

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

**Нгуен Суан Хынг**

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

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Москва, 2024

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** 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.

**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  $310-360\text{ }^\circ\text{C}$  со скоростью подачи порошка  $0,8...1,0\text{ г/с}$ , 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  $198...200\text{ HV}$ , 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.

Автор выражает искреннюю благодарность научному сотруднику НИЦ «Конструкционные керамические наноматериалы» НИТУ МИСИС Суворовой Веронике, заведующему лабораторией «Гибридные наноструктурные материалы» Комиссарову А.А. и сотруднику лаборатории Тену Денису за оказанную помощь в проведении металлографических исследований.

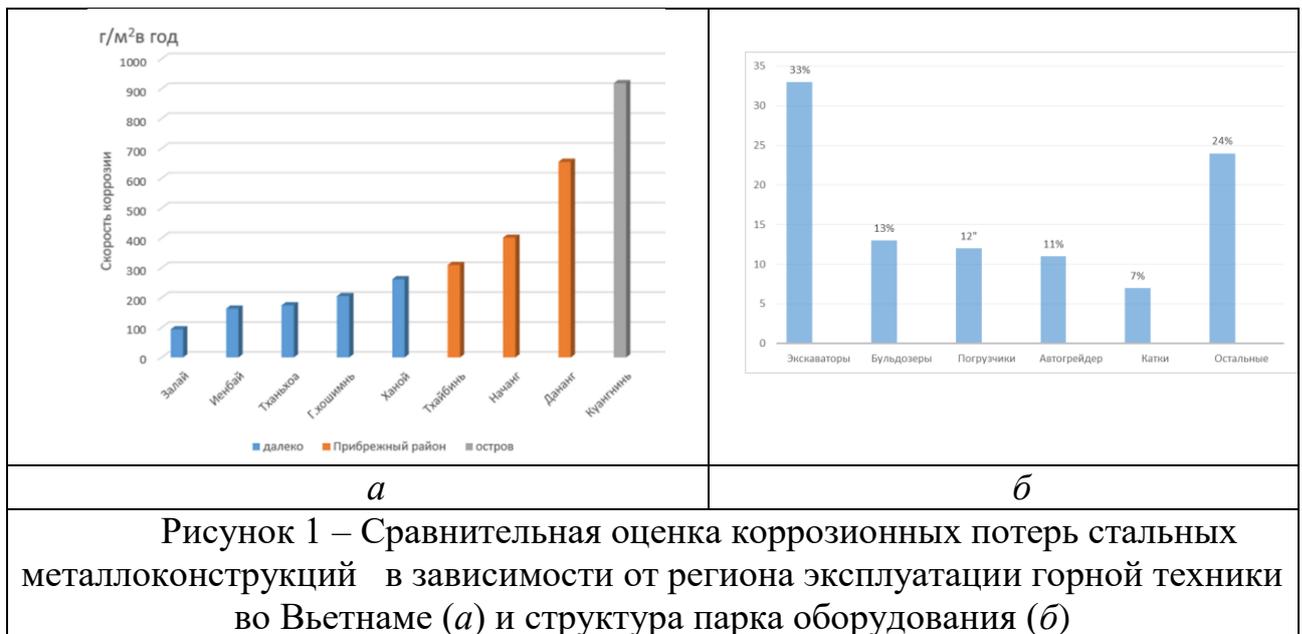
## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* дано обоснование актуальности тематики работы, сформулированы цель и задачи научного исследования, обозначены положения, выносимые на защиту и практическое значение работы.

В *первой главе* проанализированы география месторождений и темпы роста добычи твердых полезных ископаемых в СРВ. Описаны горно-геологические и климатические особенности добывающих регионов и прибрежных районов, оказывающих существенное влияние на работоспособность применяемого горного оборудования. Особое внимание уделено задаче повышения эффективности ремонта карьерных гусеничных экскаваторов при восстановлении элементов несущих металлоконструкций, сваркой и наплавкой. Показана необходимость дополнительной антикоррозионной защиты восстановленных сваркой участков, стремительно корродирующих под воздействием морской атмосферы. Приведены статистические данные по потерям металла в результате электрохимической коррозии (рис.1), основные направления и методы борьбы с нею, а также структура парка используемого оборудования.

Отмечен важнейший параметр, характеризующий особенности тропического климата во Вьетнаме - время сохранения влаги на поверхности металлических конструкций (TOW), значение которого варьируется в пределах 4000-6000 ч/год, что составляет примерно 45-75% времени года.

Освещены вопросы, связанные с сокращением расходов на закупку запасных частей гидропривода экскаваторов, в частности, аксиально-поршневых насосов, за счет развития технологий восстановительного ремонта деталей, изготовленных из цветных металлов и сплавов.



Проанализированы основные труды вьетнамских, советских, российских и зарубежных исследователей, посвященных вопросам защиты от коррозии и износа деталей горных машин. С учетом специфики климатических условий, организационных форм и технологического оснащения ремонтных баз горно-рудных предприятий Вьетнама обоснована целесообразность разработки эффективных предложений по защите восстановленных сваркой металлоконструкций карьерных экскаваторов от морской коррозии, а также разработки технологии восстановления деталей аксиально-поршневых насосов с применением прогрессивных процессов создания функциональных покрытий.

*Во второй главе* диссертации исследованы основные причины, механизмы и кинетика развития коррозионных процессов в стальных сварных конструкциях под воздействием различных агрессивных сред, в том числе морской. Выявлены основные способы защиты соединений от воздействия морской воды, приемлемые для применения в ремонтном производстве, обоснованы способ создания защитного слоя и материалы покрытий, предотвращающие развитие электрохимической коррозии в сварных металлоконструкциях.

На основе выполненного анализа установлено, что склонность сварных конструкций к разрушениям ( $K$ ) в агрессивных средах обусловлена рядом факторов, из которых определяющее влияние оказывают свойства материала конструкции  $M$ , напряженное состояние сварного соединения  $H$ , вид и свойства агрессивной среды  $C$ :

$$\bar{M} + \bar{H} + \bar{C} \rightarrow \bar{K} \quad (1)$$

При этом характер и механика разрушения зависят от: интенсивности, знака и цикличности напряжений первого  $\sigma_I$  и второго  $\sigma_{II}$  рода, запаса и концентрации потенциальной энергии первого  $W_I$  и второго  $W_{II}$  рода; 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; химического состава  $C_x$ , температурой и продолжительностью воздействия, а также характером контактирования сварного соединения со средой  $C_B$ :

$$K \leftarrow \begin{cases} H = f(\sigma_{I,II}, W_{I,II}) \\ M = f(M_{и}, M_{т}) \\ C = f(C_x, C_B) \end{cases} \quad (2)$$

Выявлены параметры, характеризующие термодинамическую неустойчивость металла, и условия самопроизвольного протекания коррозионного процесса:

$$\begin{aligned} \Delta S > 0, \quad S \rightarrow \max \\ \Delta G < 0, \quad G \rightarrow \min, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $S$  - энтропия системы и  $G$  - изобарно-изотермический потенциал Гиббса.

