромовой кислоты путем добавления восстановителей, например лимонной, винной,

щавелевой кислот, сахара, или же он образуется при электролизе во время так называемой «проработки» ванны [149]. В последнем случае трехвалентный хром возникает вследствие того, что хромовая кислота восстанавливается на катоде не непосредственно в металлический хром, а через трехвалентный хром, который в результате диффузии или конвекции удаляется из непосредственного прикатодного слоя (катодной пленки) и таким образом попадает в электролит. Как указано в [75, 93], этот распределенный в электролите хром в дальнейшем непосредственно не восстанавливается в металлический хром, но он оказывает определенное влияние на работу ванны и должен рассматриваться как существенная составная часть хромовой ванны. Вполне возможно, что трехвалентный хром находится в электролите не только в виде Cr^{3+} , но в виде соединения с хромовой кислотой и сульфатом [74, 165].

Важно прежде всего то, что небольшое количество трехвалентного хрома заметно улучшает рассеивающую способность ванны. Правда, одновременно с этим несколько уменьшается катодный выход по току, однако выгода вследствие увеличения рассеивающей способности является более значительной. Если ванна хромирования составлена из чистой хромовой кислоты и катализатора, надо принимать во внимание ограниченную рассеивающую способность ванны во время ее «проработки». Во избежание этого нужно уже при составлении ванны вводить в нее трехвалентный хром. Это достигается добавлением сульфата в форме сернокислого хрома [92].

Основные электролиты хромирования, применяемые в современном производстве, представлены в таблице 3.2.

Наибольшее применение получили простые сульфатные электролиты № 1; 2 и 3, состоящие из хромового ангидрида, серной кислоты и воды.

На процесс хромирования большое влияние оказывает соотношение между концентрациями хромового ангидрида и серной кислоты. Для осаждения покрытий хорошего качества и с наибольшим выходом по току, необходимо, чтобы отношение было равным 100 (допускается от 90 до 120).

Сравнивая сульфатные электролиты № 1; 2 и 3 между собой, необходимо

отметить следующее. Малоконцентрированный электролит №1 отличается лучшей рассеивающей способностью и более высоким выходом по току. Покрытия, полученные в нем, обладают наибольшей твердостью и износостойкостью. Однако этот электролит обладает повышенным удельным сопротивлением и требует поэтому более высокого напряжения источника тока. Кроме того, он нуждается в частом добавлении CrO_3 . Указанный электролит применяют главным образом при износостойком хромировании и восстановлений изношенных деталей.

Концентрированный электролит №3 обладает низким выходом по току и плохой рассеивающей способностью. Вместе с тем он обличается относительно хорошей кроющей способностью, большей стабильностью по концентрации CrO_3 и соотношению хромового ангидрида к серной кислоте, не требует высокого напряжения на ванне. Благодаря низкому сопротивлению можно допускать большие расстояния между анодом и деталями (до 180÷200 мм). Покрытия осаждаются в нем плотные, менее напряженные, но обладают не высокой износостойкостью. Все это обуславливает применение этого электролита при защитно-декоративном хромировании деталей сложной конфигурации.

Хромирование в рассмотренных электролитах характеризуется непостоянством состава и трудностью поддержания оптимального соотношения концентрации $\text{CrO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$.

Электролит № 2 позволяет получать как твердые покрытия, так и покрытия с хорошими защитно-декоративными свойствами. Поэтому его обычно называют универсальным или стандартным. Он получил наиболее широкое применение.

В электролите № 4 соотношение хромового ангидрида и сульфат-ионов (SO_4^{2-}) поддерживается на заданном уровне автоматически, поэтому такой электролит называется саморегулирующимся. Для автоматического поддержания концентрации сульфат-ионов в электролит вводят сернокислый стронций (SrSO_4) и кремнефтористый калий (K_2SiF_6), которые обладают ограниченной

Таблица 3.2 – Состав электролитов и режим хромирования

| Компоненты и режим | Электролиты № | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Ангидрид хромовый, г/л | 120 ... 150 | 200 ... 250 | 300 ... 350 | 250 ... 300 | 350 ... 400 | 380 ... 420 |
| Кислота серная, г/л | 1,2 ... 1,5 | 2,0 ... 2,5 | 3,0 ... 3,5 | - | 2,0 ... 2,5 | - |
| Стронций сернокислый, г/л | - | - | - | 6 | - | - |
| Калий кремнефтористый, г/л | - | - | - | 20 | - | - |
| Натр едкий, г/л | - | - | - | - | 40 ... 60 | - |
| Сахар, г/л | - | - | - | - | 1 ... 2 | - |
| Кальций углекислый, г/л | - | - | - | - | - | 60 ... 75 |
| Кобальт сернокислый, г/л | - | - | - | - | - | 18 ... 20 |
| Температура электролита, °С | 50 ... 65 | 45 ... 60 | 40 ... 50 | 50 ... 65 | 16 ... 23 | 18 ... 25 |
| Плотность тока, А/дм ² | 30 ... 100 | 20 ... 60 | 15 ... 30 | 40 ... 100 | 20 ... 80 | 100 ... 300 |
| Выход по току, % | 15 ... 16 | 12 ... 14 | 10 ... 12 | 18 ... 20 | 25 ... 30 | 35 ... 40 |

растворимостью в растворе хромового ангидрида. Введенные в электролит в количествах, превышающих их растворимость, эти соли будут находиться в небольшом избытке на дне ванны в виде твердой фазы.

Содержание ионов SO_4^{2-} в растворе при изменении концентрации CrO_3 будет автоматически поддерживаться постоянным за счет частичного растворения этого избытка.

К достоинствам такого электролита по сравнению с сульфатными относятся: стабильность состава, что уменьшает частоту его корректировки; колебания температуры электролита и плотности тока меньше отражаются на внешнем виде покрытия и выходе по току; хорошая рассеивающая способность и более качественные свойства покрытий; более высокий выход по току (18÷20%) позволяет в 1,5÷1,8 раза увеличить производительность хромирования.

Однако саморегулирующийся электролит имеет и недостатки. Он более сложен по составу, чувствителен к хлоридам и обладает большой агрессивностью. Последнее приводит к тому, что участки деталей, которые не покрываются хромом, (вследствие низкой плотности тока на них, экранирования и т. д.), растворяются в электролите даже будучи катодно поляризованными. Вместо свинцово-сурьмянистых анодов при хромировании в этом электролите необходимо применять свинцово-оловянные аноды, содержащие 6÷10 % олова. Поэтому саморегулирующийся электролит не получил широкого применения.

Электролит № 5 называется тетрахроматным. Он отличается от описанных выше тем, что большая часть хромовой кислоты, нейтрализуется щелочью, образуя тетрахромат натрия. Поэтому он не агрессивен. Хромирование ведут в стальных ваннах без какой-либо футеровки. Температура электролита не должна превышать 24 °С, так как при более высокой температуре тетрахромат разлагается.

Высокая плотность тока и низкая температура электролита обеспечивают высокий выход по току, в результате чего скорость осаждения хрома примерно вдвое выше, чем у электролитов № 1–4.

Электролит обладает более высокой, чем остальные, кроющей способностью. Покрытия осаждаются пластичные, более мягкие и менее напряженные, с малой пористостью. Их применяют в отдельных случаях в качестве защитных или защитно-декоративных.

К недостаткам тетрахроматного электролита относятся следующие. Вследствие низкой твердости покрытия его не рекомендуется применять для износостойкого хромирования и восстановления деталей. При защитно-декоративном хромировании необходимо выполнять трудоемкую операцию полирования. Поскольку применяется высокая плотность тока и выделяется большое количество тепла, а температура электролита не должна превышать 24 °С, то его необходимо охлаждать, а это связано с трудностями.

Перспективным является саморегулирующийся холодный электролит № 6. К преимуществам его относятся высокие выход по току (35...40%) и скорость осаждения хрома (0,18÷0,50 мм/ч), примерно и 10 раз превышающая скорость осаждения из обычных электролитов, при хорошем качестве покрытия. Однако для поддержания температуры электролита 18÷25 °С при высокой плотности тока (до 300 А/дм²) требуется мощный холодильный агрегат.

Приведенные выше результаты исследований дают основание предполагать, что для нанесения износостойких, герметичных дисперсно-упрочненных композиционных гальванических покрытий на основе хрома можно использовать любой из представленных в таблице 3.2 электролитов хромирования, за исключением электролита №5. Как показывает производственный опыт, тип электролита не является доминирующим фактором, влияющим на параметры процесса, кроме холодных тетрахроматных электролитов. Однако, предпочтение следует отдавать обычным стандартным электролитам (№ 2), указанным в таблице 3.2, как наиболее простым в эксплуатации, поэтому дальнейшие исследования проводились с применением стандартных электролитов хромирования.

3.2.3 Осаждение дисперсно-упрочненных композиционных гальванических покрытий на основе хрома

Схема технологического процесса нанесения износостойких, герметичных дисперсно-упрочненных композиционных гальванических покрытий на основе хрома состоит из следующих операций:

1. Промывка органическим растворителем;
2. Сушка;
3. Изоляция поверхностей, не подлежащих нанесению покрытия;
4. Монтаж детали на шпиндель установки;
5. Обезжиривание детали химическое;
6. Промывка в горячей воде ($70\div 80^{\circ}\text{C}$);
7. Декапирование детали в ванне нанесения хромового покрытия ($1\div 2$ мин);
8. Нанесение композиционных гальванических покрытий. Время нанесения покрытия t (мин) определяли по формуле:

$$t = \frac{\delta}{v}, \quad (3.1)$$

где: δ - толщина наносимого покрытия, мкм;
 v – скорость осаждения покрытий, мкм/мин.

9. Промывка горячей водой ($70\div 80^{\circ}\text{C}$);
10. Нейтрализация;
11. Промывка горячей водой ($70\div 80^{\circ}\text{C}$);
12. Демонтаж детали с установки.

В качестве анодов использовали свинцово-сурьмянистые пластины, площадь поверхности которых была в $2\div 3$ раза больше площади под покрытие. Для предотвращения образования окисной пленки на анодах, они периодически извлекались из ванны и очищались механически при помощи металлической щетки.

В связи с тем, что применяемый электролит обладает высоким сопротивлением, расстояние между анодами и деталями принимали в пределах 30÷50 мм. Расстояние деталей до дна ванны составляло не менее 250 мм, а от зеркала электролита не менее 100 мм.

3.2.4 Приготовление и корректировка электролита для нанесения дисперсно-упрочненных композиционных гальванических покрытий на основе хрома

В связи с тем, что электролит, используемый для нанесения покрытий, со временем меняет свои свойства, периодически проводилась его корректировка в соответствии с требованиями [96]. С целью обеспечения качественных покрытий периодическому контролю и корректировке подвергались концентрация хромового ангидрида, серной кислоты, а также проводился контроль массовой концентрации железа.

Контроль содержания хромового ангидрида проводился в следующей последовательности: в мерную колбу вместимостью 100 см³ отбирали пипеткой 5 см³ электролита, доводили водой до метки, перемешивали. Отбирали пипеткой 5 см³ полученного раствора в коническую колбу вместимостью 500 см³, доливали 200÷300 см³ воды, 20 см³ раствора серной кислоты. Из бюретки приливали раствор соли Мора до полного восстановления хромового ангидрида, т.е. до окрашивания раствора в зеленовато-голубой цвет и затем еще добавляли избыток раствора 3÷5 см³. Затем титровали раствором марганцово-кислого калия до появления слабо розовой окраски, исчезающей в течение 1 минуты.

Массовую концентрацию хромового ангидрида в г/дм³ вычисляли по формуле:

$$C = \frac{(V_1 K_1 - V_2) \cdot 0.00333 \cdot K_2 \cdot 1000}{V} \quad (3.2)$$

где: V_1 – объем раствора соли Мора, добавленной к пробе, см³;

V_2 – объем раствора марганцовокислого калия, израсходованный на титрование избытка соли Мора, см³;

K_1 – соотношение объемов растворов марганцовокислого калия и соли Мора;

0,00333 – массовая концентрация раствора марганцовокислого калия молярной концентрацией эквивалента 0,1 моль/дм³;

K_2 – поправка на отклонение молярной концентрации эквивалента марганцовокислого калия от 0,1 моль/дм³;

V – объем электролита, взятый на анализ, см³.

Концентрацию серной кислоты контролировали следующим способом. В химический стакан отбирали пипеткой 10 см³ электролита, разбавляли водой до 100 см³, доливали 20 см³ соляной кислоты, доводили до кипения и осторожно прибавляли 5÷10 см³ этилового спирта и кипятили 25÷30 мин до изменения окраски раствора из желтой в темно-зеленую. Затем доливали 10 см³ уксусной кислоты, нагревали до кипения, затем по каплям при перемешивании доливали 10 см³ горячего раствора хлористого бария и кипятили 5 мин. Раствор выдерживали в теплом месте 4÷6 ч, после этого фильтровали через бумажный обеззоленный фильтр. Осадок на фильтре промывали водой до удаления ионов хлора (отрицательная реакция с азотнокислым серебром). Промытый фильтр с осадком помещали в предварительно взвешенный фарфоровый тигель, сушили, прокаливали до постоянной массы при 800÷900°С, охлаждали в эксикаторе, взвешивали.

Массовую концентрацию серной кислоты в г/дм³ вычисляли по формуле:

$$C = \frac{m \cdot 0,42 \cdot 1000}{V} \quad (3.3)$$

где: m – масса осадка сернокислого бария, г;

0,42 – коэффициент пересчета сернокислого бария на серную кислоту;

V – объем электролита, взятый на анализ, см³.

Для контроля массовой концентрации железа в химический стакан вместимостью 300÷350 см³ отбирали пипеткой 5 см³ электролита, доливали 100

см³ воды, добавляли 3÷5 г хлористого аммония и раствор аммиака до появления резкого запаха. Затем добавляли 2÷3 см³ перекиси водорода, доводили до кипения, кипятили в течение 5 мин и давали осадку скоагулировать. Раствор с осадком фильтровали через бумажный фильтр, промывали горячей водой. Затем осадок растворяли на фильтре при помощи 30÷40 см³ раствора серной кислоты, обмывали фильтр 2–3 раза горячей водой. Фильтрат вместе с промывными водами собирали в мерную колбу вместимостью 100 см³, доводили до метки водой, перемешивали. Отбирали пипеткой 10 см³ полученного раствора в мерную колбу вместимостью 100 см³. Массовую концентрацию железа в г/дм³ вычисляли по формуле:

$$C = \frac{m \cdot 1000}{V} \quad (3.4)$$

где: m – масса железа, найденная по градуировочному графику, г;
 V – объем электролита, взятый для анализа, см³.

3.3 Экспериментальное оборудование, приборы и методики экспериментальных исследований

3.3.1 Обоснование выбора объектов исследования, обрабатываемых материалов и рабочих сред

Как отмечалось ранее, нанесение дисперсно-упрочненных композиционных покрытий на основе хрома улучшает условия скольжения [15] с одной стороны, а с другой – повышает износостойкость и уменьшает коррозию поверхностей, которая может достигать значительной величины. Это позволяет существенно увеличить срок эксплуатации изделий. Особенно актуальна эта проблема при изготовлении и восстановлении прецизионных узлов гидроцилиндров, имеющих, как правило, конфигурацию тел вращения. В связи с этим для имитации наиболее близких условий эксплуатации узлов образцы для исследований, представленные на рисунке 3.19, изготавливались цилиндрической формы из стали 40Х

(ГОСТ 4543-2016), как наиболее часто используемых при изготовлении штоков гидроцилиндров и наиболее сильно подверженной отрицательному влиянию хромирования.

Производительность процесса гальваноконтактного хромирования, микроструктура и шероховатость поверхности осадков, остаточные напряжения в них, прочность сцепления хрома с основой, микротвердость покрытий, их коррозионная стойкость и наводороживание основы изучались на образцах, представленных на рисунке 3.19 или на серийных штоках, представленных на рисунке 3.20. Наружный диаметр образцов составлял 22 мм, длина 45–50 мм. Образцы термообрабатывались до $\sigma_b = 1100\text{--}1450$ МПа, шлифовались до шероховатости поверхности $R_a = 2,5\text{--}1,25$ мкм, затем обезводороживались при температуре 200–220 °С. Часть образцов упрочнялась дробеструйной обработкой. Кроме того, отдельная партия образцов термообработке не подвергалась. Серийные штоки проходили стандартные технологические операции перед хромированием.



Рисунок 3.19 – Образец для испытаний свойств покрытий



Рисунок 3.20 – Серийный шток для испытаний свойств покрытий

Испытание на герметичность покрытий проводились на серийных штоках (рисунок 3.20) гидроцилиндров МС80/50х710-3(4).32, внешний вид которых представлен на рисунке 3.21, в соответствии с ГОСТ 24054-80, ГОСТ Р 50.05.01-2018 и инструкцией № 2849/183 на гидростенде № ИГ032, представленном на рисунках 3.22, 3.23 в Военном учебно-научном центре Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). В связи с тем, что гидроагрегаты используют оборудование типа «шток», работающее в паре с сопрягаемой деталью по уплотнителям, и оборудование типа «плунжер», работающих в паре с сопрягаемой деталью без уплотнителей (плунжерные пары) – схема испытаний для каждого типа гидроагрегатов была индивидуальной. На рисунке 3.24 представлена схема испытаний на герметичность узлов, работающих по уплотнению. Испытания проводились при давлении 25 МПа.



Рисунок 3.21 – Внешний вид гидроцилиндра МС80/50х710-3(4).32



Рисунок 3.22 – Внешний вид гидростенда № ИГ032 для испытаний покрытий на герметичность



Рисунок 3.23 – Испытательная ванна для проверки герметичности покрытий

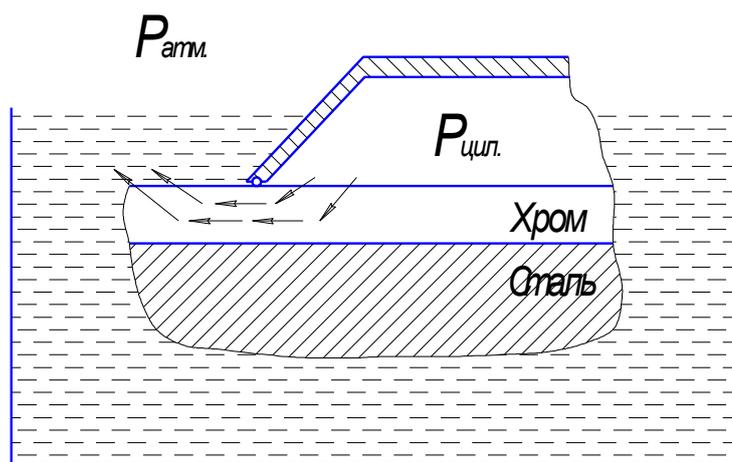


Рисунок 3.24 – Схема испытаний на герметичность пары с уплотнением

Исследовался вновь разработанный технологический процесс получения размерных хромовых покрытий с заданными физико-механическими и высокими эксплуатационными свойствами, с получением в них сжимающих остаточных напряжений методом нанесения композиционных дисперсно-упрочненных герметичных гальванических покрытий на основе хрома без предварительной и последующей механической обработки.

Покрытия осаждались в стандартном электролите хромирования, содержащем 200–250 г/л CrO_3 и 2,0–2,5 г/л H_2SO_4 , нашедшем наиболее широкое применение на предприятиях отрасли.

Для проведения экспериментальных исследований электролит приготавливался из реактивов «Химически чистый (ХЧ)» и «Чистый для анализа (ЧДА)» на дистиллированной воде по методике, описанной в [23]. Плотность электролита измеряли ареометром, кислотность рН- метромилливольтметром модели рН-121.

Температура электролита поддерживалась с точностью 1 К при помощи термометра ТПП-11 ГОСТ 13717-74 и контролировалась термометром ТН-5 ГОСТ 400-80 с ценой деления шкалы 0,2 К.

Корректировка электролита, его анализ проводились по методике,

изложенной в п. 3.2 настоящей работы и контролировалась по методике, изложенной в [53].

В связи с тем, что площадь хромирования деталей, подвергаемых нанесению гальванических покрытий в серийных гидроцилиндрах весьма разнообразна и составляет от 1 до 40 дм², а на имеющемся в гальванических цехах отрасли оборудовании затруднительно получение на таких деталях плотности тока выше 200 А/дм², максимальная плотность тока для исследований была выбрана 160 А/дм².

Ограничение по величине плотности тока вызвано также тем, что прохождение больших токов приводит к значительному нагреву деталей, затрудняет создание надежных токоподводов к ним, и, в конечном итоге, не позволяет поддерживать в процессе обработки стабильные технологические режимы.

3.3.2 Экспериментальное оборудование и условия проведения исследований

Для осуществления процесса нанесения композиционных дисперсно-упрочненных герметичных гальванических покрытий на основе хрома, была спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, представленная на рисунке 3.25. Она позволяет восстанавливать образцы с длиной, не превышающей 920 мм, и диаметром до 270 мм.

В связи с тем, что в настоящее время хромируются, в основном, штоки гидроцилиндров и, кроме того, ряд исследований важнейших эксплуатационных характеристик деталей и покрытий (в частности, усталостные испытания) проводятся на образцах, у которых необходимо хромировать наружные цилиндрические поверхности, экспериментальная установка предназначена для нанесения хромосодержащих осадков именно на такой тип поверхности. На установке возможно широкое изменение давления инструмента, межэлектродного расстояния, температуры электролита, плотности тока, частоты вращения

образцов, числа двойных ходов инструмента. Схема обработки представлена на рисунке 3.26.

Технические данные экспериментальной установки:

| | |
|--|-----------|
| максимальный диаметр обрабатываемых образцов, мм | 90 |
| максимальная длина образцов, мм | 710 |
| частота вращения шпинделя, об/мин | 60 – 200 |
| регулирование температуры, К | 300 – 363 |
| регулирование напряжения, В | 0 – 24 |
| регулирование силы тока, А | 0 – 630 |
| регулирование межэлектродного зазора, мм | 40 – 100 |
| регулирование давления инструмента, МПа | 0 – 5 |
| прижим инструмента к образцу посредством тарированных пружин | ручной |

Емкость для электролита состоит из внутреннего бака, изготовленного из титанового сплава ОТ-4 ОСТ 190024-71 и наружного бака, изготовленного из стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72. Подогрев универсального электролита хромирования, находящегося во внутреннем баке емкостью 50 дм³, осуществляется трубчатыми нагревательными элементами ТЭН-100А 13/4 Р220 ГОСТ 13268-72, размещенными в наружном баке, заполненном водой.

Осевые остаточные напряжения в хромовых покрытиях определялись по ГОСТ Р 52728-2007 методом электротензометрирования при непрерывном стравливании напряженных слоев с исследуемой поверхности на специальной установке, которая предназначена для измерения относительных деформаций и состоит из тензометрического усилителя 8АНЧ-7М и самопишущего потенциометра КСП-4. Первичными преобразователями служили тензорезисторы 2ФКПА-10-200В. Контрольное измерение остаточных напряжений, после описанного выше метода, осуществлялось согласно ГОСТ 9.302-88 методом рентгеноструктурного анализа на рентгеноструктурном дифрактометре ДРОН-3, который показан на рисунке 3.28.



Рисунок 3.25 – Экспериментальная установка для нанесения композиционных дисперсно-упрочненных герметичных гальванических покрытий на основе хрома

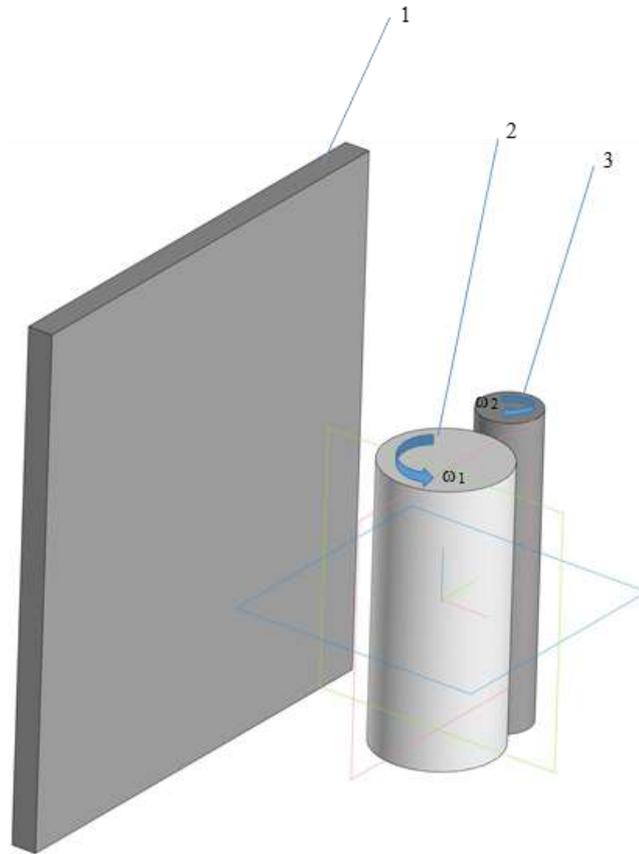


Рисунок 3.26 – Схема обработки при нанесении дисперсно-упрочненных композиционных гальванических покрытий

1 – анод; 2 – деталь; 3 – инструмент

Остаточные напряжения в исследуемом слое «А» представлялись в виде суммы [74]:

$$\sigma_x = \sigma_{xв} + \sigma_{xc} \quad (3.5)$$

где $\sigma_{xв}$ – линейная составляющая, определяемая по деформации образца при вырезки из детали;

σ_{xc} – нелинейная составляющая, вычисляемая по кривой деформации при сраствливание образца на глубину «а».

Т.к. глубина поверхностного слоя с высокими остаточными напряжениями мала по сравнению с толщиной образца, ролью линейной составляющей пренебрегали.

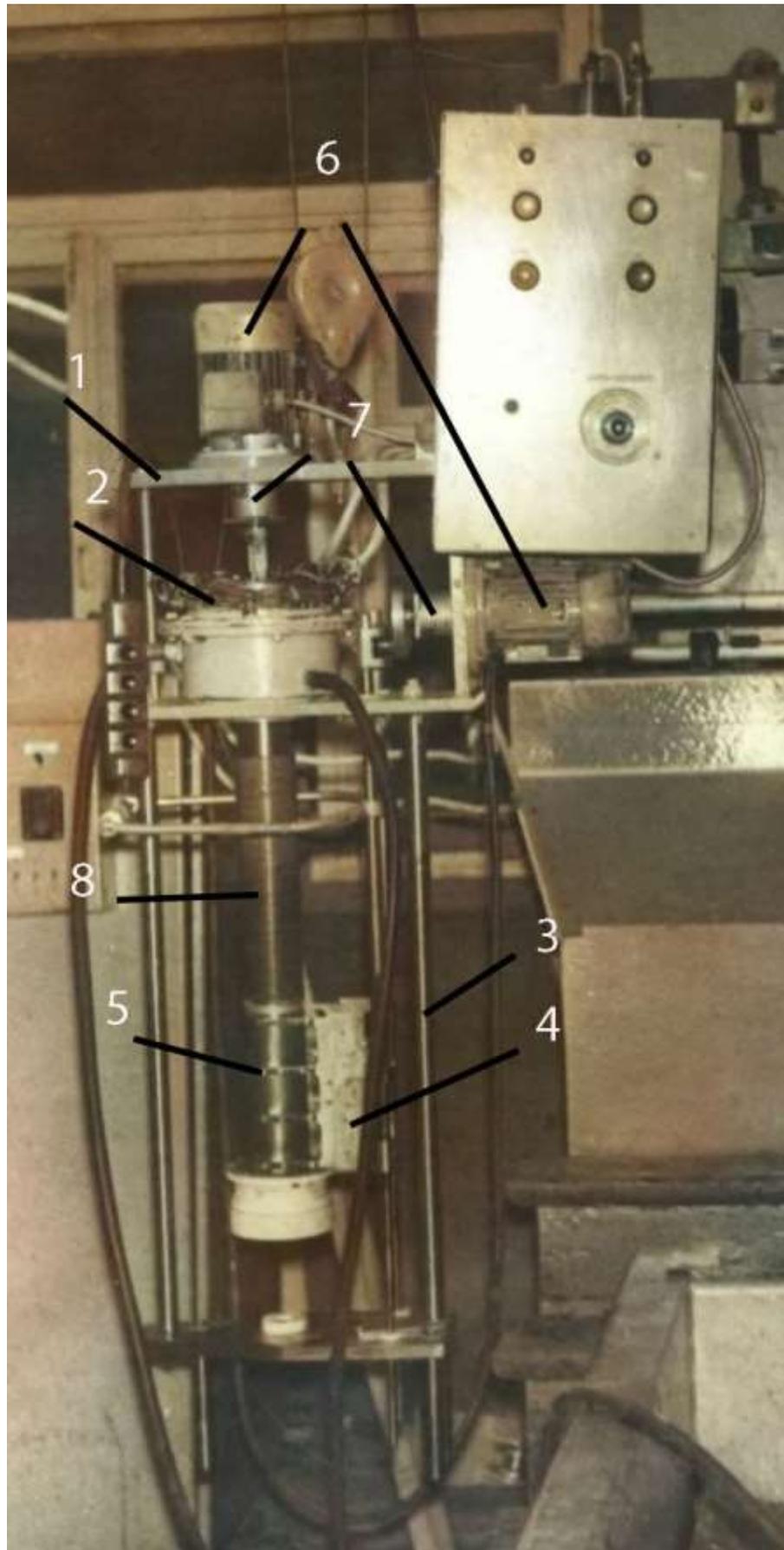


Рисунок 3.27 – Инструментальная головка для нанесения ДУГКП



Рисунок 3.28 – Рентгеноструктурный дифрактометр ДРОН-3

Нелинейную часть остаточных напряжений вычисляли по формуле, приведенной в работе [22].

$$\sigma_a = \frac{1}{2} E(h-a) \frac{d\varepsilon}{da}(a) + 2E_\varepsilon(a) - 3E(h-a) \int_0^a \frac{\varepsilon(\xi)}{(h-\xi)^2} d\xi \quad (3.6)$$

где σ - остаточные напряжения в слое «а»;

E – модуль упругости;

ε - деформация сдвига при снятии слоя «а»;

ξ - все слои, снятые до слоя «а»;

h – толщина образца.

Кольца из стали 40Х (ГОСТ 4543-2016) с нанесенным на них покрытием (рисунок 3.29) вырезались из трубчатых образцов электроэрозионным методом. На поверхность, противоположную исследуемой, клеем «Циакрин – 30»

наклеивался тензодатчик. Поверхности кольца, не подлежащие травлению, защищались пчелиным воском, а исследуемая поверхность обезжиривалась бензином. Исследованию подвергались кольца с хромовым покрытием толщиной от 40 мкм до 400 мкм.

Удаление напряженных слоев осуществлялось в электролите следующего состава: 67% ортофосфорной кислоты ГОСТ 6552-80, уд. вес 1,56 г/см³; 33% серной кислоты ГОСТ 2184-2013 уд. вес 1,24 г/см³, 50 г/л хромового ангидрида ГОСТ 2548-77. Режим электрохимического травления: плотность тока – 10 А/дм², температура электролита – 293 К. Толщина стравливаемого слоя определялась весовым методом. Расчет величины остаточных напряжений проводился по формуле (2) в приложении «MS Excel 2016» по специальной программе, приведенной в [122].

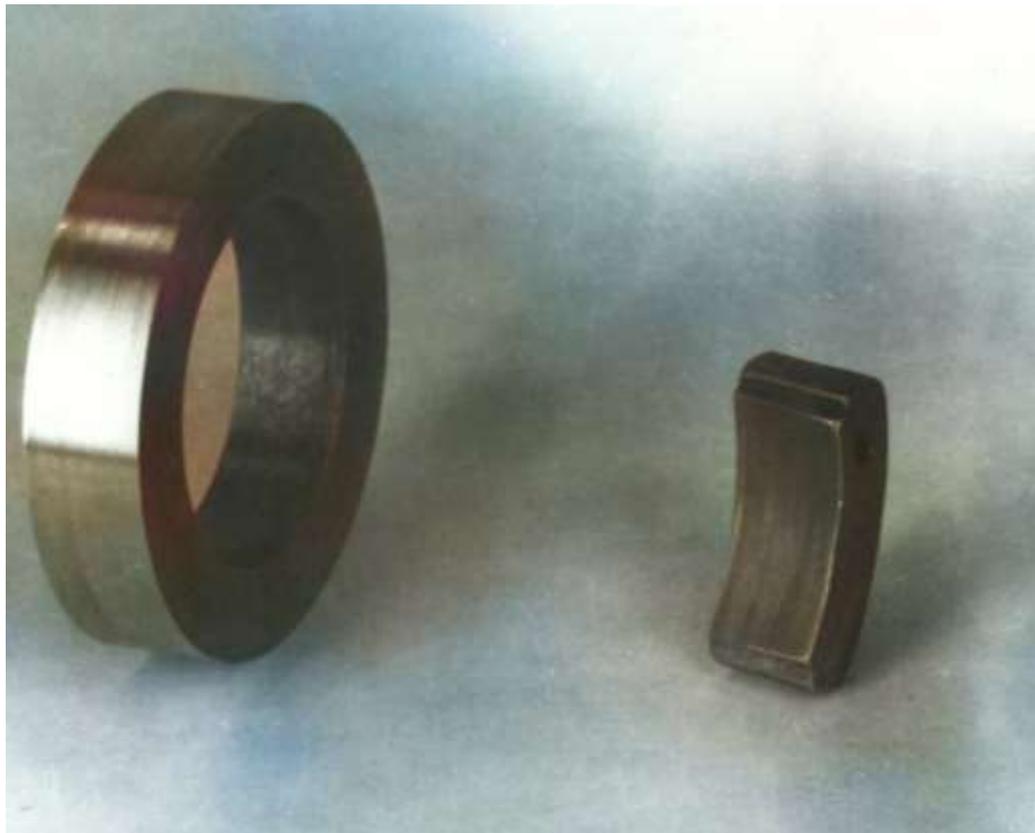


Рисунок 3.29 – Образцы для исследования остаточных напряжений

Вычисление производных для формулы (3.6) в программе осуществляется

методом центральных разностей (при постоянном шаге интерполяции) [122]:

$$\frac{d\varepsilon}{da}(a_i) \approx \frac{1}{2\Delta}(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_{i-1}) \quad (3.7)$$

где ε_i – текущая деформация образца.

Интеграл определяют по формуле трапеций:

$$\int_0^{a_i} \frac{\varepsilon(\xi)}{(h-\xi)^2} d\xi \approx \frac{\Delta}{2} \sum_{k=1}^i \left\{ \frac{\varepsilon_{k-1}}{[h-(k-1)\Delta]^2} + \frac{\varepsilon_k}{(h-k\Delta)^2} \right\} \quad (3.8)$$

где a_i – глубина стравленного слоя;

h – толщина образца;

Δ – шаг между расчетными сечениями.

Параллельно указанному выше методу проверка остаточных напряжений, как описывалось ранее, осуществлялась методом рентгеноструктурного анализа. Т.к. остаточные напряжения характеризуются однородным сжатием или растяжением (деформацией в упругой области) решетки, то они приводят к однородному изменению межплоскостных расстояний на величину Δd_{HKL} , а следовательно, к смещению рентгеновской интерференции на угол $\Delta\theta_{HKL}$. Чтобы получить величину этого смещения, продифференцируем левую часть уравнения Вульфа – Брегга [95]:

$$2d_{HKL} \sin \theta = n\lambda$$

тогда:

$$2\Delta d_{HKL} \sin \theta_0 + 2d_{0HKL} \cos \theta_0 \Delta\theta_{HKL} = 0$$

откуда:

$$\Delta\theta_{HKL} = \Delta d \frac{tg \theta_0}{d_0} = -(d - d_0) \frac{tg \theta_0}{d_0} = -\varepsilon tg \theta_0 \quad (3.9)$$

где: d и d_0 – межплоскостные расстояния плоскостей (HKL) в напряженном и ненапряженном состоянии;

ε - относительная деформация.

Размещение в памяти исходных данных и результатов промежуточных вычислений приведено ниже в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Исходные данные и промежуточные вычисления

| Условное обозначение | Численное значение | Регистр памяти |
|----------------------|------------------------|----------------|
| K | $-E/(2M_y)$ | a |
| H_i | $M_x(h-a_i)$ | b |
| DA | $M_x\Delta$ | c |
| DF_i | $d\varepsilon(a_i)/da$ | d |
| L_0 | 5 | ∅ |
| S_i | $\int[...]d\xi$ | 1 |
| F_{-1} | $-M_y\varepsilon_1$ | 2 |
| F_0 | 0 | 3 |
| F_1 | $M_y\varepsilon_1$ | 4 |
| F_2 | $M_y\varepsilon_2$ | 5 |
| F_5 | $M_y\varepsilon_5$ | 8 |
| N_c | 1,2,3... | 9 |

В таблице 3.3 обозначены:

E – модуль упругости материала;

H_i – масштабированная текущая толщина образца;

da – шаг между расчетными сечениями по диаграммной ленте;

M_x , M_y – масштабные коэффициенты по осям «глубина травления» и «деформация» соответственно;

L_0 – счетчик циклов;

F_i – величина деформации в i – ом сечении по диаграммной ленте;

N_0 – номер расчетного сечения.

Таким образом, экспериментально задача анализа макронапряжений сводится к точному определению межплоскостных расстояний [95].

Используя уравнения теории упругости для эллипсоида деформации и напряжений, получим рабочие формулы для расчета остаточных напряжений.

При однородной упругой деформации сферический элемент объема

изотропного тела деформируется в эллипсоид. Нормальное удлинение $\varepsilon_{\varphi\psi}$ в любом выбранном направлении приближенно выражается уравнением для эллипсоида деформации [91]:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = a_1^2 \varepsilon_1 + a_2^2 \varepsilon_2 + a_3^2 \varepsilon_3 \quad (3.10)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные удлинения;

a_1, a_2, a_3 – направляющие косинусы, определяющие ориентацию нормального удлинения в главных осях эллипсоида деформации.

В сферических координатах a_i могут быть выражены через углы φ и ψ [91]:

$$\begin{aligned} a_1 &= \sin \psi \cos \varphi \\ a_2 &= \sin \psi \sin \varphi \quad . \\ a_3 &= \cos \psi \end{aligned} \quad (3.11)$$

Главные удлинения $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ связаны с главными направлениями (в направлениях, в которых касательные напряжения равны нулю) следующими уравнениями [91, 95]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_3 + \sigma_2)] \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} [\sigma_2 - \mu(\sigma_1 + \sigma_3)] \quad . \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2)] \end{aligned} \quad (3.12)$$

Эллипсоид напряжений определяется уравнением [82]:

$$\sigma_{\varphi\psi} = a_1^2 \sigma_1 + a_2^2 \sigma_2 + a_3^2 \sigma_3 \quad . \quad (3.13)$$

Подставив значения $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ из (3.12) в (3.10) получаем:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1+\mu}{E} (a_1^2 \sigma_1 + a_2^2 \sigma_2 + a_3^2 \sigma_3) - \frac{\mu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad . \quad (3.14)$$

При рентгенографическом измерении напряжений глубина анализируемого слоя не превышает нескольких десятков микрометров (глубина проникновения рентгеновских лучей), что существенно меньше толщины изделия. Поэтому можно с достаточной степенью точности считать, что в этом тонком приповерхностном слое напряженное состояние плоское, как и на самой

поверхности, т.е. $\sigma_3 = 0$ (из условия равновесия).

Но в этом случае из (3.12):

$$\varepsilon_3 = -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2), \quad (3.15)$$

ε_3 определяется через относительное изменение межплоскостных расстояний для плоскостей параллельных поверхности образца:

$$\varepsilon_3 = \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0}. \quad (3.16)$$

Следовательно, по одной рентгенограмме можно определить только сумму главных напряжений:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -\frac{E}{\mu} \cdot \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0}, \quad (3.17)$$

где d_{\perp} и d_0 – межплоскостные расстояния для напряженного и ненапряженного состояния.

Точность измерения напряжений зависит от точности измерения межплоскостных расстояний и величины модуля Юнга E [157], в нашем случае при $\Delta d/d = 10^{-4}$ [91]:

$$\Delta(\sigma_1 + \sigma_2) = \frac{E}{\mu}(\theta_{\perp} - \theta_0) \operatorname{ctg} \theta_0. \quad (3.18)$$

Если необходимо определить только σ_{φ} (остаточные напряжения в направлении φ) из (3.14):

$$\varepsilon_{\varphi\psi} - \varepsilon_{\perp} = \frac{1 + \mu}{E} \sigma_{\varphi} \cdot \sin^2 \psi, \quad (3.19)$$

но

$$\varepsilon_{\varphi\psi} - \varepsilon_{\perp} = \frac{d_{\varphi\psi} - d_0}{d_0} - \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0} = (d_{\varphi\psi} - d_{\perp})d_0 \approx (d_{\varphi\psi} - d_{\perp})d_{\perp}.$$

Т.к. все деформации лежат в упругой области, то d_0 отличается от d_{\perp} не более чем на $0,001d_0$.

Учитывая, что

$$\frac{d_{\varphi\psi} - d_{\perp}}{d_{\perp}} = -ctg\theta_{\perp} \cdot \Delta\theta$$

получим:

$$ctg\theta_{\perp} (\theta_{\varphi\psi} - \theta_{\perp}) = \frac{1+\mu}{E} \sigma_{\varphi} \cdot \sin^2 \psi \quad (3.20)$$

Следовательно, при определении σ_{φ} не надо снимать ненапряженный образец для определения θ_0 и нет необходимости знать точно абсолютное значение угла $\theta_{\varphi\psi}$.

Для практического определения σ_{φ} получаем:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{Ectg\theta_0(2\theta_0 - 2\theta_{\psi})}{2(1+\mu) \cdot \sin^2 \psi}, \quad (3.21)$$

где θ_0 – наблюдаемая величина брегговского угла при $\psi = 0$;

θ_{ψ} - угол при наклонной съемке под углом ψ .

Определение $(\sigma_1 + \sigma_2)$ состоит в съемке образца при нескольких значениях $\sin^2 \psi = 0; 0,2; 0,4; 0,6 \dots$ и в каждом определяют значения θ_{ψ} . Затем для каждого значения ψ находят $\varepsilon_{\varphi\psi}$ и зная, что $\Delta\theta = \theta_{\psi} - \theta_0$ строят методом наименьших квадратов зависимость $\varepsilon_{\varphi\psi} = f(\sin^2 \psi)$. Отсекаемый отрезок на оси позволит определить $\sigma_1 + \sigma_2$.

Раздельное определение главных напряжений $\sigma_1 + \sigma_2$ возможно, если определены значения σ_{φ} в трех направлениях на поверхности образца. Наилучшая точность достигается, если сделать 4 замера: 1 – перпендикулярный поверхности ($\psi = 0$) и три наклонных (углы: $\varphi, \varphi - \alpha, \varphi + \alpha$).

Тогда получаем систему из трех уравнений [95]:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{\varphi} + \frac{0,5(\sigma_{\varphi-\alpha} - \sigma_{\varphi+\alpha})tg\varphi}{\sin 2\alpha} \\ \sigma_2 &= \sigma_{\varphi} - \frac{0,5(\sigma_{\varphi-\alpha} - \sigma_{\varphi+\alpha})ctg\varphi}{\sin 2\alpha} \\ tg2\alpha &= \frac{\sigma_{\varphi-\alpha} - \sigma_{\varphi+\alpha}}{2\sigma_{\varphi} - \sigma_{\varphi-\alpha} - \sigma_{\varphi+\alpha}} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Для исключения субъективных погрешностей необходимо использовать порошок эталонного вещества с известным $\theta_{эм}$ и наносить его в малом количестве на поверхность образца и уточнить θ_{ψ} и θ_0 через сдвиг $\theta_{эм}$.

Преимущество рентгеновского метода перед механическими состоит в отсутствии зависимости точности измерений от формы образца (наличие концентраторов и несимметричности размеров) и возможности определения σ_1/σ_2 (при стравливании σ_3) и остаточных напряжений по азимуту на поверхности образца.

Толщину покрытия определяли согласно ГОСТ 9.302-88. Использовался способ определения массы покрытия по непосредственному взвешиванию деталей до и после снятия покрытия. Применялась следующая последовательность операций: деталь обезжиривали венской известью, промывали и тщательно высушивали в сушильном шкафу при температуре 105–120 °С. После охлаждения деталь взвешивали и погружали в соответствующий раствор до полного растворения покрытия. Затем деталь промывали водой, вновь высушивали в сушильном шкафу и после охлаждения взвешивали.

Составы растворов и режимы процессов для определения толщины покрытия методом снятия приведены в таблице 3.4 (химическое снятие) и таблице 3.5 (электрохимическое снятие) [11].

Толщину покрытия (h , мкм) при этом определяют по формуле:

$$h = \frac{10000 \cdot (m_1 - m_2)}{S \cdot \rho}, \quad (3.23)$$

где m_1 и m_2 – массы деталей до и после снятия покрытия, г;

S – поверхность детали, см²;

ρ – плотность металла покрытия, г/см³.

Взвешивание производили на аналитических весах ВЛР–200 ГОСТ 24104–88, представленных на рисунке 3.30, с точностью до 10⁻⁴ г.

Скорость осаждения хромовых покрытий ν мкм/мин определялась двумя методами:



Рисунок 3.30 – Аналитические весы ВЛР-200

1. Измерением толщины покрытия на поперечном шлифе образца [23] при помощи микроскопа МИМ-8, внешний вид которого показан на рисунке 3.31.

При этом скорость осаждения определялась по формуле:

$$v = \frac{H}{\tau}, \quad (3.24)$$

где: H – толщина покрытия, мкм;

τ - время хромирования, мин.

Толщина покрытия в этом случае определялась с помощью толщиномера «Константа К6Г», внешний вид которого представлен на рисунке 3.32.

2. Взвешиванием образцов на аналитических весах ВЛР-200 ГОСТ 24104-80. В этом случае скорость осаждения хрома определялась по формуле:

$$v = \frac{10^6 \cdot (m_1 - m_2)}{S \cdot \rho \cdot \tau}, \quad (3.25)$$

где m_1 – масса образца после хромирования, кг;
 m_2 – масса образца после расхромирования, кг;
 ρ – плотность хрома, кг/м³;
 S – площадь хромированной поверхности, м²;
 τ – время хромирования, мин.

Для расчета принималось среднее арифметическое значение скорости осаждения хрома.

Шероховатость поверхности получаемых покрытий определялась на профилографе-профилометре модели 252 и контролировалась на профилометре модели 283, представленных на рисунках 3.33 и 3.34 соответственно.

Микротвердость хромовых покрытий измерялась на микротвердомере ПМТ–3, изображенном на рисунке 3.35, при нагрузке на пирамиду силой 0,5 Н. Среднее значение микротвердости определялось из десяти измерений на поперечном шлифе образцов.



Рисунок 3.31 – Внешний вид микроскопа МИМ-8



Рисунок 3.32 – Толщиномер «Константа К6Г»



Рисунок 3.33 – Профилограф-профилометр мод. 252

Таблица 3.4 – Растворы для определения толщины покрытия методом снятия (химического)

| Вид покрытия | Основной металл или металл подслоя | Компоненты раствора | Концентрация компонента | Температура раствора, °С | Способ определения |
|--------------|------------------------------------|--|--|--------------------------|--------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Цинковое | Сталь | Кислота серная Кислота соляная | 50 г/л 17 г/л | 18 – 25 | По разности масс |
| Кадмиевое | Сталь | Аммоний азотнокислый | Насыщенный раствор | 18 – 25 | |
| Медное | Сталь | Ангидрид хромовый Аммоний азотнокислый | 275 г/л 110 г/л | 18 – 25 | |
| Никелевое | Сталь | Кислота серная ($d=1,84 \text{ г/см}^3$) Кислота азотная ($d=1,41 \text{ г/см}^3$) Железо сернокислое закисное | 1 объемная часть 2 объемные части 20 г/л | 18 – 25 | |
| Хромовое | Никель, медь и её сплавы | Кислота соляная ($d=1,19 \text{ г/см}^3$) Вода дистиллированная | 1 объемная часть 1 объемная часть | 20 – 40 | |
| Хромовое | Сталь | Кислота соляная Трехокись сурьмы | 366 г/л 20 г/л | 18 – 25 | |

Продолжение таблицы 3.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|------------------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Серебряное | Сталь, медь и её сплавы | Кислота серная ($d=1,84 \text{ г/см}^3$) Кислота азотная ($d=1,41 \text{ г/см}^3$) | 19 объемная часть 1 объемные части | 18 – 25 | Химический анализ на серебро |
| Оловянное, свинцовое, сплав олово-свинец | Сталь | Кислота борфтористоводородная ($d=1,15 \text{ г/см}^3$) Перекись водорода (30%-ая) Вода дистиллированная | 10 г/л 2,5 г/л 90 г/л | 18 – 25 | По разности масс |
| Сплав медь-цинк (латунь) | Сталь | Ангидрид хромовый Аммоний серноокислый | 275 г/л 110 г/л | 18 – 25 | |
| Сплав олово-медь (белая бронза) | Сталь | Кислота винная (50%-ая) Кислота азотная ($d=1,41 \text{ г/см}^3$) | 3 объемная часть 1 объемные части | 18 – 25 | |
| Вид покрытия | Основной металл или металл подслоя | Компоненты раствора | Концентрация компонента | Температура раствора, °С | Способ определения |
| Оловянное | Омедненная сталь | Свинец уксуснокислый Натр едкий | 80 г/л 135 г/л | Кипение | По разности масс |
| | Медь и её сплавы | Кислота соляная ($d=1,19 \text{ г/см}^3$) | - | 18 – 25 | |
| Свинцовое | Омедненная сталь | Кислота сульфаминовая Перекись водорода (30%-ая) Вода дистиллированная | 150 г/л 50 мл 1000 мл | 50 – 70 | |
| Анодноокисное | Алюминий и его сплавы | Кислота ортофосфорная Ангидрид хромовый | 52 г/л 20 г/л | 90 – 100 | |

Таблица 3.5 – Растворы для определения толщины покрытия методом электрохимического снятия

| Вид покрытия | Основной металл или металл подслоя | Компоненты раствора | Концентрация компонента | Температура раствора, °С | Плотность тока, А/дм ² | Материал катода | Способ определения |
|----------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------------|--------------------|
| Оловянное | Сталь | Натр едкий | 80 г/л | 50 – 70 | 1 – 3 | Сталь | По разности масс |
| Хромовое | Сталь | Натр едкий | 10 – 20% | 50 – 70 | 5 – 10 | Сталь | |
| Хромовое | Медь, латунь | Кислота соляная | 5% | 50 | 5 – 10 | Свинец | |
| Никельное | Медь, латунь | Натрий роданистый Натрия бисульфат | 100 г/л 100 г/л | 18 – 25 | 2 | Сталь | Химический анализ |
| Никельное | Цинк и сплавы цинка | Кислота серная | 70% | 18 – 25 | 2 | Свинец | |
| Серебрянное, золотое | Мель, латунь | Калий или натрий цианистый | 3 – 15% | 18 – 25 | 0,2 – 2 | Медь, латунь, сталь | |



Рисунок 3.34 – Профилометр мод. 283



Рисунок 3.35 – Микротвердомер ПМТ-3

Адгезия хромовых покрытий исследовалась согласно требований ГОСТ 9.302-88 и проверялась по известной ранее методике [62, 127, 143] весовым

методом при осаждении трубчатых образцов с нанесенным покрытием диаметром 32 мм и длиной 50 мм на четверть их длины на прессе и определялась из выражения:

$$C_u = \frac{m_3 - m_2}{m_1 - m_2} \cdot 100\%, \quad (3.26)$$

где: m_1 – масса образца после хромирования, кг;

m_2 – масса образца после расхромирования, кг;

m_3 – масса образца после сдавливания на прессе, кг.

Металлографические исследования дисперсно-упрочненных композиционных гальванических покрытий на основе хрома проводились на микроскопе МИМ-8.

Наводороживание сталей в процессе хромирования определялось согласно требований нагревом образцов в вакууме с последующим пересчетом выделившегося водорода на 100 г металла по известной методике [47].

Концентрация водорода вычислялась по формуле:

$$C_{Hz} = \frac{P_z \cdot 170}{m}, \quad (3.27)$$

где P_z – конечное давление в системе, МПа;

m – масса образца, кг;

C_{Hz} – концентрация водорода, см³/100 г.

Коррозионные испытания проводились в камере соляного тумана КСТ-1, изображенной на рисунке 3.36, в атмосфере распыленного раствора хлористого натрия концентрацией 50 г/дм³ при температуре 35 °С по ГОСТ 9.308-85 в течение 24 часов. Раствор изготавливался путем растворения NaCl (ГОСТ 4233-77) в дистиллированной воде (ГОСТ 6709-72). Образцы готовили по ГОСТ 9.909-86.

Параллельно описанному выше проводился эксперимент по выявлению пор в осадке, заключающийся в обработке исследуемого образца раствором железосинеродистого калия $K_3Fe(CN)_6$, который, относясь нейтрально к хромовому покрытию, реагирует с ионами железа, образуя турнбулеву синь.

Контроль испытаний на коррозионную устойчивость проводился также методом планиметрирования. С этой целью на увеличенных микрофотографиях с помощью планиметра измеряли площадь, занимаемую порами. Пористость выражают в процентах от общей площади измеряемого участка.

Исследования несущей способности (предела схватывания) хромовых покрытий проводилось на специальном стенде, изображенном на рисунке 3.37, имитирующем условия работы подвижных шарнирно-болтовых соединений на натуральных образцах в паре со втулкой БрАЖ 10-4 (медь – 86 %, алюминий – 10%, железо – 4%) по методике [37]. Скорости скольжения не превышали 0,1 м/с при нормальном температурном режиме работы узла (313–323 К). Трущаяся пара представляла собой стальной цилиндр из стали 40Х (ГОСТ 4543-2016) диаметром 30 мм с нанесенным на него покрытием, работающий совместно с бронзовыми втулками, изготовленными из бронзы БрАЖ 9-4 (ГОСТ 18175-78). Одновременно истиралось несколько образцов.



Рисунок 3.36 – Камера соляного тумана КСТ-1

Начальная скорость вращения подвижного цилиндра 600 мин^{-1} , начальное усилие его осевого прижима составляло $18,8 \text{ МПа}$.



Рисунок 3.37 – Стенд для определения несущей способности

Износостойкость покрытий определялась по схеме «ролик-колодка» в условиях сухого трения весовым методом.

Испытания износостойкости покрытий проводились на модернизированной машине трения МИ-1М, внешний вид которой представлен на рисунке 3.38, по схеме «ролик-колодка» в соответствии с ГОСТ 23.224-86.

Так как к поверхности хромированных деталей силовых элементов гидроагрегатов предъявляются требования по герметичности, исследовались структуры покрытий без пор и трещин. В каждой серии обрабатывались 4 детали. Для возможности проведения сравнительного анализа износостойкости деталей, полученных по разным технологиям, исследования были проведены на режимах проверки сопротивления износу, опубликованных в [98]. Триботехнические

испытания проводили на натурной типовой конструкции узла трения «ось



Рисунок 3.38 – Модернизированная машина трения МИ-1М

совместно с цилиндрическими подшипниками скольжения» на стенде СТО1А, имитирующего работу подвижных соединений авиационных стоек шасси. Установка снабжена устройством, обеспечивающим возвратно-поступательное движение образца. Трущаяся пара представляла собой стальной цилиндр из стали 40Х ГОСТ 4543-2016 диаметром 30 мм с нанесенным на него покрытием, работающий совместно с бронзовыми втулками, изготовленными из бронзы БрАЖ 9-4 ГОСТ 18175-78. Одновременно истиралось несколько образцов. Начальная скорость вращения подвижного цилиндра 600 мин^{-1} , начальное усилие его осевого прижима составляло 18.8 МПа. Критерием оценки износостойкости служила интенсивность износа.

Во время всех испытаний снимались показания момента трения интегратора, силы прижима колодки к ролику P и температуры колодки T . Снятие параметров момента трения интегратора и силы прижима колодки к ролику осуществлялось от датчиков электрического сопротивления через модуль

аналого-цифрового ввода ADAM 4017 и модуль преобразования интерфейса ADAM 4520 к компьютеру. Это позволило вести автоматическую запись этих параметров в память компьютера. Контроль температуры в зоне трения осуществлялся бесконтактным пирометром. Подача масла обеспечивалась самотёком через капельницу с регулируемым расходом. Пары трения изготавливали с размерами колодки наружного диаметра 60 мм, с внутренним диаметром под размер диска, а размер роликов составлял $\varnothing 40 \times 12$ мм. На ролики наносили покрытия для исследования износостойкости. Исследовались пары со стандартным покрытием и дисперсно-упрочненным композиционным гальваническим покрытием на основе хрома. Для имитации работы штоков гидроцилиндров колодки и ролики изготавливались из стали 40Х (ГОСТ 4543-2016) и подвергались термообработке до HV 580÷650.

Испытания на герметичность покрытий на деталях, прошедших восстановительные операции по различным технологиям, подтвердили, что покрытия, полученные по серийной технологии хромирования, не позволяют получить герметичное хромовое покрытие. Предлагаемая технология нанесения композиционных дисперсно-упрочненных покрытий позволяет добиться наличия в хромовом покрытии сжимающих остаточных напряжений, что обеспечивается при использовании рассчитанных режимов нанесения покрытий.

Состав полученных покрытий проверялся с использованием атомно-эмиссионного спектрометра «Искролайн-300», изображенного на рисунке 3.39 в соответствии с ГОСТ Р 54153-2010.

Технические характеристики атомно-эмиссионного спектрометра «Искролайн-300» представлены в приложении Д.

3.4 Стендовые испытания гидроцилиндров

Испытания гидроцилиндров МС80/50х710-3(4).32, эксплуатируемых на тракторах ДТ-75 (бульдозер Д606, ДЗ-42, ДЗ-162), проводились в ООО «ИНОКС РЕМ» г. Воронеж согласно методики, изложенной в ГОСТ 18464-96,

ГОСТ 16514-96 и ГОСТ 27.502-83 на стенде СГЦ-ПФГУХ-190/250-34/4-7,5/2,2 представленном на рисунке 3.40.



Рисунок 3.39 – Атомно-эмиссионный спектрометр «Искролайн-300»

Технические характеристики стенда СГЦ-ПФГУХ-190/250-34/4-7,5/2,2 представлены ниже:

| | |
|---|-----------|
| Привод электрический, мощность, кВт | 2,2 ÷ 7,5 |
| Напряжение, В | 380 |
| Объём масляного бака, л | 250 |
| Максимальное давление насоса низкого давления, бар | 190 |
| Максимальное давление насоса высокого давления, бар | 250 |
| Давление настройки насоса низкого давления, бар | 10 ÷ 190 |
| Давление настройки насоса высокого давления, бар | 80 ÷ 250 |
| Давление настройки клапана давления проверки гидросистемы, бар | 10 |
| Максимальная производительность, л/мин | 34 |
| Максимальная производительность насоса высокого давления, л/мин | 4 |

| | |
|---|----------------|
| Тонкость фильтрации, мкм | 25 |
| Диапазон рабочих температур РЖ при эксплуатации, °С | -10 ÷ +60 |
| Габаритные размеры, ДхШхВ, мм не более | 1600x1600x1500 |
| Масса, кг не более | 570 |



Рисунок 3.40 – Стенд для испытаний гидроцилиндров

Рабочая жидкость – минеральное масло ВМГЗ ТУ 38 101479-86 или аналоги

Климатическое исполнение У категорий размещения 3.1 по ГОСТ15150-69.

Температура окружающей среды – от -20 °С до +40 °С.

Принципиальная гидравлическая схема вышеприведенного стенда представлена на рисунке 3.41.

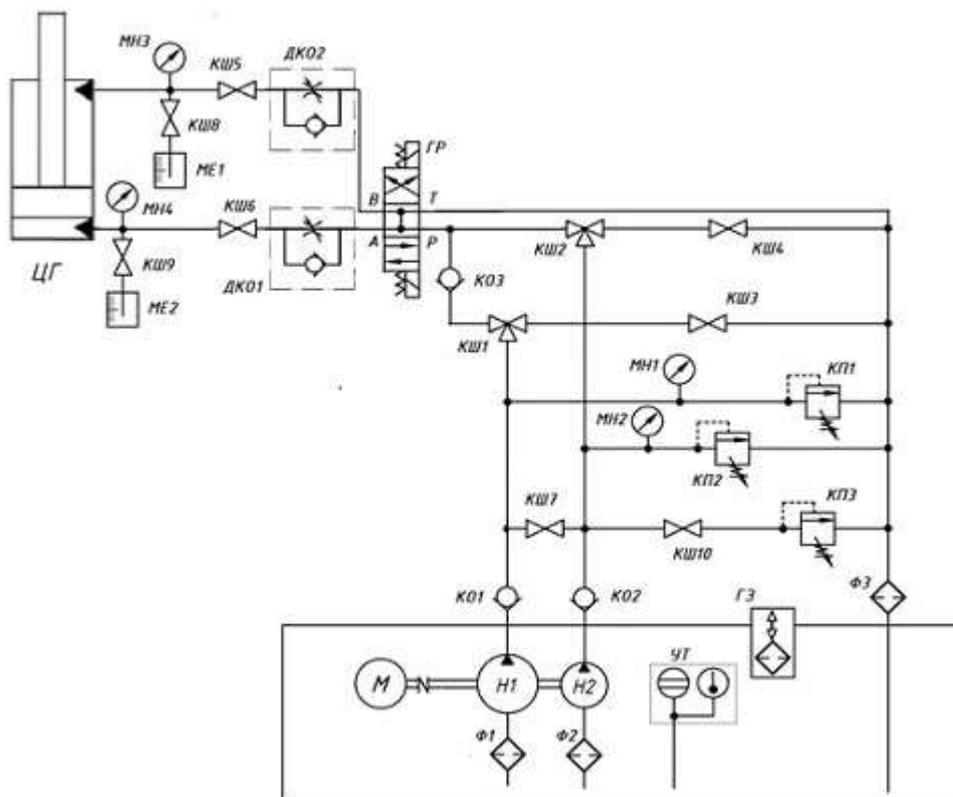


Рисунок 3.41 – Принципиальная гидравлическая схема

Основные механизмы схемы представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Основные узлы стенда для испытаний

| Наименование, обозначение | Назначение |
|---------------------------|---|
| Манометр напорный МН1 | Контроль настройки рабочего давления насоса низкого давления |
| Манометр напорный МН2 | Контроль настройки рабочего давления насоса высокого давления |
| Манометр напорный МН3-МН4 | Контроль давления полостей гидроцилиндра при испытаниях |

| Наименование, обозначение | Наименование, обозначение |
|---|---|
| Трехпозиционный гидрораспределитель с электромагнитным управлением ГР | Управление потоком рабочей жидкости |
| Клапан предохранительный КП1 | Настройка рабочего давления насоса низкого давления |
| Клапан предохранительный КП2 | Настройка рабочего давления насоса высокого давления |
| Клапан предохранительный КП3 | Настройка давления проверки гидравлической системы. Заводская настройка 10 бар. |
| Клапан обратный КО1-КО2 | Предохраняет напорную линию насоса от перегрузок |
| Клапан обратный КО3 | Организует совместную работу линий низкого и высокого давлений |
| Дроссель с обратным клапаном ДКО1-ДКО2 | Управление расходом рабочей жидкости в магистралях |
| Кран шаровый КШ1-КШ2 | Переключение направления потока рабочей жидкости от насоса в бак. КШ3-КШ4 открыты. |
| Кран шаровый КШ3-КШ4 | При закрытых КШ3-КШ4 производится настройка КП1-КП2. |
| Кран шаровый КШ5-КШ6 | Перекрытие линий при испытаниях. |
| Кран шаровый КШ7 | При открытом КШ7 максимальный расход рабочей жидкости при низком давлении (совместная работа насосов) |
| Кран шаровый КШ8-КШ9 | Открытие линий для сбора рабочей жидкости при испытании на утечки |
| Кран шаровый КШ10 | Открытие линий для проверки гидравлической системы. Кран КШ7 открыт. |

Принцип работы стенда заключается в следующем. Электродвигатель вращает масляные насосы, которые через всасывающие фильтры забирают

рабочую жидкость из гидробака. От насосов под давлением рабочая жидкость поступает в пульт управления. В пульте управления обе напорные линии соединяются в одну и по ней рабочая жидкость подается к гидрораспределителю. Мощность электродвигателя не позволяет обеспечить подачу рабочей жидкости при максимальном давлении обоих насосов. Для обеспечения работоспособности насосного агрегата требуется настройка рабочего давления в линиях низкого и высокого давления. Настройка давления осуществляется при закрытых кранах КШ3-КШ4-КШ7. Краны КШ1-КШ2 переключены на подачу рабочей жидкости от насосов к кранам КШ3-КШ4. В нейтральном положении регулятора Р через сливной фильтр Ф3 рабочая жидкость сливается обратно в гидробак. При нажатии кнопки "ВВЕРХ" на пульте дистанционного управления (ПДУ) гидрорегулятор (ГР) переключается в положение подачи давления в канал А и далее в поршневую полость гидроцилиндра. При нажатии на ПДУ кнопки "ВНИЗ" ГР переключается в положение подачи рабочей жидкости в канал В и далее в штоковую полость гидроцилиндра. Дроссели ДКО1 и ДКО2 позволяют регулировать объем (л/мин) потока рабочей жидкости по каналам В и А соответственно. Закрытие-открытие кранов КШ5-6-8-9 производятся согласно алгоритма выполнения операций при испытаниях.

Испытания на прочность проводятся в следующей последовательности. Подключить гидроцилиндр, предназначенный для испытаний. Выставить регулируемую гидравлическую аппаратуру в состояние испытания низким давлением. Включить двигатель. Несколько раз выдвинуть и задвинуть шток гидравлического цилиндра для удаления воздуха и проверки гидросистемы. Выставить регулируемую гидравлическую аппаратуру в рабочее состояние. Произвести проверку. Прочность гидроцилиндров проверять при статическом пробном давлении $P=1.5 \times P_{\text{ном}}$ по ГОСТ 16514-96 в течение не менее 3 мин. Прочность гидроцилиндров двухстороннего действия проверять в двух крайних положениях поршня, гидроцилиндров одностороннего действия – в одном крайнем положении поршня. Не допускаются видимые признаки разрушения и деформации гидроцилиндра, прекращение функционирования, нарушение

наружной герметичности или превышение установленных норм герметичности через уплотнитель штока (плунжера). Выключить двигатель.

Испытания на функционирование на холостом ходу проверяют путем последовательного сообщения полостей (полости) с напорной и сливной магистралями, осуществляя трехкратное перемещение штока (плунжера) по всей длине в обе стороны. Проверку функционирования допускается совмещать с проверкой давлений страгивания и холостого хода. Проверку функционирования проводить в двух режимах: без нагрузки и при номинальном давлении.

Испытания на наружную герметичность по неподвижным соединениям проводят при статическом пробном давлении $P=1.25 \times P_{ном}=50$ МПа по ГОСТ 16514-96 в рабочих полостях гидроцилиндра.

Испытания на внутреннюю утечку следует проводить при номинальном давлении не менее чем через 30 секунд после установки поршня в двух крайних и среднем положениях. Утечку рабочей жидкости, поступающую из полости гидроцилиндра, не находящейся под давлением, следует измерять путем фиксирования секундомером времени заполнения мерной емкости.

Для проверки внутренней утечки рабочей жидкости в среднем положении требуется приспособление для упора штока и фиксации гидроцилиндра.

Алгоритм проверки. Шток гидроцилиндра устанавливается для проверки в одно из крайних или среднее положение с упором. Через 30 секунд закрывается кран КШ5 или КШ6 ненапорной полости. Открывается соответствующий кран КШ8 или КШ9. Проводятся измерения заполнения емкостей МЕ1 или МЕ2. Затем шток гидроцилиндра устанавливается для проверки в среднее положение без упора. Гидрораспределитель находится в нейтральном положении. Закрывается кран КШ5 или КШ6 ненапорной полости. Подается давление. Внутренние утечки оцениваются по показаниям манометров МН1 и МН2.

При наличии внутренних перетечек давление в штоковой и бесштоковой полостях гидроцилиндра выравнивается и, так как площадь поршня в этих полостях различна, появляется сила, выталкивающая (втягивающая) шток гидроцилиндра.

Скорость выталкивания штока зависит от внутренних перетечек (л/мин) в гидроцилиндре, которые можно определить по формуле

$$Q = \frac{h \cdot S}{1000 \cdot t} \quad (3.28)$$

где: Q – внутренние перетечки, л/мин;

h – длина выдвижения штока, см;

S – площадь поршня в штоковой полости гидроцилиндра;

t – время измерения выдвижения штока, мин.

3.5 Эксплуатационные испытания гидроцилиндров

Эксплуатационные испытания являются завершающей стадией создания агрегата. Они осуществлялись на специальных изделиях-лабораториях в течение всего периода эксплуатации и ставили своей целью обнаружение отказов и неисправностей на ранних этапах их развития. Испытания проводились на действующих образцах техники, согласно ГОСТ 22976–78 «Гидроприводы, пневмоприводы и смазочные системы. Правила приемки».

При проведении испытаний в гидросистему устанавливался гидротестер ДНМ403 для постоянного контроля давления. Если гидротестер будет установлен перед предохранительным клапаном, то создавать давление в гидросистеме нужно осторожно, чтобы не было превышено максимально допустимое давление. Случайное увеличение расхода рабочей жидкости во время использования нагружающего давления, если его не контролировать, может привести к внезапному повышению давления, которое может разорвать рукав высокого давления или повредить насос.

Подготовка к испытаниям включает следующие этапы:

1. Составление программы и методики испытаний;
2. Отбор испытательных образцов;

3. Диагностирование и устранение неисправностей, которые препятствуют нормальной работе узла и могут отразиться на результатах или безопасности испытаний;

4. Установка на агрегате испытательной аппаратуры или выполнение подготовительных работ (установка кронштейнов, датчиков, проводки и т.д.);

При отборе испытательных образцов необходимо исключить выбор лучшего по качеству образца. При проведении эксплуатационных испытаний допускается устранение нехарактерных неисправностей, которые могут привести к срыву программы длительных испытаний. Для получения достоверных результатов испытаний, согласно ГОСТ Р 51672-2000, обеспечивалось условие воспроизводимости, т.е. такие условия, при которых результаты измерений получали одним и тем же методом, на идентичных объектах испытаний, разными исполнителями, с использованием различного оборудования. В случае длительных испытаний при необходимости выполнялось плановое техническое обслуживание гидроцилиндра в соответствии с регламентом.

Эксплуатационные испытания гидроцилиндров проводили в войсковой части 23449 на бульдозерах ДЗ-42 и на тракторах ДТ-75 в ООО «Текс» на территории сельхозугодий Воронежской области. Перед проведением испытаний гидроцилиндры ЦГ-80.56x710.31 были отрегулированы и в течение 15 часов обкатаны на стенде СГЦ-ПФГУХ-190/250/-34/4-7,5/2,2.

В процессе эксплуатационных испытаний контролировали наработку гидроцилиндров, проверяя течь гидравлической жидкости по резиновым уплотнителям и уровень специальной жидкости в системе.

Анализ и обработку экспериментальных данных для оценки эксплуатационной надежности проводили в соответствии с ГОСТ 27.301-95 [1, 148].

3.6 Математическая обработка экспериментальных данных

Погрешность результатов экспериментов оценивалась методом определения средней квадратичной погрешности [27].

Средняя арифметическая величина измерений \bar{y} определялась по формуле [25]:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (3.30)$$

где y_i – значение отдельного результата измерений;

n – количество измерений.

Отклонение результатов любого эксперимента от среднего арифметического (его погрешность) находилась из выражения:

$$\Delta y_i = |y_i - \bar{y}| \quad (3.31)$$

где y_i – результат отдельного эксперимента.

Средняя квадратичная ошибка отдельного эксперимента определялась из выражения:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n-1}} \quad (3.32)$$

Грубые ошибки при повторных экспериментах определялись с использованием критерия Стьюдента по формуле [25]:

$$\frac{y_{i+1} - \bar{y}}{S} \geq t_T \quad (3.33)$$

где y_{i+1} – значение сомнительного результата измерений;

\bar{y} – среднее арифметическое значение измерения, вычисленное без учета сомнительного результата;

S – средняя квадратичная ошибка, вычисленная без учета сомнительного результата;

t_T – табличное значение критерия Стьюдента, взятое при определенном количестве экспериментов и заданном уровне значимости.

Если вычисленное значение критерия Стьюдента оказывалось больше табличного, сомнительный результат подвергался дополнительной

экспериментальной проверке или не принимался во внимание. Ошибка среднего арифметического рассчитывалась по формуле:

$$\Delta S_{\bar{y}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (3.34)$$

Границы доверительных интервалов при заданной вероятности и определенном количестве экспериментов «n» определялись по формуле [25]:

$$\Delta y = t_m \cdot \Delta S_{\bar{y}} \quad (3.35)$$

Относительная ошибка результатов эксперимента находилась из выражения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta y}{y} \cdot 100\%. \quad (3.36)$$

Количество экспериментов в каждой точке 3–5.

При проведении исследований применялось математическое планирование эксперимента [1]. Статистические вычисления проводились с использованием регрессионного анализа. Для обработки результатов экспериментов и расчета пошаговой множественной регрессии применялся пакет “Statistika”.

Равномерность дисперсий проверялась по критерию Кохрена [25].

При этом значимость коэффициентов регрессии определялась по критерию Стьюдента (t-критерий) [27].

Коэффициент считался значимым, если выполнялось условие:

$$t_p > t_m, \quad (3.37)$$

где t_p – расчетное значение t-критерия;

t_m – табличное значение t-критерия.

Табличное значение t-критерия находилось из таблицы 14 [27] при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы:

$$f = (n - 1)N$$

где N – число точек плана в матрице планирования;

n – число параллельных экспериментов.

Однородность дисперсий проверялась по критерию Кохрена [25].

