

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный  
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева  
*(наименование института)*  
Кафедра «Машиностроение»  
*(наименование кафедры)*

Төлен Әмір Сұлтанұлы

*(Ф.И.О. обучающегося)*

Повышение износостойкости деталей типа вал конструкторско-технологическим методом

*(тема магистерской диссертации)*

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7М07112 – Цифровизация машиностроительного производства  
*(шифр и наименование образовательной программы)*

Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт Энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева  
(наименование института)

УДК 665.622.43.046.6-52 (043)

На правах рукописи

Төлен Әмір Сұлтанұлы

(Ф.И.О. обучающегося)

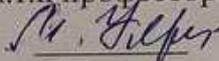
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ (ПРОЕКТ)

На соискание академической степени магистра

Название диссертации Повышение износостойкости деталей типа вал конструкторско-  
технологическим методом

Направление подготовки 7M07112 – Цифровизация машиностроительного производства  
(шифр и наименование образовательной программы)

Научный руководитель  
к.т.н профессор

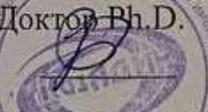
 Керимжанова М.Ф.

«10» 06 2024 г.



Рецензент

Доктор Ph.D.

 Бекмуханбетова Ш.А.

«4» июль 2024 г.

Норм контроль

доктор Ph.D. ассоциированный профессор

 Абілқайыр Ж.Н.

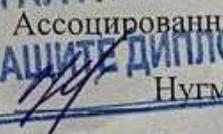
«30» мая 2024 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

доктор Ph.D.

Ассоциированный профессор

 Нугман Е.Э.

«11» 06 2024 г.



Алматы 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный  
исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт «Энергетики и машиностроения» имени А. Буркитбаева  
(наименование института)  
Кафедра «Машиностроение»  
(наименование кафедры)

7M07112 – Цифровизация машиностроительного производства  
(шифр и наименование образовательной программы)

**УТВЕРЖДАЮ**  
Заведующий кафедрой  
«машиностроение»  
доктор Ph.D.  
Ассоциированный профессор  
Нугман Е.З.

«04» 12 / 2023 г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение магистерской диссертации**

Магистранту Төлен Әмір Сұлтанұлы  
(Ф.И.О. обучающегося)

Тема «Повышение износостойкости деталей типа вал конструкторско-  
технологическим методом»

Утверждена приказом Ректора № 548-П/0 от «04» 12.2023 г.  
20 г.

(курирующий проректор)

Срок сдачи законченной диссертации «13» 06 2024 г.

Исходные данные к магистерской диссертации: вал насоса, сталь 40х, m= 51.2 кг

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) Анализ методов конструкторского проектирования для повышения износостойкости деталей типа вал: обзор существующих подходов и их применение. б) Исследование влияния различных технологических процессов на износостойкость валовых деталей: сравнительный анализ методов обработки и их эффективность.

Рекомендуемая основная литература:

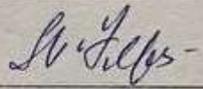
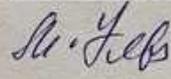
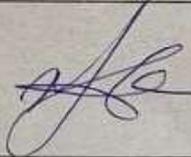
1. Царева Э.Э., Присакарь И.С. ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ РЕНОВАЦИИ // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6. – С. 82-82;
2. Вышинский В.А. Новая система постулатов (аксиом) – решение шестой проблемы Д. Гильберта, Единый всероссийский научный вестник, Москва, – 2016, №2 С.29-3

**ГРАФИК**  
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Состояние вопроса обеспечения износостойкости валов	11.01.2024	Выполнено
Методы покрытия напылением	21.02.2024	Выполнено
Исследования повышение износостойкости Деталей типа вал конструкторско-технологическим методом	17.04.2024	Выполнено
Выводы и список использованной литературы	13.05.2024	Выполнено

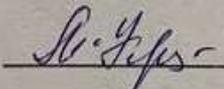
**Подписи**

консультантов и норм контролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И. О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Основной раздел	к.т.н профессор Керимжанова М.Ф.	11.03.24	
Заключение и выводы	к.т.н профессор Керимжанова М.Ф.	13.05.24	
Норм контролер	доктор Ph.D., ассоциированный профессор Абілкайыр Ж.Н.	31.05.24	

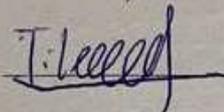
Научный руководитель

Керимжанова  
М.Ф.



Задание принял к исполнению обучающийся

Төлен Әмір  
Сұлтанұлы



Дата

« 11 » 01 2024 г

## ОТЗЫВ

### НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на \_\_\_\_\_ магистерскую диссертацию  
(наименование вида работы)  
Төлен Әмір Сұлтанұлы  
(Ф.И.О. обучающегося)  
ОП 7М07112 – Цифровизация машиностроительного производства  
(шифр и наименование ОП)

Тема: «Повышение износостойкости деталей типа валов конструкторско-технологическими методами»

Магистрант Төлен Әмір выполнил диссертационную работу в объеме по требованиям Стандарта КазННТУ 2023 года, выполненную в виде пояснительной записки на 63 стр. машинописного текста.

За период работы над магистерской диссертацией показал свою дисциплинированность, проявил самостоятельность и инициативность в решении поставленных перед ним задач, показал себя как грамотный, вдумчивый исследователь. Следует отметить целеустремленность магистранта и ответственность за свою работу.

Магистрантом представлен реферат, включающий цель и задачи исследований. Магистерская диссертация состоит из 3-х разделов.

Магистрант сделал обзор конструкторско-технологических методов повышения износостойкости деталей типа вал, определили эффективность восстановления качества изношенных поверхностей методом напыления. Изучил основные виды напыления: холодное газодинамическое, плазменное высокоскоростное кислородно-топливное. Представил расчеты нагрузки на вал МКЭ, результаты исследований по обоснованию выбора метода холодного газодинамического напыления.

В целом, магистрант оформил результаты исследований в полном объеме, работа прошла контроль на антиплагиат.

Магистерская диссертация Төлен Ә.С. полностью выполнена и может быть допущена к защите. А магистрант заслуживает присуждения ему академической степени магистра технических наук по ОП 7М07112-Цифровизация машиностроительного производства.

**Научный руководитель**

Профессор, к.т.н. каф. Машиностроение

(должность, уч. степень, звание)

М. Керимжанова М.Ф.

(подпись)

«11» \_\_\_\_\_ 2024 г.

## РЕЦЕНЗИЯ

Магистерская диссертация

Төлен Әмір Сұлтанұлы

7М07112 – Цифровизация машиностроительного производства

(шифр и наименование ОП)

На тему: «Повышение износостойкости деталей типа вал конструкторско-технологическим методом»

Выполнено:

- а) графическая часть на 20 листах
- б) пояснительная записка на 63 страницах

### ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

Данная магистерская диссертация представляет собой актуальное исследование, пронизанное глубоким анализом и тщательным подходом к теме повышения износостойкости деталей типа вал конструкторско-технологическим методом. Магистрант Төлен Ә.С проделал хорошую работу и исследование по теме диссертации и было проделано значительные труды по изучению различных аспектов данной проблемы, что отчетливо прослеживается в качественной проработке содержания исследования.

Представленная магистерская диссертация представляет собой значимый вклад в область повышения износостойкости деталей типа вал с использованием конструкторско-технологического подхода. Однако, несмотря на качественное исследование, имеются некоторые замечания, которые, однако, не влияют на общее качество работы:

1. Требуется углубить обоснование выбора методологии исследования, чтобы читатель имел более ясное представление о примененных методах и их связи с поставленными целями и задачами исследования.
2. Важно продемонстрировать более глубокий анализ полученных результатов, чтобы подчеркнуть их практическую значимость и возможные области применения в инженерной практике.
3. Рекомендуется уточнить описание экспериментальной методики исследования с целью обеспечения более полного понимания процесса проведения и анализа экспериментов.
4. Придание большей ясности структуре и логическому построению диссертации улучшит восприятие работы и облегчит читателю понимание проведенного исследования.

Важно подчеркнуть, что упомянутые замечания не оспаривают общее качество и значимость работы, а лишь направлены на ее дальнейшее улучшение и совершенствование.

С учетом данных замечаний, магистерская диссертация обладает потенциалом стать значимым вкладом в научное сообщество и инженерную практику, подтверждая авторский вклад в развитие области повышения износостойкости валовых деталей.

**Оценка работы**

Магистерская диссертация, подготовленная магистрантом Төлен Ә.С. на тему «Повышение износостойкости деталей типа вал конструкторско-технологическим методом», представляет собой выдающийся научный труд, который отличается глубоким анализом, инновационными подходами и значимыми результатами исследования.

Төлен А.С. продемонстрировал высокий уровень исследование в области цифровизации машиностроительного производства, применив современные инструменты и технологии для анализа и оптимизации конструкторских и технологических решений. Его работа является примером того, как теоретические знания могут быть успешно применены на практике для решения реальных инженерных задач.

Кроме того, следует отметить четкую структуру и логическое построение диссертации, что делает ее легко читаемой и понятной для аудитории. Презентация материала выдержана на высоком уровне, что подчеркивает профессионализм и его глубокое понимание темы исследования.