В случае электрохимической коррозии мерой химического сродства и степени термодинамической неустойчивости является электрохимический (электродный) потенциал  $\varphi$  металла в данной коррозионной среде, при этом, чем отрицательнее потенциал металла, тем более он термодинамически неустойчив и склонен к коррозии. Связь между потенциалом Гиббса  $G$  и электрохимическим потенциалом  $\varphi$  описывается выражением:

$$\Delta G = -n\Delta\varphi F = -n[(\varphi_{к})_{обр} - (\varphi_{а})_{обр}]F \quad (4)$$

где  $\Delta G$  - изменение изобарно-изотермического потенциала коррозионного процесса;  $n$  - число грамм-эквивалентов вещества;  $F$  - число Фарадея,  $(\varphi_{к})_{обр}$  - обратимый потенциал катодной реакции в данных условиях;  $(\varphi_{а})_{обр}$  - обратимый потенциал анодной реакции в данных условиях;  $\Delta\varphi = (\varphi_{к})_{обр} - (\varphi_{а})_{обр}$ ,

Из выражения (4) следует, что самопроизвольная электрохимическая коррозия возможна при условии  $(\varphi_{а})_{обр} < (\varphi_{к})_{обр}$ . Соответственно, степень электрохимической неустойчивости определится выражением:

$$\Delta\varphi = -\frac{\Delta G}{nF} \quad (5)$$

При этом сварное соединение предлагается рассматривать как сложную многоэлектродную систему с учетом образования при сварке различных структурных зон вблизи сварного шва (зоны термического влияния-з.т.в.), наличия неоднородного напряженного состояния и проявления эффекта Зеебека (рис. 2). Последнее обусловлено возникновением термоэлектродвижущей силы между сваренными элементами, пребывающими в агрессивной морской среде, которая обладает хорошей электропроводимостью. Различие химических составов восстанавливаемых сваркой элементов, а также разница температур на поверхности деталей, контактирующих с морской водой (или ее парами), и по глубине сварного соединения, приводит к появлению своего рода термопары,

активирующей коррозионный процесс в околошовной зоне. Использование для соединения металлоконструкций горных машин преимущественно различных видов термической сварки, например, таких наиболее распространённых как ручная электродуговая или в среде защитных газов, усиливает данный эффект, поэтому скорость коррозии сварных соединений в несколько раз превышает аналогичный показатель для монолитных конструкций.

Процесс электрохимической коррозии усугубляется наличием в сварном соединении газовых пор, что также способствует активному местному разрушению металла.

Агрессивное воздействие морской воды на сталь обусловлено прежде всего присутствием в среде ионов хлора  $\text{Cl}^-$ , обладающих депассивирующим эффектом (рис. 2, б). Выявлены основные уравнения, описывающие химические реакции, протекающие в стали в присутствии морской воды, показатели электрохимической коррозии и аналитические зависимости, устанавливающие связь между скоростью и глубиной коррозии монолитных конструкций под влиянием различных внешних факторов.

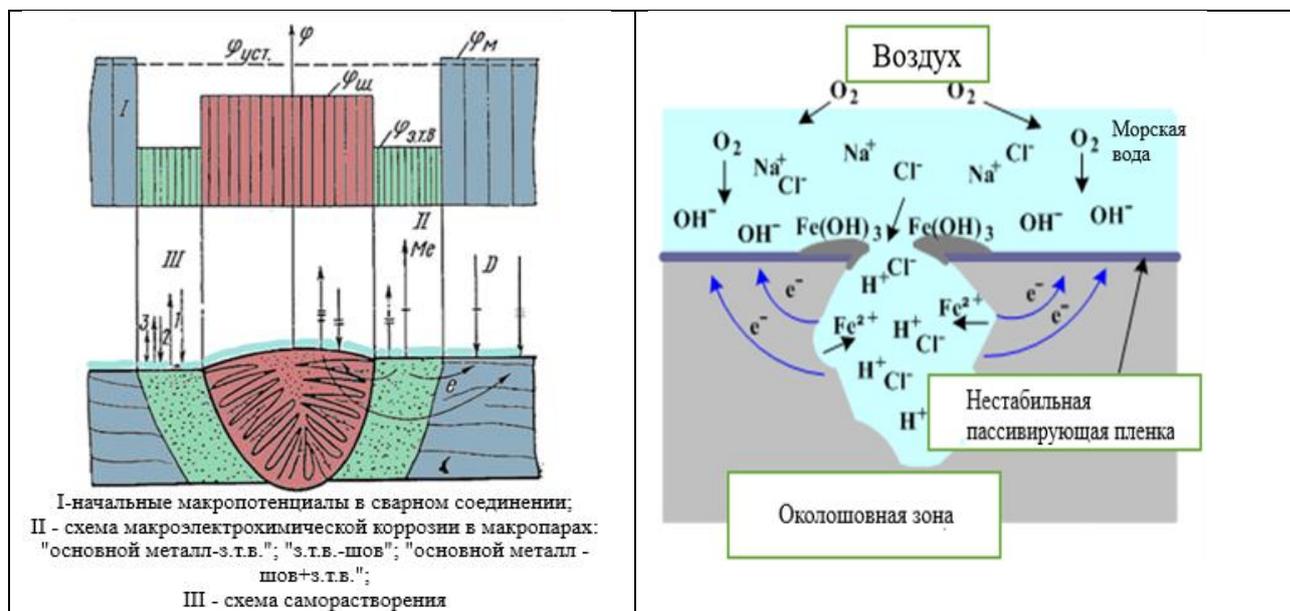


Рисунок 2 – Схема электрохимической коррозии сварного соединения: *а* – сварное соединение как многоэлектродная система; *б* – схема протекания окислительно-восстановительных ионных реакций на поверхности стали вблизи неоднородного сварного шва при взаимодействии с морской средой.  $\varphi_{ш}$ ,  $\varphi_{з.т.в.}$ ,  $\varphi_{м}$  – электродный потенциал шва, зоны термического влияния и основного материала;  $\varphi_{уст.}$  – установившийся стационарный потенциал заполяризованной системы «шов-з.т.в.-основной металл»; 1 – гетерогенный механизм электрохимической коррозии; 2 – гомогенный механизм электрохимической коррозии; 3 – химическая коррозия.