Адекватность полученной модели проверялась по критерию Фишера (F -критерий) [27]. Модель считалась адекватной, если выполнялось условие:

$$F_p < F_{кр},$$

где $F_{кр}$ – критическое значение F -критерия для степеней свободы $F_{ад} = N - m$ и $f_e = N(n - 1)$ с уровнем значимости $\alpha = 0,05$.

Расчетное значение F -критерия определялось по формуле:

$$F_P = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{y\}} \quad (3.38)$$

Дисперсия адекватности определялась из выражения:

$$S_{ад} = \frac{n}{N - m} \sum_{j=1}^n (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2 \quad (3.39)$$

где N – число точек плана в матрице планирования;

n – число параллельных экспериментов;

m – число членов аппроксимирующего полинома;

\bar{y}_j – среднее значение параметра оптимизации в точке плана;

\hat{y}_j – значение параметра оптимизации, вычисленное по аппроксимирующему полиному.

Дисперсия воспроизводимости определялась из выражения:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{N(n-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j)^2 \quad (3.40)$$

где y_{ji} – значение i -ого параметра оптимизации в j -ой точке плана;

\bar{y}_j – среднее значение параметра оптимизации в j -ой точке плана;

N – число точек плана в матрице планирования;

n – число параллельных экспериментов.

Для подтверждения использования во время исследования критериев наилучшей оценки исследуемых параметров проводили проверку измеряемых параметров на несмещённость (математическое ожидание оценки истинного значения прямого

измерения должно совпадать с истинным значением измеряемой величины), состоятельность (при увеличении числа измерений дисперсия оценки истинного значения прямого измерения стремится к нулю) и эффективность.

3.7 Выводы по главе

1. Выработана научная концепция нанесения размерного герметичного композиционного хромового покрытия, на основе которой определены методики исследования.

2. Научно обоснован выбор объектов исследований, рабочих сред, материалов образцов для испытаний.

3. Спроектировано и изготовлено оборудование для экспериментальных исследований, спланированы условия проведения экспериментов.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Определение размера наполнителя и состава композиционного покрытия базового и финишного слоя

4.1.1 Определение качественного состава и размера наполнителя базового и финишного слоя для электролитического композиционного покрытия на основе хрома

Известна возможность соосаждения инертных мелкодисперсных частиц при их электроосаждении с получением композиционных покрытий на основе металлической матрицы. Хром привлекателен в качестве металлической матрицы по целому ряду причин: в том числе хороших износостойкости и термостойкости. Однако хром из всех электроосажденных металлов обладает наименьшим сродством к веществам дисперсной фазы [150]. Значительный интерес для практики представляют композиции с оксидами и карбидами, как высокопрочными и высокотемпературными материалами.

Хромовые композиционные электролитические покрытия (КЭП), содержащие микро и субмикрочастицы твёрдых фаз представляют интерес по причине повышения функциональных характеристик относительно классических хромовых покрытий. В выборе материала дисперсной фазы в данной работе исходили из следующих требований:

- материал дисперсной фазы должен обладать лучшими механическими свойствами, чем хромовое покрытие;
- размеры частиц должны быть много меньше толщины покрытий, применяемых для создания функциональных свойств тяжело нагруженных деталей и даже сопоставимы с толщиной прикатодной плёнки, характерной для электролитов хромирования величина которой составляет по разным данным от 0,1 мкм [150], до, согласно модельным расчётам [64], 1 мкм;
- порошки дисперсных фаз должны обладать высокой химической чистотой;

- частицы должны быть устойчивы в среде электролита при рабочих температурах в течение длительного времени;
- порошки дисперсных фаз должны быть относительно коммерчески доступны для дальнейшего практического применения таких покрытий в промышленности.

Среди материалов, используемых в качестве второй фазы, с целью повышения микротвердости наращенного слоя, наиболее используемыми являются Al_2O_3 , TiO_2 , TiC , WC . В [87] указывается, что микротвердость композиционных покрытий на основе железа, содержащих частицы Al_2O_3 выше, а остаточные напряжения незначительно ниже, чем у стандартных покрытий. Снижение остаточных напряжений в 2–3 раза по сравнению со стандартными покрытиями отмечено в композиционных электролитических покрытиях на основе никеля при введении в качестве наполнителя карбида титана [93].

Одним из самых важных параметров осаждения является размер включаемых в покрытие частиц: чем меньше их размеры, тем равномернее они распределены по матрице и тем более совершенны физические свойства покрытия [124]. Так, композиционные материалы с ультрадисперсной структурой, содержащие в своем составе включения микропорошков, по сравнению с обычными материалами, имеют прочность в 2–3 раза выше [64]. Микротвердость возрастает в несколько раз, растет вязкость разрушения [156]. Однако, авторы [171-174, 191, 192] в своих исследованиях указывают, что при получении дисперсно-упрочненных материалов уменьшение размера зерна с целью получения покрытий максимальной твердости и износостойкости возможно до некоторого предела, как правило, ограниченного прикатодной пленкой, после которого наблюдается снижение твердости и износостойкости покрытий. В [136] также сообщается о повышении твердости покрытий на 21%, а износостойкости на 30% по сравнению со стандартными покрытиями при использовании электролит-суспензии с субмикронными зернами карбида вольфрама. Преимущество мелкозернистых сплавов связывается с эффектом Холла–Петча, т.е. с ролью границ зерен, как зон торможения, на пути распространения

дислокаций.

Поверхность образцов, получаемых из электролита с добавлением неэлектропроводных частиц субмикронных размеров, к которым относится оксид алюминия, также является более сглаженной, но имеет более развитую трещиноватость по сравнению с композиционными электролитическими покрытиями с включениями электропроводных частиц. Включения дисперсной фазы визуалью гораздо меньше, их распределение более равномерно. Аналогичная ситуация наблюдается и в объёме получаемых покрытий [136, 190].

В присутствии неэлектропроводной дисперсной фазы наблюдается более мелкокристаллическая структура покрытия, по аналогии со стационарным режимом нанесения. Однако для поверхности таких покрытий характерно большее количество сфероидов по сравнению с покрытиями, полученными в стандартном электролите. Морфология осадка включает в себя определенное количество зарощенных в покрытие включений частиц оксида алюминия. Поверхность образцов шероховатая и по мере увеличения продолжительности процесса осаждения этот параметр увеличивается.

Для покрытий, полученных в электролите, содержащем электропроводную дисперсную фазу, к которой можно отнести карбид титана, характерно наличие на поверхности образцов металлизированных частиц, причём с увеличением продолжительности времени процесса осаждения увеличение общего числа таких объектов заметно даже визуалью. Многие авторы [89, 136, 174] отмечают, что композиционные электролитические покрытия, полученные в электролитах с добавлением электропроводных частиц, демонстрируют значительно большее количество включений, чем покрытия из электролита с содержанием диэлектрического наполнителя. Автор видит объяснение этому эффекту в механизме формирования покрытия, при котором электропроводные частицы зарощаются гальваническим покрытием по всей контактной площади, а диэлектрические частицы только по периметру активной зоны осаждения, что придаёт ей меньшее сцепление с материалом матрицы покрытия (рисунок 4.1). В результате этого, для удаления диэлектрической частицы из матрицы на

начальном этапе ее внедрения, при контакте с инструментом требуется гораздо меньшее усилие, чем для электропроводной частицы, т.е. $F_2 \ll F_1$.

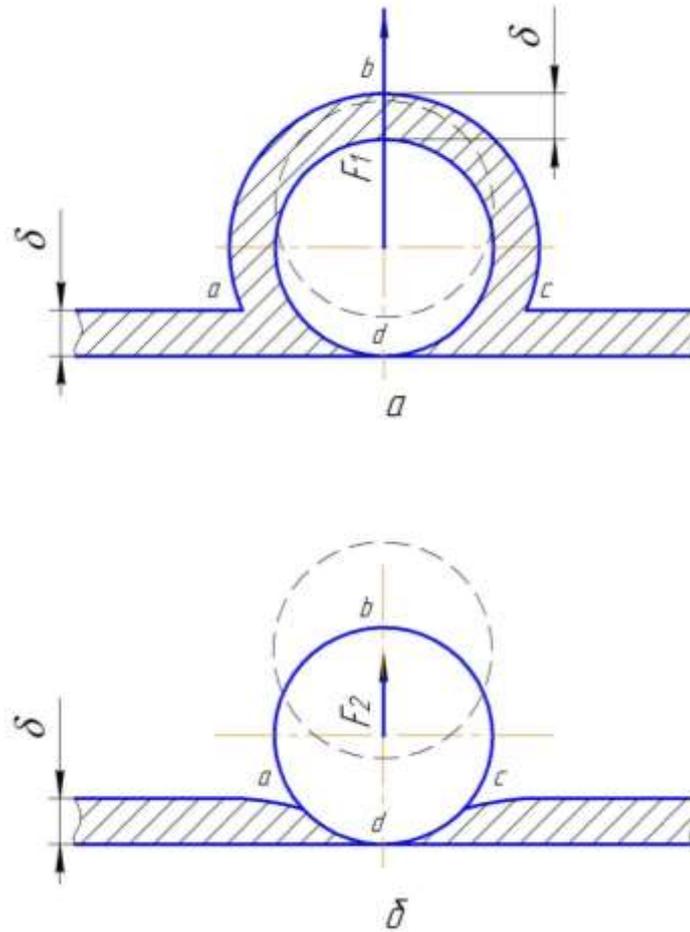


Рисунок 4.1 – Схема внедрения частиц наполнителя в матрицу:

- а – для электропроводных частиц;
- б – для диэлектрических частиц

В литературе отмечается, что введение нанопорошков увеличивает значения микротвёрдости, однако в меньшей степени, чем более крупные частицы микропорошка [60]. Однако, многие авторы придерживаются мнения, что существенным ограничением на использование для наполнителя микропорошков является эффект снижения выхода по току хрома, ввиду изменения истинной площади поверхности электрода. Наибольшее негативное влияние оказывают частицы электропроводной фазы за счёт увеличения при их контакте с катодом его истинной площади и соответствующего снижения истинной плотности тока. Добавление электропроводной фазы снижает микротвердость во всем диапазоне

исследованных плотностей тока [60].

На основании опыта исследований, подтвержденного практикой, с целью получения покрытий, имеющих заданную микротвердость и прогнозируемые физико-механические характеристики в работе предлагается использовать комбинированное композиционное электролитическое покрытие, где в качестве упрочняющей фазы применить состав из оксида алюминия и карбида титана. Размер упрочняющей фазы должен соответствовать параметру 0,1–0,5 мкм. Таким параметрам соответствуют шлифпорошок оксида алюминия 25А М1 ГОСТ 28818-90 и карбида титана КТ 1/0 ПОТ ТУ 1798-111-75420116-2006.

Традиционно в композиционных электрохимических покрытиях в качестве дисперсной фазы используются весьма твердые вещества (карбиды, оксиды, бориды и т.п.), что повышает их износостойкость в условиях абразивного изнашивания. При работе же в сопряжениях с другими деталями твердые частицы на поверхности одной из деталей во-первых, вызовут ускоренный износ сопряженной детали, во-вторых, существует опасность их выкрашивания из состава композиционных электролитических покрытий (КЭП) и попадание в рабочую зону между трущимися поверхностями сопряженных деталей. В этом случае будет наблюдаться классический абразивный износ, причем со значительной скоростью износа, благодаря использованию в качестве наполнителя композиционного материала, как правило, сверхтвердых частиц.

В этом случае, для создания финишного слоя композиционного электролитического покрытия более уместным будет использование в качестве наполнителя дисульфида молибдена (твердой смазки), что позволит уменьшить износ как восстановленных, так и сопряженных деталей. Повышенная прочность, микротвердость и соответственно износостойкость данного покрытия будет обеспечиваться применением в качестве матрицы хромового покрытия, подверженного деформации в процессе его осаждения. В момент экранирования инструментом поверхности катода, осуществляется деформирование растущих кристаллов хрома. После прохождения инструмента над конкретным участком катода, когда снимается экранирование, под действием поляризующего тока

катодная пленка мгновенно восстанавливается и там продолжается обычное электролитическое осаждение. В работе [44] доказывается, что катодная пленка препятствует разгрузке деформированных кристаллов осадка и при многократном, даже упругом деформировании, это явление позволяет накапливать в осадке значительные суммарные деформации. Там же утверждается, что многократное упругопластическое деформирование, возникающие вследствие механического воздействия, вызывает упрочнение покрытия и повышает его микротвердость и износостойкость.

4.1.2 Определение количественного состава композиционного покрытия базового слоя

КЭП, образованные за счет включений оксидов, карбидов, нитридов, боридов, обладают повышенной твердостью и износостойкостью по сравнению с чистыми покрытиями. Однако, с повышением твердости у них повышается хрупкость [17, 172]. Гальванические сплавы, хотя и обладают повышенной твердостью сравнительно с моноподкрытиями, имеют низкую тепло- и электропроводность; кроме того, их получение связано с затруднениями технологического порядка. В связи с этим предпочтение отдается композиционным гальваническим покрытиям.

Изучению механических свойств гальванических композиционных покрытий посвящен ряд работ [114, 192]. Большинство авторов [44, 91, 190] придерживается мнения, что повышение физико-механических свойств электролитического хрома возможно путем создания композиционного электролитического покрытия на основе хрома с введением карбидов или оксидов. Допускаются «мягкие» включения, которые не изменяют твердости КЭП. К таким веществам относятся дисульфид молибдена, графит, никель. Эти включения намного мягче, чем корунд и не вызывают существенных структурных изменений в матрице.

Важным преимуществом КЭП сравнительно с твердыми гальваническими

покрытиями (в том числе и сплавами) является сохранение у них повышенных значений твердости во времени, в то время как обычные покрытия с начальной высокой твердостью теряют твердость уже в первые дни и часы после получения [102, 158].

Износостойкость КЭП в несколько, а иногда и в десятки раз выше, чем чистых покрытий.

Известно [84], что повышение твердости гальванических покрытий на 10—15% часто приводит к многократному повышению их износостойкости [92]. Но увеличение твердости приводит к повышению хрупкости или внутренних напряжений осадков [84, 87]. Для разных случаев истирания существует оптимальная величина твердости, при которой наблюдается минимальный износ.

Процесс упрочнения, как предполагают [109, 162], происходит вследствие помех, создаваемых частицами перемещению дислокаций в плоскости их скольжения. Известно также, что частицы в материале препятствуют росту зерен. При уменьшении размеров частиц и неизменной их концентрации расстояние между частицами уменьшается, что приводит к образованию тонких пленок металла, которые обладают большей прочностью, чем компактной упаковкой формируемого металла.

Нарушение структуры матрицы, вызываемое диспергированием в ней частиц посторонних веществ, может привести к повышению или понижению внутренних напряжений. Чаще всего это наблюдается у покрытий на основе хрома и железа.

Получение композиционных электролитических покрытий на основе хрома связано с рядом затруднений. Особенно это касается внедрения в покрытия высокотемпературных твердых оксидов, карбидов и других веществ, которые соосаждаются сравнительно легко с покрытиями из никеля, меди, железа, олова и другими металлами. Многие авторы пришли к отрицательным результатам при попытке получения хромового покрытия, содержащего частицы оксидов [54, 89, 94].

Однако есть сведения о получении покрытий хрома из суспензий с Al_2O_3 ,

SiO_2 , и MoS_2 при воздушном или механическом перемешивании.

Некоторые авторы [143] считают, что для получения КЭП необходим высокий катодный выход матрицы, чего нет при хромировании. Выделяющийся бурно на катоде водород затрудняет вхождение частиц в покрытие. Противодействие хромового покрытия включениям связывают также с выраженной выравнивающей способностью электролитов хромирования [74].

Возможно, что затруднение образования КЭП с рядом веществ объясняется поведением самого металлического хрома — его плохой смачивающей способностью. Так, при получении многослойных покрытий Ni-Cr, содержащих промежуточный слой никеля или серебра с включениями частиц, наружным слоем является хром. Он «обходит» частицы изолятора, внедренные в промежуточный слой. В результате этого слой хрома получается рыхлым.

Описанная выше отчужденность хрома к включениям относится в первую очередь к частицам-изоляторам. Несколько иное отношение хромовых покрытий к веществам, обладающим заметной проводимостью: сульфидам, карбидам и боридам циркония, вольфрама, титана, нитриду циркония и карбиду молибдена [17, 127].

С другой стороны частицы-проводники, используемые для получения КЭП, способствуя заращиванию смежных частиц-изоляторов и удержанию их в прикатодном слое, быстрее обрастают гальваническим покрытием, что ухудшает не только шероховатость поверхности, подвергаемой нанесению покрытия, но и структуру покрытия, т.к. такой механизм осаждения КЭП способствует образованию дендритов.

Дисперсные частицы непрерывно контактируют с поверхностью катода и упрочняющее их воздействие проявляется как в момент захвата (заращивания) металлом, так и при внедрении (ударе) о поверхность катода. В момент удара частица поверхностью контакта экранирует катод, искажая (усложняя) тем самым структуру первоначальной электрокристаллизации металла. В этот же момент происходит потеря частицей кинетической энергии, зависящей от ее скорости, угла контакта с катодом, приводящая к эффекту наклепа или шлифования-

полирования. В этом случае, как и при «захвате» частиц металлом, происходит усложнение структуры покрытия и его упрочнение. Степень упрочнения металла зависит от числа контактов частиц с катодом, их размеров, плотности и скорости.

Расширение областей практического использования дисперсно-упрочненных гальванических покрытий в качестве износостойкого материала неразрывно связано с необходимостью придания ему более высоких ударной прочности, твердости, жесткости и теплостойкости. Повышение жесткости, твердости и теплостойкости достигается увеличением жесткости его макромолекул или повышением степени кристалличности путем введения наполнителя, с твердостью превышающей твердость матрицы.

Учитывая вышеизложенное, предлагается разработать состав композиционного гальванического покрытия на основе хромовой матрицы с включениями оксида алюминия (корунда) и карбида титана. Оксид алюминия ведет к повышению твердости и жесткости осадка с целью повышения его износостойкости, а карбида титана, как электропроводный материал, введен с целью увеличения однородности получаемого покрытия.

Из литературных данных известно, что повышение микротвердости покрытия, как правило, повышает его износостойкость. В связи с этим, в качестве функции отклика в исследованиях состава электролитического композиционного покрытия, обеспечивающего максимальную его износостойкость, была выбрана микротвердость получаемых покрытий, так как она в значительной степени влияет на износостойкость покрытий, требует несложное оборудование для измерения и снижает временные и материальные затраты на проведение дополнительных экспериментов.

Для реализации поставленной задачи был реализован многофакторный эксперимент по центральному композиционному плану [1].

В качестве функции отклика приняли микротвердость электролитических композиционных гальванических покрытий на основе хрома, а основными факторами – концентрацию наполнителей: оксид алюминия Al_2O_3 (ГОСТ 28818-90) и карбид титана TiC (ГОСТ 28377-89). На основании проведенных

предварительных исследований были выбраны следующие уровни варьирования факторов, представленные в таблице 4.1.

Таблица 4.1– Уровни варьирования факторов, влияющих на микротвердость (базовый слой)

| Факторы | Обозначение | Уровни | | |
|-----------------------------|-------------|---------|--------|-----------------------|
| | | верхний | нижний | Интервал варьирования |
| оксид алюминия Al_2O_3 | X_1 | 0,08 | 0,02 | 0,03 |
| карбид титана TiC | X_2 | 0,05 | 0,01 | 0,02 |

В таблице 4.2 представлены план и результаты центрального композиционного плана многофакторного эксперимента.

В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение, описывающее зависимость состава композиционного гальванического покрытия от исследуемых факторов.

Полученная модель подвергалась проверке на адекватность согласно критерию Фишера [27]. Модель считалась адекватной, если $F_p < F_{кр}$. Расчет представлен в табличной форме в таблице 4.3. Для полученной модели данное условие выполняется, следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает влияние основных факторов состава композиционного гальванического покрытия на его микротвердость.

Таблица 4.2 – Результаты эксперимента по поиску рационального состава композиционного материала

| | | |
|----------------------|----------|----------|
| Н _ц , ГПа | X_1 | X_2 |
| 13,01 | -1,00000 | -1,00000 |

| | | |
|-------|----------|----------|
| 13,74 | -1,00000 | 1,00000 |
| 13,61 | 1,00000 | -1,00000 |
| 13,39 | 1,00000 | 1,00000 |
| 13,07 | -1,41421 | 0,00000 |
| 13,24 | 1,41421 | 0,00000 |
| 13,53 | 0,00000 | -1,41421 |
| 13,89 | 0,00000 | 1,41421 |
| 14,32 | 0,00000 | 0,00000 |
| 14,31 | 0,00000 | 0,00000 |

Таблица 4.3 – Проверка адекватности модели

| Зависим. Перемен. | SS модели и SS остатков (Табл 4-1 эксп осн) | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|---------|---------|
| | Множеств R | Множеств R2 | Скоррект R2 | SS Модель | сс Модель | MS Модель | SS Остаток | сс Остаток | MS Остаток | F | p |
| Н _μ | 0,99997 | 0,99994 | 0,99987 | 1,93257 | 5 | 0,38651 | 0,00011 | 4 | 0,00002 | 13856,2 | 0,00000 |

Проверка коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента [27], показала, что все коэффициенты регрессии оказались больше табличного $t_m = 2,09$ [1].

Модель считается работоспособной, если у этой модели коэффициент детерминации $R^2 > 0,75$. Как видно из расчетов, представленных в таблице 4.3, данное условие выполняется, следовательно, модель работоспособна.

Определим значения переменных, при которых функция отклика имеет максимальное значение.

В ходе расчетов были получены данные, представленные в таблице 4.4, позволившие определить уравнение регрессии для поверхности отклика искомой функции.

Видно, что регрессионное уравнение в кодированных значениях примет вид

$$N_{\mu} = 14,32 + 0,06x_1 - 0,58x_1^2 + 0,13x_2 - 0,3x_2^2 - 0,24x_1x_2. \quad (4.1)$$

Раскодируем полученное выражение. Получим:

$$N_{\mu} = 11,14 + 78,44x_1 + 71,5x_2 - 644,44x_1^2 - 750,00x_2^2 - 400,00x_1x_2. \quad (4.2)$$

Таблица 4.4 – Расчет параметров функции отклика

| Эффект | Оценки параметров (Табл 4-1 эксп осн) Сигма-ограниченная параметризация | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|-------------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | Н μ Парам. | Н μ Ст.Ош. | Н μ t | Н μ p | -95,00% Дов.Пр. | +95,00% Дов.Пр. | Н μ Beta (B) | Н μ Ст.Ош.В | -95,00% Дов.Пр. | +95,00% Дов.Пр. |
| Св. член | 14,31500 | 0,003735 | 3833,066 | 0,000000 | 14,30463 | 14,32537 | | | | |
| X ₁ | 0,06130 | 0,001867 | 32,829 | 0,000005 | 0,05612 | 0,06649 | 0,124721 | 0,003799 | 0,114173 | 0,135269 |
| X ₁ ² | -0,57875 | 0,002470 | -234,292 | 0,000000 | -0,58561 | -0,57189 | -0,985154 | 0,004205 | -0,996828 | -0,973479 |
| X ₂ | 0,12739 | 0,001867 | 68,221 | 0,000000 | 0,12221 | 0,13257 | 0,259178 | 0,003799 | 0,248630 | 0,269726 |
| X ₂ ² | -0,30125 | 0,002470 | -121,953 | 0,000000 | -0,30811 | -0,29439 | -0,512790 | 0,004205 | -0,524465 | -0,501116 |
| X ₁ *X ₂ | -0,23750 | 0,002641 | -89,936 | 0,000000 | -0,24483 | -0,23017 | -0,341674 | 0,003799 | -0,352222 | -0,331127 |

Определим центр оптимума, про дифференцировав (4.2):

$$\frac{dH_{\mu}}{dx_1} \rightarrow -1288,88x_1 - 400,0x_2 + 78,44;$$

$$\frac{dH_{\mu}}{dx_2} \rightarrow -400,0x_1 - 1500,0x_2 + 71,5.$$

Построим не сингулярную матрицу, соответствующую данной системе уравнений:

$$M := \begin{bmatrix} 1288.88 & 400 \\ 400 & 1500 \end{bmatrix}$$

Зададим вектор из констант, соответствующий данной системе уравнений:

$$e := \begin{bmatrix} 78.44 \\ 71.5 \end{bmatrix}$$

Используем функцию «lsolve» из пакета научных программ «MathCad» для поиска решения:

$$soln := lsolve(M, e)$$

Искомое решение получено в виде:

$$soln = \begin{bmatrix} 0.0498 \\ 0.0302 \end{bmatrix}$$

Правильность полученного решения подтверждается расчетом профиля предсказанных значений, представленных на рисунке 4.2.

Для проверки полученного результата проведем графическую

интерпретацию полученного регрессионного уравнения.

Изображение поверхности отклика представлено на рисунке 4.3, а его двумерное сечение на рисунке 4.4.

На основе анализа двумерного сечения определена область оптимума критерия оптимизации и выбран рациональный состав композиции на основе хромовой матрицы: оксид алюминия – 5% по массе; карбид титана – 3% по массе; остальное – хромовая матрица. Композиционное гальваническое покрытие при этом составе имеет наиболее высокую микротвердость.

4.1.3 Определение количественного состава композиционного покрытия финишного слоя

Как указывалось ранее, композиционное гальваническое покрытие финишного слоя, представляет собой упрочненную хромовую матрицу, с включениями дисульфида молибдена, который введен с целью снижения хрупкости покрытия и коэффициента трения.

Дисперсные частицы дисульфида молибдена оказывают незначительное влияние на изменение тонкой структуры или субмикроструктуры матрицы. Однако, при их наличии происходит уменьшение блоков мозаики, увеличение микроискажений и плотности дислокаций, что способствует росту микротвердости и как следствие износостойкости [7].

Многие авторы указывают на повышение микротвердости гальванических композиционных покрытий при введении наполнителя дисульфида молибдена до определенной концентрации, зависящей от типа матрицы и способа ее получения, при превышении которой микротвердость начинает резко снижаться [6].

В связи с тем, что введение дисульфида молибдена имеет один отрицательный эффект, а именно возможное снижение микротвердости композиционного материала [6], в качестве функции отклика была выбрана, как и в предыдущем разделе, микротвердость финишного композиционного гальванического покрытия на основе хрома.

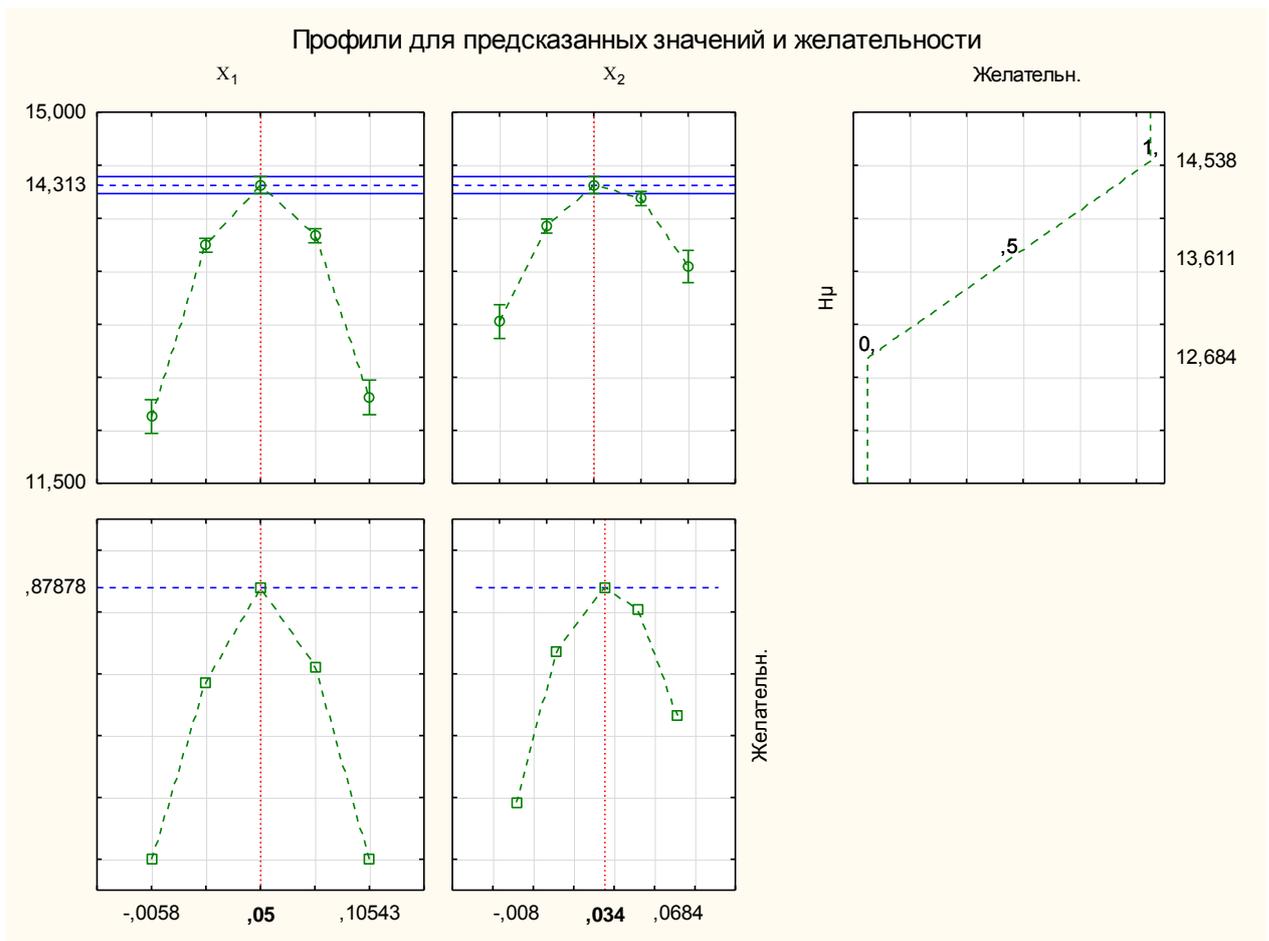
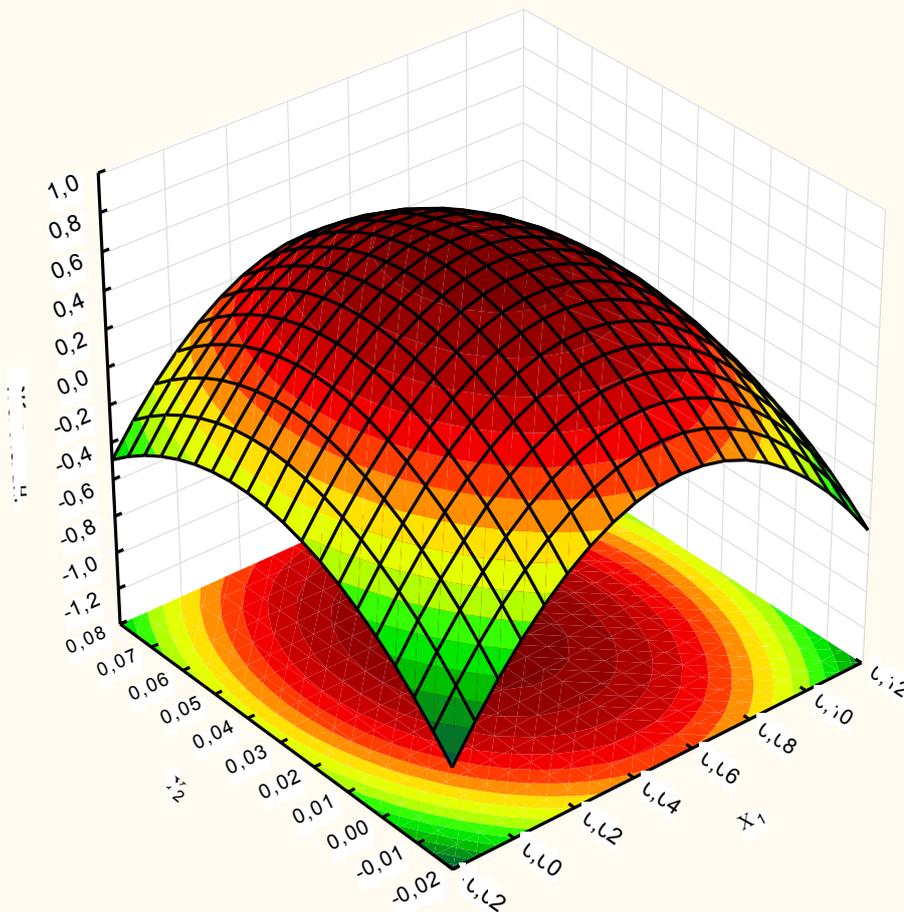


Рисунок 4.2 – Профили предсказанных значений

Для реализации поставленной задачи был реализован многофакторный эксперимент по центральному композиционному плану [1]. Наполнителем для получения финишного композиционного электролитического покрытия на основе хрома являлся дисульфид молибдена марки ДМИ-7, выпускаемый в Российской Федерации и выполняемый в соответствии с ТУ 48-19-133-90, как имеющий наиболее широкий спектр дисперсности материала.

В качестве функции отклика приняли микротвердость финишных электролитических композиционных гальванических покрытий на основе хрома с включениями дисульфида молибдена, а основными факторами концентрацию наполнителей, и размер составляющих их частиц. На основании проведенных предварительных исследований были выбраны следующие уровни варьирования факторов, представленные в таблице 4.5.

Поверхн./контуры желательности; Метод: Квадратичная подгонка



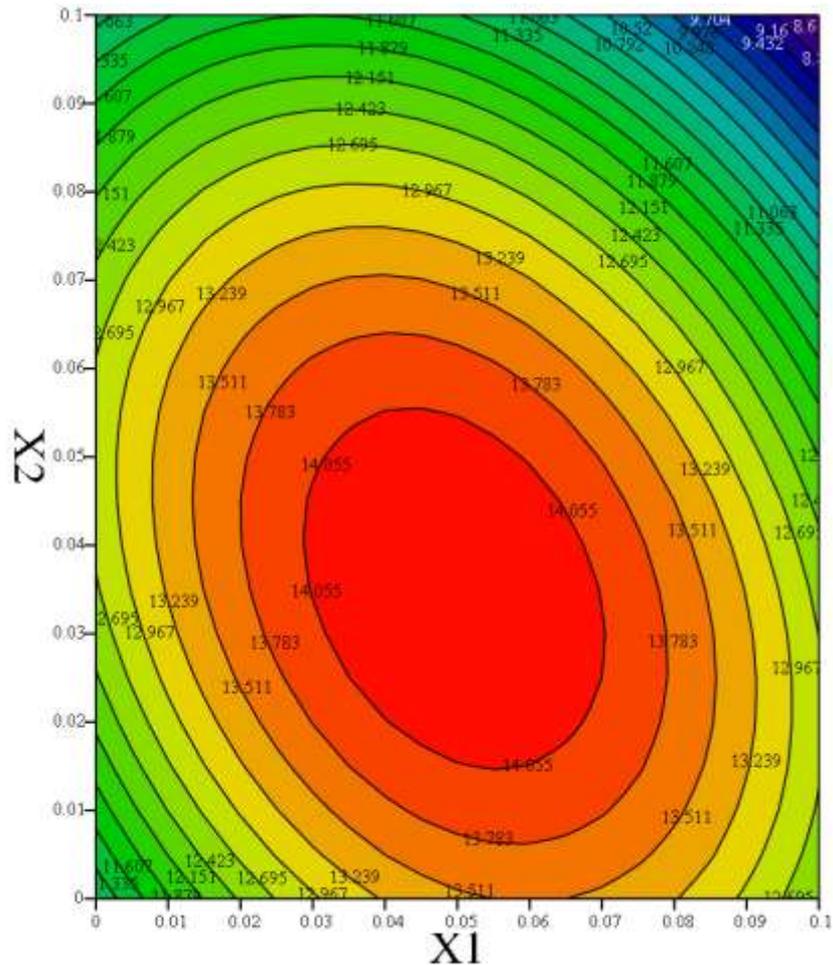
> 0,6
< 0,6
< 0,4
< 0,2
< 0
< -0,2
< -0,4
< -0,6

Рисунок 4.3 – Поверхность отклика для определения состава ДУГКП

В таблице 4.6 представлены план и результаты центрального композиционного плана многофакторного эксперимента.

Таблица 4.5 – Уровни варьирования факторов, влияющих на микротвердость (финишный слой)

| Факторы | Обозначение | Уровни | | |
|--------------------------------|-------------|---------|--------|-----------------------|
| | | верхний | нижний | Интервал варьирования |
| концентрация наполнителя | X_1 | 0,09 | 0,01 | 0,04 |
| размер частиц наполнителя, мкм | X_2 | 3,5 | 0,5 | 1,5 |



f

Рисунок 4.4 – Двумерное сечение поверхности отклика

В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение, описывающее зависимость состава композиционного гальванического покрытия от исследуемых факторов.

Полученная модель подвергалась проверке на адекватность согласно критерию Фишера [27]. Модель считалась адекватной, если $F_p < F_{кр}$. Расчет представлен в табличной форме в таблице 4.7. Для полученной модели данное условие выполняется, следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает влияние основных факторов состава композиционного гальванического покрытия на его микротвердость.

Таблица 4.6 – Результаты эксперимента по поиску рационального состава композиционного материала

| Н _ц , Гпа | X1 | X2 |
|----------------------|----------|----------|
| 13,8 | -1,00000 | -1,00000 |
| 13,4 | -1,00000 | 1,00000 |
| 13,6 | 1,00000 | -1,00000 |
| 13,2 | 1,00000 | 1,00000 |
| 13,7 | -1,00000 | 0,00000 |
| 13,4 | 1,00000 | 0,00000 |
| 13,75 | 0,00000 | -1,00000 |
| 13,38 | 0,00000 | 1,00000 |
| 13,84 | 0,00000 | 0,00000 |
| 13,84 | 0,00000 | 0,00000 |

Таблица 4.7 – Проверка адекватности модели

| Зависим. Перемен. | SS модели и SS остатков (Табл 4-1-3 эксп осн) | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|----------|----------|
| | Множеств R | Множеств R2 | Скоррект R2 | SS Модель | сс Модель | MS Модель | SS Остаток | сс Остаток | MS Остаток | F | p |
| Н _ц | 0,965138 | 0,931490 | 0,845854 | 0,442728 | 5 | 0,088546 | 0,032562 | 4 | 0,008140 | 10,87720 | 0,019146 |

Модель считается работоспособной, если её коэффициент детерминации удовлетворяет условию: $R^2 > 0,75$. Как видно из расчетов, представленных в таблице 4.7, данное условие выполняется, следовательно, модель работоспособна.

Определим значения переменных, при которых функция отклика имеет максимальное значение.

В ходе расчетов были получены данные, представленные в таблице 4.8, позволившие определить уравнение регрессии для поверхности отклика искомой функции.

Таблица 4.8 – Расчет параметров функции отклика

| Эффект | Оценки параметров (Табл 4-1-3 эксп осн) Сигма-ограниченная параметризация | | | | | | | | | |
|-----------|--|--------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|
| | Н _μ Парам. | Н _μ Ст.Ош. | Н _μ t | Н _μ ρ | -95,00% Дов.Гр. | +95,00% Дов.Гр. | Н _μ Beta (B) | Н _μ Ст.Ош.В | -95,00% Дов.Гр. | +95,00% Дов.Гр. |
| Св. член | 13,77571 | 0,053920 | 255,4867 | 0,000000 | 13,62601 | 13,92542 | | | | |
| "X1" | -0,11667 | 0,036834 | -3,1674 | 0,033944 | -0,21893 | -0,01440 | -0,414518 | 0,130872 | -0,77788 | -0,051160 |
| "X1"² | -0,16143 | 0,031066 | -3,7330 | 0,042280 | -0,32542 | 0,00256 | -0,362749 | 0,132728 | -0,73126 | 0,005763 |
| "X2" | -0,19500 | 0,036834 | -5,2940 | 0,006112 | -0,29727 | -0,09273 | -0,692837 | 0,130872 | -1,05619 | -0,329479 |
| "X2"² | -0,14643 | 0,033066 | -3,4791 | 0,048279 | -0,31042 | 0,01756 | -0,329043 | 0,132728 | -0,69755 | 0,039470 |
| "X1"*"X2" | -0,01125 | 0,025112 | -3,2484 | 0,041257 | -0,12525 | 0,10525 | -0,000000 | 0,130872 | -0,36336 | 0,363358 |

Видно, что регрессионное уравнение в кодированных значениях примет вид:

$$H_{\mu} = 13,78 - 0,12x_1 - 0,16x_1^2 - 0,19x_2 - 0,15x_2^2 - 0,01x_1x_2 \quad (4.3)$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента показала, что все коэффициенты регрессии оказались значимыми, так как вычисленные значения критерия Стьюдента оказались больше табличного t_m .

Раскодируем выражение, представленной выше. Получим:

$$H_{\mu} = 13,747 + 5x_1 + 0,26x_2 - 100x_1^2 - 0,15x_2^2 - 0,0000025x_1x_2 \quad (4.4)$$

Определим центр оптимума, продифференцировав (4.4):

$$\frac{dH_{\mu}}{dx_1} \rightarrow -0,0000025x_2 - 200,0x_1 + 5;$$

$$\frac{dH_{\mu}}{dx_2} \rightarrow -0,0000025x_1 - 0,3x_2 + 0,26.$$

Построим не сингулярную матрицу, соответствующую данной системе уравнений:

$$M := \begin{bmatrix} 200 & 0.0000025 \\ 0.0000025 & 0.3 \end{bmatrix}.$$

Зададим вектор из констант, соответствующий данной системе уравнений:

$$e := \begin{bmatrix} 5 \\ 0.26 \end{bmatrix}.$$

Используем функцию «lsolve» из пакета научных программ «MathCad» для поиска решения:

$$\mathit{soln} := \mathit{lsolve}(M, e)$$

Искомое решение получено в виде:

$$\mathit{soln} = \begin{bmatrix} 0.025 \\ 0.867 \end{bmatrix}$$

Правильность полученного решения подтверждается расчетом профиля предсказанных значений, представленных на рисунке 4.9.

Для проверки полученного результата проведем графическую интерпретацию полученного регрессионного уравнения.

Изображение поверхности отклика представлено на рисунке 4.10, а его двумерное сечение на рисунке 4.11.

На основе анализа двумерного сечения определена область оптимума критерия оптимизации и выбраны следующие параметры наполнителя в виде дисульфида молибдена для получения состава композиции финишного слоя электролитического покрытия на основе хромовой матрицы, имеющего наибольшую микротвердость: дисперсность частиц – 0,9 мкм; концентрация – 2,5% по массе.

Микротвердость финишного слоя при послойном нанесении дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий (ДГУКП) на основе хрома составляет 13,84 ГПа, что на 22,47% выше, чем у стандартного гальванического хромового покрытия. В то же время микротвердость базового слоя гальванического композиционного покрытия на основе хрома превосходит аналогичный показатель для финишного слоя на 3,47%. Это хорошо согласуется с классической теорией осаждения гальванических покрытий с хрупкой матрицей, в которой указывается: сопротивление хрома сосредоточенным нагрузкам в значительной мере определяется прочностью подложки. На более мягком основании, которое не способно выдержать местные высокие давления, хромовое покрытие продавливается вместе с подложкой, осыпается и выкрашивается, что ведет к выходу узла из строя.

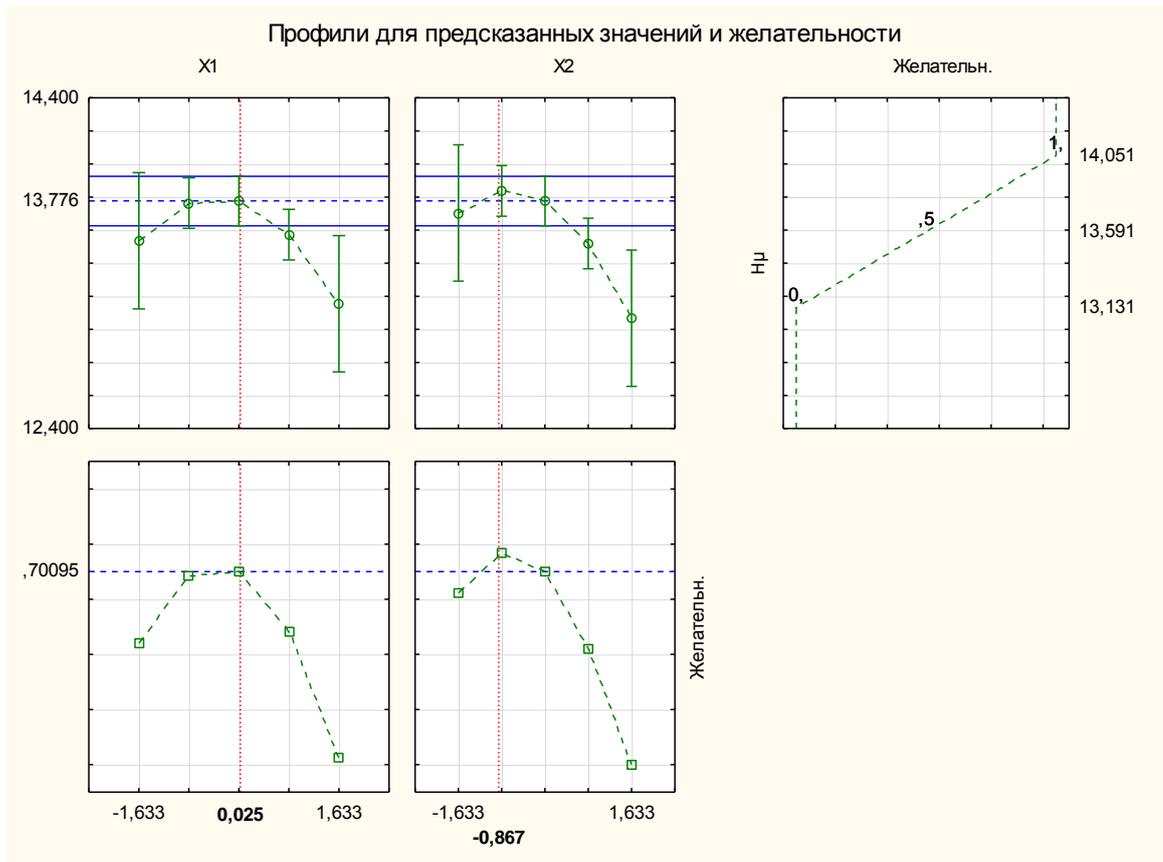


Рисунок 4.9 – Профили предсказанных значений

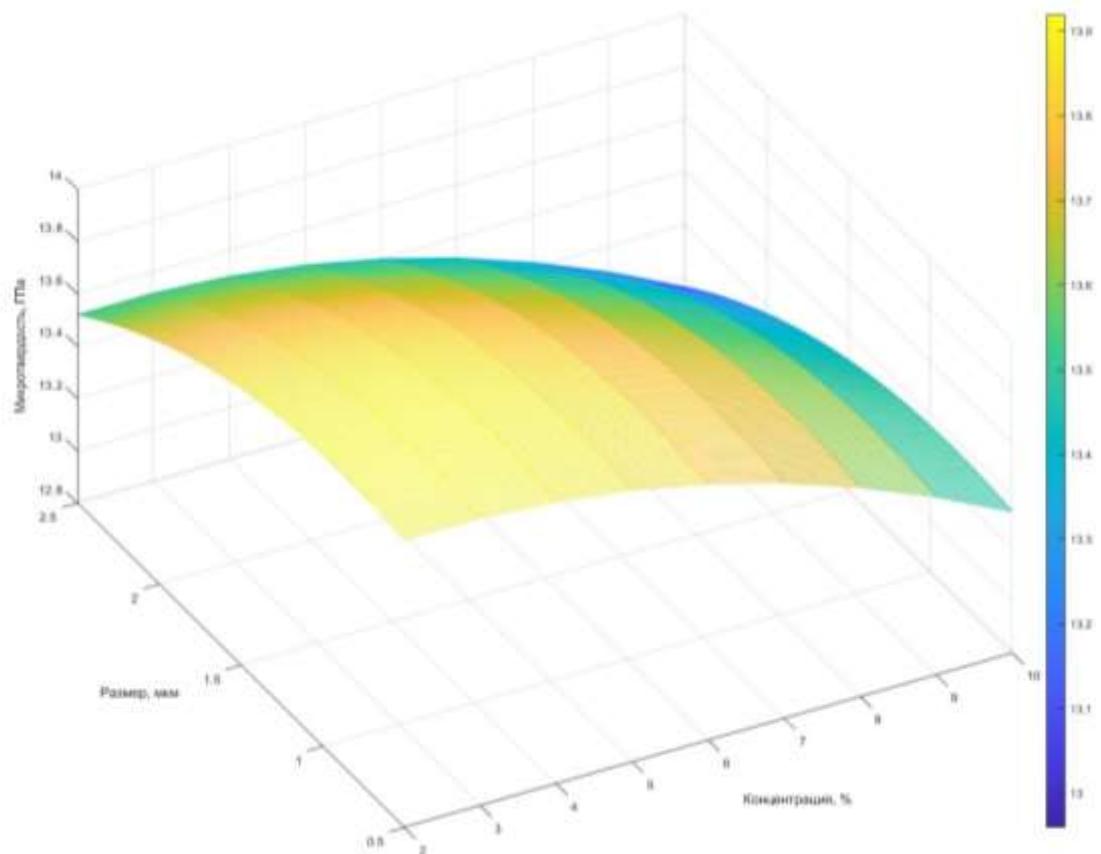


Рисунок 4.10 – Поверхность отклика для микротвёрдости

4.2 Определение режимов нанесения дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий на основе хрома

4.2.1 Определение режимов нанесения базового слоя покрытия

Как известно из литературных источников [162] нарушение структуры матрицы, вызываемое диспергированием в ней частиц посторонних элементов, приводит к изменению внутренних напряжений в покрытиях.

Известно, что в хромовых покрытиях при малых плотностях тока до (12 кА/м^2) в покрытиях формируются сжимающие остаточные напряжения, которые с повышением плотности тока переходят в растягивающие и, начиная с плотности тока 18 кА/м^2 стабилизируются [117]. Наблюдаемую зависимость можно объяснить следующим образом. Многократное пластическое деформирование каждого элементарного слоя вызывает в нем появление сжимающих остаточных напряжений, которые суммируются с собственными растягивающими остаточными напряжениями в каждом элементарном слое хрома, обусловленными структурными превращениями в осадке. При режимах нанесения покрытия, характеризующихся малой скоростью осаждения, когда формируются тонкие элементарные слои осадка, были получены сжимающие результирующие остаточные напряжения. С изменением режимов нанесения покрытий, сопровождающихся увеличением скорости осаждения, растет толщина элементарных слоев, а глубина упрочненного слоя при неизменном усилии

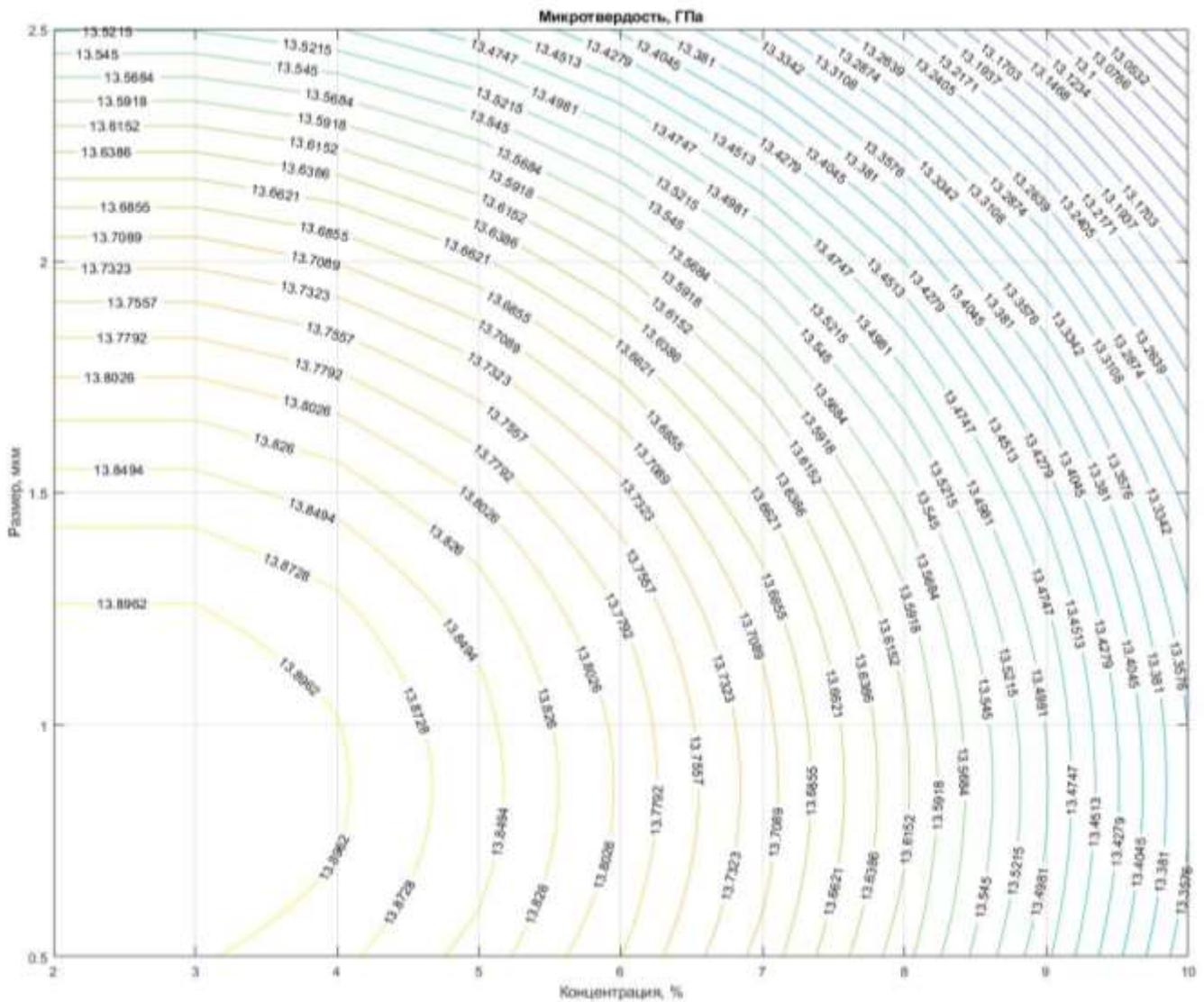


Рисунок 4.11 – Двумерное сечение поверхности отклика

деформации остается прежней. В связи с этим уменьшается доля сжимающих остаточных напряжений в каждом слое за счет того, что каждый элементарный слой деформируется меньшее количество раз, поэтому результирующие остаточные напряжения из сжимающих, уменьшаясь по абсолютной величине, переходят в растягивающие. Этот процесс может усиливаться тем, что увеличение плотности тока приводит к некоторому увеличению выделения водорода на катоде, который активно адсорбируется на гранях растущих кристаллов металла, что в свою очередь, может способствовать увеличению растягивающих остаточных напряжений в хrome [44]. Стабилизация растягивающих напряжений с повышением плотности тока объясняется растрескиванием хромового покрытия

в результате превышения остаточными напряжениями предела прочности хрома [102]. Это в свою очередь ведет не только к растрескиванию покрытия и, как следствие, потере им своих заданных эксплуатационных характеристик, но и к отслоению покрытия от основы. Однако, необходимо учитывать, что переходу напряжений в покрытии из сжимающих в растягивающие препятствуют мелкодисперсные включения в нем.

В связи с поставленной в работе задачей получения герметичных композиционных гальванических покрытий на основе хрома, необходимо определить режимы нанесения покрытия, при которых оно имеет сжимающие остаточные напряжения по величине не превосходящие предел прочности хромовой матрицы.

Для изучения влияния электролиза на остаточные напряжения получаемых покрытий применялось математическое планирование эксперимента [1]. На предварительном этапе был проведен корреляционный анализ влияния факторов процесса на зависимую величину. Принято считать, что при коэффициенте корреляции, превышающем 0,3, анализируемый параметр существенно влияет на исследуемую величину [25]. В нашем случае исследовались образцы, прошедшие восстановление хромированием с толщиной покрытия 40–400 мкм. Был реализован полный факторный эксперимент 2^4 . Характеристики плана эксперимента выбирались из условия получения беспористых хромовых покрытий со сжимающими остаточными напряжениями. В результате области варьирования независимых переменных были выбраны следующие [47]:

| | |
|--|-----------|
| плотность тока (x_1) i , кА/м ² | 8 – 20 |
| температура электролита (x_2) t , °С | 45 – 65 |
| давление инструмента (x_3) P , МПа | 1,0 – 3,0 |
| толщина покрытия (x_4) δ , мкм | 40 – 400 |

В качестве зависимой переменной выбраны остаточные напряжения в базовом слое покрытия (σ , МПа).

Исследования проводились методом регрессионного анализа, для чего на

основании экспериментальных данных была построена матрица планирования, содержащая зависимую и независимые переменные, которая представлена в приложении Б1. Одним из условий этого метода является предположение о функциональной независимости варьируемых переменных. Для оценки этого положения проводился корреляционный анализ, результаты которого также представлены в приложении Б1.

Одним из условий регрессионной модели является предположение о функциональной независимости объясняющих переменных. Связь между факторами, называемая мультиколлинеарностью, делает вычисление параметров модели либо невозможным, либо затрудняет содержательную интерпретацию параметров модели. Учитывая вышеизложенное, на основании анализа матрицы коэффициентов парной корреляции, можно сделать вывод о необходимости включения в модель таких факторов исследуемого процесса, как плотность тока, температура рабочей среды, давление инструмента на поверхность и толщины осаждаемого покрытия. Остальные факторы процесса оказались не значимы или мультиколлинеарны.

Дальнейшим этапом явилось проведение регрессионного анализа. В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение в кодированных значениях, описывающее зависимость остаточных напряжений в покрытии от исследуемых факторов:

$$\begin{aligned} o = & -211,23 + 29,85x_1 - 21,15x_2 - 24,23x_3 + 22,23x_4 - 2,81x_1x_2 - 2,65x_1x_3 + \\ & + 2,77x_2x_3 - 2,52x_1x_4 + 2,98x_2x_4 + 2,56x_3x_4 - 2,73x_1x_2x_3 - 2,69x_1x_2x_4 - \\ & - 2,69x_1x_3x_4 + 2,73x_2x_3x_4 - 2,77x_1x_2x_3x_4. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Визуализация регрессионного уравнения (4.5) представлена на рисунке 4.12 в качестве контура желательности.

Проверка адекватности выбранной модели производилась по критерию Фишера [27]. Модель считалась адекватной, если $F_p < F_{кр}$. Для полученной модели данное условие выполняется, следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает влияние основных факторов процесса на остаточные напряжения в

получаемом базовом слое покрытия.

Анализ позволил выявить, что зависимость остаточных напряжений в покрытии от исследуемых факторов сильная - множественный коэффициент корреляции достигает значения 0,999.

После проверки значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента [27], выяснилось, что все члены уравнения значимы, т.к. для них вычисленные значения критерия Стьюдента оказались больше табличного t_m .

Анализируя корреляционную матрицу, видим, что наибольшее влияние на остаточные напряжения в покрытии оказывает плотность тока (коэффициент корреляции - 0,5967). Менее значительно влияют давление инструмента, толщина осаждаемых покрытий и температура электролита (коэффициенты корреляции соответственно 0,4843, 0,4443 и 0,4227). Далее в порядке убывания степени влияния на напряжения в покрытии факторы расположились следующим образом: взаимное влияние температуры электролита и толщины покрытия (коэффициент корреляции 0,0596), взаимное влияние плотности тока и температуры электролита (коэффициент корреляции 0,0562), взаимное влияние температуры электролита и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,0554), взаимное влияние всех четырех факторов (коэффициент корреляции 0,0553), взаимное влияние

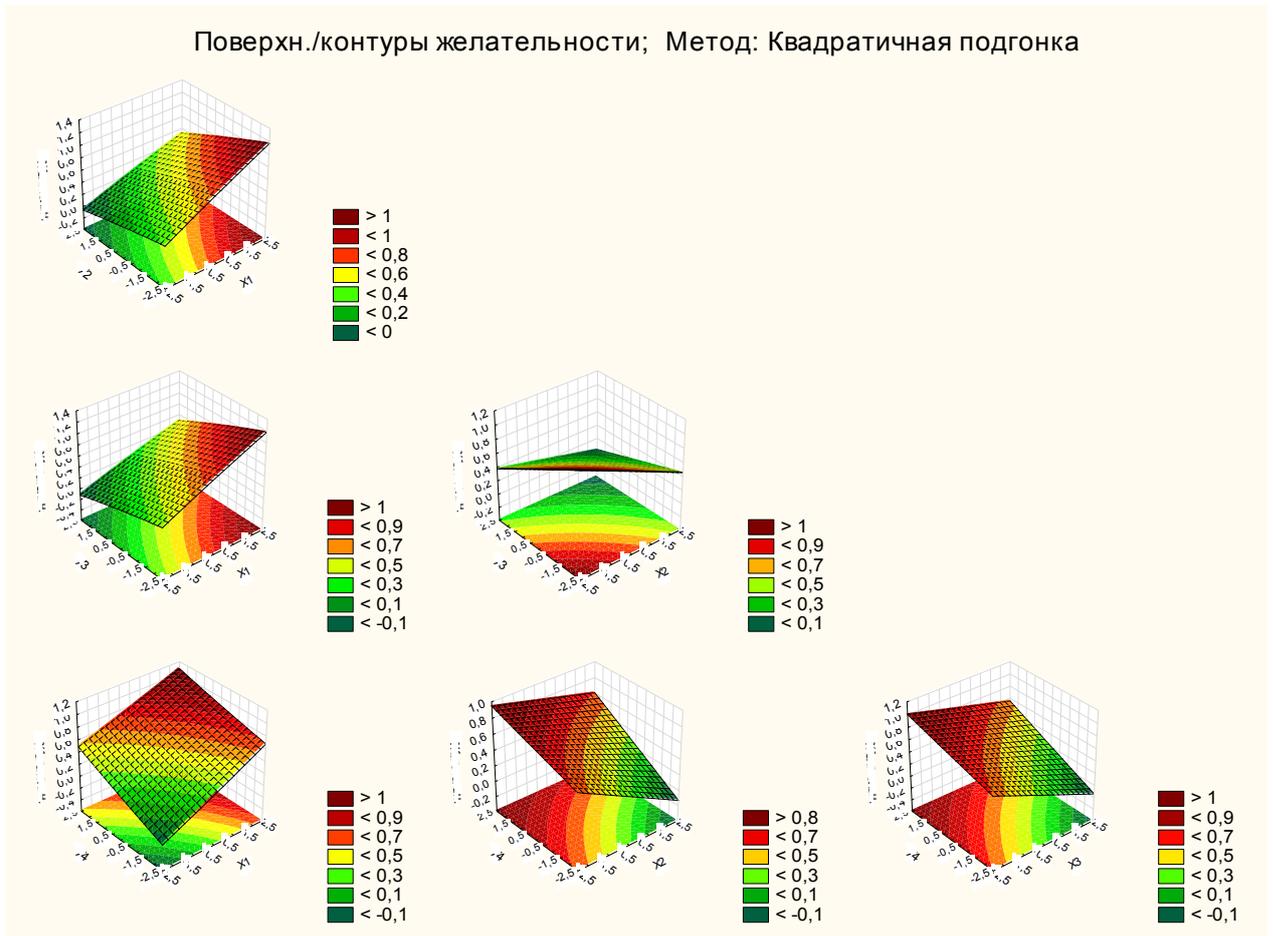


Рисунок 4.12 – Контур желательности для определения регрессионной зависимости внутренних напряжений в покрытии (базовый слой)

температуры электролита, давления инструмента и толщины покрытия, а также взаимное влияние плотности тока, температуры электролита и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,0546), взаимное влияние плотности тока, температуры электролита и толщины покрытия, а также взаимное влияние плотности тока, давления инструмента и толщины покрытия (коэффициент корреляции 0,0537), взаимное влияние плотности тока и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,0529), взаимное влияние давления инструмента и толщины покрытия (коэффициент корреляции 0,0512) и взаимное влияние плотности тока и толщины покрытия (коэффициент корреляции 0,0504)

Таким образом, раскодированное регрессионное уравнение, описывающее влияние условий осаждения на остаточные напряжения в получаемых гальванических композиционных покрытиях на основе хрома, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma = & -138,11 + 6,04x_1 - 2,17x_2 - 17,32x_3 + 0,34x_4 - 0,01x_1x_2 - 0,49x_1x_3 - \\ & - 0,2x_2x_3 - 0,01x_1x_4 - 0,005x_2x_4 - 0,23x_3x_4 + 0,01x_1x_2x_3 + 0,0003x_1x_2x_4 + \\ & + 0,01x_1x_3x_4 + 0,005x_2x_3x_4 - 0,0003x_1x_2x_3x_4. \end{aligned} \quad (4.6)$$

При анализе влияния исследуемых факторов на остаточные напряжения в хромовом покрытии из полного уравнения регрессии следует, что увеличение плотности тока ведет к уменьшению знака остаточных напряжений по абсолютной величине, что согласуется с теоретическими и экспериментальными исследованиями, изложенными в [42].

Рост давления инструмента на обрабатываемую поверхность ведет к увеличению сжимающих остаточных напряжений в покрытии. Это видимо объясняется тем, что при увеличении давления глубина деформации элементарного слоя увеличивается, а, следовательно, увеличивается общая степень деформации растущего осадка.

С ростом температуры электролита наблюдается следующая зависимость: с увеличением температуры скорость осаждения уменьшается, следовательно уменьшается толщина элементарного слоя, что при неизменном усилии деформирования приведет к большей степени деформирования каждого элементарного слоя; это вызывает возникновение больших результирующих остаточных напряжений сжатия в покрытии. Кроме того, этот процесс может усиливаться за счет того, что с увеличением температуры растет пластичность осаждаемых покрытий. Увеличение толщины покрытия ведет к общему накоплению дефектов дислокаций в гальванической матрице, сопровождающемуся изменением объема осажденного покрытия, что приводит к уменьшению остаточных сжимающих напряжений.

4.2.2 Определение режимов нанесения финишного слоя покрытия

Для изучения влияния электролиза на остаточные напряжения получаемых покрытий применялось математическое планирование эксперимента [84]. Предварительный эксперимент позволил получить корреляционную матрицу (приложение Б2), анализируя которую, можно сделать вывод о необходимости

включения в анализ следующих факторов: плотности тока, температуры электролита, давления инструмента и толщины наносимого слоя.

В нашем случае исследовались образцы, прошедшие восстановление хромированием с толщиной покрытия 20-80 мкм. Был реализован полный факторный эксперимент 2^4 . Характеристики плана эксперимента выбирались из условия получения беспористых хромовых покрытий со сжимающими остаточными напряжениями. В результате области варьирования независимых переменных были выбраны следующие [47]:

| | |
|---|-----------|
| плотность тока (X_1), i кА/м ² | 8 – 20 |
| температура электролита (X_2), t °С | 45 – 65 |
| давление инструмента (X_3), P МПа | 1,0 – 3,0 |
| толщина покрытия (X_4), δ мкм | 20 – 80 |

В качестве зависимой переменной выбраны остаточные напряжения в финишном слое покрытия (σ , МПа).

Исследования проводились методом регрессионного анализа, для чего на основании экспериментальных данных была построена матрица планирования, содержащая зависимую и независимые переменные, которая представлена в приложении Б2. Одним из условий этого метода является предположение о функциональной независимости варьируемых переменных. Для оценки этого положения проводился корреляционный анализ, результаты которого также представлены в приложении Б2.

Одним из условий регрессионной модели является предположение о функциональной независимости объясняющих переменных. Связь между факторами, называемая мультиколлинеарностью, делает вычисление параметров модели либо невозможным, либо затрудняет содержательную интерпретацию параметров модели. Учитывая вышеизложенное, на основании анализа матрицы коэффициентов парной корреляции, можно сделать вывод о необходимости включения в модель таких факторов исследуемого процесса, как плотность тока, температура рабочей среды, давление инструмента на поверхность и толщины

осаждаемого покрытия. Остальные факторы процесса оказались не значимы или мультиколлинеарны.

Дальнейшим этапом явилось проведение регрессионного анализа. В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение в кодированных значениях, описывающее зависимость остаточных напряжений в покрытии от исследуемых факторов:

$$\begin{aligned} \sigma = & -131,62 + 19,17x_1 - 12,45x_2 - 15,68x_3 + 14,46x_4 - 2,4x_1x_2 - 0,98x_1x_3 + \\ & + 2,38x_2x_3 - 2,25x_1x_4 + 1,62x_2x_4 + 2,27x_3x_4 - 2,35x_1x_2x_3 - 0,98x_1x_2x_4 - \\ & - 2,35x_1x_3x_4 + 1,0x_2x_3x_4 - 1,03x_1x_2x_3x_4. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Визуализация регрессионного уравнения (4.7) представлена на рисунке 4.13 в качестве контура желательности, а его работоспособность на рисунке 4.14 в виде сопоставления наблюдаемых и предсказанных значений.

Проверка адекватности выбранной модели производилась по критерию Фишера [25]. Модель считалась адекватной, если $F_p < F_{кр}$. Для полученной модели данное условие выполняется (Приложение Б2), следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает влияние основных факторов процесса на остаточные напряжения в получаемом финишном слое покрытия.

После проверки значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента [27], выяснилось, что все члены уравнения значимы, т.к. для них вычисленные значения критерия Стьюдента оказались больше табличного t_m .

Анализ позволил выявить, что зависимость остаточных напряжений в покрытии от исследуемых факторов сильная – множественный коэффициент корреляции достигает значения 0,999. Все коэффициенты регрессионного уравнения оказались значимы.

Анализируя корреляционную матрицу, видим, что наибольшее влияние на остаточные напряжения в покрытии оказывает плотность тока (коэффициент корреляции - 0,601). Менее значительно влияют давление инструмента, толщина осаждаемых покрытий и температура электролита (коэффициенты корреляции соответственно 0,492, 0,454, и 0,391). Далее в порядке убывания степени влияния

на напряжения в покрытии факторы расположились следующим образом: взаимное влияние плотности тока и температуры электролита (коэффициент корреляции 0,075), взаимное влияние плотности тока и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,074), взаимное влияние плотности тока, температуры электролита и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,0738), взаимное влияние плотности тока, давления инструмента и толщины покрытия (коэффициент корреляции 0,0737), взаимное влияние температуры электролита и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,072), взаимное влияние давления инструмента и толщины покрытия (коэффициент корреляции 0,071), взаимное влияние плотности тока и толщины покрытия (коэффициент корреляции 0,07), взаимное влияние температуры электролита и толщины покрытия (коэффициент корреляции 0,036), взаимное влияние все четырех факторов (коэффициент корреляции 0,032), взаимное влияние температуры электролита, давления инструмента и толщины покрытия (коэффициент корреляции 0,031), а также взаимное влияние плотности тока, температуры электролита и толщины покрытия (коэффициент корреляции 0,03).

Таким образом, раскодированное регрессионное уравнение, описывающее влияние условий осаждения на остаточные напряжения в получаемых гальванических композиционных покрытиях на основе хрома, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \sigma = & -58,98 + 2,38x_1 - 1,77x_2 - 38,37x_3 + 0,67x_4 + 0,008x_1x_2 + 1,07x_1x_3 + \\ & + 0,22x_2x_3 - 0,02x_1x_4 - 0,009x_2x_4 - 0,37x_3x_4 - 0,01x_1x_2x_3 + 0,001x_1x_2x_4 + \\ & + 0,018x_1x_3x_4 + 0,01x_2x_3x_4 - 0,0006x_1x_2x_3x_4. \end{aligned} \quad (4.8)$$

При анализе влияния исследуемых факторов на остаточные напряжения в хромовом покрытии выяснилось, что их влияние на остаточные напряжения в финишном слое покрытия аналогично их влиянию в базовом слое ДУГКП на основе хрома.