На основании представленной магистерской диссертации, считаю, что магистрант ОП 7М07112 – Цифровизация машиностроительного производства Төлен Ә.С. безусловно заслуживает присвоения степени магистра технических наук в области цифровизации машиностроительного производства.

**Рецензент**

Проректор по международным

Связям и интернализации

Доктор Ph.D.

Бекмуханбетова Ш.А.

«И» 2024 г.



## Протокол

### о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

**Автор:** Төлен Әмір Сұлтанұлы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Магистерская диссертация

**Название работы:** Повышение износостойкости деталей типа вал конструкторско-технологическим методом

**Научный руководитель:** Маншук Керимжанова

**Коэффициент Подобия 1:** 2.7

**Коэффициент Подобия 2:** 1.3

**Микропробелы:** 1

**Знаки из здругих алфавитов:** 11

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

Обоснование:

Дата

10.06.24.



Базарбай Б.

проверяющий эксперт

**Протокол**

**о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)**

**Автор:** Төлен Әмір Сұлтанұлы

**Соавтор (если имеется):**

**Тип работы:** Магистерская диссертация

**Название работы:** Повышение износостойкости деталей типа вал конструкторско-технологическим методом

**Научный руководитель:** Маншук Керимжанова

**Коэффициент Подобия 1:** 2.7

**Коэффициент Подобия 2:** 1.3

**Микропробелы:** 1

**Знаки из других алфавитов:** 11

**Интервалы:** 0

**Белые Знаки:** 0

**После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:**

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата

10.06.24



Заведующий кафедрой

**Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті  
директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы**

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

**Автор: Төлен Әмір Сұлтанұлы**

**Тақырыбы: Повышение износостойкости деталей типа вал конструкторско-технологическим методом**

**Жетекшісі: Маншук Керимжанова**

**1-ұқсастық коэффициенті (30): 2.7**

**2-ұқсастық коэффициенті (5): 1.3**

**Дәйексөз (35): 0**

**Әріптерді ауыстыру: 11**

**Аралықтар: 0**

**Шағын кеңістіктер: 1**

**Ак белгілер: 0**

**Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :**

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

**Негіздеме:**

Күні  
10.05.24



Кафедра меңгерушісі

## АНДАТПА

Диссертация конструкторлық-технологиялық тәсілді қолдана отырып, білік типті бөлшектердің тозуға төзімділігін арттыру әдістерін зерттеуге арналған. Жұмыста олардың беріктігін арттыру мақсатында осы бөлшектердің конструкциясы мен өндіру технологиясын оңтайландыруға бағытталған әдістер кешені ұсынылады және жүзеге асырылады. Негізгі әдіснамалық зерттеу құралы әр түрлі жұмыс режимдеріндегі кернеу-деформация күйін егжей-тегжейлі талдауға мүмкіндік беретін ақырлы элементтерді есептеу болып табылады.

Жүргізілген зерттеулердің негізінде біліктерді жобалау және дайындау технологиясын оңтайландыру бойынша ұсыныстар әзірленді, оның ішінде материалдарды таңдау, термиялық өңдеу және бетті өңдеу әдістері бойынша ұсыныстар бар. Алынған нәтижелердің практикалық маңызы бар және инженерлік тәжірибеде білік типті бөлшектерді пайдаланатын техникалық жүйелердің сенімділігі мен ұзақ мерзімділігін арттыру үшін пайдалануға болады.

## АННОТАЦИЯ

Диссертация посвящена исследованию методов повышения износостойкости деталей типа вал с использованием конструкторско-технологического подхода. В работе предложен и реализован комплекс методов, направленных на оптимизацию конструкции и технологии производства данных деталей с целью увеличения их долговечности. Основной методологический инструмент исследования — расчет конечных элементов, позволяющий провести детальный анализ напряженно-деформированного состояния в различных режимах эксплуатации.

На основе проведенных исследований разработаны рекомендации по оптимизации конструкции и технологии изготовления валов, включая рекомендации по выбору материалов, тепловой обработке и методам обработки поверхности. Полученные результаты имеют практическую значимость и могут быть использованы в инженерной практике для повышения надежности и долговечности технических систем, в которых применяются детали типа вал.

## ANNOTATION

This dissertation focuses on the methods of enhancing the wear resistance of shaft-type components using a design and technological approach. The study proposes and implements a complex of methods aimed at optimizing the design and production technology of these components to increase their durability. The primary methodological tool employed in the research is finite element analysis, enabling a detailed examination of the stress-strain state under various operating conditions.

The dissertation presents the results of numerical simulations, including stress, deformation, and thermal field analyses, obtained under different loading and operating conditions. Experimental studies were also conducted to validate the reliability of the obtained results.

Based on the conducted research, recommendations for optimizing the design and manufacturing technology of shafts have been developed, including suggestions on material selection, heat treatment, and surface processing methods. The obtained results have practical significance and can be utilized in engineering practice to enhance the reliability and durability of technical systems employing shaft-type component

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВАЛОВ	8
1.1 Конструкторские методы повышения износостойкости валов	13
1.2 Технологические методы повышения износостойкости валов	14
1.3 Анализ современных методов повышения износостойкости	15
2 МЕТОДЫ ПОКРЫТИЯ НАПЫЛЕНИЕМ	32
2.1 Холодное газодинамическое напыление	32
2.2 Высокоскоростное кислородно-топливное напыление	36
2.3 Плазменное напыление	41
3 ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ВАЛ КОНСТРУКТОРСКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	48
3.1 Анализ причин возникновения неисправностей и износа	48
3.2 Расчеты нагрузки на вал	51
3.3 Применение метода конечных элементов и разработка алгоритм расчета	52
3.4 Результаты исследований и обоснование выбора метода ХГДН	57
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	64
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	65

## ВВЕДЕНИЕ

Первый этап исследования включает анализ существующей литературы и научных статей, посвященных проблеме износа валов. Данный обзор поможет выявить основные причины износа, механизмы его развития, а также существующие методы повышения износостойкости.

Центробежный насос – широко используемое устройство для перекачивания жидкостей. В его основе лежит принцип центробежной силы, которая возникает при вращении вала насоса. Важной частью центробежного насоса является часть, известная как вал.

Вал центробежного насоса — это ось, вокруг которой вращается ротор насоса. Он выполняет несколько ключевых функций, влияющих на работу и производительность насоса. Во-первых, вал обеспечивает механическое соединение двигателя и ротора насоса, передавая крутящий момент от двигателя к ротору. Это позволяет насосу генерировать достаточно энергии для перемещения жидкости по системе.

Кроме того, вал выполняет еще и функцию поддержки и центровки ротора насоса. Он должен быть достаточно прочным и жестким, чтобы выдерживать нагрузки, возникающие при работе насоса. Вал должен быть изготовлен из материала, обладающего высокой прочностью и устойчивостью к коррозии, так как он подвергается воздействию агрессивных сред и высоких скоростей вращения.

Для обеспечения оптимальной производительности и долговечности насоса вал должен быть правильно сбалансирован. Несбалансированный вал может вызвать вибрацию и повышенный износ насоса, что может снизить эффективность и срок службы насоса. Поэтому при изготовлении вала особое внимание уделяется балансировке и точности его изготовления.

В современных центробежных насосах валы часто имеют сложную конструкцию и включают в себя различные элементы, такие как подшипники, уплотнения и прокладки. Эти элементы обеспечивают надежную работу насоса, предотвращая утечку жидкости и повышая его эффективность.

В целом вал является важной частью центробежного насоса, определяющей его производительность, надежность и долговечность. Качество и конструкция вала должны быть тщательно продуманы при проектировании и изготовлении насоса, чтобы обеспечить эффективную работу и минимальные потери энергии[1].

## **1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ВАЛОВ**

Долговечность и эффективность работы центробежных насосов во многом зависят от долговечности критически важных компонентов, особенно вала насоса. Вал, являющийся центральным элементом, ответственным за передачу энергии вращения на рабочее колесо, во время работы подвергается значительным механическим нагрузкам и истиранию. Следовательно, повышение износостойкости валов насосов было в центре внимания исследований и разработок в области гидродинамики и машиностроения. В этом обзоре литературы представлен обзор последних достижений и методологий, направленных на повышение износостойкости компонентов вала центробежных насосов.

Одним из подходов к повышению долговечности валов является применение различных конструкторских и технологических методов. Конструкторские методы включают в себя выбор метода материала для изготовления вала, оптимизацию его геометрии и структуры, а также применение различных покрытий и покрытий для улучшения его поверхностных свойств.

Выбор материала является важным аспектом конструкторского проектирования вала. Прочность, стойкость к повреждению и износу, термостойкость и другие свойства материала должны быть учтены при выборе выбранного материала. Применение специальных легированных сталей, например, может значительно повысить износостойкость вала и улучшить его работоспособность в условиях высокого воздействия и агрессивных средств.

Оптимизация геометрии и структуры также может обеспечить повышение его долговечности. Например, использование закалки и отпускания может улучшить механические свойства вала и повысить его устойчивость к износу. Также важно учитывать особенности силы, которой подвергается вал, и корректировать его геометрию и размеры для обеспечения равномерного распределения нагрузки и минимизации напряжений.

