

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС»

На правах рукописи

Нгуен Суан Хынг

**Обоснование метода повышения ресурса восстанавливаемых узлов и
деталей карьерных экскаваторов в условиях Социалистической Республики
Вьетнам**

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность 2.8.8. – Геотехнология, горные машины

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Мнацаканян Виктория Умедовна

Москва, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1 Анализ задачи повышения эффективности ремонта карьерных экскаваторов с учетом климатических особенностей Вьетнама.....	11
1.1 Перспективы развития добычи полезных ископаемых во Вьетнаме открытым способом до 2030 года	11
1.2 Анализ конструктивных особенностей карьерных экскаваторов и причин отказов основных узлов и несущих металлоконструкций	17
1.3 Влияние климатических особенностей Вьетнама на условия эксплуатации и работоспособности карьерных экскаваторов.....	24
1.4 Обоснование цели и задач исследования.....	33
Глава 2 Обоснование механизма и способа защиты сварных соединений от электрохимической коррозии в морской воде	37
2.1 Факторы, определяющие склонность сварных соединений к электрохимической коррозии	37
2.2 Обоснование метода и механизма защиты сварных соединений от электрохимической коррозии	52
2.3 Выводы по главе 2.....	60
Глава 3 Обоснование материалов газодинамических покрытий для защиты восстанавливаемых сваркой и наплавкой металлоконструкций от воздействия морской воды.....	61
3.1 Обоснование параметров процесса холодного газодинамического напыления и состава защитных покрытий, подавляющих коррозию сварных металлоконструкций.....	61
3.2 Методика проведения экспериментальных исследований по оценке коррозионной стойкости защитных ХГН-покрытий.....	70
3.3 Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований	74
3.4 Выводы по главе 3.....	82

Глава 4 Повышение эффективности ремонта деталей аксиально-поршневых насосов на основе применения холодного газодинамического напыления	83
4.1 Анализ требований на изготовление основных узлов аксиально-поршневого насоса.....	84
4.2 Экспериментальные исследования условий формирования ХГН-покрытий на основе меди с заданными свойствами	93
4.3 Исследование микроструктуры и трибологических характеристик ХГН - покрытия на основе композиции Cu-Al ₂ O ₃	105
4.4 Выводы по главе 4.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	120
Приложение 1	130
Приложение 2	131

Введение

Потери от коррозии и износа в горнодобывающей промышленности Вьетнама - страны богатой залежами твердых полезных ископаемых на суше, в прибрежных районах и в глубинах Южно-Китайского моря, имеют колоссальные масштабы, несмотря на применение при изготовлении машин широкого спектра коррозионностойких и устойчивых к износу материалов и функциональных покрытий. Абразивная среда, интенсивные динамические и циклические нагрузки вызывают преждевременную потерю работоспособности исполнительных органов и приводных узлов горной техники. Условия эксплуатации в тропическом климате существенно усугубляются наличием высокой влажности и непосредственным контактом с агрессивной морской средой, что приводит к интенсивной коррозии металлоконструкций и ускоренному их разрушению. Особенно чувствительны к воздействию морской атмосферы сварные соединения, широко применяемые при сборке, монтаже и ремонте горных машин.

Коррозионные повреждения деталей приводят к большим расходам на ремонт и обслуживание выемочной техники, преимущественно импортного производства, большую часть которой составляют карьерные гусеничные экскаваторы. В связи с этим возникает острая потребность в изыскании и разработке эффективных технологий защиты сварных соединений от коррозионного износа на этапе ремонта при помощи формирования на восстанавливаемых сваркой или наплавкой поверхностях локальных коррозионностойких покрытий. Это определяет важную задачу выбора и обоснования эффективного и универсального метода нанесения покрытий, стойких к коррозии и износу, который можно использовать как в стационарных ремонтных мастерских, так и в полевых условиях. Немаловажным является возможность использования метода для восстановления элементов гидроприводов экскаваторов, принимая во внимание высокую трудоемкость изготовления, стоимость запчастей и ремонта приводных узлов добычной техники.

Степень научной проработанности темы исследования

Вопросам повышения надежности и долговечности горного оборудования и транспорта посвящены труды известных советских и российских ученых А.М. Балабышко, Г.Д. Буялича, В.И. Галкина, В.Ф. Еленкина Л.И. Кантовича, А.М. Керопяна, Е.М. Кривенко, В.Н. Гетопанова, В.И. Морозова, Ю.Ф. Набатникова, М.С. Островского, И.Л. Пастоева, Р.Ю. Подэрни. Я.М. Радкевича, М.Г. Рахутина, Г.И. Солода, А.А. Хорешка, А.Л. Яблонева. Большой вклад в развитие науки о горных машинах и исследования коррозионных процессов внесли вьетнамские ученые - Ле Тхи Хонг Лиен, Хоанг Лам Хонг, Нгуен Ван Чанг, Динь Тхи Зуен.

Вместе с тем вопросы защиты от коррозии сварных металлоконструкций и технологического обеспечения ресурса пар трения в гидроприводах горных машин пока еще недостаточно проработаны, что определяет актуальность проводимых в данной работе исследований.

Объектом исследования являются восстанавливаемые сваркой элементы металлоконструкций карьерных экскаваторов, эксплуатируемых в условиях тропического климата, и элементы аксиально-поршневого насоса.

Предмет исследования - технологические методы защиты сварных металлоконструкций карьерных экскаваторов от электрохимической коррозии и износа.

Цель работы – повышение ресурса восстанавливаемых сваркой и наплавкой несущих металлоконструкций и деталей приводных узлов карьерных экскаваторов, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивной морской среды, за счет разработки технологии создания защитных покрытий, устойчивых к электрохимической коррозии, а также к износу в условиях граничного трения, на основе применения холодного газодинамического напыления

Идея работы состоит в использовании метода холодного газодинамического напыления в ремонтном производстве для создания коррозионностойких и устойчивых к износу покрытий.

Задачи исследования:

1. Анализ факторов, влияющих на потерю работоспособности элементов металлоконструкций карьерных экскаваторов, эксплуатируемых в условиях тропического климата при контакте с морской атмосферой.
2. Анализ видов коррозии, механизмов и методов защиты деталей оборудования, от электрохимической коррозии при его эксплуатации в морской атмосфере.
3. Исследование условий зарождения, механики и кинетики развития электрохимической коррозии в сварных металлоконструкциях при контакте с морской водой, выявление основных аналитических зависимостей и закономерностей исследуемого процесса.
4. Обоснование рационального метода формирования коррозионностойких покрытий для сварных соединений деталей карьерного экскаваторов на этапах его изготовления, эксплуатации и ремонта.
5. Обоснование составов и технологических условий нанесения покрытий, устойчивых к электрохимической коррозии в морской воде, на основе проведения экспериментальных исследований и оценки потери массы материала, скорости и глубины электрохимической коррозии
6. Разработка и исследование технологии восстановления элементов аксиально-поршневых насосов карьерных экскаваторов, изготовленных из цветных сплавов, с экономическим обоснованием предлагаемых решений.

Научная новизна работы заключается в обосновании метода нанесения и составов покрытий, обеспечивающих надежную защиту рабочих элементов сварных металлических конструкций карьерного экскаватора от воздействия морской среды и повышение несущей способности узлов трения гидропривода горной техники, что имеет важное значение для горнодобывающей промышленности СРВ.

Основными составляющими научной новизны являются:

1. Установление влияния напряженного состояния и структуры сварного соединения на условия зарождения и механизм развития коррозионных

процессов и кинетики разрушения металла сварного шва под действием морской атмосферы.

2. Обоснование метода защиты сварных металлоконструкций от электрохимической коррозии и повышения несущей способности узлов трения гидропривода в условиях ремонтного производства на основе создания функциональных покрытий.

3. Установление основных параметров коррозионного процесса, развиваемого в сварных соединениях под влиянием морской воды, и механизмов его подавления за счет формирования плотных покрытий с более высоким отрицательным электрохимическим потенциалом по сравнению с основным металлом, обеспечивающих надёжную защиту зон термического воздействия и сварного шва за счет активации анодного растворения материала покрытия.

4. Установление связи между параметрами газодинамического напыления и микротвердостью поверхности покрытия на основе $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$, что позволяет повысить несущую способность покрытия в узлах трения скольжения аксиально-поршневого насоса.

Научная новизна работы заключается в обосновании метода нанесения и составов покрытий, обеспечивающих надёжную защиту рабочих элементов сварных металлических конструкций карьерного экскаватора от воздействия морской среды и повышение несущей способности узлов трения гидропривода горной техники, что имеет важное значение для горнодобывающей промышленности СРВ.

Основными составляющими научной новизны являются:

1. Установление влияния напряженного состояния и структуры сварного соединения на условия зарождения и механизм развития коррозионных процессов и кинетики разрушения металла сварного шва под действием морской атмосферы.

2. Обоснование метода защиты сварных металлоконструкций от электрохимической коррозии и повышения несущей способности узлов трения

гидропривода в условиях ремонтного производства на основе создания функциональных покрытий.

3. Установление основных параметров коррозионного процесса, развиваемого в сварных соединениях под влиянием морской воды, и механизмов его подавления за счет формирования плотных покрытий с более высоким отрицательным электрохимическим потенциалом по сравнению с основным металлом, обеспечивающих надёжную защиту зон термического воздействия и сварного шва за счет активации анодного растворения материала покрытия.

4. Установление связи между параметрами газодинамического напыления и микротвердостью поверхности покрытия на основе $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$, что позволяет повысить несущую способность покрытия в узлах трения скольжения аксиально-поршневого насоса.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Повышение сопротивляемости электрохимической коррозии в морской воде восстановленных сваркой и наплавкой металлоконструкций достигается на основе создания на рабочих поверхностях анодных защитных покрытий из порошковых композиций $50\%\text{Zn}+50\%\text{Al}_2\text{O}_3$ и $55\%\text{Al}+15\%\text{Zn}+30\%\text{Al}_2\text{O}_3$ методом холодного газодинамического напыления при нанесении их в интервале температур $310-360^\circ\text{C}$ со скоростью подачи порошка $0,8...1,0$ г/с, что обеспечивает минимальную пористость покрытий и коэффициент эффективности анодной защиты $K_{э.а}$ в пределах $32...36$.

2. Сопротивляемость электрохимической коррозии алюмоцинковых покрытий с содержанием цинка до 15% в условиях нарушения сплошности покрытий или наличия в нем неравномерной пористости обусловлена анодным растворением алюминия и заполнением пор и пустот на поверхности покрытия продуктами коррозии, что предотвращает проникновение агрессивной среды к стальной основе и подавляет ее коррозию.

3. Использование порошковой композиции $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ для восстановления изношенных латунных распределительных пластин аксиально-поршневых насосов при помощи холодного газодинамического напыления

обеспечивает благоприятную структуру и микротвердость поверхностного слоя до 198...200 HV, тем самым повышает его несущую способность и трибологические характеристики, а достигаемая при напылении шероховатость Ra в пределах 2,8...3,6 мкм существенно сокращает расходы на отделочную обработку восстановленной поверхности.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается использованием апробированных методов системного анализа, применением сертифицированных программ, оборудования и методов испытания, хорошей сходимостью полученных результатов расчета и эксперимента с данными литературных источников по теме исследования.

Методы исследования.

Выполненные исследования основаны на базовых принципах теории коррозии металлов, научных основах материаловедения, методах математического и цифрового моделирования, теории вероятностей и обработки экспериментальных данных.

Научное значение работы состоит в разработке научного подхода к обоснованию метода повышения сопротивляемости рабочих поверхностей деталей горных машин к коррозионным воздействиям морской воды, что позволило разработать технологию нанесения защитных покрытий и тем самым повысить ресурс оборудования при его эксплуатации с учетом климатических особенностей СРВ

Практическое значение работы:

1. Предложены составы покрытий, метод и технологические режимы их напыления на рабочие поверхности деталей горного оборудования, обеспечивающих надежную защиту элементов металлоконструкций от электрохимической коррозии при эксплуатации в морской среде.

2. Разработана технология нанесения плотных коррозионностойких покрытий, обеспечивающая высокие эксплуатационные свойства формируемого поверхностного слоя восстановленных сваркой (наплавкой) деталей при взаимодействии с морской водой.

3. Технологические рекомендации по восстановлению и упрочнению деталей пар трения насосного оборудования, изготовленных из антифрикционных сплавов на основе меди.

Личный вклад автора

Автором выполнены теоретические и экспериментальные исследования, анализ методов и механизмов защиты сварных соединений от коррозии, проведены испытания образцов на коррозионную стойкость, определены трибологические характеристики медного покрытия.

Реализация результатов работы

Научные результаты диссертации приняты к внедрению в ООО «НПЦподземмаш», используются в Ханойском институте горной науки и технологии, в учебном процессе Горного института НИТУ МИСИС при подготовке студентов машиностроительного профиля по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на международных научных симпозиумах «Неделя горняка» в 2021-2022 гг., Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении» (ИИМ-2022, Томск), на семинарах кафедры ГОТиМ.

Публикации. Основные материалы научно-квалификационной работы опубликованы в 4 научных трудах, из которых 2 - в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 96 наименований и двух приложений. Работа изложена на 131 странице, содержит 13 таблиц и 53 рисунка.

Глава 1 Анализ задачи повышения эффективности ремонта карьерных экскаваторов с учетом климатических особенностей Вьетнама

Горнорудная промышленность Вьетнама развивается активными темпами, так как страна обладает богатыми залежами твердых полезных ископаемых. Освоение и разработка месторождений ценных минералов ведется в различных регионах страны, в том числе и в прибрежных зонах Южно-Китайского моря, а также по линии морских шельфов. Климатические особенности материковой части добывающих районов, обусловленные высокой влажностью и наличием агрессивной морской атмосферы, вызывают активную коррозию металлоконструкций и ускоряют процессы износа как несущих элементов металлоконструкций, так и ответственных соединений гидроприводов.

Парк применяемой во Вьетнаме добычной техники укомплектован, преимущественно, оборудованием зарубежного производства, что обязывает вопросы ремонтного восстановления решать эффективно и рационально определяет необходимость создания прогрессивных ремонтных служб и отделений технического сервиса, способных наряду с процессами восстановления вышедших из строя улов, обеспечивать возможность повышения их ресурса.

1.1 Перспективы развития добычи полезных ископаемых во Вьетнаме открытым способом до 2030 года

Вьетнам – страна, расположенная на Юго-Востоке Азии, обладающая колоссальными залежами полезных ископаемых, мощным научно-техническим и промышленным потенциалом, а также демонстрирующая в последнее десятилетие интенсивные темпы роста экономики. Уникальное географическое положение и специфический климат, формируемый под влиянием Южно-Китайского моря и Индийского океана, способствовали образованию широкого спектра природных ресурсов, доминирующую часть которых составляют

месторождения твердых полезных ископаемых, в которых сосредоточено более 60 различных минералов, используемых в энергетическом секторе экономики, минералы и металлы, широко применяемые в различных отраслях промышленности – металлургии, машиностроении, а также природные минералы, используемые в промышленном и гражданском строительстве [48, 49].

В энергетической сфере Вьетнама используются преимущественно уголь, добываемый в угольном бассейне ШонгХонг, запасы которого исчисляются 37 млрд. тонн, а также угольных шахтах КуангНинь, ТхайНгуен, ШонгДа и НонгСон, суммарные залежи, которых составляют более 18 млрд. тонн уран. Для нужд энергетики страны также используют нефть, уран и др.

В промышленном секторе, в частности, машиностроении, применяют группу металлических минералов, куда входят [49]: железо, марганец, хром, титан, медь, свинец, цинк, золото, серебро, кобальт, никель, алюминий, олово, вольфрам и т.д.

В настоящее время обнаружено 216 месторождений железной руды. с общими запасами около 1,2 миллиарда тонн, сосредоточенные главным образом, в рудниках Тхач Хе (около 544 млн. тонн) и Куйша (около 113 млн. тонн). Железистые конкреции также обнаружены на дне Южно-Китайского моря, что открывает большие перспективы в освоении морских месторождений [69].

В северных провинциях Вьетнама сосредоточены около 200 млн. тонн залежей бокситов, в центральной части Таи Нгуен, прогнозируемые ресурсы боксита составляют 5,4 млрд. тонн. Согласно данным департамента геологии США, по залежам бокситов на 2010 г., Вьетнам занимает 3-е на третье место в мире после Гвинеи (7,4 млрд. тонн) и Австралии (6,2 млрд. тонн). К важным промышленным минералам также относятся апатит, фосфорит, флюорит, пирит, торф, каолин, стекольный песок, графит, кристаллический кварц и т. д.

Значительный потенциал составляют природные материалы, применяемые в строительстве, такие как : известняк (около 44 миллиардов тонн), глина (около

7,6 млн. тонн), каолин (около 850 млн. тонн), полевой шпат (около 84 млн. тонн), белый кремниевый песок (около 1,4 млрд. тонн), доломит (около 2,8 млрд. тонн), строительный камень (около 53 млрд. м³), строительный песок и гравий (около 2,1 млрд. м³), глина для производства керамики (около 3,6 млрд. м³) и т.д.

Активными темпами развивается угольная промышленность (рис. 1.1.), так как спрос на этот энергоресурс растет из года в год и требует решения как ряда технических и технологических задач, так и проблем, связанных с экологической безопасностью [20].

Добыча угля открытым способом ведется в основном на разрезах в северных регионах Вьетнама, которые сосредоточены в районах Камфа и Халонг провинции Куанг Нинь. В ближайшей перспективе планируется закрытие карьеров с добычей угля менее 1 млн. тонн в год и сосредоточение на предприятиях с производительностью более 3 млн. тонн в год. До 2030 года планируется увеличить общую добычу угля до 55 - 57 млн. тонн, из которой на открытую добычу приходится 17 - 20 млн. тонн, т.е. 31-35% от общего объема [48]. Прогноз спроса на уголь во Вьетнаме до 2030 года выглядит следующим образом (таб. 1.1. и рис. 1.1):

Таблица 1.1 - Прогноз потребления угля во Вьетнаме до 2030 г. (млн.тонн)
[48, 49]

Спрос на уголь для промышленности	2020 г.	2025 г.	2030 г.
Теплоэлектростанции	64,1	96,5	131,1
Удобрения для сельского хозяйства и химикаты для химической промышленности	5,0	5,0	5,0
Цемент для промышленного и гражданского строительства	6,2	6,7	6,9
Металлургия	5,3	7,2	7,2
Другие отрасли	5,8	6,1	6,4
Итого	86,4	121,5	156,6

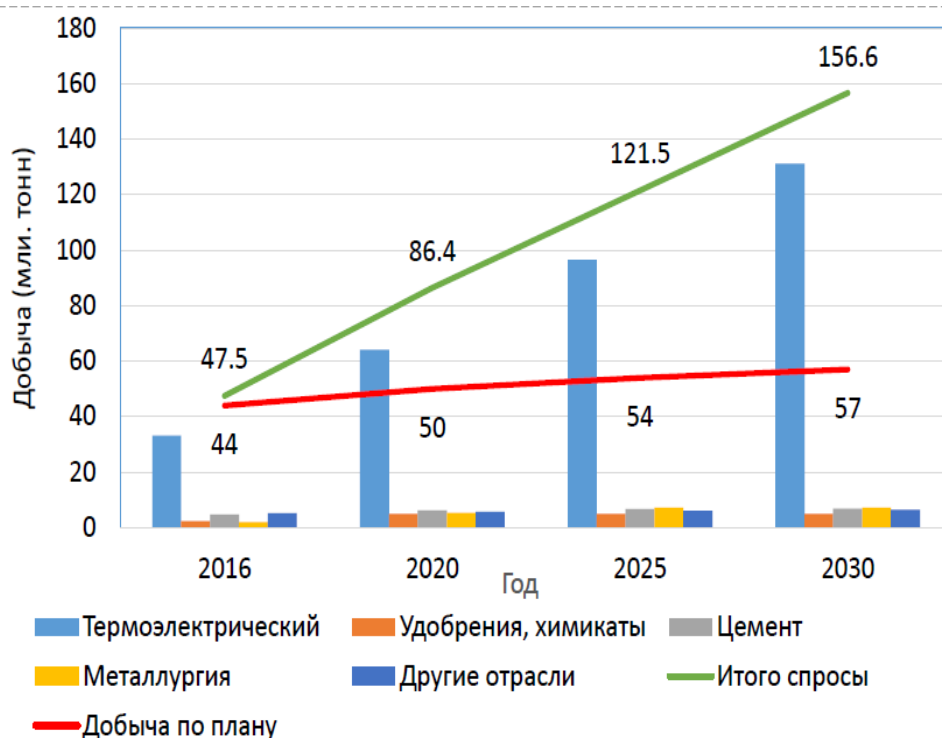


Рисунок 1.1 - Прогноз спроса на уголь во Вьетнаме на период 2016-2030 гг.

Основное содержание «Плана разработки по добыче металлических полезных ископаемых, промышленных полезных ископаемых и строительных материалов» [49, 68] сводится к поддержанию добычи существующих карьеров, улучшению и расширению рудников в направлении глубокой эксплуатации, повышению экономического коэффициента вскрыши, селективной разработке, подходящая для сложных геологических условий рудных пластов во Вьетнаме. Это также основа для горнодобывающих предприятий для разработки планов горных работ, численности трудящихся, подготовки ряда машин и технологических линий для работы их предприятий в будущем. Прогнозы спроса и потребления полезных ископаемых и планы добычи ряда основных полезных ископаемых Вьетнама приведены в таблицах 1.2, 1.3, 1.4. Основные регионы, богатые залежами твердых полезных ископаемых, а также важнейшие промышленные зоны представлены на рис. 1.2, а

Таблица 1.2 - Прогноз спроса на некоторые металлы во Вьетнаме [49]

Типы руды	Единица измерения	2016 г.	2020 г.	2025 г.	2030 г.
Железная руда	млн. тонн	7,2	18	32	41
Бокситовая руда	млн. тонн	7,5	10	18	22
Апатитовая руда	млн. тонн	3,234	5,121	5,121	5,121
Медная руда	тыс. тонн	678	852	1109	1435
Золотая руда	тыс. тонн	2450	2575	2700	2800
Никелевая руда	тыс. тонн	55,505	70,842	79,347	88,863
Вольфрам Руда	тыс. тонн	14,892	18,277	19,766	20,433

Таблица 1.3 - Прогноз спроса на цемент и строительный камень во Вьетнаме [49, 68]

Стройматериалы	Ед. изм.	2020 г.	2025 г.	2035 г.
Цемент	млн. тонн	74÷89	94,5 ÷116	127 ÷175,5
Строительный камень	млн. м ³	181	235,3	305,9

Колоссальное значение для Вьетнама представляет освоение месторождений твёрдых полезных ископаемых в прибрежных районах, в зонах континентальных шельфов и глубоководная добыча [92]

В прибрежных и мелководных районах Южно-Китайского моря провинций Куанг Сюонг, Кам Хоа, Ки Нинь, Ке Сунг и др. (рис. 1.2, б) горной промышленностью страны успешно осваиваются россыпные месторождения ильменита, рутила, магнетита, касситерита, золота, гранатов, корунда, топазов, шпинелей. По данным Департамента геологии и минералов Вьетнама суммарные запасы титановых руд здесь составляют около 6.55 млн. т. средней мощностью залегания рудного тела 1,1 м. при этом залежи простираются вдоль береговой линии в виде россыпи желтых, светло-желтых песков и темно-серых глинистых песков. [36].

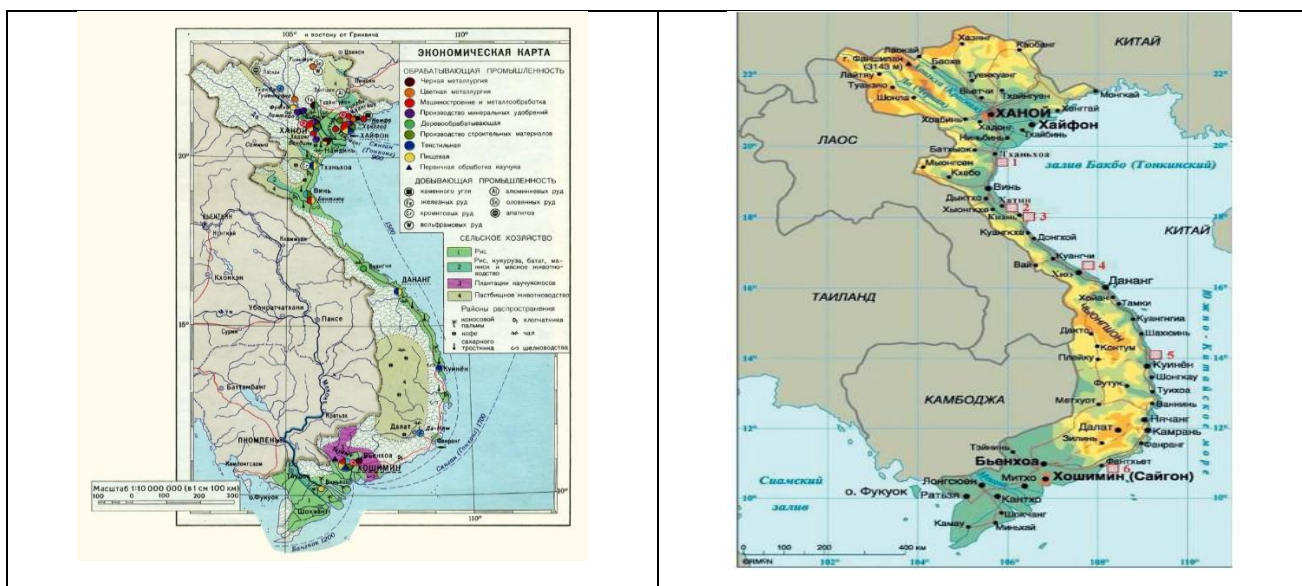


Рисунок 1.2 – Карта расположения основных месторождений ТПИ: а – в континентальной зоне; б – линия прибрежных россыпных месторождений твердых полезных ископаемых во Вьетнаме. [36, 48, 49]

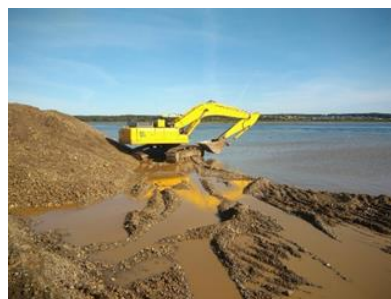
На основе анализа данных правительства Вьетнама о прогнозах спроса на полезные ископаемые до 2030 г. можно сделать вывод, что в предстоящий период интенсивного развития экономики Вьетнама добыча твердых полезных ископаемых будет непрерывно расти, так как добываемые минералы играют ключевую роль в развитии промышленного сектора экономики. Это прекрасная возможность для развития горнодобывающих предприятий, создания новых рабочих мест, роста конкурентоспособности выпускаемой продукции и благосостояния трудящихся. Для успешного освоения залежей твердых полезных ископаемых как на материковой части страны, так и в прибрежных районах, необходимо обеспечить высокий технический уровень используемого оборудования, довести потери, связанные с простоем оборудования до минимума за счет организации и проведения системы технического обслуживания и ремонта. Это позволит повысить производительность труда и эффективность горных работ.

1.2 Анализ конструктивных особенностей карьерных экскаваторов и причин отказов основных узлов и несущих металлоконструкций

Экскаваторы карьерные гусеничные (ЭКГ) являются основным оборудованием в технологической цепочке разработки и освоения твердых полезных ископаемых открытым способом. Во Вьетнаме экскаваторы применяют в различных горно-геологических условиях как в карьерах для освоения месторождений на материковой части, так в прибрежной зоне Южно-Китайского моря для добычи строительных материалов, драгоценных камней и руд промышленных минералов (рис. 1.3).



а



б

Рисунок 1.3 – Горно-геологические условия эксплуатации экскаваторов:

а – добыча полезных ископаемых на материковой части суши; *б* – в прибрежной зоне.

Экскаваторы относятся к классу выемочно-погрузочных машин. Эксплуатация карьеров ведется круглогодично, поэтому, очевидно, что эффективность ведения горных работ данной техникой в большей степени определяется ее техническим состоянием и безотказностью. С этой целью на горных предприятиях должны функционировать специализированные ремонтные подразделения и службы, осуществляющие оперативный ремонт оборудования. При этом, для устранения дефектов несущих металлоконструкций широко применяют сварку наплавку [7, 55, 63, 70].

Конструкция одноковшового экскаватора включает следующие основные части – рабочее (исполнительный орган), механическое, ходовое и силовое оборудование, механизмы управления, рамы и кузов [23, 40, 50, 55].

Все экскаваторы делятся на две большие группы: одноковшовые периодического (циклического) действия и многоковшовые непрерывного действия. Первые являются универсальными и поэтому получили более широкое распространение, по сравнению с многоковшовыми.

Среди одноковшовых выделяют лопаты карьерные механические и гидравлические (ЭКГ) и (ЭГ), карьерно-строительные (ЭКСТ) и вскрышные (ЭВГ), драглайны шагающие (ЭШ) и гусеничные (ЭКСТ)-Д [40, 50].

Экскаватор состоит из следующих основных частей: рабочего, механического, ходового и силового оборудования, механизмов управления, платформы с рамой, надстройки и кузова. Основные узлы одноковшового экскаватора показаны на рис. 1.4

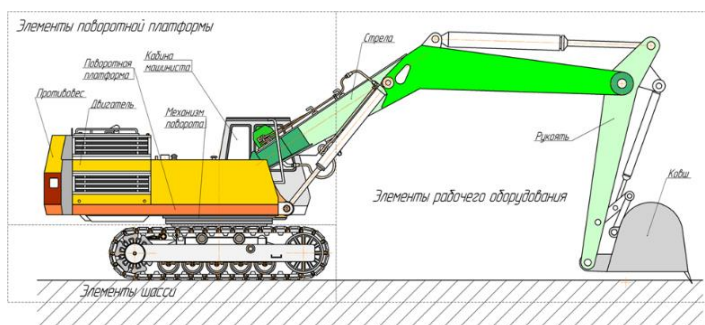


Рисунок 1.4. – Основные части одноковшового карьерного гидравлического экскаватора

Вместе с тем все узлы экскаватора, неисправности в которых определяют его работоспособное состояние, в зависимости от служебного назначения можно условно объединить в три большие группы:

1–привод (электромеханический, электрогидравлический, гидравлический, дизель-электрический, дизель-гидравлический);

2 - несущие металлоконструкции (гусеничная тележка, поворотная платформа, стрела, рукоять стрелы);

3 - исполнительный орган (ковш, лопата, драглайн, грейфер, копер).

Привод. Условия эксплуатации карьерных экскаваторов характеризуются значительными ударными нагрузками, вибрациями, большой запыленностью. Электроприводы основных механизмов работают в интенсивном повторно-

кратковременном режиме «включение-выключение». В закрытых передачах трансмиссий и в сопряжениях узлов оборудования заложены значительные зазоры, что негативным образом отражается на долговечности их работы и самих экскаваторов. Зазоры приводят к неопределенности базирования и возникновению нежелательных относительных смещений исполнительных поверхностей деталей кинематических передач, вызывая вибрации и активный износ деталей. В ряде случаев критические нагрузки способны вызвать также внезапную поломку валов или зубьев зубчатых колес механических передач, сколы и трещины в корпусных деталях и тем самым, вывести из строя технику.

Износы в шатунно-поршневой группе дизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), а также кавитация и эрозия в камере сгорания головок блоков цилиндров являются наиболее характерными причинами отказов силовых установок приводных устройств. Нередко потеря работоспособности здесь связана с некачественным их техническим обслуживанием при подготовке технологических рабочих сред [55].