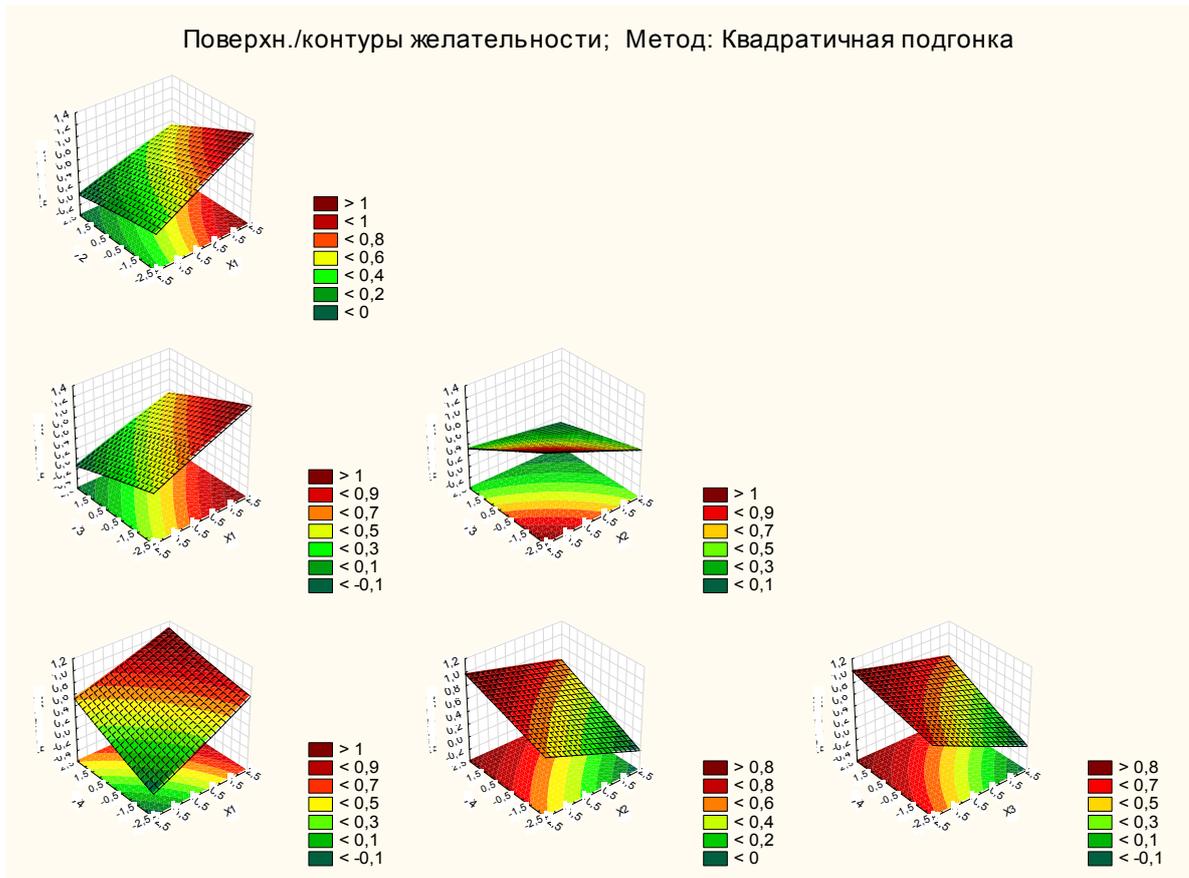


Рисунок 4.13 – Контур желательности для определения регрессионной зависимости внутренних напряжений в покрытии (финишный слой)

4.2.3 Определение рациональных режимов нанесения дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий на основе хрома

Учитывая тот факт, что эксплуатационные характеристики силовых деталей гидроприводов, как правило, обеспечиваются физико-механическими характеристиками поверхностного слоя, выбор режимов нанесения покрытия проводился по результатам осаждения финишного слоя покрытия, так как именно он непосредственно подвергается изнашиванию в процессе эксплуатации деталей. Затем данные полученные в результате исследований проверялись на базовом слое покрытия.

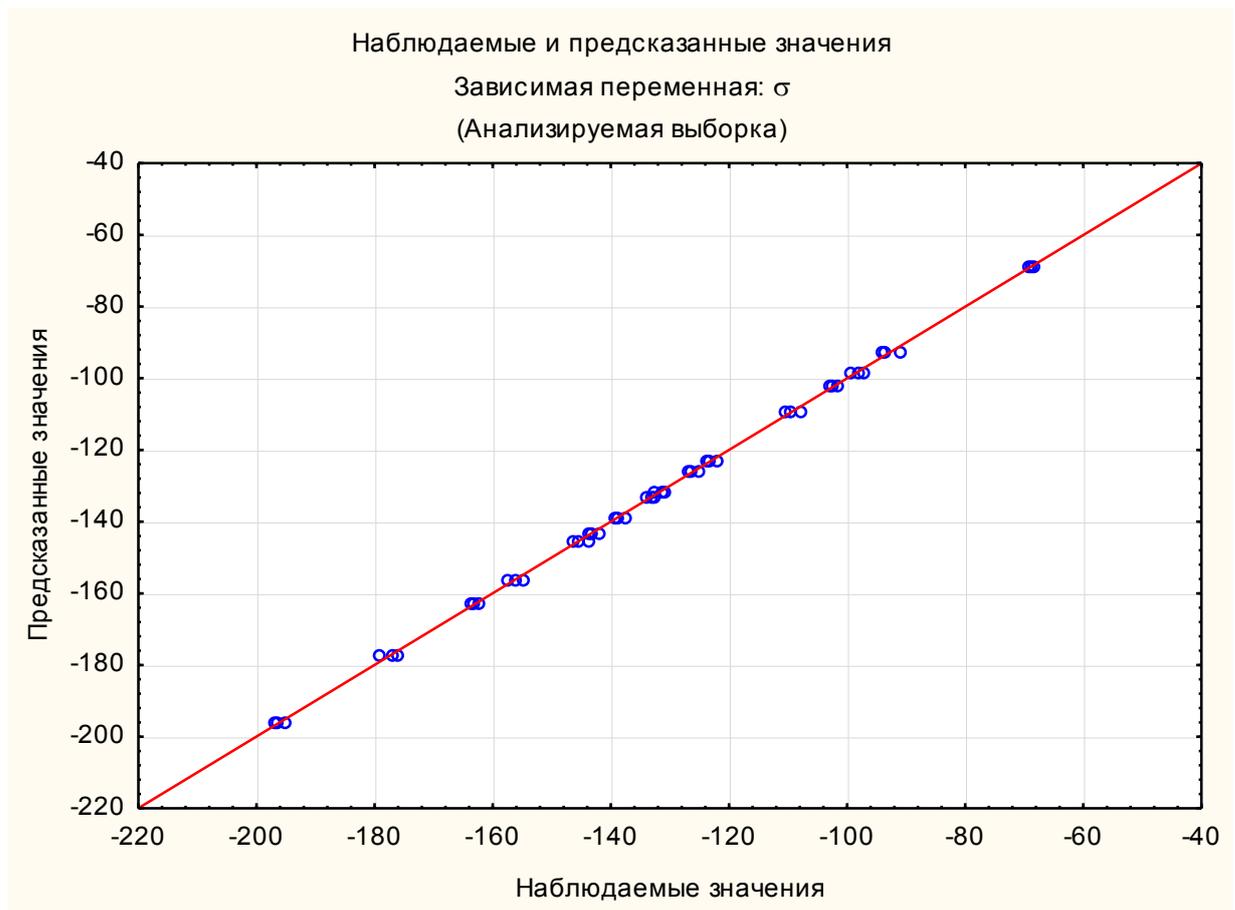


Рисунок 4.14 – Работоспособность регрессионной зависимости внутренних напряжений в покрытии (финишный слой)

Исходя из требований к физико-механическим и эксплуатационным свойствам, предъявляемым к силовым элементам гидроприводов, с целью получения герметичных покрытий на их контактной поверхности, при выборе рациональных режимов нанесения композиционных покрытий на основе хрома были заданы следующие граничные условия по остаточным напряжениям в покрытии [154]:

- для толщины 20 мкм: $-165 < \sigma < -140$ МПа;
- для толщины 80 мкм: $-125 < \sigma < -105$ МПа.

Толщина наносимых покрытий в заданном диапазоне составляла величину от 20 до 400 мкм.

Данные значения, получаемые в покрытиях, позволяют обеспечивать их герметичность и одновременно не превосходят предел прочности хромовой матрицы, что исключает отслаивание покрытия от подложки [59].

Основываясь на регрессионных уравнениях (4.6) и (4.8) были рассчитаны значения режимных параметров осаждения покрытия.

Поиск рациональных режимов обработки, удовлетворяющих заданным граничным условиям осуществлялся с применением программной среды «TEHNOLOGICS», а затем полученные данные обрабатывались в программе «Microsoft Excel». Была решена задача по поиску параметров, удовлетворяющих граничным условиям, результаты которой представлены на рисунках 4.8–4.10. Поиск рациональных режимов нанесения ДУГКП проводился с использованием программного комплекса MS Excel. Результаты вычислений представлены в приложении Е. В целом, в качестве рациональных, можно выделить следующий интервал режимов осаждения гальванических композиционных покрытий на основе хрома: катодная плотность тока 10–12 кА/м², давление инструмента на восстанавливаемую поверхность $p = 1,0–1,5$ МПа, температура электролита 60–65 °С, скорость главного движения 70–100 мин⁻¹. Эти режимные параметры обработки удовлетворяют всем заданным граничным условиям. При осаждении покрытий на рассчитанных режимах возможно получить сжимающие остаточные напряжения на толщине покрытия 20 мкм от -162,035 МПа до -137,91 МПа, а при толщине покрытия 80 мкм от -123,635 до -100,47 МПа.

Таким образом, в качестве рабочих режимных параметров осаждения как базового, так и финишного слоя установлены следующие:

| | |
|--|---------|
| плотность тока i , кА/м ² | 10–12 |
| температура электролита t , °С | 60–65 |
| давление инструмента P , МПа | 1,0–1,5 |
| скорость главного движения v , мин ⁻¹ | 70–100 |

Как видно, данные остаточные напряжения гарантируют получение герметичных покрытий. Кроме этого, необходимо отметить, что они по

абсолютной величине не превосходят предел прочности хрома, что гарантирует хорошую адгезию покрытий, как на наружных, так и на внутренних поверхностях.

Дальнейшие исследования проводились с целью определения возможности применения рассчитанных режимных параметров для нанесения базового слоя дисперсно-упрочненного композиционного электролитического покрытия на основе хрома. Расчеты проводились в программном комплексе MathCad Prime 4.0. Результаты представлены на рисунке 4.15.

По результатам расчета видно, что напряжения, создаваемые в покрытии на всем протяжении его толщины, являются сжимающими. Это обеспечивает его герметичность. Напряжения по абсолютной величине не превосходят предел прочности хрома, что служит гарантией хорошей адгезии покрытия к основе.

Особо необходимо отметить тот факт, что обычно гальванически осаждаемый хром имеет низкую адгезию с базовым покрытием в связи с тем, что хром при соприкосновении с воздухом очень быстро покрывается окисной пленкой, которая при дальнейшем покрытии образует разделяющий слой. В связи с вышеизложенным, немаловажным является и тот факт, что в работе удалось разработать композиционный состав базового и финишного слоя покрытия, которые осаждаются на одних и тех же режимных параметрах. Это позволяет вести процесс осаждения ДУГКП на основе хрома непрерывно, тем самым не только сокращая время на технологическую операцию, но и осаждать многослойные покрытия по технологии и на режимах однослойных.

4.2.4 Экспериментальная проверка распределения остаточных напряжений в покрытии

При экспериментальном исследовании влияния режимных параметров осаждения покрытия на остаточные напряжения в нем, учитывался тот факт, что максимальные компоненты тензора напряжений в заданной системе координат возможно получить при максимальной плотности тока, минимальной температуре и минимальном давлении инструмента на поверхность с покрытием, а минимальные компоненты тензора напряжений в заданной системе координат

возможно получить при минимальной плотности тока, максимальной температуре и максимальном давлении инструмента на поверхность с покрытием. Таким образом, экспериментальное исследование распределения остаточных напряжений в покрытии в области рекомендованного диапазона значений режимных параметров, представленных в п. 4.2.3 проводилось по двум режимам, обеспечивающим получение максимальных и минимальных остаточных напряжений в ДУГКП, а именно:

режим №1 (минимальные напряжения):

| | |
|---|-----|
| плотность тока, i кА/м ² | 10 |
| температура электролита, t °С | 65 |
| давление инструмента, P МПа | 1,5 |
| скорость главного движения, мин ⁻¹ | 80 |

режим №2 (максимальные напряжения):

| | |
|---|-----|
| плотность тока, i кА/м ² | 12 |
| температура электролита, t °С | 60 |
| давление инструмента, P МПа | 1,0 |
| скорость главного движения, мин ⁻¹ | 80 |

Распределение остаточных напряжений в базовом слое покрытия в зависимости от плотности тока представлено на рисунке 4.16. Видно, что до плотности тока 10 кА/м², напряжения удается держать сжимающими по всей толщине наносимого покрытия. При превышении этого значения, они начинают переходить в растягивающие и даже, применяя пластическое деформирование покрытия специальными дополнительными методами, их удается удержать в отрицательных значениях по толщине хрома не превышающей 80–100 мкм. Вообще, многие авторы утверждают, что для хромовых покрытий величина в 100 мкм является предельной для получения сжимающих остаточных напряжений. Однако, двухкомпонентное гальваническое композиционное покрытие на основе хрома, при нанесении его по рассчитанным режимам, позволяет получать сжимающие остаточные напряжения в нем на протяжении всей толщины наносимого покрытия (графики 1, 2 на рисунке 4.16).

| |
|--|
| Базовый слой 40 мкм |
| $x_1 := 10 \quad x_2 := 60 \quad x_3 := 1 \quad x_4 := 40$ |
| $6.04 \cdot x_1 - 2.17 \cdot x_2 - 17.32 \cdot x_3 + 0.34 \cdot x_4 - 0.01 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.49 \cdot x_1 \cdot x_3 \downarrow = -237.73$ $- 0.01 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0.2 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.005 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0.23 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.01 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \downarrow$ $+ 0.0003 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.01 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.005 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \downarrow$ $- 0.0003 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 - 138.11$ |
| Базовый слой 400 мкм |
| $x_1 := 10 \quad x_2 := 60 \quad x_3 := 1 \quad x_4 := 400$ |
| $6.04 \cdot x_1 - 2.17 \cdot x_2 - 17.32 \cdot x_3 + 0.34 \cdot x_4 - 0.01 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.49 \cdot x_1 \cdot x_3 \downarrow = -198.13$ $- 0.01 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0.2 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.005 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0.23 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.01 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \downarrow$ $+ 0.0003 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.01 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.005 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \downarrow$ $- 0.0003 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 - 138.11$ |
| Базовый слой 40 мкм |
| $x_1 := 12 \quad x_2 := 65 \quad x_3 := 1.5 \quad x_4 := 40$ |
| $6.04 \cdot x_1 - 2.17 \cdot x_2 - 17.32 \cdot x_3 + 0.34 \cdot x_4 - 0.01 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.49 \cdot x_1 \cdot x_3 \downarrow = -253.06$ $- 0.01 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0.2 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.005 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0.23 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.01 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \downarrow$ $+ 0.0003 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.01 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.005 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \downarrow$ $- 0.0003 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 - 138.11$ |
| Базовый слой 400 мкм |
| $x_1 := 12 \quad x_2 := 65 \quad x_3 := 1.5 \quad x_4 := 400$ |
| $6.04 \cdot x_1 - 2.17 \cdot x_2 - 17.32 \cdot x_3 + 0.34 \cdot x_4 - 0.01 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0.49 \cdot x_1 \cdot x_3 \downarrow = -216.88$ $- 0.01 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0.2 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0.005 \cdot x_2 \cdot x_4 - 0.23 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.01 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \downarrow$ $+ 0.0003 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0.01 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0.005 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \downarrow$ $- 0.0003 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 - 138.11$ |

Рисунок 4.15 – Регрессионные модели при различных параметрах осаждения

В ходе проведения экспериментальных исследований был выявлен следующий факт. На начальном этапе осаждения покрытий сжимающие остаточные напряжения увеличиваются по абсолютной величине. Затем, при дальнейшем росте толщины осадка, их абсолютная величина уменьшается, но они

все равно остаются сжимающими.

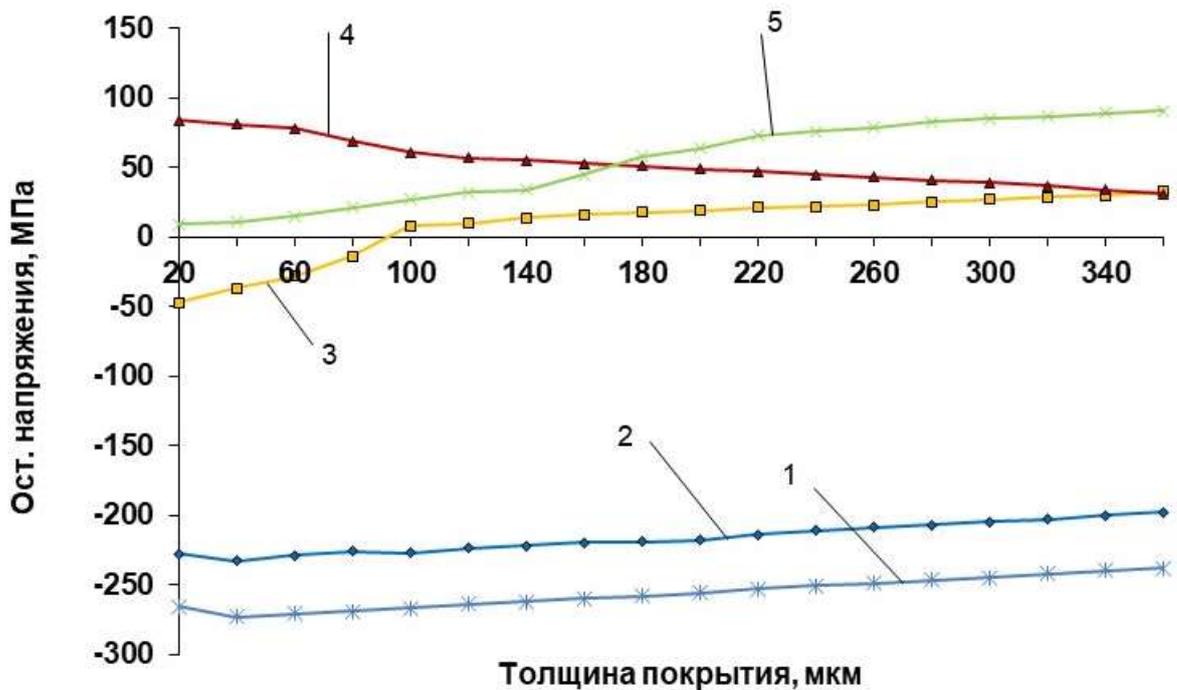


Рисунок 4.16 – Зависимость остаточных напряжений от толщины двухкомпонентного композиционного покрытия на основе хрома

(базовый слой) для различных плотностей тока:

1 – $i = 10 \text{ кА/м}^2$; $t = 65 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,5 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;

2 – $i = 12 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;

3 – $i = 14 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;

4 – $i = 18 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;

5 – $i = 30 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$.

Анализ диаграммы (рисунок 4.16) позволяет сделать вывод о том, что при малых плотностях тока, сжимающие остаточные напряжения создаются за счет упругопластической деформации растущих слоев осадка. К этому необходимо добавить, что одновременно с осаждением покрытия происходит процесс внедрения в него мелкодисперсных частиц инструментального материала, что способствует перераспределению остаточных напряжений в покрытии и созданию покрытий с более равномерным распределением остаточных напряжений в нем по толщине.

Увеличение плотности тока ведет к ускорению роста кристаллов покрытия и как следствие уменьшается процентное содержание частиц инструментального материала в покрытии. Вызвано это тем, что при увеличении плотности тока происходит ускорение процесса наращивания объема металла в единицу времени, а массовый перенос инструментального материала определяется давлением инструмента, которое остается постоянным. Следовательно, в покрытии снижается процентное содержание инструментального материала. Снижение общей концентрации мелкодисперсных частиц инструментального материала в покрытии приводит к более явному различию значений остаточных напряжений в нем по толщине покрытия. Эта теория полностью согласуется с теорией внедрения частиц в покрытие по В.Ф. Молчанову [94].

С другой стороны, плотность тока влияет на толщину покрытия, осаждаемого между двумя последовательными ходами инструмента. Чем выше плотность тока, тем более толстые слои осаждаются на восстанавливаемую поверхность между двумя последовательными ходами инструмента. Соответственно более толстый слой труднее деформируется и, соответственно в нем возникают меньшие значения остаточных напряжений по сравнению с аналогичной обработкой более тонкого слоя. Этот процесс деформации слоев покрытия различной толщины описывает теория деформации элементарных слоев покрытия, а экспериментальные исследования, приведенные на рисунке 4.16, полностью подтверждают ее.

На современном этапе только осаждение дисперсно-упрочненных композиционных покрытий благодаря управляемому внедрению мелкодисперсных частиц инструментального материала в покрытие позволяет получать сжимающие остаточные напряжения при восстановлении с повышенной плотностью тока. Это особенно важно, т.к. именно плотность тока является главным фактором, влияющим на производительность процесса восстановления [8, 15, 142].

При увеличении плотности тока до 20 кА/м^2 и выше осаждаются покрытия с растягивающими остаточными напряжениями, что вызвано видимо

растрескиванием хромовых покрытий при превышении остаточными напряжениями в покрытии предела прочности хрома.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что дисперсно-упрочненные композиционные покрытия позволяют получать сжимающие остаточные напряжения в покрытии, при значительном увеличении производительности процесса нанесения покрытия. Объясняется этот факт видимо тем, что внедрение мелкодисперсных частиц инструментального материала в покрытие снижает величину усадки последнего в 1,2 – 1,3 раза, что согласуется с гипотезой выдвинутой В.Ф. Молчановым [92], а также приводит к возникновению новых центров зарождения кристаллов, что ведет к дополнительному измельчению структуры покрытия.

На рисунке 4.17 представлено распределение остаточных напряжений в базовом слое покрытия по толщине в зависимости от температуры электролита. Как было выявлено в ходе экспериментальных исследований с уменьшением температуры электролита от 60 до 50 °С остаточные напряжения из сжимающих, уменьшаясь по абсолютной величине, переходят в растягивающие. Объясняется этот факт тем, что с увеличением температуры рабочей среды растет пластичность хромового покрытия [163, 166], и, при прочих равных условиях осаждения, элементарный слой покрытия претерпевает большую пластическую деформацию. К тому же необходимо отметить, что увеличение температуры рабочей среды ведет к снижению скорости осаждения [163, 166]. Учитывая все вышеперечисленные факторы, толщина элементарного слоя покрытия, подвергаемого деформации между двумя последовательными контактами инструмента с деталью в рассматриваемой точке, уменьшается, что также ведет к возникновению сжимающих остаточных напряжений.

Анализируя диаграмму, представленную на рисунке 4.13 можно видеть, что распределение остаточных напряжений по толщине покрытия в зависимости от температуры рабочей среды различно. Автор видит объяснение этому факту в том, что в процессе электролиза происходит массовый перенос частиц инструментального материала в покрытие. При более высоких температурах

электролита перенос инструментального материала в покрытие уменьшается в связи с увеличением пластичности покрытия и как следствие ухудшению его адсорбирующей способности в связи с уменьшением «абразивной» активности осадка. В связи с вышеизложенным, пластичное покрытие захватывает меньшее количество мелкодисперсных частиц. При уменьшении температуры рабочей среды, «абразивная» способность покрытия возрастает в связи с увеличением его твердости и как следствие происходит более интенсивный массовый перенос материала второй фазы в покрытие. Это приводит к более равномерному распределению остаточных напряжений в покрытии по его толщине, что позволяет восстанавливать детали с нанесением гальванических покрытий толщиной не достижимой другими способами холодного восстановления. Однако, экспериментальные исследования подтвердили теоретические положения, выдвинутые в работе о том, что увеличение температуры свыше $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к уменьшению остаточных напряжений ниже значения 297 МПа , которое является критическим для прочности покрытий на основе хромовой матрицы. Учитывая производительность процесса и пластичность хромовых покрытий, необходимых для оптимального внедрения мелкодисперсных инструментальных частиц в покрытие, для получения сжимающих остаточных напряжений в нем, рабочая температура может быть рекомендована в интервале $60\text{--}65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Распределение остаточных напряжений в зависимости от изменения давления инструмента показано на рисунке 4.18.

При увеличении давления увеличивается глубина зарождения пластической области, что приводит к возникновению в каждом элементарном слое сжимающих остаточных напряжений, которые, суммируясь, дают общую картину сжимающих остаточных напряжений в покрытии. Кроме этого увеличение давления приводит к повышению переноса инструментального материала в осаждаемое покрытие, однако необходимо помнить, что чрезмерное увеличение давления на обрабатываемую поверхность может вызвать переупрочнение покрытия и как следствие его разрушение.

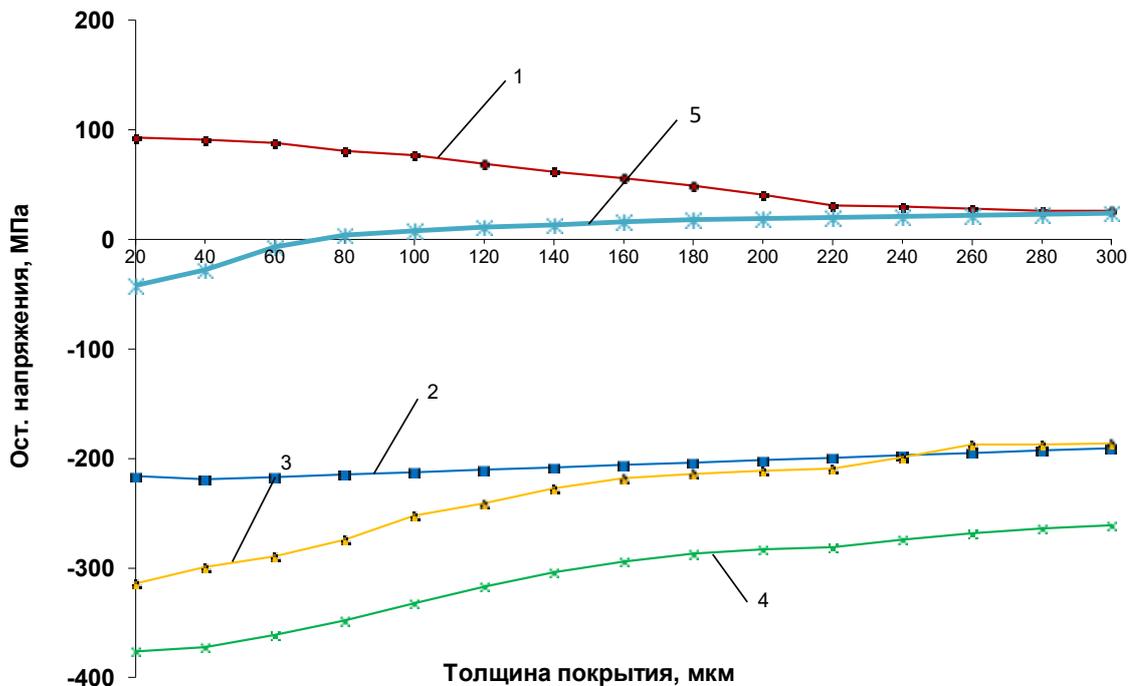


Рисунок 4.17 – Зависимость остаточных напряжений от толщины дисперсно-упрочненного композиционного покрытия

для различных температур (базовый слой):

$i = 10 \text{ кА/м}^2$; $P = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;

1 – $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ (323 К); 2 – $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ (333 К);

3 – $t = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ (343 К); 4 – $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ (353 К).

Распределение остаточных напряжений в зависимости от изменения давления инструмента показано на рисунке 4.18. Как видно из графиков с увеличением давления инструмента на обрабатываемую поверхность удается получать, а затем и увеличивать напряжения сжатия. Попытка увеличить давление инструмента с целью увеличения деформирования всего объема покрытия в процессе его нанесения привела к появлению брака в виде вспучивания и отслаивания покрытия (рисунок 4.19). Как показала практика, обработка с давлениями на поверхность обрабатываемых деталей, превышающей расчетную в 1,5 МПа вызывала местами вспучивание и отслаивание покрытий, что объясняется, видимо, значительными суммарными деформациями,

накапливающимися в процессе механического воздействия инструмента в слоях осадка и, соответственно, их переупрочнением, а также повышенной концентрацией частиц инструментального материала в покрытии.

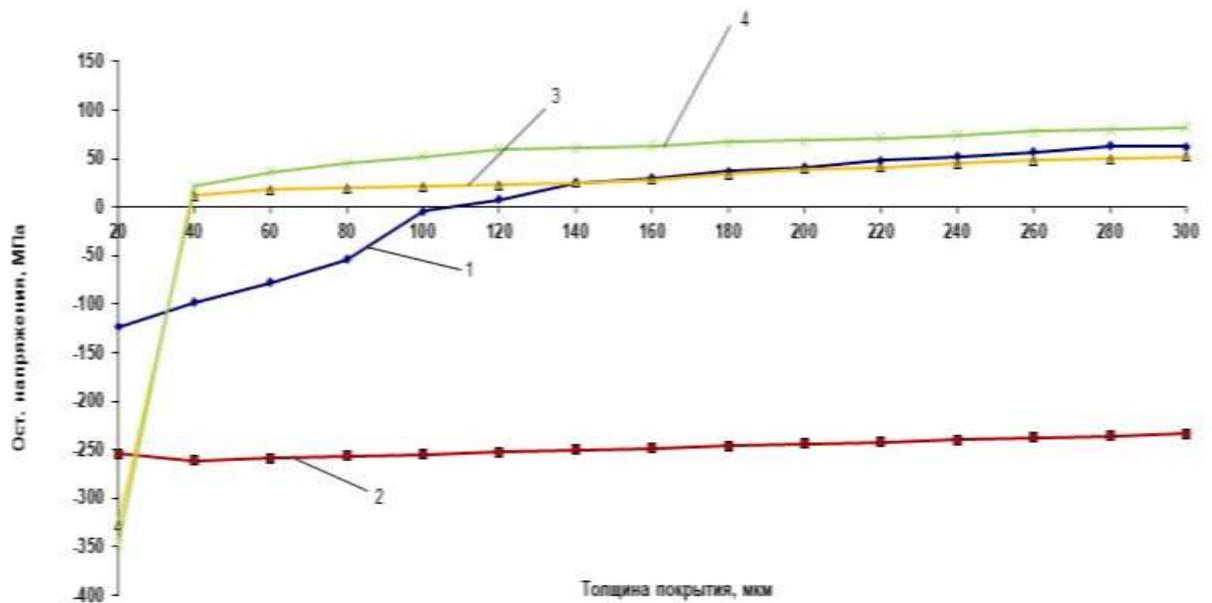


Рисунок 4.18 – Зависимость остаточных напряжений от толщины дисперсно-упрочненного композиционного покрытия на основе хрома (финишный слой) для различных давлений инструмента:

$$i = 10 \text{ кА/м}^2, t = 60 \text{ }^\circ\text{C}, V_0 = 80 \text{ об/мин};$$

$$1 - P = 0,5 \text{ МПа}; \quad 2 - P = 1,5 \text{ МПа}; \quad 3 - P = 2,5 \text{ МПа}; \quad 4 - P = 3,0 \text{ МПа}.$$

Анализ распределения остаточных напряжений в покрытии позволяет сделать следующие заключения. С увеличением давления инструмента на восстанавливаемую поверхность происходит увеличение концентрации инструментального материала в покрытии. Это в свою очередь, как отмечалось ранее, снижает величину усадки последнего в 1,2–1,3 раза, что согласуется с гипотезой [88], а также приводит к возникновению новых центров зарождения кристаллов, что ведет к дополнительному измельчению структуры покрытия.



Рисунок 4.19 – Виды брака при повышенном давлении инструмента

В результате удастся получать толстослойные покрытия с более равномерным распределением сжимающих остаточных напряжений в покрытии, что благотворно влияет на их герметичность. Однако, увеличивать давление инструмента и как следствие концентрацию мелкодисперсных частиц инструмента в покрытии недопустимо.

Превышение допустимого предела концентрации, указанного в п. 4.1 ведёт, как считает автор, к адсорбционному снижению прочности кристаллов, при котором остаточные напряжения превосходят предел прочности покрытия, что ведет к образованию трещин в осадке. Это заключение наглядно проявляется на рисунке 4.18. Кривая 4, обозначающая режимы, где концентрация инструментального материала в покрытии повышена по отношению к кривой 2, располагается более круто и приближается к линии раздела знаков напряжений. Кривая 3, полученная на режимах, обеспечивающих повышенную концентрацию инструментального материала по отношению к кривой 2 уже лежит в области, обозначающей растягивающие остаточные напряжения.

Таким образом, анализируя экспериментальные данные можно заключить, что беспористые хромовые покрытия, возможно получать при давлении инструмента на восстанавливаемую поверхность не превышающую 1,5 МПа. При дальнейшем увеличении давления инструмента получают пористые покрытия с характерной сеткой трещин, такие же покрытия можно получить при давлении инструмента менее 0,5 МПа, что объясняется недостаточным пластическим деформированием растущего осадка.

Учитывая вышеизложенное, в качестве рабочего давления для обеспечения

беспористости получаемого покрытия можно рекомендовать 1,0–1,5 МПа.

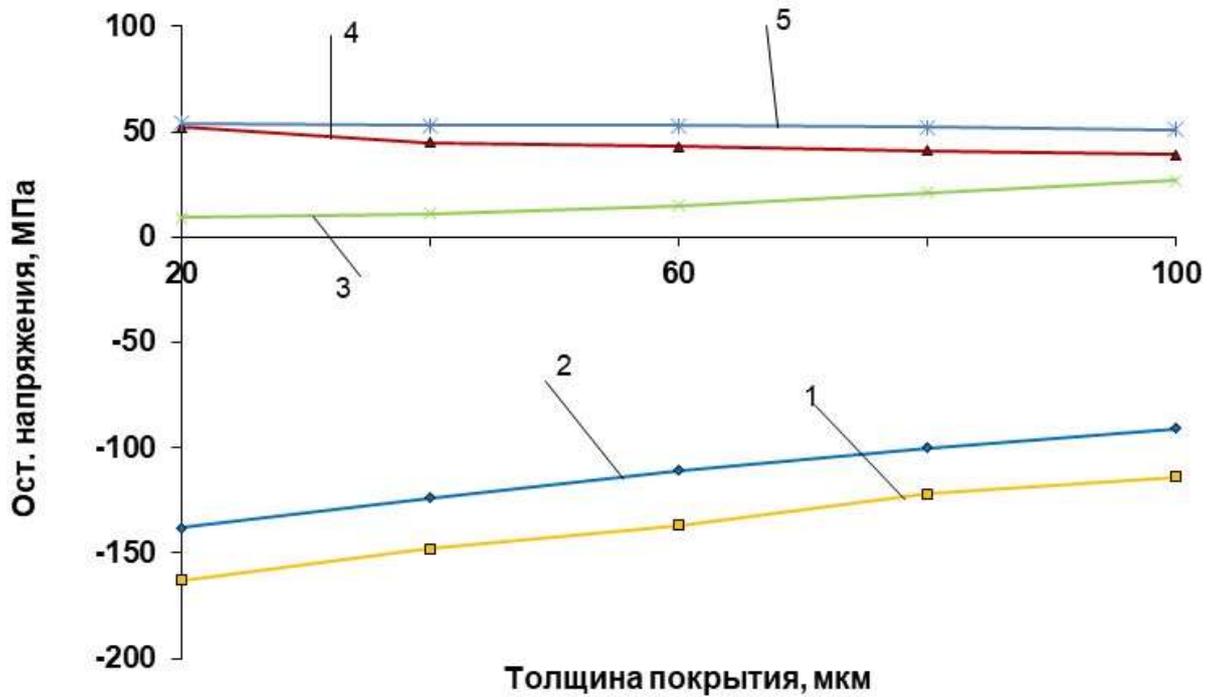


Рисунок 4.20 – Зависимость остаточных напряжений от толщины двухкомпонентного композиционного покрытия на основе хрома (финишный слой) для различных плотностей тока:

1 – $i = 10 \text{ кА/м}^2$; $t = 65 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,5 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;

2 – $i = 12 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;

3 – $i = 14 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;

4 – $i = 18 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;

5 – $i = 30 \text{ кА/м}^2$; $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$

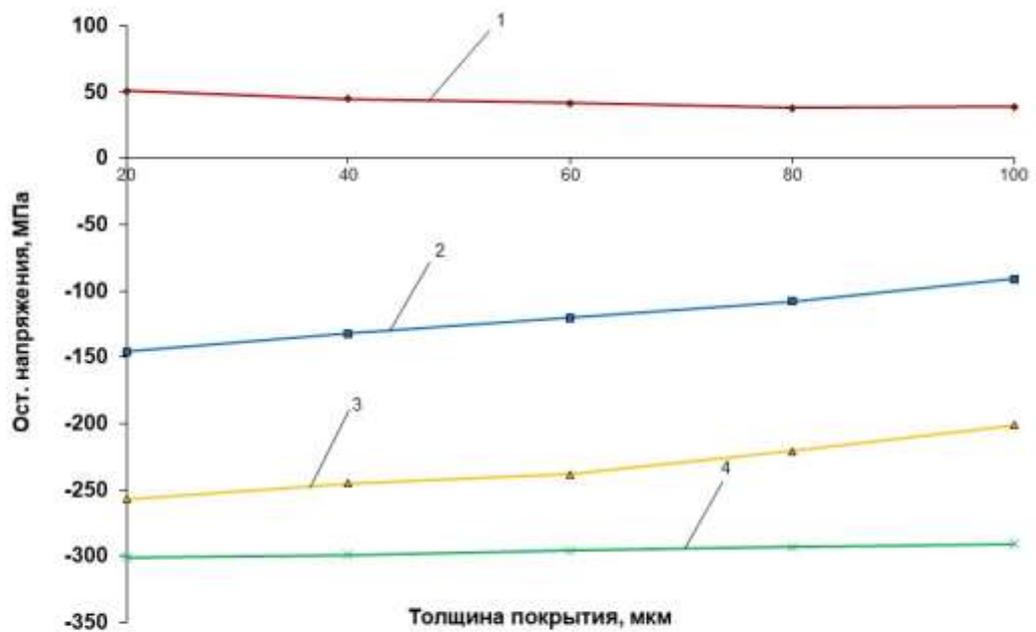


Рисунок 4.21 – Зависимость остаточных напряжений от толщины дисперсно-упрочненного композиционного покрытия на основе хрома (финишный слой) для

различных температур электролита:

$i = 10 \text{ кА/м}^2$; $P = 1,0 \text{ МПа}$; $V_0 = 80 \text{ об/мин}$;

1 – $t = 50 \text{ °C}$ (323 K); 2 – $t = 60 \text{ °C}$ (333 K);

3 – $t = 70 \text{ °C}$ (343 K); 4 – $t = 80 \text{ °C}$ (353 K)

Таким образом, в работе теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность применения рассчитанного диапазона режимных параметров для получения сжимающих остаточных напряжений в ДУГКП как в базовом, так и в финишном слое. Данное положение определяет не только экономический эффект, получаемый за счет сокращения вспомогательного времени на операциях нанесения покрытий, но и позволяет повысить качество осадка за счет исключения вынужденного прерывания процесса нанесения покрытия для перенастройки режимов его осаждения.

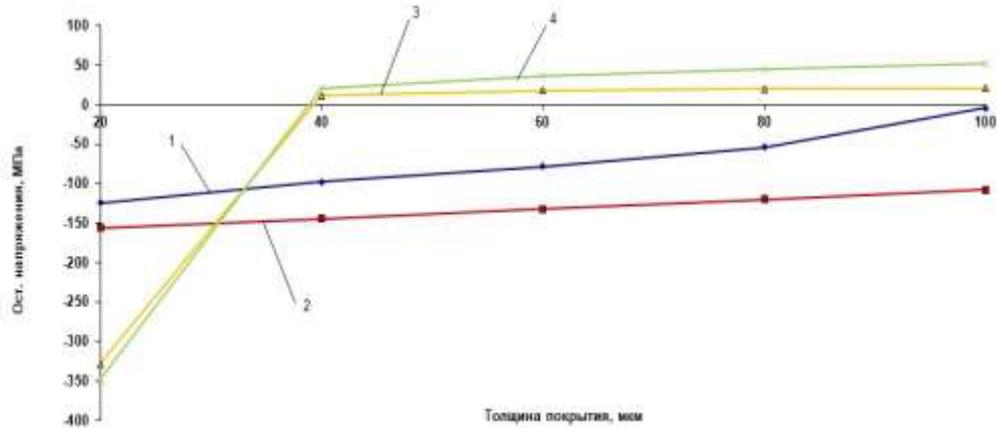


Рисунок 4.22 – Зависимость остаточных напряжений от толщины дисперсно-упрочненного композиционного покрытия на основе хрома (финишный слой) для различных давлений инструмента:

$$i = 10 \text{ кА/м}^2, t = 60 \text{ }^\circ\text{C}, V_0 = 80 \text{ об/мин};$$

1 - P = 0,5 МПа; 2 - P = 1,5 МПа; 3 - P = 2,5 МПа; 4 - P = 3,0 МПа



Рисунок 4.23 – Остаточные напряжения при нанесении стандартных и дисперсно-упрочненных композиционных покрытий

а) – растягивающие напряжения; б) – сжимающие напряжения

Основываясь на полученных в ходе исследования данных, была построена номограмма зависимости качества получаемых ДУГКП в зависимости от пара-

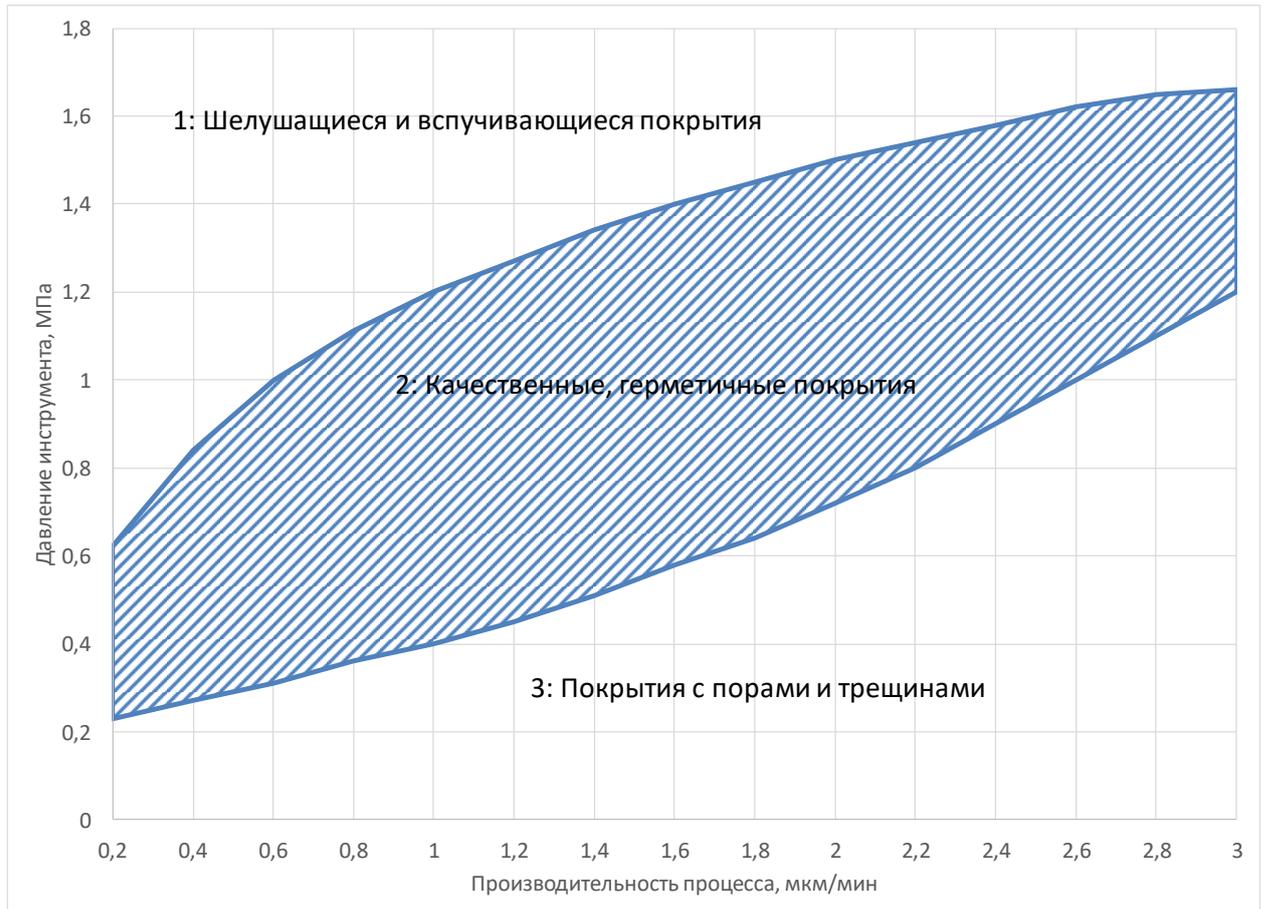


Рисунок 4.24 – Области получения покрытий заданного качества

метров осаждения, которая представлена на рисунке 4.24. Учитывая то, что основным показателем скорости роста осадка, включающим в себя параметры процесса осаждения покрытий, является производительность процесса, а наиболее простым и наименее инерционным параметром с точки зрения регулирования является давление инструмента на осаждаемое покрытие, номограмма представляет собой области получения покрытий различного качества в зависимости от производительности процесса и давления инструмента.

Экспериментальные исследования показали, что в обоих слоях покрытия остаточные напряжения, оставаясь сжимающими на всем протяжении по толщине, в финишном слое имеют меньшие значения по абсолютной величине. Автор видит объяснение данному эффекту в том, что внешнее давление на дисперсно-упрочненные композиционные покрытия базового слоя, представляющего собой материал, в матрице которого равномерно распределены

мелкодисперсные частицы второго вещества, происходит по следующей схеме. В таких материалах при нагружении всю нагрузку воспринимает матрица, в которой с помощью множества не растворяющихся в ней частиц второй фазы создается структура, эффективно сопротивляющаяся деформации. При движении дислокаций в мягкой по отношению к частицам второй фазы матрице, содержащей жесткие равновесные частицы инструментального материала, дислокация под действием касательного напряжения выгибается между ними, ее участки смыкаются за каждой частицей и, оставив вокруг частиц петли, дислокация скользит в прежнем направлении (рисунок 2.6).

Новая дислокация, проходя между частицами, оставляет вокруг каждой из них кольцо, поэтому суммарная длина дислокаций, а соответственно, и их энергия возрастают. «Ожерелья» из взаимоотталкивающихся дислокационных колец вокруг дисперсных частиц создают поле упругих напряжений, затрудняющее проталкивание новых дислокаций между частицами. Суммирование этих полей по слоям покрытия совместно с механической деформацией самой матрицы приводит к эффекту увеличения сжимающих напряжений в базовом слое по сравнению с финишным, т.к. в последнем использован более мягкий наполнитель по сравнению с матрицей и в этом случае остаточные напряжения формируются только за счет механической деформации самой матрицы.

Анализируя характер изменения кривых распределения остаточных напряжений во всех рассматриваемых в данной работе случаях, можно обнаружить одну закономерность. От основы к поверхности покрытия величина сжимающих остаточных напряжений уменьшается.

Объяснить это можно упрочнением растущих слоев покрытия в процессе обработки. Причем слои покрытия, осажденные в начальный период, деформируются в большей степени, чем осажденные в конце обработки. Многократное механическое воздействие приводит к накоплению деформаций в слоях и, соответственно, возникновению больших остаточных напряжений в нижних слоях покрытий, чем в поверхностных, т.к. последние меньшее количество раз деформируются в процессе обработки.

Оборудование, предназначенное для реализации метода, осуществляет движение вращения детали, называемое главным движением.

Анализируя экспериментальные данные, представленные на рисунке 4.25, видно, что зависимость остаточных напряжений от скорости главного движения слабовыраженная. При большей частоте вращения осаждаются более тонкие элементарные слои покрытия и, при условии неизменности давления инструмента на восстанавливаемую поверхность происходит более сильное деформирование каждого слоя, что ведет к возникновению более высоких по абсолютной величине остаточных напряжений (рисунок 4.25, кривая 3). При уменьшении частоты вращения детали осаждаются более толстые элементарные слои покрытия, и при условии неизменности давления инструмента на восстанавливаемую поверхность происходит менее сильное деформирование каждого слоя, что ведет к возникновению менее высоких по абсолютной величине остаточных напряжений в покрытии (рисунок 4.25, кривые 2, 3).

Необходимо отметить, что в отличие от напряжений в покрытиях, полученных по методу гальвано-механического осаждения с полированным инструментом, напряжения, полученные в дисперсно-упрочненных композиционных покрытиях, имеют значительно меньший разброс, как по абсолютной величине, так и по толщине покрытия. Объясняется этот факт видимо тем, что включение мелкодисперсных частиц в покрытие в процессе электролиза ведет к измельчению структуры покрытия за счет возбуждения дополнительных центров активации роста кристаллов. В этом автор видит объяснение более равномерному распределению остаточных напряжений в покрытиях, полученных предлагаемым методом.

К тому же необходимо отметить, что все хромовые покрытия подвержены усадке. Этот процесс отрицательно влияет на распределение остаточных напряжений в покрытии. Внедрение мелкодисперсных частиц в осаждаемое покрытие, как показывают проведенные исследования, снижают величину усадки покрытия в 1,2–1,3 раза, что благотворно сказывается на распределении остаточных напряжений в покрытии. Учитывая вышеизложенное в качестве

рабочих режимов можно рекомендовать скорость главного движения $V_O = 70\text{--}90$ мин⁻¹.

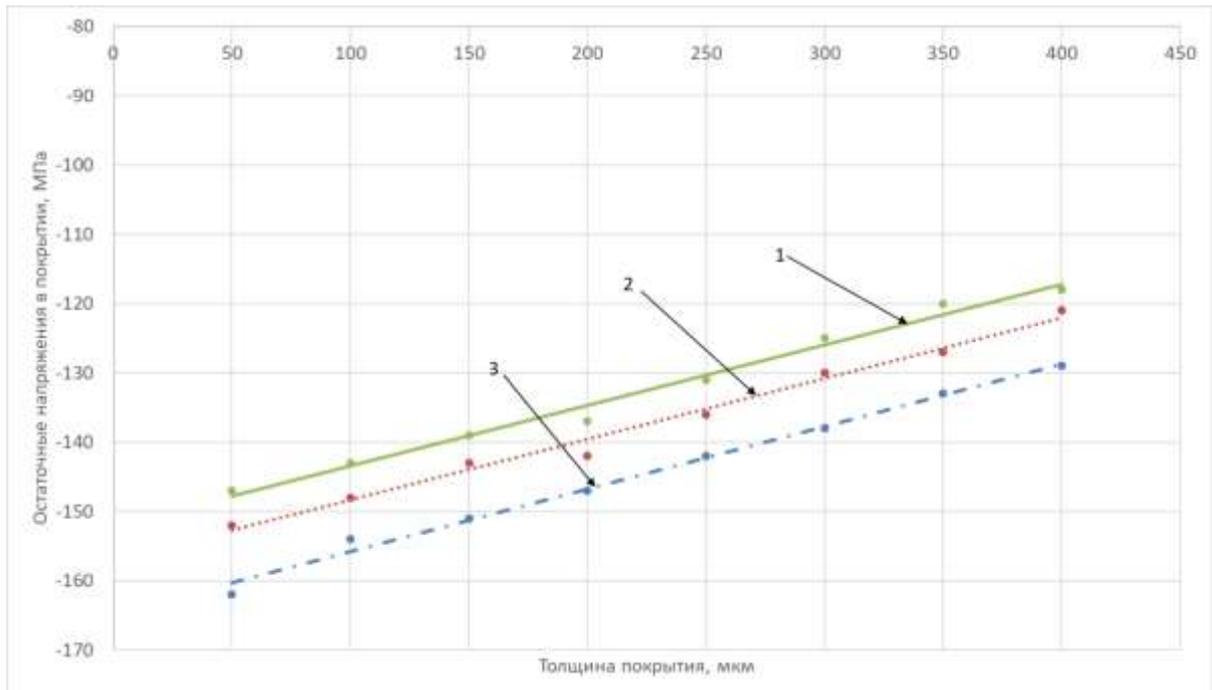


Рисунок 4.25 – Зависимость остаточных напряжений в покрытии

от скорости главного движения:

$i = 10$ кА/м²; $t = 60^\circ$ С; $P = 1,0$ МПа;

1 – 60 мин⁻¹; 2 – 80 мин⁻¹; 3 – 100 мин⁻¹

4.3 Влияние режимов осаждения покрытия на производительность процесса

Рассмотрим влияние режимов осаждения покрытия на производительность процесса при осаждении базового слоя покрытия. На предварительном этапе был проведен корреляционный анализ влияния факторов процесса на зависимую величину. Принято считать, что при коэффициенте корреляции превышающем 0,3 анализируемый параметр существенно влияет на исследуемую величину [25]. Учитывая вышеизложенное, на основе анализа корреляционной матрицы, представленной в приложении Б3, можно сделать вывод о необходимости включения в анализ следующих факторов: плотности тока, температуры электролита и давления инструмента. Для исследования влияния параметров процесса нанесения гальванических композиционных покрытий на основе хрома

на скорость осаждения базового слоя покрытия был реализован полный факторный эксперимент 2^3 . Характеристики плана эксперимента выбирались из условий получения покрытий со сжимающими остаточными напряжениями. Все режимные параметры изменяли исходя из технологических рекомендаций по получению герметичных хромовых покрытий с максимальной производительностью процесса, которые и были выбраны в качестве независимых переменных: плотность тока (x_1) – от 10 до 12 кА/м², температуру электролита (x_2) изменяли от 60 до 65 °С, давление инструмента (x_3) – от 1,0 до 1,5 МПа. Остальные факторы поддерживались на постоянном уровне, соответствующем рациональным режимам осаждения, определенным в п. 4.2 настоящей работы. Основные характеристики плана эксперимента представлены в приложении Б3.

Дальнейшим этапом явилось проведение регрессионного анализа. В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение в кодированных значениях, описывающее зависимость производительности процесса от исследуемых факторов:

$$v_o = 1,974 + 0,059 \cdot x_1 - 0,019 \cdot x_2 - 0,004 \cdot x_3 - \\ - 0,001 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0006 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0006 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,002 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (4.9)$$

Визуализация регрессионного уравнения (4.9) представлена на рисунке 4.26 в качестве контура желательности.

Проверка адекватности выбранной модели производилась по критерию Фишера [27]. Модель считалась адекватной, если $F_p < F_{кр}$. Для полученной модели данное условие выполняется, следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает влияние основных факторов процесса на производительность процесса при нанесении базового слоя покрытия.

Анализируя корреляционную матрицу, видим, что наибольшее влияние на производительность процесса оказывает плотность тока (коэффициент корреляции - 0,944). Менее значительно влияют температура электролита и давление инструмента (коэффициенты корреляции соответственно 0,315 и 0,065).

Далее в порядке убывания степени влияния на производительность процесса факторы расположились следующим образом: взаимное влияние плотности тока, температуры электролита и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,028), взаимное влияние плотности тока и температуры электролита (коэффициент корреляции 0,019), взаимное влияние плотности тока и давления инструмента, а также температуры электролита и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,009).

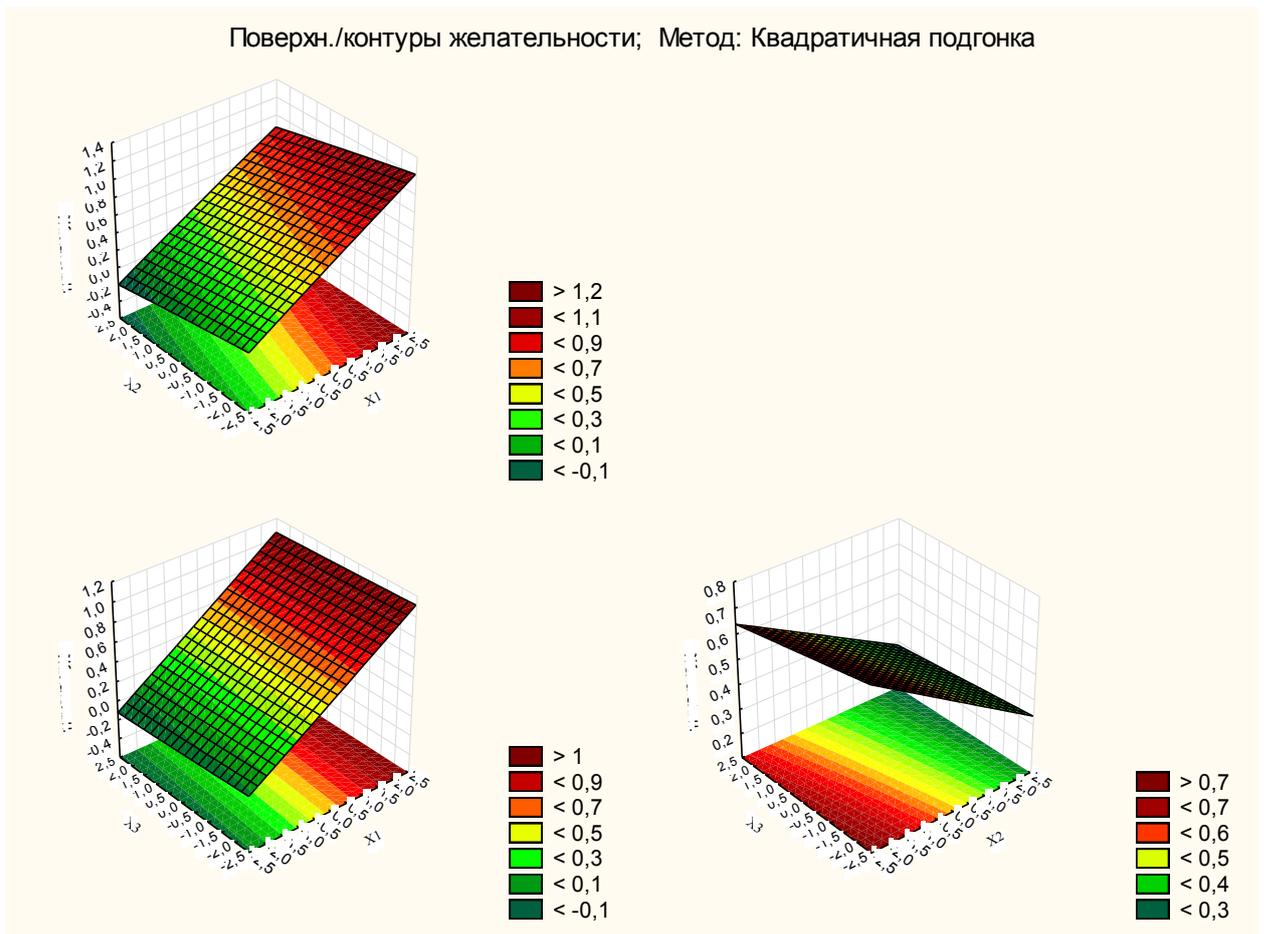


Рисунок 4.26 – Зависимость производительности процесса от параметров осаждения

Анализ позволил выявить, что зависимость производительности процесса от исследуемых факторов сильная - множественный коэффициент корреляции достигает значения 0,997. Проверка значимости коэффициентов регрессионного уравнения выявила, что значимыми являются только коэффициенты при плотности тока, температуре электролита и давлении инструмента, т.к. для них

вычисленные значения критерия Стьюдента оказались больше табличного t_m . В связи с этим полученное уравнение (4.9) в кодированных значениях может быть представлено в виде:

$$v_6 = 1,974 + 0,059 \cdot x_1 - 0,019 \cdot x_2 - 0,004 \cdot x_3 \quad (4.10)$$

Таким образом, раскодированное регрессионное уравнение, описывающее влияние условий осаждения базового слоя на производительность процесса в получаемых гальванических композиционных покрытиях на основе хрома, будет иметь вид:

$$v_6 = 1,82 + 0,059 \cdot x_1 - 0,0076 \cdot x_2 - 0,016 \cdot x_3 \quad (4.11)$$

Анализ влияния исследуемых факторов на производительность процесса нанесения базового слоя ДУГКП на основе хрома, показывает, что с увеличением температуры электролита производительность процесса уменьшается, что согласуется с характером влияния температуры электролита на скорость осаждения покрытий как при обычном хромировании, так и при гальваномеханическом. Следовательно, это приводит к более легкой деформации растущих слоев осадка. Увеличение плотности тока приводит к росту производительности и объясняется, видимо, ускорением роста кристаллов покрытия. С ростом величины давления инструмента на поверхность, подвергаемую нанесению покрытия, производительность процесса также уменьшается, что объясняется усилением деформации покрытия и, следовательно, уменьшением элементарного объема осадка, осаждаемого в единицу времени.

Экспериментальная проверка производительности процесса осаждения базового слоя ДУГКП на основе хрома представлена на рисунке 4.27.

Из графиков, представленных на рисунке 4.27 можно сделать вывод о том, что скорость нанесения базового слоя ДУГКП на основе хрома превышает аналогичный показатель процесса гальваномеханического хромирования более чем в 2,15 раза, а стандартного хромирования в 7,4 раза. Кроме этого, немало-

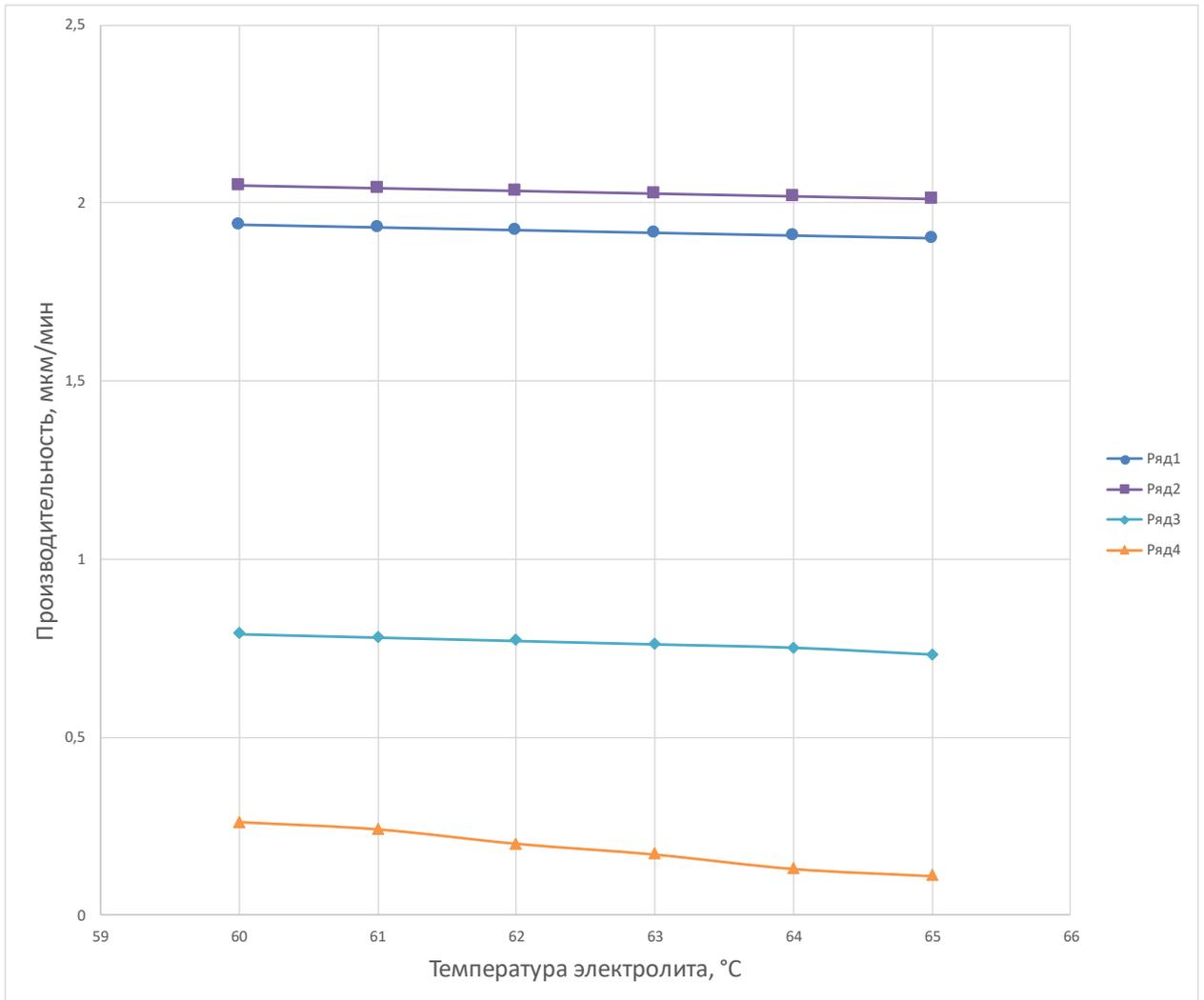


Рисунок 4.27 – Номограмма зависимости производительности процесса от температуры электролита при различных способах осаждения

Ряд 1 (композиционный базовый слой) – $i = 10 \text{ кА/м}^2$; $p = 1,0 \text{ МПа}$;

Ряд 2 (композиционный базовый слой) – $i = 12 \text{ кА/м}^2$; $p = 1,5 \text{ МПа}$;

Ряд 3 (ГМХ) – $i = 10 \text{ кА/м}^2$; $p = 1,0 \text{ МПа}$;

Ряд 4 (станд. хром) – $i = 10 \text{ кА/м}^2$

важным является тот факт, что стабильность производительности процесса осаждения композиционных покрытий на всем этапе изменения температуры электролита остается в 3,75 раза выше по сравнению с аналогичным показателем стандартного хромирования и в 1,5 раза выше, чем при гальвано-механическом хромировании.

Для исследования влияния параметров процесса нанесения гальванических композиционных покрытий на основе хрома на скорость осаждения финишного

слоя покрытия был реализован полный факторный эксперимент 2^3 . В план включались факторы, на основе проведенного корреляционного анализа матрица которого представлена в приложении Б3. Характеристики плана эксперимента выбирались из условий получения покрытий со сжимающими остаточными напряжениями. Все режимные параметры изменяли, исходя из технологических рекомендаций по получению герметичных хромовых покрытий с максимальной производительностью процесса. В качестве независимых переменных были выбраны: плотность тока (x_1) – от 10 до 12 кА/м², температура электролита (x_2) изменяли от 60 до 65 °С, давление инструмента (x_3) – от 1,0 до 1,5 МПа. Остальные факторы поддерживались на постоянном уровне, соответствующем рациональным режимам осаждения, определенным в п. 4.2 настоящей работы. Основные характеристики плана эксперимента представлены в приложении Б3.

Дальнейшим этапом явилось проведение регрессионного анализа. В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение в кодированных значениях, описывающее зависимость остаточных напряжений в покрытии от исследуемых факторов:

$$v_{\phi} = 2,533 + 0,077 \cdot x_1 - 0,024 \cdot x_2 - 0,006 \cdot x_3 + \\ + 0,000001 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,000001 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,003 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,002 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (4.12)$$

Визуализация регрессионного уравнения (4.12) представлена на рисунке 4.28 в качестве контура желательности.

Проверка адекватности выбранной модели производилась по критерию Фишера [25]. Модель считалась адекватной, если $F_p < F_{кр}$. Для полученной модели данное условие выполняется, следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает влияние основных факторов процесса на производительность процесса при нанесении базового слоя покрытия.

Анализируя корреляционную матрицу, видим, что наибольшее влияние на производительность процесса оказывает плотность тока (коэффициент корреляции - 0,949). Менее значительно влияют температура электролита и дав-

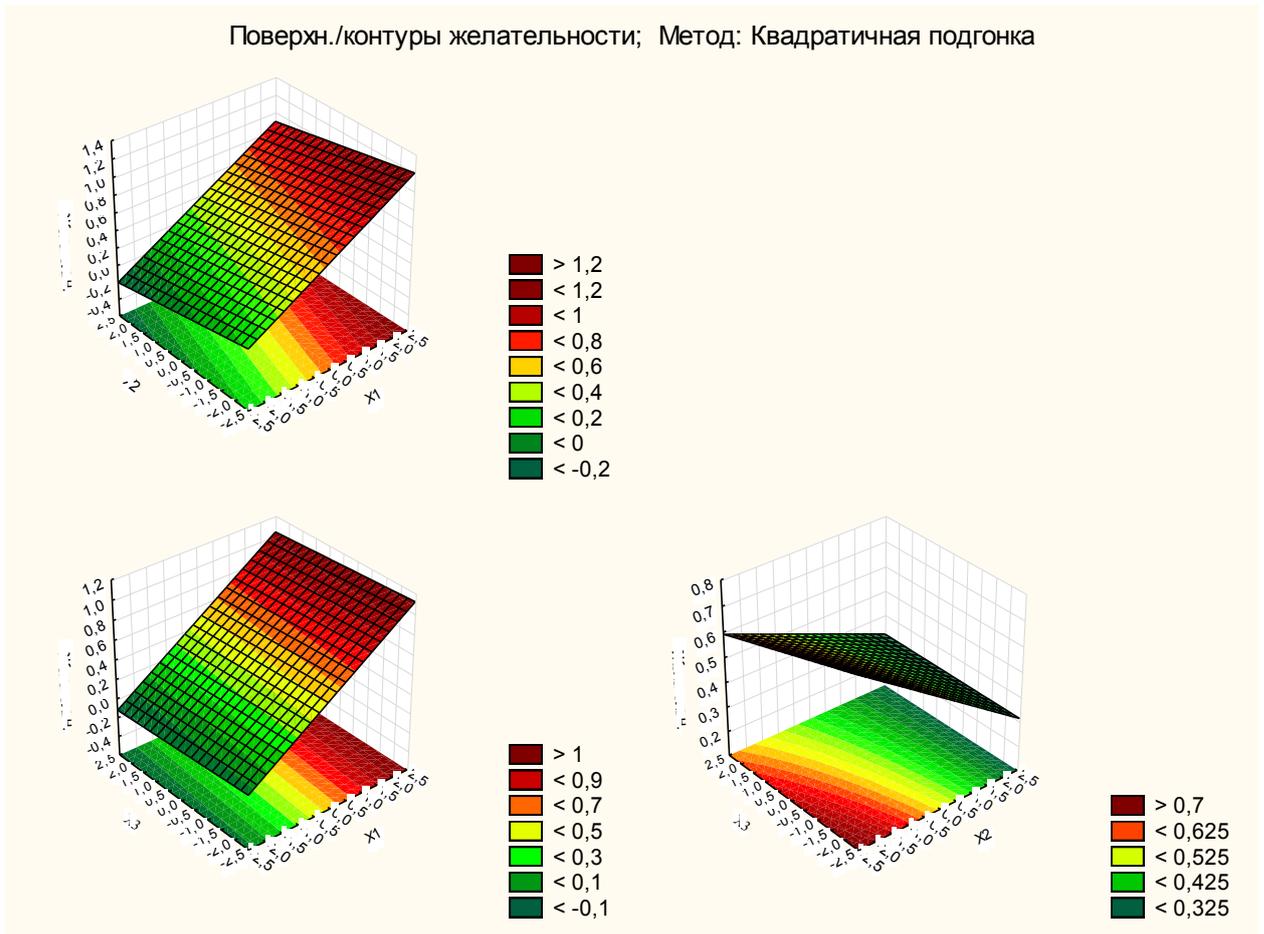


Рисунок 4.28 – Функция желательности для производительности гальванического осаждения композиционных покрытий

ление инструмента (коэффициенты корреляции соответственно 0,299 и 0,072). Далее в порядке убывания степени влияния на производительность процесса факторы расположились следующим образом: взаимное влияние температуры электролита и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,031), взаимное влияние плотности тока, температуры электролита и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,021), взаимное влияние плотности тока и температуры электролита, а также взаимное влияние плотности тока и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,00001).

Анализ позволил выявить, что зависимость производительности процесса от исследуемых факторов сильная – множественный коэффициент корреляции достигает значения 0,997. Проверка значимости коэффициентов регрессионного уравнения выявила, что значимыми являются коэффициенты при плотности тока,

температуре электролита, давлении инструмента и взаимном влиянии температуры электролита и давления инструмента т.к. для них вычисленные значения критерия Стьюдента оказались больше табличного t_m . В связи с этим полученное уравнение (4.12) в кодированных значениях может быть представлено в виде:

$$v_{\phi} = 2,533 + 0,077 \cdot x_1 - 0,024 \cdot x_2 - 0,006 \cdot x_3 + 0,003 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (4.13)$$

Раскодированное регрессионное уравнение, описывающее влияние условий осаждения финишного слоя на производительность процесса в получаемых гальванических композиционных покрытиях на основе хрома, будет иметь вид:

$$v_{\phi} = 2,691 + 0,077 \cdot x_1 - 0,016 \cdot x_2 - 0,324 \cdot x_3 + 0,005x_2x_3. \quad (4.14)$$

Анализ влияния исследуемых факторов на производительность процесса нанесения финишного слоя дисперсно-упрочненных гальванических покрытий на основе хрома, показывает, что влияние факторов процесса аналогично влиянию режимных параметров нанесения покрытия в базовом слое.

Экспериментальная проверка производительности процесса осаждения финишного слоя ДУГКП на основе хрома представлена на рисунке 4.25.

Из графиков, представленных на рисунке 4.29 можно сделать вывод о том, что скорость нанесения финишного слоя ДУГКП на основе хрома превышает аналогичный показатель при нанесении базового слоя покрытия в 1,27 раза. Автор видит объяснение в возникновении данного эффекта за счет использования при формировании финишного композиционного покрытия в качестве второй фазы только токопроводящего материала – дисульфида молибдена.