Применение различных покрытий и покрытий на поверхности вала также может значительно повысить его долговечность. Например, нанесение твердых покрытий, таких как нитрид-титан или алмазоподобное покрытие, может улучшить твердость и смазочные свойства поверхности вала, что приводит к уменьшению трения и износа.

Кроме того, большое значение для повышения износостойкости имеет также разработка и применение новых технологических методов. Например, применение лазерной обработки поверхности вала может улучшить его микрогеометрию и создать более прочную поверхность с улучшенными химическими смазками и долговечностью. Кроме того, исследования в области нанотехнологий могут привести к разработке новых методов предотвращения поражений и поражений с серьезными последствиями, способствующими увеличению долговечности валов.

В ходе научно исследовательской работы были выполнен литературный обзор на по теме диссертации повышение износостойкости детали типа вал.

Износостойкость это свойство детали выдерживать нагрузки под силы трения. Наша тема исследование иметь много решение со времен 2 промышленной революции когда научились получать высококачественную сталь.

В работах таких авторов О.В. Бурлаченко, Д.П. Ключкова[6] описали методы ппд и ультразвуковая колебания . Применение динамического метода обработки (поверхностно-пластическая деформация (ППД)) металлических поверхностей позволяет повысить его твердость и износостойкость. Кроме того, одновременное использование легирующего материала и ультразвуковых колебаний при дробеструйной очистке позволяет получение металлических поверхностей с различными механическими и физическими свойствами.

Использование ультразвуковых колебаний при обработке металлических поверхностей характеризуется специфическим технологическим процессом.

в металлическую поверхность и легирующий материал:

- звукокапиллярный эффект характеризуется глубоким проникновением жидкости и мельчайших элементов в капилляры и

- трещины материала под действием ультразвуковых колебаний ;

- интенсивный процесс диспергирования порошкового легирующего материала;

- снижение трения и повышение пластичности металла как при параллельной, так и при нормальной ориентации вибраций

- смещение относительно граничной поверхности .

В качестве легирующих добавок могут использоваться различные химические соединения (дисульфид молибдена, графитовый порошок ПГМЛ-2).

Таким образом, увеличение глубины диффузии смазочных материалов в поверхность металла позволяет значительно продлить срок службы поверхностей трения без существенного изменения их твердости.

Существуют различные способы диффузии смазки в металлическую поверхность, включая обработку поверхностным пластиком.

Деформация. Следует отметить зависимость износостойкости поверхностей трения от глубины диффузии

Допантов и режимов обработки ИПД до конца не изучены. Таким образом, интересно определить

Трибологические свойства поверхностей трения режимов методов ППД и применяемого легирующего материала.

Для выявления этой зависимости были проведены лабораторные испытания, в ходе которых металлическая поверхность была усилена.

Рассматриваемые варианты. Проведено определение оптимального химического состава порошка для приведения оптимизация параметров, позволяющая учитывать твердость, износостойкость, стоимость покрытия:

Автора как Бердиев Д.М. Юсупов А.А. Умарова М [7] использовали нетрадиционные методы термообработки. Суть нетрадиционных режимов термической обработки заключается в том, что с помощью предварительного высокотемпературного термической обработкой достигается высокий уровень дефектности кристаллической структуры стали. Это позволяет при повторном нагреве в зависимости от полноты повторяющихся структурных превращений сильно измельчать стальное зерно. Шлифовальное зерно увеличивает вязкость стали при одновременном повышении прочности. При сохранении высокого уровня плотности дислокаций происходит повышение износостойкости .

Царева Э.Э., Присакарь И.С [8] авторы использует методы нанесения износостойких материалов так видят в них самый простой и не дорогой метод.

Автор Вышинский В.А. [9] использовал лазерные технологии упрочнение поверхностей вращающихся механизмов однако, автор отметили, что влияние лазерной обработки на рабочие поверхности вращающихся механизмов требует проведения существенных теоретических и экспериментальных исследований. Имеются и другие методы повышения надежности указанных деталей, которые находятся в стадии экспериментальных исследований и требуют дорогостоящего технологического оборудования.

Мамасолиева[11] сделал сравнительный анализ на основные имеющих способов повышение метода износостойкости. Основные способы конструктивный, технологический и эксплуатационный. Но он сделал вывод что без расчета на износ все эти вышеупомянутые методы нельзя считать что их оптимальными. Благодаря расчетам можно сделать точный анализ и определить эффективность метода и срок службы. Конструктивный метод обосновывается с использованием различных смазок и очистки поверхности. Второй метод обосновывается с применением различными материалов. Третий метод обосновывается в контроле и не попадание различных абразивных частиц в деталь и соблюдение правил эксплуатации.

А. Smith [12] В своем исследовании изучил различные методы по повышению износостойкости вала насоса. Особое внимание он выделил на такие методы как напыление, плазменное нанесение и закалка. При проведение своих экспериментов результаты показали положительные эффекты и показал значительное повышение износостойкости валов при использование этих методов.

В. Johnson [13] в своей работе больше исследовал модификации поверхности валов центробежного насоса, где отметил такие методы как нанесение различных покрытий, химическая обработка и лазерная обработка, а также подробно анализировал свои исследования и выделил преимущества и ограничения для каждого метода. Кроме того предложил эффективные методы применения их на практике.

С. Williams [14] в своей исследовательской работе выделил оптимизацию между геометрией и выбором правильного материала, который в полной мере соответствует необходимым эксплуатационным требованиям, качествам

рабочей среды, также отметил тепловую обработку.

D. Brown [15] отметил такие методы, как напыление: HVOF напыление, плазменное напыление и алмазное напыление. В работе подробно описано, как и при каких показателях рабочих поверхностях детали, эти методы используют в зависимости от условий эксплуатации.

Состояние обеспечения проблемы долговечности валов является важным аспектом в области проектно-конструкторского и технологического производства. Валы считают, что их ключевая роль в различных механизмах и машинах, а также их надежность и использование оказывают непосредственное влияние на работоспособность и безопасность этих систем.

Износостойкость валов – это способность вала сохранять свои эксплуатационные характеристики и геометрию длительное время в различных условиях эксплуатации. Они подвержены различным видам износа, таким как абразивный износ, усталостный износ, коррозионный износ и т. д. Это может привести к ухудшению размеров, формы и поверхности вала, что в конечном итоге может привести к снижению производительности и даже выходу из строя.

Важным аспектом обеспечения долговечности валов является их конструкция. Проектирование и изготовление валов должно осуществляться с учетом условий и условий, для которых они применяются. Правильный выбор материала и обработка поверхности также играют важную роль в обеспечении долговечности валов.

Кроме того, важно проводить регулярное техническое обслуживание и контроль состояния валов для отслеживания признаков износа и предотвращения возможных аварий и поломок. Такие меры позволяют продлить срок службы механических узлов и машин, а также снизить затраты на их ремонт и замену.

Чтобы обеспечить долговечность валов, необходимо учитывать несколько факторов. Во-первых, ключевым моментом является выбор подходящего материала. Разные материалы имеют разные механические свойства, устойчивость к износу. Например, высокопрочные стали с добавлением специальных сплавов могут обеспечить повышенную износостойкость и коррозионную стойкость. Также можно использовать специальные композиционные материалы, которые обладают высокой прочностью и представлены.

Второй аспект – оптимизация геометрии и конструкции вала. Равномерное распределение нагрузки и минимизация напряжений на поверхности вала снижают износ. Этого можно добиться за счет оптимизации формы, размера, профиля и добавления ребер жесткости. Например, использование закалки и отпуска или добавление ребер жесткости может улучшить механические свойства вала и снизить вероятность образования трещин и износа.

Третий аспект – нанесение покрытий и покрытий на поверхность вала. Применение специальных покрытий позволяет существенно повысить его

износостойкость. Например, нитрид титана, алмазоподобные покрытия или специальные полимерные покрытия могут улучшить твердость, смазывающую способность и износостойкость поверхности вала. Эти покрытия покрывают верхний слой, который излучает трение и износ при контакте с другими деталями.

Четвертый аспект – учет правил эксплуатации. Различные условия эксплуатации, такие как тип нагрузки, рабочая скорость, рабочая среда и температура, могут повлиять на срок службы устройства. Необходимо учитывать эти условия и адаптировать освещение под работу в данных условиях. Например, валы, работающие в суровых условиях, могут потребовать специальных защитных покрытий или материалов, прикрепленных к стойкам.

Пятый аспект – использование амортизирующих элементов. Использование амортизирующих элементов, таких как пружины или демпферы, может помочь продлить срок службы вала. Эти элементы влияют на удары и вибрацию, что помогает увеличить срок службы вала и снизить его износ.

Шестой аспект – использование новых технологий. Развитие новых технологий, таких как лазерная обработка поверхности вала и использование нанотехнологий, также может повысить его долговечность. Эти технологии создают более точные и стабильные поверхности, уменьшая трение и износ.

В настоящее время ведутся активные исследования и разработки в области обеспечения долговечности валов. Компании и ученые работают над разработкой новых материалов, методов обработки поверхности и технологий, которые могут значительно улучшить износостойкость валов. Это включает в себя использование новых композиционных материалов, разработку специальных покрытий и технологий, использование новых методов обработки поверхности и использование передовых технологий, таких как нанотехнологии.