При коррозии по макрохимическому 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 макрогальванического элемента «основной металл – сварное соединение» коррозионный ток определяется выражением

$$I_{\text{кор}} = F_c i_c = F_M i_M, \quad (6)$$

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, что требует оперативного решения по их локальной защите в агрессивных средах.

Рассмотрены различные механизмы борьбы с электрохимической коррозией, заключающиеся в создании защитных, преимущественно металлических, покрытий, устойчивых к воздействию морской воды. Их подразделяют на катодные и анодные. Первые (Cu, Ni, Au, Ag, и др.) имеют значения потенциалов более положительные в агрессивной среде, осуществляют надежную защиту стали, но вместе с тем при нарушении целостности покрытий способствуют образованию гальванического элемента, где анодом служит основной металл, который начинает растворяться, а на покрытии-катоде происходит восстановление водорода.

Анодные покрытия (к примеру, на основе Zn, Cd, Al) являются более предпочтительными, так как они менее чувствительны к нарушению сплошности. В этом случае представляется важным правильно определить толщину анодного покрытия для обеспечения надежной защиты сварного соединения в течение межремонтного периода эксплуатации. Для этого должны быть известны такие параметры как скорость коррозии  $K$  анодного покрытия и линейный показатель коррозии  $h_c$ , определяемые экспериментальным путем, так как расчетными методами оценить их точно не представляется возможным.

Скорость электрохимической коррозии пропорциональна анодной плотности тока  $i_A$  растворения металла, связанной с гравиметрическим показателем скорости  $K$  (г/м<sup>2</sup>·ч) соотношением:

$$i_A = \frac{K}{q_{Me}} \text{ (А/м}^2\text{)}, \quad (7)$$

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.

При сравнении различных способов нанесения защитных покрытий выявлены несомненные достоинства метода холодного газодинамического напыления, сущность которого заключается в формировании покрытий с помощью высокоскоростного потока порошковых частиц металла, находящихся

в твердом состоянии. Колоссальная кинетическая энергия твердых частиц, движущихся со сверхзвуковой скоростью, приводит к их высокоскоростной деформации при столкновении с подложкой и образованию прочных адгезионных связей, при этом пористость покрытий не превышает 3%, что весьма существенно для защиты сварных швов.

ХГН-процесс достаточно легко реализовать в ремонтном производстве, особенно при локальном ремонте. Он хорошо совмещается с процессом наплавки или сварки и может быть применен в полевых условиях

**В третьей главе** на основании проведенных экспериментальных исследований установлены составы покрытий, в большей степени обеспечивающих защиту стальных металлоконструкций, эксплуатируемых в контакте с морской водой. Представлена методика проведения эксперимента, условия подготовки образцов и рациональные параметры напыления покрытий, обеспечивающие минимальную пористость покрытий и достаточный уровень прочности сцепления с основой.

Для выявления антикоррозионных свойств покрытий, рекомендуемых для защиты элементов горного оборудования от морской воды, были подготовлены образцы из низколегированной стали 25Х и среднеуглеродистой стали 40 в виде пластин. Одна группа образцов оставалась без покрытий, тогда как на вторую и третью – были нанесены покрытия на основе порошковых композиций следующих составов: 50%Zn+50%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 55%Al+15%Zn+30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (вес.). Выбор материалов покрытий обусловлен их приемлемой стоимостью, а также необходимостью получения достоверной информации о степени защиты ими сварных швов от морской коррозии.

Верхняя и нижняя поверхности образцов обрабатывались шлифованием. Образцы покрывались защитным покрытием полностью со всех сторон (рис. 3, а). Толщина покрытий составляла 0,3...0,4 мм. В эксперименте также принимали участие сварные образцы из стали 25 Х (имитация наплавки) (рис. б) при этом сварной шов формировался методом аргонно-дуговой сварки. Еще одну группу составляли образцы из стали 40Х, наполовину покрытые алюмоцинковым покрытием.



Наличие оксида алюминия в составе покрытий обусловлено спецификой процесса холодного газодинамического напыления для улучшения условий подачи порошка в сопловое устройство.

На рис. 4 представлено оборудование, использованное для предварительной подготовки стальных образцов и напыления покрытий

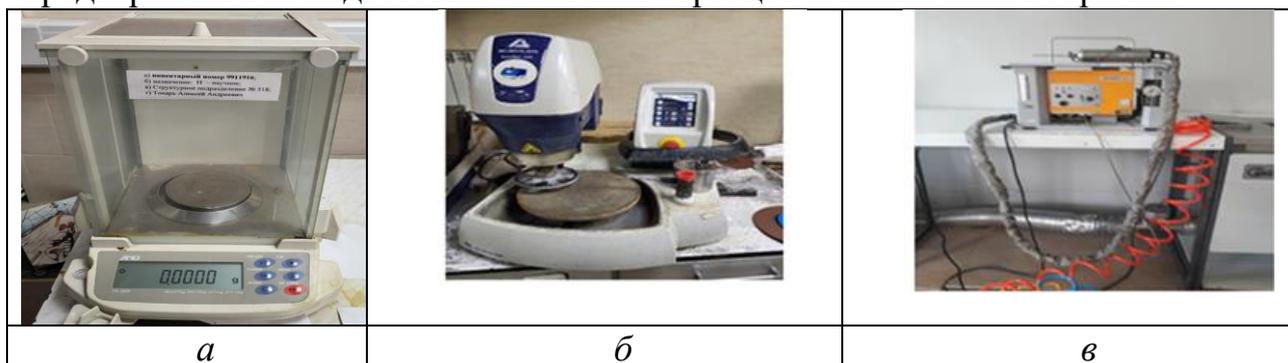


Рисунок 4 – Оборудование и аппаратура, используемые для подготовки и контроля экспериментальных образцов: *а* – аналитические весы; *б* – станок модели Buehler AutoMet™250 для шлифования поверхностей образцов под напыление покрытий; *в* - устройство «Димет-405», с помощью которого производилось напыление покрытий

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 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  $400-С$ , на втором -  $310-360^0 С$ . При этом прочность сцепления составляла не менее  $0$  МПа, а пористость в пределах  $3,0...3,5\%$ . При нанесении покрытия с температурой торможения газового потока в пределах  $310-360^0 С$  пористость на поверхности образцов не наблюдалась, шероховатость покрытий  $Ra$  находилась в пределах  $3,6..5,0$  мкм (рис.5)