4.4 Влияние режимов нанесения финишного слоя композиционного дисперсно-упрочненного покрытия на основе хрома на микрогеометрию поверхности

Регуляризация микрогеометрии технических поверхностей открыла практически неограниченные возможности управления эксплуатационными

свойствами деталей. Как отмечается в [169], девять из каждых десяти деталей силовых гидроагрегатов работают в подвижных соединениях трения скольжения. Для деталей этих пар трения необходимым условием является создание микрорельефа рабочих поверхностей с одновременной хорошей несущей способ-

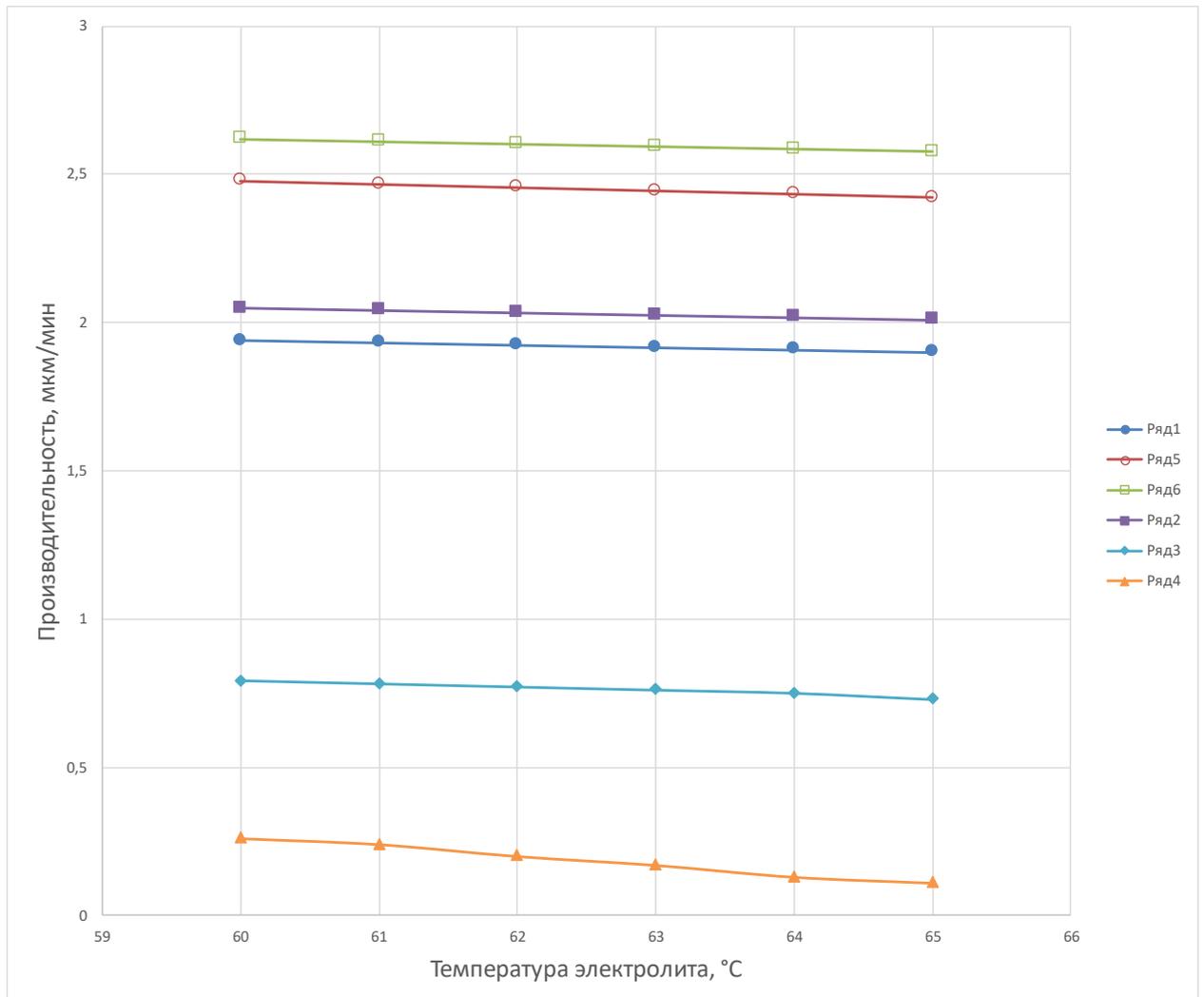


Рисунок 4.29 – Номограмма зависимости производительности финишного слоя гальванического покрытия при различных способах осаждения покрытий

Ряд 1 (композиционный базовый слой) – $i = 10 \text{ кА/м}^2$; $p = 1,0 \text{ МПа}$;

Ряд 2 (композиционный базовый слой) – $i = 12 \text{ кА/м}^2$; $p = 1,5 \text{ МПа}$;

Ряд 5 (композиционный финишный слой) – $i = 10 \text{ кА/м}^2$; $p = 1,0 \text{ МПа}$;

Ряд 6 (композиционный финишный слой) – $i = 12 \text{ кА/м}^2$; $p = 1,5 \text{ МПа}$;

Ряд 3 (ГМХ) – $i = 10 \text{ кА/м}^2$; $p = 1,0 \text{ МПа}$;

Ряд 4 (станд. хром) – $i = 10 \text{ кА/м}^2$

ностью (обеспечение малых значений контактных напряжений). Именно этим путем может быть увеличен ресурс эксплуатации подвижных соединений за счет повышения износостойкости деталей пар трения [83].

При восстановлении деталей стандартным хромированием происходит увеличение шероховатости поверхности в сравнении с исходной в 1,6 – 2 раза [38, 57]. Там же отмечается, что это в значительной мере снижает твердость хромового покрытия и одновременно повышает его пористость.

Влияние метода нанесения финишного слоя композиционного дисперсно-упрочненного покрытия на основе хрома на шероховатость поверхности восстанавливаемой детали является важным параметром, характеризующим процесс. Так как метод разрабатывался как финишный метод восстановления изношенных поверхностей деталей, к шероховатости поверхности, восстановленной данным методом, предъявляются особые требования. Этот раздел посвящен изучению влияния режимных параметров нанесения финишного слоя композиционного дисперсно-упрочненного покрытия на основе хрома на шероховатость получаемой поверхности.

В нашем случае исследовались образцы, с покрытием толщиной 40–400 мкм.

Для изучения влияния электролиза на шероховатость получаемых покрытий применялось математическое планирование эксперимента [18, 76].

Одним из условий этого метода является предположение о функциональной независимости варьируемых переменных. Для оценки этого положения проводился корреляционный анализ. На основании анализа матрицы коэффициентов парной корреляции, можно сделать вывод о необходимости включения в модель таких факторов исследуемого процесса, как плотность тока, температура рабочей среды, давление инструмента на поверхность. Остальные факторы процесса оказались не значимы либо мультиколлинеарны. Был реализован полный факторный эксперимент 2^3 . Характеристики плана эксперимента выбирались из условия получения беспористых хромовых покрытий со сжимающими остаточными напряжениями и минимальной

шероховатостью восстановленной поверхности. В результате области варьирования независимых переменных были выбраны следующие:

| | |
|--|---------|
| плотность тока (x_1) i , кА/м ² | 10–12 |
| температура электролита (x_2) t , °С | 60–65 |
| давление инструмента (x_3) P , МПа | 1,0–1,5 |

В качестве зависимой переменной была взята шероховатость поверхности покрытий (R_a , мкм).

Исследования проводились методом регрессионного анализа, для чего на основании экспериментальных данных была построена матрица планирования, содержащая зависимую и независимые переменные, которая представлена в приложении Б4.

Следующим этапом работы является подбор математической модели, наиболее точно описывающей исследуемый процесс.

Проверялось несколько типов модели, результаты представлены в приложении Б4. Анализируя проведенные вычисления видно, что наилучшим образом описывает исследуемый процесс линейная модель со свободным членом, т.к. для нее коэффициент детерминированности имеет наибольшее значение.

Дальнейшим этапом явилось проведение регрессионного анализа. Проверка адекватности выбранной модели производилась по критерию Фишера [76]. Модель считалась адекватной, если $F_p < F_{кр}$. Для полученной модели данное условие выполняется, следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает влияние основных факторов процесса ГКО на шероховатость поверхности получаемых покрытий.

В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение в кодированных единицах, описывающее зависимость шероховатости покрытий от исследуемых факторов:

$$R_a = 0,0364 + 0,005x_1 - 0,003x_2 - 0,002x_3 + 0,00004x_1x_2 + 0,00004x_1x_3 - 0,0003x_2x_3 - 0,0001x_1x_2x_3. \quad (4.15)$$

Анализ позволил выявить, что зависимость микрогеометрии от

исследуемых факторов сильная – множественный коэффициент корреляции достигает значения 0,978.

Анализируя корреляционную матрицу, видим, что наибольшее значение на шероховатость покрытий оказывает плотность тока (коэффициент корреляции – 0,828). Менее значительно влияют на микрогеометрию температура электролита и давление инструмента (коэффициенты корреляции соответственно -0,418 и 0,338). Далее в порядке убывания степени влияния на микрогеометрию поверхности факторы расположились следующим образом: взаимное влияние температуры электролита и давления инструмента (коэффициент корреляции – 0,046), сочетание всех трех факторов (коэффициент корреляции – 0,019), и взаимное влияние плотности тока и температуры электролита и взаимное влияние плотности тока и давления инструмента (коэффициент корреляции – 0,006).

После проверки значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента [76], выяснилось, что коэффициенты регрессии оказались значимыми только при плотности тока, температуре электролита и давлении инструмента, т.к. вычисленные значения критерия Стьюдента оказались больше табличного $t_m=2,77$ [18, 76]. В связи с этим полученное уравнение (4.15) в кодированных значениях может быть представлено в виде:

$$R_a = 0,0364 + 0,005x_1 - 0,003x_2 - 0,002x_3. \quad (4.16)$$

Раскодированное регрессионное уравнение, описывающее влияние условий осаждения финишного слоя на микрогеометрию в получаемых гальванических композиционных покрытиях на основе хрома, будет иметь вид:

$$R_a = 0,061 + 0,005x_1 - 0,0012x_2 - 0,008x_3. \quad (4.17)$$

Из анализа влияния исследуемых факторов на шероховатость покрытий следует, что с увеличением температуры электролита микрогеометрия покрытий уменьшается, т.к. при этом улучшается раскатка покрытия инструментом во время его нанесения на деталь, и объясняется, видимо, увеличением пластичности хрома с повышением температуры электролита.

Как указывалось ранее, наиболее рациональной плотностью тока для

получения качественных герметичных гальванических композиционных покрытий на основе хрома, является значение $10\text{--}12 \text{ кА/м}^2$, так как позволяет осаждать покрытия с наивысшей скоростью без ухудшения качества последних. Визуализация регрессионного уравнения (4.17) представлена на рисунке 4.30 в качестве контура желательности.

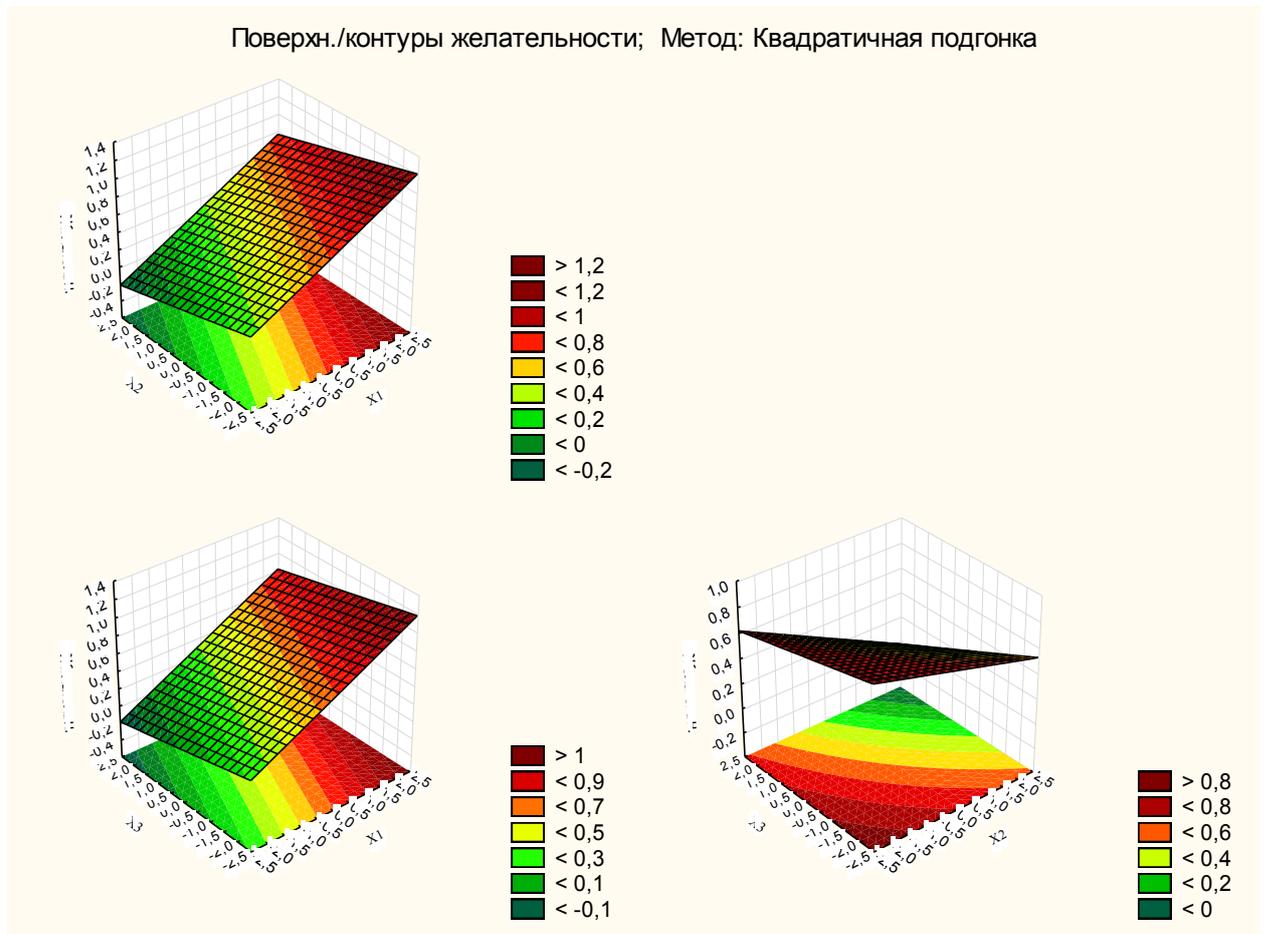


Рисунок 4.30 – Регрессионная зависимость микрогеометрии покрытия как функции параметров осаждения

На рисунке 4.31 представлена трехмерная графическая зависимость влияния температуры рабочей среды и давления инструмента на поверхность детали, подвергаемую нанесению композиционного покрытия при плотности тока 10 кА/м^2 .

Она позволяет, не прибегая к математическим вычислениям качественно оценить степень влияния режимных параметров осаждения покрытия на шероховатость последнего.

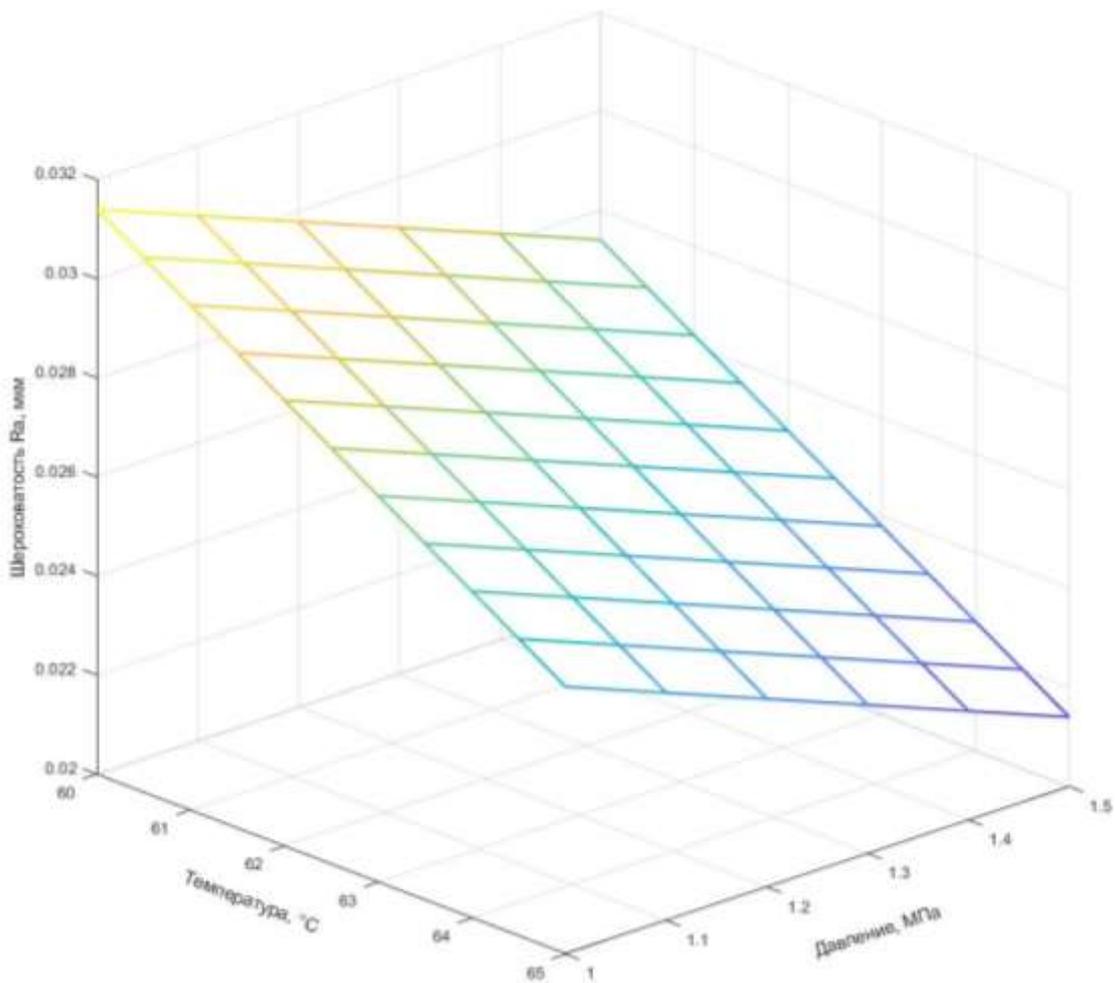


Рисунок 4.31 – Зависимость шероховатости покрытия от режимных параметров осаждения (уравнение (4.17)):

$$\text{при } i = 10 \text{ кА/м}^2, V_{\text{гд}} = 80 \text{ мин}^{-1}$$

Однако, для количественных технологических расчетов получаемой шероховатости трехмерное графическое изображение использовать затруднительно. В связи с этим была построена номограмма выбора технологических параметров для получения покрытий с заданной шероховатостью поверхности, которая представлена на рисунке 4.32.

Увеличение плотности тока приводит к незначительному увеличению шероховатости получаемых покрытий и объясняется, видимо, экстремальным характером зависимости роста покрытия от плотности тока.

Увеличение давления в исследуемом диапазоне снижает величину

шероховатости получаемых покрытий.

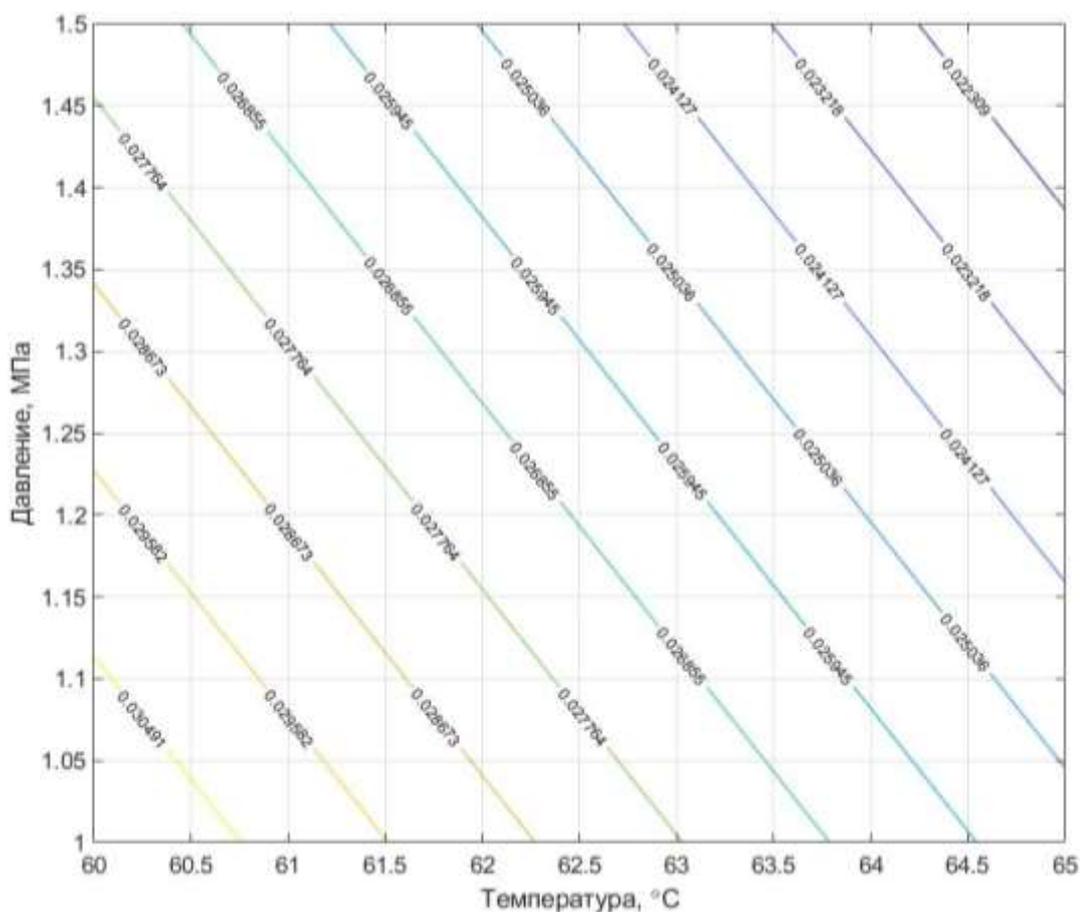


Рисунок 4.32 – Графическая зависимость для определения режимных параметров осаждения с целью получения покрытий заданной шероховатости:

$$\text{при } i = 10 \text{ кА/м}^2, V_{\text{гд}} = 80 \text{ мин}^{-1}$$

Величина микрогеометрии покрытий, полученных предлагаемым методом, лежит в пределах $R_a = 0,03\text{--}0,04$ без применения механической обработки, что позволяет рекомендовать метод для финишных операций.

Практическое исследование зависимости шероховатости покрытия от режимов его нанесения дало следующие результаты.

Исследование влияния предварительной подготовки поверхности под нанесение ДУГКП на основе хрома показало, что после проведения технологической операции осаждения покрытия шероховатость поверхности снижается по отношению к исходной. Этот эффект имеет место при нанесении на любой тип поверхности (рисунки 4.33–4.38).

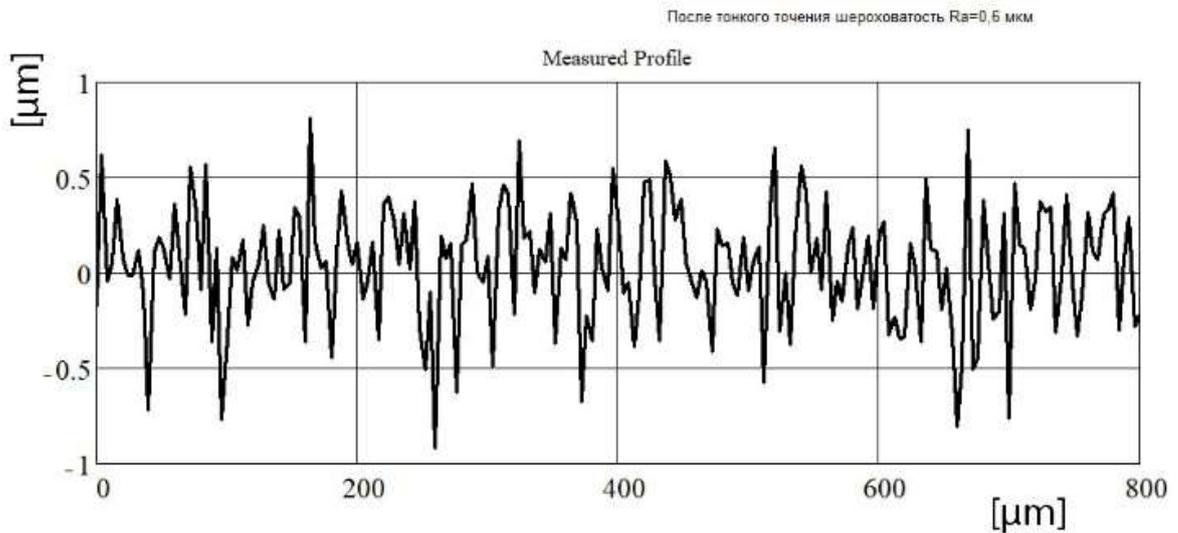


Рисунок 4.33 – Восстанавливаемая поверхность после точения

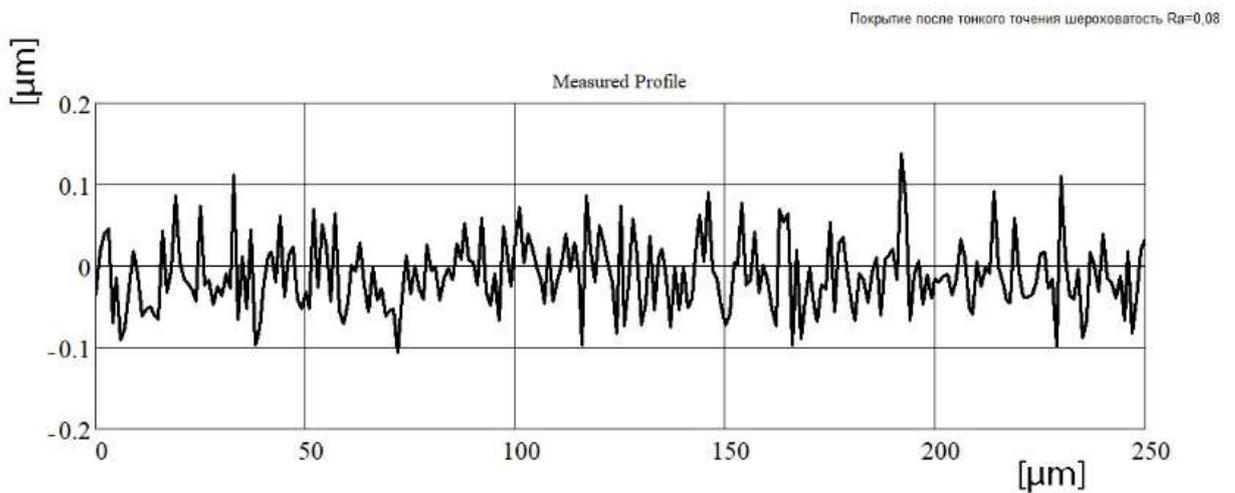


Рисунок 4.34 – Покрытие после точения

Выше установленный факт особенно интересен в свете главы 1, в которой на основании литературных данных было установлено, что при нанесении хромовых покрытий исходная шероховатость деталей повышается в 1,6–2 раза, что в свою очередь ведет к повышению пористости и снижению твердости хромового покрытия.

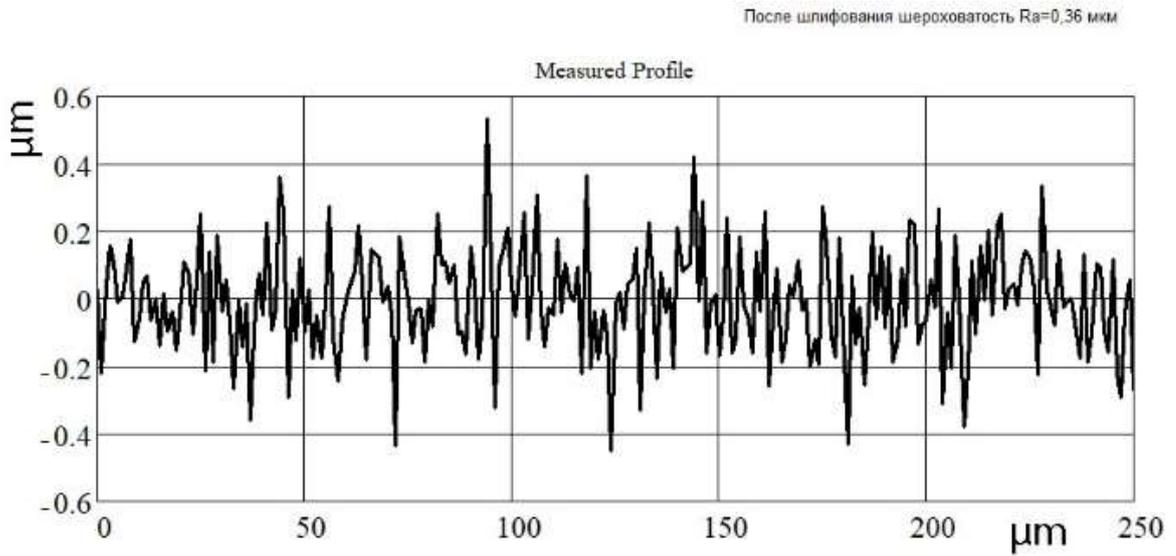


Рисунок 4.35 – Восстанавливаемая поверхность после шлифования

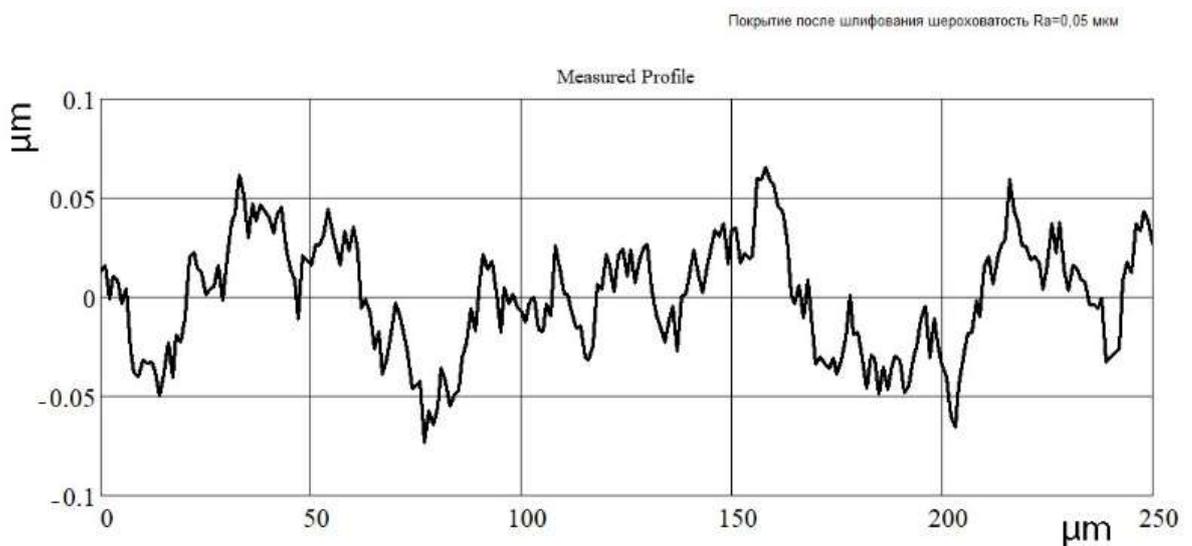


Рисунок 4.36 – Покрытие после шлифования

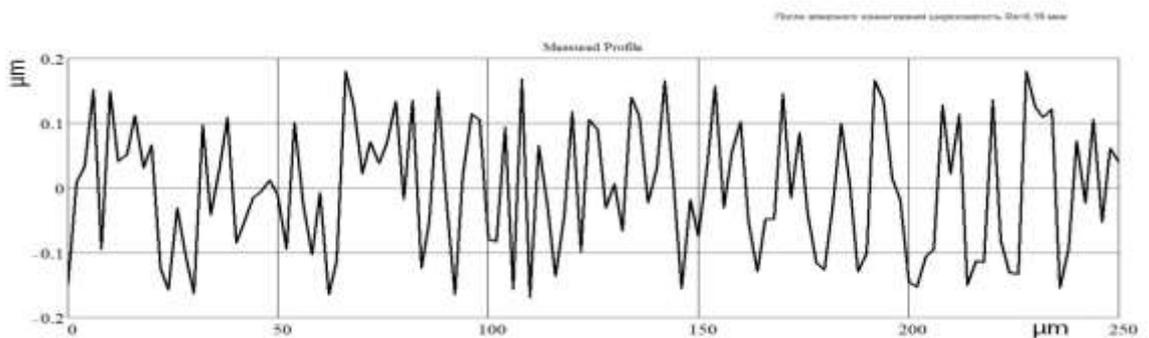


Рисунок 4.37 – Алмазное хонингование рабочей поверхности

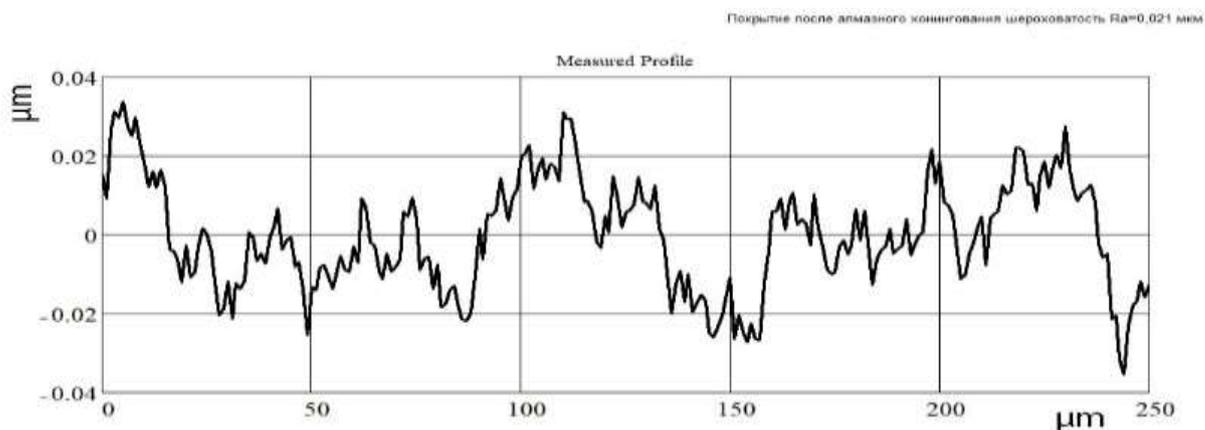


Рисунок 4.38 – Покрытие после алмазного хонингования

Влияние давления инструмента на шероховатость поверхности после нанесения покрытия представлено на рисунке 4.39. Видно, что с увеличением давления на обрабатываемую поверхность шероховатость ее значительно снижается и доходит до $R_a = 0,04$ мкм и менее. Причем, при прочих равных условиях, увеличение плотности тока способствует увеличению шероховатости осаждаемых покрытий. На рисунке представлен интервал погрешности теоретического расчета на уровне значимости $p = 0,05$, т.е. с вероятностью 95% в этом интервале теоретическое уравнение способно адекватно описывать процесс. Анализируя рисунок 4.35, видно, что все экспериментальные точки не выходят за рамки обозначенной погрешности.

Значительное уменьшение шероховатости поверхности при осаждении дисперсно-упрочненных покрытий объясняется деформацией слоев осадка в процессе обработки и сокращением времени активного свободного роста кристаллов, способствуя получению мелкокристаллических материалов, близких к аморфным.

Влияние температуры электролита на микрогеометрию покрытия представлено на рисунке 4.40.

Видно, что с увеличением температуры электролита шероховатость поверхности покрытий значительно снижается и доходит до $R_a = 0,025$ мкм и менее. Причем, при прочих равных условиях, увеличение плотности тока способствует увеличению шероховатости осаждаемых покрытий. На рисунке

представлен интервал погрешности теоретического расчета на уровне значимости $p = 0,05$, т.е. с вероятностью 95% в этом интервале теоретическое уравнение способно адекватно описывать процесс. Анализируя рисунок 4.40, видно, что все экспериментальные точки не выходят за рамки обозначенной погрешности. Уменьшение шероховатости поверхности с увеличением температуры электролита автор видит в деформировании неровностей в растущих слоях композиционного гальванического покрытия и, наряду с этим, при повышении температуры электролита уменьшается зернистость получаемых покрытий. Эти факторы и способствуют значительному снижению шероховатости поверхности получаемых покрытий.

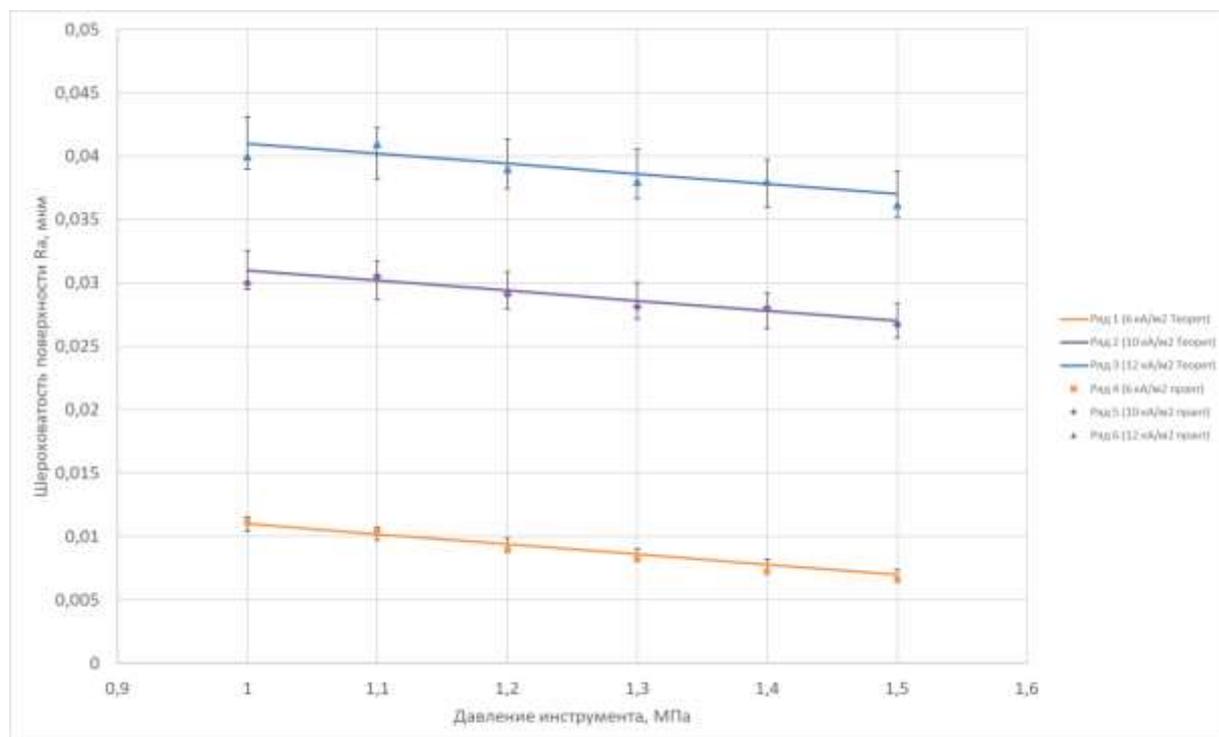


Рисунок 4.39 – Зависимость шероховатости поверхности от давления инструмента

Анализируя зависимости, представленные на рисунках 4.39 и 4.40, видно, что с увеличением плотности тока при прочих равных условиях шероховатость поверхности покрытий увеличивается, но остается значительно ниже, чем исходная на деталях. Следовательно, качественная картина изменения шероховатости поверхности при нанесении ДУГКП на основе хрома, в

зависимости от плотности тока, аналогична изменению шероховатости поверхности покрытий при хромировании в ваннах, отличаясь при этом значительно более низкими количественными значениями.

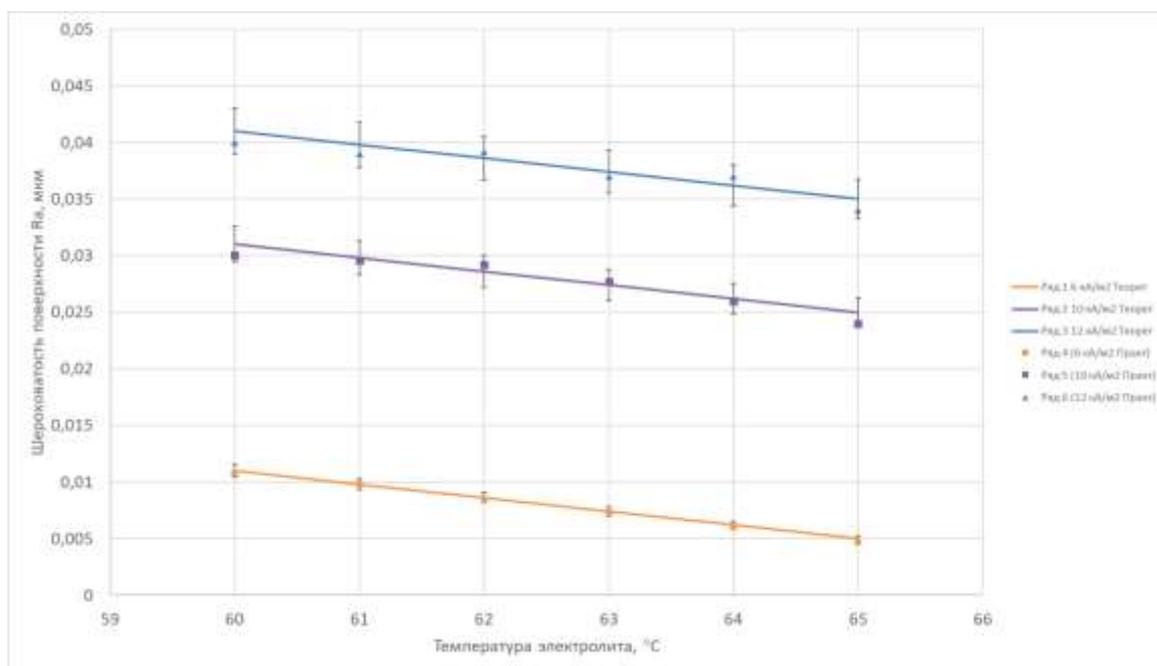


Рисунок 4.40 – Зависимость шероховатости поверхности от температуры электролита

4.5 Экспериментальная проверка качества получаемых покрытий

4.5.1 Выравнивающая способность

Детали гидроаппаратуры являются важным рабочим органом гидромашины. На них приходится вся нагрузка, оказываемая давлением жидкости в рабочих камерах – поршневой и штоковой полостях. Поскольку жидкости могут включать химически-агрессивные вещества или абразивные элементы, то для надежной и длительной эксплуатации необходимо защитить шток от воздействия подобных факторов, а также от возможного негативного воздействия влаги из окружающей среды. С этой целью используют хромирование, то есть нанесение тонкого слоя хрома порядка 15–20 мкм [89], который является барьером для нескольких

разрушительных видов воздействия. С другой стороны, восстановление деталей гидроаппаратуры нанесением гальванических покрытий требует осаждения более толстых слоев хрома, т.к. дефекты на гидроцилиндрах и гидроштоках могут достигать по разным оценкам до 250–300 мкм [166]. Учитывая вышеизложенное, необходимо исследовать выравнивающую способность предлагаемого метода, т.е. определить какую толщину покрытия необходимо наносить на неповрежденный участок детали, чтобы полностью устранить локальный износ на изделии.

Механизм восстановления деталей, имеющих износ или дефекты, заключается в избирательной способности метода ограничивать скорость осаждения покрытия на локальных участках в зависимости от износа последних. При восстановлении гильз гидроцилиндров деталь, имеющая износ, имеет погрешность формы (исходная поверхность, подлежащая восстановлению на рисунке 4.41). Как указывалось ранее, для восстановления погрешности формы применяется базовый слой покрытия, в котором в качестве материала второй фазы наряду с карбидом титана используется корунд. Инструмент при обработке внедряет в покрытие оксид алюминия, являющийся изолятором. В положении вертикальной оси пружина №1, обеспечивающая давление инструмента на деталь, сжата с силой P_1 , а в горизонтальной оси пружина №2 сжата с силой P_2 . Согласно закону Гука сила сжатия пружины определяется как

$$P_i = k \cdot x_i, \quad (4.18)$$

где P_i – сила сжатия пружины на i -ом участке, Н;

k – жесткость пружины, Н/м;

x_i – деформация пружины, м.

Так как пружины №1 и №2 имеют одинаковую жесткость, то силы, возникающие в них, будут определяться степенью деформации самих пружин. Учитывая вышеизложенное, можно утверждать, что на рисунке 4.41 $P_1 > P_2$. На участках, где инструмент развивает большее усилие, внедряется большее количество оксида алюминия в осаждаемое покрытие, тем самым обеспечивая большую его концентрацию, т. е. $C_{1к} > C_{2к}$. Оксид алюминия, являясь хорошим изолятором, закрывает поверхность электролизера экранируя его от катода, что

снижает скорость осаждения покрытия на этом участке, поэтому $V_1 < V_2$. Из-за разности скоростей происходит выравнивание профиля детали.

Для возможности реализации метода на основе экспериментальных данных получена зависимость минимальной толщины наносимого покрытия δ , мкм от устраняемой величины погрешности формы детали Δ , мкм, представленная на рисунке 4.42.

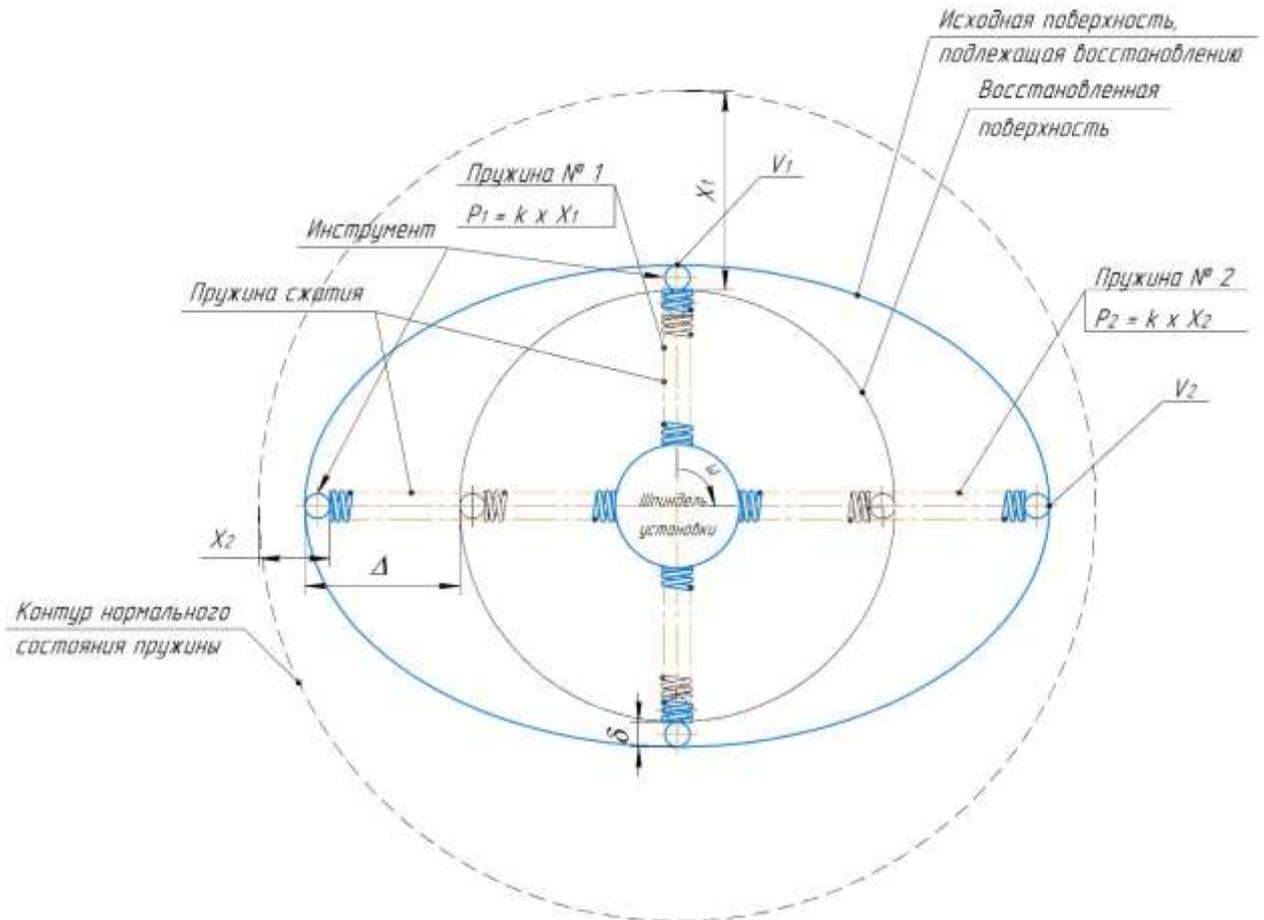


Рисунок 4.41 – Схема восстановления внутренней поверхности

Теперь, зная толщину покрытия, вычисленную по графику на рисунке 4.42 или полученную аналитически по уравнению, представленному на том же рисунке и зная производительность процесса, рассчитанную для базового слоя по выражению (4.11) и для финишного слоя по уравнению (4.14), легко получить время, необходимое для нанесения покрытий требуемой толщины, с целью восстановления геометрии детали до заданной чертежом.

4.5.2 Исследование состава покрытий

Для выявления качественного и количественного состава наносимого покрытия использовался атомно-эмиссионный спектрометр «Искролайн-300». Исследования, проводимые по методике, изложенной в главе 3 позволили получить спектрограммы исследуемых покрытий, представленные на рисунках 4.43–4.46.

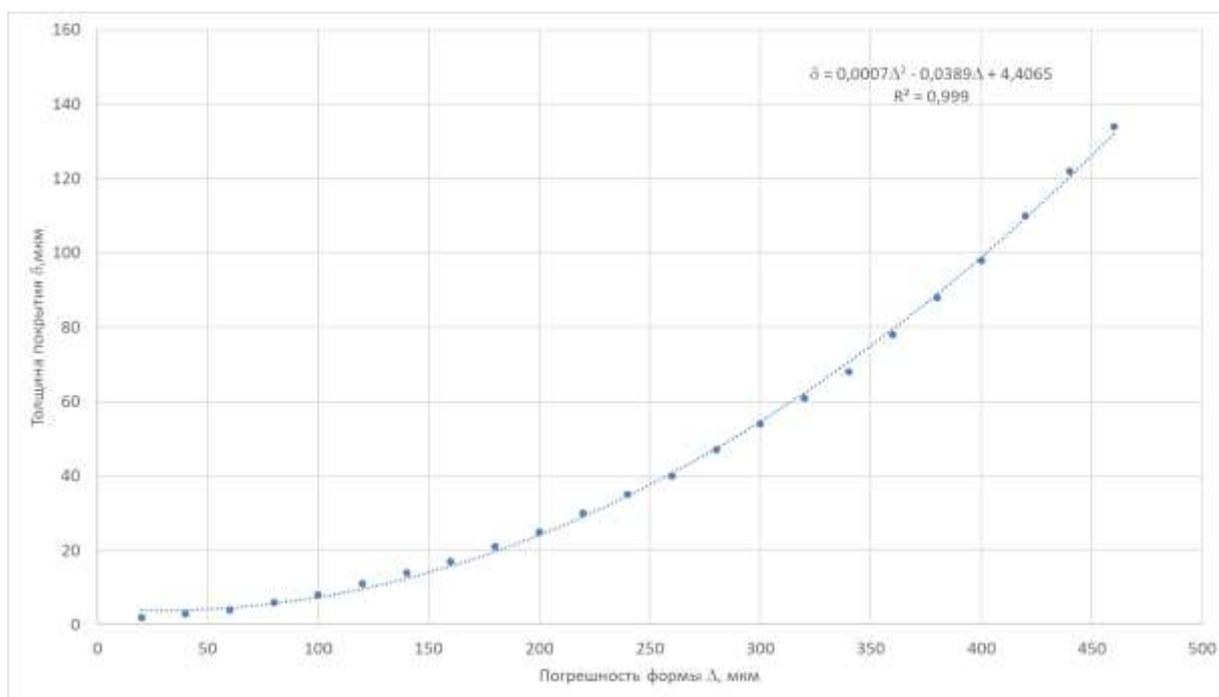


Рисунок 4.42 – Зависимость минимальной толщины наносимого покрытия от устраняемой величины погрешности формы детали

Анализ полученных спектрограмм позволяет сделать вывод о том, что в композиционных покрытиях базового слоя из электролита-суспензии и дисперсно-упрочненных композиционных покрытиях на основе хрома присутствуют вводимые элементы второй фазы, а именно алюминий и титан. В финишном дисперсно-упрочненном композиционном покрытии на основе хрома присутствуют такие элементы как молибден и сера, отсутствующие в стандартном гальваническом хромовом покрытии и в базовом слое ДУГКП на основе хрома. Однако, наличие в спектре характерных линий искомых элементов указывает лишь на присутствие данных элементов в анализируемом материале. Сравнение

относительной интенсивности спектральных линий искомым элементам с линиями основы дает возможность количественной оценки содержания элементов в анализируемой пробе.

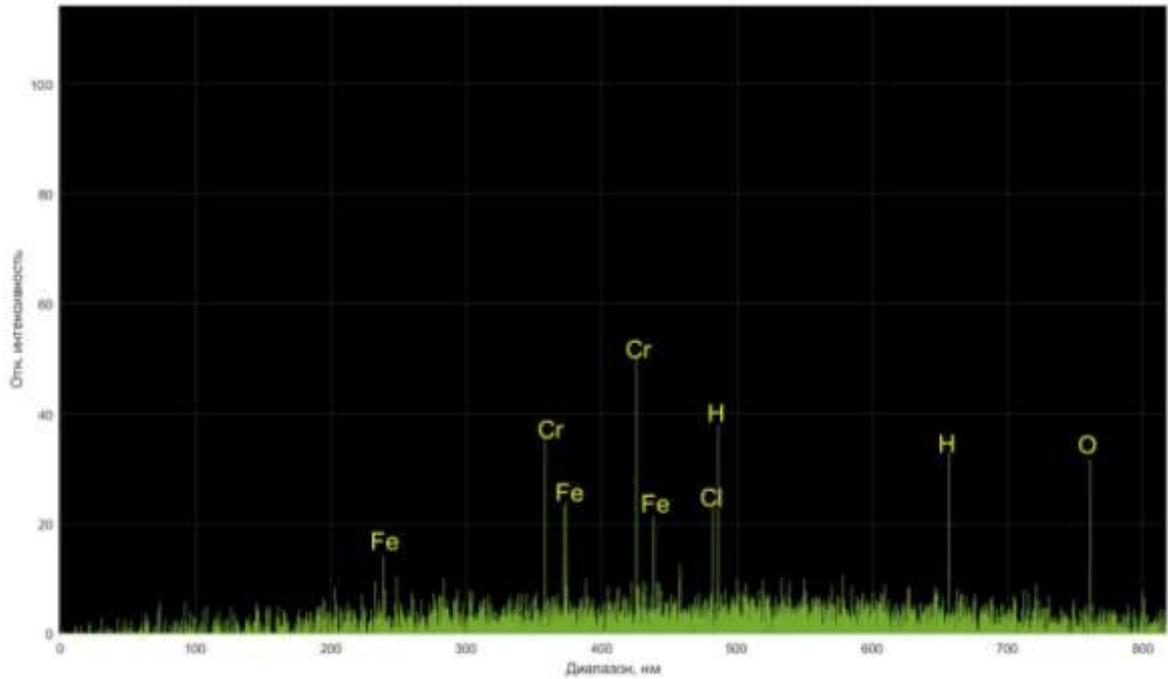


Рисунок 4.43 – Стандартное хромовое покрытие

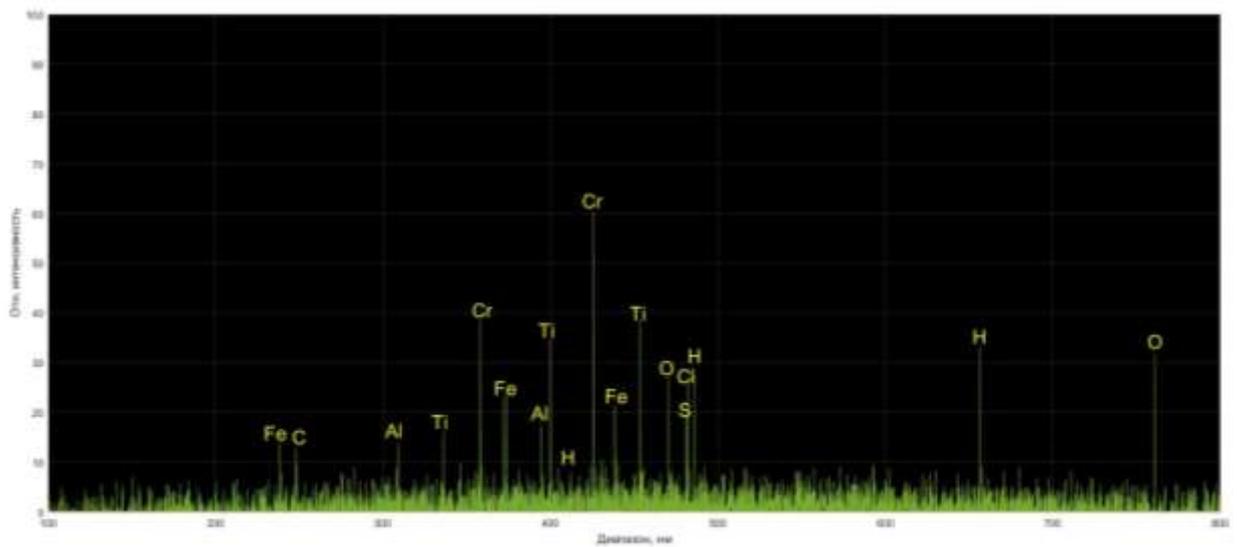


Рисунок 4.44 – Композиционное покрытие на основе хрома с оксидом алюминия из электролита-суспензии

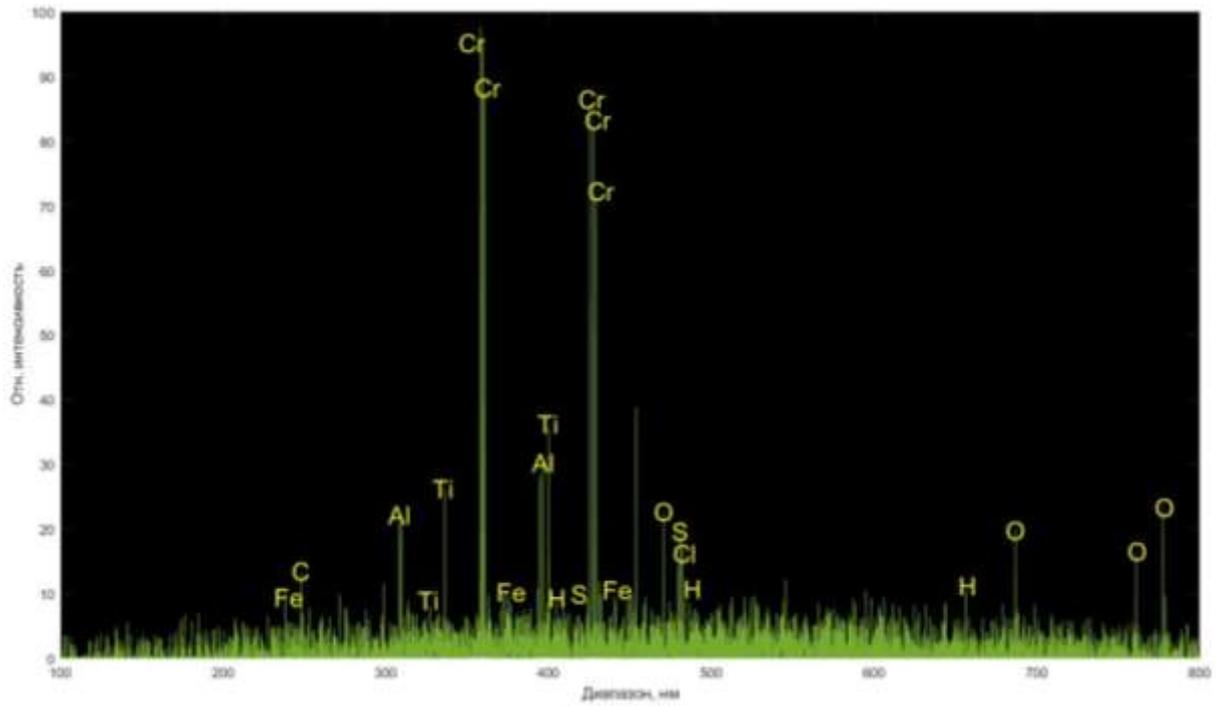


Рисунок 4.45 – Дисперсно-упрочненное композиционное покрытие на основе хрома (базовый слой)

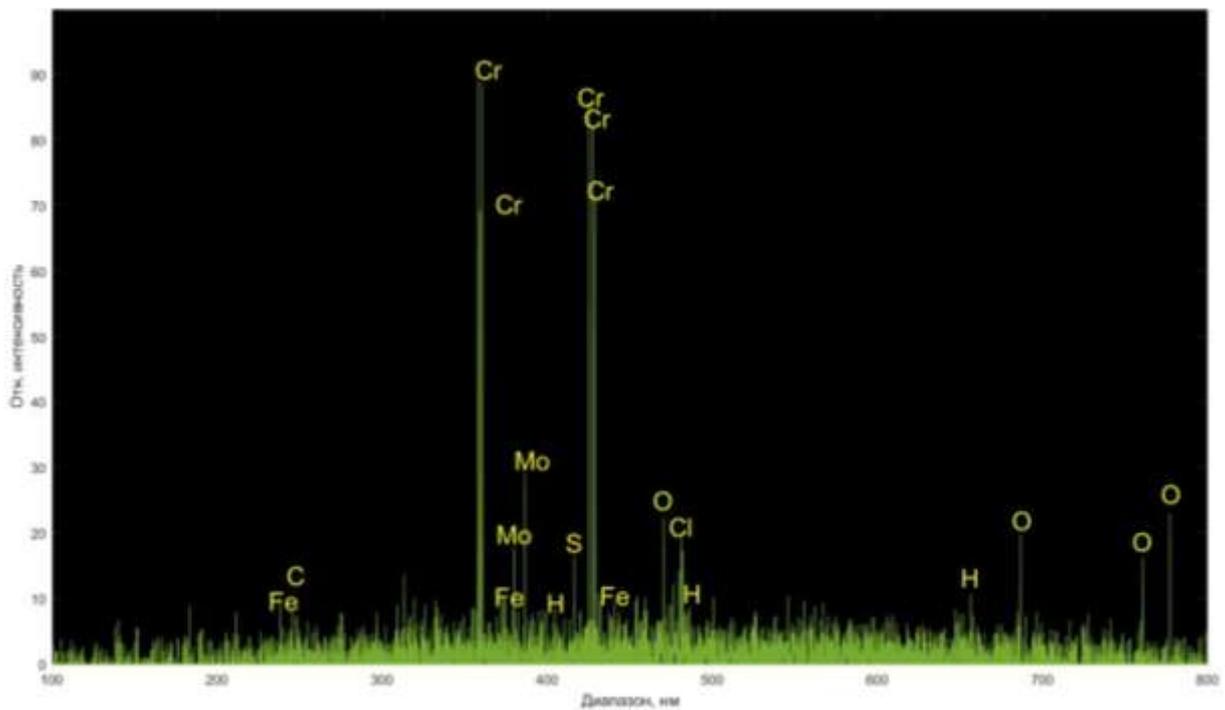


Рисунок 4.46 – Дисперсно-упрочненное композиционное покрытие на основе хрома (финишный слой)

Результаты количественного анализа представлены в таблице 4.9.

Анализируя количественный состав компонентов гальванического покрытия видно, что в композиционных покрытиях в зависимости от их функционального назначения присутствуют элементы, отсутствовавшие в стандартном гальваническом хромовом покрытии. Причем во всех типах дисперсно-упрочненных композиционных покрытий наводороживание значительно ниже, чем в покрытиях, полученных стандартным методом или из электролитов суспензий. Фактическое содержание в дисперсно-упрочненных композиционных покрытиях оксида алюминия, карбида титана и дисульфида молибдена соответствует их теоретическим значениям, рассчитанным в п. 4.1, что подтверждает правильность теоретических положений о регулируемом массопереносе вещества второй фазы при получении композиционных гальванических покрытий.

4.5.3 Исследование адгезии покрытий

Работоспособность узлов с гальваническими покрытиями в значительной мере зависит от адгезионных свойств покрытий, т.к. отмечены частые случаи скалывания хромовых покрытий в процессе эксплуатации, что приводит к выходу из строя узла в целом [17, 123, 145].

С целью изучения влияния режимных параметров осаждения покрытия на его адгезию исследовались образцы, с дисперсно-упрочненным композиционным покрытием на основе хрома для базового и финишного слоев покрытия. Причем толщина базового слоя составляла 200 – 400 мкм, а финишного слоя 40 – 200 мкм.

Корреляционный анализ, результаты которого представлены в приложении Б5, показали, что влияющими факторами на адгезию покрытия следует считать плотность тока, температуру электролита и давление инструмента.

Для изучения влияния электролиза на сцепляемость получаемых покрытий применялось математическое планирование эксперимента [1]. Был реализован полный факторный эксперимент 2^3 . Характеристики плана эксперимента

выбирались из условия получения беспористых хромовых покрытий со сжимающими остаточными напряжениями и минимальным наводораживанием стальной основы. В результате области варьирования независимых переменных были выбраны следующие:

| | |
|---|-----------|
| Плотность тока, (x_1) , i кА/м ² | 10 – 12 |
| Температура электролита (x_2) t , °С | 60 – 65 |
| Давление инструмента (x_3) p , МПа | 1,0 – 1,5 |

Таблица 4.9 – Количественный состав покрытий

| Элемент в покрытии | Содержание элемента в покрытии, % | | | |
|--------------------|-----------------------------------|--|--|---|
| | Стандартный хром | Композиционный хром из электролита-сuspензии | Дисперсно-упрочненное композиционное покрытие на основе хрома (базовый слой) | Дисперсно-упрочненное композиционное покрытие на основе хрома (финишный слой) |
| Cl | 1,08 | 1,11 | 1,34 | 1,37 |
| H | 1,34 | 1,17 | 0,11 | 0,1 |
| O | 0,42 | 1,07 | 0,44 | 0,48 |
| Mo | - | - | - | 2,36 |
| Ti | - | 0,05 | 2,69 | - |
| C | 2,14 | 0,56 | 2,27 | 0,61 |
| Cr | 90,63 | 89,43 | 86,92 | 91,87 |
| Fe | 2,89 | 2,14 | 1,08 | 1,02 |
| Al | - | 2,85 | 4,57 | - |
| S | - | - | - | 0,14 |

Частота вращения образцов поддерживалась на постоянном уровне и составляла 80 об/мин. В качестве зависимой переменной была взята сцепляемость покрытий ξ , %.

Результаты экспериментов представлены в таблице 4.9. Реализация экспериментов осуществлялась по таблице случайных чисел. Для оценки

дисперсии воспроизводимости дополнительно в центре плана ставилось еще четыре параллельных эксперимента.

Дальнейшим этапом явилось проведение регрессионного анализа. Проверка адекватности выбранной модели производилась по критерию Фишера [76]. Модель считалась адекватной, если $F_p < F_{кр}$. Для полученной модели данное условие выполняется, следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает влияние основных факторов процесса на адгезию получаемых покрытий с основой.

В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение в кодированных единицах, описывающее зависимость адгезии базового слоя ДУГКП на основе хрома от исследуемых факторов:

$$\begin{aligned} \xi_6 = & 92,14 - 2,42x_1 + 2,78x_2 - 1,15x_3 - 1,04x_1x_2 - \\ & - 0,54x_1x_3 - 0,41x_2x_3 + 0,11x_1x_2x_3. \end{aligned} \quad (4.19)$$

Анализ позволил выявить, что зависимость адгезии от исследуемых факторов сильная - множественный коэффициент корреляции достигает значения 0,998.

Анализируя корреляционную матрицу, видим, что наибольшее значение на сцепляемость покрытий оказывает температура электролита (коэффициент корреляции 0,686). Менее значительно влияют на адгезию покрытия плотность тока и давление инструмента (коэффициенты корреляции соответственно -0,595 и - 0,284). Далее в порядке убывания степени влияния на сцепляемость покрытий факторы расположились следующим образом: взаимное влияние плотности тока и температуры электролита (коэффициент корреляции - 0,254), взаимное влияние плотности тока и давления инструмента (коэффициент корреляции - 0,133), взаимное влияние температуры электролита и давления инструмента (коэффициент корреляции - 0,102) и сочетание всех трех факторов (коэффициент корреляции 0,027).

После проверки значимости коэффициентов регрессии по критерию

Стьюдента [25], выяснилось, что все коэффициенты регрессии оказались значимыми, т.к. вычисленные значения критерия Стьюдента оказались больше табличного $t_m = 2,77$ [27].

Перейдем от кодированных к натуральным значениям в регрессионном уравнении, описывающее влияние условий осаждения базового слоя на адгезию в получаемых гальванических композиционных покрытиях на основе хрома, будет иметь вид:

$$\xi_6 = -463,19 + 40,03x_1 + 8,928x_2 + 181,16x_3 - 0,636x_1x_2 - 13,16x_1x_3 - 2,592x_2x_3 + 0,176x_1x_2x_3. \quad (4.20)$$

Как указано в [1] интерпретацию модели можно производить только тогда, когда она записана в кодированных переменных. Только в этом случае на коэффициенты не влияет масштаб факторов, и можно по величине коэффициентов судить о степени влияния того или иного фактора. На основании этого положения и полученного регрессионного уравнения в кодированных значениях (4.19), описывающего зависимость адгезии базового слоя ДУГКП на основе хрома от исследуемых факторов, можно сделать вывод, что с увеличением плотности тока и давления инструмента на поверхность, подвергаемую осаждению, адгезионные свойства покрытий уменьшаются, что хорошо согласуется с характером влияния параметров осаждения на сцепляемость при хромировании [88, 94, 139]. Увеличение температуры электролита, напротив, увеличивает адгезию покрытия к подложке. Описанный характер влияния параметров электролиза на адгезию хорошо согласуется с данными работ, посвященных стандартным методам нанесения гальванических покрытий [92, 94, 139] одновременно отличаясь более высокими значениями по абсолютной величине в сравнении со значениями сцепляемости, полученными в универсальном стандартном электролите [125].

Как указывалось ранее, наиболее рациональной плотностью тока для получения качественных герметичных гальванических композиционных покрытий на основе хрома, является значение 10–12 кА/м², так как позволяет осаждать покрытия с достаточной скоростью без ухудшения качества последних.

Визуализация регрессионного уравнения (4.19) представлена на рисунке 4.47 в качестве контура желательности.

На рисунке 4.48 представлена трехмерная графическая зависимость адгезии покрытия к основе от влияния температуры рабочей среды и давления инструмента на поверхность детали, подвергаемую нанесению композиционного покрытия при плотности тока 10 кА/м^2 .

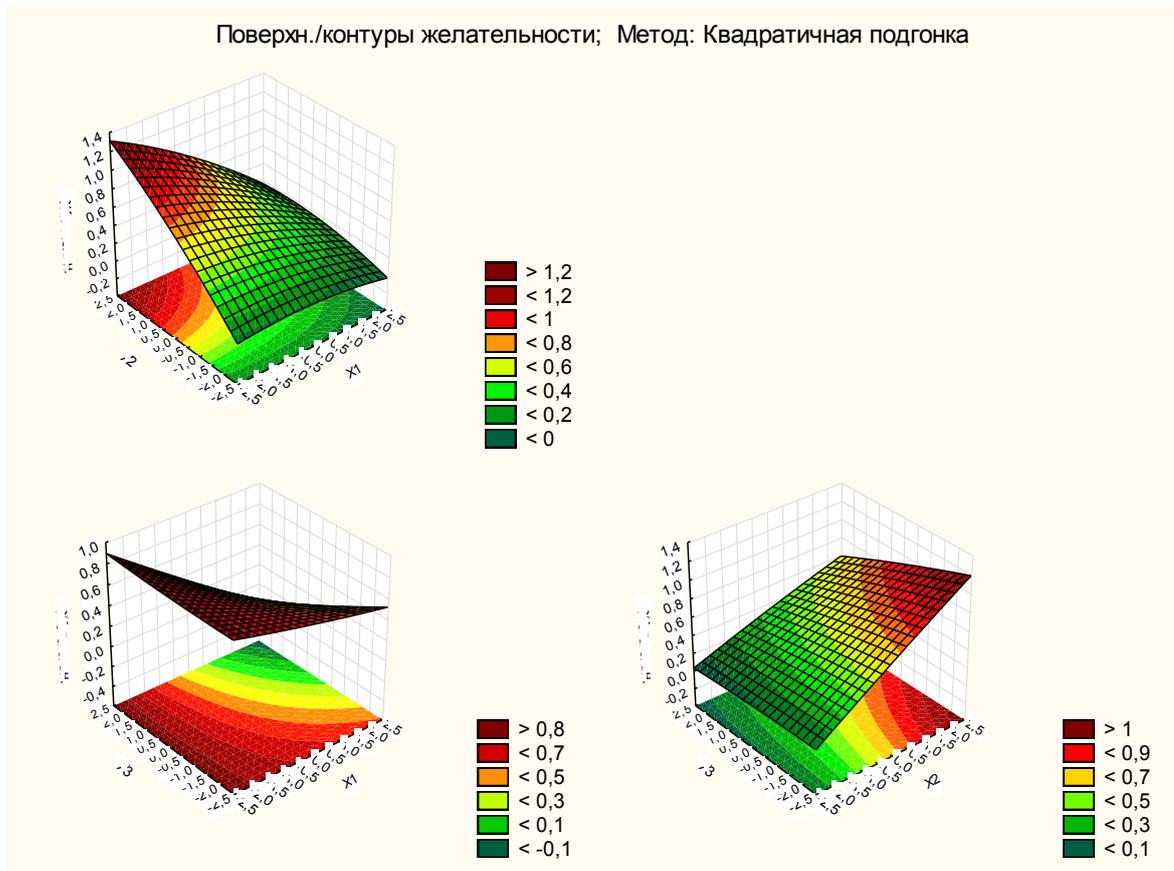


Рисунок 4.47 – График функции желательности для адгезии наносимого покрытия

Она позволяет, не прибегая к математическим вычислениям, качественно оценить степень влияния режимных параметров осаждения покрытия на адгезию последнего.

Однако, для количественных технологических расчетов получаемой шероховатости трехмерное графическое изображение использовать затруднительно. В связи с этим была построена номограмма выбора технологических параметров для получения покрытий с заданной адгезией поверхности (МПа), которая представлена на рисунке 4.49.