Однако, несмотря на значительные достижения в этой области, вопрос обеспечения долговечности валов остается актуальным и требует научных исследований и разработок. Различные отрасли промышленности, такие как автомобилестроение, энергетика, машиностроение и другие, требуют более прочных и надежных валов для обеспечения эффективной работы и систем безопасности. От износостойкости деталей машин зависит производительность производства, рациональное использование сырьевых и трудовых ресурсов, а также конкурентоспособность предприятия на рынке. Именно поэтому важной задачей является процесс прогнозирования изнашивания металлических элементов в ходе эксплуатации.

Таким образом, обеспечение долговечности валов является одной из общих задач современного машиностроения. Разработка и применение различных технологий и методов позволяют повысить эффективность механических компонентов и обеспечить их надежность и долговечность. Тщательный подход к выбору материалов, конструкции и обращению с

валами может снизить риск износа и улучшить производительность оборудования[16].

## **1.1 Конструкторский метод повышения износостойкости вала**

Конструкторские методы повышения износостойкости валов являются важным аспектом в области машиностроения и технического проектирования. Валы играют ключевую роль в различных механизмах и машинах, а их надежность и долговечность оказывают непосредственное влияние на работоспособность этих систем. Повышение износостойкости валов может быть достигнуто путем применения различных методов проектирования, учитывающих материал, геометрию, конструкцию и другие факторы, влияющие на их работоспособность.

Одним из ключевых аспектов конструкции вала является выбор оптимального материала. Материал должен обладать высокой прочностью, устойчивостью к коррозии и износу. В зависимости от требований и условий эксплуатации могут использоваться различные стали, сплавы и композиционные материалы. Например, легированные стали с добавлением хрома, никеля или молибдена обладают повышенной прочностью и устойчивостью к коррозии. Для улучшения свойств поверхности вала также можно использовать специальные покрытия, такие как нитрид титана или алмазоподобные покрытия.

Оптимизация геометрии и конструкции вала также играет важную роль в повышении его износостойкости. Равномерного распределения нагрузки и минимизации напряжений на поверхности вала можно добиться за счет оптимизации его формы, размеров и профиля. Например, использование закалки и отпуска или добавление ребер жесткости может улучшить механические свойства вала и снизить вероятность образования трещин и износа. Также важно учитывать особые нагрузки, которым подвергается вал, и оптимизировать его геометрию и размеры, чтобы обеспечить равномерное распределение нагрузки и минимизировать напряжение.

Учет условий эксплуатации также является важным аспектом конструкции вала. Различные факторы, такие как тип нагрузки, скорость вращения, рабочая среда и температура, могут повлиять на его производительность и износ. При проектировании вала необходимо учитывать эти условия и адаптировать его конструкцию для оптимальной работы в данных условиях. Например, валы, работающие в агрессивных средах, могут потребовать применения специальных защитных покрытий или материалов, устойчивых к коррозии.

Кроме того, использование амортизирующих элементов также может способствовать повышению износостойкости валов. Эти элементы, такие как пружины или демпферы, поглощают удары и вибрацию, что помогает увеличить срок службы вала и снизить износ.

В целом повышение износостойкости валов требует комплексного подхода, включающего выбор оптимального материала, оптимизацию геометрии и структуры, использование покрытий и покрытий, учет условий эксплуатации, использование амортизирующих элементов и применение новых технологий. Сочетание этих методов позволяет создавать более надежные и долговечные валы, что важно в различных отраслях машиностроения и технического проектирования.

Обеспечение износостойкости валов является важным аспектом в области проектирования и производства. Для этого необходим комплексный подход, включающий выбор оптимального материала, оптимизацию геометрии и структуры, нанесение покрытий и покрытий с учетом условий эксплуатации, использование амортизирующих элементов и применение новых технологий. Дальнейшие исследования и разработки в этой области могут привести к созданию более эффективных и надежных механизмов и машин, что важно для различных отраслей промышленности[17].

## **1.2 Технологический метод повышения износостойкости вала**

Технологический метод повышения износостойкости вала является важным аспектом в области конструкторско-технологического производства. Износостойкость вала – это способность вала сохранять свои эксплуатационные характеристики и геометрию в течение длительного времени в различных условиях эксплуатации. Повышение износостойкости валов оказывает непосредственное влияние на надежность и долговечность механизмов и машин, в которых они применяются.

Использование специальных покрытий и покрытий на поверхности вала позволяет значительно повысить его износостойкость. Покрытия создают защитный слой, который уменьшает трение и износ при контакте с другими деталями. Нитрид титана, алмазоподобные покрытия или специальные полимерные покрытия могут улучшить твердость, смазывающую способность и износостойкость поверхности вала. Такие покрытия также могут быть специально разработаны для работы в определенных условиях, например, при высоких температурах или агрессивных средах.

Развитие новых технологий играет важную роль в повышении износостойкости вала. Лазерная обработка поверхностей валов позволяет создать более точные и стабильные поверхности, что помогает снизить трение и износ. Использование нанотехнологий позволяет создавать покрытия и покрытия с уникальными свойствами, такими как высокая твердость и коррозионная стойкость. Другие новые технологии, такие как добавление наночастиц в материалы или использование 3D-печати, также могут быть использованы для повышения износостойкости вала.

Оптимизация условий эксплуатации является важным аспектом повышения износостойкости валов. Различные условия эксплуатации, такие

как тип нагрузки, скорость вращения, рабочая среда и температура, могут существенно влиять на износостойкость вала. Необходимо учитывать эти условия и адаптировать конструкцию вала для оптимальной работы в данных условиях. Например, валы, работающие в агрессивных средах, могут потребовать использования специальных защитных покрытий или материалов.

Технологические методы повышения износостойкости валов играют важную роль в обеспечении надежности и долговечности механизмов и машин. Выбор оптимального материала, оптимизация геометрии и структуры, использование специальных покрытий и технологий, применение новых технологий и оптимизация условий эксплуатации – все эти факторы в совокупности способствуют повышению износостойкости вала.

Дальнейшие исследования и разработки в этой области могут привести к созданию более эффективных и надежных механизмов и машин, способных работать в различных условиях эксплуатации и снизить потребность в регулярном обслуживании и замене валов[18].

### **1.3 Анализ современных методов повышения износостойкости**

Вопрос по повышению износостойкости детали типа вал можно решить в начале процесса разработки самой детали. Подбирая износостойкий материал до изготовления самой детали мы можем решить этот вопрос. Но учитывая то - что компоненты материала не дешевые, мы не можем на постоянной основе выбирать этот метод. Экономическое соображение не позволяет нам выбрать этот метод.

**Термообработка** это один из проверенных методов и широко известных методов. Суть заключается в изменении внутренней структуры металла после нагрева в заданном режиме и изменением кристаллической решетки в печах ТВЧ. Преимущество метода заключается в том, что можно выполнить указанный процесс для деталей в любых габаритах. Недостаток этого метода - длительность охлаждения детали. А также то, что после закалки можно не получить необходимые характеристики или рисунок поверхности покрытия, который планировалось получить после этого процесса. Т.е., в итоге не получение нужной твердости .

**Гальваника** - это один из старейших методов, который позволяет при помощи химического или электрохимического покрытия позволяет получить свойства дорогого и прочного материала. Этот процесс проводится в специальных ваннах, в которые заливают электролит с содержанием компонента необходимого металла, осаждающегося на поверхностный слой материала. Гальванический метод - это проверенный метод, которым пользуются все промышленные предприятия мира. Эта технология не такая сложная: для выполнения этого процесса нужна установка и высококвалифицированный специалист. Недостаток этого метода

заключается в том, что он требует больших энергетических затрат, вынужденной необходимости работать во вредной среде и утилизация опасных отходов производства .

**Напыление покрытий из порошковых материалов.** Главным достоинством метода напыления является его универсальность – независимость от природы материала детали. Напыление не оказывает заметного теплового воздействия на основу. Напыляют цветные металлы и сплавы, стали, твердые сплавы и керамику, пластмассы и т.п. Напыление широко применяется для восстановления формы изношенных деталей. Для повышения износостойкости обработки сложных и ответственных деталей, в т.ч. валов отнесится именно напыление. В современной машиностроительной отрасли применяют такие виды напыления как: газотермическое и плазменное, которые доступны и сравнительно просты в плане освоения технологии изготовления.

**Газотермическое напыление** - это метод, в котором в качестве исходного материала используют кислородно-ацетиленовое пламя. Технология не сложная, требуется лишь оборудование соответствующее нашему методу. Распыляемый материал поступает в ацетилено-кислородный пламенный факел горелки, нагревается до температуры, близкой к расплавлению и доходить до скорости 20...30 м/с, когда он сталкивается с нагретыми частицами, прикрепляемыми к поверхности, между которыми образует достаточно плотное однородное покрытие. Возможно газопламенное напыление полимерных материалов (пластиков), металлических материалов (алюминий, бронза, баббит, никель и др.), огнеупорных и других керамических соединений (оксид титана, оксид алюминия и др.). Этот метод позволяет нам устранить дефекты механической обработки также после штамповки. При массовом производстве этот метод наиболее экономичен. Не имеет ограничение в наносимых материалах. К недостатку этого метода можно причислить то, что в единичных и серийных производствах метод может быть не экономичен. Так как требует больших расходов ацетилена и кислорода .