Объемные гидроприводы, с помощью которых осуществляется управление движениями рабочих органов гидравлических экскаваторов также подвержены интенсивному износу из-за трения в узлах, а также попадания в зону сопряжений деталей посторонних механических частиц вместе с рабочей жидкостью [41, 43, 52, 53, 56]. Так, в гидроцилиндрах, число которых на стреле и рукояти может достигать до 4 шт., выходят из строя штоки и уплотнения, имеют место механические и коррозионные повреждения на поверхности зеркала цилиндра. Гидроцилиндры эксплуатируются без защитного кожуха и несмотря на наличие в его конструкции грундбуксы, грязесъемника и уплотнительных колец, абразивные частицы в ходе поступательного характера движения штока попадают в сопряжения, вызывая абразивный износ и более серьезные повреждения деталей.

Под действием критических нагрузок, при нерегламентированном нагружении ковша возможна также деформация штоков, что может вызвать

необратимые последствия для работоспособности гидроцилиндра и необходимости его замены.

В состав объемного гидропривода экскаваторов входят также аксиально-поршневые насосы, с помощью которых осуществляется передача крутящего момента исполнительным механизмам. Нарботка до отказа таких насосов обычно составляет 1 000 часов, тогда как при номинальных режимах эксплуатации, ресурс агрегата должен быть не менее 3 500 часов, а при рабочем давлении 16 МПа - 6 000 часов [59, 60]. Как видно, в реальных условиях эксплуатации ресурс данных агрегатов несколько ниже, что обусловлено интенсивным износом деталей пар трения чаще всего вследствие загрязнения рабочей жидкости, вместе с которой в ответственные соединения попадают посторонние механические частицы. После восстановительного ремонта межремонтный ресурс насосов не превышает 50% ресурса нового агрегата по причине ускоренного износа восстановленных деталей или нарушения высоких требований точности относительного расположения исполнительных поверхностей при сборке насоса.

Несущие металлоконструкции. Для несущих конструкций экскаватора характерными дефектами являются трещины, возникающие в результате наличия систематических нестабильных ударных воздействий в процессе черпания горной массы, подъема и поворота заполненного ковша, его перемещения для выгрузки горной массы в транспортное средство и в момент опорожнения. Таким образом, поворотная платформа, стрела, рукоять стрелы, опорная рама и колеса и трак гусеничного шасси подвергаются кратковременным рывковым критическим нагрузкам, что со временем приводит к возникновению трещин (рис. 1.5). При смещении гусеничных траков от горизонтального положения перераспределение нагрузки от катков также может привести к появлению здесь трещин, что приводит к необходимости замены траков.

Характерные дефекты металлоконструкций экскаватора, восстанавливаемые наплавкой и сваркой, приведены на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Характерные дефекты металлоконструкций карьерного экскаватора [7]

Исполнительный орган. Элементы данной группы выходят из строя вследствие взаимодействия с природными материалами, обладающими высокой абразивной способностью. Поэтому наиболее характерным видом повреждения для них является абразивное изнашивание, нередко сопровождаемое появлением трещин, выкрашиванию значительных объемов металла и сколов, например, на зубьях ковша, при ударе о породу [55, 70]

Из литературных источников [55, 62, 63] и данных производственной статистики известно, что до 75% процентов всех отказов горного оборудования происходят вследствие износа деталей сопряжений и исполнительных органов машин, и только до 20% всех неисправностей происходят из-за поломок.

Небольшой процент повреждений связан с потерей каких-либо специфических свойств материала деталей- упругости, магнитных характеристик и др. При этом важно отметить, если износы протекают постепенно, т.е. в течение определенного, часто известного и прогнозируемого периода времени, то повреждения из-за поломок и образования трещин происходят, как правило, внезапно, часто приводя к аварийной остановке оборудования и необходимости его оперативного внепланового ремонта.

Из вышеприведенного анализа возможных неисправностей узлов карьерных экскаватора заметно, что для первой и третьей групп характерные дефекты связаны преимущественно с износом деталей (детали ДВС гидропривод, подшипниковые узлы, зубчатые передачи, зубья ковшей), для второй же группы повреждения проявляются в виде трещинам, к которым приводят критические напряжения, возникающие под действием ударных нагрузок.

При этом в практике ремонта экскаваторов примерно до 80% повреждений устраняют различными вилами наплавки и сварки, и только пятая часть дефектов устраняется с применением газотермических покрытий, гальваники, и полимерных составов.

Для экскаваторной техники, эксплуатируемой во Вьетнаме, появление всем перечисленных дефектов перечисленных в предыдущем параграфе, сопровождается активной коррозией, протекающей под влиянием влажного тропического климата и высокой среднесуточной температуры.

Атмосферным явлением в большей степени подвержены вторая и третья группа, так как работают в непосредственном контакте с абразивной средой и агрессивной морской атмосферы.

Вследствие этого, на ряду с процессами восстановления повреждённые поверхности должны быть дополнительно защищены антикоррозионными покрытиями.

Приводные устройства (электропривод, гидропривод), несущие конструкции, исполнительный орган.

По каждой дать характеристику износа и восстановления.

В связи с этим, при эксплуатации и техническом обслуживании тщательно осматривают узлы и агрегаты горной техники, с целью своевременного обнаружения и устранения трещин и других нарушений сплошности металла.

Контактирование экскаваторов с абразивной средой и крупными кусками породы, способствует

Часто трещины и поломки появляются в несущих конструкциях экскаватора, изготовленных с применением сварочных работ. Именно на такие узлы приходятся основные динамические и циклические нагрузки, пиковое значение которых приводят к локальному разрушению металла или же к более серьезному усталостному разрушению.

Экскаваторы во Вьетнаме часто эксплуатируются в условиях воздействия на них высокой влажности и агрессивной морской атмосферы. Это создает благоприятные условия для коррозии металлических элементов стрелы, платформы и других несущих соединений металлоконструкций.

Регулярная очистка и нанесение защитных покрытий могут предотвратить коррозию и продлить срок службы стрелы.

Анализ условий эксплуатации оборудования на угольных разрезах северных районов Вьетнама, а также на месторождениях по добыче важных промышленных строительных материалов – известняка, глины, каолина, полевого шпата, доломита и др., часто располагаемых в прибрежных зонах,

состава парка оборудования, эксплуатируемого на угольных разрезах северных районов Вьетнама, а также на месторождениях по добыче важных промышленных строительных материалов – известняка, глины, каолина, полевого шпата, доломита и др., часто располагаемых в прибрежных зонах, показывает наличие значительного числа как гидравлических, так и электромеханических экскаваторов преимущественно. При этом несмотря на имеющуюся систему технического обслуживания и ремонта оборудования основные причины отказов экскаваторов, а также значительных расходов на ремонт оборудования, связаны, прежде всего, с интенсивной

коррозией восстановленных сваркой и наплавкой уязвимых участков несущих металлоконструкций экскаваторов и износом ответственных элементов гидравлических систем.

Это определяет необходимость решения ряда важных задач в области повышения эффективности ремонта и ресурса восстановленных узлов экскаватора, требующих оперативного решения, так как потери металла в результате коррозии

1.3 Влияние климатических особенностей Вьетнама на условия эксплуатации и работоспособности карьерных экскаваторов

Карьерные экскаваторы широко применяют во Вьетнаме для освоения месторождений прибрежных зон, в особенности ценных строительных материалов и россыпей рудных тел промышленных минералов (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Использование экскаваторов для освоения залежей прибрежных зон

При этом несущие металлоконструкции подвергаются коррозионным воздействиям морской воды, вызывающей в металлах активную коррозию [88, 89]. Из рисунка 1.6 хорошо заметны большие пятна ржавчины на стреле экскаватора.

Вьетнам расположен в районе с жарким и влажным тропическим климатом. Средняя годовая температура по регионам здесь составляет 26-27⁰С, а средняя относительная влажность достигает 82%.

В высокогорных районах температура ниже, чем на равнинах и среднегорьях. Таким образом, высокотемпературный фон является благоприятным фактором для ускорения процесса коррозии, однако высокая температура также способствует уменьшению времени влагоудержания на поверхности металла [88].

Поскольку весь восток страны обращен к морю, имеет место очень высокая относительная влажность воздуха, в среднем 78-87%, относительная влажность уменьшается с севера на юг, в высокогорных районах влажность иногда достигает 85 - 87%. Высокая влажность способствует смачиванию металлической поверхности и способствует возникновению коррозии.

Из-за влияния муссонного климата общее количество осадков в стране достаточно велико, в среднем 1000-3000 мм/год; однако есть несколько регионов с большим количеством осадков, таких как вершина Бак Куанг, Бач Ма - там среднее количество осадков составляет 5000 мм/год, в то время как в Фан Ранге и Фан Тхет климат сравнительно сухой, общее количество осадков здесь составляет всего 1000 мм в год. Несмотря на это, количество осадков в Фан Ранге, Фан Тхет, все же выше, чем в Стокгольме, Швеция (700 мм/год). Обильные осадки - это ярко выраженный муссонный тропический климат, характерный для умеренных зон, который также является фактором, способствующим повышению влажности воздуха и ускорению коррозии [88, 90, 91].

При изучении влияния климатических факторов на процессы коррозии важным является такой параметр как время сохранения влаги на поверхности металлических конструкций (TOW).

Вышеупомянутые особенности тропического климата приводят к очень длительному периоду круглогодичной влажности воздуха со средним значением TOW 4000-6000 ч/год, что составляет примерно 45-75% времени года и означает, что 45-75% времени года воздух сохраняется влажным.

На основе статистических данных, собранных более чем на 100 метеорологических станциях за 10-летний период, была установлена

взаимосвязь между TOW и относительной температурой и влажностью для климатических зон Вьетнама [88]. Из-за высокого среднегодового температурного фона отрицательных температур не бывает, поэтому показатель всегда меняется с повышением температуры.

$$TOW = -14,09T + 228,6RH - 13050 \quad (1.1)$$

Уравнение (1.1) эмпирическое, оно очень удобно для расчета TOW через T (температура) и RH (относительная влажность) – параметры, которые всегда доступны на метеорологических станциях. Это уравнение также используется для расчета TOW для местоположений, которые не определяют значение TOW статистическим методом, на основе которого была построена карта распределения TOW в соответствии с ГОСТ ISO 9223 для регионов по всей стране (рис. 1.7, а). Примечательно, что время сохранения влажности во всех климатических зонах страны очень высокое, занимая уровни T4 и T5 (самое высокое) по ГОСТ ISO 9223.

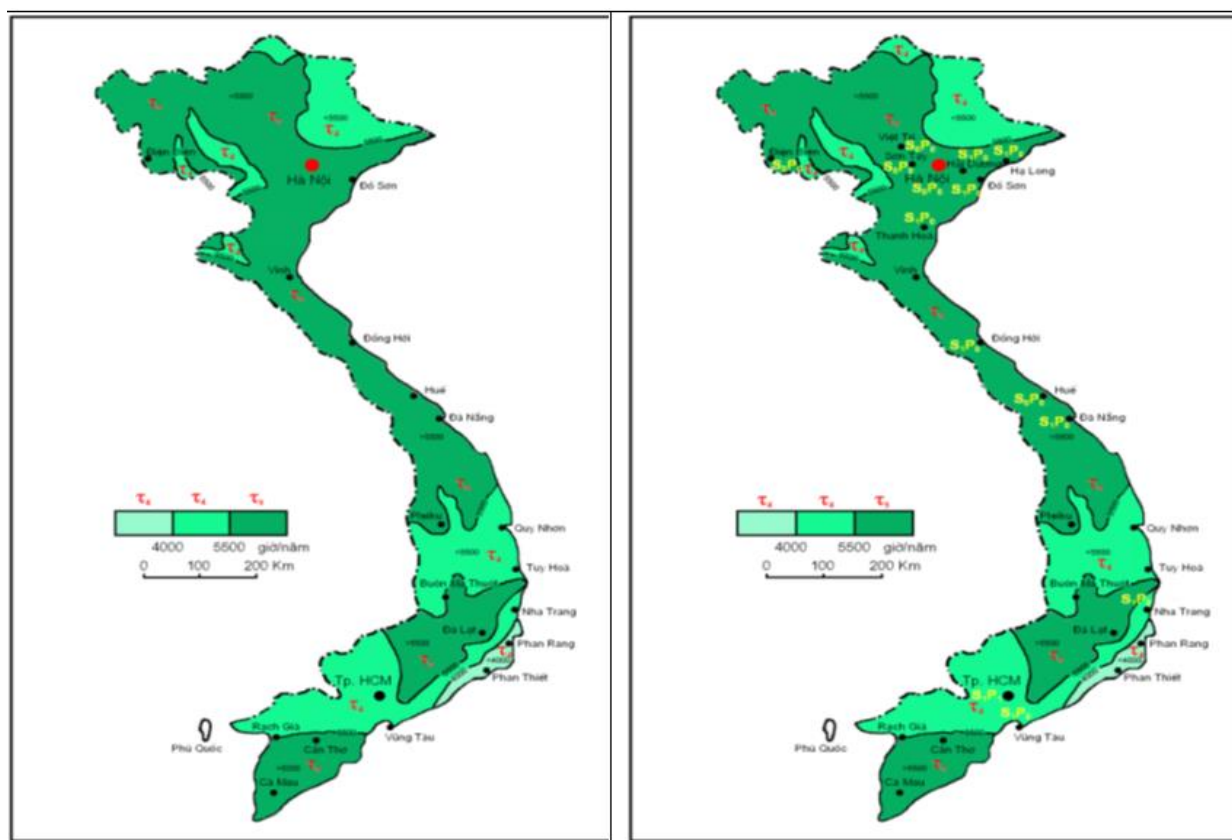


Рисунок 1.7 - Классификация TOW (а) и степень загрязнения атмосферы ионами SO_2 и CL^- (б) в соответствии по ГОСТ ISO 9223 [88]

Существует множество видов атмосферных примесей (более 2000 веществ), которые присутствуют в виде газов или мельчайших твердых/жидких частиц, взвешенных в воздухе (аэрозоли - переносимые по воздуху), но только восемь основных веществ/пар оказывают существенное влияние на процессы коррозии металлов (табл. 1.4), среди которых, как известно, наиболее распространенными примесями, ускоряющими коррозию металлов, являются ионы NO_x , SO_x и Cl^- .

Таблица 1.4. Чувствительность металлов к агрессивным примесям [86]

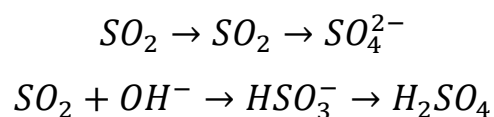
Агрессивные вещества	Ag	Al	Латунь	бРОЦ4-3	Cu	Fe	Ni	Pb	Sn	Сталь	Зл
$\text{CO}_2/\text{CO}_3^{2-}$	L			L		M	L	M		M	M
$\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$	M	L	L	L	M	L	L	L	L	L	L
$\text{NO}_2/\text{NO}_3^-$	N	L	M	M	M	M	M	M	L	M	M
H_2S	H	L	M	M	H	K	L	L	L	L	L
H_2S $\text{SO}_2/\text{SO}_4^{2-}$	L	M	H	H	H	H	M	M	L	H	H
HCl/Cl^-	M	H	M	M	M	H	M	M	M	H	M
RCOOH/COOH	L	L	M	M	M	M	H	H	L	M	M
O_3	M	N	M	M	M	M	M	M	L	M	M

Примечание: Н: очень чувствительный, М: средний, L: слабый, N: неэффективный.

Их эффекты можно кратко объяснить следующим образом.

- NO_2 , SO_2 [85, 86]

SO_2 и NO_2 являются основными промышленными выбросами, вызывающими коррозию металлов. Газ SO_2 образуется при сжигании серосодержащих топлив, или при выплавке из серосодержащих руд, SO_2 растворяется во влажной пленке и окисляется, создавая кислую среду ($\text{pH} < 4,5$) и ускоряя коррозию металла:



На самом деле, некоторые металлы, такие как алюминий/алюминиевые сплавы и цинк, достаточно стабильны в нейтральной среде (pH = 6–7,5), но очень быстро подвергаются коррозии в кислой среде [85].

Двуокись азота (NO₂) образуется в основном при высокотемпературном сгорании, когда закись азота (NO) быстро окисляется озоном с образованием NO₂. Двуокись азота совершенно нерастворима в воде, лишь небольшая часть реагирует в газовой фазе с гидроксильными радикалами и образует азотную кислоту (HNO₃), которая хорошо растворяется в воде и является коррозионно-активным веществом.

- Влияние хлорид-иона Cl⁻ - коррозия и разрушение материалов в морской среде [68, 69]

Ионы Cl⁻ существуют в виде крошечных твердых или жидких частиц, взвешенных в воздухе, обычно встречающихся в морской/прибрежной атмосфере или в промышленных зонах вокруг заводов по производству соляной кислоты или гипохлорида натрия.

В морской/прибрежной атмосфере ионы Cl⁻ являются основными возбудителями коррозии, поэтому риск повреждения оборудования и сооружений во много раз выше, чем на материке и вероятны аварии. Cl⁻-ион опасен для металлических материалов, ускоряет коррозию металлов и является возбудителем дырочной коррозии. Кроме того, ионы Cl⁻ обладают хорошей гигроскопичностью, способствуя образованию растворов электролитов на металлических поверхностях и продлевая TOW даже при высоких температурах. Ион Cl⁻ также увеличивает проводимость слоя влаги/раствора на поверхности металла, разрушая защитную пленку, тем самым увеличивая скорость коррозии. Кроме того, присутствие ионов Cl⁻ увеличивает риск и скорость стресс-коррозии металлических деталей и конструкций, особенно изготовленных из нержавеющей стали.

Выпадение ионов Cl^- определяется географическим положением, топографическими условиями и удаленностью от побережья, а также скоростью и направлением ветра. Тропическая морская атмосфера обычно имеет максимальную скорость коррозии, где скорость коррозии постоянно выше, чем в умеренной морской и тропической городской/промышленной атмосфере.

В приведенных ниже примерах сравниваются скорости коррозии в морской и наземной среде. Данные исследования коррозии углеродистой стали на пляже Куре (США) показывают, что скорость коррозии на расстоянии 250 м от уреза воды составляет 0,143 мм/год, а на расстоянии всего 25 м - скорость коррозии увеличился в 3,7 раза, достигая 0,53 мм/год. Другие данные также показывают, что скорость коррозии сталей в морской атмосфере от 1,3 до 1,5 и даже в 7,5 раз превышает скорость коррозии того же материала в наземной атмосфере [86, 91]. Данные исследований во Вьетнаме также показывают, что: скорость коррозии углеродистой стали на прибрежных станциях в 1,2-1,9 раза выше, чем на внутренних станциях (табл. 1.5) [91].

Таблица 1.5 Скорость коррозии углеродистой стали в некоторых районах Вьетнама [91]

Период	Прибрежная атмосфера		Атмосфера внутри страны	
	Станция	Скорость коррозии, г/год	Станция	Скорость коррозии, г/год
1995-1996	ДО ШОН	280-290	ХА НОЙ	240
1995-1996	НЬА ЧАНГ	254	ХОШИМИН	192
2010-2011	ДОНГ ХОЙ	379	ХА НОЙ	204

- Прочие примеси [85, 89]

Другие примеси включают двуокись углерода (CO_2), озон (O_3), аммиак (NH_3), сероводород (H_2S) и хлористый водород (HCl), а также органические кислоты, такие как муравьиная кислота (HCOOH) и уксусная кислота (CH_3COOH). , вызывают коррозию большинства металлических материалов. Оседая на поверхности металла и растворяясь во влажной пленке, они образуют ионы, такие как H^+ , Cl^- , COOH^- , CH_3COO^- , которые увеличивают

электропроводность и ускоряют коррозию металла. Кроме того, большая часть аэрозольных частиц, поглощающих воду, увеличивает значение TOW.

По методу ГОСТ ISO 9223 была проведена классификация степени коррозии для некоторых климатических зон Вьетнама на основе данных TOW, скорости осаждения ионов Cl^- и газа SO_2 (таблица 1.6) [88]. Поскольку время влагоудерживания всех климатических зон нашей страны очень велико, составляя T4 и T5, то и степень коррозии климатических зон Вьетнама довольно высока - C3 и C4 для всех климатических зон, в том числе металлических материалов (таблицы 1.6, 1.7) [88], хотя солёность атмосферы и содержание SO_2 находятся только на самом низком уровне - S0-1 и P1 (табл. 1.6).

Таблица 1.6. Климатические, экологические параметры и классификация по ISO

	Место проведения тест	TOW		Cl^-		SO_2	
		Час/год	IOS	мг/м ² день	ISO	мг/м ² день	ISO
1	Диен биен	5876	T5	1,16	S ₀		
2	Вьет чи	5967	T5	1,88	S ₀	6,67	P ₀
3	Шон тау	6007	T5	1,5	S ₀	7,92	P ₀
4	До шон	6352	T5	17,51	S ₀	2,8	P ₀
5	Хай зыонг	6226	T5	6,89	S ₁	6,01	P ₀
6	Ха ной	4917	T4	2,24	S ₁	7,95	P ₀
7	Тхань хоа	6158	T5	3,48	S ₀	3,9	P ₀
8	Донг хой	5604	T5	10,28	S ₁	2,49	P ₀
9	Донг хой 2		T5	40,1	S ₁		P ₀
10	Хие	6001	T5	1,33	S ₀	0,98	P ₀
11	Да нанг	5702	T5	4,99	S ₁	3,83	P ₀
12	Нья чанг	4848	T4	15,64	S ₁	1,34	P ₀
13	Хошимин	4612	T4	4,58	S ₁	12,63	P ₀
14	Вунг Тау	4400	T4	12,16	S ₁	3,23	P ₁
15	Му Тхо	5543	T5				P ₀

Высокие значения TOW приводят к интенсивной коррозии элементов металлоконструкций (рис.1.9), проявляемой в виде сплошной и язвенной коррозии.



Рисунок 1.8 – Язвенная коррозия на стальной детали [39]

Из-за наличия в морской воде растворенных хлоридов (ионов- активаторов Cl^-) она обладает депассивирующим действием по отношению к металлической поверхности (разрушает и предотвращает появление пассивных пленок на поверхности металла).

Таблица 1.7 – Скорость коррозии стальных металлоконструкций вследствие коррозии в различных районах Вьетнама

	Месторасположение испытательных станций	Потеря массы с единицы площади $гр/м^2$	ISO
1	Диен биен	220,69	C3
2	Вьет Чи	219,69	C3
3	Шон Тау	212,22	C3
4	До Шон	279,74	C3
5	Хай Зьонг	287,52	C3
6	Ха Ной	249,71	C3
7	Тхань Хоа	242,95	C3
8	Донг Хой(1)	255,76	C3
9	Донг Хой(2)	280,29	C3
10	Хие	247,67	C3
11	Да Нанг	264,65	C3
12	На Чанг	318,72	C3
13	Хо Ши Минь	190,53	C3
14	Вунг Тау	205,77	C3
15	Ми Тхо	186,35	C3

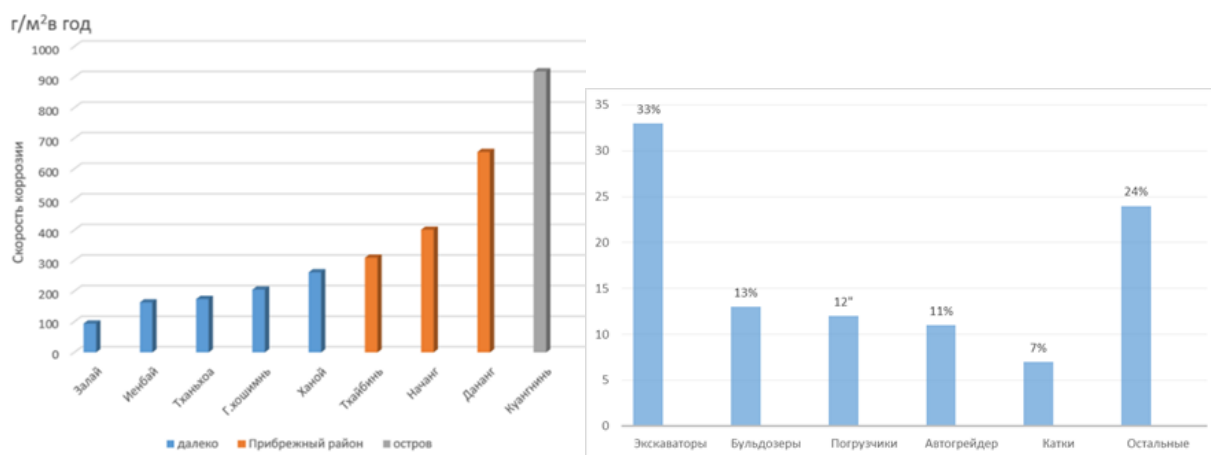
Таблица 1.8 - Скорость коррозии цинковых покрытий в зависимости от метода осаждения.

Испытательная станция	Горячий цинк		Спрей цинк	
	К, гр/м ²	ISO	К, гр/м ²	ISO
Ханой	10,858	C ₃	31,180	C ₄
До шон	18,387	C ₄	31,828	C ₄
Да Нанг	22,300	C ₄	35,581	C ₄
Нья Чанг	36,262	C ₄	39,468	C ₄
Хошимин	16,129	C ₄	38,730	C ₄
Вунг Тау	20,97	C ₄	30,645	C ₄

Таблица 1.9- Скорость коррозии некоторых металлов во Вьетнаме в зависимости от удаленности от моря (ГОСТ ISO 9223) [88]

Место проведения теста	Скорость коррозии (г/м ² в год)			Расположение относительно моря
	Сталь	Медь	Алюминий	
Залай	94,2	11,1	0,83	Далеко
Иенбай	163,4	6,6	0,67	Далеко
Тханьхоа	174,5	49,5	3,39	Далеко
Г. Хошимин	205,4	16,6	0,08	Далеко
Ханой	261,8	7,4	2,1	Далеко
Тхайбинь	309,4	10,6	0,55	Прибрежный район
Начанг	401,1	16,4	3,49	Прибрежный район
Дананг	655,1	20,4	4,49	Прибрежный район
Куангтнинь	918,8	47,4	7,42	Прибрежный район (в острове)

ая необходимость защиты стальных металлических конструкций от коррозии, в особенности после их восстановительного ремонта.



а

б

Рисунок 1.9 – Скорость коррозии стали в год в зависимости от региона эксплуатации горных машин (*а*), структура парка оборудования ДСМ(*б*)

Из таблиц 1.7-1.9 и рис. 1.9, *а*, что видно, что медь, цинк и алюминий корродируют гораздо медленнее, чем сталь, что обосновывает эффективность использования данных материалов в качестве покрытий для защиты стали от коррозии с возможностью периодически возобновлять защитные покрытия с учетом имеющегося обширного парка экскаваторного оборудования (рис. 1.9, *б*).

1.4 Обоснование цели и задач исследования

Решение актуальных задач в области развития сырьевой базы Вьетнама тесно связано с внедрением прогрессивных технологий горного дела, развитием кадрового потенциала и техническим оснащением карьеров, рудников и шахт передовой горной техникой.

Известно, что эффективная работа горных предприятий зависит прежде всего от технического состояния парка используемого оборудования, от качества и оперативности проведения ремонтных работ. Для сервисного обслуживания оборудования на горных предприятиях Вьетнама организовано функционируют подразделения ремонтных служб, усилиями которых своевременно устраняются неисправности и обеспечивается работоспособность оборудования.

Во Вьетнаме так же как и в России применяется планово-предупредительная система ремонта горного оборудования, в рамках которой предполагаются ежесменное обслуживание, систематическое текущее обслуживание, а также проведение плановых ремонтов – текущего (или среднего, с частичной разборкой ремонтируемых узлов) и капитального ремонта, при выполнении которого машину полностью разбирают, изношенные узлы направляют на утилизацию, заменяя их новыми запасными частями.

Следует отметить, что используемая во Вьетнаме горная техника практически вся импортируется из-за рубежа, соответственно в большей степени процессы ремонтного восстановления осуществляются без достаточной технической информации о ремонтируемом объекте вследствие слабой обеспеченности сопроводительной технической документацией. При этом капитальный ремонт осуществляют, преимущественно, индивидуальным методом или узловым с обезличиванием деталей [12].

В первом случае с машины снимают узлы и детали, требующие восстановления и после ремонта устанавливают на их прежнее место. Данный вид ремонта сопряжен с длительными простоями оборудования, так работы выполняются последовательно, без совмещения во времени основных переходов, требует значительных производственных площадей.

При узловом обезличенном ремонте все детали, требующие ремонта, при разборке узлов демонтируют, направляют в ремонтные подразделения, а на место неисправных устанавливают новые детали из фонда запасных частей, либо детали и узлы ранее отремонтированные. Таким образом, выполняют ремонт редукторов, гидроприводов, манипуляторов и др. Такой ремонт предполагает наличие оперативного запаса ремонтных комплектов и достаточный оборотный фонд деталей, который не всегда удается обеспечить, принимая во внимание тот факт, что детали закупаются у зарубежных производителей.

Ряд крупных горнодобывающих предприятий Вьетнама имеют собственные ремонтные базы, вместе с тем, не все из них имеют возможность выполнять сложные ремонты, например, объёмных гидроприводов горной

техники, в частности ремонт деталей узлов трения аксиально-поршневых насосов [12, 20].

В последние годы во Вьетнаме появился ряд предприятий по техническому обслуживанию и ремонту горной и дорожно-строительной техники в формате сторонних узкоспециализированных предприятий или ремонтных мастерских, сервисных центров производителей горного оборудования и специальные заводы по ремонту горной техники.

Более качественное техническое обслуживание с установкой оригинальных запасных частей выполняют сервисные центры. Стоимость ремонта у них несколько выше, чем у сторонних предприятий. Это связано с более высокой квалификацией персонала, отсутствием проблем с закупкой и своевременной поставкой запасных частей и гарантией на выполнение ремонтных работ.

Что же касается сторонних малых и специальных крупных предприятий по капремонту горной техники, то здесь имеется ряд противоречий и недостатков системного характера, которые необходимо устранять. В первую очередь это применение малоэффективных и нерациональных технологий ремонта, а также отсутствие должного качества контроля проведения ремонтных работ. Поэтому задачи, связанные с усовершенствованием применяемых технологий на основе освоения новых прогрессивных методов ремонта имеют для ремонтных служб Вьетнама важное значение.

В производственных процессах ремонта широко применяются различные способы сварки плавлением – электродуговая ручная и автоматическая в защитных средах. Также применяются установки для наплавки под слоем флюса. Все эти методы ремонта широко используют для заделки трещин в несущих металлоконструкциях, а также наплавки компенсационных слоев для восстановления рабочих размеров и форм изношенных деталей.

На некоторых предприятиях стали использовать газотермические методы напыления защитных покрытий, в частности, при ремонте деталей

гидроцилиндров [42, 43, 45], находят внедрение индукционная наплавка, а также сборка отремонтированных гидроцилиндров с применением метода регулировки с целью достижения высокой точности зазора в соединении цилиндр-поршень при переводе сопрягаемых деталей в ремонтный размер.

Вместе с тем, при ремонте деталей с применением сварки остается открытым вопрос защиты восстановленных элементов металлоконструкций от воздействия морской атмосферы, которая оказывает негативное влияние на эксплуатационные свойства восстановленных конструкций ввиду активации электрохимической коррозии в сварных швах. В особенности эти вопросы становятся актуальными при проведении ремонта крупногабаритных конструкций в полевых условиях – заварка трещин на поворотной платформе экскаватора, при ремонте сваркой рукояти стрелы или направляющих колес гусеничного шасси и ряд других узлов.

Отсутствие современных технологий ремонта ограничивает восстановительный ремонт деталей из цветных сплавов узлов трения скольжения с незначительными износами и приводит к большим расходам на закупку комплектующих, тогда как можно восстанавливать подобные детали в условиях ремонтного производства.