Исследования влияния режимных параметров осаждения на адгезию финишного слоя ДУГКП на основе хрома дало качественное и количественное совпадение с аналогичным показателем для базового слоя, из чего можно сделать вывод, что определяющим фактором, влияющим на адгезию покрытия к основе, являются режимы его нанесения.

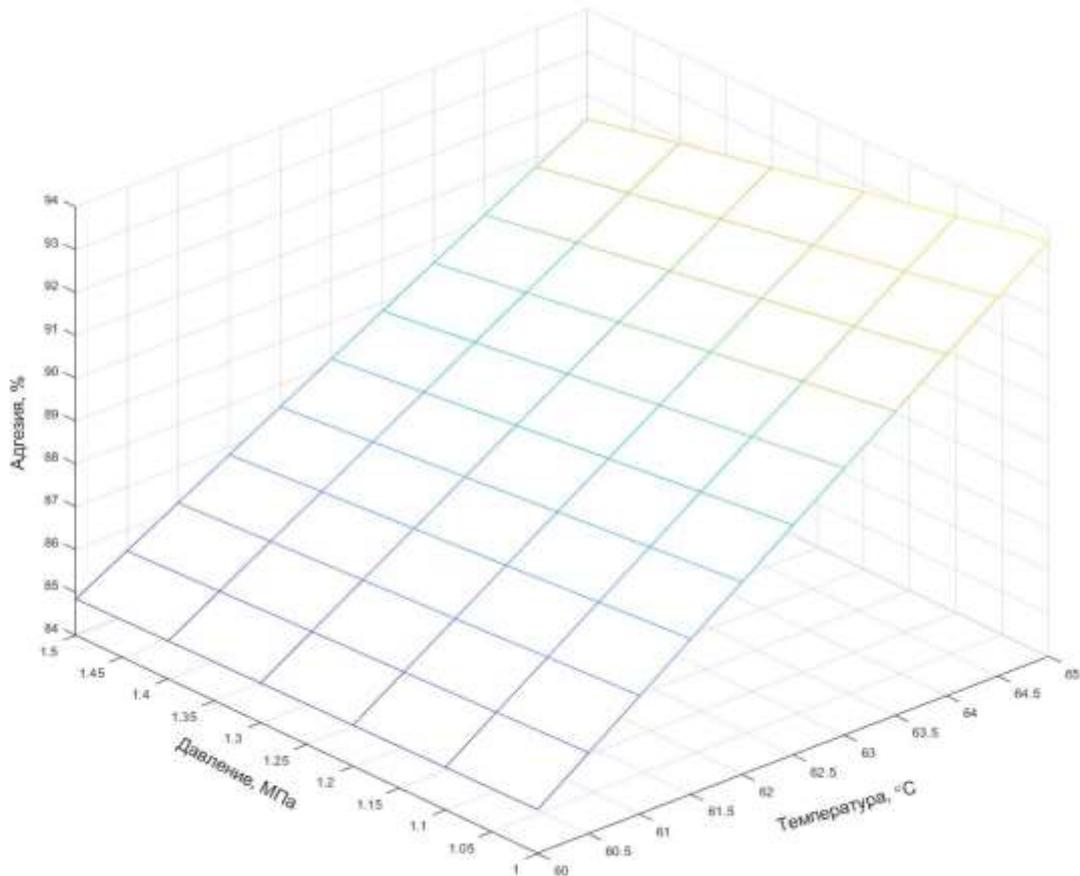


Рисунок 4.48 – Графическая интерпретация аналитической зависимости (4.20) адгезии покрытия от режимных параметров осаждения при $i = 10 \text{ кА/м}^2$, $V_{\text{гд}} = 80 \text{ мин}^{-1}$

Экспериментальная проверка адгезионных свойств покрытий показала результаты, представленные на рисунке 4.50.

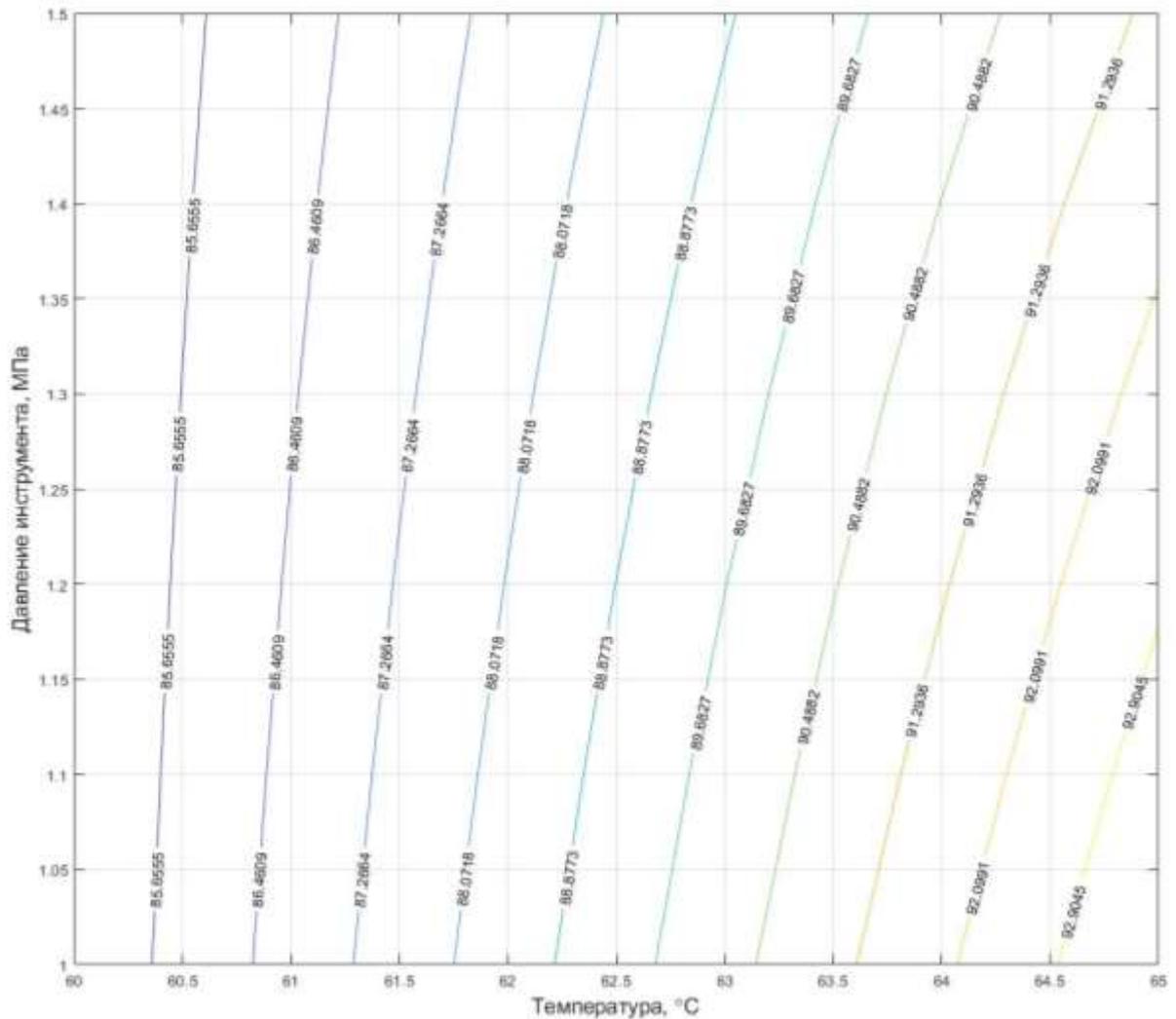


Рисунок 4.49 – Графическая зависимость для выбора режимных параметров осаждения с целью определения адгезии покрытия
при $i = 10 \text{ кА/м}^2$, $V_{\text{гд}} = 80 \text{ мин}^{-1}$

Исходя из полученных данных по адгезии стандартного хромового покрытия и ДУГКП на основе хрома, были построены аппроксимационные линии, позволяющие получить аналитические зависимости влияния толщины покрытия на его адгезию. Видно, что при все толщинах слоев адгезия при нанесении ДУГКП на основе хрома остается выше, чем при нанесении стандартного хрома. Анализируя коэффициенты при линейных аппроксимационных уравнениях видно, что скорость уменьшения адгезии покрытия при увеличении его толщины при нанесении стандартного хромового покрытия в 5,7 раза выше, чем при нанесении ДУГКП на основе хрома. Данные

исследования позволяют делать вывод о возможности применения метода нанесения ДУГКП на основе хрома не только при изготовлении новых деталей, но и при восстановлении уже отслуживших свой срок агрегатов, т.к. в этом случае с целью компенсации размерного износа применяются гальванические покрытия повышенной толщины.

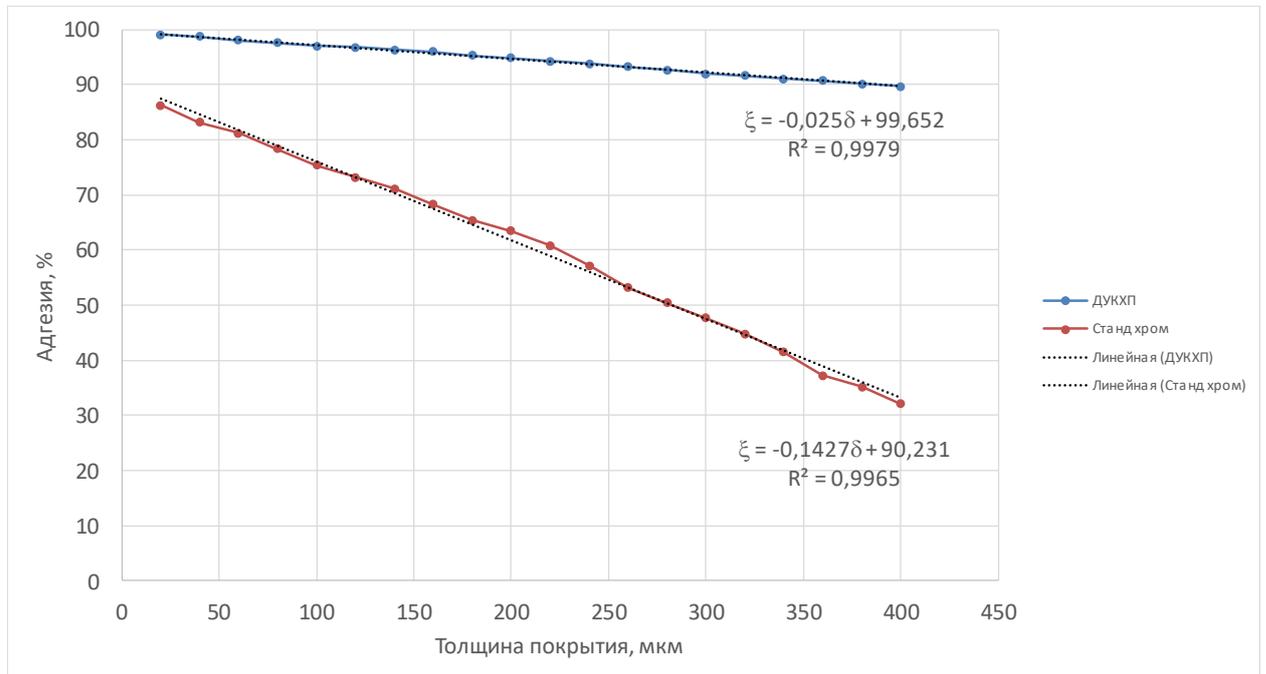


Рисунок 4.50 – Экспериментальная проверка качества адгезии композиционных покрытий

4.5.4 Наводораживание основы

Из литературных данных ясно [34, 40, 79], что снижение физико-механических свойств деталей из высокопрочных сталей, прошедших ремонтно-восстановительное хромирование или основное нанесение покрытия, многими авторами объясняется склонностью этих сталей к наводораживанию в процессе электролиза. Там же указывается, что основным фактором, влияющим на наводораживание сталей при нанесении хромовых покрытий толщиной свыше 100 мкм, в частности, при ремонтном восстановлении хромированием, является температура электролита хромирования. В то же время в [79, 169]

подчеркивается, что на современном этапе отсутствуют электролиты хромирования, обеспечивающие малое наводороживание стальной основы и, борьба с наводороживанием в процессе нанесения гальванических покрытий на основе хрома ведется путем изменения режимов осаждения покрытий.

В связи с тем, что технология нанесения ДУГКП на основе хрома разрабатывается как для использования при изготовлении новых деталей, так и для ремонтного производства, то экспериментальные исследования проводились на образцах с толщиной хромового покрытия от 20 до 300 мкм, т.к. в литературе [34, 44, 79, 169] указывается на прямую зависимость наводороживания основы от толщины наносимого хромового покрытия.

На основе анализа корреляционной матрицы, представленной в приложении Б6 можно сделать вывод о необходимости включения в анализ следующих факторов: плотности тока, температуры электролита давления инструмента и толщины покрытия. Для исследования влияния параметров процесса нанесения гальванических композиционных покрытий на основе хрома на скорость осаждения базового слоя покрытия был реализован полный факторный эксперимент 2^4 . Характеристики плана эксперимента выбирались из условий получения покрытий со сжимающими остаточными напряжениями. Все режимные параметры изменяли исходя из технологических рекомендаций по получению герметичных хромовых покрытий с максимальной производительностью процесса, которые и были выбраны в качестве независимых переменных: плотность тока (x_1) – от 10 до 12 кА/м², температуру электролита (x_2) изменяли от 60 до 65 °С, давление инструмента (x_3) – от 1,0 до 1,5 МПа, толщину покрытия (x_4) – от 20 до 300 мкм. Остальные факторы поддерживались на постоянном уровне, соответствующем рациональным режимам осаждения, определенным в п. 4.2 настоящей работы. Основные характеристики плана эксперимента представлены в приложении Б6.

Дальнейшим этапом явилось проведение регрессионного анализа. В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение в кодированных

значениях, описывающее зависимость наводороживания стальной основы (H_z , мл/100 г) от исследуемых факторов:

$$\begin{aligned}
 H_z = & 2,515 + 0,413 \cdot x_1 - 0,269 \cdot x_2 - 0,677 \cdot x_3 + 0,173 \cdot x_4 - \\
 & - 0,119 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,119 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,089 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,115 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,135 \cdot x_2 \cdot x_4 - \\
 & - 0,11 \cdot x_3 \cdot x_4 - 0,102 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,106 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,123 \cdot x_1 \cdot x_3 \cdot x_4 - \\
 & - 0,085 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0,115 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4.
 \end{aligned}
 \tag{4.21}$$

Визуализация регрессионного уравнения (4.21) представлена на рисунке 4.51 в качестве контура желательности.

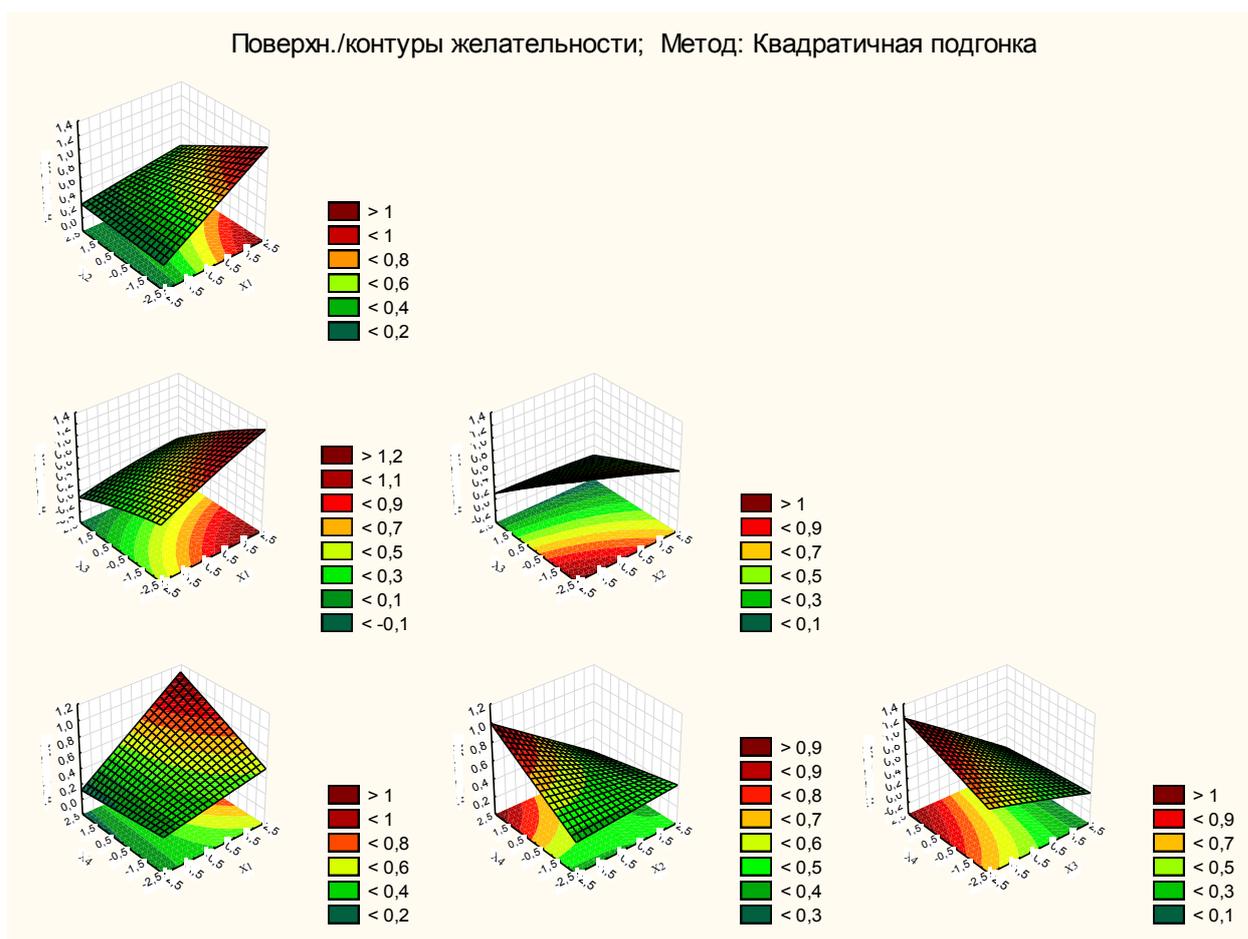


Рисунок 4.51 – График регрессионной зависимости наводороживания композиционного покрытия от параметров осаждения

Проверка адекватности выбранной модели производилась по критерию Фишера [27]. Модель считалась адекватной, если $F_p < F_{кр}$. Для полученной модели данное условие выполняется, следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает влияние основных факторов процесса на наводороживание

основы при нанесении покрытия.

Анализируя корреляционную матрицу, видим, что наибольшее влияние на наводороживание оказывает давление инструмента (коэффициент корреляции - 0,699). Менее значительно влияют плотность тока, температура электролита и толщина покрытия (коэффициенты корреляции соответственно 0,497, -0,277 и 0,179).

Далее в порядке убывания степени влияния на наводороживание основы факторы расположились следующим образом: взаимное влияние температуры электролита и толщины покрытия (коэффициент корреляции - 0,139), взаимное влияние плотности тока, давления инструмента и толщины покрытия (коэффициент корреляции 0,127), взаимное влияние плотности тока и температуры электролита, а также взаимное влияние плотности тока и давления инструмента (коэффициент корреляции -0,123), взаимное влияние плотности тока и толщины покрытия, а также сочетание всех четырех факторов (коэффициент корреляции 0,118), взаимное влияние давления инструмента и толщины покрытия (коэффициент корреляции -0,114), взаимное влияние плотности тока, температуры электролита и толщины покрытия (коэффициент корреляции 0,109), взаимное влияние плотности тока, температуры электролита и давления инструмента (коэффициент корреляции -0,105), взаимное влияние температуры электролита и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,092), взаимное влияние температуры электролита, давления инструмента и толщины покрытия (коэффициент корреляции -0,088).

Анализ позволил выявить, что зависимость наводороживания основы от исследуемых факторов сильная - множественный коэффициент корреляции достигает значения 0,99. Проверка значимости коэффициентов регрессионного уравнения выявила, что все коэффициенты являются значимыми, т.к. для них вычисленные значения критерия Стьюдента оказались больше табличного t_m .

Раскодированное регрессионное уравнение, описывающее влияние условий осаждения покрытия на наводороживание основы в получаемых ДУГКП на основе хрома, будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 H_z = & 268,76 - 21,596x_1 - 4,497x_2 - 266,169x_3 - 0,929x_4 + 0,371x_1x_2 + 22,305x_1x_3 + \\
 & + 0,08x_1x_4 + 4,406x_2x_3 + 0,016x_2x_4 + 0,922x_3x_4 - 0,373x_1x_2x_3 - 0,001x_1x_2x_4 - \\
 & - 0,079x_1x_3x_4 - 0,015x_2x_3x_4 + 0,001x_1x_2x_3x_4.
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

Анализ влияния исследуемых факторов на наводороживание основы при нанесении дисперсно-упрочненных гальванических покрытий на основе хрома, показывает, что увеличение плотности тока приводит к увеличению наводороживания основы и объясняется, видимо, характером зависимости наводороживания от плотности тока, когда при увеличении плотности тока растет количество водорода, выделяющегося при электролизе. С увеличением температуры электролита наводороживание основы уменьшается, что согласуется с характером влияния температуры электролита на наводороживание как при обычном хромировании, так и при гальвано механическом хромировании и объясняется, видимо увеличением пластичности хрома с повышением температуры электролита и, следовательно, более легким выходом водорода с поверхности. Увеличение давления инструмента приводит к уменьшению наводороживания основы, что объясняется, видимо, удалением пузырьков водорода с хромируемой поверхности в результате воздействия инструмента. С ростом продолжительности хромирования (увеличение толщины покрытия) наводороживание основы также увеличивается что объясняется более продолжительным временем процесса электролиза.

Экспериментальная проверка наводороживания покрытия при нанесении ДУГКП на основе хрома представлена на рисунке 4.52.

Из графиков, представленных на рисунке 4.52 можно сделать вывод о том, что наводороживание осадка при нанесении дисперсно-упрочненных композиционных хромовых покрытий меньше аналогичного показателя для ГМХ в 1,19 раза, а стандартного хромирования в 1,76 раза. Автор видит объяснение этому явлению в том, что при нанесении ДУГКП из-за более высокой скорости осаждения покрытий детали находятся меньшее время в процессе электролиза.

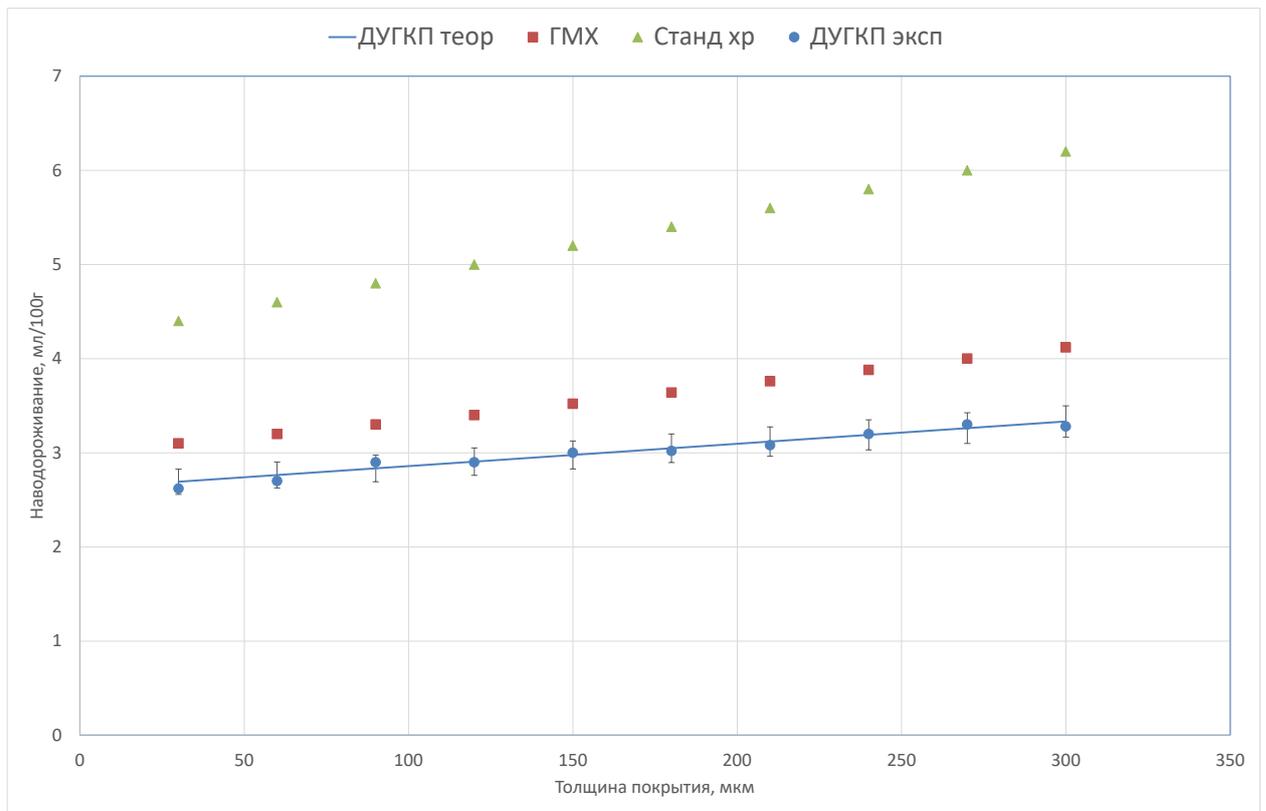


Рисунок 4.52 – Наводороживание покрытия при различных способах осаждения

Особо следует отметить тот факт, что при исследовании было установлено неравномерное распределение водорода по сечению хромированной поверхности (рисунок 4.53).

Как видно из рисунка, содержание водорода начинает резко расти при переходе границы «основа-покрытие». Это связано со особенностью структур материалов: рыхлый хром гораздо активнее поглощает водород, нежели плотная подложка. Однако, как показала практика, покрытия, полученные с одновременной обработкой поверхности осаждения инструментом, имеют более низкое содержание водорода в покрытии. Введение в покрытие мелкодисперсных частиц вызывает уменьшение степени наводороживания осадка ДУГКП в 2,35–3,46 раза по сравнению с покрытиями, полученными методом ГМХ и в 3,82–4,61 раза по сравнению со стандартными покрытиями. Это полностью согласуется с выводами, изложенными в [89].

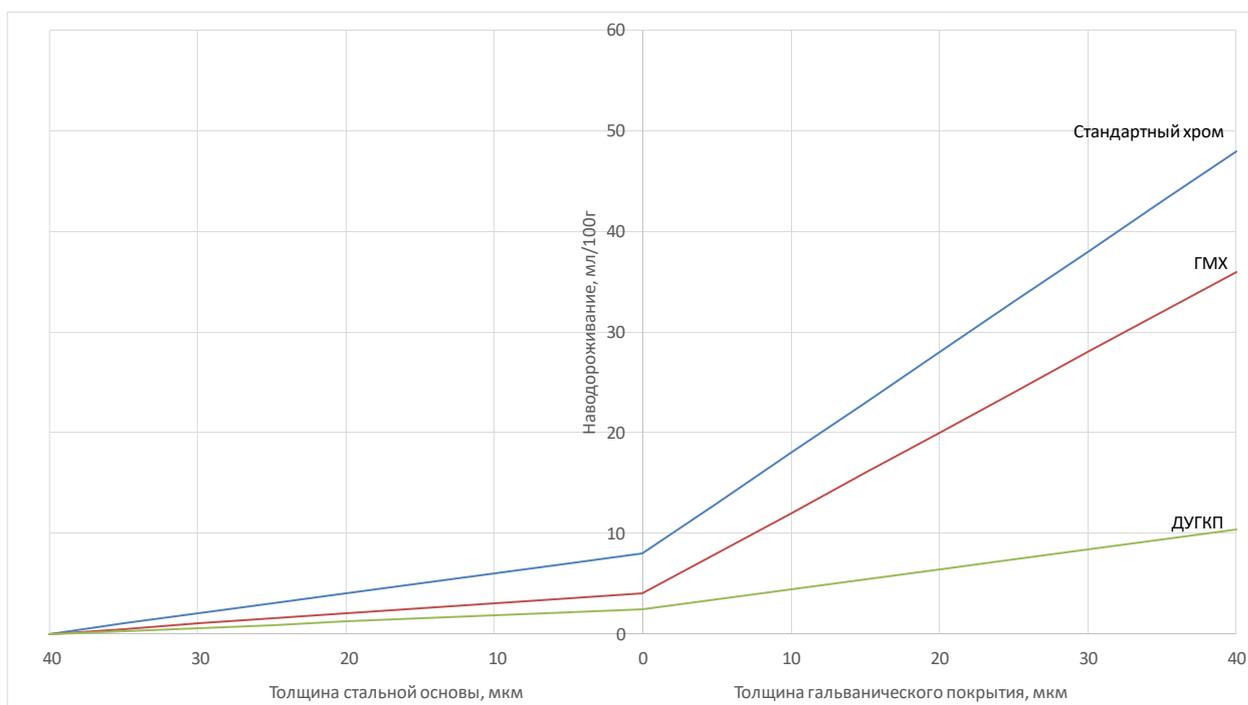


Рисунок 4.53 – График зависимости наводороживания основы и покрытия в зависимости от его толщины

4.5.5 Определение коррозионной стойкости

Хорошо известная устойчивость хрома против атмосферного влияния основана на образовании невидимой, благодаря своей прозрачности тончайшей пленки, окиси хрома. Окисная пленка защищает также хром от различных химических воздействий [88]. Вследствие этого, несмотря на то, что хром в ряду нормальных потенциалов занимает место достаточно отрицательного металла, он имеет довольно хорошую коррозионную устойчивость. Но такая пленка является крайне неустойчивой к механическим воздействиям.

Литературные данные свидетельствуют о том, что основной причиной коррозии металлов под гальваническими покрытиями является наличие глубоких пор в осадке, достигающих до основного металла [18, 40]. В связи с этим исследования проводились на образцах с покрытиями, нанесенными по разным технологиям. Результаты экспериментов представлены в таблице 4.10.

Серия 1 – образцы с покрытием, нанесенным по стандартной технологии.

Серия 2 – образцы с композиционным гальваническим покрытием на основе хрома, полученные на режимах [89]. Серия 3 – образцы, с ДУГКП на основе хрома. Толщина покрытий во всех сериях составляла 80 мкм.

Характеристика коррозионных испытаний представлена в таблице 4.11.

Таблица 4.10 – Сравнительные качественные испытания коррозионной стойкости

| № серии | Наличие пор в покрытии | Результат испытаний |
|---------|------------------------|---|
| Серия 1 | есть | Следы коррозии на основном металле проявились через 16 дней после начала испытаний. |
| Серия 2 | есть | Следы коррозии на основном металле проявились через 28 дней после начала испытаний. |
| Серия 3 | нет | Коррозия не обнаружена через 90 дней испытаний |

Таблица 4.11 – Сравнительные количественные испытания коррозионной стойкости

| № серии | Воздействующая среда | Время проведения испытаний | Потери в массе, г |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------|
| Образцы без покрытия (сталь 40X) | NaCl (3 % раствор) | 35 дней | 0,85 |
| Серия 1 | NaCl (3 % раствор) | 35 дней | 0,23 |
| Серия 2 | NaCl (3 % раствор) | 35 дней | 0,12 |
| Серия 3 | NaCl (3 % раствор) | 35 дней | – |

Анализируя таблицу, можно утверждать, что коррозионная стойкость ДУГКП на основе хрома превосходит аналогичный показатель композиционных покрытий, полученных из электролитов-суспензий в 6 раз, а стандартного хромового покрытия в 12 раз. К вышеизложенному необходимо добавить, что

нанесение ДУГКП на основе хрома позволит повысить коррозионную стойкость легированной стали 40Х в 42,5 раза, т.е. фактически устранить выход из строя узлов с покрытием по причине коррозии.

Подводя итоги проведенных экспериментов, которые полностью подтверждают теорию о первостепенности влияния пористости покрытия на его коррозионную стойкость, описанную в работах [18, 40, 166], можно утверждать, что метод нанесения ДУГКП на основе хрома не уступает новейшим достижениям технологии в этой области.

4.5.6 Герметичность покрытий

Одним из важнейших требований, предъявляемых к хромовым покрытиям силовых узлов гидроагрегатов, является обеспечение их подвижных механизмов герметичным покрытием, т.е. способностью поверхностного слоя иметь необходимую износостойкость и противостоять утечкам рабочих жидкостей и газов по слою покрытия после того, как детали подверглись гальваническому нанесению хрома. Внутренние напряжения, возникающие в процессе электроосаждения хрома, увеличивают пористость осадка, ослабляют адгезию хрома с основным металлом, вызывают снижение прочности самого осадка и деталей, подвергнутых гальваническому хромированию. Образование внутренних напряжений, как указывалось ранее, обусловлено целым рядом причин: структурными превращениями в кристаллах хрома в процессе электролиза, образованием химических соединений и т. д. [147, 166]. Реализация внутренних напряжений вызывает трещинообразование [166].

Механическая активация поверхности катода в процессе электроосаждения вызывает пластическую деформацию растущих слоев осадка, а массовый перенос вещества инструмента - возникновение большого числа активных центров электрокристаллизации. Следует учесть также, что перемещение брусков по поверхности катода способствует прекращению стадии роста кристаллов и усилению конвективного обмена в прикатодных слоях. Совокупное действие этих

факторов приводит к образованию мелкокристаллической структуры, характеризующейся наличием зерен субмикронного размера и возникновению в наносимом покрытии сжимающих остаточных напряжений. Все это вместе дает возможность получать герметичные хромовые покрытия значительной толщины (получены покрытия толщиной до 650 мкм).

Испытания проводились на серийных гидравлических штоках одинакового типоразмера (рисунок 3.20), восстановленных по серийной технологии (серия 1), по технологии нанесения ДУГКП на основе хрома на рекомендованных режимах (серия 2), по технологии нанесения ДУГКП на основе хрома на режимах получения пористых покрытий, обозначенных областью 3 на рисунке 4.24 (серия 3). Режимы осаждения покрытий выбирались следующие:

Серия 1

| | |
|-----------------------------------|----|
| Плотность тока, кА/м ² | 5 |
| Температура электролита, °С | 55 |

Серия 2

| | |
|--|-----|
| Плотность тока, кА/м ² | 10 |
| Температура электролита, °С | 62 |
| Давление инструмента, МПа | 1,0 |
| Частота вращения детали, мин ⁻¹ | 80 |

Серия 3

| | |
|--|-----|
| Плотность тока, кА/м ² | 2 |
| Температура электролита, °С | 55 |
| Давление инструмента, МПа | 0,2 |
| Частота вращения детали, мин ⁻¹ | 80 |

Результаты испытаний штоков на отсутствие пористости представлены в таблице 4.12.

В результате испытаний выяснилось, что штоки, обработанные на

соответствующих режимах (серия 2), оказались герметичными по хромовому покрытию. Штоки серии 1 и серии 3, где хромовое покрытие растрескивалось (растягивающие остаточные напряжения в хроме), а поверхность оказались покрытой протяженными канальчатыми порами.

Алмазное выглаживание штоков с пористым покрытием, полученных по серийной технологии (серия 1), имеющее цель устранить поры, привело к положительному результату лишь в одном случае из шести.

Все штоки, обработанные на режимах серии 3, имели композиционное пористое гальваническое покрытие на основе хрома. Алмазное выглаживание, имеющее цель устранить поры, привело к положительному результату лишь в одном случае из четырех.

Таблица 4.12 – Результаты испытаний штоков

| Номер серии штоков | Номер штока | Толщина покрытия, мкм | Время нанесения покрытия час. | Кол-во положений испытаний | Давление в системе МПа | Время испытания, мин | Результат испытания |
|--------------------|-------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------|---------------------|
| Серия 1 | КР-472 | 170 | 19,3 | 3 | 25 | 5 | негермет. |
| | АН-245 | 170 | 19,3 | 3 | 25 | 5 | негермет. |
| | ПС-341 | 160 | 18,6 | 3 | 25 | 5 | негермет. |
| Серия 2 | АН-281 | 170 | 1,41 | 3 | 25 | 5 | гермет. |
| | КР-493 | 170 | 1,41 | 3 | 25 | 5 | гермет. |
| | НП-146 | 180 | 1,5 | 3 | 25 | 5 | гермет. |
| Серия 3 | КР-388 | 170 | 1,68 | 3 | 25 | 5 | негермет. |
| | АН-234 | 170 | 1,69 | 3 | 25 | 5 | негермет. |
| | ПС-308 | 160 | 1,61 | 3 | 25 | 5 | негермет. |

Таким образом, испытания на герметичность покрытий на деталях, прошедших восстановительные операции по различным технологиям, подтвердили, что покрытия, полученные по серийной технологии хромирования, не позволяют получить герметичное хромовое покрытие. Предлагаемая технология нанесения композиционных дисперсно-упрочненных покрытий позволяет добиться наличия в хромовом покрытии сжимающих остаточных напряжений, что обеспечивается при использовании рассчитанных режимов нанесения покрытий. При их нарушении осадки получают с растягивающими

остаточными напряжениями (зона 1 и 3 на рисунке 4.24). Для них характерно наличие трещин на поверхности и по сечению и, как следствие, на деталях с такими покрытиями возможно проявление утечки рабочих жидкостей по хрому при рабочих давлениях в системе.

4.5.7 Износостойкость покрытий

Большинство трущихся деталей силовых гидропневмоагрегатов эксплуатируется в условиях высоких нагрузок, малых скоростей скольжения и низких температур поверхностей трения, что характерно для контактных пар силовых гидроцилиндров. В этих случаях отсутствуют какие-либо структурные изменения, перенос материала с одной поверхности на другую. Истирание рабочих поверхностей контактируемых изделий обусловлено в основном, абразивным воздействием частиц. В случае применения одной из сопрягаемых деталей с хромовым покрытием износ наблюдается в основном на изделиях с меньшей твердостью, однако и на деталях с хромовым покрытием присутствуют риски от абразивных частиц и следы от задиров [11].

Испытаниям на износостойкость подвергались детали с бронзовой поверхностью, как в наибольшей степени имитирующей трибологические свойства материала уплотнения силовых штоков гидроцилиндров. Одновременно истиралось несколько образцов. Мерой износостойчивости покрытия является толщина удаленного покрытия в единицу времени, выражаемая обычно в мкм/мин.

Для испытаний на износостойчивость были взяты образцы с покрытиями, нанесенными следующими методами: по серийной технологии гальваническим хромированием (серия 1); по технологии гальваномеханического хромирования, на режимах, опубликованных в [164] (серия 2); по технологии нанесения ДУГКП на основе хрома на режимах получения герметичных покрытий (серия 3); по технологии нанесения ДУГКП на основе хрома на режимах получения пористых покрытий (серия 4). Характеристики образцов и нанесенных на них покрытий

приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Характеристики образцов с покрытиями

| № серии | Шероховатость Ra, мкм | Микротвердость HV, МПа | Толщина покрытия, мкм | Наличие сетки трещин в покрытии |
|---------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| Серия 1 | 0,1 – 0,16 | 9800 - 10500 | 190 – 210 | присутствует |
| Серия 2 | 0,04 – 0,05 | 9800 - 10200 | 190 – 210 | отсутствует |
| Серия 3 | 0,04 – 0,05 | 14310 - 14320 | 190 – 210 | отсутствует |
| Серия 4 | 0,05 – 0,06 | 14306 - 14312 | 190 - 210 | присутствует |

В каждой серии обрабатывались 4 штока. В результате сравнительных испытаний натурной типовой конструкции узла трения выяснилось, что при базе нагружения $N = 3,6 \times 10^4$ циклов характер изменения износостойкости и величины коэффициента трения для различных нагрузок совпадают. На рисунке 4.54 показана зависимость величины коэффициента трения для разных типов покрытий в зависимости от условий испытаний.

На основе проведенных исследований видно, что ДУГКП на основе хрома на всем протяжении испытаний имеют более низкий коэффициент трения. Необходимо отметить, что с течением времени коэффициент трения при испытании серийного хромового покрытия начинает расти, в то время как аналогичный показатель для ДУГКП на основе хрома остается практически неизменным (кривая 1* и 2* на рисунке 4.54), а при повышении давления на испытуемый узел даже начинает снижаться. Автор видит объяснение этому эффекту в наличии включения в финишный (контактный) слой покрытия дисульфида молибдена, который при повышении давления на поверхность начинает более активно вступать во взаимодействие с контртелом, тем самым снижая коэффициент трения.

Механизм изнашивания был изучен в работах [72, 166]. Цикл механизма изнашивания повторяется многократно. Интенсивность изнашивания

исследуемых пар при разных нагрузках на базе $N = 10^6$ циклов представлена в таблице 4.14.

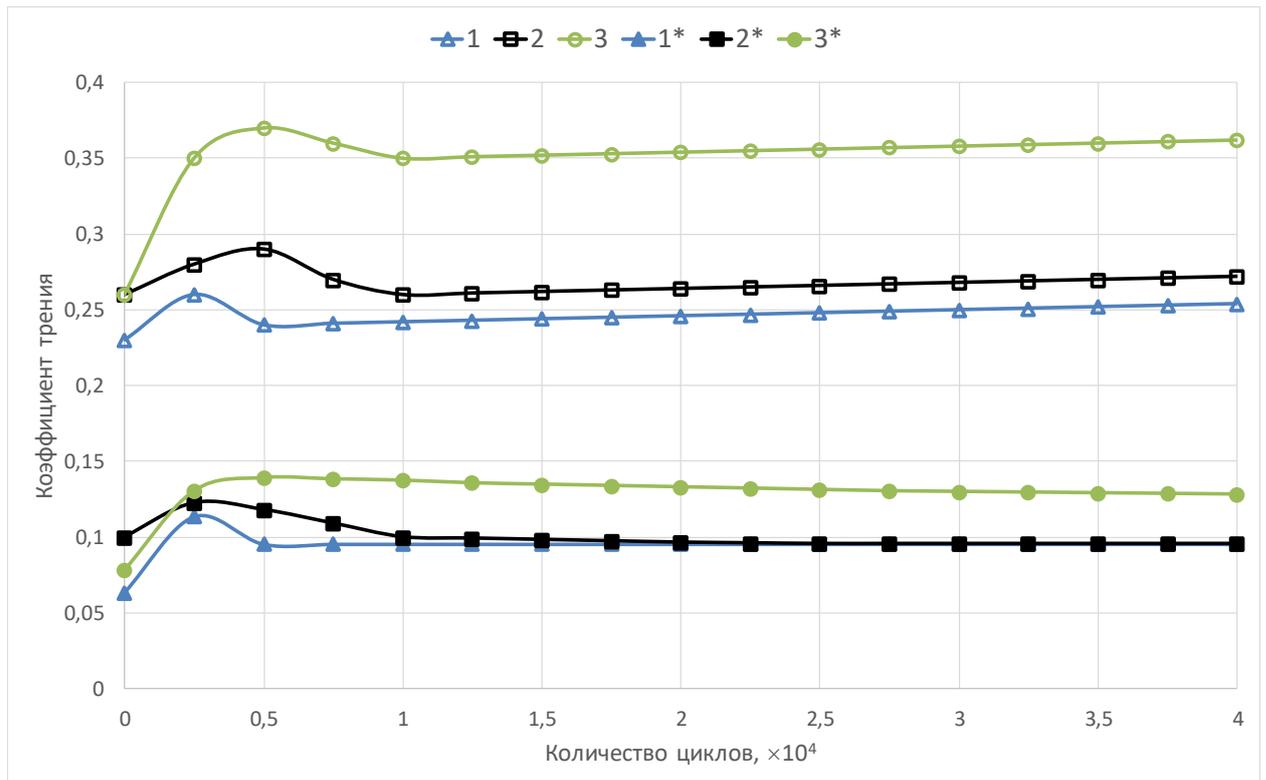


Рисунок 4.54 – Зависимость коэффициента трения по бронзе от наработки гидроцилиндров при различных нагрузках и частоте колебаний $\nu = 0,5$ Гц

1, 1* – $P = 18,8$ МПа; 2, 2* – $P = 42,3$ МПа; 3, 3* – $P = 84,3$ МПа

1, 2, 3 – хромовые покрытия по серийной технологии;

1*, 2*, 3* – ДУГКП на основе хрома

Для возможности проведения сравнительного анализа износостойкости покрытий, полученных по разным технологиям, исследования были проведены на режимах проверки износостойкости, опубликованных в [80].

Из анализа данных, приведенных в таблице 4.14, следует, что с увеличением нагрузок интенсивность изнашивания увеличивается.

Видно, что при повышенных значениях нагрузок ($P \approx P_{кр}$) интенсивность изнашивания исследуемой пары трения несколько ниже, чем серийной пары трения и пары, с покрытием по методу ГМХ. Однако, несмотря на неизменную качественную динамику процесса, подробно изученную в [80] количественная

характеристика процесса несколько изменилась в сторону увеличения износостойкости ДУГКП на основе хрома. Объясняется это видимо особой структурой получаемого покрытия.

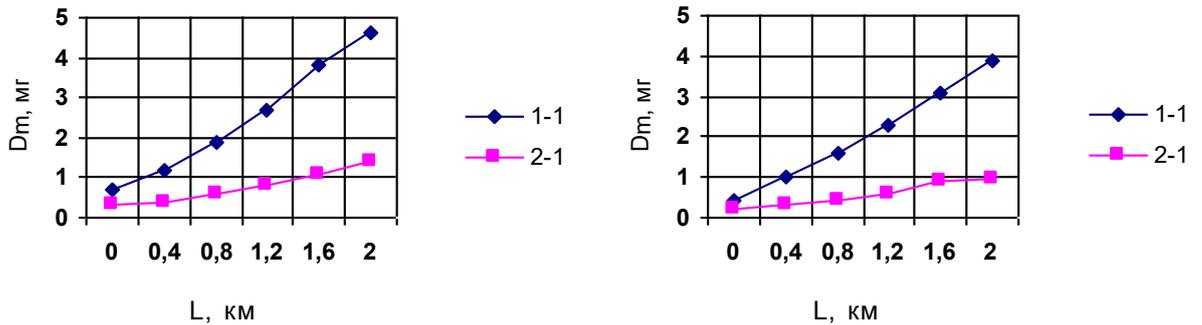
Таблица 4.14 – Сравнительные испытания на износостойкость

| Нагрузка на узел трения, МПа | Интенсивность износа, мкм/мин | | | |
|------------------------------|-------------------------------|--|---|-----------------------|
| | Стандартный узел трения | Узел трения по технологии гальваномеханического хромирования (ГМХ) | Узел трения по технологии нанесения ДУГКП на основе хрома | |
| | Пористое (серия 1) | Беспористое (серия 2) | Пористое (серия 4) | Беспористое (серия 3) |
| 18,8 | 0,00143-0,00237 | 0,00405-0,00453 | 0,00078 | 0,00114-0,00129 |
| 42,3 | 0,00720-0,04350 | 0,01370-0,01590 | 0,00492 | 0,00587-0,00628 |

В связи с тем, что прецизионные гидроцилиндры имеют направляющие бронзовые втулки, непосредственно контактирующие с силовым штоком, была исследована износостойкость покрытий, полученных при стандартном хромировании и ДУГКП на основе хрома [102]. Эталон для сравнения — образец из стали 40Х ГОСТ 4543-2016 и образец из бронзы БрАЖ 9-4 ГОСТ 18175-78 — контртело. При построении экспериментальных кривых износа применялось следующее обозначение: все пары трения маркировались двойным кодом. Причем первая цифра кода указывала на тип покрытия в паре (1 – стандартный хромовое покрытие; 2 – ДУГКП на основе хрома), а вторая – на характеристику детали в паре трения (1 – образец, 2 - контртело). При проведении эксперимента варьировали давление прижима и условия взаимодействия (без смазки или с пропиткой графитовой смазкой). Изучение зависимости триботехнических свойств основы и покрытий от условий эксплуатации в установившемся режиме показало (рисунок 4.55 а, б), что наличие смазки снижает износ контактной пары на всех образцах, однако для композиционного покрытия наличие смазки не

является определяющим условием повышения износостойкости.

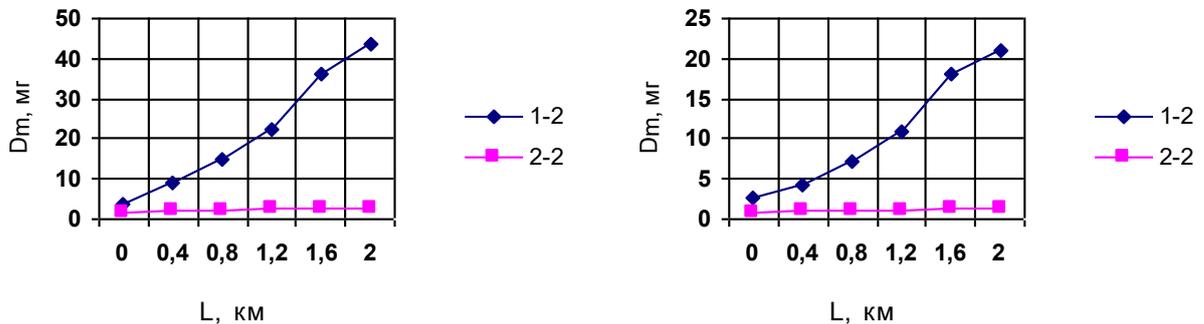
Образец



а) без смазки

б) со смазкой

контртело



а) без смазки

б) со смазкой

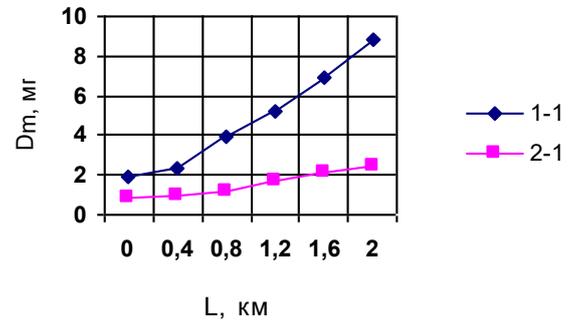
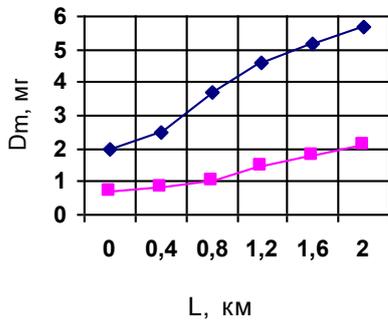
Рисунок 4.55 – Зависимость износа пары «хромовое покрытие – бронза» от типа используемого покрытия ($P = 18,8$ МПа)

Из анализа данных, полученных в ходе экспериментальных работ, можно сделать тривиальный вывод, что с увеличением удельных нагрузок интенсивность изнашивания увеличивается. Из рисунков 4.55 и 4.56 видно, что при любых значениях удельных нагрузок интенсивность изнашивания исследуемой пары трения значительно ниже, чем серийной пары. Объясняется это видимо особой структурой получаемого покрытия.

В результате исследования антифрикционных свойств пар трения «сталь — бронза», установлено, что наибольшая убыль массы отмечена для пары «сталь — бронза» со стандартным хромовым покрытием без смазки, а наименьшая — для

пары «сталь – бронза» с композиционным хромовым покрытием со смазкой (рисунки 4.55, 4.56). Данные по износу приведены в таблице 4.15.

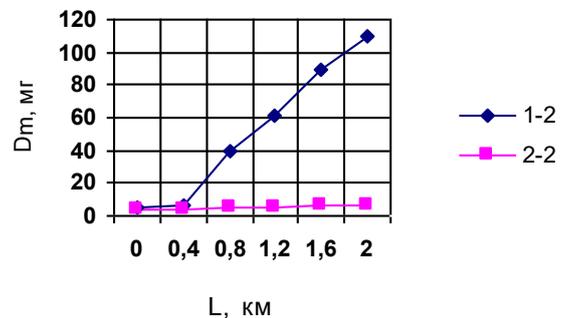
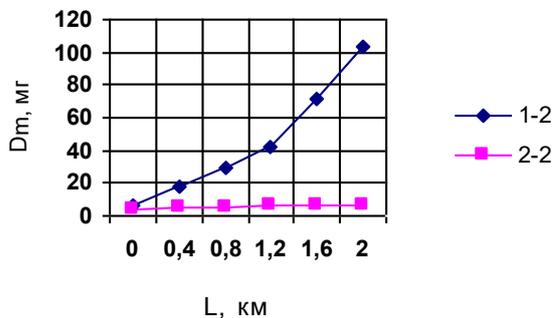
образец



а) без смазки

б) со смазкой

контртело



а) без смазки

б) со смазкой

Рисунок 4.56 – Зависимость износа пары «хромовое покрытие – бронза» от типа используемого покрытия ($P = 42,2$ МПа)

При исследовании износостойкости серийного хромового покрытия, выяснилось, что наличие графитовой смазки при увеличении давления положительно влияет на интенсивность износа (рисунок 4.56). Масло заполняет все открытые поры и в начальный момент значительно снижает износ на участках приработки. Но после вскрытия закрытых пор наблюдается значительное увеличение износа. Этот эффект можно объяснить накоплением в углублениях пор продуктов износа, которые в дальнейшем выполняют роль абразива. Для исследуемой пары трения с ДУГКП на основе хрома характерно отсутствие пор

на поверхности детали. В связи с этим, по мнению автора продукты износа своевременно удаляются из зоны трения, а не накапливаются в ней. Все это обеспечивает наиболее благоприятные условия работы контактируемых пар и повышает их износостойкость. При увеличении давления прижима контртела с 18,8 МПа до 42,2 МПа (рисунок 4.56) при испытании пары со стандартным покрытием износ образца и контртела в начальный период увеличивается примерно в три раза. Затем без наличия графитовой смазки происходит ухудшение условий трения, по-видимому, из-за заполнения выемок поверхности продуктами износа. На рисунке 4.56 видно, что убыль массы контртела в случае исследования стандартного покрытия при работе без смазки в начальный момент времени значительно выше, чем при использовании смазочного материала.

Для композиционного хромового покрытия убыль массы, как образца, так и контртела во всех случаях значительно ниже по сравнению с парой трения, имеющей стандартное хромовое покрытие. Причем, наличие или отсутствие смазочного материала в зоне трения не играет особой роли в интенсивности износа исследуемой пары. Это объясняется тем, что пористость стандартного хромового покрытия значительно выше, чем у ДУГКП на основе хрома, а твердость хромового покрытия выше, чем бронзы, поэтому и износ контртела выше. Несущественное влияние смазочного материала на повышение износостойкости объясняется наличием в новом типе покрытия включений дисульфида молибдена, которые при взаимодействии с контртелом играют роль твердого смазочного материала.

Таблица 4.15 – Количественная характеристика износа

| Путь испытаний (км) | Износ (мг) | | | |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|
| | Образец | | Контртело | |
| | со смазкой | без смазки | со смазкой | без смазки |
| | | | | |

| | | Станд. покрытие | ДУКГП (серия 3) |
|-----|------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0,4 | Давление прижима 18,8 МПа | 0,99 | 0,31 | 1,2 | 0,4 | 4,3 | 0,96 | 8,8 | 1,9 |
| 0,8 | | 1,6 | 0,42 | 1,9 | 0,6 | 7,1 | 1,03 | 14,7 | 2,2 |
| 1,2 | | 2,3 | 0,61 | 2,7 | 0,8 | 10,9 | 1,11 | 22,1 | 2,5 |
| 1,6 | | 3,1 | 0,89 | 3,8 | 1,1 | 18,1 | 1,2 | 36,2 | 2,7 |
| 2 | | 3,9 | 0,97 | 4,6 | 1,4 | 20,9 | 1,28 | 43,8 | 2,9 |
| 0,4 | Давление прижима 42,2 МПа | 2,3 | 1 | 2,2 | 0,8 | 6,2 | 4,1 | 17,3 | 4,7 |
| 0,8 | | 3,9 | 1,2 | 3,7 | 1 | 39,6 | 5 | 29,8 | 5,3 |
| 1,2 | | 5,2 | 1,7 | 4,6 | 1,5 | 61,8 | 5,6 | 42,6 | 5,8 |
| 1,6 | | 6,9 | 2,1 | 5,2 | 1,8 | 89,5 | 6,1 | 71,9 | 6,3 |
| 2 | | 8,8 | 2,4 | 5,7 | 2,1 | 109,6 | 6,4 | 103,9 | 6,5 |

Таким образом, в ходе исследований уточнен механизм износостойкости хромированных сталей, с нанесенным на них хромовым покрытием, осажденным по серийной технологии, методом гальвано механического хромирования (ГМХ) и методом получения ДУГКП на основе хрома, работающих в паре с бронзами в тяжело нагруженных узлах трения: вид износа и несущая способность изделий совпадают с аналогичными серийными парами. При этом с увеличением удельных нагрузок в обоих случаях интенсивность изнашивания увеличивается, однако, в случае покрытий ДУГКП в меньшей степени.

На основании проведенных исследований можно заключить, что ДУГКП на основе хрома, значительно повышают стойкость к износу контактной пары, как на этапе приработки, так и на установившемся участке трения. Наличие включений дисульфида молибдена в контактном слое покрытия, играющих роль наполнителя хромовой матрицы, позволяет снизить износ в несколько раз по сравнению с серийными гальваническими покрытиями. Причем желательное присутствие для стандартных покрытий смазки в узле трения для нового ДУГКП на основе хрома не является существенным фактором увеличения износостойкости.

4.5.8 Определение коэффициента трения

Известно, что повышенное трение в узлах гидро- и пневмоприводов приводит к значительным материальным потерям. В некоторых случаях на преодоление этого сопротивления затрачивается 80% потребляемой энергии [80]. Низкие КПД многих узлов обусловлены, главным образом, большими потерями на трение. В гидроцилиндрах, согласно [12], основными источниками трения являются уплотнители герметизируемых подвижных сопряжений. Этому же мнению придерживаются и авторы [14], утверждающие, что сила трения, снижающая номинальное усилие, приводящее в действие рабочий орган гидроцилиндра, зависит от типа уплотнителя, шероховатости герметизируемой поверхности, температуры, давления и коэффициента трения контактирующих пар.

Увеличение высоты микронеровностей по сравнению с заданным конструктором значением повышает интенсивность изнашивания вследствие возрастания механического сцепления, скалывания и среза микронеровностей поверхности. Уменьшение высоты по отношению к конструктивно заданному значению также способствует увеличению интенсивности изнашивания. Это происходит из-за молекулярного схватывания и заедания сопряженных поверхностей, вызванных масляным голоданием. Этот вид изнашивания характерен для деталей гидросистем и двигателей внутреннего сгорания автомобилей [14].

Например, полированные гладкие поверхности с шероховатостью $R_a = 0,04–0,16$ мкм не способны удерживать и транспортировать смазку малой вязкости в зону контакта уплотняющего элемента (например, манжеты), в результате чего возникает большое сопротивление сдвигу при так называемом масляном голодании. Кроме того, за счет роста фактической площади контакта резко увеличивается молекулярная составляющая силы трения, которая приводит к схватыванию. Наоборот, при работе грубых поверхностей вала с шероховатостью $R_a = 1,25–2,5$ мкм, хорошо удерживающих смазку, возникают значительные

деформации поверхностного слоя более мягкого материала пары. Также происходит увеличение коэффициента трения вследствие возрастания его деформационной составляющей. В результате этого происходит разрыв масляной пленки и повышенный износ уплотнения. Кроме того, продукты износа (абразивные частицы), попадая в зону контакта манжеты с валом, застревают в материале уплотнения и ускоряют процесс изнашивания сопряжения [14].

В силу вышеизложенного, можно резюмировать, что наиболее эффективным способом снижения силы трения в узле является применение низких шероховатостей контактируемых пар, являющихся гарантией долговечности уплотнителей, при одновременном обеспечении низкого коэффициента трения, обеспечивающего нормальную работу узлов в условиях масляного голодания.

Возможность получения поверхностей с низкой шероховатостью поверхности путем нанесения ДУГКП на основе хрома была доказана в главе 4.4. Поэтому в настоящем материале ставилась задача исследования влияния режимов осаждения ДУГКП на основе хрома на коэффициент трения. Т.к. композиционное хромовое покрытие может работать с различными материалами и соответственно иметь различные значения коэффициента трения, ставилась задача по изучению характера изменения коэффициента трения при использовании вместо стандартного хромового покрытия финишного слоя ДУГКП на основе хрома, как непосредственно контактирующего с рабочим органом узла.

Для реализации поставленной задачи проводился регрессионный анализ, при котором применялось математическое планирование эксперимента [84]. В нашем случае исследовались образцы с ДУГКП на основе хрома с компонентом второй фазы в виде дисульфида молибдена, имеющие толщину покрытия 40–400 мкм и работающие в паре со стальными деталями из легированной стали 40Х. Одним из условий регрессионной модели является предположение о функциональной независимости переменных факторов. Для оценки этого положения проводился корреляционный анализ, результаты которого представлены в приложении Б7. Связь между факторами, называемая

мультиколлинеарностью, делает вычисление параметров модели либо невозможным, либо затрудняет содержательную интерпретацию параметров модели. Учитывая вышеизложенное, на основании анализа матрицы коэффициентов парной корреляции, можно сделать вывод о необходимости включения в модель таких факторов исследуемого процесса, как плотность тока, температура рабочей среды и давление инструмента на поверхность. Остальные факторы процесса оказались не значимы или мультиколлинеарны.

Характеристики плана эксперимента выбирались из условия получения герметичных хромовых покрытий со сжимающими остаточными напряжениями и шероховатостью поверхности $R_a = 0,02-0,03$ мкм:

| | |
|---|-----------|
| плотность тока (X_1), i кА/м ² | 10 – 12 |
| температура электролита (X_2), t °С | 60 – 65 |
| давление инструмента (X_3), P МПа | 1,0 – 1,5 |

Был реализован полный факторный эксперимент 2^3 . В качестве параметра оптимизации выбран коэффициент трения в финишном слое покрытия (μ).

Исследования проводились методом регрессионного анализа, для чего на основании экспериментальных данных была построена матрица планирования, содержащая зависимую и независимые переменные, которая представлена в приложении Б7.

Дальнейшим этапом явилось проведение регрессионного анализа. В результате расчета пошаговой множественной регрессии с применением пакета научных подпрограмм «Statistika» получено уравнение в кодированных значениях, описывающее зависимость коэффициента трения системы покрытие-сталь 40Х от исследуемых факторов

$$\begin{aligned} \mu = & 0,149 + 0,084x_1 - 0,013x_2 - 0,015x_3 + 0,005x_1x_2 - \\ & - 0,003x_1x_3 - 0,0004x_2x_3 - 0,002x_1x_2x_3. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Визуализация регрессионного уравнения (4.23) представлена на рисунке 4.57 в качестве контура желательности.

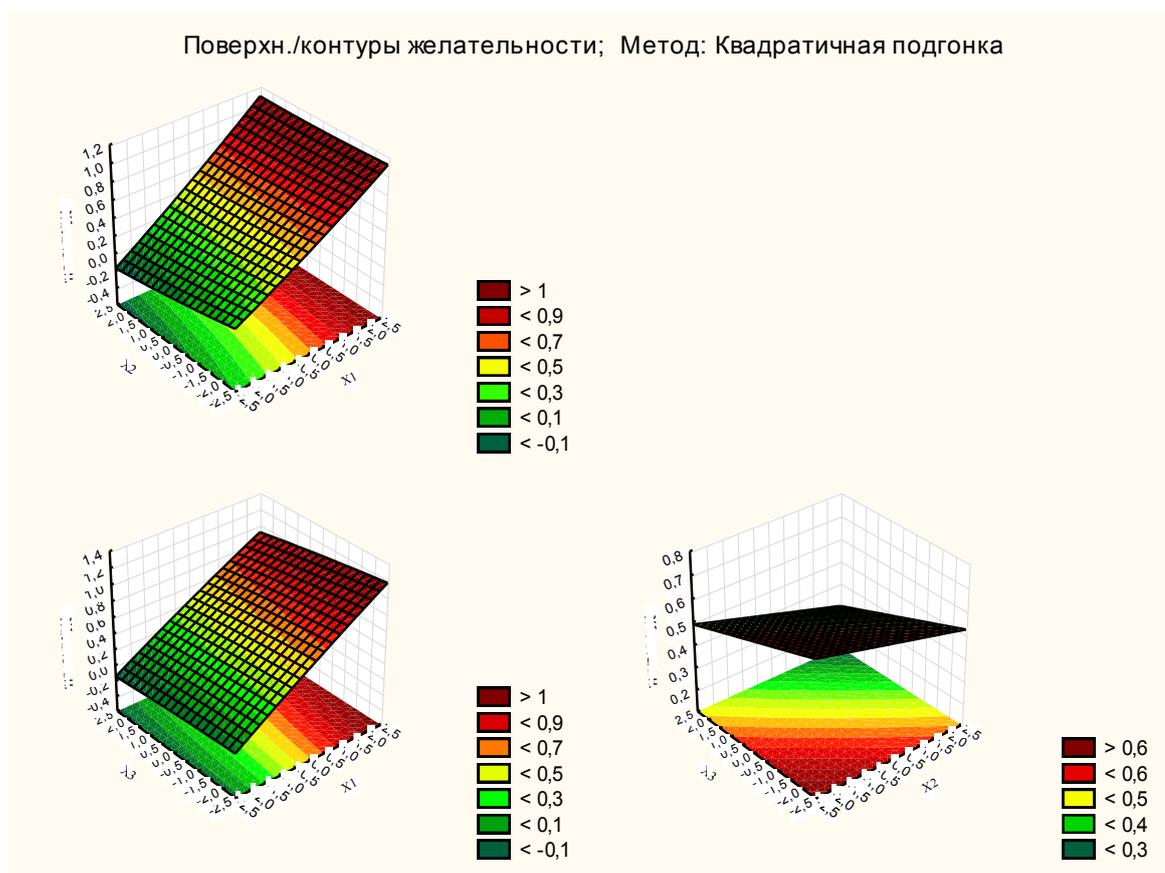


Рисунок 4.57 – График функции желательности коэффициента трения композиционного покрытия

Проверка адекватности выбранной модели производилась по критерию Фишера [27]. Модель считалась адекватной, если $F_p < F_{кр}$. Для полученной модели данное условие выполняется, следовательно, уравнение регрессии адекватно описывает влияние основных факторов процесса на коэффициент трения в получаемом финишном слое покрытия.

Анализ позволил выявить, что зависимость коэффициента трения от исследуемых факторов сильная - множественный коэффициент корреляции достигает значения 0,971.

Анализируя корреляционную матрицу, видим, что наибольшее влияние на величину коэффициента трения в финишном слое покрытия оказывает плотность тока (коэффициент корреляции 0,9553). Менее значительно влияют давление инструмента и температура электролита (коэффициенты корреляции соответственно - 0,1759 и - 0,1473). Далее в порядке убывания степени влияния на

коэффициент трения в покрытии, факторы расположились следующим образом: взаимное влияние плотности тока и температуры электролита (коэффициент корреляции 0,0618), взаимное влияние плотности тока и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,0428), взаимное сочетание всех трех факторов (коэффициент корреляции 0,0238), взаимное влияние температуры электролита и давления инструмента (коэффициент корреляции 0,0048).

После проверки значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента [27], выяснилось, что все коэффициенты регрессионного уравнения за исключением эффектов взаимодействия разных уровней оказались значимы, т.к. для них вычисленные значения критерия Стьюдента оказались больше табличного t_m . Таким образом, окончательное уравнение регрессии будет иметь вид:

$$\mu = 0,149 + 0,084x_1 - 0,013x_2 - 0,015x_3. \quad (4.24)$$

Раскодированное регрессионное уравнение, описывающее влияние условий осаждения на коэффициент трения в получаемых гальванических композиционных покрытиях на основе хрома, будет иметь вид:

$$\mu = -0,375 + 0,084x_1 - 0,0052x_2 - 0,06x_3. \quad (4.25)$$

При анализе влияния исследуемых факторов на коэффициент трения в ДУГКП на основе хрома из уравнения регрессии следует, что увеличение плотности тока ведет к увеличению коэффициента трения, что согласуется с теоретическими и экспериментальными исследованиями, изложенными в [165] и объясняется увеличением зернистости осадка при увеличении плотности тока..

Рост давления инструмента на обрабатываемую поверхность ведет к уменьшению коэффициента трения в покрытии. Это видимо объясняется тем, что при увеличении давления формируется поверхностный слой покрытия с более низкой шероховатостью поверхности.

С увеличением температуры растет пластичность осаждаемых покрытий, и они легче деформируются инструментом, что в конечном итоге позволяет формировать покрытия с меньшей микрогеометрией при неизменном давлении.

Используя приведенную зависимость (4.25) можно прогнозировать тенденцию изменения коэффициента трения в получаемых ДУГКП на основе хрома.

Экспериментальная проверка теоретических положений представлена на рисунке 4.58.

Анализ экспериментальных данных позволил установить следующее. Измерение коэффициента трения скольжения покрытий показало, что при трении стандартного хромового покрытия процесс трения характеризуется высокой скоростью роста коэффициента трения в зависимости от продолжительности испытаний, о чем говорит характер изменения кривой №1 на рисунке 4.58, и сопровождается схватыванием индентора и диска в районе испытаний на 400 секундах, о чем можно судить по резкому возрастанию коэффициента трения. Напротив, испытания ДУГКП на основе хрома (№2 на рисунке 4.58) показало, что на протяжении всего времени испытаний коэффициент трения рос менее значительными темпами по сравнению с покрытием №1, оставаясь в среднем на уровне 0,08 у покрытия №2 по сравнению с 0,21 у покрытия №1.

Введение смазочного материала, позволяет снизить коэффициент трения как для стандартного хромового покрытия (кривая №3 на рисунке 4.59), так и для ДУГКП на основе хрома (кривая №4 на рисунке 4.59). Однако тенденция роста коэффициента трения от времени испытаний сохранилась для обоих типов покрытия, но для ДУГКП на основе хрома в меньшей степени. ДУГКП на основе хрома, имеющие послойную структуру, дают наилучшие показатели по измеряемой величине. Необходимо отметить, что на всем протяжении испытаний, как со смазочным материалом, так и без него, коэффициент трения у ДУГКП на основе хрома оставался на более низком уровне, чем у стандартного хромового покрытия. Это позволяет говорить о возможно более высокой износостойкости композиционного гальванического покрытия в сравнении со стандартным.

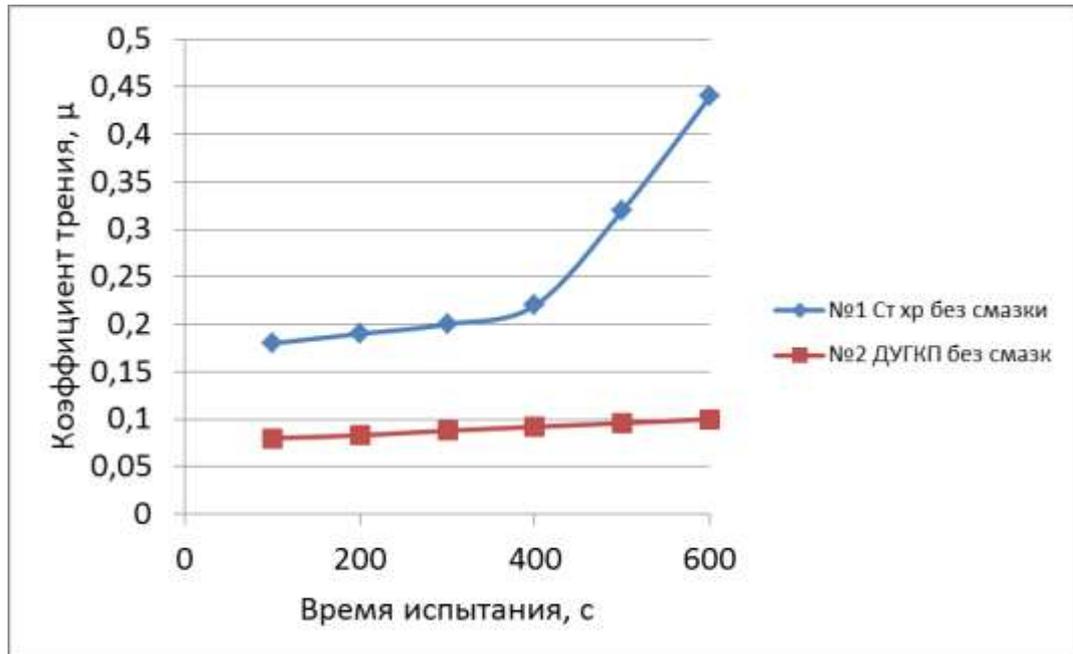


Рисунок 4.58 – Зависимость коэффициента трения гальванического покрытия на основе хрома по стали 40Х от времени испытания:

№1 – Стандартное хромовое покрытие без смазки;

№2 – ДУГКП на основе хрома без смазки

Исследования коэффициента трения проводили в соответствии с методикой экспериментальной оценки коэффициента трения в соответствии с ГОСТ 27640-88.

Анализ результатов триботехнических испытаний, проведенных при возвратно-поступательном движении штоков позволяет утверждать, что коэффициент трения контактирующих пар, имеющих ДУГКП ниже, чем у образцов пар трения серийного штока в 1,61 раза, а гильзы – в 1,41 раза; допустимая нагрузка стандартных пар трения ниже, чем пар трения с нанесенным ДУГКП у штокового узла в 1,34 раза, а у поршневого узла в 1,19 раз; значения рабочих нагрузок пар трения с ДУГКП выше для штокового узла в 1,43 раза, а для поршневого узла в 1,74 раза по сравнению со стандартными узлами.