**Плазменное напыление** - это наиболее перспективный метод покрытия поверхности детали для улучшения износостойкости. В этом методе газовая струя напыляется на материал плазмой. Высокая температура и скорость плазменной струи позволяют напылять покрытия из любых материалов: металлов и сплавов, керамических материалов, таких как оксиды, карбиды, бориды, нитриды, и композиционных материалов. Часто для плазмообразования в качестве газа используют аргон, азот и их смеси с водородом и гелием. Преимущество этого метода заключается в том, что он не имеет ограничений в режимах работ, может напылять любые материалы, также независимо от габаритов и размеров можно наносить напыление на любые участки детали. Кроме того, наиболее существенным фактором можно указать то, что не имеется способа высокого термического воздействия на деталь при нанесении покрытия без деформации детали и нарушения ее

габаритных размеров [19].

**Лазерная обработка поверхности (ЛОП)** — это передовая инженерная технология, используемая для улучшения свойств поверхности материалов, от металлов до керамики и полимеров. Используя сфокусированную энергию лазеров, этот метод обеспечивает точный контроль и настройку, что делает его неоценимым в отраслях, где целостность поверхности, долговечность и производительность имеют первостепенное значение.

По своей сути лазерная обработка поверхности включает в себя локальный нагрев и модификацию поверхности материала с помощью высокоэнергетического лазерного луча. Процесс обычно начинается с точного позиционирования заготовки, за которым следует воздействие лазерного луча на заданный участок поверхности. Интенсивная энергия лазера быстро нагревает поверхность, вызывая различные тепловые и физические преобразования в зависимости от состава материала, параметров лазера и используемой стратегии обработки.

Лазерная обработка поверхности включает в себя широкий спектр методологий, адаптированных к конкретным свойствам материала и желаемым результатам. К ним относятся:

**Лазерная закалка:** при лазерной закалке поверхность материала быстро нагревается и закаливается, вызывая мартенситное превращение и увеличивая твердость поверхности. Этот метод особенно эффективен для повышения износостойкости и усталостной прочности.

**Лазерное легирование:** Лазерное легирование включает избирательное плавление материала подложки вместе с добавлением легирующих элементов в виде порошка или проволоки. Это приводит к образованию модифицированного поверхностного слоя с улучшенными свойствами, такими как твердость, коррозионная стойкость и износостойкость.

**Лазерная наплавка** - это процесс, при котором слой материала, обычно в форме порошка, наносится на поверхность подложки с использованием лазерного луча в качестве источника тепла. Этот метод используется для ремонта поврежденных компонентов, улучшения свойств поверхности или создания сложных поверхностных структур.

**Лазерное плавление поверхности.** Лазерное плавление поверхности включает плавление поверхностного слоя материала с последующим быстрым затвердеванием. Этот процесс может улучшить микроструктуру, устранить дефекты и улучшить качество поверхности, что приводит к улучшению механических свойств и устойчивости к коррозии.

**Преимущества лазерной обработки поверхности:**

Лазерная обработка поверхности предлагает многочисленные преимущества по сравнению с традиционными методами модификации поверхности:

**Точность и контроль:** сфокусированная энергия лазера позволяет точно контролировать площадь, глубину и интенсивность обработки, что приводит

к индивидуальной модификации поверхности с минимальной потерей материала.

**Минимальная деформация.** Характеристика локализованного нагрева при лазерной обработке сводит к минимуму тепловые искажения и напряжения, сохраняя целостность размеров заготовки.

**Универсальность:** лазерную обработку поверхности можно применять к широкому спектру материалов, включая металлы, керамику и полимеры, что делает ее универсальным решением для различных промышленных применений.

**Эффективность:** быстрые циклы нагрева и охлаждения, связанные с лазерной обработкой, приводят к сокращению времени обработки и снижению энергопотребления по сравнению с традиционными методами термообработки.

**Повышение качества:** за счет улучшения микроструктуры, устранения дефектов и улучшения качества поверхности компоненты, обработанные лазером, демонстрируют улучшенные механические свойства, износостойкость и коррозионную стойкость[20].

**Электрическая контактная закалка** - это инновационный метод модификации поверхности, используемый для повышения износостойкости, долговечности и надежности электрических контактов. Подвергая контактные поверхности контролируемым электрическим разрядам, этот метод вызывает локальный нагрев и трансформацию материала, в результате чего образуются закаленные поверхностные слои, обладающие превосходными механическими и электрическими свойствами.

Электрическая контактная закалка работает по принципу электроэрозионной обработки (ЭЭО), при которой контролируемые электрические разряды используются для удаления материала с поверхности заготовки. Однако при контактной закалке целью является не удаление материала, а модификация поверхности посредством контролируемого нагрева и быстрой закалки. Когда между контактирующими поверхностями возникает электрический разряд, выделяющееся интенсивное тепло мгновенно плавит поверхностный слой с последующим быстрым затвердением после прекращения разряда. Этот процесс вызывает различные металлургические превращения, включая фазовые изменения, измельчение зерна и образование упрочненных поверхностных слоев.

**Улучшенная износостойкость:** закаленные поверхностные слои, полученные в результате закалки электрических контактов, демонстрируют значительно повышенную износостойкость, что делает их идеальными для применений, подверженных повторяющемуся скользящему или трущемуся контакту, например, в электрических переключателях, разъемах и контактах реле. Закаленные поверхности противостоят износу и деформации, тем самым продлевая срок службы контактов и уменьшая необходимость частого обслуживания или замены.

Повышенная долговечность. За счет увеличения твердости и прочности поверхности закалка электрических контактов повышает долговечность и надежность электрических контактов, особенно в суровых условиях эксплуатации, характеризующихся высокими температурами, вибрациями или загрязнением. Закаленные поверхности лучше противостоят механическим нагрузкам, термоциклированию и факторам окружающей среды, обеспечивая стабильную производительность и минимальное время простоя.

Пониженное контактное сопротивление. Закалка электрических контактов также может снизить контактное сопротивление, тем самым улучшая электропроводность и сводя к минимуму потери мощности в электрических цепях. Закаленные поверхностные слои имеют более гладкие и чистые контактные поверхности с уменьшенной шероховатостью поверхности и образованием оксидной пленки, что приводит к более надежным электрическим соединениям и повышению энергоэффективности.

Индивидуальные свойства поверхности. Электрическая контактная закалка обеспечивает гибкость в контроле глубины, твердости и микроструктуры закаленных поверхностных слоев, что позволяет инженерам адаптировать свойства поверхности к конкретным требованиям применения. Регулируя такие параметры, как энергия разряда, продолжительность и частота, можно добиться точных изменений для оптимизации производительности и функциональности.

Неразрушающий процесс. В отличие от традиционных методов термообработки, которые могут изменить объемные свойства материала, электрическая контактная закалка представляет собой неразрушающий процесс, который избирательно модифицирует поверхностный слой, сохраняя при этом свойства подложки. Это позволяет целенаправленно улучшать свойства поверхности без ущерба для общей целостности или точности размеров компонентов.

Экономическая эффективность: электрическая закалка контактов предлагает экономичное решение для повышения производительности и долговечности электрических контактов. Этот процесс требует минимального удаления материала и может выполняться быстро и эффективно, что приводит к снижению производственных затрат и времени выполнения работ по сравнению с альтернативными методами модификации поверхности[21].

**Термохимическая обработка** включает воздействие на металлические компоненты повышенных температур в контролируемой атмосфере, содержащей химически активные вещества, такие как углерод, азот или бор. Обработка обычно происходит в специализированной печи или камере, где компоненты нагреваются до температур, превышающих их критическую температуру превращения. При нагревании химически активные вещества диффундируют в поверхностный слой материала, образуя соединения или твердые растворы, изменяющие его свойства.

Науглероживание. Науглероживание включает введение углерода в поверхностный слой стальных компонентов для повышения твердости и

износостойкости. Этот процесс обычно используется в тех областях, где повышенная твердость поверхности и износостойкость имеют решающее значение, например, в зубчатых передачах, подшипниках и автомобильных компонентах.

**Азотирование:** Азотирование - это термохимическая обработка, при которой в поверхностный слой ферросплавов вводится азот, в результате чего образуются нитриды, которые значительно повышают поверхностную твердость, износостойкость и усталостную прочность. Азотирование часто используется в изделиях, требующих высокой поверхностной твердости и устойчивости к износу, таких как коленчатые валы, распределительные валы и литевальные формы.

**Карбонитрирование:** Карбонитрирование сочетает в себе элементы цементации и азотирования путем введения углерода и азота в поверхностный слой стальных компонентов. Это приводит к образованию композитного слоя, содержащего как карбиды, так и нитриды, обеспечивающего улучшенную твердость, износостойкость и усталостную прочность по сравнению с традиционными процессами цементации или азотирования.

**Борирование:** Борирование включает введение бора в поверхностный слой стальных компонентов с образованием твердых боридных соединений, которые повышают твердость поверхности, износостойкость и коррозионную стойкость. Борирование обычно используется в изделиях, требующих высокой износостойкости и термической стабильности, таких как режущие инструменты, штампы и компоненты аэрокосмической промышленности.