Эти обстоятельства приводят к необходимости решения ряда важнейших задач, связанных с необходимостью модернизации ремонтных подразделений на основе внедрения современных технологий ремонта машин и защиты деталей от коррозии и износа. Все это возможно на основе исследования причин возникновения и развития коррозионных процессов в металлоконструкциях, анализа механизмов защиты от коррозии в морской среде, выбора рационального материала для защиты сварного шва, процессов восстановления изношенных деталей узлов трения скольжения гидроприводов, в частности, изготовленных из цветных сплавов ключевых компонентов аксиально-поршневых насосов.

Глава 2 Обоснование механизма и способа защиты сварных соединений от электрохимической коррозии в морской воде

Одной из важнейших задач, стоящих перед ремонтными службами горно-рудных предприятий Вьетнама, является борьба с коррозионными процессами, протекающими в несущих металлоконструкциях, дефекты в которых устраняются при помощи наплавки и сварки. Наличие агрессивной морской атмосферы приводит интенсивному коррозионному разрушению восстановленных участков несущих металлоконструкций и требует разработки и внедрения дополнительных мер их защите от воздействия морской воды в виде соляного тумана или паров. Для этих целей необходимо проанализировать и исследовать факторы, стимулирующие в стальных металлоконструкциях зарождение и развитие коррозионных процессов, приводящих к полному разрушению ответственных элементов. Это позволит выработать стратегию защиты восстановленных элементов конструкции от коррозии и повысить их ресурс.

2.1 Факторы, определяющие склонность сварных соединений к электрохимической коррозии

Согласно [17, 37, 65], склонность сварных металлоконструкций к разрушениям (K) в агрессивных средах обусловлена, главным образом, следующими факторами (рис. 2.1):

- свойствами конструкционного материала (M);
- напряженным состоянием материала изделия (H);
- видом и свойствами воздействующей агрессивной среды (C).

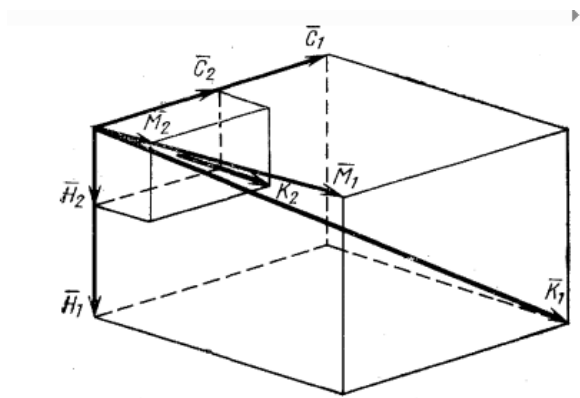


Рисунок 2.1 – Факторы, влияющие на разрушение металлоконструкций в агрессивной среде

В соответствии с рис. 2.1, где степень влияния каждого из рассматриваемых факторов отображена соответствующим вектором, в общем виде можно записать:

$$\bar{M} + \bar{H} + \bar{C} \rightarrow \bar{K}$$

Из рисунка видно, что в зависимости от конкретных условий производства (факторы М и Н) и эксплуатации сварной конструкции (фактор С) могут иметь место различные виды ее разрушения – от механического разрушения, при незначительном влиянии окружающей среды, до сплошной коррозии, в случае слабой роли напряжений.

При активном воздействии на конструкцию факторов Н и М, помимо агрессивной среды, характер и механика разрушения сварного соединения будут зависеть от интенсивности, знака и цикличности напряжений первого σ_I (уравновешиваемые в макрообъемах сварного соединения или шва) и второго σ_{II} рода (уравновешиваемые в пределах зерен металла), запаса и концентрации потенциальной энергии первого W_I и второго W_{II} рода, т.е.

$$H=f(\sigma_{I,II}, W_{I,II}),$$

а также исходных свойств материала конструкции M_n и неоднородности свойств, приобретенных в процессе технологии изготовления конструкции M_t , определяющих степень термодинамической и электрохимической

неустойчивости материала сварного соединения, т.е. его восприимчивости к воздействию среды,

$$M=f(M_{и}, M_{т}).$$

Сварные соединения, как правило, характеризуются неоднородной структурой материала различных зон термического влияния, а с учетом воздействия внешних рабочих нагрузок, постоянно пребывают в напряженном состоянии. Таким образом, в зависимости от интенсивности проявления факторов, коррозионное разрушение для сварных соединений в напряженном состоянии может появляться в виде сплошной коррозии, ускоренной местной коррозии и растрескивании (рис. 2.2).

Интенсивность влияния коррозионной среды зависит от ее химического состава C_x , а также конкретными температурой и продолжительностью воздействия, характером контактирования сварного соединения со средой $C_{в}$, т. е.

$$C=f(C_x, C_{в}).$$

С учетом всех перечисленных факторов и условий, склонность сварного соединения к коррозии в общем виде можно выразить как:

$$K \leftarrow \begin{cases} H = f(\sigma_{I,II}, W_{I,II}) \\ M = f(M_{и}, M_{т}) \\ C = f(C_x, C_{в}) \end{cases} \quad (2.1)$$

Таким образом, специфика, причины, кинетика и механизм разрушения сварных соединений обусловлены прежде всего теплофизическим и химико-металлургическим воздействием сварки, поскольку данный процесс вследствие колоссального термического влияния активирует в локальных зонах неблагоприятные изменения структуры и свойств металла, приводит к появлению концентраторов напряжения, а, следовательно, изменению напряженного состояния сварного шва и околошовной зоны в связи с чем усиливается влияние коррозионной среды на работоспособность сварных соединений.

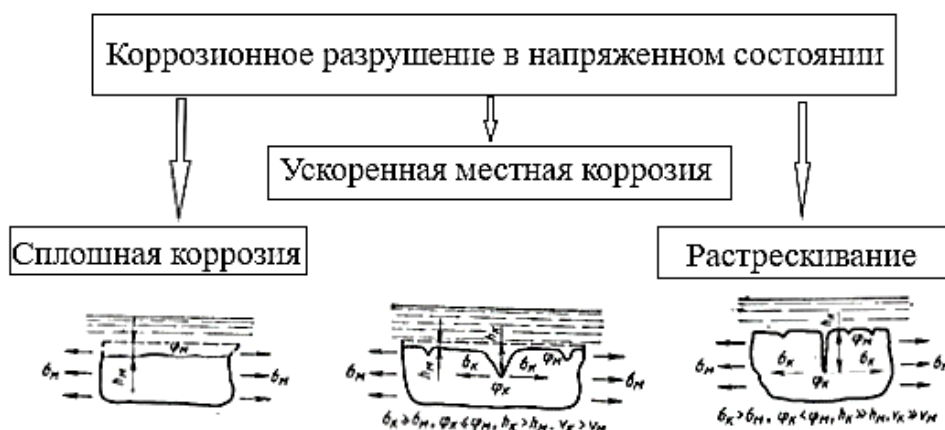


Рисунок 2.2 – Виды коррозионных разрушений в напряжённом состоянии:

σ_M, σ_K – напряжение в основном металле и в вершине концентратора; φ_M, φ_K – электродный потенциал на поверхности металла и вершине концентратора; v_M, v_K – скорость коррозии основного металла и вершины концентратора; h_M, h_K – скорость коррозии на поверхности и в концентраторе

Интенсивность теплофизического воздействия обусловлена спецификой сварки плавлением – неравномерностью нагрева и охлаждения металла, и зависит от термомеханического цикла сварочного процесса. В свою очередь химико-металлургическое воздействие проявляется в зоне сварки реакциями, протекающими между основным металлом, присадочным материалом и защитными газами, что вызывает изменение химического состава сплава в самом шве, околошовной зоне и на поверхности сварного соединения. Интенсивность данных процессов напрямую зависит от способа, технологического процесса и качества сварочных работ.

Несущие металлоконструкции экскаватора изготовлены из стали. Как правило, для них применяют низкоуглеродистые стали обыкновенного качества Ст 3сп, Ст4, и низколегированные 09ГС в случае тропического исполнения. Выбор данных материалов обусловлен низким содержанием в стали углерода, что обеспечивает ее высокую свариваемость практически всеми способами сварки как при изготовлении, так и заварку трещин при ремонте металлоконструкций.

Структурные области сварного соединения из стали определяются полиморфными превращениями железа $Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$ в рабочем интервале температур сварки и зависят также от скоростей нагрева-охлаждения сварного шва V_n , V_o и длительности пребывания в интервале рабочих температур t_1 , t_2 . Вследствие этого появляются характерные для сварного соединения следующие области (рис. 2.3): собственно сварной шов 1 с литой столбчатой структурой; околошовная зона 2, характеризующаяся неполным сплавлением основного и присадочного материала вследствие чего здесь имеет место заметная химическая, структурная и геометрическая неоднородность; зона перегрева 3 (1500-1200⁰C) с характерной крупнозернистой структурой и пониженными механическими свойствами; нормализованная зона 4 (1200 – 900 ⁰C) с мелкозернистой структурой, образуемой вследствие кратковременного пребывания в области температур выше точки A_{c3} и ускоренного охлаждения; участок неполной перекристаллизации 5 вследствие нагрева в интервале температур (900 – 750⁰C) со смешанной структурой, состоящей из зерен претерпевших рекристаллизацию и зерен исходного материала; зона полной рекристаллизации 6 (750 – 450⁰C), после которой участок синеломкости 7 (500 – 300⁰C) и затем уже зона исходного металла с ориентированной структурой прокатного металла.

Образование различных структурных зон приводит к неоднородности свойств металла сварного соединения, появлению напряжений, большого числа дислокаций и остаточных деформаций [65].

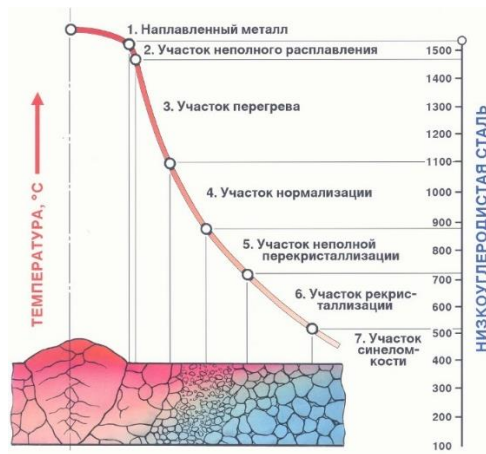


Рисунок 2.3 – Строение сварного шва и прилегающих к нему участков

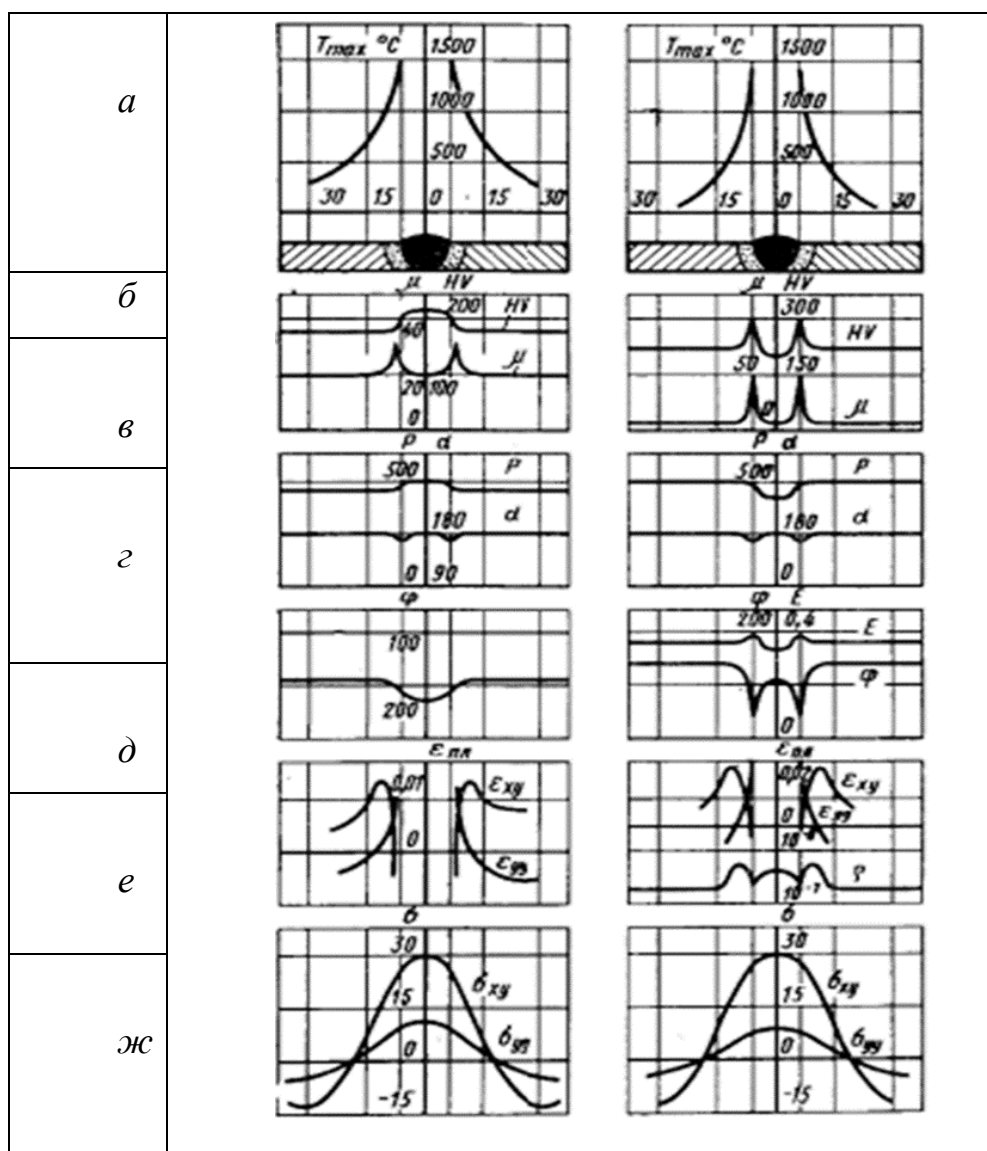


Рисунок 2.4 – Характеристика свойств и параметров различных участков сварного соединения: *a* – интервалы рабочих температур при нагреве и охлаждении; *б* – схема сварного соединения в поперечном сечении; *в* – изменение твердости по Виккерсу HV и размер зерна μ ; *г* – механические свойства при изгибе в зависимости от нагрузки P и угла изгиба α ; *д* – электродный ϕ и термоэлектрический E (мВ) потенциалы шва; *е* – остаточные пластические продольные ϵ_{xy} и поперечные ϵ_{yy} деформации; *ж* – остаточные продольные σ_{xy} и поперечные σ_{yy} напряжения (кгс/мм²) [65]

Таким образом, сварные соединения представляют собой гетерогенную систему, в силу чего они проявляют высокую термодинамическую неустойчивость и поэтому достаточно чувствительны к воздействию агрессивных сред.

При этом в сварном соединении связь между эквивалентным напряжением σ_i и пластической составляющей эквивалентной деформации ε_i описывается зависимостью:

$$\sigma_i = A \varepsilon_{i\text{пл}}^n \quad (2.2)$$

где A и n – коэффициенты, численное значение которых для материалов СтЗсп и 12Х18Н10Т соответственно составляют: $A = 630 \dots 700$ МПа, $n = 0,15 \dots 0,22$; $A = 630 \dots 700$ МПа, $n = 0,34$;

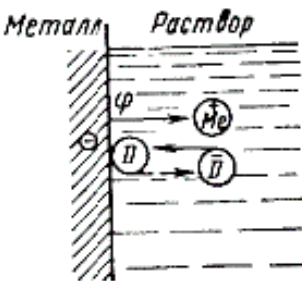
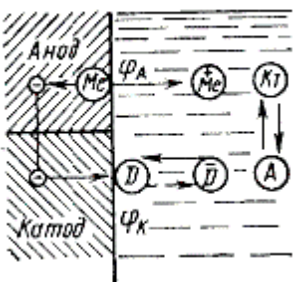
2.2 Теоретическое исследование электрохимической коррозии сварных соединений

Электрохимическая коррозия сварного соединения происходит вследствие термодинамической неустойчивости различных участков конструкции, прилегающих к сварному шву, возникающей вследствие термомеханического влияния сварки плавлением, и представляет собой процесс самопроизвольного разрушения материала по причине электрохимического взаимодействия металлов с электролитической средой. При этом разрушение происходит вследствие протекания следующих двух процессов:

- анодного растворения - ионизации атомов и перехода ионов металлов в электролит с оставлением эквивалентного количества электронов в металле;
- катодного процесса - восстановления окислительных компонентов раствора с присоединением электронов, возникающих при ионизации.

Оба процесса протекают с возникновением электрического тока в системе «металл-электролит» и могут быть реализованы по гомогенно- и гетерогенно-электрохимическому механизму (табл. 2.1) [1, 18, 67].

Таблица 2.1 – Механизмы электрохимической коррозии [65]

Механизм коррозии	Схема процесса электрохимической коррозии	Особенности протекания
Гомогенная		1. Две стадии протекания процесса без пространственного разделения металла на анодные и катодные участки 1.1 $neMe^{n+} + mH_2O \rightarrow Me^{n+}H_2O + ne$ (анодная реакция окисления $\rightarrow$) 1.2 $Dm + mH_2O \leftarrow Dm^{n+}mH_2O + ne$ ($\leftarrow$ катодная реакция восстановления) 2. Наличие коррозионного тока 3. Зависимость кинетики процесса от электродного потенциала
Гетерогенная		Возможность пространственного разделения сопряженных анодных (1.1) и катодных (1.2) процессов
Примечание: Me-металл, D - деполяризатор; e – электрон; K – катион; A-анион; φ_A, φ_K - электродные потенциалы анода и катода, φ_A < φ_K. - - - -> - диффузия продуктов катодной реакции		

Условие самопроизвольного протекания коррозионного процесса:

$$\Delta S > 0, \quad S \rightarrow \max \quad (2.3)$$

$$\Delta G < 0, \quad G \rightarrow \min, \quad (2.4)$$

где S -энтропия системы и G – изобарно-изотермический потенциал Гиббса - параметры, характеризующие термодинамическую неустойчивость металла.

В случае электрохимической коррозии мерой химического сродства и степени термодинамической неустойчивости является электрохимический (или электродный) потенциал ϕ металла в данной коррозионной среде, возникающий в связи с образованием двойной электрической прослойки - пространственного распределения электрического заряда на границе контакта разных фаз [51]. При

этом, чем отрицательнее потенциал металла, тем более он термодинамически неустойчив и склонен к коррозии. Связь между потенциалом Гиббса G и электрохимическим потенциалом φ описывается выражением:

$$\Delta G = -n\Delta\varphi F = -n[(\varphi_{\kappa})_{\text{обр}} - (\varphi_{\alpha})_{\text{обр}}]F \quad (2.5)$$

где ΔG – изменение изобарно-изотермического потенциала коррозионного процесса; n – число грамм-эквивалентов вещества; F – число Фарадея.

$$\Delta\varphi = (\varphi_{\kappa})_{\text{обр}} - (\varphi_{\alpha})_{\text{обр}},$$

где $(\varphi_{\kappa})_{\text{обр}}$ – обратимый потенциал катодной реакции в данных условиях; $(\varphi_{\alpha})_{\text{обр}}$ – обратимый потенциал анодной реакции в данных условиях.

Из этого выражения следует, что самопроизвольная электрохимическая коррозия возможна при условии $(\varphi_{\alpha})_{\text{обр}} < (\varphi_{\kappa})_{\text{обр}}$. Соответственно, степень электрохимической неустойчивости определится выражением [51]:

$$\Delta\varphi = -\frac{\Delta G}{nF} \quad (2.6)$$

Между тем, термодинамическая неустойчивость, обусловленная электродным потенциалом, однозначно не определяет кинетики коррозии. Скорость коррозии, согласно законам электрохимической кинетики, определяется общим значением потенциала на границе металл-раствор, составом раствора и условиями диффузии компонентов или продуктов реакции в растворе, явлениями поляризации [51, 57].

Участки металла, имеющие более отрицательный потенциал, становятся анодом, более положительный – катодом [51, 57]. Коррозионная среда растворяет главным образом анодные сегменты. Согласно гетерогенному механизму, общий ток коррозии равен:

$$I_{\kappa} = \sum I_{\kappa\alpha}, \quad (2.7)$$

Здесь

$$I_{\kappa\alpha} = (\varphi_{\kappa}^0 - \varphi_{\alpha}^0) / (R + P_{\kappa} + P_{\alpha})$$

представляет собой коррозионный ток микро- и макроэлементов; φ_{κ}^0 , φ_{α}^0 – начальные потенциалы катодного и анодного участков коррозионного элемента; P_{κ} , P_{α} – величины поляризационных катодного и анодного

сопротивлений этих участков; R – омическое сопротивление системы. $\varphi_k^0 - \varphi_a^0$ – электродвижущая сила коррозионного элемента, характеризующая степень термодинамической устойчивости системы;

потенциалов катодных и анодных участков с усилением их поляризации и увеличением сопротивлением коррозионной среды; $(R + P_k + P_a)$ – общее кинетическое торможение системы.

Таким образом, коррозия тем слабее, чем меньше первоначальная разность потенциалов катодных и анодных участков, чем сильнее их поляризация и чем больше сопротивление коррозионной среды.

Потеря массы при электрохимической коррозии определяется скоростью анодного растворения, которое характеризуется плотностью тока, пропорциональной потере вещества с единицы площади анода:

$$m = i_a \frac{A}{nF} t, \quad (2.9)$$

где m – количество металла, перешедшего в раствор с единицы поверхности в результате анодного растворения; i_a – плотность анодного тока; A – относительная масса металла; n – валентность металла; F – число Фарадея; t – время коррозии.

Изменение изобарно-изотермического потенциала Гиббса ΔG и электрохимического потенциала $\Delta \varphi$, вызываемое теплофизическим и термомеханическим воздействием сварки определится разностью потенциалов сварного соединения G_c и основного металла G_m (рис. 2.5):

$$\Delta G_c = G_c - G_m; \quad \Delta \varphi_c = \varphi_c - \varphi_m \quad (2.10)$$

Появление разности потенциалов в коррозионной среде связано, прежде всего, со структурными и полиморфными превращениями в стали в процессе сварки, что приводит к образованию концентраторов напряжений, изменению свойств поверхности сварного соединения, возникновению остаточных деформаций и описывается обобщенно выражением:

$$\Delta G_c \leftarrow \sum_{i=1}^{i=n} G_{ci} = \Delta G_{\text{сполм}} + \Delta G_{\text{схим}} + \Delta G_{\text{сструк}} + \Delta G_{\text{спов}} + \dots \quad (2.11)$$

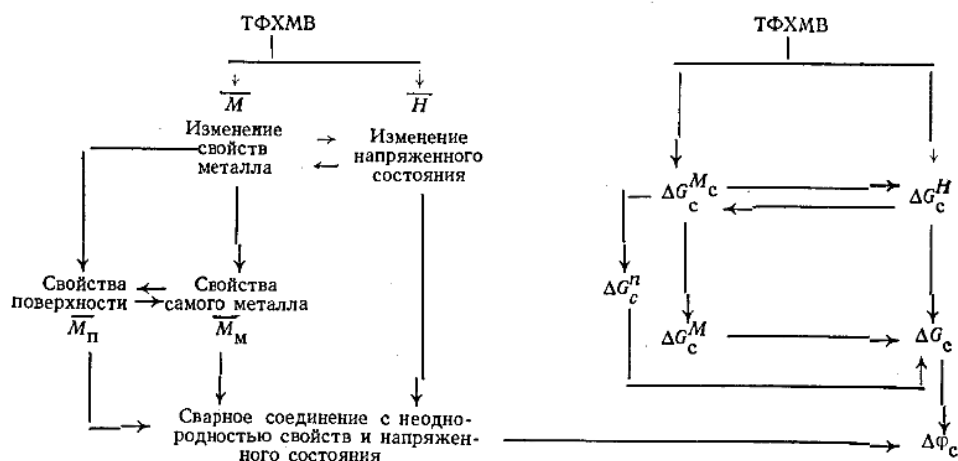


Рисунок 2.5 – Влияние сварки на свойства металла, напряженное состояние и его термодинамическую неустойчивость

Термодинамические закономерности для ряда сварных соединений приведены в работах [18, 47].

Сварное соединение характеризуется повышенной по сравнению с основным металлом термодинамической и соответственно электрохимической неоднородностью 2-х видов:

- макро химической неоднородностью, обусловленной различием потенциалов в разных зонах сварного соединения;
- локальной электрохимической неоднородностью, обусловленной структурной и химической неоднородностью в пределах каждой зоны.

Значение общих и локальных электродных потенциалов и величина поляризуемости характеризует восприимчивость сварного соединения к воздействию различных сред [51]. Из-за повышенной неоднородности коррозионное разрушение сварных соединений происходит по гетерогенно-электрохимическому механизму и обусловлено двумя взаимосвязанными процессами: анодным растворением по макрогетерогенно-электрохимическому механизму по причине макроэлектрохимической неоднородности разных зон и саморастворение этих зон. Последнее возможно как по микрогетерогенно - и гомогенно-электрохимическому механизмам (рис. 2.6)

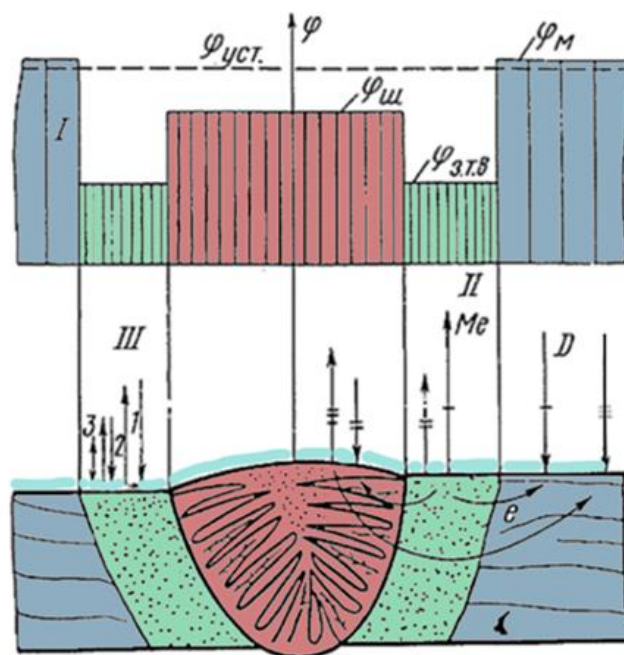


Рисунок 2.6 – Схема электрохимической коррозии сварного соединения:

I – схематическое распределение начальных макропотенциалов в сварном соединении; $\varphi_{ш}$, $\varphi_{з.т.в.}$, $\varphi_{М}$ – электродный потенциал шва, зоны термического влияния и основного материала; $\varphi_{уст}$ – установившийся стационарный потенциал поляризованной системы «шов-з.т.в.-основной металл»; II – принципиальная схема макроэлектрохимической коррозии: макропара «основной металл – з.т.в.», макропара «з.т.в. – шов», макропара «основной металл – шов+з.т.в.»; III – схема саморастворения: 1 – гетерогенный механизм электрохимической коррозии; 2 – гомогенный механизм электрохимической коррозии; 3 – химическая коррозия [37]

Анализируя схему электрохимической коррозии, представленную на рисунке 2.6, можно предположить, что сварное соединение представляет собой сложную многоэлектродную систему, при этом возможны различные соотношения между электродными потенциалами различных зон и, значит, различная стойкость против коррозионного разрушения. Более сложная система электродных потенциалов возникает при коррозии сварных соединений из сталей разных марок и разнородных материалов.

В табл. 2.2 приведены электродные потенциалы сварных соединений из низкоуглеродистой и нержавеющей хромоникелевой стали, из которой видно, что возникающие электродные потенциалы различных участков сварного соединения зависят в том числе и от способа сварки.

Таблица 2.2 - Электродные потенциалы сварных соединений в различных средах [65]

Материал	Способ сварки	Присадочный материал	Коррозионная среда	Электродный потенциал, мВ		
				Основной металл	Сварной шов	ЗТВ
Сталь углеродистая	РДС покрытым электродом	Покрытие руднокислосое основное рутиловое	Морская вода	-385	-410 -390 -395	- - -
	Неплавящимся электродом	Без присадки	3%NaCl 20%NaOH	-152 -555	-172 -570	-162 -580
Сталь аустенитная 12X18Н10Т	Аргонно-дуговая	Без присадки	3%NaCl 1%HNO ₃ 42%MgCl*	+137 +83 +126	+108 +80 +126	+75 +83 -
	РДС	ЦЛ II	65%HNO ₃ * 50%H ₂ SO ₄	+1250 -0,54	+1250 -0,531	+1170 - 0,528
*Кипящий раствор						

При коррозии по макрoхимическому механизму определение электродных потенциалов позволяет оценить коррозионную неустойчивость сварных соединений. Чрезвычайно опасно, когда в качестве анода служит сварной шов или зона термического влияния. Вследствие малой площади этих участков по сравнению с основным металлом, плотность коррозионного тока в этих областях будет достаточно высока, что приведет к высокой скорости растворения металла. Для макрoгальванического элемента «основной металл – сварное соединение» коррозионный ток определяется выражением

$$I_{\text{кор}} = F_c i_c = F_m i_m, \quad (2.12)$$

где, F_m , i_m , F_c , i_c – площадь и плотность тока основного металла и сварного соединения.

Поскольку $F_M \gg F_c$, постольку $i_c \gg i_m$, что указывает на то, что в агрессивной атмосфере более интенсивно самопроизвольная коррозия будет протекать в сварном соединении, а именно в тех зонах, где больше величина разброса потенциалов.

Скорость электрохимической коррозии пропорциональна анодной плотности тока i_A растворения металла, связанной с гравиметрическим показателем скорости K (г/м²·ч) соотношением:

$$i_A = \frac{K}{q_{Me}} \text{ (А/м}^2\text{)}, \quad (2.13)$$

где $q_{Me} = \frac{A_M}{zF}$ - электрохимический эквивалент металла (г/А·ч), в котором A_M – атомная масса металла (г); z – валентность ионов; F – число Фарадея.

Для железа q_{Me} принимается равным $q_{Fe} = 1,04$ г/А·ч для цинка соответственно $q_{Zn} = 1,22$ г/А·ч . $q_{Al} = 0,34$ г/А·ч, K определяется экспериментально.

Развитие анодных процессов в сварных конструкциях при воздействии внешних рабочих нагрузок могут привести к их ускоренному разрушению.

Зарождение дефектов и развитие коррозионного разрушения $K(x, y, z, t)$ в сварном соединении определяется соотношением энергетического фактора $\mathcal{E}(x, y, z, t)$ и физико-химических факторов $R(x, y, z, t)$ сопротивляемости металла коррозионным разрушениям. Соответственно, условие разрушения сварного соединения имеет вид:

$$K(x, y, z, t) = \frac{\mathcal{E}(x, y, z, t)}{R(x, y, z, t)} \rightarrow \max, \quad (2.14)$$

где x, y, z – координаты относительно центра шва; t – время [37].

Для сварных швов характерны следующие виды коррозионных разрушений – сплошная или общая коррозия (равномерная и сосредоточенная) (рис.2.7, а), местная (структурная и точечная), (рис. 2.7, б), коррозионно-усталостные разрушения хрупкого типа с развитием магистральной трещины без явных макропластических деформаций (рис. 2.7, в).