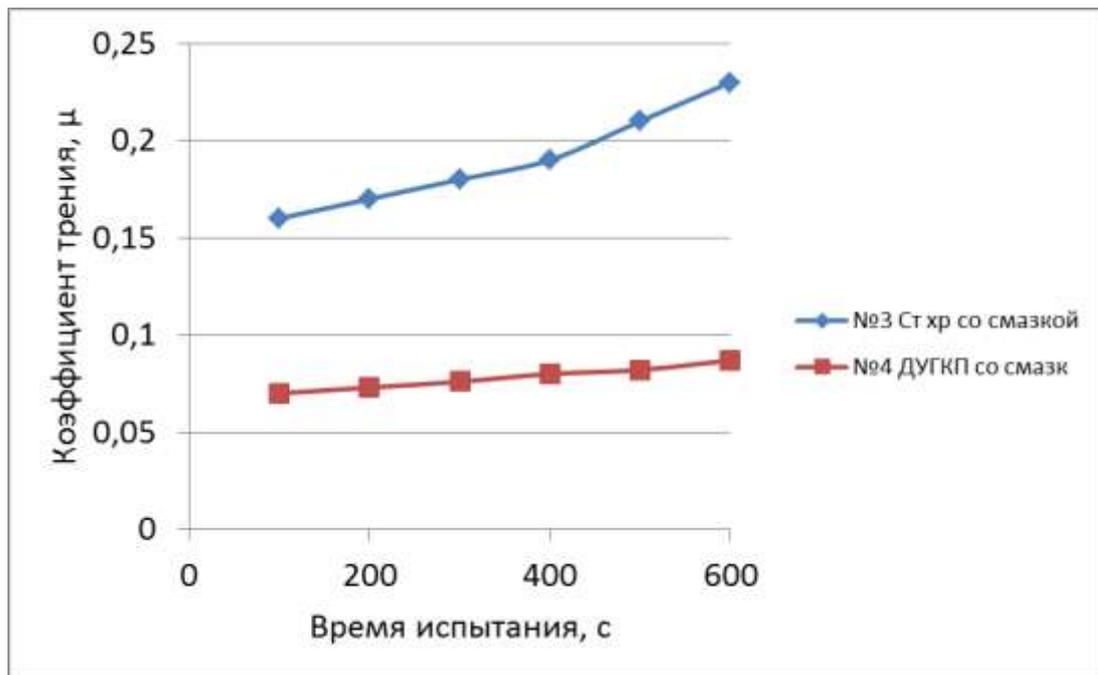


Рисунок 4.59 – Зависимость коэффициента трения гальванических покрытий на основе хрома по стали 40Х от времени испытания:

№3 – Стандартное хромовое покрытие со смазкой;

№4 – ДУГКП на основе хрома со смазкой

4.5.9 Металлографические исследования покрытий

Металлографические исследования поверхности и поперечного шлифа полученных ДУГКП на основе хрома позволили выявить три основных типа микроструктуры (рисунок 4.60):

1 – полосатая беспористая структура на поперечном шлифе и отсутствие трещин на поверхности;

2 – пористая структура с трещинами по сечению и на поверхности с широкими одиночными рисками-трещинами, нормальными к основанию;

3 – пористая структура с трещинами по сечению, расположенными под углом к основанию и хаотичной сеткой на поверхности.

Как выявили исследования, проводимые в ходе нанесения хромовых покрытий на детали типа тел вращения хромированием, при плотности тока до 12 кА/м^2 формируются структуры первого типа, но начиная с плотности тока

12 кА/м², формируются структуры второго типа. При дальнейшем увеличении плотности тока свыше 18 кА/м² на покрытии получаем структуру третьего типа.

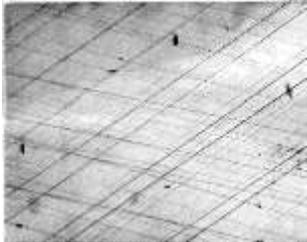
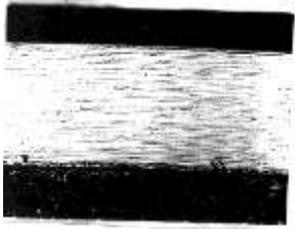
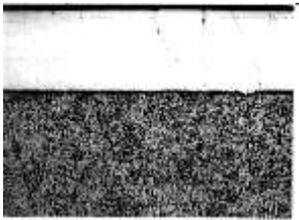
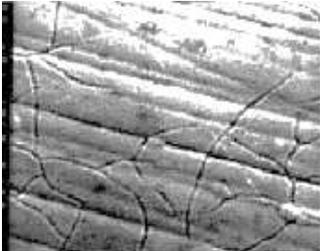
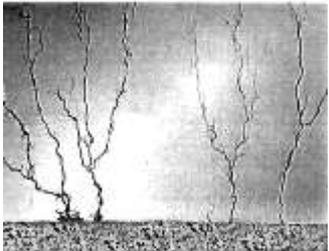
| Тип структуры | Поверхность покрытия ×50 | Вид поперечного шлифа ×1000 |
|---------------|---|---|
| 1 |  |  |
| 2 |  |  |
| 3 |  |  |

Рисунок 4.60 – Основные виды микроструктуры гальванических осадков

Увеличение температуры электролита ведет к уменьшению скорости осаждения хрома, уменьшению толщины элементарного слоя покрытия, осаждаемого между двумя последовательными ходами инструмента по одной

геометрической точке поверхности. Вследствие вышесказанного увеличивается глубина пластической деформации элементарного слоя покрытия, что приводит к различным дефектам, вызванным переупрочнением покрытия, а именно их шелушению и вспучиванию. При уменьшении температуры электролита с 60 °С до 50 °С формируются осадки со структурой второго типа. При температуре ниже 50 °С осаждаются покрытия, для которых характерны растягивающие остаточные напряжения.

Регулировкой давления инструмента удалось достичь следующих результатов. При давлении инструмента на восстанавливаемую поверхность до 1,0 МПа получают осадки второго типа. Но при увеличении давления до 1,5 МПа удалось получить переход осадков из второго типа в первый. При дальнейшем увеличении давления инструмента свыше 1,5 МПа и выше наблюдается шелушение покрытия, вызываемого видимо его переупрочнением и избыточным внедрением частиц инструмента в покрытие, которые, согласно гипотезе [65] вызывают дополнительное микропластическое упрочнение осаждаемого покрытия.

Таким образом, на основании проведенных исследований подтверждены ранее установленные режимы нанесения ДУГКП на основе хрома без предварительной и последующей механической обработки со сжимающими остаточными напряжениями, исключая образование в покрытии трещин, что обуславливает их герметичность.

Как видно из технологических рекомендаций каждый режимный параметр имеет некоторый разброс значений. Объясняется это тем, что экспериментально установлено существование зависимости критического давления инструмента от скорости осаждения покрытия, при превышении которой возможно получение некачественных покрытий с шелушениями и вспучиванием.

На рисунке 4.24 приведены кривые, характеризующие области получения покрытий различного качества для метода ДУГКП и для сравнения метода ГМО.

Как видно из рисунка зона получения качественных покрытий при

реализации метода ДУГКП несколько расширяется. Нижняя граница получения качественных покрытий методом ДУГКП опускается ниже линии обозначающей нижнюю границу получения качественных покрытий методом ГКО. Объясняется это видимо тем, что при определенной скорости осаждения покрытия и малом давлении инструмента на восстанавливаемую поверхность обеспечивается малая концентрация частиц инструментального материала в покрытии.

Следовательно, усадка покрытия существует, но она, как указывалось ранее, значительно меньше, чем для покрытий без включений второй фазы. Все это ведет к расширению области получения качественных покрытий. Аналогично вышесказанному метод ДУГКП расширяет и верхнюю границу получения качественных покрытий, определяемую по методу ГМО. Объясняется это наличием более высокого давления инструмента при фиксированной скорости осаждения покрытия. При этом происходит повышение концентрации инструментального материала в покрытии, что ведет к уменьшению усадки самого покрытия и, как следствие, отсутствию трещин на поверхности осадка. Однако, повышать давление до бесконечности невозможно. При превышении некоторого предельного значения давления наблюдается переупрочнение покрытия, что приводит к его вспучиванию и шелушению. Таким образом, видно, что по сравнению с методом ГМО метод ДУГКП раскрывает более широкие технологические возможности.

Снижение требований к ограничению технологических параметров при получении качественных хромовых покрытий методом ДУГКП объясняется, как указывалось ранее, специфическими особенностями реализации метода, а именно обеспечением контролируемого внедрения материала второй фазы в покрытие.

Серийные покрытия в данном разделе не рассматривались, т.к. они не позволяют получать качественные герметичные покрытия без дополнительной механической обработки.

На рисунках 4.61, 4.62 представлены поверхности серийного хромового покрытия и ДУГКП на основе хрома.

Видно, что ДУГКП на основе хрома обладает более мелкозернистой

структурой по сравнению с хромовым покрытием, полученным по стандартной технологии. Объясняется этот факт видимо тем, что включение мелкодисперсных частиц в покрытие в процессе электролиза ведет к измельчению структуры покрытия за счет возбуждения дополнительных центров активации роста кристаллов.



Рисунок 4.61 – Поверхности хромосодержащих покрытий (увеличение в 100 раз):
а – серийное хромовое покрытие; б – ДУГКП на основе хрома

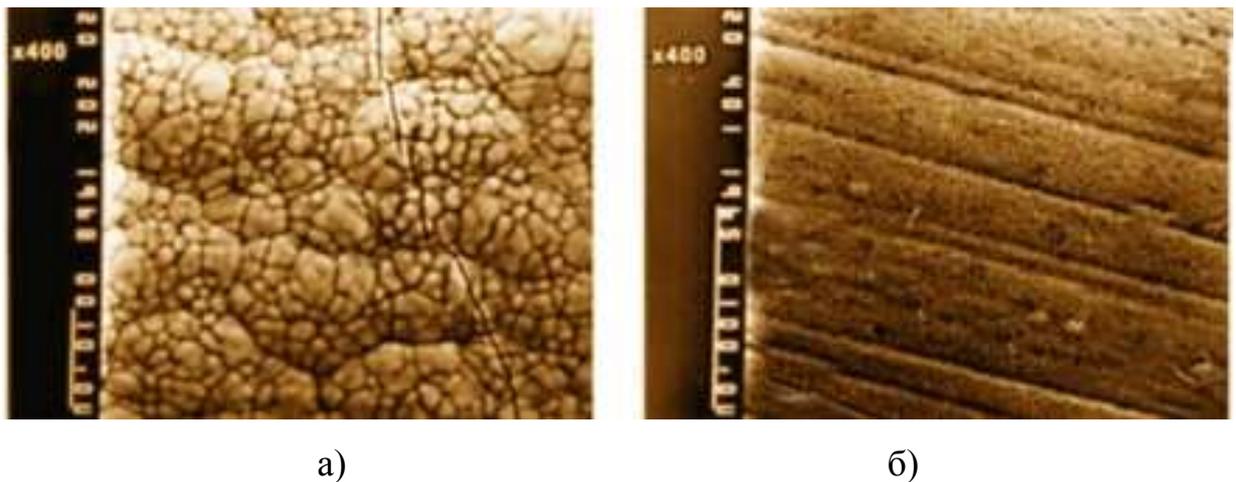


Рисунок 4.62 – Поверхности хромосодержащих покрытий (увеличение в 400 раз):
а – серийное хромовое покрытие; б – ДУГКП на основе хрома

При увеличении в 400 раз зерно на ДУГКП на основе хрома не просматривается, что подтверждает выдвинутую гипотезу о том, что механическая активация растущих слоев создает условия осаждения, при которых регулярное экранирование поверхности электролизера инструментом позволяют

управлять процессом роста кристаллов хрома и их величиной, что обеспечивает мелкозернистость осадков, вплоть до получения «металлического стекла».

4.6 Экспериментальная проверка эксплуатационных характеристик получаемых покрытий

4.6.1 Стендовые испытания гидроцилиндров

Испытания на гидравлические утечки проводились на серийных гидроцилиндрах МС80/50х710-3(4).32, чертеж которых представлен на рисунке 4.63, а внешний вид на рисунке 4.64. Представленный на испытания гидроцилиндр выпускается ОАО «Волгоградский тракторный завод» и устанавливается на тракторах ДТ-75 (бульдозер Д606, ДЗ-42, ДЗ-162) для управления подъемом и опусканием отвала.

Штоки и гильзы для испытания покрытий обрабатывались по серийной технологии и с нанесением на рабочие поверхности ДУГКП на основе хрома.

Техническое состояние гидроцилиндра характеризуется герметичностью поршня, штока и клапана ограничения хода поршня. Проверку детали проводят согласно методике, изложенной в главе 3. Гидроцилиндр считается работоспособным, если скорость перемещения поршня в гидроцилиндре, уменьшающаяся в связи с утечками рабочей жидкости через зазоры между гидроцилиндром и поршнем, штоком и уплотнением, превышает величину 2 мм/мин [67, 130].

Результаты стендовых испытаний представлены на рисунке 4.65. Испытания проводились в ООО «ИНКОС РЕМ» (приложение А3).

серийного покрытия в 1,94 раза больше, чем при использовании ДУГКП.

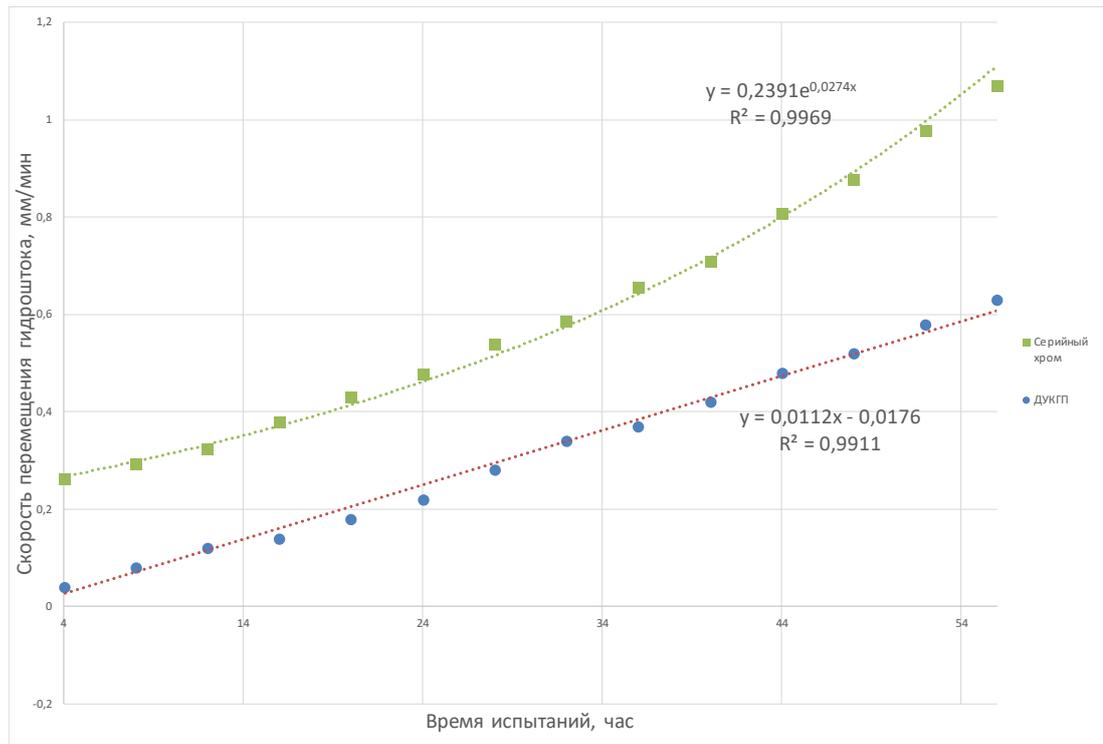


Рисунок 4.65 – Результаты стендовых испытаний гидроцилиндров

Проведенные триботехнические испытания представлены в таблице 4.16.

Совокупная интенсивность изнашивания пар трения с нанесенным ДУГКП на основе хрома меньше, чем у стандартных пар для штокового узла в 1,29 раза, для поршневого – в 1,25 раз.

После окончания стендовых испытаний и разборки гидроцилиндров, задиров, следов наволакивания и схватывания на поверхностях гидроштока и гидроцилиндра обнаружено не было.

4.6.2 Эксплуатационные испытания гидроцилиндров

Эксплуатационные испытания гидроцилиндров МС80/50х710-3(4).32 с нанесенным ДУГКП на основе хрома на рабочие поверхности, подвергаемые износу, проводились с целью выявления эффективности разработанной технологии повышения надёжности деталей силовых гидроагрегатов, в

соответствии с методикой, представленной в п. 3.5. Результаты проведенных испытаний представлены в приложении А1.

Таблица 4.16 – Триботехнические испытания гидроцилиндров

| | Допустимая нагрузка, МПа | Рабочая нагрузка, МПа | Коэффициент трения | Интенсивность изнашивания подвижных соединений, мкм/час | Интенсивность изнашивания неподвижных соединений, мкм/час | Суммарная интенсивность износа, мкм/час |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|---|---|---|
| Штоковый узел | | | | | | |
| Серийный гидроцилиндр | 12,8 | 6,57 | 0,129 | $4,4 \times 10^{-8}$ | $3,9 \times 10^{-8}$ | $8,3 \times 10^{-8}$ |
| Гидроцилиндр с ДУГКП | 17,2 | 9,4 | 0,08 | $3,3 \times 10^{-8}$ | $3,1 \times 10^{-8}$ | $6,4 \times 10^{-8}$ |
| Поршневой узел | | | | | | |
| Серийный гидроцилиндр | 12 | 6,2 | 0,138 | $1,51 \times 10^{-10}$ | $1,02 \times 10^{-9}$ | $1,171 \times 10^{-9}$ |
| Гидроцилиндр с ДУГКП | 14,3 | 10,8 | 0,098 | $1,2 \times 10^{-10}$ | $9,2 \times 10^{-10}$ | $1,04 \times 10^{-9}$ |

Восстановленные гидроцилиндры устанавливали на тракторы ДТ–75 в хозяйствах Воронежской области. На испытание было принято 32 силовых гидроцилиндра. В процессе испытания в журнале фиксировались наработка и объем выполненной работы.

За время эксплуатации гидроцилиндров с ДУГКП на основе хрома не было зафиксировано ни одного отказа по причине дефекта штока или гильзы с покрытием ДУГКП.

Нормативная величина среднего ресурса новых гидроцилиндров для различных типов может варьироваться в широких пределах и в среднем составляет 6125 часов, а нормативная величина среднего 80 % ресурса – 4900 часов [80].

По результатам эксплуатационных испытаний было установлено, что 80-ти процентный гамма ресурс гидроцилиндров МС80/50х710-3(4).32 с покрытием по серийной технологии составил 5878 мото-час.

В результате эксплуатационных испытаний было установлено, что нижняя доверительная граница прогнозируемого среднего ресурса гидроцилиндров с нанесенным ДУГКП на основе хрома на рабочие поверхности составила 7819 часов, а нижняя доверительная граница 80 % ресурса – 6255 часов, что уже превышает нормативные значения 80 % ресурса серийных штоков в 1,06 раза, что представлено на рисунке 4.66.

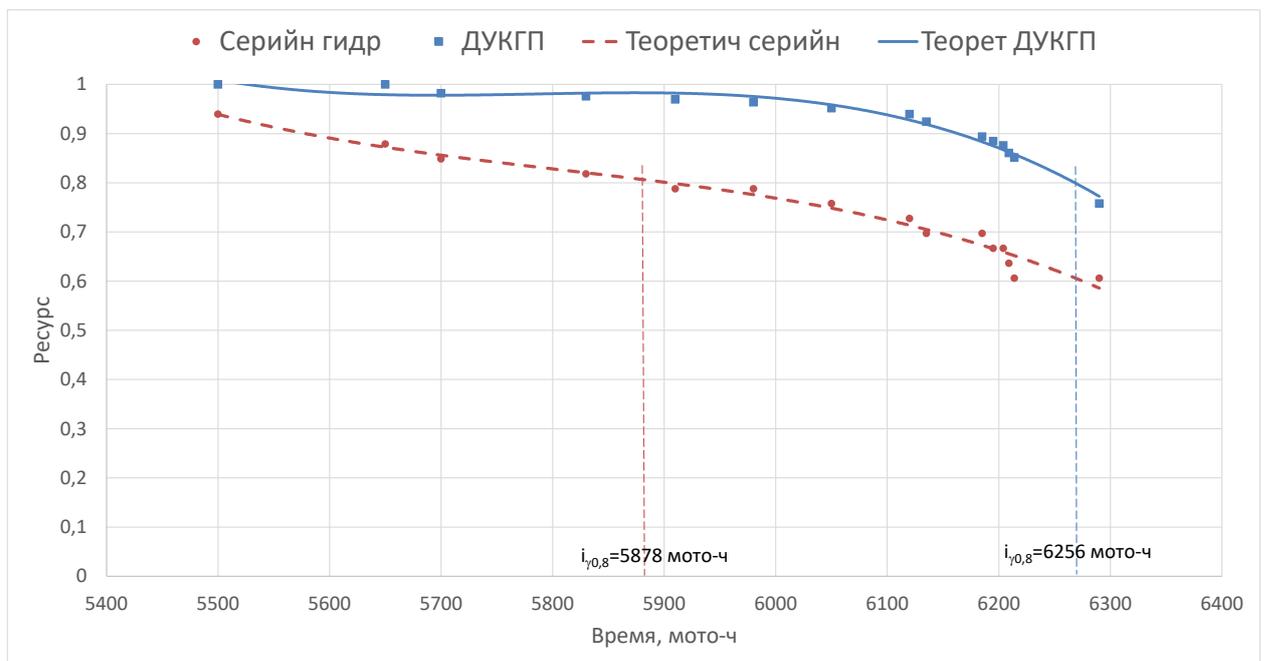


Рисунок 4.66 – Ресурсные испытания гидроцилиндров с нанесенным композиционным покрытием

После испытаний была произведена разборка гидроцилиндров с целью установления причины снижения ресурса. Выявлено, что во всех случаях снижения ресурса гидроцилиндров с ДУГКП на основе хрома причиной являлся износ уплотнения по штоку вследствие воздействия на него абразивных частиц из окружающей среды. Непосредственно износов, сколов и других дефектов покрытия штока, поршня и гильзы обнаружено не было. После замены

уплотнения гидроцилиндры продолжали эксплуатацию на технике.

На рисунках 4.67–4.69 представлены графические интерпретации статистических параметров надежности.

Как известно [12], достоинством средней наработки объекта до отказа является наглядность и простота его вычисления из экспериментальных данных об отказах объектов. Однако, как математическое ожидание оно не может полностью характеризовать время работы объекта, для этого необходимо знать, по крайней мере, начальные и центральные моменты случайной величины. Кроме того, затруднительно с необходимой для практики точностью оценить надежность объекта, время работы которого меньше среднего времени работы до отказа. Анализируя представленный рисунок 4.67 видно, что вероятность безотказной

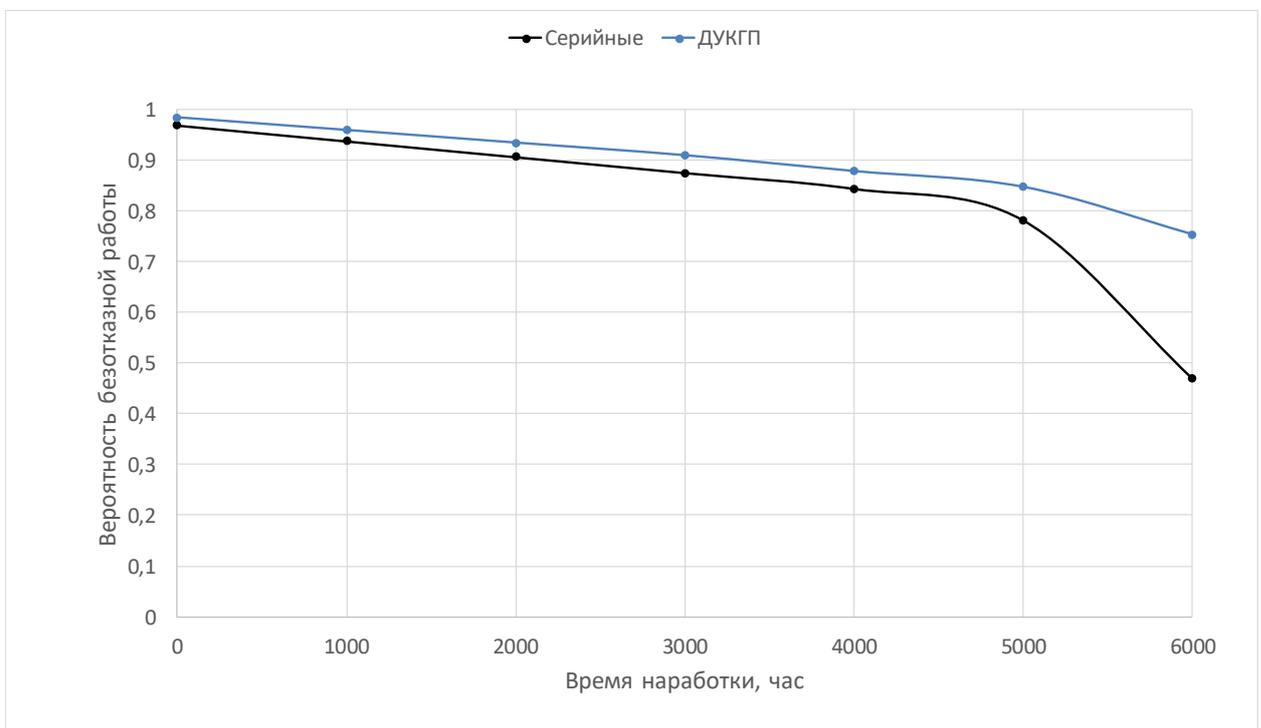


Рисунок 4.67 – Зависимость вероятности безотказной работы от наработки

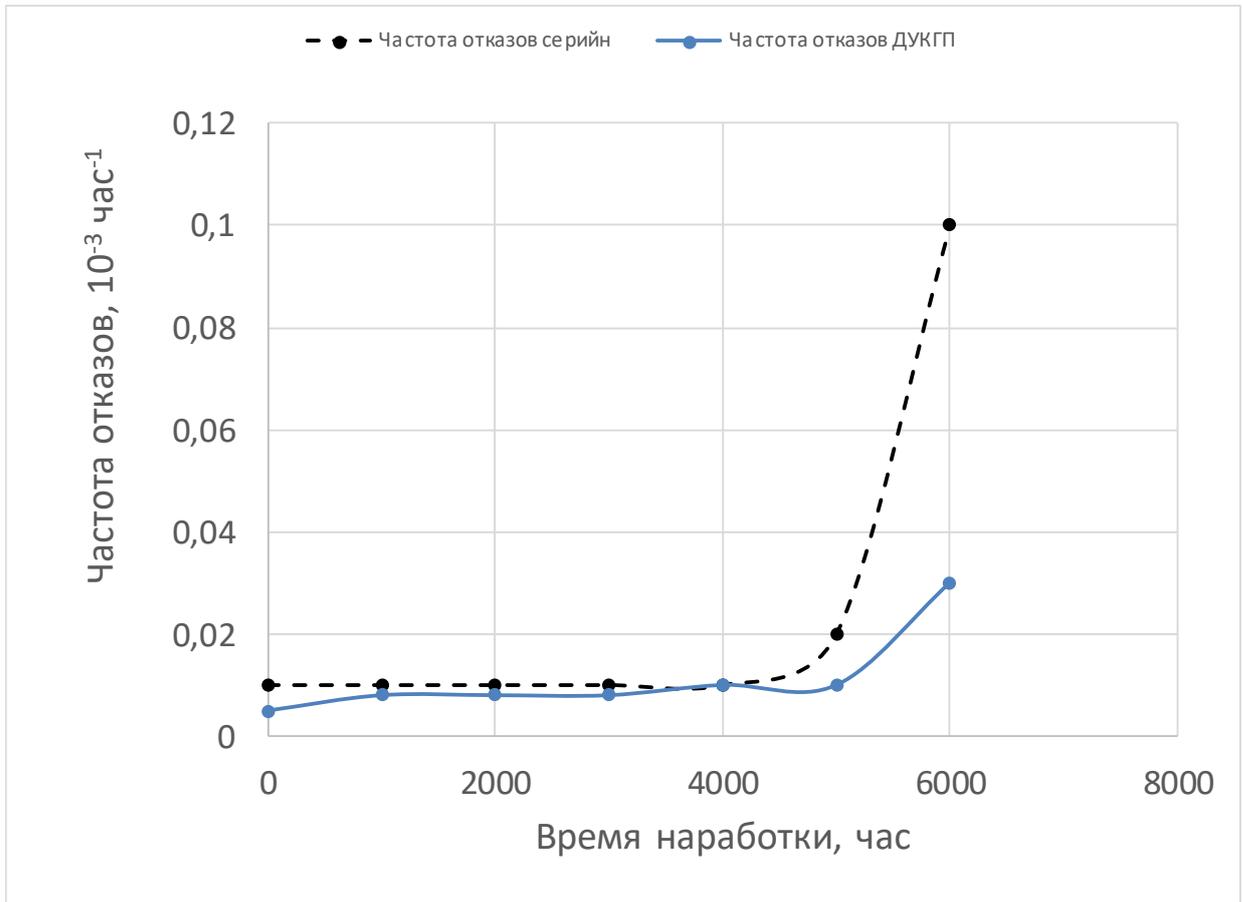


Рисунок 4.68 – Зависимость частоты отказов от наработки

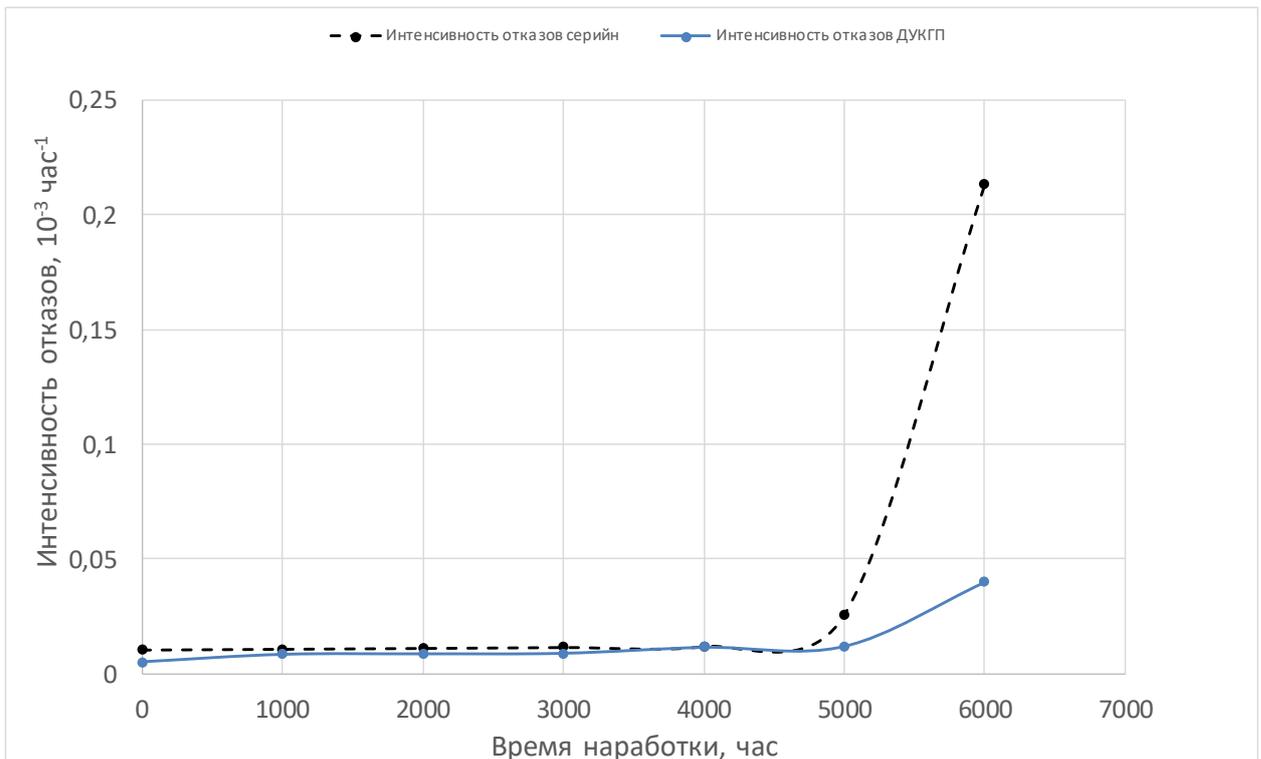


Рисунок 4.69 – Зависимость интенсивности отказов от наработки

4.7 Выводы по главе

1. Проведенные лабораторные исследования позволили установить, что для композиционных покрытий на основе хрома, обладающего наименьшим сродством к веществам дисперсной фазы, определён рациональный состав композиции базового слоя: оксид алюминия – 5% по массе; карбид титана – 3% по массе; остальное – хромовая матрица. Композиционное гальваническое покрытие при этом составе имеет наиболее высокую микротвердость.

Рациональное содержание дисульфида молибдена при нанесении финишного слоя электролитического покрытия на основе хромовой матрицы, имеющего наибольшую микротвердость: дисперсность частиц – 0,9 мкм; концентрация – 2,5% по массе.

2. В результате исследований были определены режимные параметры осаждения базового и финишного слоя: плотность тока 10–12 кА/м², температура электролита 60–65 °С, давление инструмента 1,0–1,5 МПа, скорость главного движения 70–100 мин⁻¹, гарантирующие получение герметичных покрытий. Возникающие при данном режиме нанесения в осаждаемом покрытии остаточные напряжения сжатия не превосходят по абсолютной величине предел прочности хрома, что гарантирует получение герметичного покрытия с хорошей адгезией к основе, как на наружных, так и на внутренних поверхностях.

3. Установлено, что скорость нанесения базового слоя ДУГКП на основе хрома превышает аналогичный показатель процесса гальваномеханического хромирования более чем в 2,15 раза, а стандартного хромирования в 7,4 раза. Скорость нанесения финишного слоя выше аналогичного показателя базового слоя в 1,27 раза, что объясняется использованием токопроводящего материала – дисульфида молибдена.

4. При осаждении дисперсно-упрочненных герметичных износостойких композиционных гальванических покрытий на основе хрома значение шероховатости поверхности не превышает значения 0,04 мкм, что позволяет использовать разработанный метод в качестве финишной обработки

прецизионных деталей, и объясняется деформацией слоев осадка в процессе обработки и сокращением времени активного свободного роста кристаллов.

5. В результате лабораторных испытаний установлено, что скорость уменьшения адгезии покрытия при увеличении его толщины при нанесении стандартного хромового покрытия в 5,7 раза выше, чем при нанесении ДУГКП на основе хрома.

6. Введение в покрытие мелкодисперсного наполнителя вызывает уменьшение степени наводораживания осадка ДУГКП в 2,35–3,46 раза по сравнению с покрытиями, полученными методом ГМХ и в 3,82–4,61 раза по сравнению со стандартными покрытиями.

7. В ходе лабораторных исследований установлено, что при плотности тока 10 кА/м^2 , температуре электролита $62 \text{ }^\circ\text{C}$, давлении инструмента 1 МПа и частоте вращения детали 80 мин^{-1} удаётся получать герметичное покрытие необходимой толщины.

8. Установлено, что ДУГКП на основе хрома значительно повышают стойкость к износу контактной пары как на этапе приработки, так и на установившемся режиме эксплуатации. Наличие включений дисульфида молибдена в контактном слое покрытия, играющих роль наполнителя хромовой матрицы, снижает коэффициент трения, что позволяет снизить износ в несколько раз по сравнению с серийными гальваническими покрытиями.

9. Анализ результатов стендовых испытаний, проведенных при возвратно-поступательном движении штоков показал, что коэффициент трения контактирующих пар, имеющих ДУГКП ниже, чем у образцов пар трения серийного штока в 1,61 раза, а гидроцилиндра – в 1,41 раза; допустимая нагрузка стандартных пар трения ниже, чем пар трения с нанесенным ДУГКП у штока в 1,34 раза, а у гидроцилиндра в 1,19 раз; значения рабочих нагрузок пар трения с ДУГКП выше для штока в 1,43 раза, а для гидроцилиндра в 1,74 раза по сравнению со стандартными узлами. Совокупная интенсивность изнашивания пар трения с нанесенным ДУГКП на основе хрома меньше, чем у стандартных пар для штока в 1,29 раза, а для гидроцилиндра – в 1,25 раз.

10. На основании результатов эксплуатационных испытаний установлено, что вероятность безотказной работы гидроцилиндров с нанесенными ДУГКП на основе хрома с ростом наработки убывает в меньшей степени (в 1,08 раза) в сравнении со стандартными гидроцилиндрами.

5 ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И СХЕМЫ НАНЕСЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

5.1 Разработка рекомендаций по особенностям применения метода

Представленный в работе метод позволяет наносить многофункциональные покрытия, особенности нанесения которых зависят от выбора схемы обработки поверхности непосредственно в ванне с электролитом.

Методика выбора схемы обработки определяется следующими компонентами, обуславливающими варьирование качеств получаемых покрытий в заранее заданной области:

1. режимными параметрами осаждения;
2. типом материала, служащего подложкой под наносимое покрытие;
3. составом применяемого электролита.

Значения режимных параметров осаждения, определяющих получение композиционных покрытий с заранее заданными физико-механическими и, как следствие, эксплуатационными свойствами подробно рассмотрены в главе 4.

Осаждение покрытий по предлагаемому методу в определенной степени определяется параметрами основного металла.

Большинство деталей силовой гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники изготавливается из высокопрочных, легированных и углеродистых сталей. В ходе исследования параметры осаждения покрытий рассчитывались с ориентацией на использование в качестве подложки именно таких материалов. Однако, предлагаемая технология позволяет наносить функциональные покрытия и на другие типы материалов, в последнее время все более широко используемых в сельскохозяйственной технике. К ним относят: алюминий и его сплавы, свинец, цинк и олово. Особенно актуальна в последнее время задача нанесения хромосодержащих покрытий на хромированные поверхности.

Таким образом, разработан новый метод холодного нанесения герметичных размерных дисперсно-упрочненных гальванических композиционных хромосодержащих покрытий. Суть метода заключается в совмещении гальванического процесса осаждения покрытия при одновременном механическом воздействии на него химически нейтрального инструмента с внедрением в растущую гальваническую матрицу двухкомпонентного наполнителя (TiC и Al_2O_3). В процессе нанесения покрытие испытывает послойную упруго-пластическую деформацию, за счёт воздействия на него инструмента. Это формирует дисперсно-упрочненный выравнивающий слой. Затем наносится дисперсно-упрочненное композиционное гальваническое покрытие на основе хромовой матрицы с дисульфидом молибдена в качестве наполнителя. Это позволяет формировать финишный слой композиционного гальванического покрытия на основе хромовой матрицы с повышенными антифрикционными свойствами, что положительно сказывается на износостойкости осадка и обеспечивает заранее заданные физико-механические и, как следствие, эксплуатационные характеристики герметичного поверхностного слоя детали, без механической обработки как самой детали, так и гальванического покрытия. Метод позволяет получать размерное износостойкое герметичное хромосодержащее покрытие с внутренними напряжениями сжатия, препятствующими трещинообразованию. При этом впервые послойная деформация покрытия обеспечивалась качением инструмента по обрабатываемой поверхности. Это позволило повысить плотность упаковки формируемого композиционного материала, что положительно сказалось на обеспечении герметичности формируемых осадков.

Основным условием приготовления смеси карбидов с оксидами при изготовлении инструментальной головки является равномерное распределение карбидов и оксидов между собой в соотношении, отвечающем заданным требованиям. Для этого указанные порошки смешивают, а затем подвергают размолу в жидкой среде (этиловый спирт, ацетон или другие органические жидкости). Здесь жидкая среда препятствует окислению компонентов полученной

суспензии и обеспечивает оптимальное диспергирование ингредиентов.

Процесс размола в значительной мере определяет равномерность распределения компонентов смеси, от которой в дальнейшем зависят условия спекания и эксплуатационные свойства полученных пластин.

Продолжительность размола в зависимости от требуемого размера зерна карбидной фазы твердого сплава обычно составляет 18...96 часов.

Мешалкой атриторной мельницы приводится во вращение относительно небольшое количество шаров, остальные приводятся в движение путем передачи импульсов от шара к шару. Скорости шаров распределены очень неравномерно как по радиусу, так и по высоте, и именно этим объясняется высокая, по сравнению, например, с барабанными мельницами, эффективность измельчения в атриторах, так как механическое истирающее ударное воздействие на частицы порошка, заключенные между двумя шарами, возможно только тогда, когда они движутся с разными скоростями.

Во время размола в атриторной мельнице работает система циркуляции суспензии. При этом соотношение между объемами шаров и суспензии должно быть равным 6:1. После мокрого размола пульпу насосом под давлением 0,6 МПа через распылительную форсунку подают в сушильную камеру 1 установки сушки распылением изображенную на рисунке 3.5. Туда же, пройдя подогреватель 5, поступает под давлением 0,1...0,3 МПа азот, нагретый до температуры 170...200 °С. Образовавшиеся при распылении гранулы, высохнув, скапливаются в разгрузочном бункере 6. Смесь паров спирта с азотом (температура около 100°С) из камеры 1 поступает в циклон 2, где в разгрузочном бункере накапливаются унесенные из камеры 1 мелкие гранулы, и насосом подается в скруббер-конденсатор 3. Здесь спирт отделяется от азота и поступает в холодильник 4.

Полученные таким способом гранулы порошка карбид-связка имеют сферическую форму диаметром 2...20 мкм. Карбидная основа твердосплавной смеси делает ее малопластичной и плохо прессуемой. Поэтому перед прессованием пластин порошок твердосплавной смеси пластифицируют путем

ввода в него 6...15% пластификатора (парафин, воск, раствор каучука в бензине и др.). Благодаря этому улучшается текучесть смеси, уменьшается трение между зернами карбида и, как следствие, усилие прессования.

Прессование заготовок проводили на пресс-автомате КА 0624, схема работы которого представлена на рисунке 3.7 б. Она осуществляется в следующей последовательности:

1. Положение заполнения (точка F).

Неподвижная матрица 2 заполняется порошком до верхнего края. Верхний пуансон 1 перемещается вниз и погружается в матрицу (точка E), уплотняя порошок сверху.

2. Начало перемещения матрицы (точка M₁).

Верхний пуансон 1 достиг своего конечного положения в матрице 2. Матрица с верхним пуансоном синхронно перемещается вниз. Достигается положение прессования, в результате которого порошок уплотняется снизу.

3. Положение прессования (точка P).

Верхний пуансон 1 перемещается вверх. Матрица 2 после короткой выдержки перемещается вниз и достигает положения стягивания.

4. Положение стягивания (точка A).

Заготовка извлекается из пресс-оснастки и сдвигается в сторону.

Таким образом, прессование заготовок на пресс-автомате КА 0624 осуществляется давлением верхнего пуансона 1 с подпрессовкой заготовки нижним пуансоном 3, в результате чего обеспечивается высокая степень равномерности распределения плотности по всему объему заготовки, т. е. малая анизотропия свойств. После прессования заготовки поступают на сушку в электрическую печь непрерывного действия. В процессе сушки при температуре 160...250 °С из заготовок удаляется бензин, если в качестве пластификатора использовали раствор каучука в бензине, частично выгорает пластификатор, а заготовки упрочняются. Далее заготовки попадают в вакуумно-компрессионную печь, внешний вид которой представлен на рисунке 3.8, где перед спеканием из

них полностью удаляют пластификатор. Процесс спекания в печах заключается в последовательном выполнении спекания и горячего изостатического прессования. На первой стадии спекание обеспечивает относительную плотность заготовок пластин около 92...95 %, при которой все поры являются закрытыми. Спекание производят в вакууме для того, чтобы не оставлять газов в закрытых порах.

После достижения указанной плотности вакуум в печи заменяют атмосферой аргона при повышенном (до 10 МПа) давлении, допрессовывая заготовки до беспористого состояния. Благодаря всестороннему сжатию равными по величине давлениями аргона твердый сплав приобретает более однородную структуру и повышенные механические характеристики. График изменения температуры T и давления P во времени τ в вакуумно-компрессионных печах представлен на рисунке 3.9.

Опорные поверхности пластин обрабатывали на двухстороннем плоскошлифовальном станке ELB Star 2 фирмы ELB (Германия), представленном на рисунке 3.10. Схема обработки пластин на станке, показанная на рисунке 3.11, производится торцами двух алмазных кругов 1, 5 между которыми располагаются пластины 2, установленные в ячейки сепаратора 6, совершающего осциллирующее движение относительно шлифовальных кругов. Верхнему шлифовальному кругу 5 сообщается вертикальное перемещение для подвода в рабочую зону, рабочей подачи и отвода. По окончании рабочей подачи производят выглаживание, после чего обработанные пластины выводятся из рабочей зоны для разгрузки.

Алмазные круги, применяемые на этом станке имеют диаметр 500 мм, ширину рабочей поверхности 40 мм и толщину алмазоносного слоя (зернистостью 100/80) 4 мм.

Шлифование осуществляли с использованием смазывающе-охлаждающей жидкости «Укринол – 1», так как применение водных жидкостей приводит к образованию на поверхностях пластин трудноудаляемых окисных пленок.

Шлифование задних поверхностей инструментальных пластин (граней и вершин) производили на плоскошлифовальном станке с ЧПУ АВА-S-FPE-60-30

(Германия), изображенном на рисунке 3.12. На рисунке 3.13 показана схема обработки. В этом случае главные формообразующие движения - поступательное в направлении оси X, вращательные вокруг осей B и C осуществляются с помощью шаговых электродвигателей, управляемых системой числового программного управления (ЧПУ) станка (рисунок 3.13). Такой способ шлифования позволяет производить обработку задних поверхностей пластин любых форм, в том числе пластин, имеющих задний угол на гранях и вершинах.

Шлифование фасок на передних поверхностях пластин производят следующим образом (рисунок 3.16).

После центрирования по наружному контуру пластину 4 зажимают в бабке 5 так, что ее передняя поверхность прижимается к передней неподвижной цапфе 1 таким образом, чтобы толщина пластины не оказывала влияния на ширину фаски. Бабка изделия 5 перемещается по направлению к алмазному шлифовальному кругу 2 и подводит подлежащую обработке режущую кромку (или заднюю поверхность) к копирной линейке 3. Перемещение бабки изделия вперед и сила прижима пластины к копирной линейке обеспечиваются пружиной 6. Алмазный круг подводится к заготовке и производит шлифование фаски с предварительно выбранной подачей на заданную глубину. После выхаживания алмазный круг возвращается в исходное положение.

У пластин, имеющих радиальное закругление вершин, фаски шлифуют за один оборот по всем граням и вершинам. При шлифовании пластин, имеющих фаски на вершинах, после обработки каждой грани и вершины бабка изделия отводится для осуществления поворота пластины на следующую грань.

Станки с ЧПУ для шлифования граней и вершин пластин обеспечивают точность шлифования в пределах $\pm 0,005$ мм, которая достигается благодаря программируемому контролю за размерами и автоматической подналадке. При этом допуск на ширину фаски выдерживается в пределах $\pm 0,02$ мм, а производительность станка составляет 150...250 шт/ч.

После алмазного шлифования пластин их грани имеют малый радиус округления, пилообразную форму и сколы. При использовании таких пластин в

качестве инструмента это приводит к появлению царапин, рисков сколов и других дефектов на обрабатываемом покрытии. Поэтому далее пластины полировали на щеточно-полировальном станке FORMAQSG-1300R6 представленном на рисунке 3.17 а, у которого полировальные щетки совершают сложное планетарное движение. Схема обработки представлена на рисунке 3.17 б.

При этом в качестве щетины использовался конский волос, а в качестве абразивного материала применяли алмазную пасту зернистостью 7/5. В результате достигается стабильная форма режущих кромок с плавным переходом от передней поверхности к задней, снижается шероховатость поверхности пластин.

После полирования пластины протирали этиловым спиртом и направляли на мойку в ультразвуковую ванну. В дно такой ванны заделана диафрагма, соединенная с магнитострикционным или пьезоэлектрическим преобразователем. Колебания от ультразвукового генератора через преобразователь передаются диафрагме, а от нее – моющему раствору. Очищающее действие ультразвуковых колебаний основано на явлении кавитации жидкости.

При распространении ультразвуковых волн в моющем растворе появляются области сжатия и разрежения. Когда при разрежении жидкость не выдерживает созданного ультразвукового напряжения и силы, действующие на молекулы, начинают превышать силы межмолекулярного сцепления, то жидкость разрывается. В местах разрывов возникают мельчайшие пузырьки, наполненные парами жидкости и растворенных в ней газов. Захлопываясь, эти пузырьки оказывают микроударное воздействие на загрязненную поверхность и очищают её.

В очистке участвуют также пузырьки, не связанные с кавитационными явлениями. При образовании ультразвукового поля они приходят в колебательное состояние и также способствуют удалению загрязнений, проникая в зазоры между загрязнениями и поверхностью пластин.

Для мойки инструментальных пластин использовали ультразвуковую линию 1100x450x150 «ВЗПС» производительностью 30000 пластин в смену,

внешний вид которой изображен на рисунке 3.18 а, а ее схема на рисунке 3.18 б. Они представляют собой комплект из семи ультразвуковых и промывочных ванн из коррозионностойкой стали, выполненных в одном корпусе.

Пластины загружают в специальные поддоны, а затем в корзины транспортера. Перенос корзин в ванны осуществляется автоматически в следующей последовательности: 1-3-4-5-2-3-5-6-7 (пластины после полирования) и 4-5-2-3-5-6-7 (чистые пластины) (рисунок 3.18 б).

В качестве моющих растворов в этих ваннах применяли высокощелочной (Кависан-Карбон S), слабощелочной (Кависан-Ультра) и кислотный (Кависан-Карбон) растворы, а также высокоочищенную от примесей ионов деионизированную воду.

Для достижения максимального эффекта очистки в этой машине используют совокупность следующих методов воздействия на загрязнения: ультразвук, барботаж, струи в объеме жидкости.

Нанесение исследуемых покрытий проводилось на экспериментальной установке, представленной на рисунке 5.1.

Хромирование по хрому.

Гальванически осаждаемый хром, как показывает практика, плохо сцепляется с хромовой подложкой. Это связано с быстрым покрытием окисной пленкой внешнего слоя при соприкосновении его с воздухом. В дальнейшем такая пленка образует разделяющий слой.

Хорошее сцепление при последующем хромировании возможно только после удаления образующейся окисной пленки, причем хромирование надо производить незамедлительно, во избежание её нового возникновения. Для этого хромированные изделия сначала нагревают в теплой воде до температуры ванны, а затем переносят либо в ванну хромирования, либо в ванну, специально используемую для этой цели, с одинаковым или схожим составом. Затем производят кратковременную анодную обработку хромированных изделий в течение нескольких секунд. Окисная пленка от этого растворяется, а хромовое покрытие становится шероховатым. Затем меняют полярность подключения или

быстро, без промежуточной промывки, перемещают изделия из ванны травления в хромовую ванну. После этого детали, закрепленные в шпинделе установки, хромируют. Для получения необходимой адгезии наносимого слоя хрома необходимо, чтобы плотность тока, температура электролита и его состав электролита при первом и последующем хромировании были одинаковыми. Вместо переключения полюсов, для достижения необходимого эффекта, изделие перед включением тока можно на несколько секунд замкнуть накоротко со свинцовым анодом. В результате этого возникающий гальванический элемент вызывает электрический ток, приводящий к активизации хромовой поверхности.

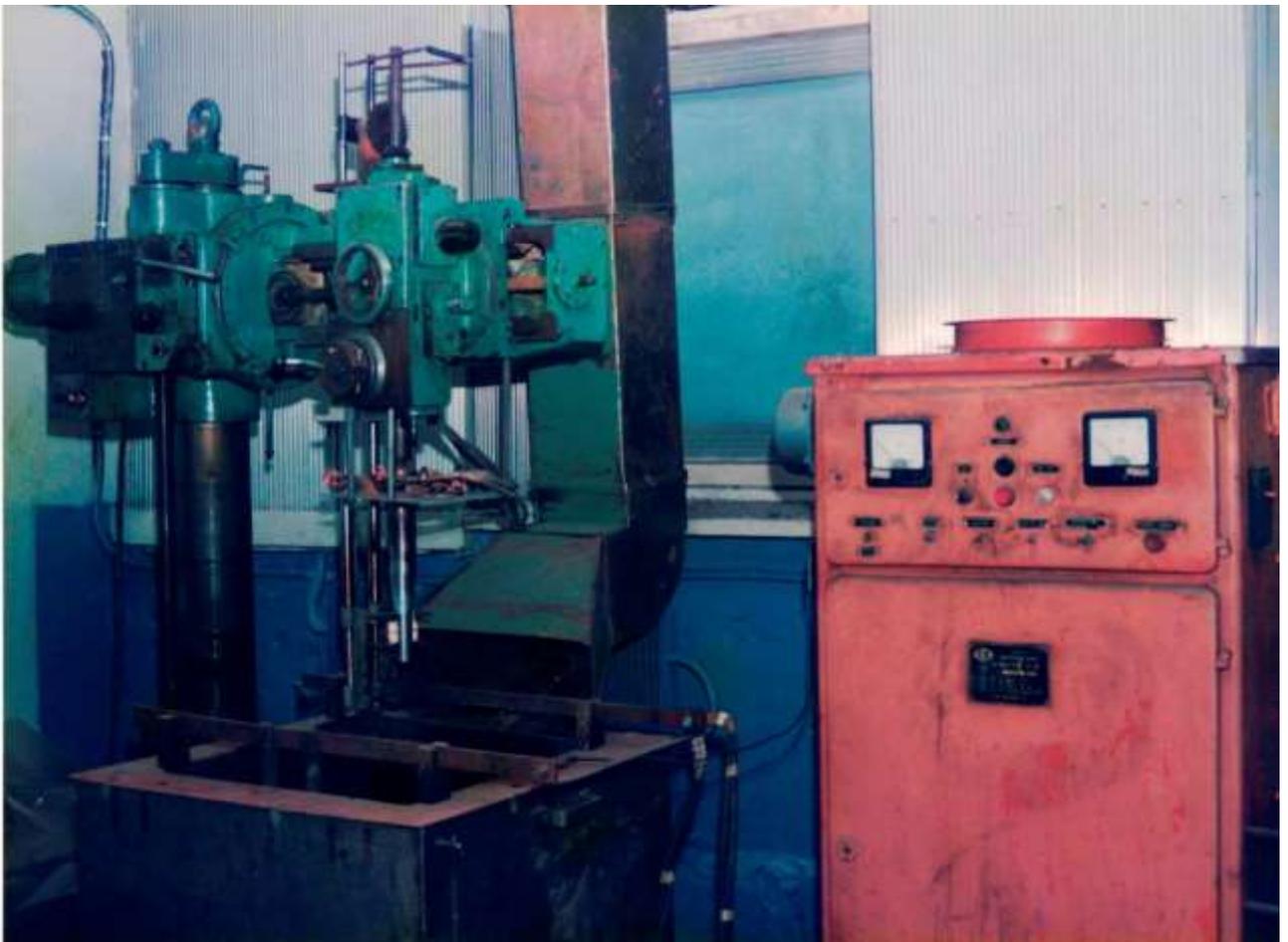


Рисунок 5.1 – Общий вид экспериментальной установки

Электролиты, содержащие фторид вместо сульфата, более пригодны для хромирования по хрому или многослойного хромирования. Это объясняется разъедающими свойствами таких электролитов. В этом отношении удобно

использовать саморегулирующиеся ванны, содержащие электролиты со смешанными кислотами. Осаждение хрома на хромовую поверхность из тетрахроматных ванн также не встречает значительных затруднений. Преимущество подобных ванн заключается в возможности нанесения защитных покрытий на крупногабаритные изделия, которые нельзя полностью погрузить в ванну. Они хромируются в этом случае по частям. Причем хромированные участки, долгое время находившиеся на воздухе, при новом погружении подвергаются нанесению покрытия без каких-либо осложнений. Необходимость производить послойное хромирование с фиксированными параметрами осаждения не позволяет получить качественные осадки, если условия их осаждения заранее неизвестны.

Хромирование алюминия и его сплавов.

Хромирование алюминия может производиться как с декоративной целью, так и для придания поверхности твердости. Поскольку электроотрицательность алюминия ниже, чем у хрома в пассивном состоянии, то при нанесении тонкого декоративного слоя хромового покрытия без защитного промежуточного слоя возникает опасность усиленной коррозии алюминия. Для предупреждения такого эффекта необходимо использовать промежуточный слой из меди, никеля или их сплава. В настоящее время блестящее анодирование придает алюминию устойчивый металлический блеск, который почти не отличается от блеска хромированной поверхности. Поэтому в настоящее время блестящее хромирование алюминия не является вынужденной необходимостью. Исключение составляет случай, когда необходимо получить покрытие специального вида, обладающее особыми свойствами блестящего хрома. Тем не менее, блестящее хромирование алюминия используется широко.

Рассматривая вопрос о твердом хромировании алюминия, необходимо отметить, что этот металл намного мягче хрома, стали и железа. Поэтому тонкий слой твердого хрома на мягком основном металле не выдерживает сильных ударных нагрузок и сжатия. Нанесенное покрытие продавливается или

отслаивается. Твердое хромирование рекомендуется лишь для трущихся деталей, воспринимающих лишь значительные касательные напряжения. При этом покрытие может иметь толщину до 300 мкм и служить хорошей защитой от коррозии. Кроме того, хромированный алюминий недопустимо подвергать термическим нагрузкам. Коэффициенты термического расширения хрома и алюминия сильно различаются в результате чего покрытие растрескивается и теряет защитно-коррозионные свойства.

Необходимым условием для получения высокой адгезии при твердом хромировании алюминиевых деталей является значительная шероховатость подложки. Однако если шероховатость поверхности будет выше некоторой предельной величины, то на формируемом покрытии возможно образование дендритов и наростов, в результате чего полученное покрытие будет отслаиваться. Для устранения этого целесообразно поверхность изделия обдуть тончайшим кварцевым песком, после чего отшлифовать и обезжирить её, а затем непосредственно хромировать в ванне твердого хромирования на режимах, рекомендованных в главе 4.

Матирование поверхности для получения лучшего сцепления поверхностей рекомендуется производить также при помощи разнообразных способов травления. Так как алюминий легко растворяется в кислотах и щелочах, то возможно использование как щелочного, так и кислотного травления. При выборе способа травления необходимо учитывать состав алюминиевого сплава. Ввиду высокой скорости образования окисной пленки, применяют хорошо зарекомендовавший себя способ обработки поверхности, когда после травления получают на алюминии защитную пленку из металла, осажденного контактным способом.

При кислотном травлении используют присадки железа, никеля, марганца, меди, а при щелочном – цинка. При щелочном цинкатном травлении поверхность алюминия разъедается в меньшей степени, что используют при блестящем хромировании. С другой стороны, тончайшие пленки цинка не годятся для непосредственного хромирования, поскольку разрушаются от воздействия

хромового электролита и частично переходят в раствор. В этом случае перед хромированием необходимо дополнительно производить меднение или никелирование.

Для кислотного травления рекомендуется использовать раствор следующего состава: 50 г/л хлористого никеля, 2% плавиковой кислоты и 4% борной кислоты или 50% соляной кислоты и 5 г/л сульфата марганца. Травление происходит при повышенной температуре (30–40° С) в течение 15–30 с. Такому травлению можно подвергать чистый алюминий и его сплавы, содержащие магний или кремний. Растворы, содержащие никель, рекомендуется применять для травления литейных сплавов, а растворы, содержащие марганец — для поковок и катаного материала. Для сплавов, содержащих медь, такое травление непригодно. Для травления сплавов с магнием предлагается раствор, содержащий 15% хлорной меди и 0,5% соляной кислоты. Для травления с осаждением железа рекомендуется раствор хлорного железа в концентрированной соляной кислоте при температуре 95 °С. После такой обработки изделие промывают, никелируют в соответствующей ванне и хромируют.

При хромировании сплавов, содержащих цинк, рекомендуется предварительно осаждать тончайший слой цинка из щелочного цианистого раствора. После чего полученную пленку растворяют в разбавленной серной или азотной кислоте, с последующим покрытием слоем меди толщиной до 5 мкм из цианистой медной ванны.

При нанесении гальванических покрытий на алюминий (и при хромировании в частности) рекомендуется применять способы, которые основываются на отложении промежуточных слоев цинка из щелочных растворов. Подобные способы применимы для декоративного хромирования, поскольку растравливание поверхности алюминия происходит в ограниченном размере. Цинковые промежуточные покрытия могут быть нанесены путем непосредственного осаждения методом погружения или катодным способом. Первой обработкой по способу погружения является легкое травление в растворе,

содержащем 65 г/л хромовой кислоты и 175 г/л серной кислоты при температуре 65 °С в течение от 30 сек до 2 мин.

Хороших результатов можно достигнуть при осаждении гальванических покрытий путем погружения изделия в раствор, содержащий около 720 г/л сульфата цинка и 35 мл/л плавиковой кислоты. Погружение изделия производят при комнатной температуре и незначительном перемешивании раствора в течение 5–60 с. При этом получают высокую адгезию покрытия с алюминиевыми сплавами, содержащими медь, магний и марганец. Кроме того, можно применять растворы, содержащие олово или кадмий, однако получаемое при этом покрытие не обладает никакими преимуществами в сравнении с цинковым покрытием.

Большим недостатком способа непосредственного осаждения цинка являются цинковые промежуточные пленки, имеющие различную структуру и состав в зависимости от типа металла, являющегося основанием. Это создает определенные трудности при хромировании деталей из комбинированных конструкционных материалов. В этом случае электролизом получают тонкое цинковое покрытие, которое затем латунируют гальваническим способом и никелируют. Прочность сцепления толстых покрытий с никелем повышают путем тепловой обработки, после чего покрытия механически обрабатывают и хромируют обычным способом. При указанном приеме применяются следующие стадии обработки.

Первая электролитическая очистка: электролит состоит из 28 г/л едкого натра, 28 г/л цианистого натрия и 14 г/л карбоната натрия. Изделия подвешивают на 3–5 мин на катод при напряжении 7 В и температуре 21 °С, после чего их тщательно промывают.

Кислотное травление: обработка изделия при комнатной температуре в смеси концентрированных серной и азотной кислот, составленных в равной пропорции. Время обработки 2–3 мин. После чего изделие тщательно промывают.

Вторая электролитическая очистка: катодная обработка изделий в электролите, содержащем 14 г/л едкого натра и 14 г/л цианистого натрия, при комнатной температуре, напряжении 7 В, в течение 10–30 с, с последующей

промывкой. Исполнение указанных операций очистки можно варьировать в соответствии с обрабатываемыми изделиями. Дальнейшую обработку изделия производят с учетом материала подложки.

Гальваническое цинкование: электролит состоит из 0,5 г/л хлористого цинка, 0,5 г/л цианистого натрия и 10 г/л едкого натра. Температура комнатная, плотность тока 0,5 А/дм², время выдержки 20 с. В случае простоя ванн цинковые аноды извлекают. Оцинкованные детали должны иметь бронзовую окраску. Темный, голубовато-черный цвет – показатель повышенной толщины цинкового покрытия.

После цинкования детали помещают непосредственно в гальваническую ванну латунирования: электролит состоит из 12 г/л уксуснокислой меди, 12 г/л хлористого цинка, 30 г/л цианистого натрия, 0,9 г/л карбоната натрия и 12 г/л бисульфита натрия. Температура 27–32 °С, плотность тока 0,7–1 А/дм², время выдержки не более 8 с. Материал анодов – латунный лист. Латунное покрытие должно быть бледно-желтого цвета. После цинкования детали особенно тщательно промывают без всякого погружения в кислоту и, по возможности, быстро переносят в ванну никелирования. Электролит ванны никелирования состоит из 250 г/л сульфата никеля, 100 г/л сульфата магния, 5 г/л хлористого натрия, 25 г/л борной кислоты при рН = 5,6. Температура ванны 46 °С, плотность тока 1–1,5 А/дм². Электролит перемешивают сжатым воздухом при непрерывной фильтрации. Площадь деполяризованных никелевых анодов должна быть в 3 раза больше площади поверхности обрабатываемого изделия.

После никелирования изделие нагревают до температуры 230 °С в выдерживают в течение 30 мин. Это ведет к увеличению прочности сцепления никеля. Если покрытие имеет брак, то после тепловой обработки в дефектных местах образуются зоны вспучивания. Хромирование производят по рассчитанным заранее режимам. Все операции проводятся в указанной последовательности без длительных перерывов.

Существенным недостатком данного способа является необходимость тепловой обработки, связанной с дополнительными затратами и тепловыми

деформациями деталей. Кроме того, она нарушает непрерывность процесса. Однако, в настоящее время существует способ, лишенный указанных недостатков. Детали после второй электролитической очистки погружают при комнатной температуре на 3 мин без тока в раствор, состоящий из 525 г/л едкого натра и 100 г/л окиси цинка. В результате образуется темная цинковая пленка, которую растворяют после промывки в 50%-ном растворе азотной кислоты, затем снова производят тщательную промывку детали, гальваническое цинкование первоначальным способом и дальнейшую нормальную обработку. Такая промежуточная обработка настолько улучшает прочность сцепления покрытия, что после никелирования можно не производить тепловой обработки. Указанный способ применяется, прежде всего, для пустотелых алюминиевых изделий.

Хромирование цинка и цинковых сплавов.

Хромирование цинка и его сплавов во многом подобно хромированию алюминия. Цинк, являющийся основным металлом в подложке, обладает высокой электроотрицательностью и низкой твердостью, вследствие чего надо добиваться получения беспористого покрытия для недопущения появления коррозии. При декоративном хромировании необходимо предварительное доброкачественное меднение и никелирование во избежание ускоренной коррозии, которая может явиться следствием гальванической обработки. Соотношения между хромом и цинком здесь еще менее благоприятные, чем нанесении хрома на алюминий, поскольку последний склонен к пассивированию. Для цинка это не характерно, поэтому наличие пор может привести к сплошной коррозии. С другой стороны, для цинка не применимы способы обработки поверхности, аналогичные анодной оксидации алюминия.

Гальваническое хромирование, не являющееся необходимым для алюминия, широко применяется для цинка. Хромированный цинк, как и алюминий, запрещено подвергать ударным нагрузкам и сжатию во избежание растрескивания гальванического покрытия.

При хромировании цинка, из-за его особых свойств, необходимо соблюдать ряд мер для предупреждения возможного брака. Хромовокислый электролит сильно воздействует на цинк. Покрyтия, получаемые при непосредственном хромировании, имеют неоднородную внешнюю структуру. Причем риск отслаивания таких осадков очень велик. Для получения доброкачественных хромированных цинковых деталей надо принимать соответствующие меры, начиная с процесса литья. Плохое, пористое или содержащее окисные включения литье не пригодно для таких целей. Необходимо сохранять поверхностную корку, образующуюся при литье. В противном случае обнажается находящийся под ней менее плотный, сильно пористый металл, который плохо поддается нанесению гальванических покрытий.

Шлифование и полирование, при изготовлении деталей, нужно производить весьма осторожно, без значительных нагрузок на шлифовальный инструмент, во избежание запрессования в мягкую поверхность цинка шлифующих и полирующих материалов. Последующую очистку изделия необходимо производить тщательно при помощи трихлорэтилена или очищающей эмульсии. Использование сильных щелочных сред недопустимо. При щелочном обезжиривании значение рН раствора не должно превышать 9,5. Поскольку при полировании имеется риск появления прочного сцепления полирующей пасты с обрабатываемой поверхностью, то рекомендуется производить очистку струйным методом. Очистка должна следовать непосредственно за полированием во избежание затвердения полирующей пасты на поверхности. После обезжиривания поверхности органическими растворителями изделия просушивают. В противном случае остатки растворителя могут задержаться в порах поверхности, что послужит причиной образования пузырей.

Последние следы загрязнений удаляют при помощи электролитического обезжиривания. В этом случае допускается использовать лишь слабую щелочь (рН ниже 12), а время выдержки не должно превышать 30 с. На производстве часто используют ванну обезжиривания, содержащую 25–40 г/л тринатрий-фосфата или 20 г/л тринатрий-фосфата и 20 г/л метасиликата натрия. Температура

ванны 90 °С, плотность тока 5–6 А/дм². Для анодного обезжиривания, рекомендуемого в меньшей степени, можно использовать раствор, содержащий 20–40 г/л пиррофосфата натрия при температуре 65–80 °С. После обезжиривания необходимо тщательно промыть изделие сначала в горячей, а затем в холодной проточной воде.

После этого проводят кислотное травление детали для активизации запассивировавшейся поверхности. При этом применяют раствор одной из следующих кислот: 1–2% (по объему) плавиковой кислоты, 1–5% соляной кислоты, до 5% серной кислоты, 5–10% фосфорной кислоты. Допускается использование 2%-ного раствора цианистого натрия при температуре 80 °С. Присадки смачивающих веществ оказывают благоприятное влияние. Травление проводят до появления на поверхности детали пузырьков. Далее изделия меднят в нормальной цианистой медной ванне с небольшим количеством свободного цианида. Добавление в медную ванну винно-кислой соли оказывает благоприятное действие на качество медного покрытия. После промывки следует произвести кратковременную нейтрализацию остатков щелочи в 1%-ном растворе серной кислоты. После этого осуществляют матовое или блестящее никелирование в нормальной никелевой ванне и, наконец, хромирование. Во избежание действия коррозии необходимо, чтобы декоративные блестящие хромовые покрытия на цинковой подложке имели достаточную толщину даже при наличии подслоя меди или никеля. Обычная толщина хрома 0,25 мкм слишком мала. Её величина не должна быть меньше 0,8 мкм.

Возможно прямое никелирование цинка, однако производят его в специальных ваннах с низким содержанием никеля. Процесс никелирования начинают при высокой плотности тока, которую затем постепенно снижают. Матовые покрытия подвергаются финишной механической обработке. В связи с этим предпочтительно производить меднение обрабатываемой поверхности непосредственно перед блестящим никелированием. При работе с ваннами блестящего никелирования, дающими ровное покрытие, полирование матовых медных покрытий необязательно.

Цинковые сплавы перед меднением или никелированием могут быть также оцинкованы из щелочной цинковой ванны или гальванически покрыты латунью. Последнюю можно также осадить в блестящем виде из соответствующих ванн.

Указания, приведенные для хромирования цинковых сплавов, могут быть использованы для нанесения хрома на латунь. Однако, непосредственное нанесение слоя хрома недопустимо, поскольку в этом случае наблюдается коррозия основного металла, приводящая к отслаиванию хромового покрытия. Поэтому предварительное меднение или никелирование является необходимым условием.

Непосредственное хромирование цинковых поверхностей допускается, если обрабатываемую деталь предварительно в течение 15 секунд при комнатной температуре выдерживают в растворе, содержащем 200 г/л хромата натрия и 0.9% серной кислоты. Это приводит к возникновению пассивирующей пленки, которая защищает цинк от слишком сильного воздействия хромовой ванны. После тщательной промывки производят хромирование в нормальной хромовой ванне при низкой температуре (25–30 °С) и плотности тока 9–15 А/дм². Матовые хромовые покрытия при этом полируют с большой осторожностью во избежание частичного или полного их снятия. В тетрахроматной ванне хромирование цинка производят без предварительного пассивирования, поскольку цинк стоек к такому типу электролита.

Хромирование свинца и олова.

При хромировании мягких и легко окисляемых металлов: свинца и олова, могут встретиться определенные затруднения. Непосредственное их хромирование нежелательно, поскольку подобные осадки имеют низкую адгезию с подложкой. Сначала производят меднение или латунирование, после чего следует химическая очистка поверхности. Таковую очистку проводят путем травления. Олово травят в 2–5%-ной азотной или соляной кислоте, а свинец – в сильной разбавленной азотной кислоте или в 5–8%-ном растворе цианистого натрия. Далее проводят механическую очистку поверхности песком, пемзой или

стальной щеткой. При механической обработке свинца и олова, так же как и при механической обработке цинка, необходимо следить, чтобы шлифующий или полирующий металл не вдавливался в мягкую поверхность, поскольку он с трудом удаляется, а его остатки препятствуют нанесению покрытия хорошего качества. Меднение можно производить в нормальных медно-цианистых ваннах.

Для непосредственного хромирования олова, свинца или их сплавов рекомендуются хромовые электролиты, содержащие 0,3–1% сульфата и 15–35% уксусной кислоты, например, 250 г/л хромового ангидрида, 50 г/л уксусной кислоты, 1 г/л серной кислоты. Хромирование производят при температуре 34 °С и плотности тока 21,5 А/дм². Допускается применение других электролитов.

Как указывалось ранее, состав электролита хромирования позволяет варьировать качествами получаемых хромосодержащих покрытий и существенно влияет на работу электролитической ванны, что немаловажно знать при получении размерных функциональных осадков.

Хромовая кислота.

Для получения хромосодержащих покрытий в настоящее время применяются исключительно растворы окиси шестивалентного хрома, называемой также трехокисью хрома, хромовым ангидридом или просто хромовой кислотой. Все ванны хромирования работают с нерастворимыми анодами, вследствие чего весь выделяемый металл забирается из раствора. Это вызывает необходимость текущей корректировки электролита путем добавления хромового ангидрида.

Из чистых растворов хромовой кислоты не происходит выделение металла, поэтому необходимо присутствие незначительного количества посторонних анионов – катализаторов. Чаще всего это сульфаты, фториды или кремнефториды. Ввиду ограниченного содержания посторонних анионов (около 1% от общего содержания хромового ангидрида), необходимо употреблять при составлении ванны химически чистый хромовый ангидрид. Если в хромовом ангидриде находятся незначительные количества сульфатов, то они должны быть

определены и учтены при составлении состава электролита. Как правило, допустимое содержание сульфата в хромовом ангидриде не должно превышать 0,2%.