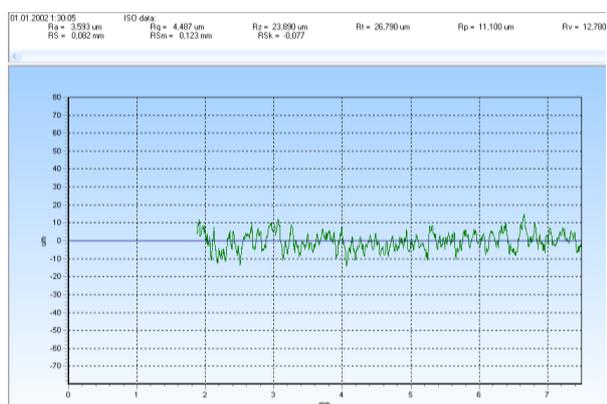


Рисунок 5 - Шероховатость поверхности образца с покрытием на основе композиции  $55\%Al+15\%Zn+30\%Al_2O_3$  ,  $Ra=3,6$  мкм

Перед проведением эксперимента все образцы взвешивали на аналитических весах с точностью до  $0,001$  г, после чего для ускорения процесса их помещали в стеклянные емкости с раствором морской соли ( $NaCl$ ) с

периодическим погружением. Концентрация раствора соли соответствовала ее среднему содержанию в морской воде Южно-Китайского моря и составляла 32-воздуха 27-28<sup>0</sup>С, температура солевого раствора составляла 24-25<sup>0</sup>С. Таким образом, условия эксперимента были приближены к условиям тропического климата Вьетнама. Продолжительность эксперимента - 60 суток.

Через каждые 10 суток образцы вынимали из раствора, промывали, очищали от продуктов коррозии, просушивали феном и повторно взвешивали на аналитических весах.

С

к

о

р

где  $\Delta m$  – изменение массы образца, г;

$S$  – площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – продолжительность воздействия коррозионной среды на образец, сут.

В 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

о

з

и

и

С учетом пористости покрытий плотность алюмоцинкового и цинкового покрытий принимали равными 3,38г/см<sup>3</sup> и 5,05 г/см<sup>3</sup>, соответственно, а плотность стали 7,8 г/см<sup>3</sup>.

Результаты экспериментов представлены на рис. 6-9.

Фото пластин в солевом растворе по истечении 10 суток при максимальной скорости коррозии представлено на рис. 6.

Анализ результатов эксперимента с пластинами, выдержанными в морской воде, показал, что скорость коррозии не является постоянной величиной (рис. 6). Были выявлены следующие закономерности. В первые 10 суток скорости коррозии у всех образцов – как с покрытиями, так и стального образца без покрытия, достигали максимальных значений. Для стального образца она составляет 3,022 ( $\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}$ ), для образца с покрытием на основе порошка Zn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

0,685 ( $\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}$ ), а для покрытия Al+Zn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> скорость коррозии за сутки с

единицы площади - 0,012 ( $\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}$ ). При этом коррозия сварного соединения без

покрытия протекает более активно со скоростью 4,692 ( $\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}$ ) [1]. Очаги

коррозии зарождаются в околошовной зоне и далее она распространяется по всей поверхности шва (рис. 6, б) На стальных образцах без покрытия

наблюдалась сплошная коррозия.

у

(

в

е

с

о

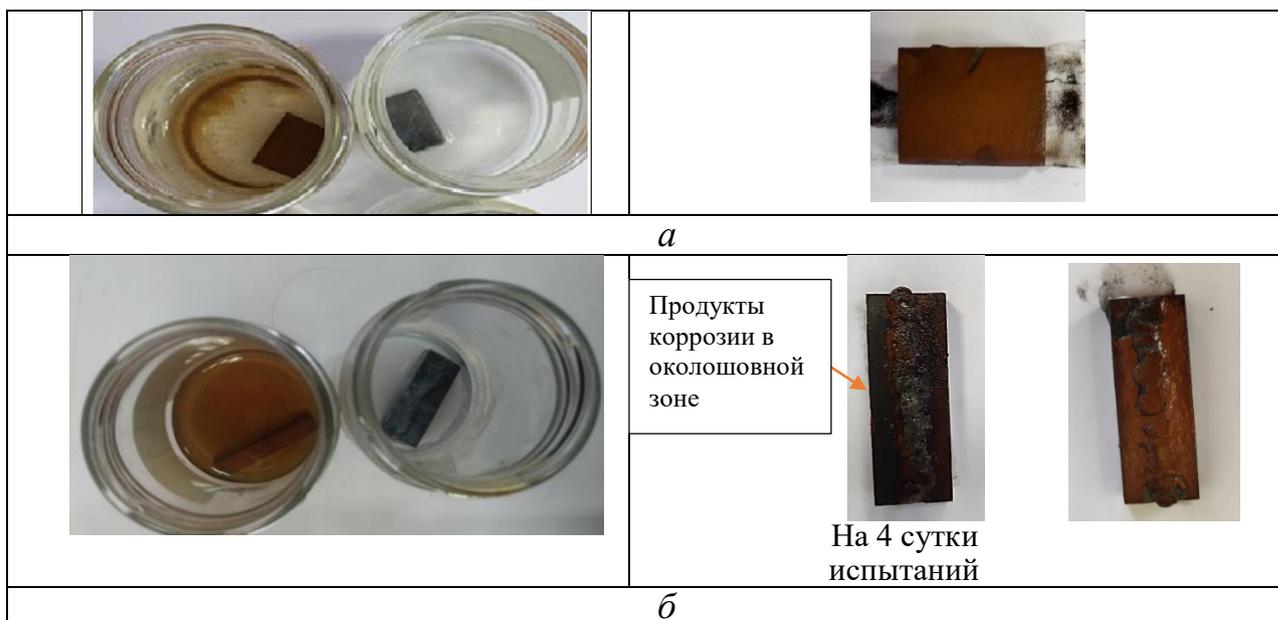


Рисунок 6 – Фото образцов в процессе испытаний в морской воде в течение 10 суток и после их извлечения из раствора: *a* – пластина из стали 25Х без покрытия (в растворе слева) и с покрытием на основе 50%Zn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (в растворе справа), *б* – сварное соединение без покрытия (в растворе слева) и с покрытием на основе 55%Al+15%Zn+30%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (в растворе справа)