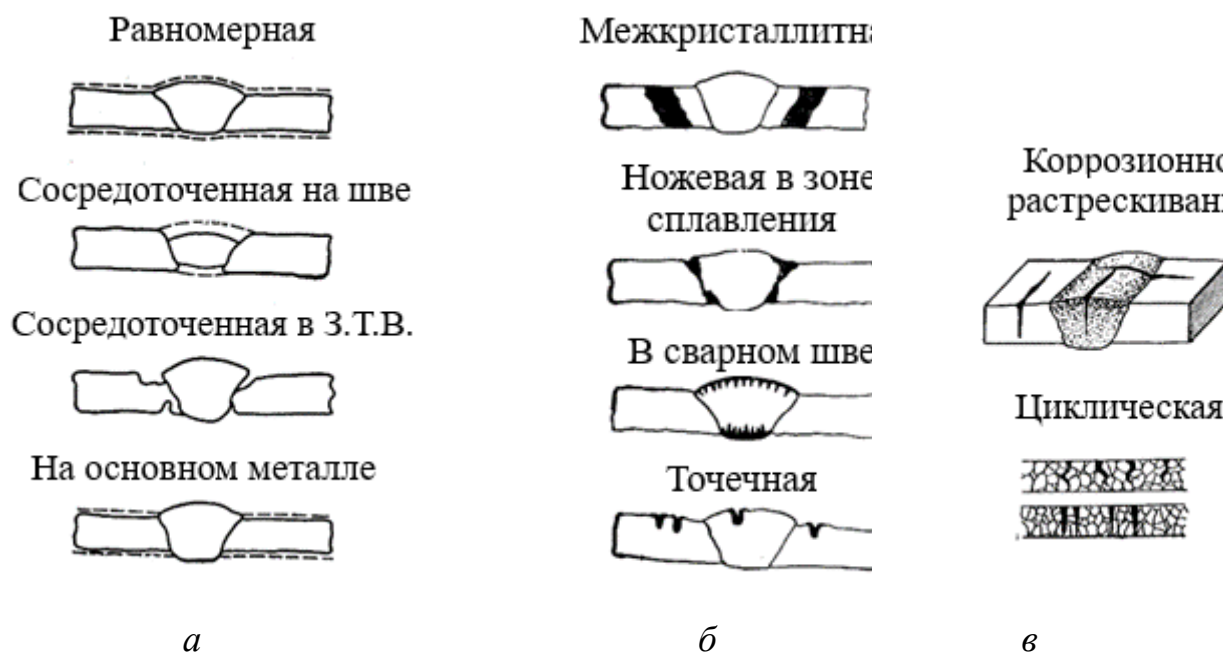


Рисунок 2.7 – Характер коррозионных разрушений сварных швов: *а* – равномерная и сосредоточенная; *б* – местная (точечная); *в* – коррозионно-усталостное растрескивание

Для уменьшения термодинамической нестабильности сварных соединений на практике используют ряд мер, который предусматривает – подбор рациональных присадочных материалов, способов и режимов сварки, термическая обработка сварной конструкции, а также применение различных покрытий и др. Все предпринимаемые меры являются достаточно эффективными в тех или иных условиях эксплуатации и воздействия конкретной агрессивной среды и малоэффективны при работе узла в атмосфере морской средой.

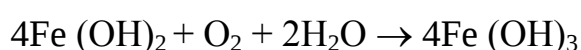
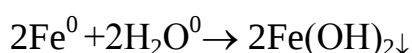
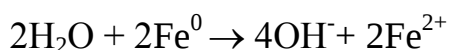
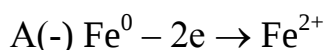
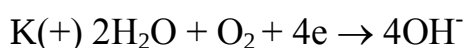
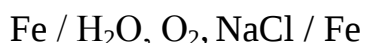
Вопросы защиты сварных конструкций от воздействия агрессивных сред успешно решаются на этапе их проектирования путем выбора соответствующих металлических материалов и покрытий. Однако в процессе ремонта с применением повторной сварки для заделки трещин и сколов первоначальные покрытия нарушаются, соответственно во избежание коррозии свариваемых элементов, требуется надежная защита.

2.2 Обоснование метода и механизма защиты сварных соединений от электрохимической коррозии

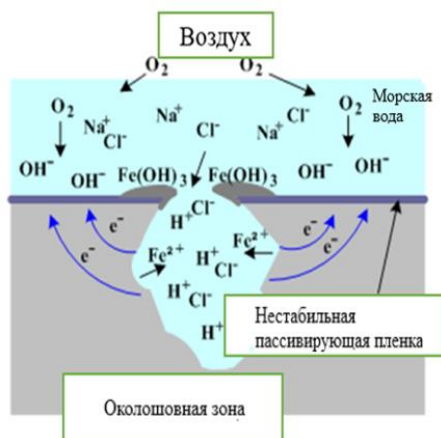
Несущие элементы конструкции экскаватора – гусеничная тележка, поворотная платформа, стрела, рукоять стрелы, т.е. все элементы, для которых характерным дефектом являются трещины и пробоины, восстанавливают электродуговой сваркой или наплавкой. При этом, побочным эффектом является наличие пористости и неоднородности химического состава металла в околошовной зоне. В присутствии агрессивной морской воды на поверхности шва возникает электрохимическая коррозия, которая достаточно быстро приводит к полному разрушению восстановленного участка.

Как уже было отмечено, электрохимическая коррозия – процесс, сопровождаемый развитием окислительно-восстановительных ионных реакций на поверхностях соприкосновения металла с электролитом [71]. В качестве электролита здесь выступают пары (капли) морской воды, осаждаемые на поверхности металлоконструкций при интенсивном их испарении с поверхности Южно-Китайского моря. В результате протекания этих реакций возникает гальванический элемент и, соответственно, появление электрического тока.

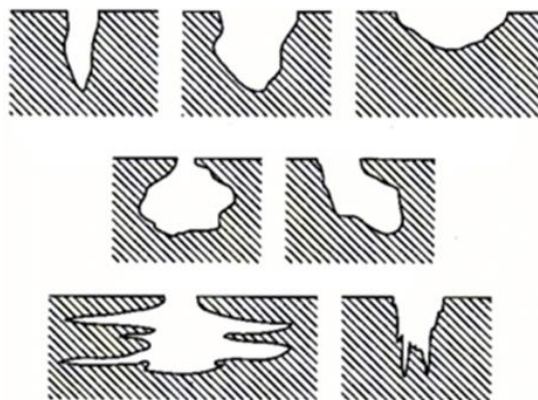
При осаждении паров или капель морской воды на элементы стальных металлоконструкций положительные ионы, находящиеся на поверхности металла, переходят в эту агрессивную воздушно-водяную среду. При этом на катодных участках образуется гидроокись железа (II) Fe(OH)_2 , которая при дальнейшем воздействии коррозионной среды превращается в гидроокись железа (III) (бурого цвета), т. е. ржавчину Fe(OH)_3 [71, 72]:



На рис. 2.8, а представлена схема процесса коррозионного разрушения сварных швов при воздействии на них морской воды.



а



б

Рисунок 2.8 – Схема протекания окислительно-восстановительных ионных реакций на поверхности стали при взаимодействии с морской средой (а) и кинетика развития коррозионного разрушения металла под воздействием морской атмосферы (б).

Скорость износа сварных швов чрезвычайно высока – достигает 1–3 мм/год, что гораздо выше скорости коррозии монолитных деталей – 0,05...0,19 мм/год [17, 67]. Объясняется это тем, что сварные швы подвержены воздействию электрического тока, возникающего под действием эффекта Зеебека (вследствие наличия термоэлектродвижущей силы между сваренными деталями в условиях хорошей электропроводимости морской воды) [71].

Предполагается, что сварной шов и основной металл в силу различия химического состава, образуют своего рода термопару. При наличии разности температур в этих зонах, что возможно при работе узлов в течение дня и разной степени нагрева под действием солнечных лучей, такая термопара многократно ускоряет коррозию в присутствии электропроводящей морской воды или ее паров.

Две детали, даже выполненные из одной и той же стали, в некоторой степени отличаются по химическому составу, к тому же в сварном соединении присутствует присадочный материал и перемешивание его при расплавлении с

основными компонентами свариваемых элементов приводит к изменению химсоставов сварного шва и околошовной зоны [71, 82]. В тоже время зональная температура морской воды (или капель воды) практически всегда неодинаковая для разных участков сварного соединения, что приводит к образованию термопары, многократно ускоряющей в условиях электропроводящей морской воды процесс коррозии шва и околошовной зоны.

Для подавления развития электрохимической коррозии в различных отраслях промышленности прибегают к разработке и реализации различных способов защиты от коррозии (рис 2.9)



Рисунок 2.9 – Основные способы защиты от коррозии, применяемые в промышленности

Рассмотрим некоторые из них на для оценки возможности их применения при ремонте.

С развитием различных способов сварки, наплавки и термического напыления, защитные металлические покрытия стали применяться во всех отраслях промышленности, в том числе и горном машиностроении как при изготовлении, так и в процессе ремонта машин [37].

Металлические покрытия изолируют металл изделия от воздействия внешней среды, предотвращают образование гальванической пары и способствуют повышению термодинамической устойчивости металла.

Металлические покрытия различаются по механизму защиты и в зависимости от реализуемой технологии могут быть сформированы гальваническими методами, горячим наращиванием, термодиффузионным процессом, металлизацией и плакированием.

Из всех перечисленных методов в условиях ремонтного подразделения горных предприятий Вьетнама может быть реализована лишь металлизация. При этом покрытия должны иметь высокую прочность сцепления и низкую пористость, быть плотными и работоспособными.

По механизму защиты металлические покрытия подразделяются на анодные и катодные.

Катодные покрытия, потенциалы которых в данной среде имеют более положительное значение, чем потенциал основного металла. По отношению к стали катодными покрытиями являются медные, никелевые, золотые, серебряные, палладиевые, рис. 2.10 [6, 13, 25, 27, 28].



Рисунок 2.10 – Электродный ряд напряжений металлов [13]

Использование катодных покрытий возможно лишь в условиях сохранения их сплошности, т.е. недопущения внешнего механического воздействия на защитное покрытие во избежание его отслоения или повреждения, вследствие чего может образоваться нежелательная гальванопара (рис. 2.11, а).

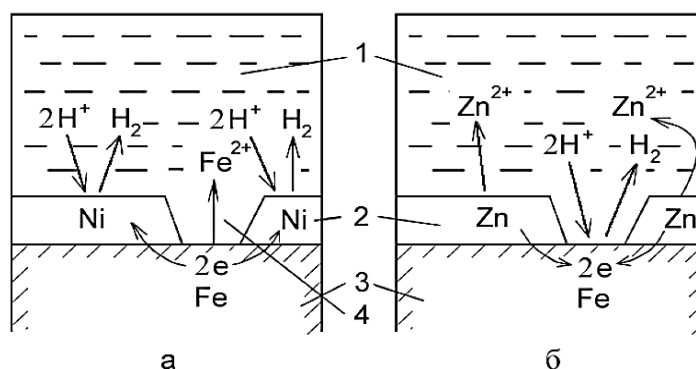


Рисунок 2.11 - Схема коррозии металла в кислом растворе при нарушении металлических покрытий: *а* - катодного, *б* - анодного; 1 – раствор, 2 -покрытие, 3 – основной металл, 4 – дефект в покрытии

Характеристикой катодной защиты является величина защитного эффекта Z (%):

$$Z = \frac{K_0 - K_1}{K_0} \cdot 100\% \quad (2.15)$$

где K_0 – скорость коррозии металла без защиты, г/(м²·ч)

K_1 - скорость коррозии металла в условиях электрохимической защиты, г/(м²·ч)

Анодные покрытия имеют более отрицательный потенциал, чем потенциал основного металла. К тому же, они не чувствительны к нарушению целостности покрытия, так как в случае частичного локального разрушения продолжают выполнять защитную функцию в возникающей гальванопаре (рис. 2.11, *б*) [22, 27, 28]. При этом, их ресурс зависит от толщины покрытия, а эффективность анодной защиты $K_{э.а}$ определяется отношением скорости коррозии без защиты $K_{б.з}$ к скорости коррозии под защитой $K_з$:

$$K_{э.а} = K_{б.з} / K_з \quad (2.16)$$

В связи с тем, что металлоконструкции карьерных экскаваторов эксплуатируются в условиях воздействия механических нагрузок, что может привести к нарушению целостности покрытия, наиболее приемлемым и надежным вариантом является использование анодных защитных покрытий на

основе цинка и алюминия. Данные материалы имеют большее по сравнению с железом отрицательные электродные потенциалы (рис. 2.10)

При выборе способа защиты поверхности от коррозии необходимо учитывать производственные условия, при которых их возможно реализовать. Так как задача сводится к повышению сопротивляемости коррозии восстанавливаемых элементов конструкции, то анализировать необходимо технологические возможности и производственные мощности ремонтных служб горных предприятий, а также степень мобильности оборудования, при помощи которого представляется возможным использовать предлагаемый способ защиты.

Нанесение гальванических покрытий можно реализовать только на заводах-изготовителях промышленной продукции, так как применяемые электролиты оказывают колоссальное негативное воздействие на окружающую среду и требуют использования специальных средств для утилизации электролитов и защиты персонала от вредных паров химических соединений. В связи с этим, использование их в малых мелкосерийных ремонтных производствах не представляется возможным.

Использование горячего цинкования для защиты от коррозии восстанавливаемых сваркой металлоконструкций в условиях малого ремонтного производства также не представляется возможным, так данный метод требует специально оборудованных участков и достаточно сложной процедуры подготовки поверхности перед нанесением покрытия. К тому же присущие методу таких недостатков как трудность регулирования и неравномерность толщины покрытия, а также значительный расход металла, не гарантируют получения высокого качества покрытия при ремонте.

Диффузионные покрытия металлами применяют для защиты стали против газовой коррозии. С их помощью повышают жаростойкость сплавов. Покрытия получают путем насыщения поверхностных слоев защищаемого твердого металла атомами протекторного металла при высоких температурах,

т.е. за счет их взаимной диффузии (алитирование, термосилицирование). Такие покрытия имеют переменный градиентный состав.

В ремонтном производстве применение диффузионных покрытий осложняется требованиями техники безопасности и необходимостью приобретения специальных защитных камер.

При всех достоинствах, длительность полимеризации *неметаллических* покрытий повышает технологическое время восстановления и стоимость ремонта по причине дороговизны полимерных составов. В связи с этим, данный способ пока не нашел широкого применения во Вьетнаме.

Ингибиторы коррозии используют в стационарных установках с коррозионными средами и поэтому применительно к коррозии в условиях морской атмосферы применяться не могут

Таким образом, для условий малого ремонтного производства во Вьетнаме наиболее эффективными способами создания защитных покрытий являются методы, связанные с напылением металлических защитных слоев, которые с одинаковой эффективностью можно использовать как на специализированных производственных участках, так и в мобильных переносных ремонтных станциях без необходимости крупных затрат на приобретение средств защиты рабочих мест и персонала ремонтных бригад. Данные условия формируют ряд требований, которые необходимо учитывать при выборе способа защиты и оборудования для его реализации:

- возможность формирования плотных металлических покрытий толщиной от 50 мкм до 3...4 мм с учетом степени износа деталей соединений;
- достижение достаточно высокой адгезионной прочности покрытия с основным металлом с учетом фактора сваривания разнородных материалов;
- возможность напыления композитных износостойких покрытий на детали узлов трения оборудования, в том числе гидравлического;
- простота обслуживания оборудования, исключая необходимость дополнительной подготовки кадрового состава;

- проведение процесса без использования горючих газов и высокотемпературных потоков;
- простота подготовки поверхности под нанесение защитного коррозионно- и износостойкого покрытия;
- возможность локальной защиты крупногабаритных конструкций без дополнительной термической и механической обработки;
- возможность выполнения работ в полевых условиях и многократного воспроизведения покрытия после его выработки.

Таким образом, всем вышеперечисленным требованиям отвечает метод холодного газодинамического напыления (ХГН) [4, 9, 24, 66]. Скорость полета частиц в процессе напыления составляет 500...600 м/с, что обеспечивает возможность высокоплотных покрытий на металлической основе. Использование для напыления порошковых композиций в сочетании различных металлов с оксидной и карбидной керамикой также позволяет формировать износостойкие и антифрикционные покрытия для деталей узлов трения скольжения гидроприводов карьерных экскаваторов.

2.3 Выводы по главе 2

1. На основе проведения теоретических исследований выявлены факторы, определяющие условия протекания электрохимической коррозии в сварных соединениях под воздействием агрессивной среды. Установлено, что основными причинами возникновения гальванопар в сварном соединении являются химическая и структурная неоднородность сварного шва и околошовной зоны, наличие пористости, проявление эффекта Зеебека, что приводит к образованию многоэлектродной системы, характеризующейся разностью электродных потенциалов, где под воздействием морской воды активируется процесс электрохимической коррозии.

2. Установлены и проанализированы основные аналитические зависимости, описывающие условия возникновения и протекания электрохимической коррозии в стали. Определены основные механизмы защиты стальных деталей на основе выявления энергетических параметров взаимодействия материала-протектора и пассивируемого объекта с агрессивной средой. Принят анодный механизм защиты от коррозии, как наиболее приемлемый для сварных соединений, эксплуатируемых в условиях воздействия механических нагрузок, так как для анодных покрытий отсутствуют жесткие требования по сохранению целостности.

3. На основе выполненного анализа методов защиты металлов от коррозии выявлены наиболее рациональные для применения в ремонтном производстве при восстановлении металлоконструкций сваркой или наплавкой. В большей степени предъявляемым требованиям соответствует метод газодинамического напыления, позволяющий формировать плотные покрытия без расплавления напыляемых частиц. Определены материалы защитных покрытий для углеродистых и легированных сталей, в качестве которых выступают цинк и алюминий.

Глава 3 Обоснование материалов газодинамических покрытий для защиты восстанавливаемых сваркой и наплавкой металлоконструкций от воздействия морской воды

Согласно плану развития минерально-сырьевой базы Вьетнама до 2030 г. одно из перспективных направлений горнодобывающей промышленности страны связано с освоением природных ресурсов и залежей твердых полезных ископаемых прибрежных зон, береговой линии Южно-Китайского моря, а также морских шельфов [68]. Сосредоточение здесь рудных тел ценных металлов, драгоценных минералов и важных строительных материалов в виде россыпи желто-белых и темно-серых песков, глины и гумуса позволяет осваивать эти месторождения с использованием традиционных экскаваторов на гусеничном шасси, которые отличаются маневренностью, высокой производительностью и могут эксплуатироваться практически круглосуточно. Соответственно, вопросы защиты от коррозии в морской воде металлоконструкций, прошедших ремонтное восстановление сваркой, встают наиболее остро, так как неизбежное контактирование с агрессивной средой приводит к ускоренному износу и поломкам несущих металлоконструкций.

3.1 Обоснование параметров процесса холодного газодинамического напыления и состава защитных покрытий, подавляющих коррозию сварных металлоконструкций

Учитывая климатические особенности Вьетнама, вся импортируемая горная техника, в том числе и механическое оборудование карьеров, поставляется в страну в тропическом исполнении. Для этого широко используются низколегированные стали и различные защитные покрытия, сформированные на заводах-изготовителях широко известными методами - горячим цинкованием, алитированием, гальваническими и другими методами, лакокрасочными и полимерными материалами. В связи с этим, в начальный

период эксплуатации горное оборудование демонстрирует заявленный производителями ресурс.

Между тем, закупаемая техника может эксплуатироваться годами. К тому же, возможна закупка техники бывшей в употреблении.

Регулярные текущее обслуживание и выполняемые по графику капитальные ремонты, способствуют поддержанию удовлетворительного технического состояния горных машин. При этом ремонт оборудования часто заключается в замене изношенных деталей на новые или же их восстановление при помощи термических способов сварки.

Для элементов механических передач - зубчатых колес, валов, шкивов, звездочек, функционирующих в закрытых корпусах при наличии обильной смазки, такой ремонт является вполне приемлемым и часто обеспечивает должный ресурс сопряжений и работоспособность узлов.

Однако, при восстановлении элементов несущих металлоконструкций в условиях ремонтного производства, к примеру, устранении трещин в стреле и рукояти стрелы, в местах стыка несущих конструкций поворотной платформы, часто происходит нарушение технологических заводских регламентов, в силу ряда причин и обстоятельств. В первую очередь это касается применяемых материалов и технологий, а также квалификации кадрового состава ремонтных служб. Часто в условиях ремонтного восстановления сваркой и наплавкой используют ручную дуговую сварку вместо, допустим, контактной, или плазменной, которую реализуют на предприятии-изготовителе. Существенное отличие этих технологий заключается главным образом, в появлении в первом случае обширной зоны термического влияния и, как следствие, возникновению термических напряжений.

Крупнейшими поставщиками горной техники во Вьетнам являются ведущие производители Юго-Восточной Азии – Хендай (Корея), Komatsu, Hitachi, Caterpillar (Япония), Cummins (Китай) и др. При производстве данной техники достаточно высок уровень автоматизации, что обеспечивает высокое качество изготовления без излишнего влияния человеческого фактора. При

ремонте же, в силу мелкосерийного характера производства, все работы выполняются, как правило, вручную. Поэтому влияние человеческого фактора на качество ремонта весьма велико.

Кардинальное отличие материально-технической базы ремонтных служб от механосборочных участков заводов-изготовителей горной техники, конечно же, влияет и на качество проведения ремонтных работ, и на форму ее организации. Поэтому наличие в ремонтных службах универсальных, но в то же время эффективных технических средств позволяет оперативно решать сложные задачи без существенных материальных и финансовых затрат. При этом особенно важно, чтобы используемая аппаратура не требовала сложного технического обслуживания и больших производственных площадей, принимая во внимание то обстоятельство, что услуги по ремонту во Вьетнаме оказывают преимущественно небольшие компании. Поэтому наилучшим решением как для малых, так и крупных ремонтных предприятий является применение метода и оборудования для холодного газодинамического напыления.

В параграфе 2.3 уже были рассмотрены отличительные особенности различных методов защиты металлоконструкций от коррозии и износа, поэтому здесь мы отметим только важные практические аспекты настройки аппарата холодного газодинамического напыления для эффективного его использования и обоснования режимов обработки.

Существуют две разновидности холодного газодинамического напыления – напыление высокого давления (до 40 атм, 4,0 МПа) и напыление низкого давления (5...8 атм., до 0,8 МПа).

Установки первого типа позволяют напылять чистые металлы и различные соединения на их основе, с использованием в качестве транспортирующих газов как инертных – гелий, аргон, так и активных – азот. Эти установки достаточно дорогие, при использовании в качестве транспортирующего газа азота, требуется его дополнительная доочистка, для получения высококачественных покрытий. При этом имеет место большой расход порошковых материалов и электроэнергии. В виду высокой потребляемой мощности до 18 кВт, установки

данного типа, как правило, выпускают полуавтоматическими или полностью роботизированными. Использовать их в ручном режиме малоэффективно. Установки ХГН высокого давления производят компании CGT (Германия) мощностью до 50 кВт, Интерметкомполит (Россия) до 18кВт. В большей степени данные установки используют для исследовательских целей.

ХГН низкого давления представлено на рынке оборудования двумя производителями - Inovati (США) и «Димет-405» (Россия).

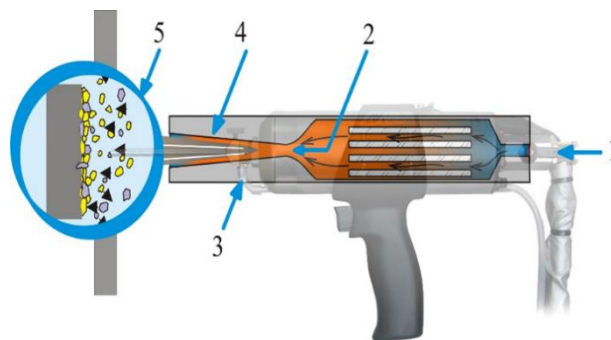
Здесь необходимо отметить, что явление холодного газодинамического напыления было открыто российским учеными [4, 24]. Первые в мире промышленные установки начал разрабатывать и изготавливать Обнинский центр порошкового напыления. Поэтому за этой компанией закреплён приоритет и авторское право на ряд разработок в этой сфере.

Установки «Димет-405» (рис. 3.1) отличается компактностью и мобильностью. Может использоваться как в ручном режиме, так и автоматическом. Позволяет решать спектр актуальных задач как при ремонте оборудования, так и при создании новых машин. Данную установку можно использовать также при ремонте в полевых условиях. В качестве транспортирующего газа используется сжатый воздух. Выгодным отличием данного метода создания покрытий от газотермического является низкая пористость и газопроницаемость металлических покрытий большой толщины, что делает его более предпочтительным при создании коррозионностойки покрытий.

Важное преимущество данной установки заключается в возможности выполнять предварительную струйно-абразивную обработку поверхности перед напылением и сразу, вслед за очисткой, производить напыление покрытия. На установке имеется два питателя, в один из которых загружается керамический порошок – электрокорунд или карбид кремния.



а



б

Рисунок 3.1 - Установка «Димет-405» для холодного газодинамического напыления (*а*); схема формирования покрытия (*б*) [24]: 1– подача сжатого воздуха 2 – нагрев воздуха; 3 – подача порошка; 4 – ускорение частиц до сверхзвуковых скоростей; 5 – формирование покрытия

Одна из важнейших особенностей ХГН-процесса заключается в возможности формирования плотных покрытий из порошковых частиц, находящихся в твердом состоянии, благодаря сверхзвуковым скоростям полета в направлении подложки. При этом особое значение приобретают такие параметры процесса, как температура торможения газового потока вблизи подложки, поскольку напрямую определяет уровень адгезионной прочности покрытий и плотность. На рис. 3.2 показана зависимость температуры торможения газа от расстояния от среза сопла для различных температурных режимов, указанных на приборной панели для оборудования «Димет-403» [14]. Эти же зависимости являются справедливыми и для модели «Димет-405», так как отличие двух устройств состоит лишь в различном конструктивном исполнении держателя соплового блока.

Из рисунка 3.2 видно, что температура газового потока уменьшается по мере удаления от среза сопла, что определяет необходимость стабилизировать дистанцию напыления для порошков с различной плотностью и размеров.

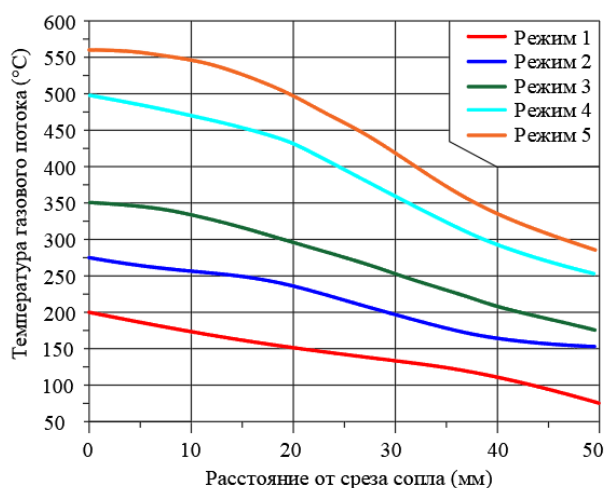


Рисунок 3.2 – Изменение температуры торможения газового потока при различных режимах нагрева (1-5) сжатого воздуха для установки «Димет -403» в зависимости от дистанции напыления

Температура торможения газа определяет конечную скорость движения частиц в направлении подложки и, соответственно, энергию удара их при столкновении с ней. Для формирования высоких показателей адгезии и плотности покрытий рекомендуется проводить напыление на максимальной скорости.

На рис. 3.3 показаны графики, характеризующие изменение скорости газового потока в зависимости от расстояния до среза сопла для различных температурных режимов остановки «Димет-403» («Димет-405»)

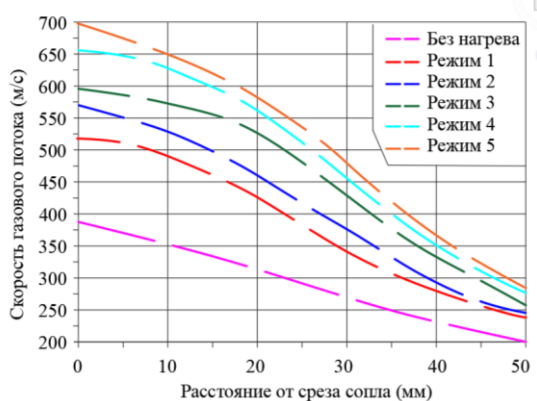


Рисунок 3.3- Изменение скорости газового потока в зависимости от расстояния до среза сопла при различных режимах при различных температурных режимах [14].

Из литературных источников [4, 9, 14, 24] известно, что выбор тех или иных параметров напыления зависит от вида напыляемых частиц, их диаметра, массы, плотности и теплопроводности.

При нанесении коррозионностойких покрытий большое значение приобретает формируемая пористость, так как при избыточном ее проявлении эксплуатационные свойства покрытия, в частности, сопротивляемость электрохимической коррозии, снижаются.

Исходя из условий протекания анодного механизма электрохимической защиты стальных металлоконструкций, в качестве защитных материалов рекомендовано использовать металлы, располагаемые левее пассивируемого металла, т. е. металлы с большим отрицательным электрохимическим потенциалом, чем у металла, требующего защиты. По отношению к сплавам на основе железа такими свойствами обладают следующие материалы (см. рис. 2.10) – цинк, алюминий и магний. Исходя из соображений экономичности, для практического применения рекомендуются цинк и алюминий.

В литературе имеются некоторые данные по защитным свойствам этих материалов в виде ХГН - покрытий для монолитных материалов и отчасти сварных соединений [4, 9], выполненных при нормальной температуре в стандартных растворах морской воды с 3%-м содержанием NaCl.

Однако, климатические условия Вьетнама несколько отличаются от климатических норм северных широт, так как среднегодовая температура здесь составляет 26-27⁰С, при этом летом, на протяжении длительного периода, среднесуточная температура может достигать 29 – 32⁰С. Необходимо также учитывать среднюю концентрацию соли в Южно-Китайском море [79], которая превышает 3%-ный пороговый уровень и в среднем, в зависимости от региона, колеблется в интервале 32...34 г/л.

В связи с этим, поставлена задача максимально приблизить условия проведения эксперимента к реальным, для выявления рациональных составов покрытий и параметров протекающего коррозионного процесса с целью воспроизведения покрытий в регионе эксплуатации карьерных экскаваторов.

В связи с этим для исследования были выбраны следующие материалы покрытий – композиционный порошок на цинковой основе в смеси с оксидом алюминия в соотношении 50%/50%, а также композитный алюмоцинковый порошок, содержащий оксид алюминия следующего химического состава: 55%Al 15%Zn30% Al_2O_3 .

Выбор данного состава алюмоцинка обусловлен также отсутствием информации по испытаниям такого покрытия в морской воде. В литературе имеются сведения по алюминиевым покрытиям, без примеси цинка, а также алюмоцинковым составам с содержанием 5, 10 и 20% цинка, из которых лучшую стойкость в морской воде продемонстрировали покрытия с 5-ти и 10-ти процентным содержанием цинка. Таким образом, по алюмоцинковому составу с 15-ти процентным содержанием цинка вопрос пока остается открытым.

После определения составов покрытий, решался вопрос о технологических параметрах их нанесения с целью получения достаточно плотного покрытия рациональной толщины с минимальным содержанием открытой пористости. При этом производилась визуальная (качественная) оценка наличия пор (рис. 3.4). Прочность сцепления покрытия с основой оценивалась при помощи ударного воздействия.