Концентрация хромового ангидрида в электролитах для хромирования по методу ГКО с инструментом из многофазного композиционного материала может колебаться в пределах 180–600 г/л. Однако крайние значения в указанном интервале редко применяют на практике. Рабочие концентрации хромовых ангидридов лежат в пределах 200–400 г/л. Приблизительно можно считать, что разбавленные растворы дают лучший выход по току, а концентрированные – лучше проводят ток, причем при электролизе требуется меньшее напряжение. Концентрированные растворы имеют еще одно преимущество: они менее чувствительны к загрязнениям и колебаниям в составе ванны. Кроме того, они обладают лучшей рассеивающей способностью. Разбавленные растворы в свою очередь дают более твердые хромовые покрытия. Однако указанное различие невелико и не может быть использовано в качестве определяющего фактора при выборе электролита.

Свойства гальванических хромосодержащих покрытий зависят не только от содержания хромовой кислоты, но и от наличия катализаторов в ней, а также от общих условий работы во время электролиза. Этим объясняется часто противоречивое толкование отдельных изменений в составе ванны.

Катализаторы.

В качестве катализаторов применяют сульфаты, фториды, кремнефториды или их смеси. При отсутствии катализатора и при обычной плотности тока хром на катоде не осаждается. При низких катодных потенциалах ток отсутствует. При более высокой катодной поляризации выделяется водород без осаждения хрома, и только при высокой плотности тока и повышенной поляризации на катоде осаждается хром, содержащий окисные включения.

При низкой концентрации катализатора возможно несколько вариантов протекания процесса гальванического осаждения:

- электрический ток не проходит;
- электрический ток проходит, но хромосодержащее покрытие на катоде не выделяется; либо выделяется в виде окисла коричневого цвета, подобного металлическому хрому; либо в виде хрома с большим содержанием окисных включений.

При повышенном содержании катализатора значительно ухудшается рассеивающая способность ванны, а при дальнейшем его возрастании сильно падает выход по току вплоть до прекращения осаждения хромосодержащего осадка. Практика показывает, что при очень высоком содержании серной кислоты (свыше 20%) осаждение хрома с удовлетворительным выходом по току возможно только при сильно повышенной плотности тока.

Посторонние анионы могут быть добавлены в электролит в виде свободной кислоты или любой растворимой соли, чаще всего соли щелочных или щелочноземельных металлов. Обычно применяют сульфаты, которые добавляют в количествах, необходимых для поддержания соотношения CrO_3 к $(\text{SO}_4)_2$ в пределах от 120:1 до 80:1. Чаще всего количество серной кислоты составляет порядка 1 % от употребляемого количества хромового ангидрида. В зависимости от его содержания должна определяться концентрация посторонних анионов в электролите.

Вместо сульфатов или наряду с ними в ванну добавляют фториды или кремнефториды. Наиболее благоприятной концентрацией для фторид-ионов является величина 1,5–2,5% от общего содержания хромового ангидрида, а для кремнефторид-ионов – 1,2–4%. При добавлении фторидов создается некоторое преимущество в сравнении с сульфатами. Заметно повышается выход по току, увеличивается твердость хромосодержащего покрытия, в особенности для хрома, выделяемого из растворов, содержащих только кремнефтористоводородную кислоту. С другой стороны, фторидсодержащие ванны более чувствительны к колебаниям в составе электролита и его загрязнению, особенно железом. Подобные ванны требуют более тщательного корректирования и наблюдения, в

сравнении с сульфатсодержащими, причем аналитический контроль содержания фторидов значительно сложнее.

Кроме того, фторсодержащие ванны обладают высокой агрессивностью по отношению к анодному и катодному материалу, что затрудняет их широкое внедрение.

В настоящее время анионы сульфата и кремнефторида добавляют одновременно в виде труднорастворимых солей. Растворимость этих солей такова, что насыщенный их раствор даёт желаемую концентрацию посторонних анионов. При этом необходимо учитывать зависимость растворимости от температуры электролита. Характерной особенностью приготовленных таким образом хромовых ванн являются колебания температуры. Целесообразно избегать таких колебаний особенно с сильными кратковременными изменениями.

Трехвалентный хром.

Наряду с хромовой кислотой и посторонними анионами хромовые ванны всегда содержат некоторое количество трехвалентного хрома. Он может быть введен в ванну перед началом работы или получен из хромовой кислоты путем добавления восстановителей: лимонной, винной, щавелевой кислот или сахара. Чаще всего на производстве он образуется при электролизе во время так называемой «проработки» ванны. В этом случае трехвалентный хром возникает вследствие восстановления хромовой кислоты на катоде через трехвалентный хром, который в результате диффузии или конвекции удаляется из непосредственного прикатодного слоя (катодной пленки) и попадает в гомогенный электролит. Эти распределенные в электролите ионы в дальнейшем не восстанавливаются в металлический хром, а оказывают определенное влияние на работу ванны и должны рассматриваться как её составная часть. Вполне возможно, что трехвалентный хром находится в электролите не только в виде Cr^{3+} , но и в виде соединения с хромовой кислотой и сульфатом.

Даже небольшое количество трехвалентного хрома заметно улучшает рассеивающую способность ванны. Правда, одновременно с этим несколько

уменьшается катодный выход по току. Однако, выгода от увеличения рассеивающей способности более значима. Если ванна хромирования составлена из чистой хромовой кислоты и катализатора, надо принимать во внимание ограниченную рассеивающую способность ванны во время ее «проработки». Во избежание этого нужно уже при составлении ванны вводить в нее трехвалентный хром. Это достигается добавлением сульфата в форме сернокислого хрома или иного восстановителя, посредством которого определенное количество хромовой кислоты восстанавливается до трехвалентного хрома, улучшающего рассеивающую способность ванны с самого начала ее работы.

При чрезмерно низкой концентрации трехвалентного хрома рассеивающая способность ванны заметно снижается. Кроме того, для инициализации процесса хромирования требуется на начальных этапах повышенная плотность тока. При превышении допустимой концентрации таких ионов сильно падает электропроводность ванны и повышается напряжение. Ухудшаются также и свойства хромовых покрытий. Они получаются матовыми хрупкими и пятнистыми.

Теоретические расчеты, подтвержденные экспериментальной проверкой результатов, показали, что оптимально допустимое содержание трехвалентного хрома в ванне, свободной от загрязнений, при нанесении дисперсно-упрочнённых композиционных размерных герметичных покрытий составляет 1–2% от количества находящегося в нем хромового ангидрида. При одновременном присутствии других металлов, и в особенности железа, допустимое количество трехвалентного хрома значительно уменьшается.

При систематической работе ванны один раз установленная концентрация трехвалентного хрома не изменяется. Всякие изменения концентрации этого иона свидетельствуют о неправильном соотношении площади анодов и катодов. Этот недостаток устраняется увеличением анодной поверхности при слишком высокой концентрации трехвалентного хрома и уменьшением её при слишком малой концентрации. Несмотря на то, что поддержание определенной концентрации трехвалентного хрома менее значимо влияет на работу ванны в сравнении с

поддержанием концентрации катализатора, при общем анализе электролита ванны рекомендуется регулярно проводить аналитический контроль содержания данного иона.

5.2 Разработка рекомендаций по сочетанию технологических режимов хромирования из условия получения заданных характеристик качества наносимого слоя

В машиностроении вообще, и в гальваническом производстве в частности, оптимальное сочетание технологических режимов подразумевает определение области получения покрытий заданного качества с заранее заданными физико-механическими и, как следствие, эксплуатационными свойствами при возможно максимальной производительности процесса.

Исследования производительности процесса в зависимости от параметров осаждения проводились в главе 4.

Область получения покрытий заданного качества.

В ходе проведения экспериментальных исследований (глава 4) было выявлено, что при плотности тока до 12 кА/м^2 удавалось получить покрытия со сжимающими, остаточными напряжениями. Дальнейшее увеличение тока приводит к переходу остаточных напряжений сжатия в растягивающие напряжения с одновременным увеличением их по абсолютной величине.

Этот процесс, по всей видимости, объясняется увеличением плотности тока, повышающей скорость осаждения покрытия, а, следовательно, и толщину элементарного слоя хрома, осаждаемого между двумя последовательными ходами инструмента. При определенных давлении и плотности тока между двумя последовательными ходами инструмента осаждается такая толщина элементарного слоя, которая не испытывает полного упругопластического деформирования осаждаемого слоя. В результате чего в формируемом покрытии создаются растягивающие остаточные напряжения. Предельной плотностью тока

для создания сжимающих остаточных напряжений в покрытии является величина 12 кА/м^2 .

В ходе испытаний было установлено, что с увеличением температуры электролита от 50 до 65 °С остаточные напряжения из растягивающих, уменьшаясь по абсолютной величине, переходят в сжимающие. Для хромовых покрытий, осаждаемых стандартным методом, увеличение температуры электролита приводит к уменьшению остаточных напряжений растяжения. Это объясняется увеличением температуры электролита и уменьшением скорости осаждения гальванического хрома. Следствием этого служит уменьшение толщины элементарного слоя дисперсно-упрочненного покрытия, осаждаемого между двумя последовательными ходами инструмента. Каждый слой при этом претерпевает значительную деформацию, приводящую к возникновению сжимающих остаточных напряжений в покрытии.

Практические испытания показали, что с увеличением давления инструмента на обрабатываемую поверхность удается получать напряжения сжатия в нём. Однако, при возрастании давления свыше $1,5$ МПа на покрытии наблюдаются вспучивания и шелушения, вызванные переупрочнением покрытия и повышенной концентрацией частиц инструментального материала. Давление ниже $1,0$ МПа не даёт полного пластического деформирования растущих слоев осадка. Осаждаемые покрытия получают с растягивающими остаточными напряжениями и характерной развитой сеткой трещин.

Режимы восстановления деталей беспористым хромированием:

| | |
|---|------------|
| плотность тока i , кА/м^2 | 10 – 12; |
| температура электролита, °С | 60 – 65; |
| давление p , МПа | 1,0 – 1,5; |
| частота вращения детали, об/мин | 80; |
| количество двойных ходов инструмента, мин^{-1} | 100 – 160. |

Из технологических рекомендаций видно, что каждый режимный параметр имеет определённый интервал значений. Это объясняется экспериментально

установленной зависимостью критического давления инструмента от скорости осаждения покрытия. Определенное сочетание этих параметров может привести к получению некачественных покрытий с шелушениями и вспучиванием (Приложение В).

Налицо усадка покрытия. Однако, как указывалось в главе 4, она значительно меньше, чем покрытий у покрытий без инструментальных включений. Это ведет к расширению номенклатуры силовых гидроагрегатов, на которые возможно нанесение герметичного износостойкого дисперсно-упрочненного покрытия. Аналогично предложенный метод расширяет и верхнюю границу получения качественных покрытий, определяемую по методу ГМО. Это объясняется возможностью повышения давления инструмента при фиксированной скорости осаждения покрытия и замене силы трения скольжения, служащей причиной внедрения инструментальных частиц при методе ГКО с однофазным композиционным инструментом, на силу трения качения, при использовании метода ГКО с многофазным композиционным инструментом. При этом происходит повышение концентрации инструментального материала в покрытии, которое ведет к уменьшению усадки самого покрытия и, как следствие, отсутствию трещин на поверхности осадка. Однако повышать давление до бесконечности невозможно. Превышение определенного значения давления приводит к переупрочнению покрытия, его вспучиванию и шелушению. На рисунке 5.2 кривая, показывающая предельное значение сочетания скорости осаждения и давления инструмента обозначена цифрой 2. Из рисунка видно, что нанесение ДУГКП на основе хрома раскрывает более широкие технологические возможности для получения герметичных износостойких покрытий.

Снижение требований к ограничению технологических параметров при получении качественных хромосодержащих покрытий предлагаемым методом объясняется особенностями реализации метода: применением специально разработанного двухкомпонентного композиционного инструментального материала, способного наносить базовый и финишный слои гальванического покрытия, позволяющего осуществлять контролируемый перенос

инструментального материала и добиваться герметичных износостойких осадков с толщиной до 650 мкм на сторону.

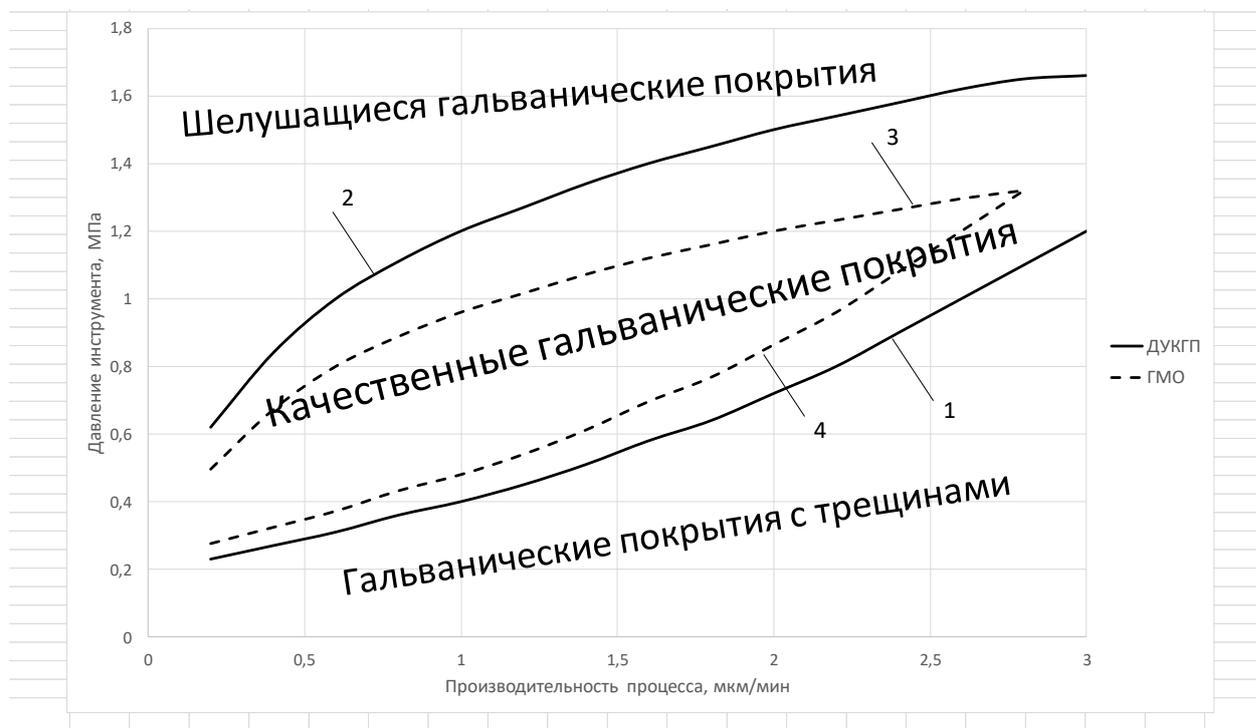


Рисунок 5.2 – Взаимосвязь качества осаждаемых покрытий с давлением инструмента и скоростью осаждения

5.3 Расчет экономической эффективности

Расчёт экономической эффективности разработанной технологии производился по отраслевой методике [53, 58] на примере Воронежской области, по ценам 2020 года.

В качестве исходных данных для расчета примем данные из таблицы 5.1.

Экономический эффект от внедрения технологии нанесения ДУГКП определяется следующим образом:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_k + \mathcal{E}_{бр}, \quad (5.1)$$

где: \mathcal{E} – суммарный экономический эффект, руб.

\mathcal{E}_k – экономический эффект от повышения качества, руб.

$\mathcal{E}_{бр}$ – экономический эффект, определяемый снижением брака, руб.

Таблица 5.1 – Влияние режимных параметров на производительность процесса

| № п/п | Наименование исходных данных | Условное обозначение | Ед. изм. | Исходные данные | |
|-------|---------------------------------------|----------------------|----------|--------------------|--|
| | | | | Стандартные методы | ГКО с инструментом из многофазного композиционного материала |
| 1 | Годовая программа | n | шт. | 150 | 150 |
| 2 | Технологическая себестоимость | C | руб. | 504 621 | 426 987 |
| 3 | Капитальные вложения | K | руб. | 1 099 384 | 1 461 676 |
| 4 | Нормативный коэффициент эффективности | E_n | б.р. | 0,15 | 0,15 |
| 5 | Процент брака | $K_{бр}$ | б.р. | 0,5 | 0,03 |

Приведенные затраты при нанесении гальванических покрытий по стандартной и разработанной технологиям определяем по формуле:

$$Z = C + E_n \cdot K, \quad (5.2)$$

где: Z – приведенные затраты, руб.

$$Z_1 = C_1 + E_n \cdot K_1 = 504621 + 0,15 \cdot 1099384 = 669528,6 \text{ руб.}$$

$$Z_2 = C_2 + E_n \cdot K_2 = 426987 + 0,15 \cdot 1461676 = 646283,4 \text{ руб.}$$

Для определения экономического эффекта от повышения надёжности, ресурса и качества восстановленных гидроцилиндров в целом воспользуемся соотношением:

$$\mathcal{E}_k = Z_1 \cdot \frac{P_1 + E_n}{P_2 + E_n} - Z_2, \quad (5.3)$$

где: P – коэффициент реновации, определяемый как

$$P = \frac{1}{T},$$

где: T – срок службы гидроцилиндра до ремонта.

Благодаря нанесению на обрабатываемую поверхность герметичных износостойких покрытий с низкой шероховатостью, обеспечиваемой финишным слоем, срок службы изделий составляет более 5000 мото-час, в то время как для

изделий с покрытиями, нанесенными по стандартной технологии, этот показатель не превышает 3000 мото-час.

Срок службы гидроцилиндров до ремонта составляет:

$$T_1 = \frac{3000}{240} = 12,5.$$

$$T_2 = \frac{5000}{240} = 20,8.$$

Коэффициенты реновации для стандартных и дисперсно-упрочненных покрытий:

$$P_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{12,5} = 0,08.$$

$$P_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{20,8} = 0,05.$$

В этом случае экономический эффект от повышения качества составит:

$$\mathcal{E}_к = 669528,6 \cdot \frac{0,08 + 0,15}{0,05 + 0,15} - 646283,4 = 123674,49 \text{ руб.}$$

Потери от брака из-за негерметичности деталей по слою хрома определим по формуле:

$$П = C_{бр} \cdot K_{бр}. \quad (5.4)$$

где: $C_{бр}$ – себестоимость изготовления деталей до образования брака;

$K_{бр}$ – процент брака.

Эмпирически установлено, что $K_{бр1}=0,5$, а $K_{бр2}=0,03$. Для указанных значений определим потери от брака:

$$П_1 = C_{бр1} \cdot K_{бр1} \cdot n = 504621 \cdot 0,5 \cdot 150 = 37846575 \text{ руб.}$$

$$П_2 = C_{бр2} \cdot K_{бр2} \cdot n = 426987 \cdot 0,5 \cdot 150 = 32024025 \text{ руб.}$$

Экономический эффект от использования технологии нанесения ДУГКП на основе хрома составит величину:

$$\mathcal{E}_{бр} = П_1 - П_2 = 37846575 - 32024025 = 5822550 \text{ руб.} \quad (5.5)$$

Из приведенных вычислений ясно, что преимущества использования ДУГКП на основе хрома заключаются не только от повышения качества

получаемых изделий, но и в снижении затрат на потери, связанные с браком гидроцилиндров.

Суммарный экономический эффект, согласно (5.1), будет составлять:

$$\mathcal{E} = 123674,49 + 5822550 = 5946224,49 \text{ руб.}$$

5.4 Выводы по главе

1. Разработаны и экспериментально проверены технологические рекомендации для применения метода ГКО с инструментом из многофазного композиционного материала при осаждении хромовых покрытий на различные типы материалов в различных типах рабочих сред.

2. Установлено влияние компонентов рабочей среды на характер работы ванны хромирования.

3. Выявлена зависимость производительности процесса хромирования по методу нанесения ДУГКП от режимных параметров осаждения. Установлено, что скорость осаждения покрытий гальваноконтakтным хромированием в 7,4 раза превосходит скорость нанесения хромовых покрытий по стандартной технологии и в 2,15 раз по технологии ГМХ.

4. Установлены области получения покрытий различного качества и выявлена зависимость режимных параметров для обеспечения надёжности силовых гидравлических узлов сельскохозяйственной техники.

5. Определён суммарный экономический эффект при использовании технологии нанесения размерного износостойкого герметичного дисперсно-упрочненного композиционного гальванического покрытия на основе хрома в сравнении со стандартными технологиями. В ценах 2020 года он составил 5 946 224,49 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Решая поставленную научную проблему повышения надежности силовых гидравлических узлов сельскохозяйственной техники, в диссертационной работе разработан и исследован новый способ нанесения износостойкого размерного герметичного дисперсно-упрочненного композиционного гальванического покрытия, исключающий его механическую обработку (патент РФ № 100520), для упрочнения и восстановления силовой гидравлической аппаратуры, позволяющий исключить риск получения распространенного дефекта – течи по хрому.

2. Представлена модель для определения размеров наполнителя композиционного материала с целью обеспечения заданных физико-механических свойств получаемого покрытия, позволяющая прогнозировать напряжения в зависимости от условий его осаждения.

Установлено, что во избежание переупрочнения формируемого покрытия необходимо контролировать глубину зарождения пластической области в процессе гальваноконтрастного осаждения, поскольку при контакте инструмента с восстанавливаемой поверхностью деформации подвергается не только верхний слой покрытия, но и нижележащие слои. В предположении допущений механики сплошных сред определено и практически подтверждено, что пластическая область зарождается не на поверхности покрытия, а на глубине 127 мкм, создавая разветвленную сетку трещин. Поэтому в процессе нанесения дисперсно-упрочненного композиционного гальванического покрытия необходимо корректировать давление инструмента до получения необходимой степени упрочнения формируемых слоёв.

3. Проведенные лабораторные испытания, базирующиеся на разработанной программе экспериментальных исследований, позволяющей оценить по оригинальной предложенной методике физико-механические свойства дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий (патент РФ № 2581412) позволили установить:

– Для композиционных покрытий на основе хрома, обладающих наименьшим сродством к веществам дисперсной фазы, определён рациональный состав композиции базового слоя: оксид алюминия – 5% по массе; карбид титана – 3% по массе; остальное – хромовая матрица. Дисперсность частиц – 0,9 мкм. Композиционное гальваническое покрытие при этом составе имеет наиболее высокую микротвердость.

Рациональное содержание дисульфида молибдена при нанесении финишного слоя электролитического покрытия на основе хромовой матрицы, имеющего наибольшую микротвердость: дисперсность частиц – 0,9 мкм; концентрация – 2,5% по массе.

– Режимные параметры осаждения базового и финишного слоя дисперсно-упрочненного композиционного гальванического покрытия: плотность тока 10–12 кА/м², температура электролита 60–65 °С, давление инструмента 1,0–1,5 МПа, скорость главного движения 70–100 мин⁻¹ гарантируют получение герметичных осадков. Возникающие при данном режиме нанесения в осаждаемом покрытии остаточные напряжения сжатия не превосходят по абсолютной величине предел прочности хрома, что гарантирует получение покрытия с хорошей адгезией к основе, как на наружных, так и на внутренних цилиндрических поверхностях.

– Скорость нанесения базового слоя дисперсно-упрочненного гальванического композиционного покрытия на основе хрома превышает аналогичный показатель процесса гальваномеханического хромирования более чем в 2,15 раза, а стандартного хромирования в 7,4 раза. Скорость нанесения финишного слоя выше аналогичного показателя базового слоя в 1,27 раза, что объясняется использованием токопроводящего материала – дисульфида молибдена.

– Значение шероховатости поверхности получаемых покрытий не превышает значения 0,04 мкм, что позволяет использовать разработанный метод в качестве финишной обработки прецизионных деталей, исключая механическую обработку, и объясняется деформацией слоев осадка в процессе обработки, а

также сокращением времени активного свободного роста кристаллов.

– Определена выравнивающая способность при восстановлении гидроцилиндров нанесением финишного износостойкого размерного герметичного дисперсно-упрочненного композиционного гальванического покрытия, характеризуемая толщиной наносимого осадка как функцией величины погрешности формы детали.

– Скорость уменьшения адгезии покрытия при увеличении его толщины для стандартного хромового покрытия в 5,7 раза выше, чем для дисперсно-упрочненного гальванического композиционного покрытия на основе хрома.

– Введение мелкодисперсного наполнителя в гальваническую матрицу вызывает уменьшение степени наводораживания дисперсно-упрочненного гальванического композиционного покрытия в 2,35–3,46 раза по сравнению с покрытиями, полученными методом гальваномеханического хромирования и в 3,82–4,61 раза по сравнению со стандартными покрытиями.

– Установлено, что коррозионная стойкость дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий на основе хрома превосходит аналогичный показатель композиционных покрытий, полученных из электролитов-суспензий в 6 раз, а стандартного хромового покрытия в 12 раз.

– При плотности тока 10 кА/м^2 , температуре электролита $62 \text{ }^\circ\text{C}$, давлении инструмента 1 МПа и частоте вращения детали 80 мин^{-1} удаётся получать износостойкое размерное герметичное дисперсно-упрочненное композиционное гальваническое покрытие толщиной до 650 мкм.

– Дисперсно-упрочненное гальваническое композиционное покрытие на основе хрома значительно повышает стойкость к износу контактной пары как на этапе приработки, так и на установившемся режиме эксплуатации. Наличие включений дисульфида молибдена в контактном слое покрытия, играющих роль наполнителя хромовой матрицы, снижает коэффициент трения и, как следствие, повышает износостойкость детали и уплотнителей. Совокупная интенсивность изнашивания пар трения с нанесенным дисперсно-упрочненным гальваническим композиционным покрытием на основе хрома меньше, чем у стандартных пар для

штока в 1,29 раза, а для гильзы – в 1,25 раз.

– Коэффициент трения контактирующих пар, имеющих дисперсно-упрочненное гальваническое композиционное покрытие, ниже, чем у образцов пар трения серийного штока в 1,61 раза, а гильзы – в 1,41 раза; допустимая нагрузка стандартных пар трения ниже, чем пар трения с нанесенным дисперсно-упрочненным гальваническим композиционным покрытием у штока в 1,34 раза, а у гильзы в 1,19 раз; значения рабочих нагрузок пар трения с дисперсно-упрочненным гальваническим композиционным покрытием выше для штока в 1,43 раза, а для гильзы в 1,74 раза по сравнению со стандартными узлами.

– Металлографические и рентгеноструктурные исследования композиционных покрытий на основе хрома, полученных предлагаемым методом, показали возможность осаждения мелкозернистого покрытия, близкого к структуре покрытия типа «металлическое стекло», которое, как известно, характеризуется отсутствием пористости, износоустойчивостью, высокой механической прочностью.

– В ходе стендовых испытаний гидравлических утечек на серийных гидроцилиндрах было определено, что скорость перемещения гидроштока, вызванная утечками рабочей жидкости, в случае серийного покрытия в 1,94 раза больше, чем при использовании дисперсно-упрочненных гальванических композиционных покрытий.

4. В результате проведения эксплуатационных испытаний было установлено, что вероятность безотказной работы гидроцилиндров с нанесенными дисперсно-упрочненными гальваническими композиционными покрытиями на основе хрома в 1,08 раза выше в сравнении со стандартными гидроцилиндрами.

5. На основании проведённых теоретических и экспериментальных исследований спроектировано и изготовлено оборудование и средства технологического оснащения, а также разработана технология для осуществления процесса нанесения герметичного размерного композиционного дисперсно-упрочненного гальванического покрытия на основе хрома.

В результате было установлено: при плотности тока до 12 кА/м^2 возможно нанесение покрытия со сжимающими остаточными напряжениями, что гарантирует получение герметичных осадков. С увеличением температуры электролита от 50 до $65 \text{ }^\circ\text{C}$ остаточные напряжения из растягивающих, уменьшаясь по абсолютной величине, переходят в сжимающие. Это связано с уменьшением скорости осаждения гальванического хрома и, как следствие, уменьшением толщины элементарного слоя дисперсно-упрочненного покрытия, осаждаемого между двумя последовательными ходами инструмента. Каждый слой при этом претерпевает значительную деформацию, приводящую к возникновению сжимающих остаточных напряжений в покрытии. Увеличение давления инструмента на обрабатываемую поверхность приводит к возникновению напряжений сжатия в таком покрытии. Однако, при возрастании давления свыше $1,5 \text{ МПа}$ на поверхности детали наблюдаются вспучивания и шелушения, вызванные переупрочнением покрытия и повышенной концентрацией частиц инструментального материала. Давление ниже $1,0 \text{ МПа}$ не даёт требуемого наклёпа растущих слоев осадка. Осаждаемые покрытия получают с растягивающими остаточными напряжениями и характерной развитой сеткой трещин.

6. Определён суммарный экономический эффект при использовании технологии нанесения размерного износостойкого герметичного дисперсно-упрочненного гальванического композиционного покрытия на основе хрома в сравнении со стандартными технологиями при изготовлении и ремонте силовой гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники. В ценах 2020 года он составил $5\,946\,224,49$ руб.

Предложения для реализации

Для ремонтных предприятий рекомендуется модернизация существующих технологий восстановления силовой гидравлической аппаратуры путем внедрения технологических процессов, позволяющих получать функциональные износостойкие герметичные дисперсно-упрочненные композиционные покрытия

на основе хрома. Нанесение подобных покрытий следует проводить по модернизированной технологии подтвержденной патентами (патенты РФ на изобретение №100520, 258412) и представленной в данной работе. Для этих целей в качестве наполнителя рекомендуется использовать в базовом слое карбид титана (шлифпорошок КТ 1/0 ПОТ ТУ 1798-111-75420116-2006 – 3%) и оксида алюминия (шлифпорошок 25А М1 ГОСТ 28818-90 – 5%), а в финишном слое – дисульфид молибдена марки ДМИ-7, выпускаемый в Российской Федерации в соответствии с ТУ 48-19-133-90 – 2,5%.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Большой интерес для развития рассматриваемой темы представляют исследования в области теории упругости и пластичности многослойных композиционных материалов, а также размерного нанесения покрытия при восстановлении и упрочнении контактируемых поверхностей высокоресурсных деталей сельскохозяйственной техники. Они позволят более ясно представить механизм формирования и изменения напряженно-деформированного состояния в гальванических осадках и, как следствие, точнее прогнозировать предел их прочности. Кроме того, одной из приоритетных задач является изучение влияния других наполнителей в хромовой матрице на свойства получаемых покрытий с целью расширения спектра возможного использования таких осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский – 2-е изд. М. : Наука, 1976. – 280 с.
2. Аксенов, А.С. Гальваническое хонингование / А.С. Аксенов, М.В. Сочнев – М. : ВИМИ, 1986. – 16 с.
3. Андрианов, М.И. Хромирование пресс-форм, режущего инструмента и штампов в саморегулирующемся электролите / М.И. Андрианов // Новая прогрессивная технология и технологическое оборудование в машиностроении. Москва : НИИМаш. – 1973. – №8. – С. 2–14.
4. Астахов, М.В. Износостойкость композиционных хромовых покрытий, полученных методом гальваноконтактного осаждения / М.В. Астахов, С.Ю. Жачкин // Известия вузов. Машиностроение : Сб. науч. тр. Москва. – 2004.
5. Афанасьев, Б.В. Установка для гальваномеханической обработки наружных цилиндрических поверхностей / Б.В. Афанасьев // Прогрессивные способы восстановления деталей машин и повышения их прочности. Кишинев : КСХИ. – 1979. – С. 29–31.
6. Афанасьев, Е.А. Влияние дисульфида молибдена на физико-механические свойства композиционных покрытий на основе железа / Е.А. Афанасьев, В.И. Серебровский // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 9. – С. 77–79.
7. Афанасьев, Е.А. Упрочнение и восстановление деталей машин электроосажденными композиционными покрытиями на основе железа с применением дисульфида молибдена: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / Афанасьев Евгений Андреевич. – Курск, 2015. – 17 с.
8. Балаев, Е.И. Исследование технологических параметров гальванического хонингования отверстий. / Е.И. Балаев, Я.В. Хусаинов, С.П. Петрова // Электрофизические и электрохимические методы обработки. Москва : НИИМаш. – 1982. – Вып.4. – С. 3–4.

9. Балаев, Е.И. Экспериментальные исследования абразивно-гальванической обработки / Е.И. Балаев, В.К. Лин, А.А. Ивкин // Электрофизические и электрохимические методы обработки. Москва : НИИмаш. – 1976. – Вып.8. – С. 14–16.
10. Баранчиков, В.И. Обработка специальных материалов в машиностроении / В.И. Баранчиков, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов – М. : КолосС, 2004. – 264 с.
11. Батищев, А.Н. Восстановление деталей гальванопокрываниями на ремонтных предприятиях / А.Н. Батищев, И.Г. Голубев – М. : АгроНИИТЭИИТО. – 1987. – 25 с.
12. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т.М. Башта и др. – М. : Машиностроение. – 1982. – 423 с.
13. Березкин, В.Г. Формоизменение металлов при обработке давлением / В.Г. Березкин – М. : Машиностроение. – 1973. – 154 с.
14. Бильнер, Я.М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я.М. Бильнер и др. – Минск : Высшая школа. – 1985. – 382 с.
15. Бобриков, Ю.В. Технология восстановления золотниковых пар судовых машин при ремонте хромированием с одновременным хонингованием : – дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Бобриков Юрий Викторович. – Ленинград, 1985. – 194 с.
16. Бобриков, Ю.В. Физико-механические свойства покрытий при хромировании с одновременным хонингованием / Ю.В. Бобриков // Ремонт судов речного флота : Сб. науч. тр. ЛИВТ. – Ленинград, 1985. – С. 112–115.
17. Богорад, Л.Я. Катодно-механическое хромирование. / Л.Я. Богорад, В.А. Касьян, Л.К. Кнопина и др. // Отраслевой журнал. – 1984. – №10. – С. 30–32.
18. Богорад, Л.Я. Хромирование / Л.Я. Богорад. – 5-е изд., Л. : Машиностроение, 1984. – 96с.
19. Болотин, В.В. К расчету макроскопических постоянных сильно изотропных композиционных материалов / В.В. Болотин, Москаленко В.Н. // Изв. АН СССР. – МТТ. – № 3. – 1969. – 108 с.

20. Брондз, Л.Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов / Л.Д. Брондз. – М. : Машиностроение, 1986. – 184 с.
21. Бырдин, А.П. Зависимость скорости главного и вспомогательного движений на установке ГМХ для получения качественных хромовых покрытий / Бырдин А.П., Жачкин С.Ю. // Нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении: Межвуз. сб. научн. трудов. – Воронеж. – 1999. – С. 33–37.
22. Ваграмян, А.Т. Методы исследования электроосаждения металлов / А.Т. Ваграмян, З.А. Соловьева // М.: Изд-во АН СССР. – 1955. – 448 с.
23. Ваграмян, А.Т. Теория и практика электролитического хромирования / А.Т. Ваграмян, Д.Н. Усачев. – М. : Изд-во АН СССР. – 1967. – 27 с.
24. Вандышев, В.А. Техника и вооружение / В.А. Вандышев, Ф.А. Аюпов, В.Ф. Молчанов. – М. : Машгиз. – 1956. – № 10. – С. 23–24.
25. Ван дер Варден, Б.Л. Математическая статистика / Б.Л. ван дер Варден. – М. : Иностранная литература, 1960. – 435 с.
26. Ванин, Г.А. Микромеханика композиционных материалов / Г.А. Ванин. – Киев : Наукова думка, 1985. – 302 с.
27. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 564 с.
28. Воробьев, Л.Н. Технология машиностроения и ремонт машин / Л.Н. Воробьев. – Учебник для вузов. М. : Высшая школа, 1981. – 344 с.
29. Вороницын, И.С. Исследование механических свойств хромовых покрытий, применяемых для упрочнения и восстановления деталей машин / И.С. Вороницын. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 47 с.
30. Вячеславов, П.М. Гальванотехника благородных и редких металлов / П.М. Вячеславов, С.Я. Грилнхес, Г.К. Буркат, Е.Г. Круглова. – Л. : Машиностроение, 1970. – 248 с.
31. Вячеславов, П.М. Методы испытаний электролитических покрытий / П.М. Вячеславов, Н.М. Шмелева. – Л. : Машиностроение, 1977. – 88 с.
32. Гальванические покрытия в машиностроении. В 2-х кн. Кн 1 / Под ред. М.А. Шлугера. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с.

33. Гаркунов, Д.Н. Долговечность трущихся деталей машин / Д.Н. Гаркунов, А.А. Старосельский. – М. : Машиностроение, 1967. – 126 с.
34. Герасименко, А.А. Определение параметров электрохимических процессов осаждения покрытий / А.А. Герасименко, В.И. Микиток – М. : Metallurgy, 1980. – 111 с.
35. Гинберг, А.М. Инженерная гальванотехника в приборостроении / Под ред. А.М. Гинберга. – М. : Машиностроение, 1977. – 512 с.
36. Грилихес, С.Я. Электролитические и химические покрытия. Теория и практика / С.Я. Грилихес, К.И. Тихонов. – Л : Химия. Ленинградское отделение, 1990. – 288 с.
37. Грин, А. Большие упругие деформации и нелинейная механика сплошной среды / А. Грин, Дж. Адкинс. – М. : Мир, 1965. – 455 с.
38. Губкин, С.И. Теория обработки металлов давлением / С.И. Губкин. – М. : Metallurgizdat, 1947. – 532 с.
39. Дюмин, И.Е. Современные методы организации и технологии ремонта автомобилей / И.Е. Дюмин, В.А. Какуевичкий, А.С. Силкин. – К. : Техника, 1970. – 218 с.
40. Емелин, М.И. Защита машин от коррозии в условиях эксплуатации / М.И. Емелин, А.А. Герасименко. – М. : Машиностроение, 1980. – 224 с.
41. Жачкин, С.Ю. Автоматизация процесса восстановления деталей гальваническим наращиванием металла / С.Ю. Жачкин // Теория и практика машиностроительного оборудования: Тез. докл. международной научно-технической конференции. Воронеж : ВГТУ, 1996. – С. 97–98.
42. Жачкин, С.Ю. Антикоррозионная защита металла методом гальваноконтактного осаждения / С.Ю. Жачкин, Д.Г. Янов // Нетрадиционные методы обработки. Выпуск 6: Межвузовский сб. научн. тр. Воронеж : ВГТУ, 2003. – С. 110–111.
43. Жачкин, С.Ю. Восстановление деталей плунжерных пар дисперсно-упрочненным хромовым покрытием / С.Ю. Жачкин // Нетрадиционные методы

обработки. Выпуск 6 : Межвузовский сб. научн. тр. Воронеж: ВГТУ, 2003. – С. 99–103.

44. Жачкин, С.Ю. Восстановление деталей сельхозмашин методом холодного нанесения гальванических композитных хромовых покрытий: дис. ... д-ра тех. наук : 05.20.03 / Жачкин Сергей Юрьевич. – М., 2005. – 367 с.

45. Жачкин, С.Ю. Гальваномеханическое наращивание металла при ремонте машин / С.Ю. Жачкин // Гибкоструктурные нетрадиционные технологии в машиностроении и приборостроении : Сборник научных трудов. Воронеж : ВГТУ, 1996. – С.67–72.

46. Жачкин, С.Ю. Закономерность механического контакта инструмента при нанесении композитных хромовых покрытий / С.Ю. Жачкин // Инновации в авиационных комплексах и системах военного назначения. Сб. науч.-метод. материалов науч. практ. конф. ВАИУ, 2009. – Вып. 32. – С. 42–46.

47. Жачкин, С.Ю. Износостойкость покрытия для восстановления и изготовления деталей машин / С.Ю. Жачкин, М.В. Астахов // Технология металлов : Ежемес. производственный, научно-тех. и учебно-метод. журнал. : Москва, 2005. – С. 40–43.

48. Жачкин, С.Ю. Исследование износостойкости композитных хромовых покрытий / С.Ю. Жачкин, П.В. Цысоренко // Упрочняющие технологии и покрытия. Москва : Машиностроение. – 2009. – №11. – С. 25–28.

49. Жачкин, С.Ю. Исследование шероховатости поверхности композитных гальванических покрытий / С.Ю. Жачкин, П.В. Цысоренко, И.Г. Шашков // Теория и практика машиностроительного оборудования. Воронеж : ВГТУ. – 2007. – Вып. 15. – С. 64–69.

50. Жачкин, С.Ю. Нанесение толстослойных герметичных хромовых покрытий методом ГМХ / С.Ю. Жачкин, М.И. Чижов // Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин : Тез. докл. семинара. Москва : МДНТП. – 1990. – С. 15–16.

51. Жачкин, С.Ю. Особенности нанесения хромовых покрытий методом ГКО на мягкие конструкционные материалы / Жачкин С.Ю., Коростылев А.В. //

Проблемы и решения в области нетрадиционных технологий : Материалы научно-практической конференции. Вып.1. Воронеж : ВГТУ. – 2002. – С. 8–10.

52. Жачкин, С.Ю. Особенности получения шероховатости поверхности покрытий при методе ГКО / С.Ю. Жачкин // Нетрадиционные методы обработки. Выпуск 6 : Межвузовский сб. научн. тр. Воронеж : ВГТУ. – 2003. – С. 107–110.

53. Жачкин, С.Ю. Разработка и исследование способа восстановления деталей гальвано-механическим хромированием: дис. ... канд. тех. наук : 05.03.01 / Жачкин Сергей Юрьевич. – Воронеж, 1992. – 130 с.

54. Жачкин, С.Ю. Расход рабочей среды при восстановлении деталей методом гальваноконтантного осаждения (ГКО) / Жачкин С.Ю., Смоленцев В.П. // Нетрадиционные методы обработки : Межвуз. сб. научн. трудов, часть 2. Воронеж : ВГТУ. – 2002. – С. 96–101.

55. Жачкин, С.Ю. Расчет электрических и химических параметров восстановления деталей по методу гальваноконтантного осаждения (ГКО) / С.Ю. Жачкин, А.И. Болдырев // Нетрадиционные методы обработки : Межвуз. сб. научн. трудов, часть 2. Воронеж : ВГТУ. – 2002. – С.101–106.

56. Жачкин, С.Ю. Управление качеством поверхностного слоя при восстановлении деталей хромированием / С.Ю. Жачкин // Теория и практика машиностроительного оборудования : Тез. докл. международной научно-технической конференции. Воронеж : ВГТУ. – 1996. – С. 96–97.

57. Жачкин С.Ю. Управление качеством хромовых покрытий при гальваноконтантном осаждении / С.Ю. Жачкин, А.П. Бырдин // Современная электротехнология в промышленности центра России. Сборник трудов. Тула : ТулГУ. – 2003. – С. 69–75.

58. Жачкин, С.Ю. Холодное восстановление деталей машин методом гальваноконтантного осаждения покрытий / Жачкин С.Ю., Астахов М.В. // Научные проблемы и перспективы развития, ремонта, обслуживания машин, восстановления и упрочнения деталей : Материалы международной научно-технической конференции. Москва : ГНУ ГОСНИТИ. – 2004. – С. 34–39.

59. Жачкин, С. Ю. Холодное гальваноконтактное восстановление деталей : монография / С.Ю. Жачкин. – Воронеж : ВГТУ, 2002. – 138 с.
60. Железнов, Е.В. Электроосаждение хромовых покрытий из хромовокислых электролитов в присутствии дисперсных фаз вюрцитоподобного VN, TiN, WC и детонационных алмазов : Дис. ... канд. техн. наук : 05.20.20 / Железнов Евгений Валерьевич. – М., 2017. – 197 с.
61. Жендарева, О.Г. Анализ гальванических ванн / О.Г. Жендарева, З.Х. Мухина. – М. : Химия, 1970. – 248 с.
62. Жендарева, О.Г. Методы корректировки электролита / О.Г. Жендарева. – М. : Химия, 1972. – 154 с.
63. Иванова, Н.Д. Способы получения черных хромовых покрытий. Информационное письмо / Иванова Н.Д., Тараненко Н.И. – К. : Наукова думка, 1975. – С. 23.
64. Иванова, Н.Д. Электрохимические бифункциональные системы / Н.Д. Иванова, С.В. Иванов // Усп. хим. – 1993. – Т. 62., вып.10. – С. 963–974.
65. Ильин, В.А. Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание / В.А. Ильин. – Л. : Машиностроение, 1983. – 87 с.
66. Калмуцкий, В.С. Оптимизация технологии осаждения износостойких покрытий / В.С. Калмуцкий. – Кишинев : Штинца, 1973. – 96 с.
67. Кальбус, Г.Л. Стенды для испытания тракторных гидроприводов / Г.Л. Кальбус. – М. : Агропромиздат, 1985. – 96 с.
68. Кержиманов, Е.С. Исследование процесса восстановления деталей тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин контактным электролитическим хромированием : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Кержиманов Евгений Сергеевич. – Москва : МИСИ, 1966. – 208 с .
69. Кижнер, А.Х. Ремонт трубопроводной арматуры электростанций / А.Х. Кижнер. – М. : Высш. школа, 1986. – 144 с.
70. Константинов, В.В. Материаловедение для гальваников / В.В. Константинов. – М. : Высш. школа, 1984. – 87 с.

71. Коттрелл, А.Х. Дислокация и пластическое течение в кристаллах / А.Х. Коттрелл. – М. : Metallurgizdat, 1958. – 267 с.
72. Крагельский, Н.В. Трение и износ / Н.В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 183 с.
73. Кряжов, В.М. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники механизированной наплавкой с применением упрочняющей технологии / В.М. Кряжов. – М. : ГОСНИТИ, 1972. – 178 с.
74. Кудрявцев, Н.Т. Электролитические покрытия металлами / Н.Т. Кудрявцев. – М. : Химия, 1979. – 352 с.
75. Лайнер, В.И. Защитные покрытия металлов / В.И. Лайнер. – М. : Metallurgiya, 1974. – 338 с.
76. Лайнер, В.И. Комбинированное хромирование для защиты от коррозии и механического износа / В.И. Лайнер, О.А. Петрова. – М. : ЦИТЭИН, 1959. – 57 с.
77. Левитский, Г.С. Хромирование деталей машин и инструментов / Г.С. Левитский. – М. : Машиностроение, 1972. – 71 с.
78. Липин, А.И. Восстановление деталей машин нанесением металлических и неметаллических покрытий / А.И. Липин // Материалы заводского опыта. Москва : НИИМаш, 1974. – С. 4-56.
79. Максимчук, В.П. Водородное растрескивание высокопрочных сталей после нанесения гальванохимических покрытий / В.П. Максимчук, С.П. Половников – М. : Энергоатомиздат, 2002. – 320 с.
80. Макушок, Е.М. Механика трения / Е.М. Макушок. – Минск : Наука и техника, 1974. – 252 с.
81. Маликов, В.Н. Влияние отделочно-упрочняющей обработки алмазным выглаживанием на физико-механические и эксплуатационные свойства деталей с металлопокрытиями / В.Н. Маликов, Л.А. Хворостухин, В.А. Торнаев // Прогрессивные процессы упрочнения поверхностным пластическим деформированием. М. – 1974. – С. 54–56.
82. Малинин, Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М. : Машиностроение, 1975. – 399 с.

83. Малянов, В.Н. Гальваническое наращивание металла с одновременной обработкой / В.Н. Малянов, Г.И. Эжиев // Техника в сельском хозяйстве. – 1984. – № 2. – С. 53–54.
84. Малянов, В.Н. Опыт применения гальванического осаждения и хонингования / В.Н. Малянов, Б.С. Деминцев // Вестник машиностроения. – 1980. – № 9. – С. 60–61.
85. Матулис, Ю.Ю. Вопросы теории хромирования / Ю.Ю. Матулис. – Вильнюс : Госполитиздат Литовской ССР, 1959. – 7 с.
86. Матулис, Ю.Ю. Теория и практика электролитического хромирования / Ю.Ю. Матулис, М.А. Мицкус. – Вильнюс : Госполитиздат Литовской ССР, 1957. – 31 с.
87. Михайлов, А.А. Обработка деталей с гальваническими покрытиями / А.А. Михайлов. – М. : Машиностроение, 1981. – 144 с.
88. Молодык, Н.В. Восстановление деталей машин / Н.В. Молодык, Б.А. Лангрет, А.К. Бредун. – Киев : Урожай, 1985. – 160 с.
89. Молчанов, В.Ф. Восстановление и упрочнение деталей автомобилей хромированием / В.Ф. Молчанов. – М. : Транспорт, 1981. – 176 с.
90. Молчанов, В.Ф. Комбинированные электролитические покрытия / В.Ф. Молчанов, Ф.А. Аюпов, В.А. Вандышев, В.М. Дзицюк. – Киев : Техн., 1976. – 174 с.
91. Молчанов, В.Ф. Повышение долговечности и надежности работы деталей машин, механизмов и приборов хромированием в саморегулирующемся электролите с добавкой бихромата калия / В.Ф. Молчанов, М.К. Рыбаков. – К. : КВИАУ, 1968. – 219 с.
92. Молчанов, В.Ф. Скоростное хромирование / В.Ф. Молчанов. – Киев : Техника, 1965. – 250с.
93. Молчанов, В.Ф. Хромирование в саморегулирующихся электролитах / В.Ф. Молчанов. – Киев : Техника, 1972. – 155 с.
94. Молчанов, В.Ф. Эффективность и качество хромирования деталей / В.Ф. Молчанов. – Киев : Техника, 1979. – 229 с.

95. Новиков, И.И. Дефекты кристаллической решетки металлов / И.И. Новиков. – М. : Metallurgy, 1975. – 208 с.

96. ОСТ 3-6446-88. Электролиты хромирования. Методики выполнения измерений содержаний компонентов. – М. : Стандартинформ, 1988. – 21 с.

97. Пеньков, Н.А. Влияние дисперсной фазы наполнителя на свойства композитного хромового покрытия / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, О.А. Сидоркин, С.В. Нелысов // Труды ГОСНИТИ. – 2017. – Т. 126. – С. 168–175.

98. Пеньков, Н.А. Влияние кинематики движения инструмента на формирование износостойкого покрытия / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов, М.А. Краснова // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т. 14. № 2. – С. 142–148.

99. Пеньков, Н.А. Влияние плазменной обработки на структуру, фазовый состав и микротвердость стали Р6М5 / Н.А. Пеньков // Журнал «Научное образование». – № 3(8). – 2020. – Номер публикации: 15-2006171903.

100. Пеньков, Н.А. Влияние режимов электролиза на микротвердость дисперсно-упрочненных композитных материалов на основе железа / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Р.Н. Задорожний, С.В. Нелысов // Труды ГОСНИТИ. – 2017. – Т. 128. – С. 55–61.

101. Пеньков, Н.А. Восстановление гидроцилиндров дисперсно-упрочненным гальваническим композитным покрытием на основе хрома : монография / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова, О.А. Сидоркин. – Воронеж: ВГТУ, 2017. – 160 с.

102. Пеньков, Н.А. Восстановление изношенной внутренней поверхности гильз цилиндров дизельных двигателей композитным гальваническим покрытием / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, М.Н. Краснова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – № 5(161). – С. 225–227.

103. Пеньков, Н.А. К вопросу моделирования струйного осаждения гальванических композитных покрытий при различных углах атаки / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, М.В. Киргинцев, И.А. Спицын // Материалы международной научно-практической конференции «Энергоэффективность и

энергосбережение в современном производстве и обществе». – Ч.1. – 2018. – С. 247–250.

104. Пеньков, Н.А. Моделирование влияния размеров и концентрации упрочняющей фазы наполнителя на свойства дисперсно-упрочненных композитных гальванических покрытий / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков // Труды ГОСНИТИ. – 2017 г. – Т. 129. – С. 193–198.

105. Пеньков, Н.А. Моделирование качества восстановления деталей гальваническими композитными покрытиями при струйном методе осаждения / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, М.В. Киргинцев, Р.Н. Задорожний // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2019. – № 7. – С. 30–33.

106. Пеньков, Н.А. Моделирование механического воздействия инструмента при получении гальванических композитных покрытий / С.Ю. Жачкин, М.Н. Краснова, Н.А. Пеньков, А.И. Краснов // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 120. – С. 130–135.

107. Пеньков, Н.А. Моделирование процесса осаждения композитных покрытий на основе хрома / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифонов // Виртуальное моделирование прототипирование и промышленный дизайн. – 2018. – Вып. 4. – С. 59–63.

108. Пеньков, Н.А. Моделирование режимов осаждения композитных гальванических дисперсно-упрочненных покрытий при восстановлении деталей сельхозмашин / Н.А. Пеньков, С.Ю. Жачкин, В.П. Лялякин, М.Н. Краснова // Труды ГОСНИТИ. – 2018 г. – Т. 131. – С. 237–243.

109. Пеньков, Н.А. Оценка модуля упругости композитных гальванических покрытий при их послойном осаждении / С.Ю. Жачкин, А.И. Завражнов, Н.А. Пеньков, А.В. Мартынов, Р.Н. Задорожний // Инженерные технологии и системы. – Т.31. – №3. – 2021. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202103.430-448.

110. Пеньков, Н.А. На специальную тему: дис. ... канд. тех. наук: 20.02.17 / Пеньков Никита Алексеевич. – Воронеж, 2015. – 157 с.

111. Пеньков, Н.А. Обеспечение износостойкости композитных покрытий на основе хрома / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков // Технический сервис машин. – 2019. – № 2(135). – С. 170–177.

112. Пеньков, Н.А. Обеспечение качественно-точностных характеристик при восстановлении деталей автотранспорта / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, М.Н. Краснова, А.А. Плахотин, Р.Н. Задорожний // М. : Технический сервис машин. – №1(138). – 2020. – С. 93–99.

113. Пеньков, Н.А. Оборудование для размерного нанесения гальванических композитных покрытий / Н.А. Пеньков. – Журнал «Научное образование». – № 3(8). – 2020. – Номер публикации: 15-2006171905.

114. Пеньков, Н.А. Определение оптимальной скорости нанесения композитных гальванических покрытий / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Р.Н. Задорожний, О.П. Багно // Международная научно-техническая конференция «Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства». – 2019. – С. 16–17.

115. Пеньков, Н.А. Повышение износостойкости деталей гидроприводов прессового оборудования гальваническими композитными покрытиями / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Р.Н. Задорожний // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2017. – № 9. – С. 29–32.

116. Пеньков, Н.А. Обеспечение качественно-точностных характеристик при восстановлении деталей автотранспорта / Пеньков Н.А., Жачкин С.Ю., Завражнов А.И., Сидоркин О.А. // Технический сервис машин. – Т.59. – №3(144) – С. 116–121. – DOI 10.22314/2618-8287-2021-59-3-116-121.

117. Пеньков, Н.А. Повышение надежности контактных поверхностей подъемного механизма путем комбинированной плазменной обработки / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, М.Н. Краснова, Г.И. Трифонов // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2017. – № 1. – С. 140–145.

118. Пеньков, Н.А. Системный анализ при моделировании напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя при нанесении композитных

покрытий методом ГКО / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, В.В. Михайлов, Г.В. Зибров // Вестник МичГАУ. – 2013. – № 6. – С. 63–67.

119. Пеньков, Н.А. Управление внутренними напряжениями в гальванических композитных покрытиях на основе железа / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, О.А. Сидоркин, С.В. Нелысов // Труды ГОСНИТИ. – 2017. – Т. 129. – С. 183–188.

120. Пеньков, Н.А. Устройство для формирования трубчатых изделий из композиционных материалов : пат. № 2581412 / С.Ю. Жачкин, Н.В. Жачкина, Ю.С. Пенькова, В.Ф. Лазукин, О.А. Сидоркин, Н.А. Пеньков // Российская Федерация: МПК7 В29С53/04. Заявитель и патентообладатель : ФГОУ ВПО ВГТУ. – № 2014118172/05, заявл. – 05.05.2014; опубл. – 20.04.2016. – Бюл. № 11 – 4 с.

121. Пеньков, Н.А. Устройство получения композитных гальванических покрытий на внутренних поверхностях : пат. № 100520 / С.Ю. Жачкин, П.В. Цысоренко, Н.А. Пеньков, О.А. Сидоркин, А.А. Живогин // Российская Федерация: МПК С25Д 5/22. Заявитель и патентообладатель : ФГОУ ВПО ВГТУ. – № 2010116716/02; заявл. – 27.04.2010; опубл. – 20.12.2010. – Бюл. № 35. – 6 с.

122. Перене, Н.С. Электроосаждение никеля в условиях механической активации поверхности катода (1. Микроструктура покрытий) / Н.С. Перене, Р.А. Рагаускайте, А.А. Баранаускас и др. // Тр. АН Лит. ССР. Сер. Б. – 1979. – Т.1(110). – С. 37–43.

123. Перене, Н.С. Электроосаждение никеля в условиях механической активации поверхности катода (2. Особенности осаждения в проточном и непроточном электролитах) / Н.С. Перене, Р.А. Рагаускайте, А.А. Баранаускас и др. // Тр. АН Лит. ССР. Сер. Б. – 1981. – Т.3(124). – С. 3–10.

124. Петров, Ю.Н. Гальваномеханическое осаждение покрытий как способ восстановления изношенных деталей машин / Ю.Н. Петров, В.Н. Малянов, Н.И. Корнейчук // Прогрессивные способы восстановления деталей машин и повышения их прочности. – Кишинев : КСХИ. – 1979. – С. 48–51.

125. Петров, Ю.Н. Осаждение железных и хромовых покрытий гальваномеханическим способом / Ю.Н. Петров, Н.И. Корнейчук, В.А. Черемпей и др. // Тез. докл. 9-й Всесоюзн. науч.-техн. конф. по электрохимической технологии «Гальванотехника-87». – Казань. – 1987. – С. 197–199.

126. Петров, Ю.Н. Основы ремонта машин / Ю.Н. Петров, А.И. Селиванов, Г.П. Шаронов. – М. : Колосс, 1972. – 527 с.

127. Петров, Ю.Н. Особенности гальванического процесса хромирования / Ю.Н. Петров, Н.И. Корнейчук, В.А. Черемпей // Твердые износостойкие гальванические и химические покрытия : Материалы семинара. – М. : МДНТП. – 1984. – С. 31–35.

128. Петров, Ю.Н. Ремонт автотракторных деталей гальваническими покрытиями / Ю.Н. Петров, В.П. Косов, М.П. Стратулат // Кишинев : Картя Молдовеняскэ, 1976. – 273 с.

129. ПИ № 1046-75. Производственная инструкция ВИАМ. Хромирование. – Взамен инструкции № 593-65. – М. : Стандартиформ, 1975. – 32 с.

130. ПИ № 1064-75 Производственная инструкция. Эксплуатация и обслуживание гидроцилиндров. Утв. ВИАМ. – М. : Стандартиформ, 1975. – 24 с.

131. Плеханов, И.Ф. Расчет и конструирование устройств для нанесения гальванических покрытий / И.Ф. Плеханов. – М. : Машиностроение, 1988. – 224 с.

132. Плешаков, В.В. Влияние поверхностного пластического деформирования на герметичность хромовых покрытий / В.В. Плешаков, В.С. Кудряшов // Пути снижения металлоемкости и трудоемкости при создании изделий. – М. : МДНТП. – 1979. – С. 163–167.

133. Плешаков, В.В. Повышение надежности деталей, восстанавливаемых гальваническими покрытиями / В.В. Плешаков. – М. : Россельхозиздат, 1963. – 56 с.

134. Понтрягин, Л.С. Обыкновенные дифференциальные уравнения / Л.С. Понтрягин. – М. : Наука, 1970. – 331 с.

135. Поперека, М.Я. Внутренние напряжения электролитических осаждаемых покрытий / М.Я. Поперека. – Новосибирск : Западно-сибирское книжное изд-во, 1966. – 335 с.

136. Попов В.А. Исследования структуры хром-алмазных покрытий. / В.А. Попов, П.Я. Детков, А.Н. Кириченко, М.Н. Ковальчук // Известия РАН. Серия физиков. – 2005. – Т. 69. – № 4. – С. 520–523.

137. Применение катодно-механического хромирования штока гидроамортизатора : Отчет о НИР/ Иванов В.П. – Москва : № ГР Г66281; инв. №001.86, 1986. – 7 с.

138. Процесс хромирования с одновременным механическим воздействием : Каталог «Межотраслевая выставка «Прогресс - 83». – М. : ВИМИ, 1983. – С. 31.

139. Пугачевский, К.М. Применение металлопокрытий при производстве и ремонте деталей машин / К.М. Пугачевский, В.Ф. Молчанов. – К. : КРДЭНТП, 1977. – 128 с.

140. Пурин, Б.А. Комплексные электролиты в гальванотехнике / Б.А. Пурин, А.В. Цера, Э.А. Озола, И.Л. Витиня. – Рига : Лиесма, 1978. – 267 с.

141. Пурин, Б.А. Электроосаждение металлов из пирофосфатных электролитов / Б.А. Пурин. – Рига: Зинатне, 1975. – 172 с.

142. Редько, Ф.Ф. Гальванохиноирование – технология и оборудование / Ф.Ф. Редько, Э.Я. Гродзинский // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – М. : НИИмаш. – 1982. – С. 8–11.

143. Редько, Ф.Ф. Разработка процесса гальванохиноирования в СССР / Ф.Ф. Редько, Э.Я. Гродзинский, А.З. Бродский // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – М. : НИИмаш. – 1982. – С. 1–3.

144. Румянцев, Г.И. Экспериментальные исследования процесса гальванического хиноирования прецизионных деталей топливно-гидравлической аппаратуры / Г.И. Румянцев, В.И. Пестриков, Ю.В. Поляков. – Тр. НИАТ № 391, 1980. – 6 с.

145. Рыбаков, М.К. Теория и практика применения износостойких и защитно-декоративных покрытий / М.К. Рыбаков, В.Ф. Молчанов. – К. : КРДЭНТП, 1969. – 262 с.
146. Рябой, А.Я. Повышение ресурса авиационных деталей из высокопрочных сталей / А.Я. Рябой, Л.Д. Брондз. – М. : Машиностроение, 1977. – 104 с.
147. Рябой, А.Я. Получение газонепроницаемых хромовых покрытий / А.Я. Рябой // Защита металлов. – 1976. – Т. 12. – Вып.3. – С. 339.
148. Саньков, В.М. Лабораторные испытания износостойкости деталей, восстановленных хромовыми покрытиями контактным электролитическим способом / В.М. Саньков, А.Г. Шеховцов // Тр. МГМИ. – 1981. – Т.70. – С. 3–5.
149. Сайфуллин, Р.С. Комбинированные электролитические покрытия и материалы / Р.С. Сайфуллин. – М.: Химия, 1972. – 81 с.
150. Сайфуллин, Р.С. Композиционные покрытия и материалы / Р.С. Сайфуллин. – М. : Химия, 1977. – 272 с.
151. Севастьянов, В.Б. Теория и практика хромирования / В.Б. Севастьянов, В.М. Дзыцюк. – К. : КРДЭНТП, 1976. – 160 с.
152. Северный, А.Э. Защита сельскохозяйственной техники от коррозии / А.Э. Северный, Е.А. Пучин. – М. : АгроНИИТЭИИТО, 1990. – 51 с.
153. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение-1, 2001. – 912 с.
154. Справочное руководство по гальванотехнике / Под ред. В.И. Лайнера. – М. : Металлургия, 1972. – 487 с.
155. Сулов, А.Г. Технологическое обеспечение контактной жесткости соединений / А.Г. Сулов. – М. : Наука, 1977. – 101 с.
156. Тананаев, И.В. Физикохимия ультрадисперсных систем / И.В.Тананаев – М. : Наука, 1987. – 230 с.
157. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М. : Наука, 1975. – 576 с.

158. Физическое материаловедение: Учебник для вузов / Под общей ред. Б.А. Калина. – М. : МИФИ, 2007. – ISBN 978-5-7262-0821-3. Том 1. ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА. – 636 с.

159. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т.1 / Г.М. Фихтенгольц. – М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1947. – 690 с.

160. Фомичев, В.Т. Хромирование в саморегулирующемся электролите с органическими добавками. Прикладная электрохимия / В.Т. Фомичев, Г.П. Губаревич, А.М. Озеров // Теория, технология и защитные свойства гальванических покрытий. Межвузовский сборник научных трудов. Казань : КХТН. – 1990. – С. 126–127.

161. Фрейденталь, А. Математические теории неупругой сплошной среды / А. Фрейденталь, Х. Гейрингер. – М. : Физматгиз, 1962. – 349 с.

162. Фридель, Ж. Дислокации / Ж. Фридель. – М. : Мир, 1967. – 644 с.

163. Фролов, К.В. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 1995. – 864 с.

164. Цысоренко, П.В. Разработка технологии размерного восстановления внутренних цилиндрических поверхностей гильз гидроцилиндров сельскохозяйственной техники композитным покрытием на основе хрома : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Цысоренко Павел Владимирович. – Мичуринск-наукоград, 2012. – 132 с.

165. Черкез, М.Б. Хромирование / М.Б. Черкез. – Л. : Машиностроение, 1971. – 112 с.

166. Чижов, М.И. Гальваномеханическое хромирование деталей машин / М.И. Чижов, В.П. Смоленцев. – Воронеж: ВГТУ, 1998. – 162 с.

167. Чижов, М.И. Установка ГМХ для нанесения толстых (до 200 мкм) герметичных размерных хромовых покрытий / М.И. Чижов, С.Ю. Жачкин // Интенсификация машиностроительного производства на основе внедрения перспективного оборудования и технологии : Тр. отрасл. конф. молодых специалистов. – Воронеж : НИИАСПК. – 1990. – С. 78–79.

168. Шероховатость поверхности: Технологическое обеспечение параметров. РТМ 24.004129-78. – М. : Минтяжмаш. – 1978. – 45 с.
169. Шлугер, М.А. Коррозия и защита металлов / М.А. Шлугер, Ф.Ф. Ажогин, Е.А. Ефимов. – М : Metallurgiya, 1981. – 216 с.
170. Altmayer, F. Plat & Surf Finish / F. Altmayer. – 1991. – 78. – No 6. – P. 8–12.
171. Anani, A. Appl. Electrochem / A. Anami, Z. Mao, S. Srinivasan, A.J. Appleby. – 1991. – 21. – 683 p.
172. Fink, C.G. Trans. Am. Electrochem. Soc. / C.G. Fink, J.D. Prince // 1928. – 54. – 315 p.
173. Fransaer, J. Electrochem Soc. / J. Fransear, J.P. Celis, J.R. Roos // 1992. – 139. – 413 p.
174. Keddam, M. J. Appl. Electrochem / M.J. Keddam, S. Senyarich, H. Takenouti, P. Bernard // 1994. – 24. – 1037 p.
175. Lohmeyer, S. Galvanotechnik / S. Lohmeyer // 1991. – 82. – №11. – 3842 p.
176. Patent 1269194. MCF⁵ C 23 D 5/22. Electroplate honing apparatus / M.P. Ellis, R.J. Gavasso (GB) Published – 06.04.72.
177. Patent 1364182. Electroplate and honing apparatus / M.P. Ellis, K.N. Kaahe (GB) Published. – 21.08.74.
178. Patent 3616289 (US). Electroplate honing method / M.P. Ellis, R.J. Gavasso-published. – 26.10.71.
179. Patent 3637469 (US). Electroplate honing method / M.P. Ellis, R.J. Gavasso-published. – 25.01.72.
180. Patent 3751346 (US). Combined plating and honing method and apparatus / M.P. Ellis, R.J. Gavasso-published. – 07.08.73.
181. Patentschrift 1217171. Verfahren und vorrichtung zur massgenanen Bearbeiten der Aussen – und/oder Innenfloiehe von rohrformigen Korpern / Veroffenthiche. – 18.06.66.
182. Penkov, N.A. About modeling kinematic parameters of deposition from composite electrochemical coatings for restoration of details for agricultural machines /

S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, A.I. Zavrazhnov, S.N. Sharifullin // IOP Conf. Series: Materials science and engineering. – 570 – 2019. – 012104. – DOI:10.1088/1757-899X/570/1/012104.

183. Penkov, N.A. Analytical calculation of elastic modulus of composite electroplating coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.N. Krasnova // MATPR 10241. – 2019. – P. 2515–2517.

184. Penkov, N.A. Determination of the elastic modulus of the composite dispersion-strengthened galvanic coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.A. Krasnova // Engineering studies. – 2018. – Issue 3(2). – Vol. 10. – P. 729–737.

185. Penkov, N.A. Dispersion-hardened composite coatings with desired physical and mechanical properties / Zhachkin S.Yu., N.A. Penkov, M.N. Krasnova // Engineering Computations. – 2017. – № 8(2). – Vol. 34. – P. 2577–2586.

186. Penkov, N.A. The impact of the strengthening phase filler on the properties of composite dispersion-strengthened galvanic coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.A. Krasnova, A.I. Zavrazhnov // Engineering computations. – 2018. – № 8(2). – Vol. 35. – P. 3245–3251.

187. Penkov, N.A. The technical definition of permanent dispersion-strengthened composite multilayer galvanic coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.A. Krasnova // Australian journal of education and science. – 2018. – Vol. XI. – №1 (21). – P. 238–253.

188. Penkov, N.A. To the question of the influence on pressure of the tool on the processed surface when applying the dispensible-strengthened composite galvanic coatings / S.Yu. Zhachkin, N.A. Penkov, M.N. Krasnova // MATPR 10241. – 2019. – P. 2512–2514.

189. Penkov N.A. Wear-resistance of composite galvanic chrome coatings / Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Krasnova M.N. // Engineering Studies. – 2017. – Issue 3(2). – Vol. 9. – P. 529–536.

190. Suzuki, Y. J. Electrochem. Soc. / Y. Suzuki, O. Asai // 1987. – 134. – 1905 p.

191. Watson, S.W. J. Electrochem. Soc. / S.W. Warson // 1993. – 140. – 2235 p.

192. Williams, R.V. Trans. Inst. Met. Finish / R.V. Williams, P.W. Martin // 1964. – 42. – 182 p.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А1



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО «ИНОКС РЕМ»

А.В. Богданов

«14» октября 2021 г.

АКТ

СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ГИДРОЦИЛИНДРОВ МС80/50Х710-3(4).32 С СЕРИЙНЫМИ И ВОССТАНОВЛЕННЫМИ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫМИ КОМПОЗИЦИОННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ГЕРМЕТИЧНЫМИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИМИ ПОКРЫТИЯМИ ШТОКАМИ И ГИЛЬЗАМИ

Комиссия в составе представителей ООО «ИНОКС РЕМ»: главного специалиста Чумакова А.В., слесаря Лопатина С.Ю. и представителя ВУНЦ ВВС «ВВА» к.т.н. Пенькова Н.А. составила настоящий акт в том, что в ООО «ИНОКС РЕМ» были проведены стендовые испытания серийных и восстановленных дисперсно-упрочненными композиционными функциональными герметичными гальваническими покрытиями штоков и гильз гидроцилиндров МС80/50Х710-3(4).32.

На оборудовании ООО «ИНОКС РЕМ» были проведены сравнительные ускоренные износные испытания серийных и восстановленных дисперсно-упрочненными композиционными функциональными герметичными гальваническими покрытиями штоков и гильз.

Испытаниям подвергали шесть гидроцилиндров.

Рабочие поверхности штоков и гильз имели следующие параметры: шероховатость (R_a) 0,04...0,06 мкм, нецилиндричность 2...4 мкм, некруглость 0,2...0,3 мкм, конусность на длине 20 мм не более 0,5...0,6 мкм, что соответствует техническим требованиям.

Испытания проводили на стенде СГЦ-ПФГУХ-190/250-34/4-7,5/2,2, согласно методике, изложенной в ГОСТ 18464-96, ГОСТ 16514-96 и ГОСТ 27.502-83. В качестве рабочей жидкости использовали минеральное масло ВМГЗ (ТУ 38 101479-86). Диапазон температур рабочей жидкости при испытании поддерживался в пределах -10...60 °С.

По окончании испытаний были получены следующие результаты:

1. Износ гидроцилиндров МС80/50Х710-3(4).32, восстановленных дисперсно-упрочненными композиционными функциональными герметичными гальваническими покрытиями в 4,3 раза меньше износа серийных деталей.
2. Утечек рабочей жидкости, следов задира и схватывания на рабочих поверхностях штоков и гильз, восстановленных дисперсно-упрочненными композиционными функциональными герметичными гальваническими покрытиями, в процессе испытаний не наблюдалось.

Представители ООО «ИНОКС РЕМ»

Представитель ВУНЦ ВВС «ВВА»

А.В. Чумаков

Н.А. Пеньков

С.Ю. Лопатин

ПРИЛОЖЕНИЕ А2

УТВЕРЖДАЮ
 Заместитель командира в/ч 23449-
 начальник технической части
 подполковник
 В. Мищенко
 «1» _____ 2021 г.

ПРОТОКОЛ № 514

Эксплуатационных испытаний гидроцилиндров отвала бульдозера ДЗ-42, восстановленных путем нанесения на рабочие поверхности композиционного гальванического покрытия.

| № п/п | Наименование единицы техники | Испытываемые детали | Кол-во деталей | Дата постановки на испытание | Дата контроля качества изделия | Заключение о пригодности для дальнейшей эксплуатации |
|-------|------------------------------|---------------------|----------------|------------------------------|--------------------------------|--|
| 1 | Бульдозер ДЗ-42 | ЦГ-80.56x710.31 | 2 | 23.11.2019 | 17.04.2021 | Пригодно к дальнейшей эксплуатации |

Все гидравлические цилиндры, восстановленные нанесением композиционного гальванического покрытия, прошли успешные натурные, стендовые и промышленные испытания. Нарботка бульдозера ДЗ-42 с момента установки гидроцилиндров составила 2487 моточасов, что превышает норму наработки до капитального ремонта. Снижение эксплуатационных характеристик гидроцилиндров не обнаружено. Рекламации отсутствуют.