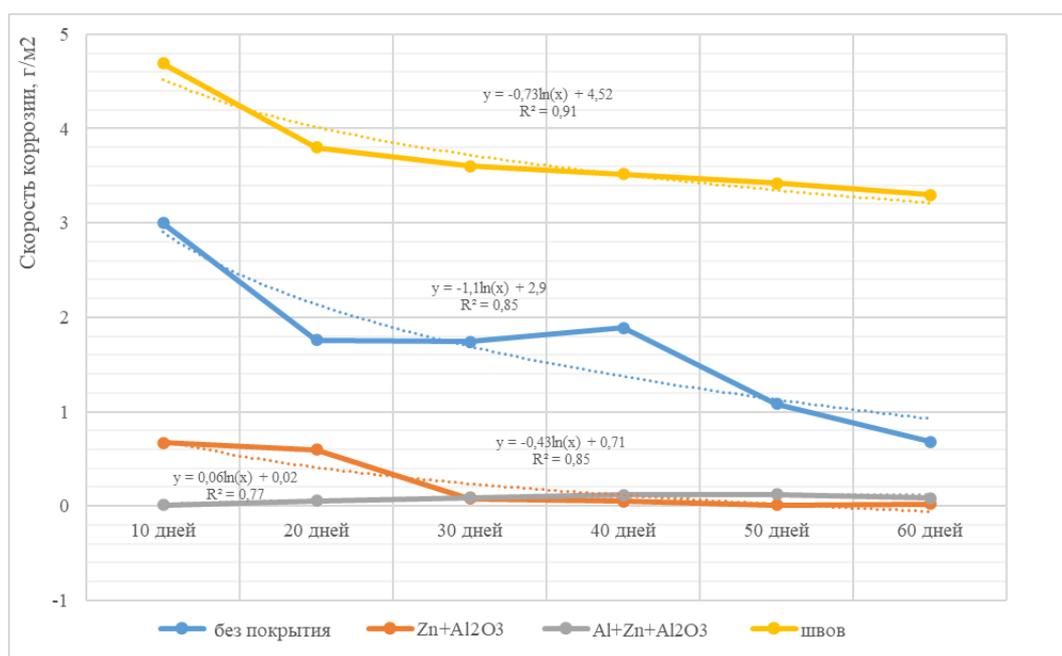


Рисунок 7 – Изменение скорости коррозии образцов с покрытиями и без в течение 60 суток пребывания в морской воде с периодическим погружением.

Начиная с 10 и вплоть до 20 суток, скорость коррозии образцов постепенно снижается, и в большей степени это выражено для стального образца без покрытия и образца с покрытием состава Zn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Из рисунка видно, что скорость коррозии образца с покрытием на основе Al+Zn+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

остаётся практически неизменной. К 60-м суткам испытаний скорость коррозии стабилизируется у всех образцов, достигая своего минимума. Для сварного соединения скорость коррозии также снижается, но по сравнению с монолитным образцом без покрытия остается достаточно высокой.

Обработка экспериментальных данных и аппроксимация полученных графиков позволила получить уравнения для скорости и глубины коррозии цинковых и алюмоцинковых покрытий (рис. 7), адекватно описывающие зависимость параметров от времени.

На рис. 8 представлены глубинные показатели коррозии  $h_c$  для испытуемых образцов, из которого видно, что максимальное значение  $h_c=13,4$  мкм имеет стальной образец без покрытия, несмотря на видимое снижение скорости коррозии к 60-м суткам испытаний. Минимальное значение глубинного показателя коррозии  $h_c$  имеет образец с алюмоцинковым покрытием 1,83 мкм, причем на протяжении всего времени испытаний. Чуть большее значение глубины коррозии, по сравнению с алюмоцинковым, имеет цинковое покрытие 3,56 мкм, обусловленное, возможно, наличием незначительной пористости и активным его растворением. Между тем, по сравнению со стальным образцом эта величина весьма мала

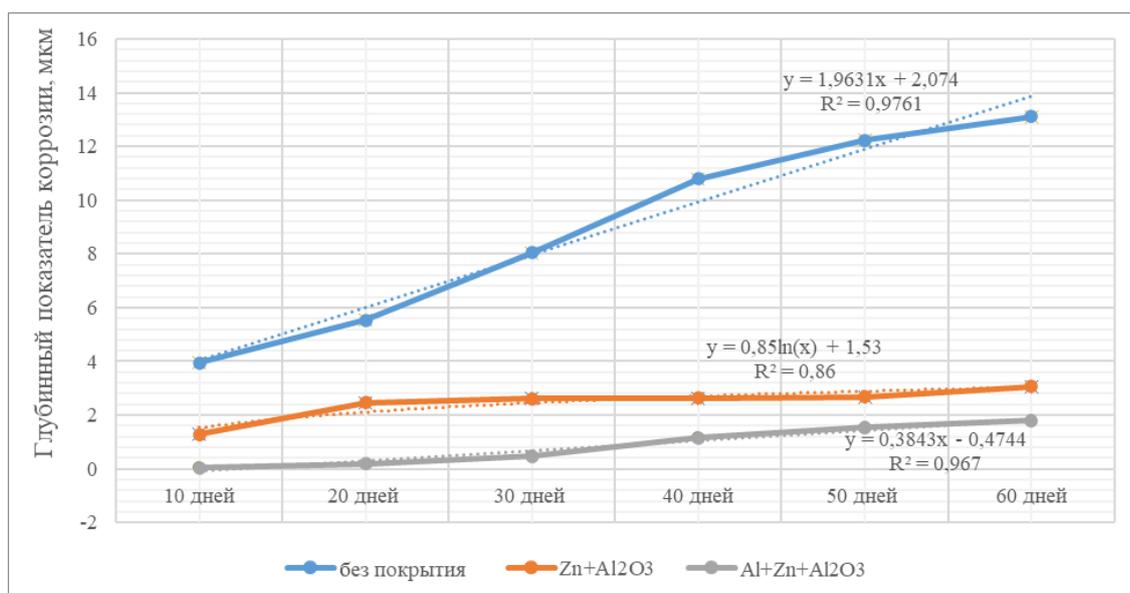


Рисунок 8 – Изменение глубинного (линейного) показателя  $h_c$  коррозии образцов с покрытиями и без в течение 60 суток пребывания в морской воде с периодическим погружением.

Также было проведено исследование коррозионной стойкости стальных образцов, частично покрытых алюмоцинковым покрытием. 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. 9) с меньшей площадью поверхности. Таким образом, для покрытий на основе алюминия имеет место эффект запечатывания пор и дефектов. 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.



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, так как обеспечивают коэффициент эффективной анодной защиты  $K_{э.а.}$  в пределах 32..36 для сварного соединения и 7...8 для монолитного стального образца. Лучшими защитными свойствами в морской воде обладает покрытие на основе композиции  $Al+Zn+Al_2O_3$ , так как скорость и линейный показатель коррозии у данного покрытия меньше, чем у цинка.

Высокая коррозионностойкость алюмосодержащего покрытия в морской воде, вероятно, обусловлена достаточно сильным наклепом частиц алюминия при напылении покрытия, благодаря чему в каждом элементарном слое покрытия возникают сжимающие напряжения, повышающие сопротивляемость покрытия 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.