На ри.3.5 представлена профилограмма поверхности алюмоцинкового покрытия без признаков открытой пористости, полученная с помощью портативного профилографа модели Time TR 200. Профилограммы снимались в продольном направлении образца с шагом смещения в поперечном направлении 3 мм. Далее профилограммы обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения на персональном компьютере. Шероховатость поверхности покрытий Ra варьировалась в пределах 3,6...5 мкм

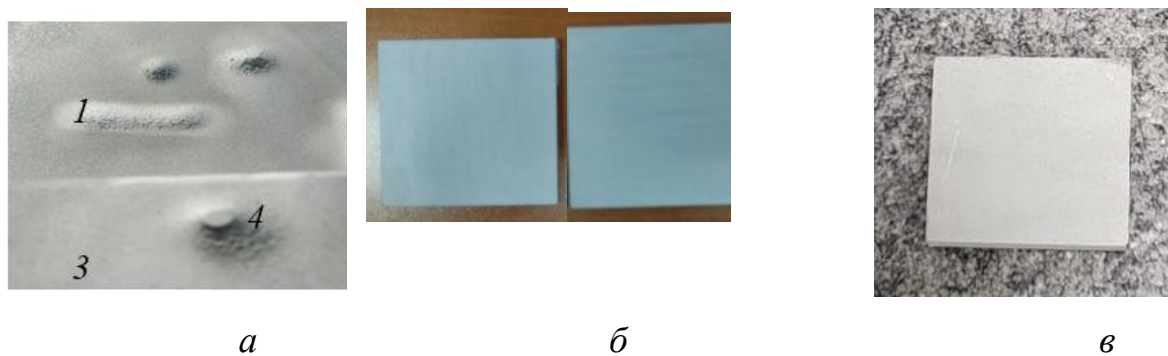


Рисунок 3.4 - Отработка режимов напыления для получения плотных покрытий, расстояние от среза сопла до подложки 10-12 мм:

а – алюмоцинковое покрытие: 1 - температурный режим 4 ($\approx 450^{\circ}\text{C}$), скорость подачи порошка 2 г/с, 2 - температурный режим 3 ($\approx 350^{\circ}\text{C}$), скорость подачи порошка 1,4 г/с; 3 - температурный режим 3 ($\approx 350^{\circ}\text{C}$), скорость подачи порошка 1,0 г/с, 4 – испытание покрытия на посредством ударного воздействия; *б, в* – плотные цинковые и алюмоцинковое покрытия - температурный режим 3 ($\approx 330^{\circ}\text{C}$), скорость подачи порошка 0,8..1,0 г/с (режим 4-4,5)

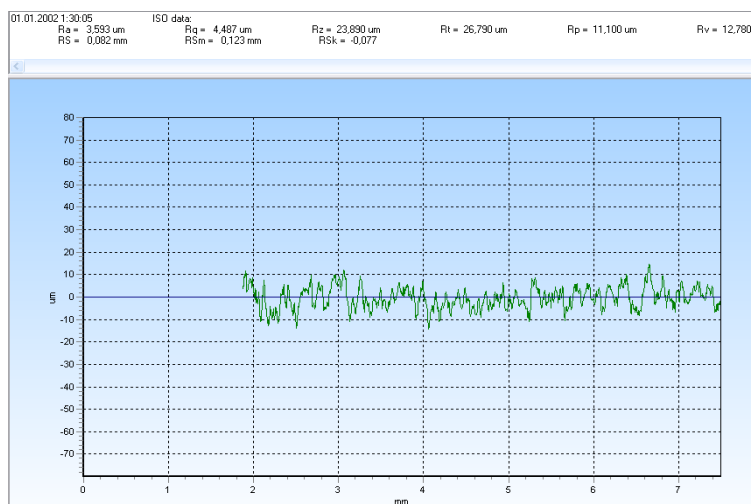


Рисунок 3.5 - Шероховатость поверхности образца с покрытием на основе композиции $55\%\text{Al}+15\%\text{Zn}+30\%\text{Al}_2\text{O}_3$, $R_a=3,6$ мкм

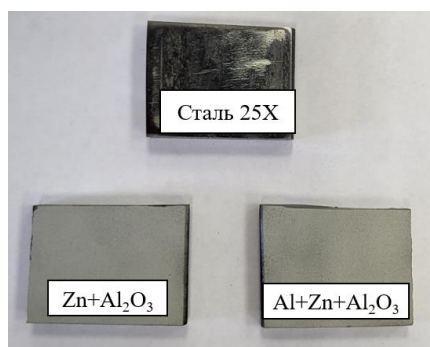
Таким образом, опытным путем были установлены рациональные режимы напыления достаточно плотных покрытий толщиной 0,4...0,6 мм, что вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым коррозионностойким покрытиям :

температурный режим 3, скорость подачи 4..4,5 на регуляторе подачи порошка, дисперсность порошка 30..40 мкм.

3.2 Методика проведения экспериментальных исследований по оценке коррозионной стойкости защитных ХГН-покрытий

Для выявления антикоррозионных свойств покрытий, рекомендуемых для защиты элементов горного оборудования от влажного морского воздуха и морской воды, были подготовлены образцы из низколегированной стали 25Х в виде пластин. Верхняя и нижняя поверхности образцов обрабатывались шлифованием. Одна группа монолитных образцов оставалась без покрытий, тогда как на вторую и третью – были нанесены покрытия соответственно на основе порошков следующих составов: $50\%Zn+50\%Al_2O_3$ и $55\%Al+15\%Zn+30\%Al_2O_3$ (рис. 3.6, а). Образцы покрывались полностью со всех сторон для исключения влияния на ход эксперимента стальной подложки. Толщина покрытий составляла 0,3...0,4 мм.

В эксперименте также принимали участие сварные образцы из стали 25 Х (имитация наплавки) (рис. 3.6, б) при этом сварной шов формировался методом аргоно-дуговой сварки с использованием присадочного материала марки Св-08Г2С. Еще одну группу составляли образцы из стали 40Х, наполовину покрытые алюмоцинковым покрытием (рис.3.6, в).



*a**б**в*

Рисунок 3.6 – Подготовленные образцы для проведения экспериментальных исследований; *a* - в виде монолитных пластин; *б* – сварные; *в* – наполовину покрытые

Для лучшего сцепления покрытий с подложкой (не менее 30 МПа) и исключения влияния прочности сцепления покрытия с материалом пластины на результаты эксперимента, защищаемая поверхность стальных образцов предварительно подвергалась струйно-абразивной очистке при помощи частиц электрокорунда (Al_2O_3).

Напыление покрытий выполнялось при помощи установки «ДИМЕТ-40»5 при следующих условиях: давление сжатого воздуха $P = 0,5...0,6$ МПа, дистанция напыления $L = 10-12$ мм, дисперсность порошковых частиц $\delta=35-40$ мкм, температура потока на первом этапе $400-450^{\circ}C$, на втором - $310-360^{\circ}C$. При этом прочность сцепления составляла не менее 30 МПа, а пористость в пределах $3,0...3,5\%$. При нанесении покрытия с температурой торможения газового потока в пределах $310-360^{\circ}C$ пористость на поверхности алюмоцинковых покрытий практически не наблюдалась, шероховатость покрытий Ra находилась в пределах $3,6..5,0$ мкм [44].

Перед проведением эксперимента верхняя и нижняя плоскости монолитных образцов обрабатывалась шлифованием с достижением допуска параллельности до 0,1 мм, затем все образцы взвешивали на аналитических весах с точностью до 0,001 г, после чего для ускорения эксперимента их помещали в стеклянные емкости с раствором морской соли (NaCl) с периодическим погружением через каждые 10 суток. Концентрация раствора соли соответствовала ее среднему содержанию в морской воде Южно-Китайского моря и составляла 32-34 г/л [79]. В помещении, где проходил эксперимент, поддерживали температуру воздуха $27-28^{\circ}C$, температура солевого раствора составляла $24-25^{\circ}C$. Таким образом, условия эксперимента были

приближены к условиям тропического климата Вьетнама. Продолжительность экспериментальных исследований оставляла 60 суток.

На рисунке 3.7 представлено лабораторное оборудование, с помощью которого выполнялось шлифование образцов и определялась их масса до и после проведения экспериментов.

Через каждые 10 суток образцы вынимали из раствора, промывали, очищали от продуктов коррозии, просушивали феном и повторно взвешивали на аналитических весах. При этом в емкости заливали свежеприготовленный раствор.



а



б



в

Рисунок 3.7 – Оборудование и аппаратура, используемые для подготовки и контроля экспериментальных образцов: *а* – аналитические весы; *б* – станок модели Buehler AutoMet™ 250 для шлифования поверхностей образцов под напыление покрытий

Скорость коррозии по гравиметрическому (весовому) показателю $K \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}} \right)$ рассчитывали по формуле [18]:

$$K = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}, \quad (3.1)$$

где Δm – изменение массы образца, г;

S – площадь поверхности образца, м^2 ;

τ – продолжительность воздействия коррозионной среды на образец, сут.

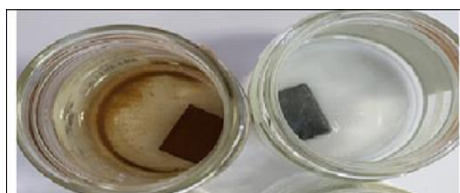
Оценка коррозии по весовому показателю не является достаточно корректной характеристикой ввиду различной плотности испытываемых материалов – стали, цинкового и алюмоцинкового покрытий. В связи с этим также определяли линейную (глубинную) коррозию, переводя потерю массы в линейный показатель коррозии h_c по формуле

$$h_c = \frac{\Delta m}{S \cdot \rho_c}, \text{ см} \quad (3.2)$$

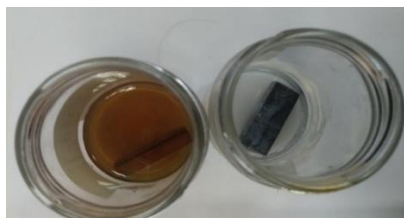
где ρ_c – плотность покрытия.

С учетом малой пористости плотность алюмоцинкового и цинкового покрытий принимали равными $3,38 \text{ г/см}^3$ и $5,05 \text{ г/см}^3$, соответственно, а плотность стали $7,8 \text{ г/см}^3$.

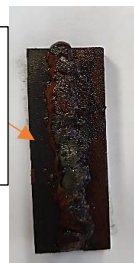
Фото пластин в солевом растворе по истечении 10 суток представлено на рис. 3.8.



а



Продукты коррозии в околошовной зоне



На 4 сутки испытаний

б

Рисунок 3.8 – Фото образцов в процессе испытаний в морской воде в течение 10 суток и после их извлечения из раствора: *а* – пластина из стали 25Х без покрытия (в растворе слева) и с покрытием на основе $50\% \text{Zn} + 50\% \text{Al}_2\text{O}_3$ (в растворе справа), *б* – сварное соединение без покрытия (в растворе слева) и с покрытием на основе $55\% \text{Al} + 15\% \text{Zn} + 30\% \text{Al}_2\text{O}_3$ (в растворе справа)

В эксперименте участвовало 3 серии одноименных образцов, поэтому скорость коррозии и глубинный показатель оценивали по средним значениям потери массы образцов.

Результаты эксперимента периодически сводили в таблицу вида 3.1

Таблиц 3.1 – Исходные данные и результаты эксперимента, полученные после выдержки образцов в морской воде в течение 10 суток (1 серия образцов).

Параметр	Сварной образец	Образец из стали 25Х без покрытия	Образец с покрытием Zn+Al ₂ O ₃	Образец с Покрытием Al+Zn+Al ₂ O ₃
Площадь поверхности образца S, м ²	0,0018	0.00178	0.00161	0.00161
Масса образца до испытаний m ₀ , г	28, 32	28,791	29,051	28,454
Масса образца после испытаний m ₁ , г	28,236	28,7376	29,04	28,4538
Потеря массы, Δm, г	0,0834	0,0534	0,011	0,0002
Продолжительность испытаний τ, сут.	10	10	10	10
Скорость коррозии K, ($\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}$)	4, 692	3,022	0,685	0,012
Плотность, г/см ³		7,8	5,05	3,38
Линейный (глубинный) показатель коррозии h _c , см	-	0,000395 (3,95·10 ⁻⁴)	0,000124 (1,24·10 ⁻⁴)	3,66·10 ⁻⁶

Для сварных образцов определяли только скорость коррозии, так как достоверно определить площадь образца после коррозионных процессов было весьма сложно.

3.3 Обработка и анализ результатов экспериментальных исследований

На основе результатов всех трех серий экспериментов для всех образцов, участвовавших в испытаниях, были определены средние значения скорости коррозии K и глубинные показатели коррозии h_c , характеризующие степень их сопротивляемости электрохимической коррозии. Результаты вычислений представлены на рис. 3.9 и 3.10.

Математическая обработка экспериментальных данных и аппроксимация графиков в программе Excel позволили получить соответствующие уравнения для скорости и глубинного показателя коррозии образцов в морской воде с концентрацией соли 3,2 – 3,4% при температуре 27-29 °С, отвечающими климатическим условиям Вьетнама.

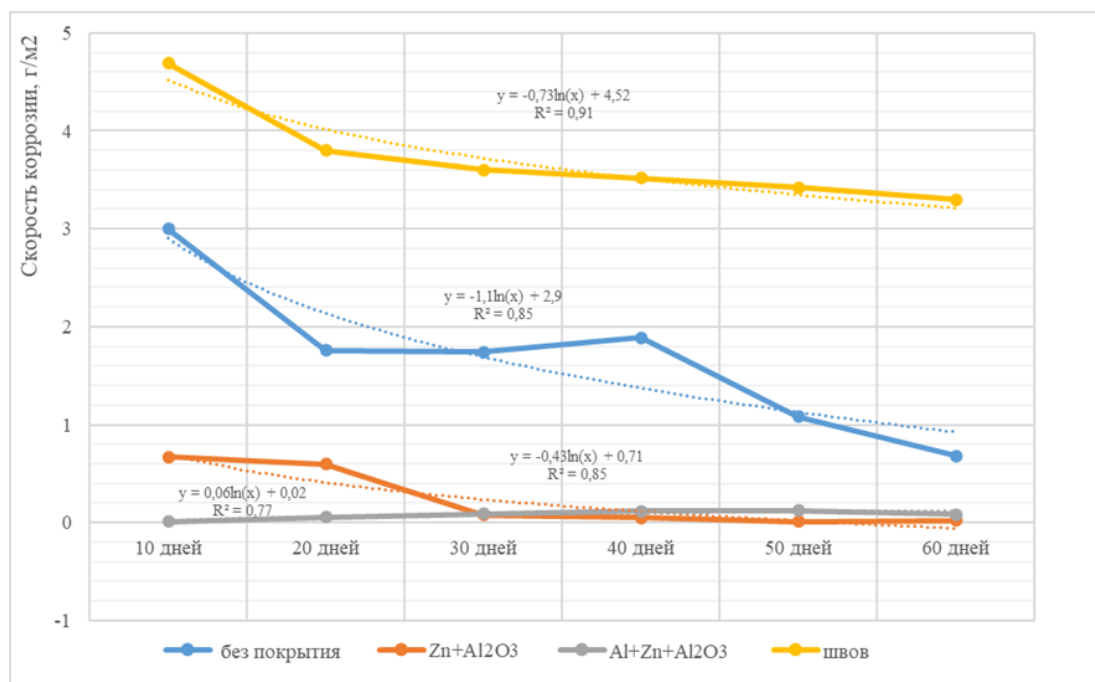


Рисунок 3.9 – Изменение скорости коррозии образцов с покрытиями и без в течение 60 суток пребывания в морской воде с периодическим погружением

Анализ результатов эксперимента с пластинами, выдержанными в морской воде, показал, что скорость коррозии не является постоянной величиной. Были выявлены следующие закономерности. В первые 10 суток скорости коррозии у всех образцов - как с покрытиями, так и стальных образцов, в том числе сварных, без покрытий, достигали максимальных

значений. Для стального образца она составляет $3,022 \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}} \right)$, для образца с покрытием на основе порошка $\text{Zn} + \text{Al}_2\text{O}_3$ - $0,685 \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}} \right)$, а для покрытия $\text{Al} + \text{Zn} + \text{Al}_2\text{O}_3$ скорость коррозии за сутки с единицы площади - $0,012 \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}} \right)$. При этом коррозия сварного соединения без покрытия протекает более активно со скоростью $4,692 \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}} \right)$ [44]. Очаги коррозии зарождаются в околошовной зоне и далее она распространяется по всей поверхности шва (рис. 3.8, б) На стальных образцах без покрытия наблюдалась сплошная коррозия (рис. 3.8, а).

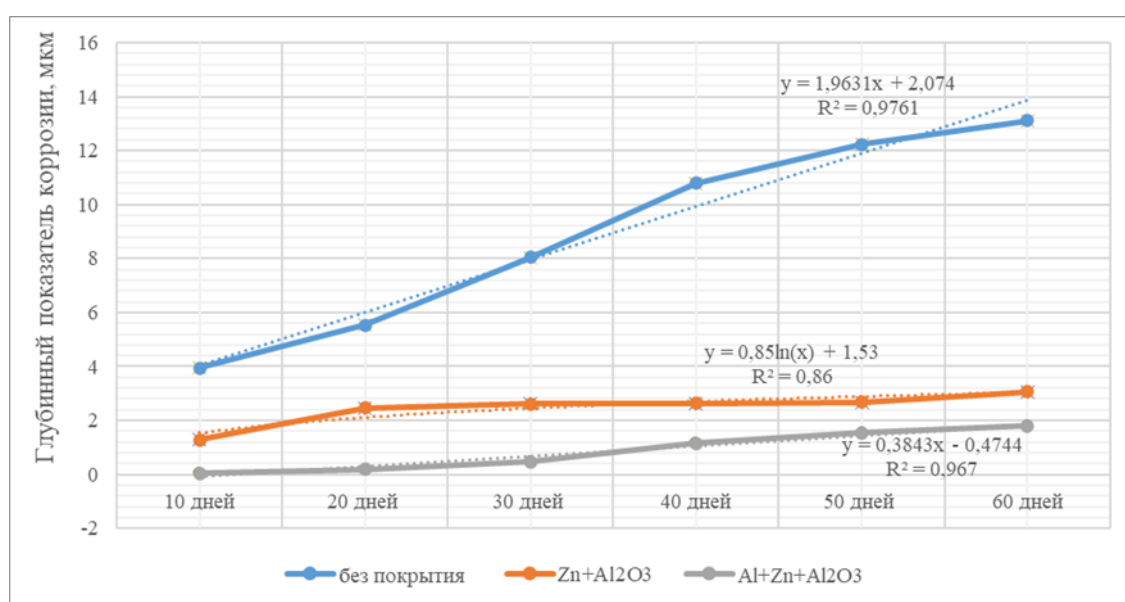


Рисунок 3.10 – Изменение глубинного (линейного) показателя h_c коррозии образцов с покрытиями и без в течение 60 суток пребывания в морской воде с периодическим погружением

Начиная с 30 суток, скорость коррозии образцов с покрытиями изменяется незначительно, в то же время для образцов без покрытий она монотонно уменьшается. Для стального образца на 40-й день испытаний наблюдался небольшой рост скорости коррозии, но впоследствии, процесс стабильно протекал с некоторым затуханием коррозионного процесса.

Анализ глубинных показателей коррозии h_c показал интенсивный рост данного параметра для незащищенного образца и незначительное его изменение для защитных покрытий. При этом глубинный показатель для алюмоцинкового покрытия меньше, чем для цинкового, что говорит о достаточно высокой сопротивляемости данного покрытия электрохимической коррозии.

При контакте с морской атмосферой коррозия алюминия протекает с приростом массы образца, поскольку в этом случае образуются труднорастворимые соединения. В то же время взаимодействие цинка с морской атмосферой сопровождается образованием на поверхности тонких защитных пленок, которые достаточно быстро растворяются в морской среде, что вызывает потерю массы цинковых покрытий. Так как сами покрытия представляют собой псевдосплавы с явно выраженной гетерогенной структурой - механическую смесь трех компонентов - $Al+Zn+Al_2O_3$, справедливо считать, что каждый из упомянутых выше механизмов коррозии протекает одновременно. В связи с этим, факт потери массы или ее прироста, вероятно, будет определяться содержанием в покрытии цинка и скоростью его реакции с агрессивными компонентами морской воды. Известно, что при содержании в покрытии цинка в пределах 5-10% процентов, наблюдается явный прирост массы образца благодаря образованию устойчивых к коррозии соединений алюминия с компонентами морской воды в присутствии кислорода [4]. При увеличении содержания цинка до 20%, пребывание образцов в морской воде сопровождается потерей массы образцов из-за активного растворения продуктов взаимодействия цинка с морской солью [4]. Очевидно, что при этом скорость двух - или трехкомпонентных покрытий будет определяться содержанием менее устойчивым к коррозии металлом. Эти рассуждения позволяют предположить, что в случае присутствия в покрытии до 15%, цинка, скорость его растворения и скорость прироста массы образцов вследствие образования нерастворимых соединений на основе алюминия, несколько выравнивается.

Покрытия на основе цинка также показали достаточно высокую стойкость. Существенное влияние в растворении покрытия из цинка оказывают поры. В

гальванической паре Zn-сталь цинк является анодом, растворяясь в агрессивной среде он активно корродирует, при этом защищает основной металл.

Также было проведено исследование коррозионной стойкости стальных образцов, частично покрытых алюмоцинковым покрытием, так как это имеет место в реальных условиях ремонта и эксплуатации сварных металлоконструкций. Установлено, что локальное покрытие стальной поверхности алюмоцинковым порошком предотвращает коррозию основного металла, при этом корродирует, собственно, покрытие с отложением продуктов коррозии на участках несплошностей (рис. 3.11) с меньшей площадью поверхности. Таким образом, для покрытий на основе алюминия имеет место эффект запечатывания пор и дефектов (как в случае чистого алюминия). Тем самым появляется возможность локальной защиты зон, восстановленных при ремонте наплавкой или сваркой, экономя расходы на порошковые материалы и энергию.



а



б

Рисунок 3.11 – Результаты испытаний стальных образцов, частично покрытых алюмоцинковым покрытием: *а* – коррозия покрытия в верхней части образца с приростом материала; поверхность стали без следов коррозии; *б* – шлифы для оценки микротвердости продуктов коррозии по Виккерсу.

При этом, образование на поверхности алюмоцинковых покрытий нерастворимых в морской воде осадков, никак не влияет на работоспособность металлоконструкций. При необходимости продукты коррозии можно удалить и возобновить защитное покрытие, не выводя

экскаваторы из эксплуатации, т.е. в режиме технического обслуживания или текущего ремонта, что приводит к существенной экономии затрат на плановый и внеплановый ремонты, обусловленные коррозией в морской атмосфере.

Исследование свойств образованного на поверхности образца продуктов коррозии говорит о том, что при взаимодействии покрытия с морской водой образуется достаточно плотное вещество с твердостью 280-340HV.

Ранее такой эффект наблюдался для алюминиевых покрытий, в которых механизм защиты протекает поэтапно, как это показано на рис. 3.12.

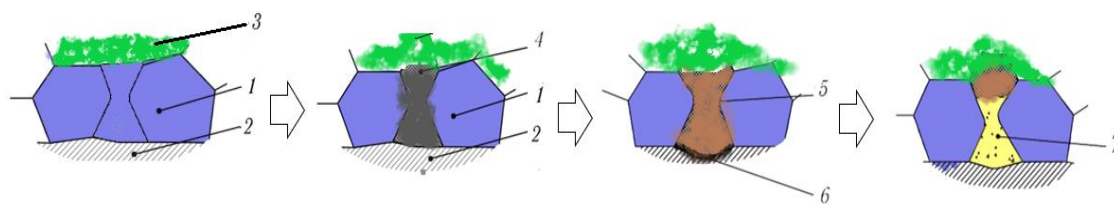


Рисунок 3.12 - Механизм защиты стали от электрохимической коррозии в морской воде продуктами коррозии алюминиевого покрытия: 1 — анодное покрытие, 2 — основа-катод, 3 — агрессивная среда, 4 — пора, трещина, 5 — растворение покрытия, 6 — начало разрушения основы, 7 - нерастворимые осадки

Сущность его заключается в следующем. При нарушении сплошности анодного алюминиевого покрытия в агрессивной среде в результате его механического повреждения образуется гальваническая пара «покрытие-основной металл», в которой активизируется анодное растворение алюминия. Образующиеся продукты коррозии откладываются на поврежденных участках, защищая их от коррозии [4].

Таким образом, установлено, что алюмоцинковое покрытие с 15% цинка обладают достаточно высокими защитными свойствами. Скорость их коррозии в

среднем за весь период испытаний в 8 раз меньше, чем скорость коррозии монолитных стальных пластин, и почти в 36 раз меньше, чем скорость коррозии сварных соединений. При сравнении с цинковыми покрытиями они также показали лучший результат в первые 30 суток, так как коррозия в них развивалась медленнее. Вероятно, это связано с наличием пористости в цинковом покрытии, поскольку на поверхности алюмоцинковых покрытий пористости не наблюдалось. Однако к концу испытаний, на 60 суток, скорости коррозии цинка и алюмоцинка практически сравнялись. Соответственно к концу времени проведения эксперимента коэффициенты эффективности анодной защиты $K_{э.а}$ покрытий для монолитной стальной пластины составляли в пределах 7... 8, для сварного соединения – 32...36.

Суммарный глубинный показатель коррозии h_c для цинкового покрытия за период испытаний чуть выше, чем для алюмоцинкового, вероятно, также из-за наличия небольшой пористости. Для цинка он составляет 3,56 мкм, тогда как для алюмоцинка – 1, 83 мкм. При этом глубинный показатель для стали без защитного покрытия составляет 13, 4 мкм, что соответственно в 3,78 и в 7,3 раза выше, чем для покрытий, что указывает на хорошие защитные свойства последних.

Высокая коррозионная стойкость алюмосодержащего покрытия в морской воде, вероятно, обусловлена высокой пластичностью алюминия и его склонностью к упрочнению. Высокоскоростное напыление алюминия сопровождается достаточно сильным наклепом частиц порошка, благодаря чему в каждом элементарном слое покрытия возникают сжимающие напряжения, повышающие его сопротивляемость коррозии.

Полученные экспериментальные графики и уравнения позволяют рассчитать толщину покрытия на определенный период эксплуатации сварных конструкций и при необходимости возобновлять покрытия непосредственно в полевых условиях, выполнив предварительно струйно-абразивную обработку защищаемой поверхности.

Соответственно, эти покрытия могут быть рекомендованы для защиты элементов металлоконструкций и сварных соединений, эксплуатируемых в морской воде или в атмосфере соляного тумана.

Результаты работы могут быть применены также для защиты узлов разрабатываемого оборудования, используемого для освоении морских месторождений (рис. 3.13) [83].

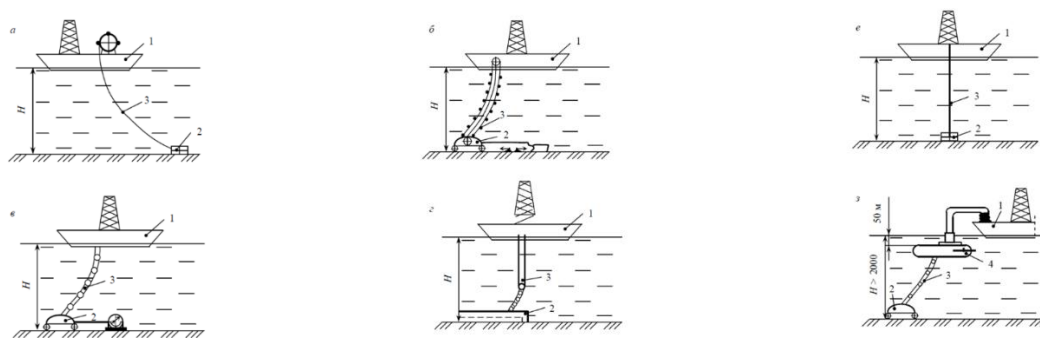


Рисунок 3.13 - Компоновочные схемы глубоководных добычных агрегатов [83]:

а – скрепер канатный; *б* – элеватор ковшовый; *в* – гидротранспорт; *г* – эрлифт; *д* – самовсплывающая установка; *е* – контейнерный подъемник; 1 – судно-носитель; 2 – донный агрегат; 3 – транспортное средство; 4 – автономный всплывающий агрегат; 5 – промежуточный привод

Исполнительные органы таких агрегатов погружены в морскую воду и поэтому нуждаются в защите от электрохимической коррозии

Таким образом обоснованы составы и условия формирования защитных покрытий для стали, устойчивых к электрохимической коррозии в морской воде.

3.4 Выводы по главе 3

1. На основе идентификации основных параметров холодного газодинамического напыления для установки «Димет-405» были установлены рациональные параметры процесса формирования плотных коррозионностойких покрытий для защиты стальных металлоконструкций от электрохимической коррозии при контакте с морской водой. Так, для достижения желаемого результата покрытия на основе алюминия и цинка необходимо формировать при температуре торможения газа 310-360⁰С при скорости подачи порошка 0,8...1 г/с на расстоянии от среза сопла 10-12 мм.

2. В результате экспериментальных исследований скорости и глубины коррозии образцов с покрытиями, сформированными холодным газодинамическим напылением, установлено, что применение алюмоцинковых и цинковых покрытий предотвращает коррозию основного металла и тем самым продлевает ресурс сварных металлоконструкций. Коэффициенты анодной защиты данными покрытиями $K_{э.а}$ варьируются в пределах 7...8 для монолитных образцов и 32...36 – для сварных.

3. Установлено, что при нарушении сплошности анодного алюминиевого покрытия в морской воде в результате его механического повреждения образуется гальваническая пара «покрытие-основной металл», в которой активизируется анодное растворение алюминия. Образующиеся продукты коррозии откладываются на поврежденных участках, защищая стальную поверхность от коррозии.

4. Полученные в результате обработки экспериментальных данных уравнения для скорости K и глубинного показателя h_c коррозии, позволяют прогнозировать ресурс стальных металлоконструкций и сварных соединений, эксплуатируемых при контакте с морской водой, что предоставляет возможность оценить момент времени для возобновления защитного покрытия при его полном растворении в агрессивной морской воде.

Глава 4 Повышение эффективности ремонта деталей аксиально-поршневых насосов на основе применения холодного газодинамического напыления

Одна из важнейших производственных задач ремонтных служб горных предприятий Вьетнама состоит в организации качественного ремонта элементов гидроприводов карьерных экскаваторов зарубежного производства.

Гидроприводы широко применяются в горной технике благодаря комплексу достоинств, к числу которых можно отнести:

- возможность плавного регулирования давления, скорости движения, благодаря чему достигается требуемая позиционная точность исполнительных органов горных машин;
- компактность и небольшая масса на единицу мощности;
- возможность передачи мощности от одного источника энергии к различным рабочим элементам машины;
- высокая надежность, простота управления и др. [6, 52].

Вместе с тем, он имеет ряд недостатков, обусловленных чувствительностью к загрязнению рабочей жидкости, сложностью диагностики технического состояния, высокой стоимостью технического обслуживания и ремонта, а также высокими требованиями к организации рабочих мест для его ремонта.

Жесткие требования точности поверхностей деталей и сборки соединений, шероховатости сопрягаемых поверхностей трения, а также специфика применяемых материалов деталей существенно влияют на трудоемкость и достигаемое качество ремонта. Присутствие в составе гидромашин деталей из сплавов на основе меди повышает стоимость ремонта, при этом на практике часто ограничиваются заменой детали с предельным износом на новую или же заменой всего узла, так как методы восстановления, широко используемые для черных металлов, не всегда эффективны для деталей из цветных сплавов.

4.1 Анализ требований на изготовление основных узлов аксиально-поршневого насоса

В приводах гидравлических карьерных экскаваторов широко применяются регулируемые аксиально-поршневые насосы (АПН) (рис. 4.1). По типу конструкции их разделяют на две группы: насосы с наклонным блоком, когда ось вращения блока цилиндров располагается под углом к оси вращения приводного вала (рис. 4.1, *а*) и с наклонным приводным диском, в них ось вращения блока цилиндров совпадает с осью вращения вала (рис. 4.1, *б*) [5, 6].