ВрИО начальника инженерной службы

капитан В. Павлюченко

Начальник отд. ЭСО и К

ст. лейтенант Г. Кудрявцев

ПРИЛОЖЕНИЕ АЗ



«УТВЕРЖДАЮ»
 Главный инженер
 ООО «ИНОКС РЕМ»

А.П. Черных А.П. Черных

«14» октября 2021 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

технологии восстановления гидроцилиндров МС80/50Х710-3(4).32,
 установленных на тракторах ДТ-75 и бульдозерах ДЗ-42

Комиссия в составе: представителей ООО «ИНОКС РЕМ»: главного инженера А.П. Черных, начальника ОТК А.А.Зачиняева, инженера технолога Д.В.Ткачева и представителя ВУНЦ ВВС «ВВА» кандидата технических наук Н.А. Пенькова составила настоящий акт о внедрении технологии восстановления гидроцилиндров МС80/50Х710-3(4).32, установленных на тракторах ДТ-75 и бульдозерах ДЗ-42.

Основанием для внедрения явились положительные результаты лабораторных, стендовых и эксплуатационных испытаний.

В процессе внедрения выполнен следующий объем работ:

1. В ВУНЦ ВВС «ВВА» разработана и передана ООО «ИНОКС РЕМ» техническая документация на технологический процесс восстановления гидроцилиндров МС80/50Х710-3(4).32.

2. Разработаны и переданы в ООО «ИНОКС РЕМ» рекомендации по нанесению дисперсно-упрочненных композиционных функциональных герметичных гальванических покрытий.

На основании рассмотренных материалов комиссия установила:

1. Признать работу, проводимую сотрудником ВУНЦ ВВС «ВВА» Пеньковым Н.А., актуальной и имеющей важное значение для сельскохозяйственной техники.
2. Внедрение рассмотренной технологии является эффективным средством восстановления работоспособности и увеличения ресурса гидроцилиндров МС80/50Х710-3(4).32, установленных на тракторах ДТ-75 и бульдозерах ДЗ-42.
3. Рекомендовать данную технологию к внедрению на предприятиях, занимающихся ремонтом силовой гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники.

Представители ООО «ИНОКС РЕМ»

Представитель ВУНЦ ВВС «ВВА»

А.П. Черных А.П. Черных

Н.А. Пеньков Н.А. Пеньков

А.А. Зачиняев А.А. Зачиняев

Д.В. Ткачев Д.В. Ткачев

ПРИЛОЖЕНИЕ А4

«УТВЕРЖДАЮ»
 Директор ООО «ТрансПрофи»


 _____ А.К. Куратник
 «24.» _____ 42 _____ 2021 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ
 технологии восстановления гидроцилиндров МС80/50Х710-3(4).32,
 установленных на тракторах ДТ-75 и бульдозерах ДЗ-42

Комиссия в составе: директора ООО «ТрансПрофи» Куратник А.К. и представителя ВУНЦ ВВС «ВВА» кандидата технических наук Н.А. Пенькова составила настоящий акт о внедрении технологии восстановления гидроцилиндров МС80/50Х710-3(4).32, установленных на тракторах ДТ-75 и бульдозерах ДЗ-42.

Основанием для внедрения явились положительные результаты лабораторных, стендовых и эксплуатационных испытаний.

В процессе внедрения выполнен следующий объем работ:

1. В ВУНЦ ВВС «ВВА» разработана и передана ООО «ТрансПрофи» техническая документация на технологический процесс восстановления гидроцилиндров МС80/50Х710-3(4).32.

2. Разработаны и переданы в ООО «ТрансПрофи» рекомендации по нанесению дисперсно-упрочненных композиционных функциональных герметичных гальванических покрытий.

На основании рассмотренных материалов комиссия установила:

1. Работа, проводимая сотрудником ВУНЦ ВВС «ВВА» Пеньковым Н.А., является актуальной и имеет важное значение для сельскохозяйственной техники.
2. Предложенная технология нанесения дисперсно-упрочненных композиционных функциональных герметичных гальванических покрытий на гильзы и штоки гидроцилиндров МС80/50Х710-3(4).32, установленных на тракторах ДТ-75 и бульдозерах ДЗ-42, является эффективным средством восстановления их работоспособности и увеличения ресурса.
3. Рассмотренная технология рекомендуется к внедрению на предприятиях, занимающихся ремонтом силовой гидравлической аппаратуры сельскохозяйственной техники.

Представитель ООО «ТрансПрофи»


 _____ А.К. Куратник



Представитель ВУНЦ ВВС «ВВА»


 _____ Н.А. Пеньков

ПРИЛОЖЕНИЕ Б1

| Корреляционная матрица | | | | | | | | |
|------------------------|----------|-----|-----|-----|----------|------------|-----|----------|
| | σ | i | t | p | $V_{гл}$ | $I_{инст}$ | v | δ |
| σ | 1 | | | | | | | |
| i | 0,624422 | 1 | | | | | | |
| t | -0,46359 | 0 | 1 | | | | | |
| p | -0,50143 | 0 | 0 | 1 | | | | |
| $V_{гл}$ | -0,03784 | 0 | 0 | 0 | 1 | | | |
| $I_{инст}$ | -0,0473 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | |
| v | 0,10407 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| δ | 0,359516 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Расчет параметров регрессии

| Эффект | Оценки параметров (Таблица данных22) Сигма-ограниченная параметризация | | | | | | | | | |
|------------------|---|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| | σ Парам. | σ Ст.Ош. | σ t | σ p | -95,00% Дов.Пр. | +95,00% Дов.Пр. | σ Beta (B) | σ Ст.Ош.В | -95,00% Дов.Пр. | +95,00% Дов.Пр. |
| Св. член | -211,225 | 0,231053 | -914,203 | 0,000000 | -211,700 | -210,750 | | | | |
| "X1" | 29,854 | 0,231053 | 129,209 | 0,000000 | 29,384 | 30,325 | 0,596755 | 0,004619 | 0,587357 | 0,606167 |
| "X2" | -21,146 | 0,231053 | -91,519 | 0,000000 | -21,616 | -20,675 | -0,422687 | 0,004619 | -0,432095 | -0,413279 |
| "X3" | -24,225 | 0,231053 | -104,864 | 0,000000 | -24,700 | -23,750 | -0,484320 | 0,004619 | -0,493728 | -0,474912 |
| "X4" | 22,229 | 0,231053 | 96,208 | 0,000000 | 21,750 | 22,700 | 0,444342 | 0,004619 | 0,434932 | 0,453749 |
| "X1**X2" | -2,812 | 0,231053 | -12,173 | 0,000000 | -3,283 | -2,342 | -0,056219 | 0,004619 | -0,065627 | -0,046812 |
| "X1**X3" | -2,646 | 0,231053 | -11,451 | 0,000000 | -3,116 | -2,175 | -0,052888 | 0,004619 | -0,062299 | -0,043480 |
| "X2**X3" | 2,771 | 0,231053 | 11,992 | 0,000000 | 2,300 | 3,241 | 0,055387 | 0,004619 | 0,045975 | 0,064794 |
| "X1**X4" | -2,521 | 0,231053 | -10,910 | 0,000000 | -2,991 | -2,050 | -0,050385 | 0,004619 | -0,059797 | -0,040982 |
| "X2**X4" | 2,979 | 0,231053 | 12,894 | 0,000000 | 2,509 | 3,450 | 0,059557 | 0,004619 | 0,050142 | 0,068959 |
| "X3**X4" | 2,563 | 0,231053 | 11,091 | 0,000000 | 2,092 | 3,033 | 0,051222 | 0,004619 | 0,041812 | 0,060630 |
| "X1**X2**X3" | -2,729 | 0,231053 | -11,812 | 0,000000 | -3,200 | -2,259 | -0,054552 | 0,004619 | -0,063967 | -0,045146 |
| "X1**X2**X4" | -2,688 | 0,231053 | -11,632 | 0,000000 | -3,158 | -2,217 | -0,053727 | 0,004619 | -0,063128 | -0,044313 |
| "X1**X3**X4" | -2,688 | 0,231053 | -11,632 | 0,000000 | -3,158 | -2,217 | -0,053727 | 0,004619 | -0,063128 | -0,044313 |
| "X2**X3**X4" | 2,729 | 0,231053 | 11,812 | 0,000000 | 2,259 | 3,200 | 0,054552 | 0,004619 | 0,045146 | 0,063967 |
| "X1**X2**X3**X4" | -2,771 | 0,231053 | -11,992 | 0,000000 | -3,241 | -2,300 | -0,055387 | 0,004619 | -0,064794 | -0,045975 |

Определение качества модели

| Зависим. Перемен. | SS модели и SS остатков (Таблица данных22) | | | | | | | | | | |
|----------------------|--|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------|------|
| | Множеств R | Множеств R2 | Скоррект R2 | SS Модель | сс Модель | MS Модель | SS Остаток | сс Остаток | MS Остаток | F | p |
| σ | 0,999659 | 0,999317 | 0,998997 | 120048,5 | 15 | 8003,232 | 82,00000 | 32 | 2,562500 | 3123,212 | 0,00 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б2

| Корреляционная матрица | | | | | | | | |
|------------------------|----------|-----|-----|-----|----------|------------|-----|----------|
| | σ | i | t | p | $V_{гл}$ | $I_{инст}$ | v | δ |
| σ | 1 | | | | | | | |
| i | 0,568224 | 1 | | | | | | |
| t | -0,42186 | 0 | 1 | | | | | |
| p | -0,4563 | 0 | 0 | 1 | | | | |
| $V_{гл}$ | -0,03444 | 0 | 0 | 0 | 1 | | | |
| $I_{инст}$ | -0,04305 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | |
| v | 0,094704 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| δ | 0,327159 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Расчет параметров регрессии

| Эффект | Оценки параметров (Матрица ост напр 03финишн) Сигма-ограниченная параметризация | | | | | | | | | |
|------------------|--|-------------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | σ Парам. | σ Ст.Ош | σ t | σ p | -95,00% Дов.Пр. | +95,00% Дов.Пр. | σ Beta (B) | σ Ст.ОшВ | -95,00% Дов.Пр. | +95,00% Дов.Пр. |
| Св. член | -131,622 | 0,151764 | -867,282 | 0,000000 | -131,931 | -131,313 | | | | |
| "X1" | 19,170 | 0,151764 | 126,312 | 0,000000 | 18,860 | 19,479 | 0,601250 | 0,004760 | 0,591554 | 0,610946 |
| "X2" | -12,450 | 0,151764 | -82,038 | 0,000000 | -12,760 | -12,141 | -0,390505 | 0,004760 | -0,400200 | -0,380809 |
| "X3" | -15,682 | 0,151764 | -103,332 | 0,000000 | -15,991 | -15,373 | -0,491865 | 0,004760 | -0,501567 | -0,482169 |
| "X4" | 14,467 | 0,151764 | 95,326 | 0,000000 | 14,158 | 14,776 | 0,453757 | 0,004760 | 0,444067 | 0,463453 |
| "X1**X2" | -2,404 | 0,151764 | -15,839 | 0,000000 | -2,713 | -2,095 | -0,075393 | 0,004760 | -0,085089 | -0,065697 |
| "X1**X3" | -0,980 | 0,151764 | -6,460 | 0,000000 | -1,290 | -0,671 | -0,030757 | 0,004760 | -0,040446 | -0,021055 |
| "X2**X3" | 2,378 | 0,151764 | 15,669 | 0,000000 | 2,069 | 2,687 | 0,074583 | 0,004760 | 0,064887 | 0,084279 |
| "X1**X4" | -2,248 | 0,151764 | -14,812 | 0,000000 | -2,557 | -1,939 | -0,070505 | 0,004760 | -0,080207 | -0,060810 |
| "X2**X4" | 1,162 | 0,151764 | 7,657 | 0,000000 | 0,853 | 1,471 | 0,036448 | 0,004760 | 0,026753 | 0,046144 |
| "X3**X4" | 2,274 | 0,151764 | 14,982 | 0,000000 | 1,965 | 2,583 | 0,071316 | 0,004760 | 0,061620 | 0,081012 |
| "X1**X2**X3" | -2,352 | 0,151764 | -15,498 | 0,000000 | -2,661 | -2,043 | -0,073773 | 0,004760 | -0,083468 | -0,064077 |
| "X1**X2**X4" | -0,981 | 0,151764 | -6,466 | 0,000000 | -1,290 | -0,672 | -0,030777 | 0,004760 | -0,040473 | -0,021087 |
| "X1**X3**X4" | -2,351 | 0,151764 | -15,493 | 0,000000 | -2,660 | -2,042 | -0,073746 | 0,004760 | -0,083442 | -0,064057 |
| "X2**X3**X4" | 1,007 | 0,151764 | 6,636 | 0,000000 | 0,698 | 1,316 | 0,031587 | 0,004760 | 0,021897 | 0,041283 |
| "X1**X2**X3**X4" | -1,033 | 0,151764 | -6,806 | 0,000000 | -1,342 | -0,724 | -0,032397 | 0,004760 | -0,042093 | -0,022707 |

Определение качества модели

| Зависим. Перемен. | SS модели и SS остатков (Матрица ост напр 03финишн) | | | | | | | | | | |
|----------------------|---|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|----------|------|
| | Множеств R | Множеств R2 | Скоррект R2 | SS Модель | сс Модель | MS Модель | SS Остаток | сс Остаток | MS Остаток | F | p |
| σ | 0,999637 | 0,999275 | 0,998935 | 48757,53 | 15 | 3250,502 | 35,37760 | 32 | 1,105550 | 2940,167 | 0,00 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б3

| Корреляционная матрица | | | | | | | | |
|------------------------|----------|-----|-----|-----|----------|------------|-----|----------|
| | σ | i | t | p | $V_{гл}$ | $I_{инст}$ | v | δ |
| σ | 1 | | | | | | | |
| i | 0,924422 | 1 | | | | | | |
| t | -0,76359 | 0 | 1 | | | | | |
| p | -0,60143 | 0 | 0 | 1 | | | | |
| $V_{гл}$ | -0,03784 | 0 | 0 | 0 | 1 | | | |
| $I_{инст}$ | -0,0473 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | |
| v | 0,10407 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| δ | 0,359516 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Базовый слой

Определение качества модели

| Зависим. Перемен. | SS модели и SS остатков (Таблица производ базов слой.sta) | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|----------|------|
| | Множеств R | Множеств R2 | Скоррект R2 | SS Модель | сс Модель | MS Модель | SS Остаток | сс Остаток | MS Остаток | F | p |
| v | 0,998284 | 0,996571 | 0,995070 | 0,094925 | 7 | 0,013567 | 0,000327 | 16 | 0,000020 | 664,2286 | 0,00 |

Расчет параметров регрессии

| Эффект | Оценки параметров (Таблица производ базов слой.sta) Сигма-ограниченная параметризация | | | | | | | | | |
|----------|--|------------|----------|----------|-----------------|-----------------|--------------|-------------|-----------------|-----------------|
| | v Парам. | v Ст.Ош. | v t | v p | -95,00% Дов.Пр. | +95,00% Дов.Пр. | v Beta (B) | v Ст.Ош.В | -95,00% Дов.Пр. | +95,00% Дов.Пр. |
| Св. член | 1,974000 | 0,000922 | 2140,230 | 0,000000 | 1,972045 | 1,975955 | | | | |
| X1 | 0,059500 | 0,000922 | 64,510 | 0,000000 | 0,057545 | 0,061455 | 0,944444 | 0,014640 | 0,913409 | 0,975480 |
| X2 | -0,019833 | 0,000922 | -21,503 | 0,000000 | -0,021789 | -0,017878 | -0,314815 | 0,014640 | -0,345851 | -0,283779 |
| X3 | -0,004083 | 0,000922 | -4,427 | 0,000423 | -0,006039 | -0,002128 | -0,064815 | 0,014640 | -0,095851 | -0,033779 |
| X1*X2 | -0,001167 | 0,000922 | -1,265 | 0,224017 | -0,003122 | 0,000789 | -0,018519 | 0,014640 | -0,049554 | 0,012517 |
| X1*X3 | 0,000583 | 0,000922 | 0,632 | 0,536024 | -0,001372 | 0,002539 | 0,009259 | 0,014640 | -0,021777 | 0,040295 |
| X2*X3 | 0,000583 | 0,000922 | 0,632 | 0,536024 | -0,001372 | 0,002539 | 0,009259 | 0,014640 | -0,021777 | 0,040295 |
| X1*X2*X3 | 0,001750 | 0,000922 | 1,897 | 0,075977 | -0,000205 | 0,003705 | 0,027778 | 0,014640 | -0,003258 | 0,058814 |

| Эффект | Статистики коллинеарности для членов в уравнении (Таблица производ базов слой.sta) Сигма-ограниченная параметризация | | | | | | | | |
|----------|---|-------------------|-----------|-----------|------------|--------------|----------|----------|--|
| | Допуск | Дисперс. Infl fac | R квадр. | v Бета | v Частн. | v Получас. | v t | v p | |
| X1 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | 0,944444 | 0,998083 | 0,944444 | 64,5105 | 0,000000 | |
| X2 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | -0,314815 | -0,983135 | -0,314815 | -21,5035 | 0,000000 | |
| X3 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | -0,064815 | -0,741999 | -0,064815 | -4,4272 | 0,000423 | |
| X1*X2 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | -0,018519 | -0,301511 | -0,018519 | -1,2649 | 0,224017 | |
| X1*X3 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | 0,009259 | 0,156174 | 0,009259 | 0,6325 | 0,536024 | |
| X2*X3 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | 0,009259 | 0,156174 | 0,009259 | 0,6325 | 0,536024 | |
| X1*X2*X3 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | 0,027778 | 0,428571 | 0,027778 | 1,8974 | 0,075977 | |

| Корреляционная матрица | | | | | | | | |
|------------------------|----------|-----|-----|-----|----------|------------|-----|----------|
| | σ | i | t | p | $V_{гл}$ | $I_{инст}$ | v | δ |
| σ | 1 | | | | | | | |
| i | 0,804247 | 1 | | | | | | |
| t | -0,66432 | 0 | 1 | | | | | |
| p | -0,52324 | 0 | 0 | 1 | | | | |
| $V_{гл}$ | -0,03292 | 0 | 0 | 0 | 1 | | | |
| $I_{инст}$ | -0,04116 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | |
| v | 0,090541 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| δ | 0,312779 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Финишный слой

Определение качества модели

| Зависим. Перемен. | SS модели и SS остатков (Таблица производ финиш слой.sta) | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|----------|------|
| | Множеств R | Множеств R2 | Скоррект R2 | SS Модель | сс Модель | MS Модель | SS Остаток | сс Остаток | MS Остаток | F | p |
| v | 0,998296 | 0,996596 | 0,995106 | 0,156117 | 7 | 0,022302 | 0,000532 | 16 | 0,000032 | 669,0714 | 0,00 |

Расчет параметров регрессии

| Эффект | Оценки параметров (Таблица производ финиш слой.sta) | | | | | | | | | |
|----------|---|------------|----------|----------|-----------------|-----------------|--------------|-------------|-----------------|-----------------|
| | v Парам. | v Ст.Ош. | v t | v p | -95,00% Дов.Пр. | +95,00% Дов.Пр. | v Beta (B) | v Ст.Ош.В | -95,00% Дов.Пр. | +95,00% Дов.Пр. |
| Св. член | 2,532500 | 0,001179 | 2148,898 | 0,000000 | 2,530002 | 2,534998 | | | | |
| X1 | 0,076667 | 0,001179 | 65,054 | 0,000000 | 0,074168 | 0,079165 | 0,948958 | 0,014587 | 0,918034 | 0,979882 |
| X2 | -0,024167 | 0,001179 | -20,506 | 0,000000 | -0,026665 | -0,021668 | -0,299128 | 0,014587 | -0,330052 | -0,268204 |
| X3 | -0,005833 | 0,001179 | -4,950 | 0,000145 | -0,008332 | -0,003335 | -0,072203 | 0,014587 | -0,103127 | -0,041280 |
| X1*X2 | 0,000000 | 0,001179 | 0,000 | 1,000000 | -0,002498 | 0,002498 | 0,000000 | 0,014587 | -0,030924 | 0,030924 |
| X1*X3 | 0,000000 | 0,001179 | 0,000 | 1,000000 | -0,002498 | 0,002498 | 0,000000 | 0,014587 | -0,030924 | 0,030924 |
| X2*X3 | 0,002500 | 0,001179 | 2,121 | 0,049865 | 0,000002 | 0,004998 | 0,030944 | 0,014587 | 0,000021 | 0,061868 |
| X1*X2*X3 | 0,001667 | 0,001179 | 1,414 | 0,176463 | -0,000832 | 0,004165 | 0,020630 | 0,014587 | -0,010294 | 0,051553 |

| Эффект | Статистики коллинеарности для членов в уравнении (Таблица производ финиш слой.sta) | | | | | | | | |
|----------|--|-------------------|-----------|-----------|------------|--------------|----------|----------|--|
| | Допуск | Дисперс. Infl fac | R квадр. | v Бета | v Частн. | v Получас. | v t | v p | |
| X1 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | 0,948958 | 0,998115 | 0,948958 | 65,0538 | 0,000000 | |
| X2 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | -0,299128 | -0,981501 | -0,299128 | -20,5061 | 0,000000 | |
| X3 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | -0,072203 | -0,777778 | -0,072203 | -4,9497 | 0,000145 | |
| X1*X2 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | 0,000000 | 0,000000 | 0,000000 | 0,0000 | 1,000000 | |
| X1*X3 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | 0,000000 | 0,000000 | 0,000000 | 0,0000 | 1,000000 | |
| X2*X3 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | 0,030944 | 0,468521 | 0,030944 | 2,1213 | 0,049865 | |
| X1*X2*X3 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | 0,020630 | 0,333333 | 0,020630 | 1,4142 | 0,176463 | |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б4

| Линейная модель со свободным членом | | | |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|
| -0,00213 | -0,00263 | 0,005208 | 0,036542 |
| 0,00022 | 0,00022 | 0,00022 | 0,00022 |
| 0,975562 | 0,001076 | #Н/Д | #Н/Д |
| 266,1271 | 20 | #Н/Д | #Н/Д |
| 0,000925 | 2,32E-05 | #Н/Д | #Н/Д |

| Линейная модель без свободного члена | | | |
|--------------------------------------|----------|----------|------|
| -0,00213 | -0,00263 | 0,005208 | 0 |
| 0,007977 | 0,007977 | 0,007977 | #Н/Д |
| 0,028028 | 0,039079 | #Н/Д | #Н/Д |
| 0,201855 | 21 | #Н/Д | #Н/Д |
| 0,000925 | 0,03207 | #Н/Д | #Н/Д |

| Экспоненциальная модель со свободным членом | | | |
|---|----------|----------|----------|
| 0,941064 | 0,928141 | 1,156339 | 0,035982 |
| 0,00809 | 0,00809 | 0,00809 | 0,00809 |
| 0,958652 | 0,039635 | #Н/Д | #Н/Д |
| 154,5657 | 20 | #Н/Д | #Н/Д |
| 0,728422 | 0,031418 | #Н/Д | #Н/Д |

| Экспоненциальная модель без свободного члена | | | |
|--|----------|----------|------|
| 0,941064 | 0,928141 | 1,156339 | 1 |
| 0,725562 | 0,725562 | 0,725562 | #Н/Д |
| 0,002738 | 3,554511 | #Н/Д | #Н/Д |
| 0,019218 | 21 | #Н/Д | #Н/Д |
| 0,728422 | 265,3255 | #Н/Д | #Н/Д |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б5

| Корреляционный анализ | | | | | | | | | |
|-----------------------|----------|-----|-----|-----|----------|------------|-----|----------|--|
| | ξ | i | t | p | $V_{гл}$ | $I_{инст}$ | v | δ | |
| ξ | 1 | | | | | | | | |
| i | -0,87642 | 1 | | | | | | | |
| t | 0,628586 | 0 | 1 | | | | | | |
| p | -0,61273 | 0 | 0 | 1 | | | | | |
| $V_{гл}$ | -0,01424 | 0 | 0 | 0 | 1 | | | | |
| $I_{инст}$ | -0,0047 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | | |
| v | 0,00737 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | |
| δ | 0,016416 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |

Корреляционная матрица (базовый слой)

| Эффект | Оценки параметров (Таблица адгезия.sta) Сигма-ограниченная параметризация | | | | | | | | | |
|--------------|--|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| | $\xi, \%$ | $\xi, \%$ | $\xi, \%$ | $\xi, \%$ | -95,00% | +95,00% | $\xi, \%$ | $\xi, \%$ | -95,00% | +95,00% |
| | Парам. | Ст.Ош. | t | p | Дов.Пр. | Дов.Пр. | Beta (B) | Ст.Ош.В | Дов.Пр. | Дов.Пр. |
| Св. член | 92,14042 | 0,03515 | 2621,277 | 0,00000 | 92,06590 | 92,21493 | | | | |
| "X1" | -2,41708 | 0,03515 | -68,763 | 0,00000 | -2,49160 | -2,34257 | -0,59547 | 0,00866 | -0,61383 | -0,57711 |
| "X2" | 2,78292 | 0,03515 | 79,170 | 0,00000 | 2,70840 | 2,85743 | 0,68560 | 0,00866 | 0,66724 | 0,70396 |
| "X3" | -1,15292 | 0,03515 | -32,799 | 0,00000 | -1,22743 | -1,07840 | -0,28403 | 0,00866 | -0,30239 | -0,26567 |
| "X1**X2" | -1,03292 | 0,03515 | -29,388 | 0,00000 | -1,10743 | -0,95840 | -0,25447 | 0,00866 | -0,27282 | -0,23611 |
| "X1**X3" | -0,53878 | 0,03515 | -15,327 | 0,00000 | -0,61327 | -0,46423 | -0,13272 | 0,00866 | -0,15108 | -0,11436 |
| "X2**X3" | -0,41378 | 0,03515 | -11,771 | 0,00000 | -0,48827 | -0,33923 | -0,10193 | 0,00866 | -0,12029 | -0,08357 |
| "X1**X2**X3" | 0,10878 | 0,03515 | 3,094 | 0,00697 | 0,03423 | 0,18327 | 0,02679 | 0,00866 | 0,00843 | 0,04515 |

Определение качества модели

| Зависим. Перемен. | SS модели и SS остатков (Таблица адгезия.sta) | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|----------|------|
| | Множеств R | Множеств R2 | Скоррект R2 | SS Модель | сс Модель | MS Модель | SS Остаток | сс Остаток | MS Остаток | F | p |
| $\xi, \%$ | 0,999400 | 0,998800 | 0,998275 | 394,9516 | 7 | 56,42166 | 0,474467 | 16 | 0,029654 | 1902,655 | 0,00 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б6

| | σ | i | t | p | $V_{гл}$ | $I_{инст}$ | v | δ |
|------------|----------|-----|-----|-----|----------|------------|-----|----------|
| σ | 1 | | | | | | | |
| i | 0,613682 | 1 | | | | | | |
| t | -0,45561 | 0 | 1 | | | | | |
| p | -0,49281 | 0 | 0 | 1 | | | | |
| $V_{гл}$ | -0,03719 | 0 | 0 | 0 | 1 | | | |
| $I_{инст}$ | -0,04649 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | |
| v | 0,10228 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| δ | 0,353332 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Расчет параметров регрессии

| Эффект | Оценки параметров (Таблица данных4) Сигма-ограниченная параметризация | | | | | | | | | |
|-------------|--|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| | Hz | Hz | Hz | Hz | -95,00% | +95,00% | Hz | Hz | -95,00% | +95,00% |
| | Парам. | Ст. Ош. | t | p | Дов.Пр. | Дов.Пр. | Beta (B) | Ст. Ош.В | Дов.Пр. | Дов.Пр. |
| Св. член | 2,514583 | 0,016796 | 149,7099 | 0,000000 | 2,480370 | 2,548796 | | | | |
| X1 | 0,481250 | 0,016796 | 28,6520 | 0,000000 | 0,447037 | 0,515463 | 0,496813 | 0,017340 | 0,461494 | 0,532133 |
| X2 | -0,268750 | 0,016796 | -16,0005 | 0,000000 | -0,302963 | -0,234537 | -0,277441 | 0,017340 | -0,312761 | -0,242122 |
| X3 | -0,677083 | 0,016796 | -40,3113 | 0,000000 | -0,711296 | -0,642870 | -0,698980 | 0,017340 | -0,734299 | -0,663660 |
| X4 | 0,172917 | 0,016796 | 10,2949 | 0,000000 | 0,138704 | 0,207130 | 0,178509 | 0,017340 | 0,143189 | 0,213828 |
| X1*X2 | -0,118750 | 0,016796 | -7,0700 | 0,000000 | -0,152963 | -0,084537 | -0,122590 | 0,017340 | -0,157910 | -0,087271 |
| X1*X3 | -0,118750 | 0,016796 | -7,0700 | 0,000000 | -0,152963 | -0,084537 | -0,122590 | 0,017340 | -0,157910 | -0,087271 |
| X2*X3 | 0,089583 | 0,016796 | 5,3335 | 0,000008 | 0,055370 | 0,123796 | 0,092480 | 0,017340 | 0,057161 | 0,127800 |
| X1*X4 | 0,114583 | 0,016796 | 6,8219 | 0,000000 | 0,080370 | 0,148796 | 0,118289 | 0,017340 | 0,082969 | 0,153608 |
| X2*X4 | -0,135417 | 0,016796 | -8,0623 | 0,000000 | -0,169630 | -0,101204 | -0,139796 | 0,017340 | -0,175115 | -0,104476 |
| X3*X4 | -0,110417 | 0,016796 | -6,5738 | 0,000000 | -0,144630 | -0,076204 | -0,113987 | 0,017340 | -0,149307 | -0,078668 |
| X1*X2*X3 | -0,102083 | 0,016796 | -6,0777 | 0,000001 | -0,136296 | -0,067870 | -0,105385 | 0,017340 | -0,140704 | -0,070065 |
| X1*X2*X4 | 0,106250 | 0,016796 | 6,3258 | 0,000000 | 0,072037 | 0,140463 | 0,109686 | 0,017340 | 0,074367 | 0,145006 |
| X1*X3*X4 | 0,122917 | 0,016796 | 7,3180 | 0,000000 | 0,088704 | 0,157130 | 0,126892 | 0,017340 | 0,091572 | 0,162211 |
| X2*X3*X4 | -0,085417 | 0,016796 | -5,0854 | 0,000016 | -0,119630 | -0,051204 | -0,088179 | 0,017340 | -0,123498 | -0,052859 |
| X1*X2*X3*X4 | 0,114583 | 0,016796 | 6,8219 | 0,000000 | 0,080370 | 0,148796 | 0,118289 | 0,017340 | 0,082969 | 0,153608 |

Определение качества модели

| Зависим. Перемен. | SS модели и SS остатков (Таблица данных4) | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|-------------|-------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|----------|------|
| | Множеств R | Множеств R2 | Скоррект R2 | SS Модель | сс Модель | MS Модель | SS Остаток | сс Остаток | MS Остаток | F | p |
| Hz | 0,995178 | 0,990378 | 0,985868 | 44,6064 | 15 | 2,973764 | 0,433333 | 32 | 0,013542 | 219,6010 | 0,00 |

Расчет параметров регрессии

| Одномерные результаты для каждой Зав. Пер. (Таблица данных) Сигма-ограниченная параметризация Декомпозиция гипотезы | | | | | |
|---|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Эффект | Степени Свободы | Hz SS | Hz MS | Hz F | Hz p |
| Св. член | 1 | 303,5102 | 303,5102 | 22413,00 | 0,000000 |
| X1 | 1 | 11,1169 | 11,1169 | 820,94 | 0,000000 |
| X2 | 1 | 3,4669 | 3,4669 | 256,02 | 0,000000 |
| X3 | 1 | 22,0052 | 22,0052 | 1625,00 | 0,000000 |
| X4 | 1 | 1,4352 | 1,4352 | 105,98 | 0,000000 |
| X1*X2 | 1 | 0,6769 | 0,6769 | 49,98 | 0,000000 |
| X1*X3 | 1 | 0,6769 | 0,6769 | 49,98 | 0,000000 |
| X2*X3 | 1 | 0,3852 | 0,3852 | 28,45 | 0,000008 |
| X1*X4 | 1 | 0,6302 | 0,6302 | 46,54 | 0,000000 |
| X2*X4 | 1 | 0,8802 | 0,8802 | 65,00 | 0,000000 |
| X3*X4 | 1 | 0,5852 | 0,5852 | 43,22 | 0,000000 |
| X1*X2*X3 | 1 | 0,5002 | 0,5002 | 36,94 | 0,000007 |
| X1*X2*X4 | 1 | 0,5419 | 0,5419 | 40,02 | 0,000000 |
| X1*X3*X4 | 1 | 0,7252 | 0,7252 | 53,55 | 0,000000 |
| X2*X3*X4 | 1 | 0,3502 | 0,3502 | 25,86 | 0,000016 |
| X1*X2*X3*X4 | 1 | 0,6302 | 0,6302 | 46,54 | 0,000000 |
| Ошибка | 32 | 0,4333 | 0,0135 | | |
| Всего | 47 | 45,0399 | | | |

| Статистики коллинеарности для членов в уравнении (Таблица данных4) Сигма-ограниченная параметризация | | | | | | | | |
|---|----------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|----------|----------|
| Эффект | Допуск | Дисперс. Infl fac | R квадр. | Hz Бета | Hz Частн. | Hz Получас. | Hz t | Hz p |
| X1 | 1,000000 | 1,000000 | 0,000000 | 0,496813 | 0,981062 | 0,496813 | 28,6520 | 0,000000 |
| X2 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | -0,277441 | -0,942812 | -0,277441 | -16,0005 | 0,000000 |
| X3 | 1,000000 | 1,000000 | 0,000000 | -0,698980 | -0,990297 | -0,698980 | -40,3113 | 0,000000 |
| X4 | 1,000000 | 1,000000 | 0,000000 | 0,178509 | 0,876407 | 0,178509 | 10,2949 | 0,000000 |
| X1*X2 | 1,000000 | 1,000000 | 0,000000 | -0,122590 | -0,780822 | -0,122590 | -7,0700 | 0,000000 |
| X1*X3 | 1,000000 | 1,000000 | 0,000000 | -0,122590 | -0,780822 | -0,122590 | -7,0700 | 0,000000 |
| X2*X3 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | 0,092480 | 0,686005 | 0,092480 | 5,3335 | 0,000008 |
| X1*X4 | 1,000000 | 1,000000 | 0,000000 | 0,118289 | 0,769777 | 0,118289 | 6,8219 | 0,000000 |
| X2*X4 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | -0,139796 | -0,818598 | -0,139796 | -8,0623 | 0,000000 |
| X3*X4 | 1,000000 | 1,000000 | 0,000000 | -0,113987 | -0,757994 | -0,113987 | -6,5738 | 0,000000 |
| X1*X2*X3 | 1,000000 | 1,000000 | 0,000000 | -0,105385 | -0,731996 | -0,105385 | -6,0777 | 0,000001 |
| X1*X2*X4 | 1,000000 | 1,000000 | 0,000000 | 0,109686 | 0,745420 | 0,109686 | 6,3258 | 0,000000 |
| X1*X3*X4 | 1,000000 | 1,000000 | 0,000000 | 0,126892 | 0,791180 | 0,126892 | 7,3180 | 0,000000 |
| X2*X3*X4 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | -0,088179 | -0,668547 | -0,088179 | -5,0854 | 0,000016 |
| X1*X2*X3*X4 | 1,000000 | 1,000000 | 0,000000 | 0,118289 | 0,769777 | 0,118289 | 6,8219 | 0,000000 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Б7

Корреляционный анализ

| | μ | i | t | p | $V_{гл}$ | $V_{инст}$ | $V_{осажд}$ | δ |
|-----------|----------|-----|-----|-----|----------|------------|-------------|----------|
| μ | 1 | | | | | | | |
| i | 0,834255 | 1 | | | | | | |
| t | -0,76648 | 0 | 1 | | | | | |
| p | -0,79099 | 0 | 0 | 1 | | | | |
| $V_{гл}$ | -0,06085 | 0 | 0 | 0 | 1 | | | |
| $V_{всп}$ | -0,06085 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | |
| m | -0,02028 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| d | -0,02028 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Матрица планирования эксперимента

| μ | X1 | X2 | X3 |
|-------|----|----|----|
| 0,1 | -1 | -1 | -1 |
| 0,26 | 1 | -1 | -1 |
| 0,06 | -1 | 1 | -1 |
| 0,22 | 1 | 1 | -1 |
| 0,08 | -1 | -1 | 1 |
| 0,24 | 1 | -1 | 1 |
| 0,04 | -1 | 1 | 1 |
| 0,2 | 1 | 1 | 1 |

Корреляционная матрица

| Эффект | Статистики коллинеарности для членов в уравнении (Таблица коэф трения) Сигма-ограниченная параметризация | | | | | | | |
|----------|---|----------------------|-----------|---------------|-----------------|-------------------|------------|------------|
| | Допуск | Дисперс. Infl fac | R квадр. | μ Бета | μ Частн. | μ Получас. | μ t | μ p |
| X1 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | 0,955293 | 0,984715 | 0,955293 | 22,61427 | 0,000000 |
| X2 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | -0,147334 | -0,657199 | -0,147334 | -3,48777 | 0,003041 |
| X3 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | -0,175850 | -0,721068 | -0,175850 | -4,16283 | 0,000733 |
| X1*X2 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | 0,061785 | 0,343416 | 0,061785 | 1,46261 | 0,162938 |
| X1*X3 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | -0,042774 | -0,245404 | -0,042774 | -1,01258 | 0,326330 |
| X2*X3 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | -0,004753 | -0,028116 | -0,004753 | -0,11251 | 0,911819 |
| X1*X2*X3 | 1,000000 | 1,000000 | -0,000000 | -0,023763 | -0,139266 | -0,023763 | -0,56254 | 0,581542 |

Определение качества модели

| Зависим. Перемен. | SS модели и SS остатков (Таблица коэф трения) | | | | | | | | | | |
|----------------------|---|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------|---------|
| | Множеств R | Множеств R2 | Скоррект R2 | SS Модель | сс Модель | MS Модель | SS Остаток | сс Остаток | MS Остаток | F | p |
| μ | 0,98562 | 0,97144 | 0,95895 | 0,17919 | 7 | 0,02559 | 0,00526 | 16 | 0,00032 | 77,7703 | 0,00000 |

ПРИЛОЖЕНИЕ В

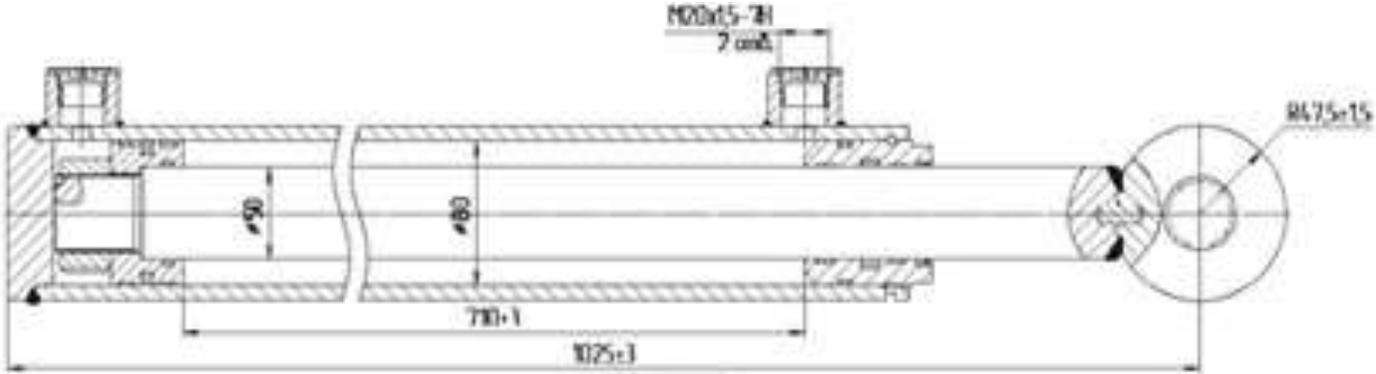
| | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|-------|--|--------|--|-----|--|
| Дубл. | | | | | | | | | |
| Взам. | | | | | | | | | |
| Подп. | | | | | | | | | |
| | | | | | | 01140. | | | |
| | | | | 2К625 | | | | | |
| Гидроцилиндр МС80/50х710-3(4).32 | | | | | | | | 005 | |
| <p>Комплект документов технологического процесса</p> | | | | | | | | | |

Продолжение приложения В

| | | | | | | | | | | |
|-------|---|----|---------|-----|------|---|------|-------|----|-----|
| Дубл. | | | | | | | | | | |
| Взам. | | | | | | | | | | |
| Подл. | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 60140 | | 2 |
| | | | | | | | | | | 010 |
| Р | | ПИ | Д или В | L | t | i | S | n | V | |
| 01 | Зенкер 1692-3454 ГОСТ 12489-71 | | | | | | | | | |
| 02 | Штангенциркуль ШЦ-1-125-0,05 ГОСТ 166-89 | | | | | | | | | |
| Р 03 | | | 17,3 | 115 | 0,75 | 1 | 0,35 | 500 | 26 | |
| 04 | | | | | | | | | | |
| О 05 | 4. Зенковать фаску 3 | | | | | | | | | |
| Т 06 | Втулка 30-2 ОСТ 2 П12-11-84 | | | | | | | | | |
| 07 | Зенковка 1634-3454 ГОСТ 14953-69 | | | | | | | | | |
| 08 | Штангенциркуль ШЦ-1-125-0,05 ГОСТ 166-89 | | | | | | | | | |
| Р 09 | | | 17,3 | 2,5 | 2,5 | 1 | 0,35 | 500 | 26 | |
| 10 | | | | | | | | | | |
| О 11 | 5. Нарезать резьбу 2 | | | | | | | | | |
| Т 12 | Патрон 6161-0104 ГОСТ 21938 –76; Втулка 6142 – 0169 ГОСТ 21940-76 | | | | | | | | | |
| 13 | Метчик 1391-0311 ГОСТ 1604-71 | | | | | | | | | |
| 14 | Калибр резьбовой М20×2,5 ГОСТ 2016-68 | | | | | | | | | |
| Р 15 | | | 20 | 115 | 1,35 | 1 | - | 315 | 20 | |
| 16 | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | |
| ОК | | | | | | | | | | |

Продолжение приложения В

| | | | | | | | | | | |
|----------|---------|--|--|----------------------------------|--|-------|--|-----|----|-----|
| Дубл. | | | | | | | | | | |
| Взам. | | | | | | | | | | |
| Подл. | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 60140 | | 3 | | |
| Разраб. | Пеньков | | | ВУНЦ ВВС «ВВА» | | | | | | |
| Провер. | | | | | | | | | | |
| Нормир. | | | | | | | | | | |
| Согл. | | | | | | | | | | |
| Н.контр. | | | | Гидроцилиндр МС80/50х710-3(4).32 | | | | 002 | 01 | 010 |



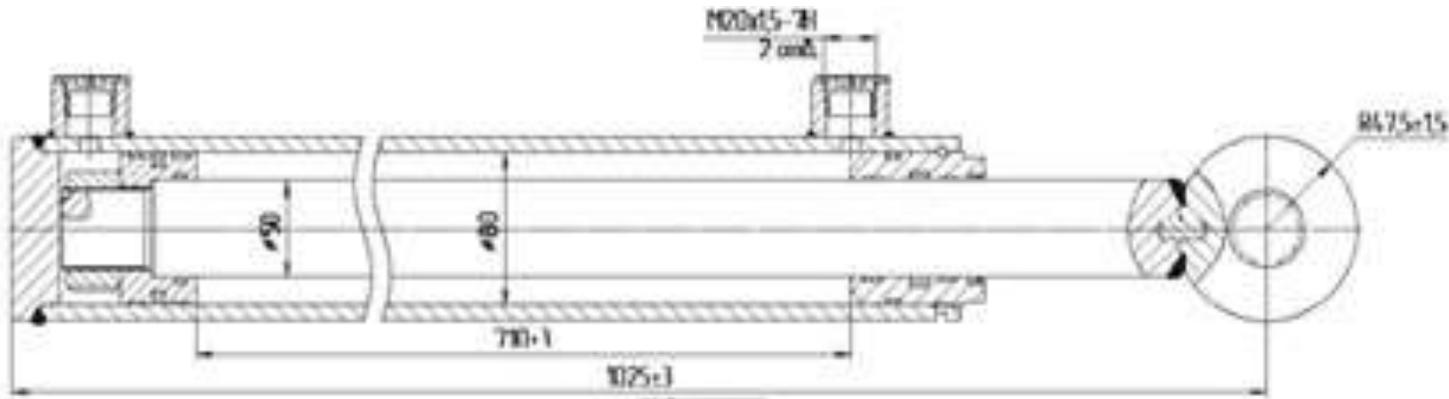
КЭ

Продолжение приложения В

| | | | | | | | | | | | |
|-------|--|--|--|----|---------|---|---|-------|-----|-----|----|
| Дубл. | | | | | | | | | | | |
| Взам. | | | | | | | | | | | |
| Подл. | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 60140 | | 3 | |
| | | | | | | | | | | 015 | |
| Р | | | | ПИ | Д или В | L | t | i | S | n | V |
| О 01 | 9. Точить фаску 7 | | | | | | | | | | |
| Т 02 | Резец 2192-0045 Т15К6 ГОСТ 18877-73 | | | | | | | | | | |
| 03 | Штангенциркуль ШЦ-1-250-0,05 ГОСТ 166-89 | | | | | | | | | | |
| Р 04 | | | | | 35 | 2 | 2 | 1 | 0,3 | 630 | 69 |
| 05 | | | | | | | | | | | |
| 06 | | | | | | | | | | | |
| 07 | | | | | | | | | | | |
| 08 | | | | | | | | | | | |
| 09 | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | |
| ОК | | | | | | | | | | | |

Продолжение приложения В

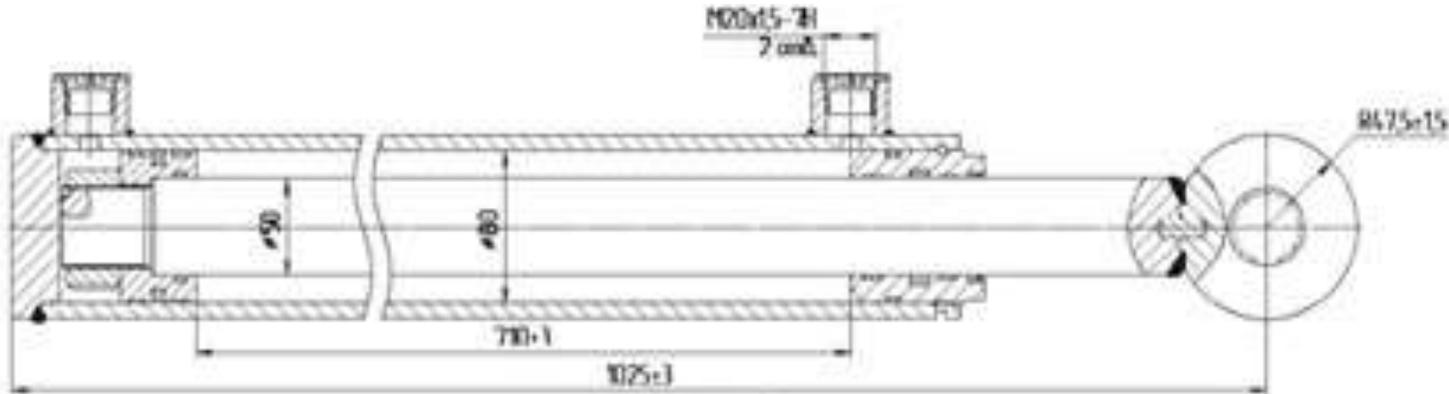
| | | | | | | | | | | |
|----------|---------|--|--|----------------------------------|--|--|-------|-----|----|-----|
| Дубл. | | | | | | | | | | |
| Взам. | | | | | | | | | | |
| Подл. | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 60140 | | 4 | |
| Разраб. | Пеньков | | | ВУНЦ ВВС «ВВА» | | | | | | |
| Провер. | | | | | | | | | | |
| Нормир. | | | | | | | | | | |
| Согл. | | | | | | | | | | |
| Н.контр. | | | | Гидроцилиндр МС80/50х710-3(4).32 | | | | 002 | 01 | 015 |



КЭ

Продолжение приложения В

| | | | | | | | | | |
|----------|---------|--|--|--|--|--|-------|-----|-----|
| Дубл. | | | | | | | | | |
| Взам. | | | | | | | | | |
| Подл. | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 60140 | | 4 |
| Разраб. | Пеньков | | | | | | | | |
| Провер. | | | | | | | | | |
| Нормир. | | | | | | | | | |
| Согл. | | | | | | | | | |
| Н.контр. | | | | | | | | 002 | 02 |
| | | | | | | | | | 020 |

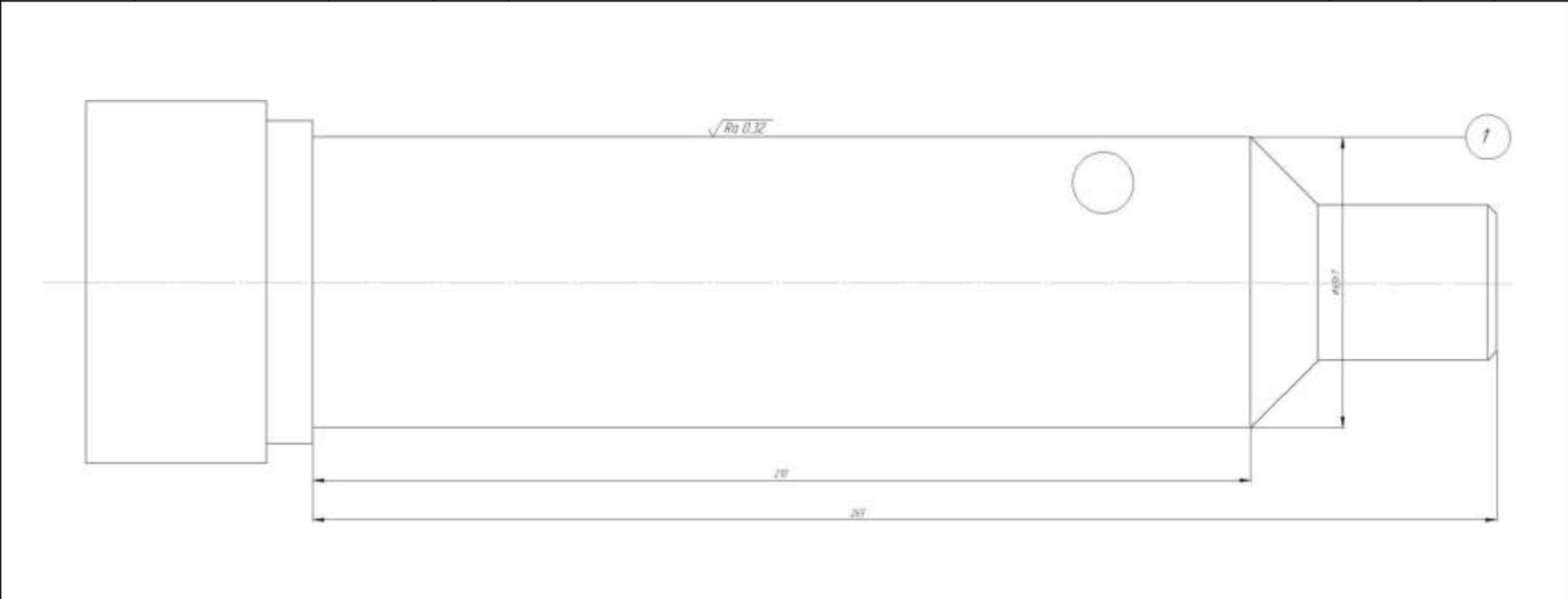


Продолжение приложения В

| | | | | | | | | | | | |
|-------|--|--|--|----|---------|-----|------|-------|-----|-----|----|
| Дубл. | | | | | | | | | | | |
| Взам. | | | | | | | | | | | |
| Подл. | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | 60140 | | 2 | |
| | | | | | | | | | | 025 | |
| Р | | | | ПИ | Д или В | L | t | i | S | n | V |
| Р 01 | | | | | 65,1 | 210 | 0,05 | 12 | 1,4 | 73 | 15 |
| 02 | | | | | | | | | | | |
| 03 | | | | | | | | | | | |
| 04 | | | | | | | | | | | |
| 05 | | | | | | | | | | | |
| 06 | | | | | | | | | | | |
| 07 | | | | | | | | | | | |
| 08 | | | | | | | | | | | |
| 09 | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | |
| ОК | | | | | | | | | | | |

Продолжение приложения В

| | | | | | | | | | | |
|----------|---------|--|--|----------------------------------|--|-------|--|-----|----|-----|
| Дубл. | | | | | | | | | | |
| Взам. | | | | | | | | | | |
| Подл. | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 60140 | | 3 | | |
| Разраб. | Пеньков | | | ВУНЦ ВВС «ВВА» | | | | | | |
| Провер. | | | | | | | | | | |
| Нормир. | | | | | | | | | | |
| Согл. | | | | | | | | | | |
| Н.контр. | | | | Гидроцилиндр МС80/50х710-3(4).32 | | | | 002 | 03 | 025 |



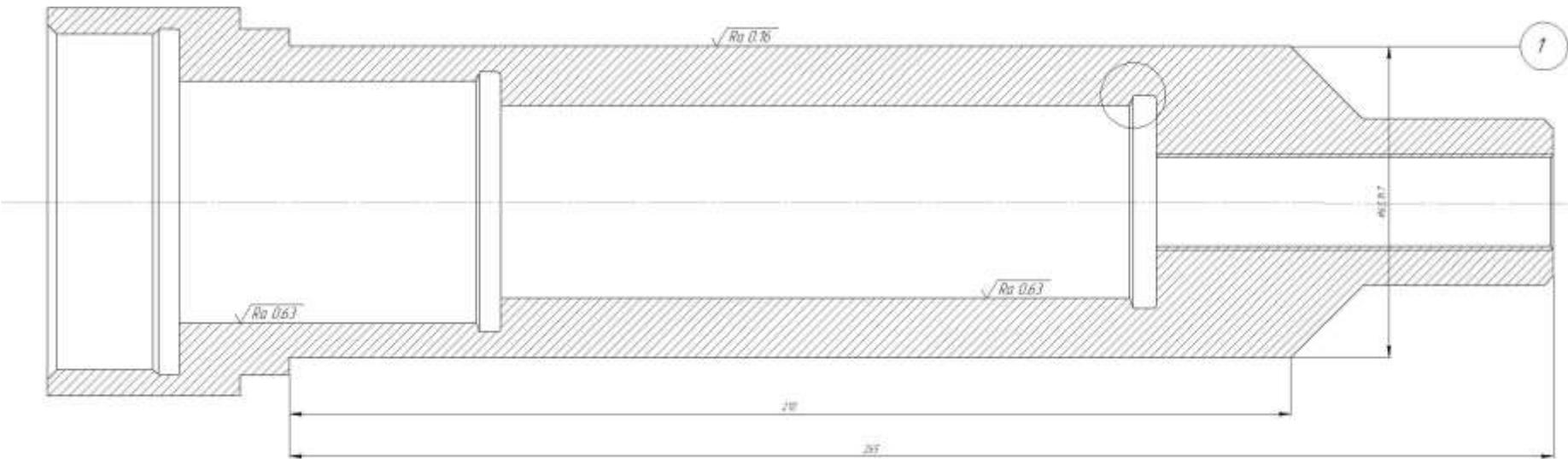
КЭ

Продолжение приложения В

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|--|--|----------------|-------------------------------|-------------------------|-------|--|--------------|-------|
| Дубл. | | | | | | | | | | |
| Взам. | | | | | | | | | | |
| Подл. | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 60140 | | 1 | |
| Разраб. | Пеньков | | | ВУНЦ ВВС «ВВА» | | | | | | |
| Провер. | | | | | | | | | | |
| Нормир. | | | | | | | | | | |
| Согл. | | | | | | | | | | |
| Н.контр. | | | | | | | | | 002 | 04 |
| Наименование операции | | | | | Наименование, марка материала | | | | | МД |
| Контрольная | | | | | Сталь 40Х ГОСТ 1050–88 | | | | | |
| Наименование оборудования | | | | То | Тв | | | | Обознач. ИОТ | |
| Стол контрольный | | | | | | | | | | |
| Р | Контролируемые параметры | | | Код средств ТО | | Наименование средств ТО | | | Об и ПК | То/Тв |
| О 01 | 1. Проверить деталь на соответствие марки материала по поверхности Ø65 | | | | | | | | | |
| 02 | | | | | | Стилоскоп | | | 100% | |
| 03 | | | | | | | | | | |
| О 04 | 2 Контролировать соответствие поверхности детали требованиям под нанесение покрытий по ТУ 14-131-528-82 | | | | | | | | | |
| 05 | | | | | | Профилометр-профилограф | | | 100% | |
| 06 | | | | | | | | | | |
| 07 | | | | | | | | | | |
| 08 | | | | | | | | | | |
| 09 | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | |
| ОК | | | | | | | | | | |

Продолжение приложения В

| | | | | | | | | | | |
|----------|---------|--|--|----------------------------------|--|-------|--|-----|----|-----|
| Дубл. | | | | | | | | | | |
| Взам. | | | | | | | | | | |
| Подл. | | | | | | | | | | |
| | | | | | | 60140 | | 2 | | |
| Разраб. | Пеньков | | | ВУНЦ ВВС «ВВА» | | | | | | |
| Провер. | | | | | | | | | | |
| Нормир. | | | | | | | | | | |
| Согл. | | | | | | | | | | |
| Н.контр. | | | | Гидроцилиндр МС80/50х710-3(4).32 | | | | 003 | 01 | 035 |



КЭ

Продолжение приложения В

| | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--|--|----------------|----------------|-------------------------------|-----------|-------|---------|--------------|----------------|
| Дубл. | | | | | | | | | | |
| Взам. | | | | | | | | | | |
| Подл. | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | 60140 | | 1 | |
| Разраб. | Пеньков | | | ВУНЦ ВВС «ВВА» | | | | | | |
| Провер. | | | | | | | | | | |
| Нормир. | | | | | | | | | | |
| Согл. | | | | | | | | | | |
| Н.контр. | | | | | | | | | 003 | 03 |
| Наименование операции | | | | | Наименование, марка материала | | | | | МД |
| Контрольная | | | | | Сталь 40Х ГОСТ 1050–88 | | | | | |
| Наименование оборудования | | | | То | Тв | | | | Обознач. ИОТ | |
| Стол контрольный | | | | 7,2 | 2,1 | | | | | |
| Р | Контролируемые параметры | | Код средств ТО | | Наименование средств ТО | | | Об и ПК | То/Тв | |
| О 01 | 1. Проверить отсутствие вмятин, забоин, коррозии и других дефектов визуально | | | | | | | | | |
| 02 | | | | | | | | | | 100% |
| О 03 | 2. Контролировать отсутствие микротрещин на поверхности Ø65 | | | | | | | | | |
| 04 | | | | | | | | | | Установка ДРОН |
| 05 | | | | | | | | | | 100% |
| О 06 | 3. Контролировать герметичность покрытия на поверхности Ø65 | | | | | | | | | |
| 07 | | | | | | | | | | Ванна |
| 08 | | | | | | | | | | 100% |
| О 09 | 4. Контролировать геометрию на поверхности Ø65 | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | МР – 75 ГОСТ 4381-80 | Микрометр | | | 100% | |
| 11 | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | |
| ОК | | | | | | | | | | |

ПРИЛОЖЕНИЕ Г1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ
№ 100520

**УСТРОЙСТВО ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ
ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ВНУТРЕННИХ
ПОВЕРХНОСТЯХ**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
"Воронежский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2010116716
Приоритет полезной модели 27 апреля 2010 г.
Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 20 декабря 2010 г.
Срок действия патента истекает 27 апреля 2020 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам*



Б.И. Симонов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г2

32

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2581412

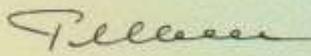
**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРУБЧАТЫХ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Воронежский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014118172
Приоритет изобретения 05 мая 2014 г.
Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 24 марта 2016 г.
Срок действия патента истекает 05 мая 2034 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

 Г.П. Иванев



ПРИЛОЖЕНИЕ ГЗ



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Технические характеристики атомно-эмиссионного спектрометра «Искролайн-300»

| | |
|---|---------------|
| Рабочий спектральный диапазон, нм | 174 – 915 |
| Спектральное разрешение, нм, не более | |
| в диапазоне 174 – 410 нм | 0,05 |
| в диапазоне 410 – 915 нм | 0,2 |
| Пределы детектирования легирующих и примесных элементов(углерода, хрома, марганца, титана, кремния, никеля, меди, ванадия) (по критерию 3σ) при анализе сталей , %, не более | 0,0001 |
| Предел допускаемого относительного СКО выходного сигнала спектрометра в режиме измерения относительных интенсивностей при анализе сталей, %, не более | |
| в диапазоне массовых долей элементов свыше 0,0001% до 0,01% | 40 |
| в диапазоне массовых долей элементов свыше 0,010% до 0,10%; | 10 |
| в диапазоне массовых долей элементов свыше 0,10% до 1,0%; | 7 |
| в диапазоне массовых долей элементов свыше 1,0% до 99,90% | 10 |
| Средняя обратная линейная дисперсия, нм/мм, не более | |
| в диапазоне 174 – 410 нм | 0,56 |
| в диапазоне 410 – 915 нм | 1,7 |
| Система возбуждения спектра (тип разряда - низковольтная униполярная искра в атмосфере аргона): | |
| – диапазон напряжений, В | от 100 до 500 |
| – диапазон частот, Гц | от 100 до 400 |
| – диапазон емкостей, мкФ | от 2 до 8 |
| – диапазон индуктивностей, мкГн | от 40 до 750 |
| – диапазон сопротивлений, Ом | от 0,3 до 3,3 |

| | |
|--|--|
| Система регистрации: | |
| – диапазон длительности одного кадра, с | |
| – число кадров | от 0,004 до 60,000 |
| Габаритные размеры, мм, не более: | от 1 до 500 |
| Масса, кг, не более | 1200×1060×750 |
| Потребляемая мощность, В·А, не более | 250 |
| Электрическое питание | 500 |
| Средний срок службы, лет | (220 ⁺²² ₋₃₃) В |
| Средняя наработка спектрометра на отказ, ч, не менее | (50±2) Гц |
| Условия эксплуатации: | 7 |
| Диапазон температуры, °С | 9000 |
| Диапазон атмосферного давления, кПа | от +15 до +25 |
| Диапазон относительной влажности, % при t = 25 °С | от 84,0 до 106,7 |
| | от 20 до 80 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Microsoft Excel 14.0 Отчет о результатах

Лист: [Эксперимент Никита 01.xlsx]к 4.2фин

Отчет создан: 28.12.2020 15:54:00

Результат: Решение найдено. Все ограничения и условия оптимальности выполнены.

Модуль поиска решения (финишный слой, min)

Модуль: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ

Время решения: 0,016 секунд.

Число итераций: 3 Число подзадач: 0

Параметры поиска решения

Максимальное время Без пределов, Число итераций Без пределов, Precision 0,000001, Использовать автоматическое масштабирование

Сходимость 0,0001, Размер совокупности 100, Случайное начальное значение 0, Правые производные, Обязательные границы

Максимальное число подзадач Без пределов, Максимальное число целочисленных решений Без пределов, Целочисленное отклонение 1%, Считать неотрицательными

Ячейка целевой функции (Минимум)

| Ячейка | Имя | Исходное значение | Окончательное значение |
|---------|----------|-------------------|------------------------|
| \$C\$10 | s= d(X4) | -58,98 | -162,035 |

Ячейки переменных

| Ячейка | Имя | Исходное значение | Окончательное значение | Целочисленное |
|--------|-------|-------------------|------------------------|---------------|
| \$D\$3 | i(X1) | 0 | 10 | Продолжить |
| \$D\$4 | t(X2) | 0 | 65 | Продолжить |
| \$D\$5 | p(X3) | 0 | 1,5 | Продолжить |
| \$D\$6 | d(X4) | 0 | 20 | Продолжить |

Ограничения

| Ячейка | Имя | Значение ячейки | Формула | Состояние | Допуск |
|--------|-------|-----------------|----------------|--------------|--------|
| \$D\$3 | i(X1) | 10 | \$D\$3<=\$I\$3 | Без привязки | 2 |
| \$D\$3 | i(X1) | 10 | \$D\$3>=\$I\$4 | Привязка | 0 |
| \$D\$4 | t(X2) | 65 | \$D\$4<=\$J\$3 | Привязка | 0 |
| \$D\$4 | t(X2) | 65 | \$D\$4>=\$J\$4 | Без привязки | 5 |
| \$D\$5 | p(X3) | 1,5 | \$D\$5<=\$K\$3 | Привязка | 0 |
| \$D\$5 | p(X3) | 1,5 | \$D\$5>=\$K\$4 | Без привязки | 0,5 |
| \$D\$6 | d(X4) | 20 | \$D\$6=\$L\$4 | Привязка | 0 |

Microsoft Excel 14.0 Отчет о результатах

Лист: [Эксперимент Никита 01.xlsx]к 4.2фин

Отчет создан: 28.12.2020 15:54:35

Результат: Решение найдено. Все ограничения и условия оптимальности выполнены.

Модуль поиска решения (финишный слой, mip)

Модуль: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ

Время решения: 0,031 секунд.

Число итераций: 3 Число подзадач: 0

Параметры поиска решения

Максимальное время Без пределов, Число итераций Без пределов, Precision 0,000001, Использовать автоматическое масштабирование

Сходимость 0,0001, Размер совокупности 100, Случайное начальное значение 0, Правые производные, Обязательные границы

Максимальное число подзадач Без пределов, Максимальное число целочисленных решений Без пределов, Целочисленное отклонение 1%, Считать неотрицательными

Ячейка целевой функции (Минимум)

| Ячейка | Имя | Исходное значение | Окончательное значение |
|---------|----------|-------------------|------------------------|
| \$C\$10 | s= d(X4) | -58,98 | -123,635 |

Ячейки переменных

| Ячейка | Имя | Исходное значение | Окончательное значение | Целочисленное |
|--------|-------|-------------------|------------------------|---------------|
| \$D\$3 | i(X1) | 0 | 10 | Продолжить |
| \$D\$4 | t(X2) | 0 | 65 | Продолжить |
| \$D\$5 | p(X3) | 0 | 1,5 | Продолжить |
| \$D\$6 | d(X4) | 0 | 80 | Продолжить |

Ограничения

| Ячейка | Имя | Значение ячейки | Формула | Состояние | Допуск |
|--------|-------|-----------------|----------------|--------------|--------|
| \$D\$3 | i(X1) | 10 | \$D\$3<=\$I\$3 | Без привязки | 2 |
| \$D\$3 | i(X1) | 10 | \$D\$3>=\$I\$4 | Привязка | 0 |
| \$D\$4 | t(X2) | 65 | \$D\$4<=\$J\$3 | Привязка | 0 |
| \$D\$4 | t(X2) | 65 | \$D\$4>=\$J\$4 | Без привязки | 5 |
| \$D\$5 | p(X3) | 1,5 | \$D\$5<=\$K\$3 | Привязка | 0 |
| \$D\$5 | p(X3) | 1,5 | \$D\$5>=\$K\$4 | Без привязки | 0,5 |
| \$D\$6 | d(X4) | 80 | \$D\$6=\$L\$3 | Привязка | 0 |

Microsoft Excel 14.0 Отчет о результатах

Лист: [Эксперимент Никита 01.xlsx]к 4.2фин

Отчет создан: 28.12.2020 15:30:22

Результат: Решение найдено. Все ограничения и условия оптимальности выполнены.

Модуль поиска решения (финишный слой, max)

Модуль: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ

Время решения: 0,016 секунд.

Число итераций: 2 Число подзадач: 0

Параметры поиска решения

Максимальное время Без пределов, Число итераций Без пределов, Precision 0,000001, Использовать автоматическое масштабирование

Сходимость 0,0001, Размер совокупности 100, Случайное начальное значение 0, Правые производные, Обязательные границы

Максимальное число подзадач Без пределов, Максимальное число целочисленных решений Без пределов, Целочисленное отклонение 1%, Считать неотрицательными

Ячейка целевой функции (Максимум)

| Ячейка | Имя | Исходное значение | Окончательное значение |
|---------|----------|-------------------|------------------------|
| \$C\$10 | s= d(X4) | -58,98 | -137,91 |

Ячейки переменных

| Ячейка | Имя | Исходное значение | Окончательное значение | Целочисленное |
|--------|-------|-------------------|------------------------|---------------|
| \$D\$3 | i(X1) | 0 | 12 | Продолжить |
| \$D\$4 | t(X2) | 0 | 60 | Продолжить |
| \$D\$5 | p(X3) | 0 | 1 | Продолжить |
| \$D\$6 | d(X4) | 0 | 20 | Продолжить |

Ограничения

| Ячейка | Имя | Значение ячейки | Формула | Состояние | Допуск |
|--------|-------|-----------------|----------------|--------------|--------|
| \$D\$3 | i(X1) | 12 | \$D\$3<=\$I\$3 | Привязка | 0 |
| \$D\$3 | i(X1) | 12 | \$D\$3>=\$I\$4 | Без привязки | 2 |
| \$D\$4 | t(X2) | 60 | \$D\$4<=\$J\$3 | Без привязки | 5 |
| \$D\$4 | t(X2) | 60 | \$D\$4>=\$J\$4 | Привязка | 0 |
| \$D\$5 | p(X3) | 1 | \$D\$5<=\$K\$3 | Без привязки | 0,5 |
| \$D\$5 | p(X3) | 1 | \$D\$5>=\$K\$4 | Привязка | 0 |
| \$D\$6 | d(X4) | 20 | \$D\$6=\$L\$4 | Привязка | 0 |

Microsoft Excel 14.0 Отчет о результатах
 Лист: [Эксперимент Никита 01.xlsx]к 4.2фин
 Отчет создан: 28.12.2020 15:29:47

Результат: Решение найдено. Все ограничения и условия оптимальности выполнены.

Модуль поиска решения (финишный слой, тах)

Модуль: Поиск решения нелинейных задач методом ОПГ
 Время решения: 0,016 секунд.
 Число итераций: 2 Число подзадач: 0

Параметры поиска решения

Максимальное время Без пределов, Число итераций Без пределов, Precision 0,000001, Использовать автоматическое масштабирование
 Сходимость 0,0001, Размер совокупности 100, Случайное начальное значение 0, Правые производные, Обязательные границы
 Максимальное число подзадач Без пределов, Максимальное число целочисленных решений Без пределов, Целочисленное отклонение 1%, Считать неотрицательными

Ячейка целевой функции (Максимум)

| Ячейка | Имя | Исходное значение | Окончательное значение |
|---------|----------|-------------------|------------------------|
| \$C\$10 | s= d(X4) | -58,98 | -100,47 |

Ячейки переменных

| Ячейка | Имя | Исходное значение | Окончательное значение | Целочисленное |
|--------|-------|-------------------|------------------------|---------------|
| \$D\$3 | i(X1) | 0 | 12 | Продолжить |
| \$D\$4 | t(X2) | 0 | 60 | Продолжить |
| \$D\$5 | p(X3) | 0 | 1 | Продолжить |
| \$D\$6 | d(X4) | 0 | 80 | Продолжить |

Ограничения

| Ячейка | Имя | Значение ячейки | Формула | Состояние | Допуск |
|--------|-------|-----------------|----------------|--------------|--------|
| \$D\$3 | i(X1) | 12 | \$D\$3<=\$I\$3 | Привязка | 0 |
| \$D\$3 | i(X1) | 12 | \$D\$3>=\$I\$4 | Без привязки | 2 |
| \$D\$4 | t(X2) | 60 | \$D\$4<=\$J\$3 | Без привязки | 5 |
| \$D\$4 | t(X2) | 60 | \$D\$4>=\$J\$4 | Привязка | 0 |
| \$D\$5 | p(X3) | 1 | \$D\$5<=\$K\$3 | Без привязки | 0,5 |
| \$D\$5 | p(X3) | 1 | \$D\$5>=\$K\$4 | Привязка | 0 |
| \$D\$6 | d(X4) | 80 | \$D\$6=\$L\$3 | Привязка | 0 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

ПРАВИТЕЛЬСТВО ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ



ДИПЛОМ

награждается

лауреат премии правительства Воронежской области
среди молодых ученых

Пеньков

Никита Алексеевич

кандидат технических наук, начальник лаборатории научно-исследовательского центра (образовательных и информационных технологий) федерального государственного казенного военного образовательного учреждения высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации

за научную работу

«Технология получения плотного износостойкого хрома на системах гидропривода»

Губернатор
Воронежской области

А.В. Гусев

Постановление правительства
Воронежской области от 20.12.2018 № 1147







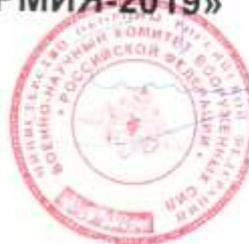
ДИПЛОМ

ЗА АКТИВНОЕ УЧАСТИЕ В МЕРОПРИЯТИЯХ
МЕЖДУНАРОДНОГО ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКОГО
ФОРУМА «АРМИЯ-2019»
НАГРАЖДАЕТСЯ

капитан
ПЕНЬКОВ
НИКИТА АЛЕКСЕЕВИЧ

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА
МВТФ «АРМИЯ-2019»

И.МАКУШЕВ



XXII Московский международный
Салон изобретений и инновационных технологий



«АРХИМЕД-2019»

ДИПЛОМ

Решением Международного Жюри
награждается

БРОНЗОВОЙ МЕДАЛЬЮ

Федеральное государственное казённое военное
образовательное учреждение высшего образования
«Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
за разработку «Шарнир равных угловых скоростей»
(Трифонов Г.И., Жачкин С.Ю., Краснова М.Н.,
Пеньков Н.А., Сидоркин О.А.)

Председатель
Международного Жюри,
академик,
член президиума РАН

С.М. Алдошин

Президент Салона

Д.И. Зезюлин

Руководитель
Федеральной службы
по интеллектуальной
собственности

Г.П. Ивлиев

Россия, Москва, 26.03 – 29.03.2019 г.