**Преимущества термохимической обработки:**

**Улучшенная твердость поверхности:** термохимическая обработка значительно увеличивает твердость поверхности металлических компонентов, делая их более устойчивыми к износу, истиранию и деформации. Это приводит к увеличению срока службы компонентов, снижению требований к техническому обслуживанию и повышению производительности в условиях сильного износа.

**Повышенная износостойкость:** образование твердых соединений, таких как карбиды, нитриды и бориды, во время термохимической обработки повышает износостойкость обработанных деталей, позволяя им противостоять суровым условиям эксплуатации и абразивным средам.

**Повышенная усталостная прочность.** Термохимическая обработка повышает усталостную прочность металлических компонентов за счет создания закаленного поверхностного слоя, который более устойчив к возникновению и распространению усталостных трещин. Это особенно полезно в приложениях, подверженных циклическим нагрузкам, таких как автомобильные компоненты и детали машин.

**Защита от коррозии:** некоторые термохимические обработки, такие как азотирование и борирование, также обеспечивают повышенную коррозионную стойкость за счет образования защитных поверхностных слоев, которые подавляют процессы коррозии и окисления. Это продлевает срок

службы компонентов, подвергающихся воздействию агрессивных сред, например, в морских и химических процессах.

Стабильность размеров: термохимическая обработка обычно приводит к минимальным искажениям или изменениям размеров обрабатываемых компонентов, обеспечивая стабильность размеров и соблюдение жестких допусков. Это важно в приложениях, где точные размеры имеют решающее значение, например, в точном машиностроении и изготовлении инструментов.

Экономическая эффективность: термохимическая обработка предлагает экономически эффективное решение для улучшения свойств металлических компонентов по сравнению с альтернативными методами модификации поверхности. Процесс может осуществляться в печах периодического или непрерывного действия, что позволяет эффективно обрабатывать большие количества компонентов при относительно низких затратах на единицу[22].

**Наноструктурирование поверхности** это передовая инженерная технология, используемая для изменения морфологии, структуры и свойств поверхности материалов на наноуровне. Создавая наноразмерные элементы и структуры на поверхности материалов, наноструктурирование поверхности предлагает уникальные преимущества с точки зрения механических, оптических, электрических и биологических свойств.

Принципы поверхностного наноструктурирования:

Наноструктурирование поверхности включает создание наноразмерных элементов, узоров или структур на поверхности материалов. Этого можно достичь с помощью различных методов, включая физические методы, такие как лазерная абляция, электронно-лучевая литография и ионно-лучевое фрезерование, а также химические методы, такие как самосборка, химическое осаждение из паровой фазы и осаждение атомного слоя. Полученные наноструктуры могут включать наночастицы, нанопроволоки, нанотрубки, наноструктуры или нанопористые поверхности, в зависимости от конкретного используемого метода изготовления.

Преимущества наноструктурирования поверхности:

Улучшенные механические свойства. Наноструктурирование поверхности может значительно улучшить механические свойства материалов за счет введения наноразмерных свойств, таких как нанозерна, нанокристаллические структуры или поверхности с наноузорами. Эти наноструктуры могут повысить твердость, прочность, ударную вязкость и пластичность, делая материалы более устойчивыми к износу, усталости и деформации.

Индивидуальная смачиваемость поверхности: наноструктурирование поверхности позволяет точно контролировать смачиваемость поверхности при применении на гидрофобных, гидрофильных, супергидрофобных и супергидрофильных поверхностях. Наноструктуры могут быть разработаны для управления углом контакта и адгезионными свойствами материалов, обеспечивая самоочищение поверхностей, создание покрытий,

предотвращающих запотевание, и улучшение транспорта жидкости в микрофлюидных устройствах.

Улучшенные трибологические характеристики: наноструктурированные поверхности обладают превосходными трибологическими свойствами, включая снижение трения, улучшенную смазку и повышенную износостойкость. Поверхности с нано-рисунком могут создавать воздушные или жидкостные карманы, которые уменьшают поверхностный контакт и силы трения, что приводит к более плавному скольжению и увеличению долговечности механических компонентов.

Оптические свойства. Наноструктурирование поверхности позволяет манипулировать оптическими свойствами материалов, что приводит к новым явлениям, таким как плазмонные эффекты, улучшенный захват света и настраиваемое оптическое поглощение. Наноструктурированные поверхности используются в таких приложениях, как солнечные элементы, датчики, оптические покрытия и технологии отображения, для повышения эффективности, чувствительности и производительности.

Повышенная биологическая совместимость: наноструктурированные поверхности могут имитировать топографию и функциональность естественных биологических поверхностей, способствуя адгезии, пролиферации и дифференциации клеток. Наноструктурированные биоматериалы используются в тканевой инженерии, регенеративной медицине и биомедицинских имплантатах для улучшения биосовместимости, уменьшения воспаления и улучшения интеграции тканей.

Увеличение площади поверхности: наноструктурирование увеличивает эффективную площадь поверхности материалов, что выгодно для приложений катализа, зондирования и хранения энергии. Наноструктурированные поверхности обеспечивают больше активных центров для химических реакций, что приводит к улучшению каталитической активности, селективности и эффективности гетерогенного катализа и электрохимических процессов.

Гибкое и масштабируемое производство. Методы наноструктурирования поверхности обеспечивают гибкость и масштабируемость при изготовлении наноструктур из широкого спектра материалов, включая металлы, керамику, полимеры и композиты. Эти методы можно адаптировать для крупномасштабных производственных процессов, что позволит производить наноструктурированные материалы для коммерческого применения.

Настраиваемые свойства: наноструктурирование поверхности позволяет точно настраивать свойства материала, контролируя размер, форму, расстояние и ориентацию наноструктур. Это позволяет разрабатывать материалы с индивидуальными свойствами, оптимизированными для конкретных применений - от антибликовых покрытий до высокопроизводительных датчиков[23].

**Алмазное упрочнение и выглаживание** - это передовая технология обработки поверхности, используемая для повышения твердости,

износостойкости и гладкости материалов за счет нанесения алмазоподобных углеродных (DLC) покрытий. Покрытия DLC состоят из аморфного углерода с гибридными связями  $sp_3$  и  $sp_2$ , аналогичными тем, которые встречаются в структурах природного алмаза. Эти покрытия обладают исключительной твердостью, низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью, что делает их идеальными для применений, где требуются превосходные свойства поверхности.

Принципы алмазной закалки и сглаживания:

Процесс осаждения: алмазное закаливание и сглаживание включают осаждение алмазоподобных углеродных покрытий на поверхность материалов с использованием различных методов, таких как физическое осаждение из паровой фазы (PVD), химическое осаждение из паровой фазы (CVD) или химическое осаждение из паровой фазы с плазменным усилением (PECVD). В процессе осаждения атомы углерода ионизируются или испаряются и осаждаются на поверхность подложки, где образуют тонкое конформное покрытие с алмазоподобными свойствами.

Структура пленки: DLC-покрытия обычно состоят из смеси углеродных связей  $sp_3$  и  $sp_2$ , причем связи  $sp_3$  обеспечивают твердость и износостойкость, аналогичные алмазу, а связи  $sp_2$  способствуют смазывающей способности и низкому трению. Уникальная микроструктура DLC-покрытий обеспечивает исключительные механические и трибологические свойства, в том числе высокую твердость (до 80 ГПа), низкий коэффициент трения (0,05–0,2) и высокую износостойкость.

Сглаживание поверхности. Помимо повышения твердости и износостойкости, покрытия DLC также могут придавать материалам гладкую поверхность с низким коэффициентом трения. Аморфная структура покрытий DLC позволяет им соответствовать топографии поверхности подложки, заполняя неровности поверхности и сглаживая пики и впадины шероховатостей. Это приводит к снижению трения, улучшению смазывания поверхности и повышению устойчивости к адгезионному износу и истиранию.

Преимущества алмазной закалки и выравнивания:

Исключительная твердость: покрытия DLC обладают исключительной твердостью, превосходящей твердость большинства конструкционных материалов, включая металлы, керамику и полимеры. Эта высокая твердость обеспечивает превосходную устойчивость к износу, истиранию и царапинам, продлевая срок службы компонентов с покрытием и снижая требования к техническому обслуживанию.

Низкое трение: алмазная закалка и сглаживание приводят к образованию покрытий с низкими коэффициентами трения, минимизируя потери энергии, а также уменьшая износ, вызванный трением, и выделение тепла. Гладкая, смазывающая поверхность, обеспечиваемая DLC-покрытиями, повышает эффективность и производительность движущихся компонентов, таких как подшипники, шестерни и поверхности скольжения.

**Коррозионная стойкость:** покрытия DLC обеспечивают превосходную коррозионную стойкость, защищая основные материалы от деградации из-за химического воздействия, окисления и воздействия окружающей среды. Инертная природа DLC-покрытий делает их пригодными для применения в агрессивных средах, например, в морской, автомобильной и аэрокосмической промышленности.