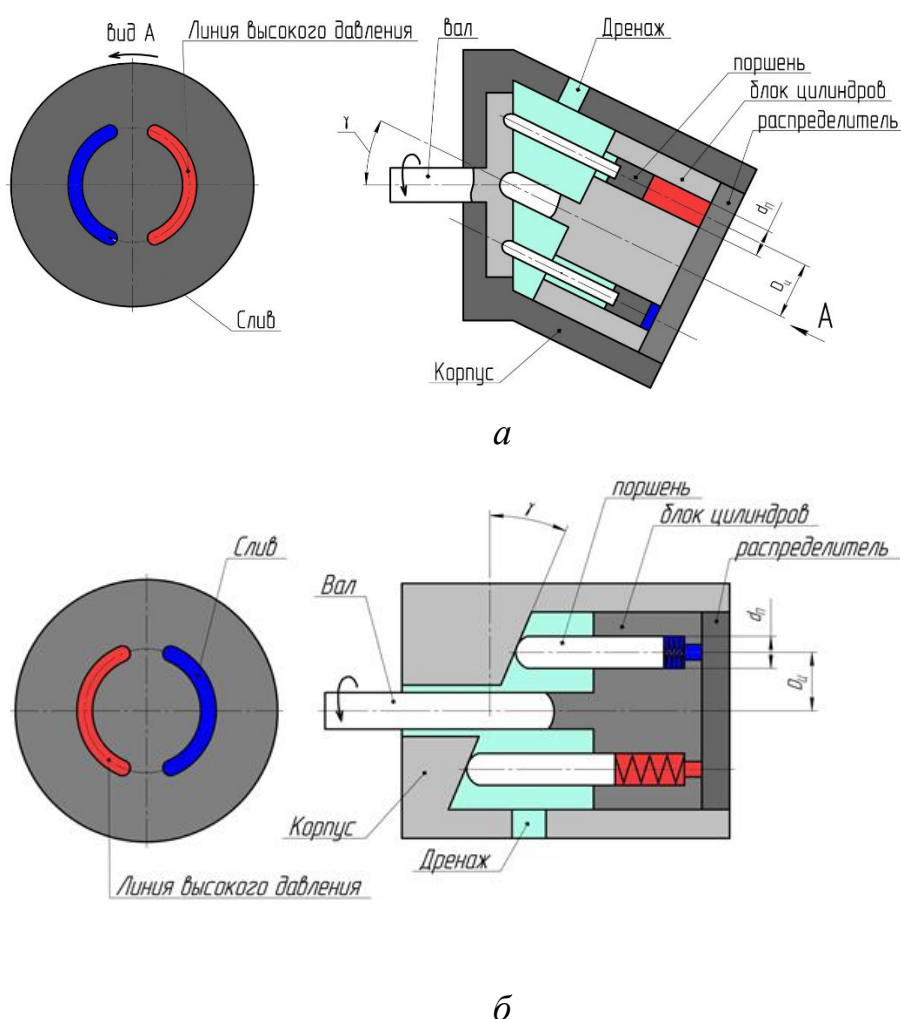


Рисунок 4.1 – Типы конструкций аксиально-поршневых насосов [5, 6]: *а* – с наклонным блоком цилиндров; *б* – с приводным наклонным диском

Ценным достоинством таких насосов является их быстродействие при регулировании подачи. Так, изменение подачи от 0 до максимума в некоторых

типах насосов осуществляется за 0,04 с; от максимального значения до нулевого -за 0,02 с.

При всей своей привлекательности и достоинствах, аксиально-поршневые насосы характеризуются сложностью конструкции и технологии изготовления, что приводит к достаточно большим затратам на их эксплуатацию, обслуживание и ремонт.

Одним из наиболее значимых факторов, влияющих на работоспособность насосов является чистота рабочей жидкости. Согласно производственной статистике, до 70 % отказов насосов вызваны загрязнением рабочей жидкости мелкодисперсными частицами продуктов износа металла с поверхностей трения, керамической пылью и частицами краски, попадающие в рабочую жидкость вследствие негерметичности баков, частицами изношенных резиновых уплотнений, а также продуктами реологии масла. Это приводит к появлению неисправностей, обусловленных износом деталей распределительного узла насоса, частей поршневой группы, возникновением задиров на поверхностях трущихся деталей, износом уплотнений.

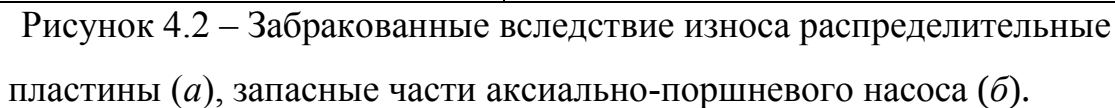
Одной из проблем, с которой сталкиваются при ремонте наиболее ответственных узлов этих насосов, является интенсивный износ деталей основных соединений поршневого блока, выполненных из цветных металлов и сплавов на их основе. Износы в соединении «поршневой блок – распределительная пластина» (ПБ-РП) устраняют одним из следующих методов:

- возможной регулировкой требуемых зазоров в сопряжении при помощи установки компенсирующих шайб;

- устранением рисок и царапин износа на контактируемом с распределительной пластиной поверхности поршневого блока при помощи механической обработки с использованием притирочных паст с последующей установкой компенсирующих прокладок, шайб или колец;

- созданием на изношенных поверхностях трения компенсирующих слоев – покрытий при помощи электроискрового наращивания [60, 61] или наплавки;

Следует отметить, порядок цен на данные детали относит восстановительный ремонт к разряду дорогостоящих. Так, стоимость блока цилиндров в настоящее время варьируется в пределах 9000...10000 руб., поршней с подпятниками до 10 000 руб., распределительной пластины до 2500 руб, наклонного диска до 7000 руб.



86

наружное кольцо подшипника, имеет место выработка или появляются сколы, нарушающие осевое положение подшипника, что приводит к недопустимому его торцевому биению.

Возможность восстановления деталей соединений поршневой группы в условиях ремонтного производства ограничивают высокие требования размерной точности, относительного положения, точности формы и шероховатости сопрягаемых поверхностей. Так, в соответствии с требованиями на изготовление насосов, принятые зазоры между поршнем (плунжером) и гильзой блока цилиндров составляют 0,010...0,015 мм, что определяет необходимость обработки сопрягаемых поверхностей по 5-6-му квалитетам точности. При этом достигаемые параметры шероховатости рабочих поверхностей поршней и цилиндров Ra регламентируют диапазоном 0,16 - 0,025 мкм.

В соответствии с требованиями на изготовление шероховатость Ra торцевых поверхностей упорно-распределительного диска (пластины) находится в пределах 0,63-0,32 мкм, а цилиндрического блока — 0,32-0,16 мкм. При этом для сопрягаемых торцевых поверхностей деталей данного соединения необходимо выдержать плоскостность, а также их перпендикулярность к осям вращения; непрямолинейность этих поверхностей не должна превышать 0,005 мм [6].

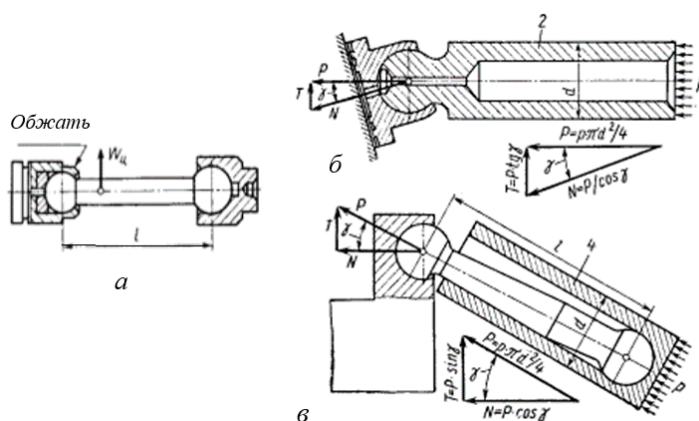


Рисунок 4.3 – Схема завальцовки поршня со сферическим поршневым штоком (а), расчетные схемы поршней насосов с наклонным диском (б) и наклонным блоком цилиндров (в) [6]

Соединение поршня со сферическим поршневым штоком осуществляют с помощью завальцовки (рис. 4.3, *а*). При этом создаваемое соединение должно быть жестким и прочным для преодоления действующих сил - усилия, развиваемого вакуумом в цилиндре, сил инерции поршня и силы трения его в цилиндре (рис. 4.3 *б, в*). Люфты в поршневой группе категорически недопустимы. Они могут возникнуть при некачественной завальцовке сферических головок шатунов в поршнях и приводить к нарушению фазораспределения, а также вызвать разрушение поршневых шатунов в результате ударного действия на поршни давления жидкости [6].

Таким образом, практически для всех сопрягаемых деталей требуется отделочная обработка, в качестве которой применяется тонкое шлифование, полирование с последующей притиркой, а для обработки отверстий блока цилиндров – хонингование. Все это указывает на высокую трудоемкость их изготовления и существенное влияние на себестоимость насоса, и, соответственно, на стоимость запасных частей, приобретаемых для замены изношенных элементов соединений, и большие затраты на ремонт аксиально-поршневых насосов.

Воспроизвести все этапы технологии изготовления ответственных соединений аксиально-поршневого насоса (АПН) в условиях ремонтного производства не представляется возможным, к тому же является нецелесообразным, поскольку производители гидравлического оборудования вместе с готовыми изделиями поставляют на рынок широкий спектр запасных частей и ремкомплектов. Вместе с тем следует признать, что все узлы АПН не выходят из строя одновременно. Появление утечек в соединениях качающего узла, а также через образуемые недопустимые зазоры в соединениях «шатун-вал»; «блок цилиндров - поршень», «блок цилиндров – распределительная пластина» (БЦ-РП); «распределитель – крышка» и другие происходит по причине потери работоспособности какого-то одного ответственного соединения, так называемого, лимитирующего узла, который впоследствии

вызывает нарушение функционирования всех остальных соединений из-за нарушения размерных связей вследствие неравномерного износа и увеличения первоначальных зазоров, достигнутых при сборке узлов на заводе-изготовителе. Таким образом, с выявлением первопричины потери работоспособности насоса, представляется возможным разработка ответных эффективных мер, предотвращающих интенсивный износ соединений при помощи создания на контактирующих поверхностях благоприятных условий трения скольжения, способствующих сопротивлению износу и увеличению ресурса ответственных узлов.

Согласно ранее проведенным исследованиям причин отказов аксиально-поршневым насосов [59, 60], ресурсолимитирующим узлом, в большей степени влияющим на объемный КПД насоса и работу остальных сопряжений, признано соединение «блок цилиндров – распределительная пластина» (БЦ-РП). При этом, в соответствии ГОСТ 23. 224-86, несущую способность рекомендуется определять по формуле:

$$P_{мп} = \frac{H_{\mu}r}{R_z} \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_0}\right) \geq \sigma_{z\ max} \quad (4.1)$$

$P_{мп}$ – максимальная удельная нагрузка, воспринимаемая парой трения, H_{μ} – микротвёрдость (или твердость по Виккерсу) контр-тела из более пластичного антифрикционного материала; r – радиус закругления неровностей более твердой из контактируемых поверхностей; R_z – шероховатость более твердой поверхности, определяемая по десяти точкам; τ – прочность на срез адгезионной связи, образующихся мостиков сварки; σ_0 – предел текучести деформируемой поверхности; $\sigma_{z\ max}$ – фактическая нагрузка на пару трения.

Из формулы вытекает, что несущая способность пары трения главным образом определяется микротвёрдостью H_{μ} применяемого для пары трения антифрикционного материала, параметрами получаемого качества поверхности ($\frac{r}{R_z}$), а также соотношением адгезионной прочности покрытия и его предела

текучести $\frac{2\tau}{\sigma_0}$. Соответственно, при равных показателях шероховатости поверхности, полученных в процессе отделочной обработки покрытия, несущая способность будет тем выше, чем больше его микротвёрдость и выше адгезионная прочность.

В работе [61] на основе выполненного имитационного моделирования взаимодействия пары трения БЦ-РП с учетом действия рабочих нагрузок были определены контактные напряжения σ , максимальное значение которых не превышает 32 МПа.

Основываясь на этих данных справедливо предположить, что в случае восстановления изношенных рабочих поверхностей распределительной пластины или цилиндрического блока с применением методов нанесения покрытий, минимальное значение адгезионной прочности τ покрытия, рассматриваемое как касательное напряжение в плоскости по границе раздела покрытие-основа, должно составлять не менее 16 МПа ($\tau_{\max} = \sigma/2$).

В большинстве случаев для рассматриваемой пары трения скольжения «блок цилиндров-распределительная пластина» применяют сочетание таких сплавов, как сталь-латунь или сталь-бронза, исходя из требований скорости скольжения и высоких антифрикционных свойств сплавов на основе меди в условиях жидкостного и граничного трения. Окружные скорости на трущихся торцовых поверхностях не должны превышать 8-10 м/с, среднее значение скорости движения поршней в цилиндрах 4 - 6 м/с

В зависимости от назначения насоса и от величины создаваемого им номинального давления применяются различные технологии изготовления и конструкционные материалы. Распределительную пластину изготавливают в основном из стали Х12Ф1 в паре с цилиндрическим блоком из оловянисто-свинцовой бронзы [6]. В современных насосах серии 3.313 и насосах зарубежных версий распределительную пластину изготавливают из азотированной стали 38Х2МЮА (810...830 НВ), а блок цилиндров из марганцевистой латуни ЛМцКНС58-3-1,5-1,5-1 (165 НВ).

В насосах больших размеров из бронзы изготавливают лишь трущиеся поверхности блока (втулки цилиндров и торцовую опору), сам же блок изготавливают из стали типа 12ХНЗА. В насосах малого размера блок цилиндров изготавливают целиком из бронзы (латуни), в частности, из сурьмянистой бронзы ($HB > 60$), в паре с распределительным диском— из стали ХВГ ($HRC > 60$) [5, 6].

Применяются также распределительные пластины из низкоуглеродистой нитрированной стали ($HRC\ 60...62$) в паре с цилиндрическим блоком из свинцовисто-оловянистой бронзы. При этом поршни изготавливают из цементируемой стали 12ХНЗА с твердостью рабочих поверхностей 58HRC или из стали ХВ2 (55—60HRC). [6]

В некоторых случаях для ускорения и улучшения условий приработки, и минимизации износа в этот период торцы бронзовых цилиндрических блоков и распределительных дисков покрывают тонкой пленкой из антифрикционных материалов, в основном серебра.

Поршни могут быть изготовлены также из шарикоподшипниковой стали ШХ15 с закалкой до $HRC\ 62—64$. Для стального цилиндрического блока ($HRC\ 60$) поршни изготавливают обычно из прочной бериллиевой бронзы. Для условий эксплуатации при высоких температурах ($150^{\circ}C$) поршни и гильзы покрывают серебром. Для изготовления же насосов, предназначенных для работы при температурах выше $500^{\circ}C$, применяют никелевые сплавы [5, 6].

Из вышеприведенного анализа следует, что в узлах трения скольжения АПН широко применяются традиционные антифрикционные сплавы на основе меди, имеющие гомогенную структуру, полученную при металлургическом производстве сплава. Данные материалы бесспорно являются наиболее эффективными, так как в условиях жидкостного и граничного трения обеспечивают минимальный коэффициент трения. Однако, обеспечивая низкий коэффициент трения в паре с более твердым материалом, благодаря высокой пластичности, сплавы на основе меди, не обладая высокими механическими характеристиками – микротвердостью, пределом текучести, пределом прочности на растяжение, имеют ограниченную сопротивляемость абразивному износу. В

связи с этим, при попадании в зону трения посторонних механических частиц вместе с рабочей жидкостью, происходит интенсивный абразивный износ более пластичного материала и ресурс соединения снижается.

В трудах известных советских ученых [32, 75], посвященных вопросам трения, контактного взаимодействия твердых тел, износу в парах трения скольжения, а также в работах зарубежных исследователей, доказано, что наиболее благоприятной структурой антифрикционного материала для лучшего сопротивления трению скольжения и абразивному износу является сочетание мягкой пластичной матрицы с включениями из высокотвердых мелкодисперсных частиц на основе оксидов, боридов, карбидов, карбонитридов и т.п. Вместе с тем в парах трения скольжения, например, «вал-втулка», «вал конуса дробилки-подпятник» из пластичного материала принято изготавливать деталь, менее трудоемкую в изготовлении и ремонте – втулку, обосновывая это тем, что ее интенсивный износ предотвращает износ сопряженной детали, (контр-тела). Однако с развитием технологий создания различных функциональных покрытий - газотермического напыления, технологий поверхностного микролегирования, PVD - и CVD - технологий и др, ситуация кардинально изменилась, появилась возможность создавать различные композитные покрытия, а также обратные пары трения, когда антифрикционные слои формируются на поверхности вала.

Принимая во внимание тот факт, что все детали АПН относятся к числу достаточно трудоемких в изготовлении и ремонте, мероприятия, направленные на повышение износостойкости элементов пар трения, выполненных из сплавов на основе меди, являются чрезвычайно актуальными.

В работе [60] для этих целей при ремонте соединений поршневого блока использовался метод электроискрового упрочнения (микролегирование). При этом осуществлялась микронаплавка поверхностных слоев изношенных торцевых поверхностей цилиндрического блока и распределительной пластины присадочными материалами, идентичными по химсоставу материалам подложек. Эффект упрочнения и повышения износостойкости пар трения достигался за

счет образования в наплавленном слое марганцовистой латуни нитридов и карбонитридов, обладающих высоким сопротивлением износу. При этом сохранялась металлическая матрица наплавленного присадочного материала, обладающая высокой пластичностью.

При всех достоинствах, метод электроискрового упрочнения имеет существенный недостаток – низкую производительность, что затрудняет выполнять обработку больших площадей, и ограничения по химическому составу применяемых электродов.

Для повышения несущей способности соединения БЦ-РП при ремонтном восстановлении узла, в настоящей работе предлагается использовать метод холодного газодинамического напыления, являющийся наиболее универсальным как для создания коррозионностойких покрытий (гл. 3), так и для повышения износостойкости элементов пар трения. В качестве материала покрытия для восстановления детали, выполненной из цветного сплава на медной основе, выбран композитный материал, представляющий собой механическую смесь меди с оксидом алюминия в соотношении 55%/45% (мас.).

4.2 Экспериментальные исследования условий формирования ХГН-покрытий на основе меди с заданными свойствами

С целью выявления условий формирования ХГН-покрытий на основе меди с заданными механическими и трибологическими характеристиками требуется проведение серии экспериментальных исследований, поэтому важно определиться с входными параметрами, в частности, с размером частиц композитного порошка.

Медь относится к пластичным материалам, способным к деформационному упрочнению, что должно положительно сказаться на ожидаемых свойствах покрытия при высокоскоростном напылении, поскольку залогом достижения высокой адгезии и когезии покрытий является удар частицы о подложку и ее деформация. Наряду с хорошей пластичностью, медь имеет

достаточно высокую теплопроводность, которая выполняет важную функцию в вопросах образования прочной связи между частицей и подложкой [4].

Возникновение адгезионных связей в процессе ХГН объясняется исследователями [93, 94] появлением адиабатной сдвиговой неустойчивости. Поясним это (рис. 4.4.). Для материала, склонного к упрочнению при пластическом деформировании отношение напряжение/деформация монотонно увеличивается. При адиабатическом формоизменении энергия пластической деформации рассеивается в тело, т.е. отсутствует теплообмен с окружающей средой [4]. В результате этого происходит увеличение температуры тела и его разупрочнение.



Рисунок 4.4 – Кривые напряжение-деформация при различных процессах деформации твердых тел [94]

Для обеспечения высокой эффективности ХГН-процесса и воспроизводимости результатов эксперимента на начальном этапе был выполнен анализ гранулометрического состава порошкового материала. Как видно из рис. 4.4, с ростом деформации скорость упрочнения быстро снижается при достижении максимального значения напряжения [4]. При локализованной деформации сдвиг и нагрев сосредотачиваются в малом объеме, что приводит к разупрочнению материала внутри области локализации и ускоренному падению

напряжения до нуля, вызывая вязкое состояние, при котором напряжение пропорционально скорости деформации.

Установлено, что с увеличением скорости удара размер области локализации для пластичных и плотных материалов уменьшается, а при критической скорости удара в области локализации имеет место интенсивное увеличение деформации, температуры и снижение напряжения практически до нуля. Таким образом, считается, что разупрочнение и сдвиговая локализация способствуют образованию связи между частицей порошка и материалом основы [94], поскольку сдвиговая локализация способствует чистых контактных поверхностей, в свою очередь разупрочнение вместе с высоким давлением приводит к образованию взаимно конформных контактных поверхностей и появляются условия для образования адгезионной связи между частицей и подложкой.

Выявлена связь между размером частиц напыляемого порошка, скоростью ее удара и условиями появлением сдвиговой неустойчивости. Так, например, для частицы диаметром 5 мкм при скоростях удара в пределах 400...600 м/с сдвиговая неустойчивость не возникает, а для частиц от 15 до 50 мкм при этих же скоростях она появляется, причем если частица размером 15 мкм закрепляется при скорости 600 м/с, то более крупная, размером до 25 мкм закрепляется при 500 м/с, а размером 50 мкм - при 450 м/с [4].

Поверхностные загрязнения в виде оксидной пленки негативно влияют на закрепление мелких частиц, что требует для них увеличения критической скорости удара.

Минимальные размеры частиц, способных создавать ХГН- покрытие представлены на рис. 4.5

Качество связи увеличивается с ростом размера частиц при одинаковой скорости из-за увеличения температуры и времени контакта. Снижение критической скорости напыления вследствие высоких начальных температур происходит по причине возрастания влияния термического разупрочнения [4, 24].

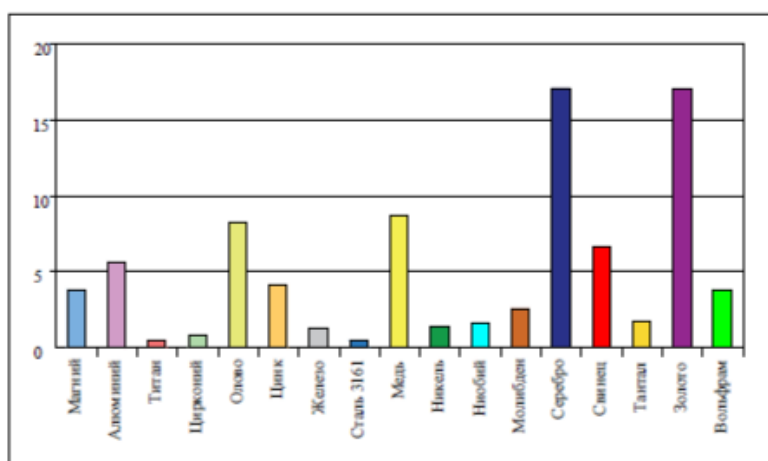


Рисунок 4.5 – Нижний пороговый уровень диаметра частиц, способных к ХГН-процессу

Используемый для экспериментальных исследований композиционный порошок системы $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ получен методом механического измельчения исходных компонентов. При этом частицы меди имеют преимущественно сферическую форму, тогда как частицы оксида алюминия представлены в исходном порошке в виде зерен неправильной геометрической формы. Оценка фракционного состава частиц и гранулометрических характеристик порошка выполнялось с помощью анализатора размера частиц серии ProSizer на основе метода лазерной дифракции с диспергированием частиц порошка в водной суспензии.

Размеры и распределение частиц порошка представлены на рис. 4.6

Результаты анализа указывают на присутствие в порошке следующих основных фракций: 5 – 10 мкм – 17, 1%; 10-20 мкм – 34, 13%; 20 – 45 мкм 27,42%, что вполне удовлетворяет требованиям к порошковым материалам, предназначенным для напыления покрытий при помощи установки «Димет – 405», а также для формирования гетерогенных структур с мелкодисперсными включениями упрочняющих фаз.

Образец: Cu-Al2O3-Average	Номер:	Владелец: МИСИС
Оператор: Суворов Д.С.	Время: 2024-03-18 11:41:28	Измерено: МИСИС
Метод: Laser	Sampling:	Среда: Water
Диспергент:	Ultrasound: Always ON, 50W, 120s, 0s	Speed (rpm): 1600
Опт. режим: Fraunhofer	Режим: General	Распределение Volume
RI частиц:	RI среды:	Примечания:

D[4,3]: 14.01 мкм	D[3,2]: 5.533 мкм	SSA: 401.7 м ² /kg	Затемн.: 5.87 %
D[2,1]: 1.484 мкм	D[1,0]: 0.709 мкм	SPAN: 1.820	Ост.: 1.475 %

D03 = 1.058 мкм	D06 = 1.495 мкм	D10 = 2.408 мкм	D16 = 3.659 мкм	D25 = 5.979 мкм
D75 = 20.75 мкм	D50 = 13.30 мкм	D84 = 23.94 мкм	D90 = 26.62 мкм	D97 = 32.40 мкм

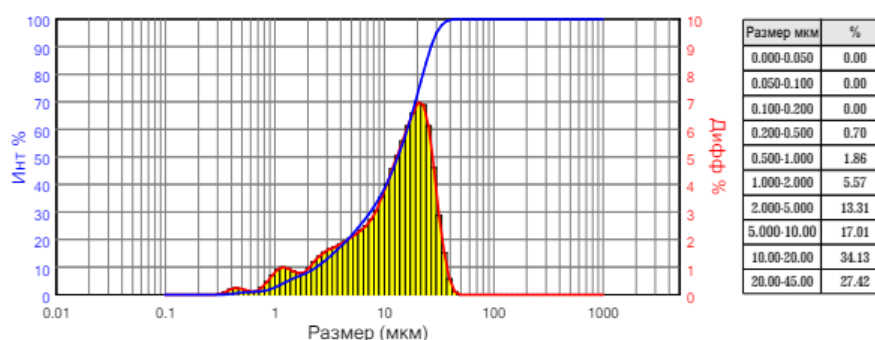


Рисунок 4.6 – Результаты анализа гранулометрического состава частиц порошковой композиции Cu-Al₂O₃, диспергированных в водной суспензии

Для установления диапазона величин скорости подачи порошкового материала при формировании покрытий и соответствующих им цифровым показателям на приборной панели установки «Димет -405», порошок помещался в питатель № 2 и при установленных различных режимах подачи выпускался из питателя через выпускное отверстие в специальную пластиковую емкость массой 2 грамма в течение 60 секунд (рис. 4.7, а). После чего емкость с порошком взвешивали на аналитических весах. Делением полученной массы порошка на 60 секунд получали значение скорости подачи в г/с.

Для оценки температурного режима нагрева воздушного потока, транспортирующего частицы порошка на поверхность подложки в процессе напыления, использовалась никель-молибденовая термопара, подключенная к компьютеру. При установлении различных режимов, термопара помещалась в газовый поток на расстоянии 8-12 мм от среза сопла, с фиксацией

температурного поля на протяжении 2-3 минут (рис. 4.7, б). На оборудовании «Димет-405» представлено 5 температурных режимов от 1 до 5. Измерение температурного поля для каждого режима выполнялось три раза. Результаты измерений – средние значения температур на расстоянии 10-12 мм от среза сопла, на котором производилось напыление, представлены в таблице 4.1.

По результатам измерения видно, что температура в зависимости от области измерения в пятне контакта несколько изменяется в пределах 10 -12⁰С.

В центральной части газового потока она несколько выше, чем на периферии.

Таблица 4.1 – Соответствие температурных режимов на приборной панели оборудования ДИМЕТ реальным температурам газового потока

Номера температурных режимов на панели установки	Температура газового потока на расстоянии 10-12 мм от среза сопла, °С
1	140-150
2	200-210
3	250-260
4	300-310
5	400-410

Для нанесения покрытий были подготовлены цилиндрические образцы из меди и латуни марки ЛС59 и плоские подложки из стали 25Х в количестве 18 штук (рис. 4.7, в,б.). Выбор материала стальной подложки обусловлен необходимостью выявления возможности создания обратных пар трения путем формирования покрытий на основе меди на стальных деталях. Для этого потребовалось оценить уровень адгезии композитного порошка на основе меди со стальной подложкой, так как при нанесении меди на подложки из медных сплавов уровень адгезионной прочности априори достаточно высокий вследствие схожести их физико-механических, теплофизических и упругих характеристик. Наряду с этим, благодаря цветовому различию двух материалов, представляется возможным дать характеристику границы раздела покрытия с основой.

Толщина плоских стальных образцов (рис. 4.7, б) составляла 5 мм, цилиндрических - 20 мм (рис. 4.7, в) Перед нанесением покрытия, поверхность подложек подвергалась струйно-абразивной обработке частицами электрокорунда марки К-00-04-16, дисперсностью 100...160 мкм при температуре 140...160⁰С (режим 1) без предварительного обезжиривания. Толщина наносимого покрытия не превышала 0,6 мм.



а



б

в

Рисунок 4.7 – Предварительная подготовка экспериментальных исследований: *а* – определение скорости подачи порошка; *б* – плоские образцы-подложки из стали; *в* – образцы из латуни и меди.

Предварительная струйно-абразивная обработка подложек производилась с целью создания развитой шероховатости поверхности для обеспечения более благоприятных условий формирования адгезионных связей между материалами покрытия и подложки. В процессе такой обработки производится дополнительная очистка поверхностного слоя образца от оксидной пленки, а также активация поверхностных атомов для лучшего взаимодействия с

частицами материала покрытия. Предварительная обработка выполнялась в два прохода.

На начальном этапе эксперимента были выполнены предварительные работы по определению скорости подачи порошкового материала.

Известно [4, 24], что скорость подачи порошка - второй по значимости фактор, после температуры газопорошкового потока, оказывающий существенное влияние на такие характеристики ХГН-процесса и покрытия, как адгезионная прочность, пористость, толщина покрытия, а также эффективность напыления и производительность процесса. С ростом скорости подачи порошка эффективность и производительность процесса напыления увеличивается, при этом прочность сцепления и плотность покрытий несколько снижается [24].

При установлении скорости подачи исходили из следующих соображений. Для получения максимального эффекта по адгезии покрытий учитывалось то, что с увеличением подачи до 1,0 г/с, скорость потока частиц снижается и соответственно уменьшается энергия удара частиц о подложку, что приводит к снижению адгезионной прочности. Наряду с этим в трассе подачи порошка начинают забиваться питающие трубки и каналы. Поэтому на этапах предварительных экспериментов для выбранного порошкового материала было принято решение изменять подачу в пределах 0,3...0,6 г/с, что обеспечивает более комфортные условия напыления и качество покрытия. При этом за каждый выполненный проход со скоростью продольной подачи сопла, равной 10-12 мм/с наносился слой, равный по толщине 0,25 - 0,3 мм. Таким образом, для получения покрытия толщиной 0,5 – 0,6 мм формировалось последовательно два слоя покрытия.

Температурные режимы принимались в диапазоне (200-210⁰С) – (400 - 410⁰С). Принятые факторы и уровни их варьирования представлены в табл. 4.4

Таблица 4.2- Факторы и уровни их варьирования

Факторы	Код	Уровни варьирования					
		В натуральных значениях			В кодированных обозначениях		
		Нижний	Средний	Верх.	Нижний	Средний	Верх.

Температура, °С	X ₁	200-210	300-310	400-410	-1	0	+1
Подача порошка, г/с	X ₂	0,4	0,5	0,6	-1	0	+1

Интервал варьирования температуры t торможения газового потока принимался равным 100 °С, а для скорости подачи порошка – 0,1 г/с.

В качестве выходных параметров приняты микротвердость покрытия Виккерсу HV, МПа (Y1) и шероховатость поверхности Ra мкм (Y2). Первый параметр характеризует несущую способность покрытия, второй - возможность уменьшения объемов последующей отделочной обработки покрытия.

Таким образом, был реализован двухфакторный эксперимент. План эксперимента и средние значения полученных выходных параметров представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3-План проведения и результаты двухфакторного эксперимента по нанесению покрытия Cu-Al₂O₃ на стальную подложку

№ эксп.	Факторы		Функция отклика	
	X1 температура	X2 подача	Y ₁ (HV _{ср})	Y ₂ (Ra, мкм)
1	-1	-1	180	3, 2
2	-1	0	172	2,8
3	-1	+1	200	3,8
4	0	-1	130	4,2
5	0	0	134	4,0
6	0	+1	149	4,8
7	+1	-1	120	5,0
8	+1	0	123	5,4
9	+1	+1	127	5,6

Образцы с покрытиями показаны на рисунке 4.8 Цветовой спектр покрытий обусловлен различным температурным режимом напыления.