**В четвертой главе диссертации** исследованы вопросы технологического обеспечения процесса восстановления деталей аксиально-поршневых насосов, изготовленных из цветных сплавов. С этой целью были проанализированы требования точности и качества поверхности, предъявляемые к ответственным соединениям насоса ( $IT6..5$ ,  $Ra = 1,25...0,16$  мкм) и специфика контакта сопрягаемых деталей. Установлено, что детали пар трения поршневого блока выходят из строя в результате абразивного износа, являющегося следствием загрязнения рабочей жидкости механическими

частицами пыли и других включений. Основным методом ремонта при малых износах является регулировка зазоров в соединениях при помощи установки шайб-компенсаторов после проведения притирочных работ, а при среднем и капитальном ремонте, при значительных величинах износа, производится замена деталей на новые. С учетом стоимости запасных деталей, в особенности изготовленных из медных сплавов, ремонт насоса сопряжен с серьезными финансовыми вложениями, что определяет необходимость изыскания эффективных методов и разработки технологии восстановления изношенных деталей в условиях ремонтного производства. В диссертации на примере рекомендаций, разработанных для восстановления распределительной пластины насоса, изготовленной из медно-цинкового сплава, подтверждена целесообразность применения ХГН-процесса при ремонте аксиально-поршневого насоса.

Согласно исследованиям, ресурсолимитирующим узлом, в большей степени влияющим на объемный КПД аксиально-поршневого насоса и работу остальных сопряжений, является соединение «блок цилиндров – распределительная пластина». Отказы данного узла происходят, главным образом, вследствие интенсивного износа распределительной пластины, выполненной из латуни, при ее контакте с блоком цилиндров в условиях граничной смазки. Это приводит к появлению утечек вследствие увеличения конструктивных зазоров.

Блок цилиндров изготавливают из цементованной стали, имеющей высокую твердость до 63..65 HRC. В силу значительной разницы твердости контактируемых поверхностей, укоренному износу подвергается латунная пластина.

В соответствии ГОСТ 23.224-86, несущую способность восстанавливаемых покрытием деталей соединений рекомендуется определять по формуле:

$$P_{мп} = \frac{H_{\mu}r}{R_z} \left(1 - \frac{2\tau}{\sigma_{0,2}}\right) \geq \sigma_{z \max} \quad (10)$$

где  $P_{мп}$  – максимальная удельная нагрузка, воспринимаемая и допускаемая парой трения,  $H_{\mu}$  – 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;  $\tau$  – прочность на срез адгезионной связи;  $\sigma_{0,2}$  – предел текучести деформируемой поверхности;  $\sigma_{z \max}$  – фактическая нагрузка на пару трения.

Из формулы вытекает, что несущая способность пары трения главным образом определяется микротвёрдостью применяемого антифрикционного материала, качеством обработки поверхностей и соотношением  $\frac{2\tau}{\sigma_{0,2}}$ .

Соответственно, чем выше  $H_{\mu}$  и меньше  $\frac{2\tau}{\sigma_{0,2}}$ , тем выше несущая способность.

Следовательно, при возможности локального изменения структуры и улучшения свойств поверхностного слоя с применением функциональных покрытий возможно значительно улучшить условия трения и повысить ресурс

сопряжения. Основываясь на данном предположении, предложено восстанавливать распределительные пластины насосов при помощи ХГН композитного покрытия на основе меди. При этом необходимо стремиться к получению высоких значений микротвердости  $H_u$  и адгезии покрытий  $\tau$ .

Для проведения экспериментальных исследований был выбран композитный порошок системы  $Cu-Al_2O_3$ . Образцы с покрытиями представлены на рис. 10. Цветовой спектр покрытий обусловлен различным температурным режимом напыления.

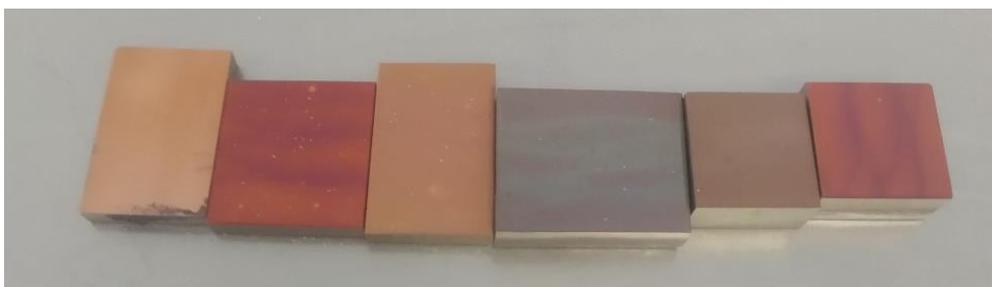


Рисунок 10 – Покрытия на основе композиции  $Cu-Al_2O_3$ , сформированные на разных режимах

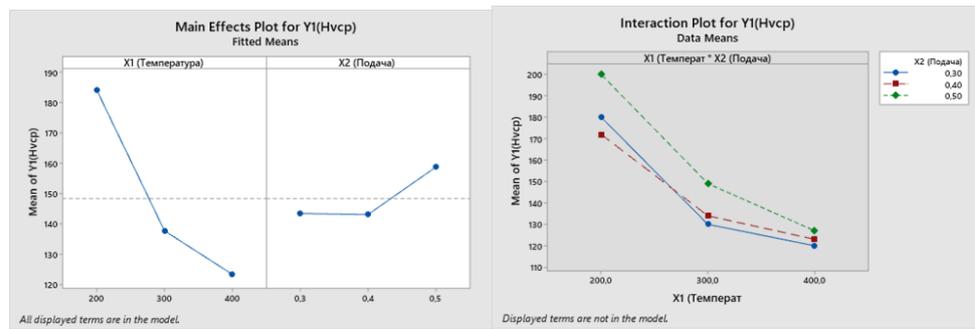
Для выявления условий получения покрытий с максимальной микротвердостью  $HV$  и минимальной шероховатостью был реализован двухфакторный эксперимент. В качестве варьируемых параметров приняты:  $X_1$  – температура процесса,  $t$ ,  $^{\circ}C$ ;  $X_2$  – скорость подачи порошка в сопловое устройство, г/с.

На рис. 11 представлены графики, характеризующие влияние режимов напыления на исследуемые параметры покрытия. Из графиков видно, что с повышением температуры процесса микротвердость по Виккерсу  $HV$  уменьшается, а с увеличением подачи повышается. Повышение температуры с 210 до 410  $^{\circ}C$ , приводит к увеличению шероховатости поверхности  $Ra$  с 3,2 до 5,5 мкм.