**Биосовместимость:** алмазные упрочняющие и разглаживающие покрытия биосовместимы и совместимы с биологическими тканями, что делает их пригодными для медицинского и биомедицинского применения. Имплантаты и медицинские устройства с DLC-покрытием демонстрируют меньший износ, улучшенную биосовместимость и улучшенную интеграцию тканей, что приводит к улучшению результатов лечения пациентов и увеличению срока службы имплантатов.

**Универсальность:** покрытия DLC можно наносить на широкий спектр материалов, включая металлы, керамику, полимеры и композиты, что обеспечивает универсальность при обработке поверхности. Покрытия DLC могут быть адаптированы к конкретным требованиям, таким как твердость, смазывающая способность и адгезия, что делает их пригодными для различных отраслей промышленности, включая автомобильную, аэрокосмическую, электронную и медицинскую технику.

**Экологичность:** алмазные закалочные и сглаживающие покрытия обеспечивают экологические преимущества по сравнению с традиционными методами обработки поверхности. Покрытия DLC можно наносить с использованием экологически чистых процессов, таких как PVD и CVD, которые производят минимальные отходы, выбросы и опасные побочные продукты. Кроме того, долговечность покрытий DLC снижает необходимость частого повторного покрытия и утилизации компонентов с покрытием, что еще больше сводит к минимуму воздействие на окружающую среду[24].

**Метод обработки роликами** - это специализированный метод обработки поверхности, используемый для повышения износостойкости деталей машин, особенно в тех случаях, когда они подвергаются высокому уровню трения, истиранию и механическим нагрузкам. Этот метод включает контролируемое применение роликов к поверхности заготовок, придание сжимающих напряжений и вызывание полезных микроструктурных изменений, которые улучшают твердость, прочность и долговечность поверхности. Ниже подробно рассматривается метод обработки роликами как средство повышения износостойкости деталей машин и его преимущества:

**Принципы обработки роликов:**

**Оттиск валиком:** обработка роликами включает прижатие специально разработанных роликов к поверхности заготовок с контролируемой силой и скоростью. Валики могут иметь узоры, текстуры или углубления, адаптированные к конкретным требованиям применения. Когда ролики соприкасаются с поверхностью заготовки, они создают сжимающие

напряжения и деформации, вызывая полезные микроструктурные изменения в материале.

**Модификация поверхности:** Механическая деформация, вызванная обработкой роликами, приводит к ряду положительных эффектов на поверхности заготовки. Эти эффекты включают упрочнение, измельчение зерна, фазовое превращение и возникновение остаточных сжимающих напряжений. Эти изменения способствуют повышению твердости поверхности, прочности и износостойкости, улучшая производительность и долговечность деталей машин.

**Преимущества обработки роликов для повышения износостойкости:**

**Улучшенная твердость поверхности.** Валковая обработка значительно увеличивает твердость поверхности деталей машин, вызывая нагартование и способствуя образованию мелкозернистой микроструктуры. Закаленный поверхностный слой более устойчив к истиранию, эрозии и деформации, что приводит к увеличению срока службы и снижению скорости износа.

**Повышенная износостойкость:** сжимающие напряжения и микроструктурные изменения, вызванные обработкой роликами, повышают износостойкость деталей машин, особенно при частом контакте и высоких нагрузках. Закаленный поверхностный слой демонстрирует повышенную стойкость к абразивному, адгезионному и усталостному износу, что приводит к снижению потерь материала и увеличению интервалов между техническим обслуживанием и заменой.

**Уменьшение трения и истирания.** Обработка роликами может помочь уменьшить трение и истирание между сопрягаемыми поверхностями, обеспечивая более плавный контакт и уменьшая шероховатость поверхности. Сжимающие напряжения, возникающие при обработке роликами, препятствуют образованию и распространению неровностей на поверхности, сводя к минимуму силы трения и предотвращая повреждение поверхности, связанное с истиранием и заеданием.

**Стабильность размеров:** обработка роликами может улучшить стабильность размеров деталей машин за счет уменьшения деформации поверхности и минимизации изменений размеров во время работы. Сжимающие напряжения, возникающие при обработке роликами, противодействуют растягивающим напряжениям, создаваемым внешними нагрузками, помогая поддерживать точность размеров и предотвращая деформацию или коробление компонентов.

**Пригодность для различных материалов.** Валковая обработка применима к широкому спектру материалов, включая металлы, сплавы, керамику и композиты. Эта универсальность позволяет повысить износостойкость различных типов деталей машин, независимо от состава материала или твердости.

**Экономичная обработка поверхности.** Валковая обработка предлагает экономически эффективное решение для повышения износостойкости по сравнению с альтернативными методами обработки поверхности, такими как

нанесение покрытия или термообработка. Этот процесс требует минимального оборудования и может быть интегрирован в существующие производственные процессы с относительно небольшими капиталовложениями, что делает его привлекательным вариантом для малых и средних производственных предприятий.

**Неразрушающий процесс:** метод обработки роликами — это неразрушающий метод обработки поверхности, который не изменяет объемные свойства материала и не ставит под угрозу его структурную целостность. В отличие от методов нанесения покрытий, которые могут включать дополнительные слои или границы раздела, подверженные расслоению или деградации, обработка валками модифицирует существующую поверхность материала без введения внешних покрытий или слоев[25].

**Метод катодного распыления** - также известен как физическое осаждение из паровой фазы (PVD), представляет собой высокоэффективный метод покрытия поверхности, используемый для повышения износостойкости деталей машин. При катодном распылении в вакуумной камере создается высокоэнергетическая плазма, а атомы или молекулы целевого материала (катода) выбрасываются на поверхность подложки (детали машины) с образованием тонкого, прочного слоя покрытия. Этот процесс изменяет свойства поверхности подложки, придавая ей повышенную твердость, износостойкость и другие желаемые характеристики. Вот углубленное исследование катодного распыления как метода повышения износостойкости деталей машин:

**Принципы катодного распыления:**

**Генерация плазмы.** Катодное распыление начинается с создания плазмы низкого давления внутри вакуумной камеры. Обычно это достигается путем подачи высоковольтного электрического разряда на газ (например, аргон) внутри камеры, ионизации газа и генерации плазмы.

**Нанесение целевого материала:** твердый целевой материал, часто металл или керамика, помещается в вакуумную камеру в качестве катода. Когда ионы плазмы сталкиваются с материалом мишени, они передают кинетическую энергию атомам или молекулам мишени, заставляя их выбрасываться с поверхности катода.

**Формирование тонкой пленки:** выброшенные целевые атомы или молекулы проходят через вакуумную камеру и осаждаются на поверхность подложки (детали машины), образуя тонкопленочное покрытие. Этот слой покрытия прилипает к поверхности подложки, изменяя ее поверхностные свойства и обеспечивая повышенную износостойкость.

**Преимущества катодного напыления для повышения износостойкости:**

**Повышение твердости:** катодное распыление позволяет наносить тонкопленочные покрытия со значительно повышенной твердостью по сравнению с материалом подложки. Эти покрытия могут иметь значения твердости, сравнимые или превышающие твердость закаленной стали,

обеспечивая превосходную стойкость к абразивному износу, царапинам и повреждениям поверхности.

Улучшение износостойкости: тонкопленочные покрытия, полученные методом катодного распыления, обладают исключительной износостойкостью благодаря высокой твердости, гладкой поверхности и сцеплению с подложкой. Эти покрытия способны выдерживать длительное воздействие абразивных и эрозионных сил, снижая потери материала и продлевая срок службы деталей машин.

Сглаживание поверхности. Катодное распыление также может способствовать сглаживанию шероховатостей и неровностей поверхности подложки. Тонкопленочное покрытие образует гладкий равномерный слой на поверхности подложки, уменьшая трение и улучшая смазку поверхности, что еще больше повышает износостойкость и снижает вероятность повреждения поверхности.

Химическая инертность. Многие материалы, используемые в качестве мишеней при катодном распылении, такие как нитрид титана (TiN), нитрид хрома (CrN) и алмазоподобный углерод (DLC), демонстрируют превосходную химическую инертность и устойчивость к коррозии. Покрытия, полученные из этих материалов, могут защитить детали машин от химического воздействия, окисления и воздействия окружающей среды, повышая как износостойкость, так и устойчивость к коррозии.

Индивидуально подобранные свойства покрытия. Катодное распыление обеспечивает гибкость в выборе целевых материалов и параметров нанесения, позволяя точно контролировать свойства покрытия, такие как состав, толщина, твердость и адгезия. Такая универсальность позволяет настраивать покрытия в соответствии с конкретными требованиями к износостойкости различных деталей машин и условий эксплуатации.

Равномерное покрытие покрытия: Катодное распыление обеспечивает равномерное покрытие поверхности подложки тонким пленочным покрытием даже на сложных геометрических формах и поверхностях. Такая однородность обеспечивает постоянство свойств покрытия и эксплуатационных характеристик по всей поверхности детали машины, максимизируя эффективность повышения износостойкости.

Экологичность: катодное распыление является относительно экологически чистым методом нанесения покрытия по сравнению с традиционными процессами нанесения покрытия, которые часто включают использование опасных химикатов и образуют токсичные отходы. PVD-покрытия, полученные методом катодного напыления, обычно требуют минимальной последующей обработки или вообще не требуют ее и производят минимальное количество отходов, что делает их устойчивым и экологически чистым вариантом повышения износостойкости деталей машин[25].