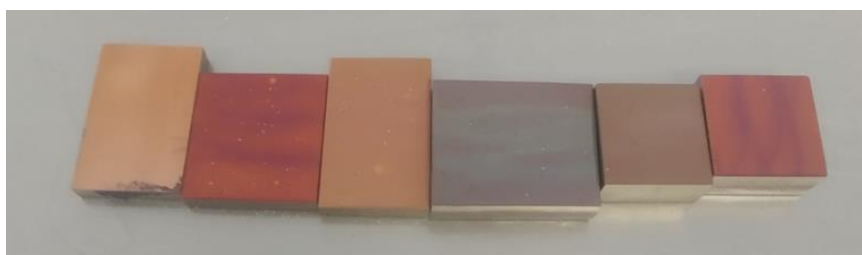
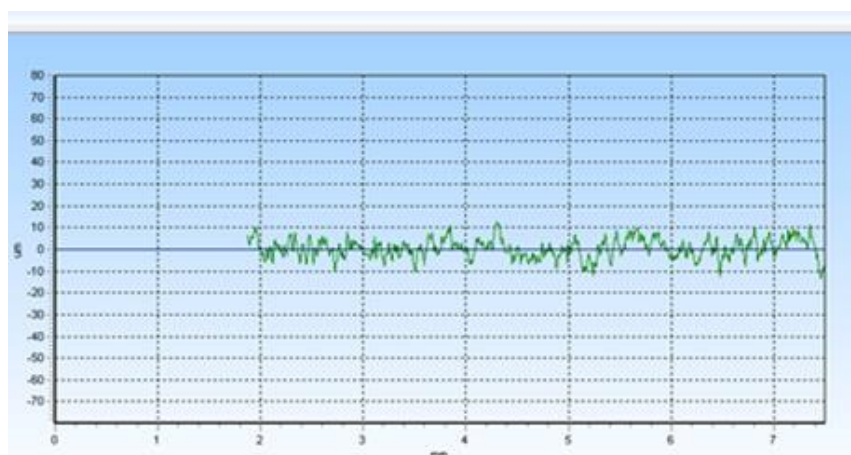


Рисунок 4.8 - Покрытия на основе композиции Cu-Al₂O₃, сформированные на разных режимах

Каждый опыт в эксперименте выполнялся дважды. После охлаждения образцов при помощи цифрового штангенциркуля с ценой деления 0,01 мм определяли толщину образца с покрытием. Для оценки шероховатости поверхности по параметру Ra использовали портативный профилограф модели Time TR200, совместимый с персональным компьютером. Визуализация и анализ профилограмм выполнялись при помощи специализированного программного обеспечения (рис.4.9).



a

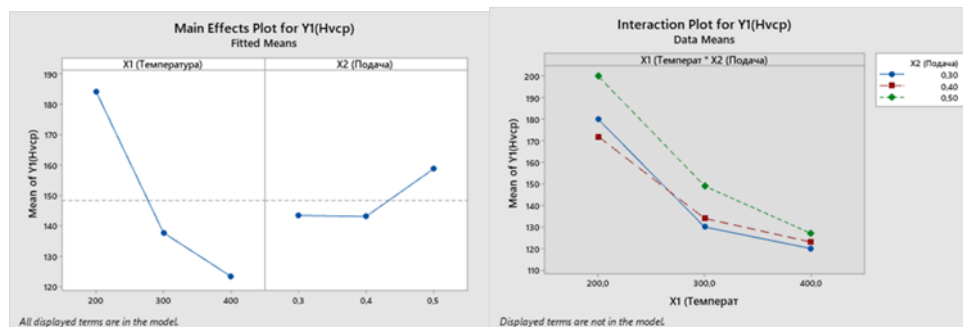


б

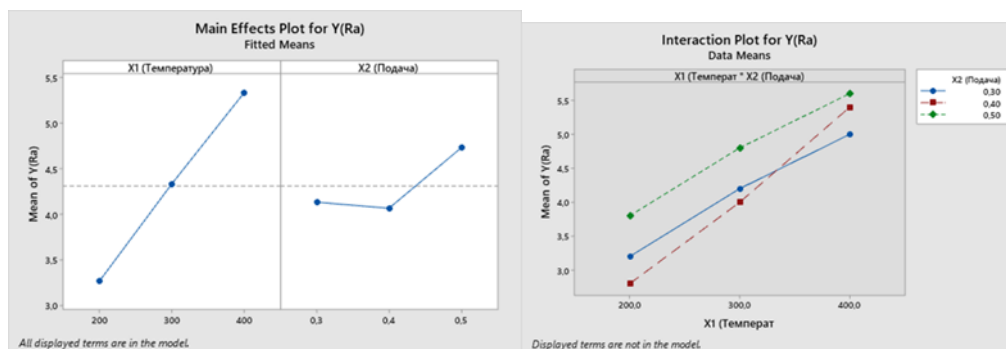
Рисунок 4.9 – Шероховатость покрытий на основе порошковой композиции Cu-Al₂O₃: *a* – Ra = 3,6 мкм; *б* - Ra = 4,6 мкм

Обработка экспериментальных данных выполнялась с помощью программы MiniTab (рис. 4.10). Анализ полученных данных показал, что с

увеличением температуры газопорошкового потока микротвердость поверхности довольно интенсивно уменьшается с максимального значения 200 HV до минимального 123 HV, а с ростом скорости подачи порошка увеличивается незначительно (рис. 4.10, а). Микротвердость покрытия по Виккерсу определяли с помощью твердомера модели Wilson Hardness



а



б

Рисунок 4.10 – Влияние технологических режимов напыления на изменение микротвердости HV(а) и шероховатости поверхности Ra (б) композитного покрытия на основе меди

Анализируя влияние параметров напыления на шероховатость поверхности Ra, можно сделать вывод, что с увеличением температуры и скорости подачи порошка шероховатость поверхности ухудшается.

Следует также отметить, что с увеличением температуры и подачи порошка поверхностная пористость покрытия несколько увеличивается.

В результате обработки экспериментальных данных были получены уравнения регрессии для микротвердости HV и шероховатости поверхности Ra покрытия, адекватно описывающие изменение выходного параметра в пределах

факторного пространства в зависимости от температуры t газового потока и скорости подачи порошкового материала S :

$$HV = 208,7 - 0,303 t + 76,7 S \quad (R^2 = 0,95) \quad (4.2)$$

$$Ra = 0,011 + 0,01t + 3S \quad (R^2 = 0,93) \quad (4.3)$$

Таким образом, напыление покрытия на режимах $t = 200-210$ °C с подачей порошка $S = 0,5$ г/с, обеспечивает микротвердость поверхностного слоя до $200HV$ (расч. $186 HV$), что в 1.17 раз выше микротвердости базового материала пластины из сложнолегированной латуни марки ЛМцКНС58-3-1,5-1,5-1(165 HV)

Получение повышенной твердости при низкотемпературном напылении вероятно обусловлено температурой рекристаллизации меди. При движении твердых частиц медного порошка со сверхзвуковой скоростью и ударном их столкновении с поверхностью подложки, происходит интенсивная деформация каждого слоя (порции порошка), что приводит к наклепу покрытия, т.е. его упрочнению. Несмотря на присутствие в покрытии равномерно распределенных частиц оксида алюминия, благодаря чему представляется возможным получить композитный материал с твердостью, гораздо более высокой, чем твердость чистой меди, существенный вклад в формирование твердости покрытия вносит и собственно деформационное упрочнение меди при ударе о подложку. Твердость меди в отожженном и деформированном состояниях соответственно составляет 50...55 НВ и 90...110 [36] с пределом прочности на разрыв 220 – 245 и 340 – 450 МПа в разных состояниях, т.е. меняется в достаточно широком диапазоне в зависимости от вида обработки.

Температура кристаллизационного отжига меди составляет 450-500°C, а полная рекристаллизация протекает при температуре 270°C [35, 39], что может являться основанием выбора температурного режима напыления. Следовательно, в процессе холодного газодинамического напыления необходимо создать температурные условия формирования покрытия, при

которых возможно сохранить деформационное упрочнение меди и предотвратить ее рекристаллизацию, т.е. не выше 250 °С

Твердость алюмо-железо-никелевой бронзы 10-4-4, из которой изготавливают распределительную пластину и в некоторых случаях блок цилиндров АПН, согласно данным [36, 39], находится в пределах 165...170НВ. алюмо-марганцовистой бронзы Бр. АЖМц 10-3-1,5 и Бр. АЖ 9-4 всего 110НВ. Формируемый при напылении псевдосплав на основе системы Cu-Al₂O₃ приобретает микротвердость по Виккерсу до 200 НV, что свидетельствует о возможном увеличении несущей способности восстановленных деталей АПН.

4.3 Исследование микроструктуры и трибологических характеристик ХГН -покрытия на основе композиции Cu-Al₂O₃

Для оценки эксплуатационных характеристик покрытия на основе порошковой композиции Cu-Al₂O₃, сформированного холодным газодинамическим напылением, исследовали состав, структуру и триботехнические свойства покрытий.

Для подготовки металлографических шлифов фрагменты образцов с покрытиями вырезали при помощи электроэрозионного станка CHMER GX-320L с ЧПУ, после чего выполняли их запрессовку в специальную проводящую смесь фенольной смолы на автоматическом прессе Simplimet 1000 при температуре 150 °С и давлении $\approx$ 300 атм. Здесь важно отметить, что на всех шлифах покрытия сохранились, отслоение отсутствовало, что говорит о достаточно высоком уровне адгезии, не менее 30 МПа.

После запрессовки выполнялось шлифование и полирование исследуемой поверхности образцов на специальной установке модели Buehler AutoMetTM 250 с использованием алмазно-абразивной суспензии с микрочастицами 0,05 мкм при нагрузке 25 Н.

После полирования образцы №1 и №2 (рис. 4.11, а) устанавливали на предметный столик сканирующего микроскопа модели Tescan Vega 3 с

приставкой для проведения микрорентгеноспектрального анализа (рис. 4.11, б). Микроструктура образца с покрытием представлена на рис. 4.11, в)

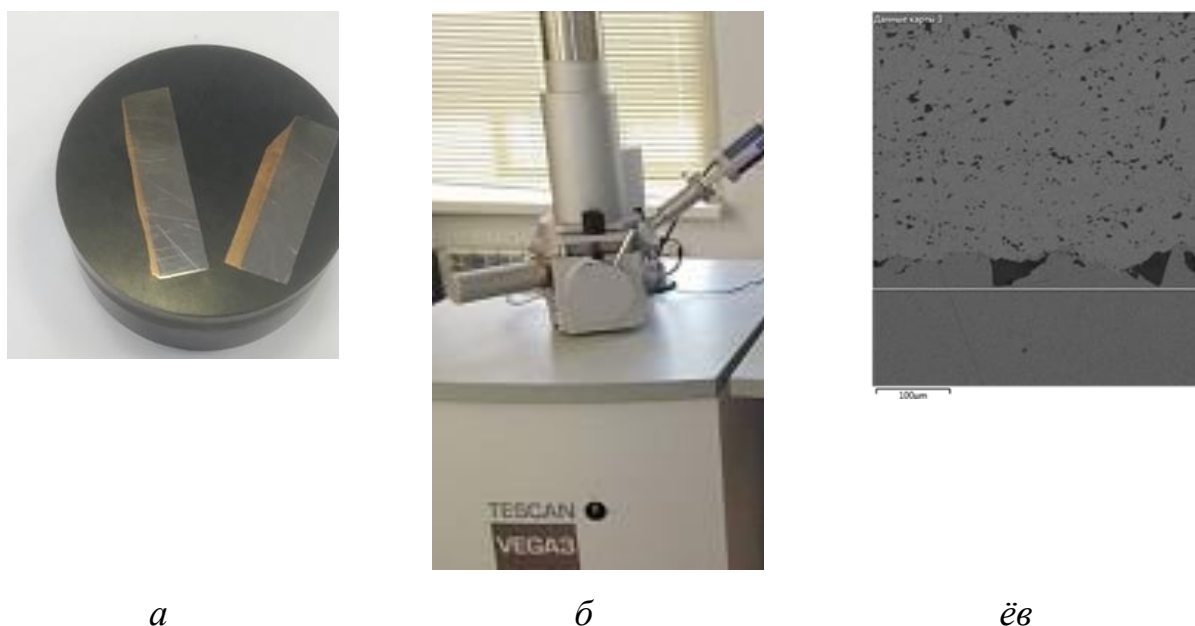


Рисунок 4.11 - Подготовленные для микроанализа шлифы (а), сканирующий микроскоп Tescan Vega 3, микроструктура медного покрытия и граница раздела «покрытие-подложка» (в)

Структура покрытия (рис. 4,11, в) для двух образцов гетерогенная, состоит из металлической медной матрицы с внедренными в нее частицами оксида алюминия. Частицы Al_2O_3 распределены достаточно равномерно. На представленном электронном изображении четко выражена граница раздела «медное покрытие-стальная подложка». Хорошо видны крупные частицы корунда (100...120 мкм), закрепившиеся на поверхности стали в процессе подготовительной обработки (темные фрагменты треугольной формы). Структура покрытия плотная, без выраженной пористости. На границе раздела дефекты не выявлены.

При проведении спектрального анализа для образца №1 (рис. 4.12) установлено, что среднее содержание меди и корунда в покрытиях несколько отличается от состава исходных порошков (55%Cu-45% Al_2O_3). Так, для первого образца содержание меди составляет 68,5%, соответственно корунда 31,5%, т.е.

из 45% корунда, содержащегося в исходном порошке, небольшая его часть распыляется на пути движения частиц к поверхности подложки.

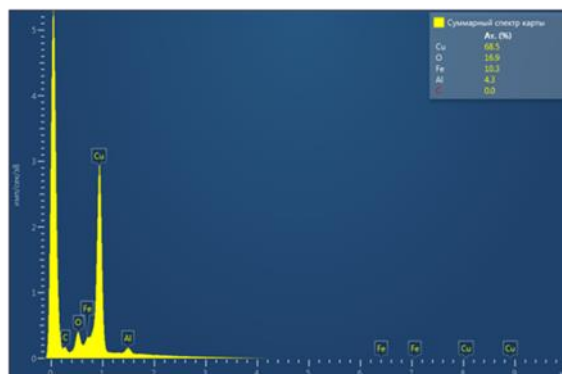


Рисунок 4.12 – Спектральный анализ медного покрытия №1 (суммарный спектр карты)

На рис. 4.13 представлен состав покрытия в характеристических излучениях Cu, Fe, O₂ и Al. Несколько завышенные значения по содержанию кислорода обусловлены скорее возможным выкрашиванием частиц оксида алюминия в процессе шлифования образцов, чем пористостью покрытия.

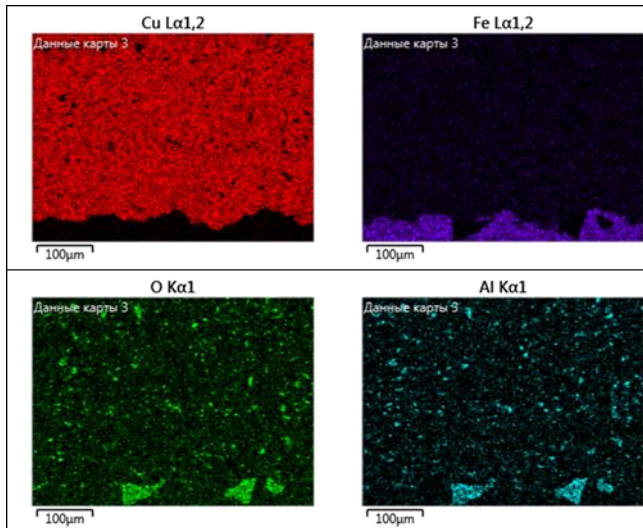


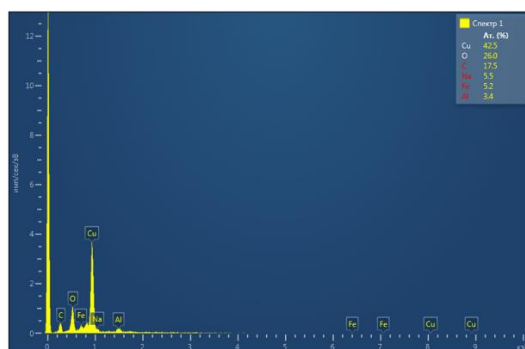
Рисунок 4.13 – Медное покрытие и граница раздела со сталью в характеристических излучениях Cu, Fe, O₂ и Al.

Для анализа состава покрытия №2 выделены и исследованы 4 зоны - спектры 1- 4. Распределение элементов в каждой из зон представлено на рис.

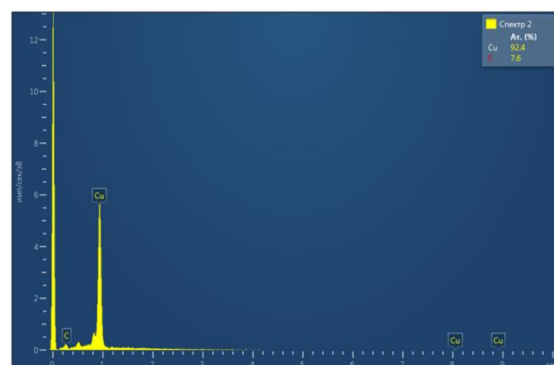
4.14. На рис. 4.15 приведен суммарный спектр карты, из которого следует, что среднее содержание меди в исследуемой зоне покрытия составляет 62,2%.

Наличие в покрытии следов углерода обусловлено присутствием частиц фенольной смолы, используемой для приготовления шлифов. Частицы железа перешли в зону покрытия вследствие совместного полирования поверхности подложки и покрытия.

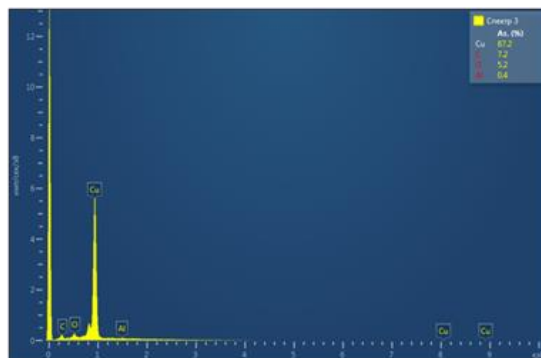
На рис. 4.16 медное покрытие образца №2 и граница раздела покрытия со сталью представлены в характеристических излучениях Cu, Fe, O₂ и Al.



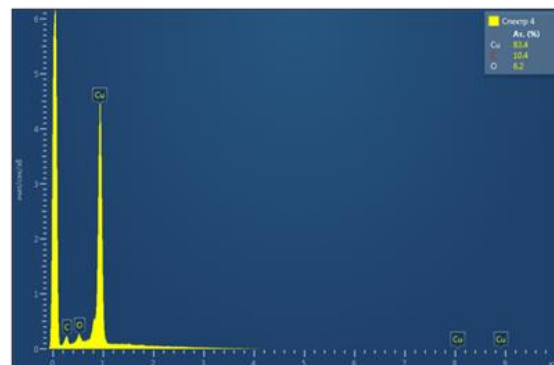
Элементный состав покрытия,
спектр 1



Элементный состав покрытия,
спектр 2



Элементный состав покрытия,
спектр 3



Элементный состав покрытия,
спектр 4

Рисунок 4.14 – Элементный состав покрытия №2

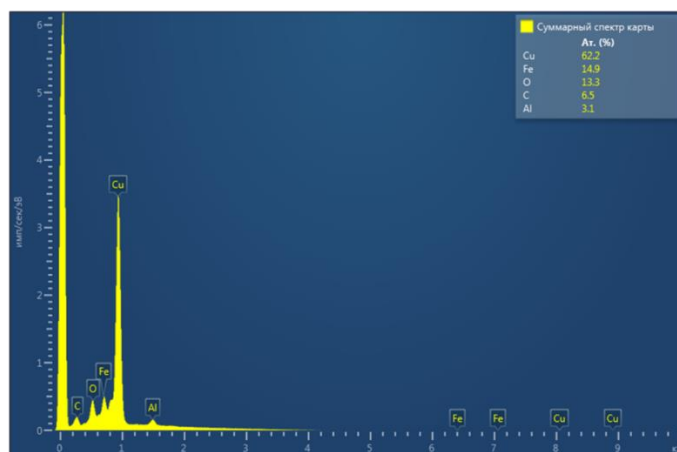


Рисунок 4. 15 - Суммарный спектр карты для покрытия № 2

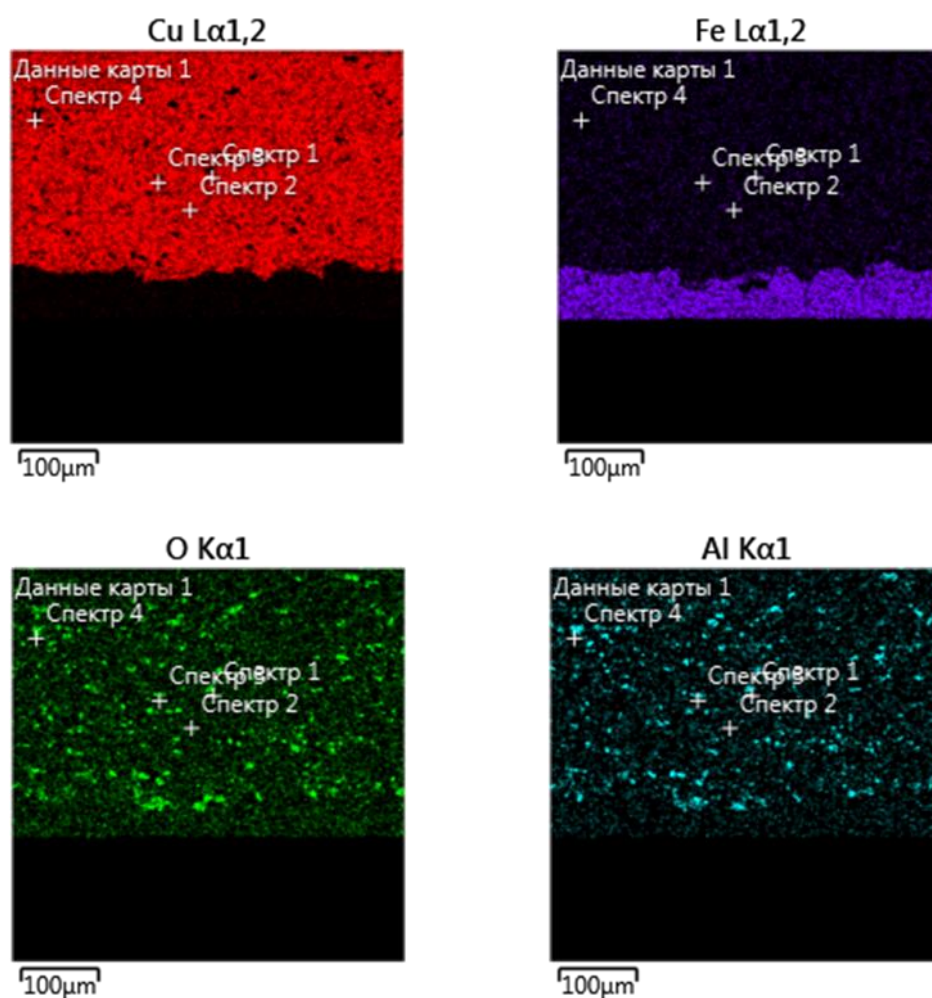


Рисунок 4.16 - Медное покрытие образца №2 и граница раздела «покрытие подложка» в характеристических излучениях Cu, Fe, O₂ и Al.

Таким образом, микроструктура покрытий на основе композитного порошка меди с оксидом алюминия, сформированного холодным газодинамическим напылением, является двухфазной и представляет собой механическую смесь меди с частицами корунда. Такая структура для деталей узлов трения скольжения, выполненных из более пластичных антифрикционных материалов, эксплуатируемых в контакте с более твердыми материалами, упрочненными химико-термической обработкой, является наиболее благоприятной, так как повышает сопротивляемость детали абразивному износу и тем самым, продлевает ресурс сопряжения [32, 75, 76].

С целью исследования основных трибологических характеристик покрытия на основе композиции Cu-Al₂O₃ в работе проводились испытания на трение скольжения в условиях сухого трения по схеме «вращающийся диск-неподвижный шарик» (рис. 4.17, а). Испытания проводились на трибометре модели Tester T-10 (рис. 4.17, б). В качестве контр-тела выступал стальной шар диаметром 10 мм, изготовленный из стали ШХ15, твердостью 63...65 HRC (рис. 4.17, в)

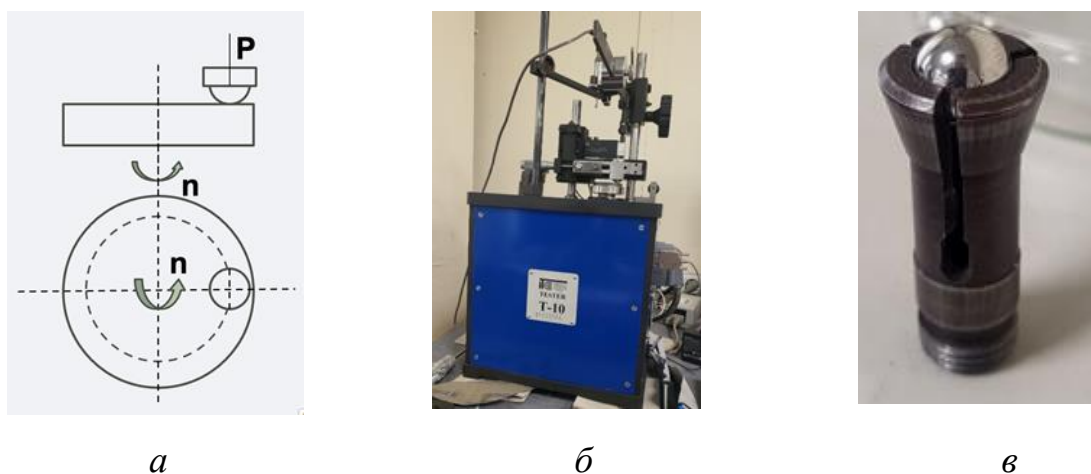


Рисунок 4.17 - Условия проведения испытаний медных покрытий на трение:

а – схема испытания; *б* – оборудование – трибометр модели Tester T-10;
в – контр-тело – стальной шар

Для оценки коэффициента трения были подготовлены специальные образцы в форме диска, на поверхность которых наносились медные покрытия на основе композиции 55%Cu-45% Al_2O_3 на установленных ранее режимах напыления, обеспечивающих максимальную микротвердость покрытия по Виккерсу 200-201 HV. Шероховатость поверхности R_a после нанесения покрытия составляла в пределах 3,2...3,6 мкм, а после отделочной обработки – 0,2...0,14 мкм (рис. 4.18).

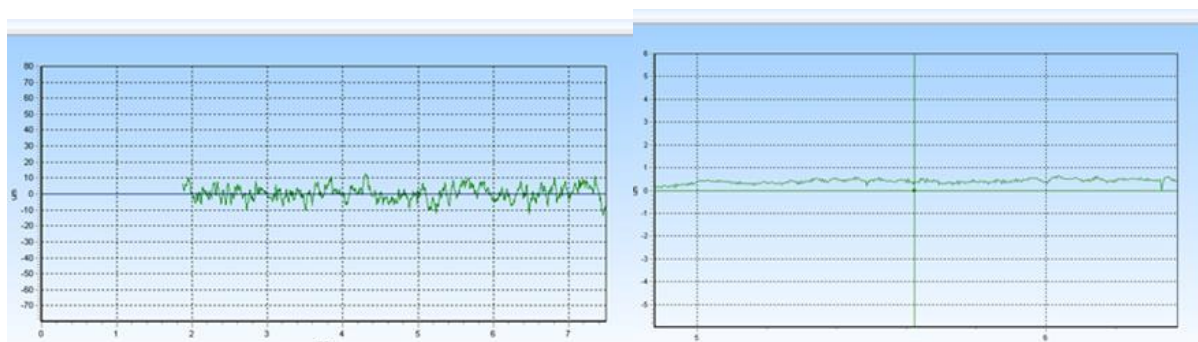


Рисунок 4.18 - Шероховатость медного покрытия после напыления $R_a = 3,6$ мкм (а) и после отделочной обработки (б) $R_a = 0,14$ мкм.

Испытания проводились на следующих режимах: частота вращения образца $n = 190 \text{ мин}^{-1}$, нагрузка на стальной шар $N=10 \text{ Н}$, время испытаний – 1 час.

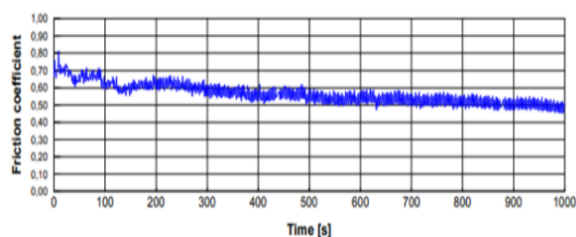
Полученные результаты по коэффициенту трения и величине износа в процессе испытаний представлены на рис. 4.19

На всех графиках для коэффициента трения (синий график) отчетливо видна специфическая зона приработки, характеризующаяся интенсивным увеличением коэффициента трения в начальный период с последующей стабилизацией процесса в условиях установившегося контакта и нормального изнашивания. При этом величина износа, отображаемая графиком зеленого цвета, монотонно растет. Для образца с шероховатостью поверхности $R_a = 1,6...1,4$ мкм (рис. 4.16) линейный износ U за час испытаний в условиях сухого

трения без учета периода приработки, начиная с 720-й секунды испытаний составляет 21,5 мкм, а для покрытия, обработанного полированием, – 16,5 мкм.



Поверхность покрытия
нешлифованная, $Ra=3,2$ мкм

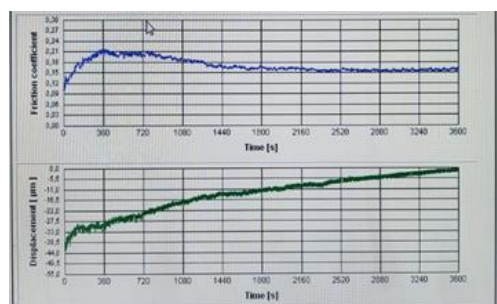


Коэффициент трения $f=0,5$

a



Поверхность после
шлифования и полирования,
 $Ra=0,2$ мкм



Коэффициент трения $f=0,15$

б

Рисунок 4.19 – Результаты трибоиспытний медного покрытия без смазки для оценки коэффициента трения: *a* – нешлифованного, сразу после напыления покрытия $Ra = 3,2$ мкм, $f=0,5$; *б* – после шлифования и полирования $Ra = 0,2$ мкм, $f = 0,15$

На рис. 4.20 представлены результаты испытания на трение для образца, обработанного шлифованием до $Ra = 2,0 \dots 1,6$ мкм

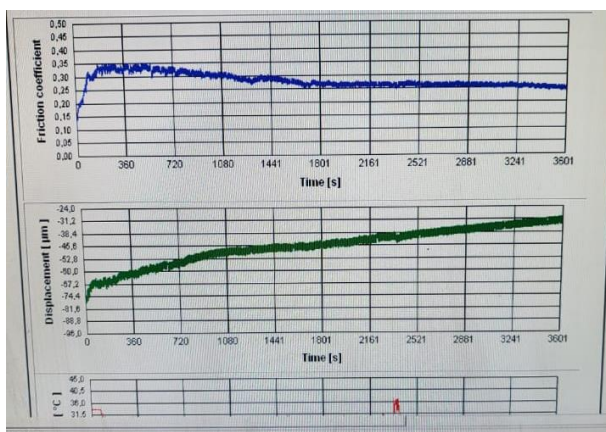


Рисунок 4.20 - Результаты испытания на трение для покрытия, обработанного шлифованием до $Ra = 1,6 \dots 1,4$ мкм, коэффициент трения $f=0,25$

Важно отметить, что коэффициент трения в паре «латунь-сталь» в условиях сухого трения составляет $0,15 \dots 0,25$. [75, 76]

Таким образом все образцы продемонстрировали достаточно хорошие результаты в условиях сухого трения. Композитное покрытие на основе меди и алюмооксидной керамики, сформированное газодинамическим напылением может быть рекомендовано для восстановления изношенных поверхностей латунных распределительных пластин (или цилиндрических блоков из медных сплавов), поскольку в паре трения со сталью в условиях сухого трения имеет коэффициент трения ниже ($f = 0,15$), чем коэффициент трения в паре латунь – сталь ($f = 0,15 \dots 0,25$), а также демонстрирует более высокую несущую способность, благодаря гетерогенной структуре, состоящей из пластичной медной матрицы с включениями частиц оксида алюминия, обладающей достаточно высокой микро твёрдостью по Виккерсу.