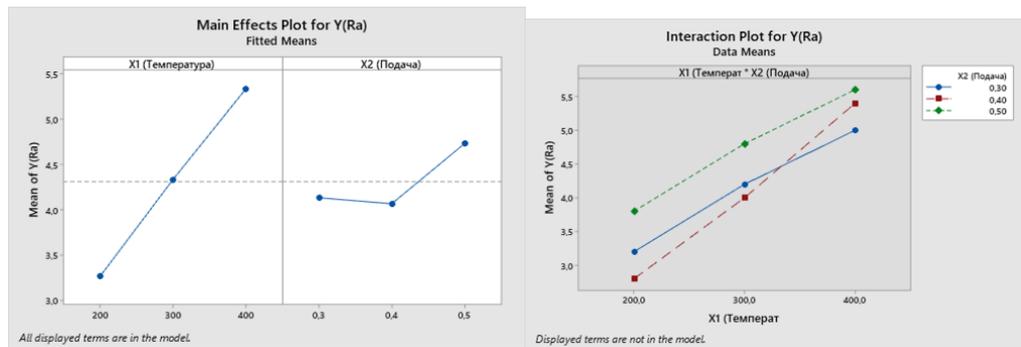
В результате обработки данных эксперимента в программе MiniTab были получены уравнения регрессии для микротвердости  $HV$  и шероховатости поверхности покрытия  $Ra$ , адекватно описывающие изменение выходного параметра в пределах факторного пространства в зависимости от температуры  $t$  газового потока и скорости подачи порошкового материала  $S$ :

$$HV = 208,7 - 0,303 t + 76,7 S \quad (R^2 = 0,95) \quad (11)$$

$$Ra = 0,011 + 0,01t + 3S \quad (R^2 = 0,93) \quad (12)$$



а



б

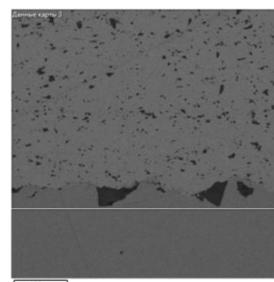
Рисунок 11 – Влияние технологических режимов напыления на изменение микротвердости HV(a) и шероховатости поверхности Ra (б) композитного покрытия на основе меди

Таким образом, напыление покрытия на режимах  $t = 200-210 \text{ }^{\circ}\text{C}$  с подачей порошка  $S = 0,5 \text{ г/с}$ , обеспечивает микротвердость поверхностного слоя до 200HV.

На рис. 12 представлена микроструктура образца. Структура покрытия гетерогенная, состоит из металлической медной матрицы с внедренными в нее частицами оксида алюминия. Частицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  распределены достаточно равномерно. На представленном электронном изображении четко выражена граница раздела покрытие-подложка. Хорошо видны крупные частицы абразива  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (100...120 мкм), закрепившиеся на поверхности стали на этапе подготовительной обработки (темные фрагменты треугольной формы). Структура покрытия плотная, без выраженной пористости. На границе раздела дефекты не выявлены.



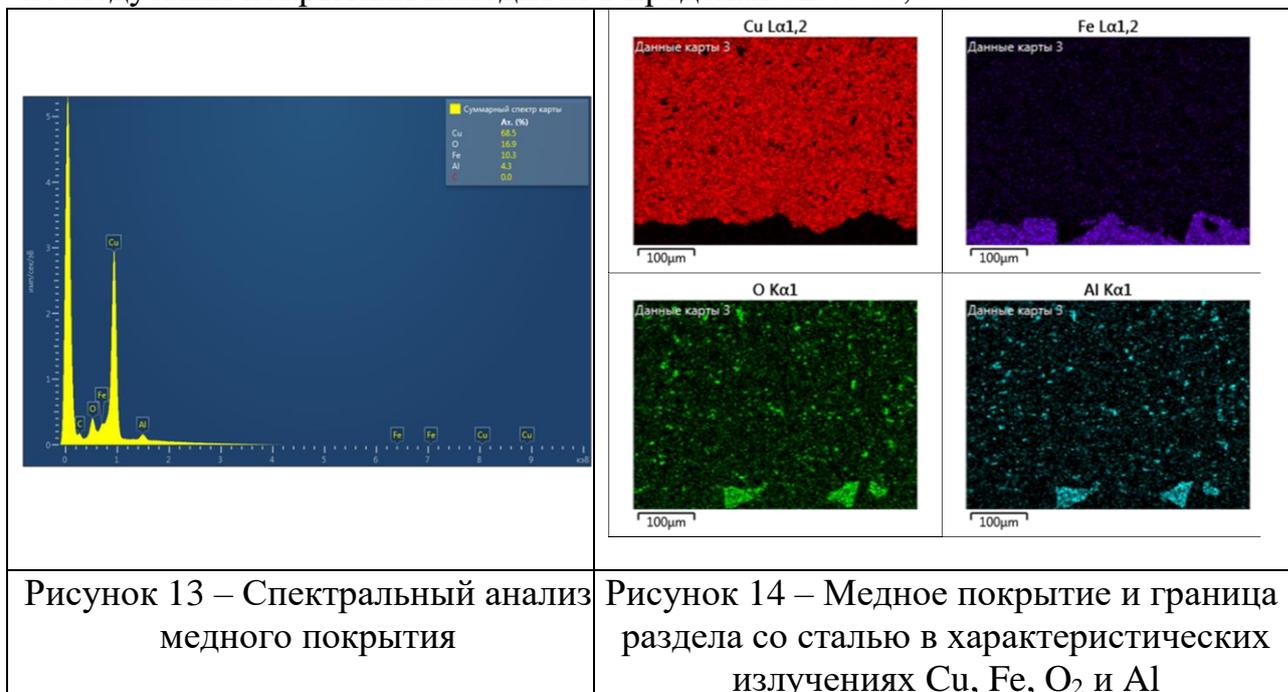
а



б

Рисунок 12 – Подготовленные для микроанализа шлифы (а), микроструктура медного покрытия и граница раздела «покрытие-подложка» (б)

Спектральный анализ карты (суммарный спектр), выполненный при помощи сканирующего микроскопа модели Tescan Vega 3 с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа, представлен на рис. 13. На рис. 14 представлен состав покрытия в характеристических излучениях Cu, Fe, O<sub>2</sub> и Al. Несколько завышенные значения по содержанию кислорода обусловлены скорее возможным выкрашиванием частиц оксида алюминия в процессе шлифования образцов, чем пористостью покрытия. Среднее содержание меди в исследуемых покрытиях находится в пределах 62... 68,5%.



Несмотря на присутствие в покрытии равномерно распределенных частиц оксида алюминия, благодаря чему представляется возможным получить композитный материал с твердостью, превышающей твердость чистой меди, существенный вклад в формирование твердости покрытия вносит также деформационное упрочнение частиц меди при ударе их о подложку. Твердость меди в деформированных состояниях достигает 90...110 НВ (в отожженном 50..55НВ). Температура рекристаллизации меди составляет 270 °С, следовательно, в процессе напыления покрытия необходимо назначать температурные режимы, при которых можно было бы сохранить деформационное упрочнение меди и предотвратить ее рекристаллизацию.