Для восстановления деталей, выполненных из сплавов на основе меди могут быть также рекомендованы медно-цинковые порошки, содержащие в своем составе оксид алюминия.

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения данной технологии составит около 1806000 руб.

4.4 Выводы по главе 4

1. Выявлены и проанализированы технические требования на изготовление аксиально-поршневых насосов, широко применяемых в гидроприводах карьерных экскаваторов. На основе анализа конструкции и условий их эксплуатации определены наиболее уязвимые узлы насоса – пара трения «блок цилиндров – распределительная пластина», требующие разработки предложений по повышению их эксплуатационных характеристик на этапе восстановительного ремонта.

2. Установлено, что несущую способность восстанавливаемых деталей узлов трения насоса определяют микротвердость H_m детали из более пластичного антифрикционного материала, параметры качества и микропрофиля поверхности детали из более твердого материала, а также соотношение прочности сцепления и предела текучести материала покрытия. Показано, что при всех равных прочих условиях несущую способность пары трения «блок цилиндров – распределительная пластина» возможно увеличить за счет повышения микротвердости и адгезионной прочности материала покрытия.

3. На основе проведения и обработки результатов экспериментальных исследований процесса формирования порошкового композитного покрытия на основе $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ рекомендуемого для упрочнения контактной поверхности распределительной пластины, установлены режимы холодного газодинамического напыления, при которых представляется возможным повысить микротвердость поверхности до 200-201 HV и тем самым увеличить несущую способность узла трения. Получены уравнения, адекватно описывающие связь микротвердости покрытия с режимами напыления-скоростью подачи порошка и температурой газового потока. В результате установлено, что максимальное значение микротвердости возможно получить при температуре 200-210 °C и подаче порошка в пределах 4..5 г/с

5. Выполнен анализ микроструктуры и трибологических характеристик композитного покрытия на основе меди. В результате трибологических испытаний установлено численное значение коэффициента трения для пары

«медное покрытие-стальной шар» в условиях сухого трения, которое составило $f=0,15$ для покрытия, обработанного шлифованием с последующим полированием до $Ra=0,2$ мкм. Таким образом, коэффициент трения для пары «покрытие-сталь» меньше, чем для пары «латунь-сталь», имеющей в базовом варианте ($f=0,15...0,25$). Это указывает на улучшение условий трения и при полученной более высокой микротвердости композитного покрытия подтверждает возможность применения предложенных решений для повышения ресурса сопряжения БЦ-РП. Экономические расчеты подтвердили эффективность предлагаемых решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОодЫ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны научно обоснованные технологические решения для ремонта оборудования горнорудных предприятий, обеспечивающие надежную защиту восстановленных сваркой и наплавкой элементов металлических конструкций карьерных экскаваторов от воздействия морской воды и повышение ресурса узлов трения гидропривода горных машин, что имеет важное значение для горнодобывающей промышленности СРВ

Основные научные результаты и выводы, полученные лично автором:

1. Установлено, что климатические условия СРВ, обусловленные высокой среднегодовой температурой воздуха и влажностью, а также наличием в атмосфере прибрежных районов агрессивных сред, в частности, паров морской воды, вызывают интенсивную коррозию несущих металлоконструкций и потерю работоспособности ответственных узлов карьерных экскаваторов, восстанавливаемых сваркой и наплавкой.

2. В результате анализа механизма и кинетики развития электрохимической коррозии под влиянием морской воды установлено, что в большей степени коррозии подвержены сварные соединения металлоконструкций вследствие наличия в местах стыка и зоны термического влияния различных структурных областей и переходных участков, характеризующихся неоднородностью свойств и разностью электрохимических потенциалов. Проявление эффекта Зеебека также усиливает развитие электрохимической коррозии в сварных швах, а наличие в морской атмосфере ионов хлора оказывает депассивирующее действие по отношению к металлической стальной поверхности, тем самым способствует ее разрушению.

3. В результате анализа применяемых методов защиты стальных поверхностей от коррозии обоснована целесообразность использования холодного газодинамического напыления для создания покрытий, устойчивых к

электрохимической коррозии как на стадии изготовления, так и при ремонте деталей, в том числе и в полевых условиях. При этом пористость формируемых покрытий варьируется в пределах 3,0-4,0%, что благотворно влияет на их защитные свойства. Обоснована целесообразность применения анодных покрытий на основе 50%Zn+50%Al₂O₃ и композиции 55Al+15%Zn+30%Al₂O₃.

4. При проведении коррозионных испытаний образцов без покрытий в морской воде установлено, что начальная скорость коррозии сварного образца из стали 25Х в 1,55 раза выше, чем у монолитного образца из аналогичного сплава, при этом в сварном соединении продукты коррозии появляются уже на 4-й день испытаний в виде ржавчины, которая располагается в околошовной зоне, т.е. в зоне термического влияния, непосредственно в углублениях, примыкающих к сварному шву. Это указывает на наличие здесь существенной разности потенциалов вследствие нестабильной структуры различных участков.

5. Установлено, что коррозия монолитного образца носит сплошной характер, т.е. продукты коррозии равномерно покрывают поверхность образца. Несколько иная картина наблюдается для сварного соединения – выявленная на начальном этапе испытаний местная коррозия в околошовной зоне распространилась по всей поверхности образца с существенным преобладанием толщины коррозионного слоя по сравнению с толщиной коррозионного слоя монолитного образца.

6. В результате проведения коррозионных испытаний образцов в морской воде установлено, что в течение первых 10 суток начальная скорость коррозии сварных образцов из стали 25Х без покрытий составляет $4,692 \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}} \right)$, пластин из стали 25Х без покрытия $3,022 \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}} \right)$, что существенно выше скорости коррозии образцов с покрытиями из порошков Al+ Zn+Al₂O₃ - $0,012 \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}} \right)$, и для покрытия Zn+Al₂O₃ - $0,685 \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}} \right)$. Вместе с тем выявлено, что с течением времени скорость коррозии на всех образцах снижается и к концу эксперимента стабилизируется.

7. Установлено, что минимальное значение линейного показателя коррозии имеет образец с алюмоцинковым покрытием, причем на протяжении всего времени испытаний. Суммарный глубинный показатель h_c этого покрытия составил 1,83 мкм за 60 суток испытаний. Чуть большее значение глубины коррозии, по сравнению с алюмоцинковым, имеет цинковое покрытие 3,56 мкм, но по сравнению со стальным образцом эта величина достаточно мала. Для стального монолитного образца глубинный показатель равен 13,4 мкм. Коэффициент эффективности анодной защиты покрытий $K_{э,а}$ для монолитного стального образца составляет 7...8, для сварного – 32...36.

8. Установлено, что алюмоцинковое покрытие сварных соединений надежно защищает стальную основу и сварной шов от коррозии при наличии на поверхности несплошностей в виде пор или повреждения покрытия, прежде всего, за счет появления гальванической пары «сталь – алюминий», в которой алюмоцинковое покрытие, будучи анодом, растворяется с образованием достаточно плотных коррозионных продуктов, запечатывающих несплошности и, тем самым, предотвращающих коррозию стали. Микротвердость по Виккерсу продуктов коррозии алюмоцинкового покрытия варьируется в пределах 210...340HV.

9. Определена целесообразность применения холодного газодинамического напыления для восстановления латунных распределительных пластин аксиально-поршневых насосов, используемых в гидроприводах карьерных экскаваторов. Напыление порошковых композиций на основе меди позволяет компенсировать утраченные вследствие износа формы и размеры детали, а также получить модифицированный поверхностный слой с высокими эксплуатационными характеристиками.

10. В результате обработки экспериментальных данных были определены рациональные условия напыления, при которых удалось достичь высокую микротвердость и минимальную шероховатость поверхности покрытия. Так, при температуре торможения газа $t = 200 - 210$ °C и скорости подачи порошка $S = 0,5$ г/с микротвердость покрытия составила 198...200 HV (при твердости исходного

материала распределительной пластины 165 HV); минимальная шероховатость $Ra = 2,8$ мкм была получена на режимах $t = 200 - 210$ °C и подаче $S = 0,4$ г/с, что при восстановлении позволяет сократить объемы механообработки и ограничиться отделочной обработкой. Высокое значение твердости покрытия обусловлено упрочнением медной матрицы в результате наклепа.

11. Сканирующей электронной микроскопией установлено, что композитное медное покрытие имеет плотную гетерогенную структуру, состоящую из медной пластичной матрицы с равномерно распределенными включениями частиц корунда до 31, 5% и прочность сцепления не ниже 30 МПа, что обеспечивает высокую эксплуатационную и несущую способность композитного слоя в условиях граничного трения. Трибологические испытания обработанного до $Ra = 0,2$ мкм покрытия по схеме «диск-стальной шар» позволили получить данные по коэффициенту трения, численное значение которого в условиях сухого трения составило $f = 0,15$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ажогин Ф.Ф. Коррозионное растрескивание и защита высокопрочных сталей. М.: Металлургия, 1974. 256 с.
2. Акимов Г.В., Теория и методы исследования коррозии металлов, изд. АН СССР, 1945,
3. Акимов, Георгий Владимирович. Теория и методы исследования коррозии металлов. Изд-во Акад. наук СССР, 1945
4. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. — М. Физматлит, 2010, 536 с.
5. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика: Справочное пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Машиностроение, 1971. - 670 с.
6. Башта Т.М. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем. Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1974. 606 с.
7. Богданов А. П., Гайнуллин А. А., Ефимов А. А., Левкович Р. В., Наумов Д. С., Окулов К. Ю. Дефекты металлоконструкции карьерных экскаваторов. Universum: Технические науки : электрон. научн. журн. Богданов А.П. [и др.]. 2015. № 11 (22). <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/2775>
8. Болотнев А. Ю. Повышение надежности базовых узлов металлоконструкций карьерных экскаваторов в условиях севера. Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. тех. наук. Иркутск, 2009 г. 18 с.
9. Веселы В. Защита стальных конструкций от коррозии путем металлизации алюминием // Защита металлов. 1973. Т. 1, № 1. С. 666–671.
10. Виноградов, Станислав Николаевич. Защита металлов от коррозии: учеб. пособие / С. Н. Виноградов, Г. Н. Мальцева ; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Пензенский гос. ун-т". - Пенза : Изд-во Пензенского гос. ун-та, 2006 (Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та). - 112, [2] с. : ил., табл.; 20 см.

11. Влияние фосфат-ионов на анодное растворение титана в серной кислоте / С. М. Русакова, И. Г. Горичев, А. Л. Ключев и др. // *Химическая технология*. — 2011. — Т. 12, № 3. — С. 179–184
12. Ву Нгок Ан. Разработка системы ремонта дорожных машин с учетом тропических условий и особенностей эксплуатации во Вьетнаме. Дисс. На соиск. уч. ст. к.т.н. Москва, 2023. 235 с.
13. Гинцберг, Семен Абрамович. Свойства кобальтовых и никелевых покрытий, полученных в хлоридных и сульфатных электролитах [Текст] / С. А. Гинцберг, А. Ф. Иванов, Г. В. Тюренков. - Москва : [б. и.], 1968.
14. Геращенко Д. А. Разработка технологического процесса нанесения покрытий методом «холодного» газодинамического напыления на основе армированных порошков системы $Al-Sn+Al_2O_3$. Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2015 . 172 с.
15. Глесстон С., Введение в электрохимию, ИИЛ, 1951.
16. Глинка Н.Л. Общая химия: учебное пособие / Н. Л. Глинка. - Москва: КноРус, 2016. – 746 с. ил.
17. Е.А. Кривоносова, С.Н. Акулова, А.В. Мышкина. К проблеме коррозионного разрушения сварных швов//Вестник ПНИПУ – 2017. – Т.19, №3- с. 114 – 138. DOI: 10.15593/2223-9877/2017.3.07
18. Жук Н. П. Курс коррозии и защиты металлов: Учебник/ Для металлург. специальностей вузов. - Москва: Металлургия, 1968. - 407 с.
19. Добрецов В.Б. Основные вопросы освоения минеральных ресурсов Мирового океана / В.Б. Добрецов, В.А. Рогалев / Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы. СПб, 2003. 524 с.
20. Занг Куок Кхань. Обоснование и выбор рациональных параметров гидрапривода карьерного гидравлического экскаватора с учетом условий эксплуатации во Вьетнаме. Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н., Москва, 2021. 173 с.

21. Исследования в области электрохимического и коррозионного поведения металлов и сплавов: Сборник работ / Под ред. чл.-кор. Акад. наук СССР Г. В. Акимова. - Москва : изд-во и тип. Оборонгиза, 1950. - 292 с., 6 л. ил.
22. Картер В. И. Металлические противокоррозионные покрытия. — Л.: Судостроение, 1980. 168 с.
23. Кантович Л.И., Гетопанов В.Н. Горные машины. Учебное пособие. М.: Недра, 1989. 304 с.: ил.
24. Каширин А. И., Шкодкин А. В. Газодинамическое напыление металлических покрытий — возникновение метода и его современное состояние. — Упрочняющие технологии и покрытия. 2007, № 12(36), с. 22-33.
25. Коррозия. Справочник. — М.: Металлургия, 1981. 632 с.
26. Коррозионная стойкость оборудования химических производств. Нефтеперерабатывающая промышленность : справ. руководство / под ред. А. М. Сухотина, Ю. И. Арчакова. — Л. : Химия, 1990. — 400 с.
27. Керопян А.М. Методика определения фактической площади контакта с рельсом тяговых колес железнодорожного транспорта// Горный журнал. 2021, №9
28. Коррозия и защита металлов от коррозии [Текст] : учебное пособие для студентов технических специальностей / Ю. П. Перелыгин, И. С. Лось, С. Ю. Киреев ; М-во образования и науки РФ, Федеральное гос. бюджет. образоват. учреждение высшего. проф. образования "Пензенский гос. ун-т" (ПГУ). - Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. - 81, [2] с. : ил., табл.; 21 см.; ISBN 978-5-94170-493-4
29. Козловская А. П., Нгуен Суан Хынг, Нгуен Тхэ Винь. Исследование причин отказов трубопроводов промышленного оборудования/ «Решение задач проектирования современного технологического оборудования»: Сборник научных трудов кафедры технологических машин и мехатронных систем. — М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2022. — с. 31-37.

30. Коррозия и защита оборудования от коррозии, Мальцева Г. Н. Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000
31. Коррозия металлов, под ред. В.В. Скорчеллетти, кн. 1 и 2. Госхимиздат, 1952.
32. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. - 528 с.: ил.
33. Лабутин, Александр Лукич. Коррозия и способы защиты оборудования в производстве органических кислот и их производных [Текст] / Под ред. Г. В. Сагалаева. - Москва : Госхимиздат, 1959. - 186 с.
34. Ларионов В.П. Новые подходы к разработке современных технологий сварки и нанесения покрытий для обеспечения эксплуатационной надежности металлоконструкций и изделий, эксплуатируемых в условиях Сибири и Крайнего Севера / Ларионов В.П., Слепцов О.Е., Сараев Ю.Н., Безбородов В.П. // Вестник академии военных наук. - 2008. - № 3. С. 67.
35. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. учебник для высших технических учебных заведений. – 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение – 1990. - 528 с.: ил.
36. Ле Дук То. Фундаментальные проблемы. В: Южно-Китайское море. Ханой: Издательство естественные науки и технологии; 2009. Т. 1. 3. Май Тхань Тан. Геология и геофизика. В: Южно-Китайское море. Ханой: Издательство Ханойского национального университета; 2003. Т. 3.
37. Лучкин Р. С. Прочность и надежность паяных конструкций [Электронный ресурс]: электронное учебное пособие / Р. С. Лучкин. Тольятти: Тольяттинский гос. ун-т, сор. 2014. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM)
38. Мальцева Г. Н. Под редакцией д. т. н., профессора С. Н. Виноградова. Коррозия и защита оборудования от коррозии: Учеб. пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000. - с.: 55 ил., 20 табл., библиогр. 11 назв.

39. Материаловедение и термическая обработка металлов и сплавов / Б. А. Колачев [и др.]. – М. : Металлургия, 1981. – 416 с.
40. Махно Д.Е. Эксплуатация и ремонт карьерных экскаваторов в условиях севера. – М.: Недра, 1984. – 133 с.
41. Мнацаканян В. У., Нго Ву Нгуэн, Нгуен Тхэ Винь, Нгуен Суан Хынг. Достижение требуемой точности соединения цилиндр-поршень при ремонте гидростоек механизированных крепей // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5 (S4). — С. 3–11. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_4_3.
42. Нго Ву Нгуэн, Нго Ван Туан, Нгуен Тхэ Винь, Нгуен Суан Хынг. Обоснование метода восстановления работоспособности штоков гидростоек крепей очистных забоев. // ТГиСМ НиП. - 2022. - №16 - с.146-154. DOI 10.26160/2658-3305-2022-16-146-154.
43. Нгуен Суан Хынг, Нго Ву Нгуэн, Нгуен Тхэ Винь. Ресурсосберегающие технологии восстановления работоспособности горного оборудования. Сборник трудов XIII Международной научной-практической конференции «Инновационные технологии в машиностроении»/ Юргинский технологический институт. - Томск : Изд-во томского политехнического университета, 2022. – с.106 – 109.
44. Нгуен Суан Хынг, Новикова А.Д., Мнацаканян В.У. Повышение ресурса горного оборудования за счет применения защитных покрытий// Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – №19. – С. 185-189.
45. Новикова А.Д., Нгуен Суан Хынг, Козловская А.П. Повышение ресурса быстроизнашиваемых элементов насосного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. - №3 (специальный выпуск 8). – С. 3-12. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_3_8_3.
46. Основы электрохимической коррозии металлов и сплавов: учеб. пособие / Л.Г. Петрова, Г.Ю. Тимофеева, П.Е. Демин, А.В. Косачев; под общ. ред. Г.Ю. Тимофеевой. – М.: МАДИ, 2016. – 148 с.

47. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т1. М.: Металлургия, 1968. - с. 695.
48. Перспективный план развития добычи типов твёрдых полезных ископаемых промышленности Вьетнама до 2020 года и видение до 2035 года. «Правительственный Вьетнам». Ханой, 2016. - 275с.
49. Перспективный план развития угольной промышленности Вьетнама до 2020 года и видение до 2030 года. «Правительственный Вьетнам». Ханой, 2016. - 118с.
50. Подерни Р.Ю. Механическое оборудование карьеров. Учебник для вузов. М.: МГГУ, 2007. – 689 с.
51. Петецкий В. Н. Теория сварочных процессов: учеб. пособие / В. Н. Петецкий, С. А. Готовко; Краснояр. гос. техн. ун-т. - Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. - 140 с,
52. Рахутин М.Г., Занг Куок Кхань, Кривенко А.Е., Ван Хиеп Чан. Оценка влияния температуры рабочей жидкости на потери мощности карьерного гидравлического экскаватора. // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 374-383.
53. Рахутин М.Г., Ван Хиеп Чан, Ле Ван Лой. Обоснование оптимальных наработок основных насосов карьерного гидравлического экскаватора. // Горная промышленность № 2(174) 2024. с. 116-121
54. Ровках, С.Е. Техническое обслуживание и ремонт строительной техники. Справочник / С.Е. Ровках [и др.]. - Москва, 1986.-275 с.
55. Русихин В.И., Эксплуатация и ремонт механического оборудования карьеров. Учебник для вузов. М.: Недра, 1982. 214 с.
56. Севагин С.В., Вержанский А.П.. Обеспечение требуемого качества изготовления штоков гидроцилиндров погрузочно-доставочных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал).- 2021.-№5.- с. 35-44.
57. Семенова, И. В. Коррозия и защита от коррозии/Семенова И. В. , Флорианович Г. М. , Хорошилов А. В. ; Под ред. И. В. Семеновой. - 3-е

- изд. перераб. и доп. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. - 416 с. - ISBN 978-5-9221-1234-5. - Текст: электронный // ЭБС "Консультант студента": - URL
58. Семёнова И. В. Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семёнова, А. В. Хорошилов, Г. М. Флорианович. – М. : Физматлит, 2006. – 376 с.
59. Сенин А. П. Исследование работоспособности и разработка технологических рекомендаций по ремонту объемного гидропривода ГСТ-90 / Ф. Х. Бурумкулов, П. А. Ионов, Д. А. Галин, А. М. Земсков // Труды ГОСНИТИ. – 2011. – Т. 107, часть 1. – С. 78–86.
60. Сенин А. П. Новая технология ремонта аксиально-поршневых гидромашин / Ф. Х. Бурумкулов, П. А. Ионов, А. В. Столяров // Тракторы и сельхозмашины. – 2012. – № 9. С. 50–53.
61. Сенин А. П. Технология ремонта регулируемых аксиально-поршневых гидромашин восстановлением ресурсолимитирующих соединений. Автореф. дисс. на соис. уч. ст. канд. техн. наук. Саранск, 2012. 18 с.
62. Справочник. Восстановление деталей машин. Под. ред В.П.Иванова М.: Маш-2003, 620.
63. Солод Г.И., Морозов В.И., Русихин В.И. Технология машиностроения и ремонта горных машин. М.: Недра, 1988. 421 с.
64. Скрыбин В.А., Борискин В.П. и др. Ремонт технологических машин и оборудования. Учебное пособие., 2014 г.
65. Стеклов О.И. Прочность сварных конструкций в агрессивных средах. М.: Машиностроение. 1976. – 200 с.
66. Столбов А. А., Папырин А. Н., Шпитальник Д. Л. и др. Разработка технологии нанесения алюминиевых покрытий на наружную поверхность труб 60–114 мм по способу газодинамического напыления // Отчет ВОИР, Новосибирск, 1989.
67. Справочник по сварке под ред. А.И. Акулова. Т.4. М.: Машиностроение, 1971.- с.416

- 68.Строительный кодекс Вьетнама Природно-физические и климатические данные для строительства. «Министерство строительства». Ханой, 2009. - 324с.
- 69.Тан Ф. В. Климат Вьетнама. «Естественно-научные вузы». Ханой, 2015. - 138с.
- 70.Титиевский Е.М., Щербань И.Е. Ремонт карьерных экскаваторов. – М.: Недра, 1992. – 238 с.
- 71.Терюшева С.А., Веревкин В.И., Лакеев С.А., Фадеев А.В., Коберник М.В., Нагаева К.Ю., Судницын А.А. Исследование электрохимической коррозии сварных швов// Вестник молодежной науки. Калининградский государственный технический университет.№3(5). 2016
- 72.Терюшева С.А., Веревкин В.И., Игушев В.Ф., Панца В., Ратникова П.А., Мищенко Е.А. Оценка численных значений скоростей коррозии судовых металлоконструкций из стали // Материалы XVI международной научно-практической конференции «Наука в современном информационном обществе». North Charleston, USA, 13–14 августа 2018 года. С. 83-87.
- 73.Томашов Н.Д. , Доклады АН СССР, номер 7, 615, 1941.
- 74.Томашов Н.Д., Матвеева Т.В., Исследования по коррозии металлов,1, (АН СССР, «Труды ИФХ», вып. 2, 146, изд. АН СССР,195.
- 75.Томашов Н.Д.,Коррозия металлов с кислородной деполяризацией, изд.АН СССР, 1947.
- 76.Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. Кн.2./Под ред. И. В. Крагельского, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, Кн.1. 1978. – 400 с., ил.
- 77.Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн. Кн.2./Под ред. И. В. Крагельского и В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с., ил.
- 78.Химическое сопротивление материалов и защита от коррозии: учебное пособие. Часть II / Г.Ф. Нафиков, Э.Г. Гарайшина. Нижнекамск

- Нижекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2012. - 88 с.
- 79.Хорн, Р. Морская химия: Структура воды и химия гидросферы. - Москва: Мир, 1972. - 398 с. ил.
- 80.Шехтман В.Ш., Веденеева М.А., Жук Н.П., «Журн.физмисии», 28, 2199, 1954.
- 81.Шикалов В.С., Клинков С.В., Косарев В.Ф. Холодное газодинамическое напыление алюминиевого покрытия на эрозионно нестойкий материал// Теплофизика и аэромеханика, 2019, том 26, № 5. с.779-787
- 82.Электродные процессы: Избр. тр. / А. Н. Фрумкин; Отв. ред. Б. П. Никольский; [АН СССР, Ин-т электрохимии им. А. Н. Фрумкина]. - Москва : Наука, 1987.
- 83.Юнгмейстер Д.А. Обоснование типов глубоководной техники для добычи морских железомарганцевых конкреций / Д.А. Юнгмейстер, С.М. Сударииков, К.А. Киреев // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 88-95. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.88
- 84.Ю. П. Перелыгин, И. С. Лось, С. Ю. Киреев. Коррозия и защита металлов от коррозии : учеб. пособие для студентов технических специальностей / Ю. П. Перелыгин, И. С. Лось, С. Ю. Киреев. – 2-е изд., доп. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. – 88 с.
- 85.ASM Corrosion Handbook, Vol.13A - Corrosion: Fundamentants, Testing, and Protection, Ed. Stephen D. Cramer and Bernard S. Covono, Jr, ASM International 2003.
- 86.Christofer Leygraf, Thomas Graedel - Atmospheric corrosion, A John Wiley and Sons, Inc., Publication, 2000
- 87.Cường độ bức xạ năng lượng mặt trời tại các khu vực Việt Nam. Nguồn truy cập: <https://solarpower.vn/cuong-do-buc-xa-nang-luong-mat-troi-tai-cac-khu-vuc-viet-nam/> <https://solarpower.vn/cuong-do-buc-xa-nang-luong-mat-troi-tai-cac-khu-vuc-viet-nam/> (ngày truy cập: 25.06.2018).

- 88.L. Thị Hồng Liên, “ĂN MÒN VÀ PHÁ HỦY VẬT LIỆU KIM LOẠI TRONG MÔI TRƯỜNG KHÍ QUYỀN NHIỆT ĐỐI VIỆT NAM”, Vietnam J. Sci. Technol., vol. 50, no. 6, p. 795, Apr. 2017.
- 89.Rez a Javaherdashti - How corrosion affects industry and life, Anti-Corrosion Methods and Materials 47 (1) (2000) 30 - 34.
- 90.Số liệu thống kê - Tổng cục thống kê Việt Nam 2017. Nguồn truy cập: <https://www.gso.gov.vn/default.aspx?tabid=713> (дата обращения: 25.06.2018).
- 91.Số liệu thử nghiệm qua các thời kỳ của Viện khoa học vật liệu// [bhttps://moc.gov.vn/vn/tin-tuc/1173/66542/nghiem-thu-cac-de-tai-khoa-hoc-cong-nghe-cua-vien-vat-lieu-xay-dung.aspx](https://moc.gov.vn/vn/tin-tuc/1173/66542/nghiem-thu-cac-de-tai-khoa-hoc-cong-nghe-cua-vien-vat-lieu-xay-dung.aspx) (дата обращения: 20.01.2021)
- 92.Ngo Chan Thien Quy, Kirichenko Yu. V. Mineral Potential of Subsea Deposits in Vietnamese Part of South China Sea. Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry. 2020;(1):140–143. (In Russ.) DOI 10.30686/1609-9192-2020-1-140-143.
- 93.Assadi H., Gaertner F., Stoltenhoff T., Kreye H. Bonding mechanism in cold spraying // Acta Materiala. 2003. V. 51, Issues 15, September, P. 4379–4394.
- 94.Grujicic M., Zhao C. L., DeRosset W. S., Helfricht D. Adiabatic shear instability based mechanism for particle/substrate bonding in the cold-gas dynamic-spray process // Materials and Design. V. 25, Issue 8, December 2004, p. 681–688
- 95.Wright T. W. Shear band susceptibility:work hardening materials // Int. J. Plasticity. 1992. V. 8(2). P. 583–602.
- 96.Wright T. W. Toward a defect invariant basis for susceptibility to adiabatic shear bands // Mech. Mater. 1994. V. 17(1). P. 215–22.



INSTITUTE OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY
 № 3 Phan Dinh Giot Str., Phuong Liet, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam
 Tel: +84.4.38642024 - Fax: +84.4.38641564
 Web: <http://imsat.vn> Email: imsat@vkhcnm.com.vn

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директор Ханойского Института

Горной Науки и Технологий

Д-р. Тхань Ван Туан

VIỆN
 KHOA HỌC
 CÔNG NGHỆ
 VINACOMIN
 22/04/2024 г. Ханой

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы Нгуена Суана Хынга на тему: «Обоснование метода повышения ресурса восстанавливаемых узлов и деталей карьерных экскаваторов в условиях Социалистической Республики Вьетнам», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, выполненной в Университете науки и технологий МИСИС

(г. Москва, Россия)

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты диссертационной работы аспиранта кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения Горного института Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» Нгуена Суана Хынга имеют большое научное и практическое значение. Разработанные в диссертации технологические рекомендации по защите от электрохимической коррозии восстановленных сваркой и наплавкой металлоконструкций карьерных экскаваторов и восстановлению элементов аксиально-поршневых насосов, представляющие большой научно-практический интерес, рассмотрены на Ученом совете Ханойского Института Горной Науки и технологий (ХИГНТ) и приняты к использованию в учебном процессе при подготовке специалистов в области проектирования, технического обслуживания и ремонта современной горной техники и разработке технологии восстановления насосного оборудования.



Утверждаю

Генеральный директор
ООО «НПЦПодземмаш», к.т.н.

Д.Я. Соловых

« 18 » апреля 2024 г.

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы *Нгуена Суана Хынга* на тему: «Обоснование метода повышения ресурса восстанавливаемых узлов и деталей карьерных экскаваторов в условиях Социалистической Республики Вьетнам», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящей справкой подтверждаем, что результаты диссертационной работы Нгуена Суана Хынга «Обоснование метода повышения ресурса восстанавливаемых узлов и деталей карьерных экскаваторов в условиях Социалистической Республики Вьетнам» актуальны и имеют большое практическое значение.

Особый интерес представляют эффективные технологические предложения по защите элементов сварных металлоконструкций от развития в них электрохимической коррозии под влиянием морской атмосферы, что обеспечивается формированием на сварных швах плотных коррозионностойких покрытий. Также являются полезными технологические рекомендации по восстановлению и упрочнению деталей пар трения аксально-поршневых насосов, изготовленных из антифрикционных сплавов на основе меди.

Результаты проведенной работы способствуют решению важных научно-практических задач в области совершенствования ремонта карьерных экскаваторов, широкой номенклатуры механического оборудования горных предприятий, а также могут быть использованы при проектировании и создании передовой техники для освоения морских месторождений твердых полезных ископаемых.

Результаты диссертационной работы Нгуена Суана Хынга успешно апробированы и приняты к использованию в ООО «НПЦПодземмаш».

Инженер-конструктор

Серебренников Н.Е.