На рис. 15 представлены профилограммы поверхностей покрытия после напыления (рис. 15, а) и последующей отделочной обработки (рис. 15, б). Профилографирование поверхности производилось профилометром модели Time TR200 вдоль поверхности плоских образцов с поперечным шагом 3 мм с целью выявления открытой пористости. Следует отметить, что при нанесении медного покрытия при температурах 210-310 °С пористость на поверхности не наблюдалась.

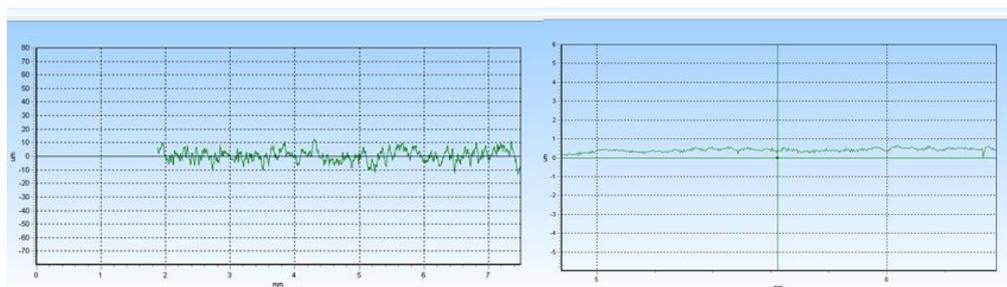


Рисунок 15 - Шероховатость медного покрытия после напыления  $Ra = 3,6$  мкм (а) и после отделочной обработки ( $b$ )  $Ra = 0,14$  мкм.

Для оценки несущей способности покрытия и коэффициента трения скольжения проводились испытания по схеме «диск- стальной шар» в условиях сухого трения. Испытания проводились на трибометре модели Tester T-10. Для этого были подготовлены дисковые образцы, на поверхность которых наносили медное покрытие на установленных режимах напыления толщиной 0,7 мм с учетом припуска на шлифование. Шероховатость поверхности первого образца составляла  $Ra$  3,2 мкм (рис. 16, а), второго -  $Ra$  0,2 мкм (рис. 16, б), она обеспечивалась отделочной обработкой. Контр-тело – шар диаметром 10 мм из закаленной стали ШХ15 (63...65 HRC).

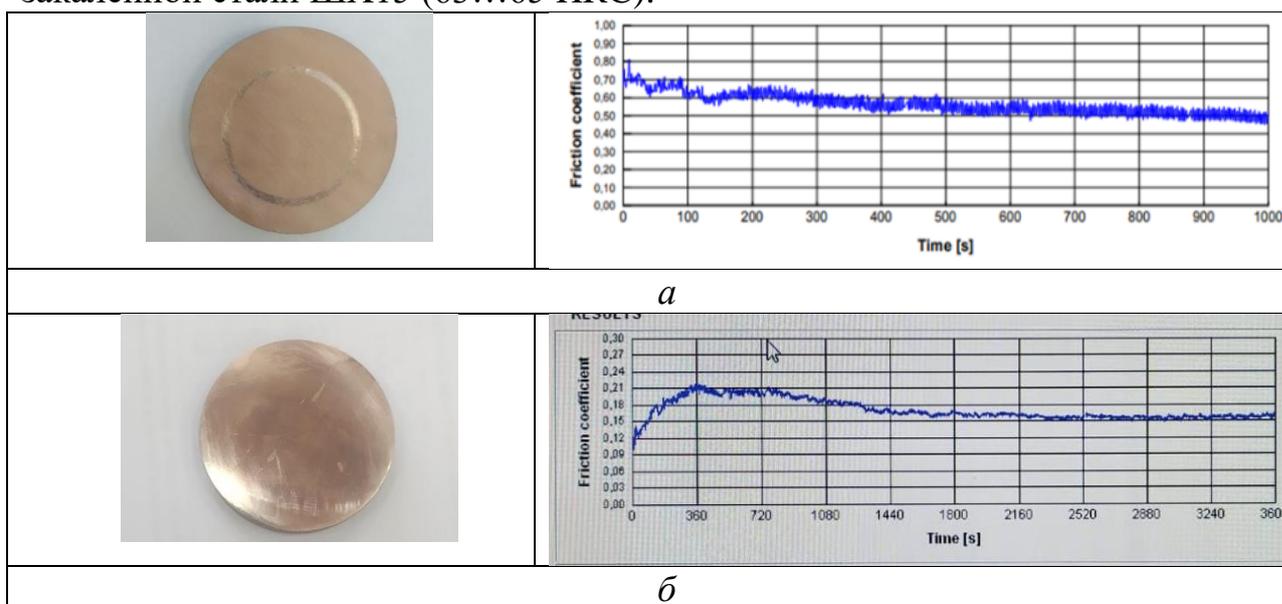


Рисунок 16 – Результаты трибоиспытний медных покрытий без смазки для оценки коэффициента трения: а – нешлифованного, сразу после напыления покрытия  $Ra = 3,2$  мкм,  $f = 0,5$ ; б – после шлифования и полирования,  $Ra = 0,2$  мкм,  $f = 0,15$

Полученный коэффициент трения для пары «покрытие-сталь» в условиях сухого трения составляет  $f = 0,15$ , тогда как для пары «латунь-сталь» в базовом варианте  $f = 0,15...0,25$ . Таким образом, для восстановления изношенных распределительных пластин аксиально-поршневых насосов целесообразно применять холодное газодинамическое напыление композитного порошка системы  $Cu-Al_2O_3$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

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  $50\%Zn+50\%Al_2O_3$  и композиции  $55Al+15\%Zn+30\%Al_2O_3$ .

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  $\text{Al} + \text{Zn} + \text{Al}_2\text{O}_3 - 0,012 \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}\right)$ , и для покрытия  $\text{Zn} + \text{Al}_2\text{O}_3 - 0,685 \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}}\right)$ . 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  $t = 200 - 210$  °С и скорости подачи порошка  $S = 0,5$  г/с микротвердость покрытия составила 198...200 НV (при твердости исходного материала распределительной пластины 165 НV); минимальная шероховатость  $Ra = 2,8$  мкм была получена на режимах  $t = 200 - 210$  °С 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 30МПа, 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  $f = 0,15$ .

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

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

1. 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.

2. 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

##### *Публикации в других изданиях*

3. 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.

4. 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.