**Метод ионного осаждения** – метод также известен как ионная имплантация или осаждение с помощью ионного луча, представляет собой

метод модификации поверхности, используемый для повышения износостойкости деталей машин. В этом методе энергичные ионы ускоряются и направляются к поверхности материала подложки, где они проникают в поверхностные слои, вызывая полезные изменения в микроструктуре и свойствах материала. Ионное осаждение можно использовать для увеличения твердости поверхности, улучшения износостойкости и улучшения других свойств поверхности, критически важных для производительности деталей машин.

Принципы ионного осаждения:

Ускорение ионов. Осаждение ионов начинается с генерации пучка энергичных ионов, обычно с использованием источника ионов, такого как радиочастотный (РЧ) генератор ионов или источник плазмы. Эти ионы ускоряются до высоких скоростей с помощью электрического или магнитного поля, достигая энергий от нескольких кэВ до нескольких МэВ.

Поверхностное взаимодействие: ускоренные ионы направляются к поверхности материала подложки, где они взаимодействуют с атомами или молекулами в поверхностных слоях. При ударе ионы проникают в материал, вытесняя атомы, создавая вакансии и вызывая структурные изменения в решетке.

Глубина имплантации. Глубина проникновения ионов в материал зависит от таких факторов, как энергия ионов, масса ионов, материал подложки и температура. Обычно глубина ионной имплантации варьируется от нескольких нанометров до нескольких микрометров, при этом неглубокие имплантации используются для модификации поверхности, а более глубокие имплантации — для изменения объемных свойств.

Модификация поверхности: имплантация ионов в поверхностные слои материала подложки вызывает различные положительные эффекты, включая повышение твердости поверхности, улучшение износостойкости, повышение коррозионной стойкости и снижение трения. Эти эффекты являются результатом изменений микроструктуры, состава и свойств поверхностных слоев, вызванных ионной бомбардировкой.

Преимущества ионного осаждения для повышения износостойкости:

Повышенная твердость поверхности. Ионное осаждение может значительно повысить твердость поверхности деталей машин за счет введения в поверхностные слои упрочняющих элементов, таких как ионы углерода, азота или металлов. Имплантированные ионы взаимодействуют с материалом подложки, образуя твердые растворы, соединения или фазы, повышающие твердость поверхности и устойчивость к износу.

Улучшенная износостойкость: повышенная твердость поверхности и модифицированная микроструктура, возникающая в результате ионного осаждения, способствуют повышению износостойкости деталей машин. Закаленные поверхностные слои обладают меньшей восприимчивостью к абразивному износу, адгезионному износу и поверхностной усталости, что

приводит к увеличению срока службы и снижению требований к техническому обслуживанию.

**Индивидуальные свойства покрытия:** ионное осаждение обеспечивает гибкость в управлении свойствами поверхностных слоев путем регулирования таких параметров, как энергия ионов, доза ионов, температура имплантации и материал подложки. Это позволяет адаптировать покрытия в соответствии с конкретными требованиями к износостойкости для различных деталей машин и условий эксплуатации.

**Минимальное изменение подложки.** Ионное осаждение — это метод неразрушающей модификации поверхности, который не изменяет объемные свойства или размеры материала подложки. В отличие от традиционных методов термообработки, которые могут вызвать деформацию, растрескивание или металлургические изменения в подложке, ионное осаждение выборочно модифицирует поверхностные слои, сохраняя при этом свойства основного материала.

**Универсальность:** ионное осаждение можно применять к широкому спектру материалов подложек, включая металлы, керамику, полимеры и композиты. Такая универсальность позволяет повысить износостойкость различных типов деталей машин, независимо от состава материала, геометрии или сложности.

**Контроль глубины:** ионное осаждение позволяет точно контролировать глубину проникновения ионов в материал, позволяя избирательно модифицировать поверхностные слои, не влияя на объемные свойства. Такой контроль глубины позволяет создавать индивидуальные конструкции покрытия с мелкой имплантацией для поверхностного упрочнения и более глубокой имплантацией для улучшения объемных свойств.

**Экологичность:** ионное осаждение является относительно экологически чистым методом модификации поверхности по сравнению с традиционными процессами нанесения покрытия, которые часто включают использование токсичных химикатов и образуют опасные отходы. Ионная имплантация требует минимальных расходных материалов и производит минимальное количество отходов, что делает ее экологически безопасным вариантом повышения износостойкости деталей машин[26].

**Термическое осаждение,** также известное как термическое напыление или термическое покрытие, представляет собой метод модификации поверхности, используемый для повышения износостойкости деталей машин. В этом методе материал покрытия нагревается до расплавленного или полурасплавленного состояния, а затем наносится на поверхность материала подложки с помощью термического распылителя. При ударе материал покрытия затвердевает, образуя тонкий липкий слой, который изменяет свойства поверхности подложки. Термическое осаждение может быть использовано для повышения твердости поверхности, улучшения износостойкости и обеспечения теплоизоляции деталей машин, подвергающихся суровым условиям эксплуатации. Вот углубленное

исследование термического осаждения как метода повышения износостойкости деталей машин:

Принципы термического осаждения:

Подготовка материала покрытия. При термическом осаждении материал покрытия в виде порошка, проволоки или стержня вводится в пистолет для термического распыления. Материал покрытия обычно выбирают на основе его желаемых свойств, таких как твердость, износостойкость, коррозионная стойкость или теплопроводность.

Источник тепла: материал покрытия нагревается до расплавленного или полурасплавленного состояния с использованием источника тепла, такого как пламя, плазменная или электрическая дуга. Интенсивное тепло, выделяемое источником тепла, плавит или размягчает материал покрытия, подготавливая его к нанесению на подложку.

Движение: расплавленный или полурасплавленный материал покрытия продвигается по поверхности подложки с помощью высокоскоростного потока газа, такого как сжатый воздух, азот или инертный газ. Кинетическая энергия газового потока ускоряет материал покрытия по направлению к подложке, где он ударяется о поверхность и прилипает к ней.

Формирование покрытия: при ударе расплавленный или полурасплавленный материал покрытия быстро затвердевает, образуя тонкий когезивный слой, который связывается с поверхностью подложки. Слой покрытия соответствует топографии подложки, заполняя неровности поверхности и образуя механически прочную связь с материалом подложки.

Преимущества термического осаждения для повышения износостойкости:

Повышенная твердость поверхности. Термическое осаждение может значительно повысить твердость поверхности деталей машин за счет нанесения на поверхность подложки твердых, износостойких покрытий. Материалы покрытия, такие как керамика, карбиды и металлические сплавы, обычно используются для повышения твердости поверхности и устойчивости к абразивному износу.

Улучшенная износостойкость. Твердые износостойкие покрытия, полученные методом термического осаждения, обеспечивают повышенную износостойкость деталей машин, подвергающихся абразивному, эрозионному или адгезионному износу. Эти покрытия действуют как защитный барьер, уменьшая потери материала, продлевая срок службы компонентов и сводя к минимуму необходимость частого обслуживания или замены.

Индивидуально подобранные свойства покрытия. Термическое осаждение позволяет выбирать материалы покрытия с особыми свойствами, адаптированными к требованиям к износостойкости в конкретной области применения. Толщину покрытия, состав, микроструктуру и пористость можно контролировать для оптимизации производительности и долговечности в различных рабочих средах и условиях.

Универсальность: термическое осаждение применимо к широкому спектру материалов подложки, включая металлы, керамику, полимеры и композиты. Такая универсальность позволяет повысить износостойкость различных типов деталей машин, независимо от состава материала, геометрии или сложности.

Теплоизоляция. Помимо износостойкости, термоосаждение может обеспечить теплоизоляционные свойства деталям машин, работающих в условиях высоких температур. Покрытия с низкой теплопроводностью могут уменьшить теплопередачу и тепловое расширение, улучшая производительность и надежность компонентов в экстремальных температурных условиях.

Экономичная обработка поверхности. Термическое осаждение предлагает экономически эффективное решение для повышения износостойкости по сравнению с альтернативными методами обработки поверхности, такими как нанесение покрытия или замена материала. Этот процесс требует минимального оборудования и может выполняться с использованием стандартного промышленного оборудования, что делает его пригодным как для мелкомасштабного, так и для крупномасштабного производства.

Экологичность: термическое осаждение является относительно экологически чистым методом обработки поверхности по сравнению с традиционными процессами нанесения покрытия, которые часто включают использование токсичных химикатов и приводят к образованию опасных отходов. Термическое напыление производит минимальные отходы и выбросы, а многие материалы покрытия экологически безопасны, что делает его экологически безопасным вариантом повышения износостойкости деталей машин[27].

## 2 МЕТОДЫ ПОКРЫТИЯ НАПЫЛЕНИЕМ

### 2.1 Холодное газодинамическое напыление

Холодное газодинамическое напыление (также называемое холодным напылением или кинетическим напылением) современная технология напыления процессов вида термического напыления (включая плазменное напыление и напыление ВГП). При холодном напылении сжатые инертные газы (обычно азот и гелий) ускоряют частицы порошка (обычно металлические частицы диаметром от 10 до 100 нм) в сопле Лавала до сверхзвуковой скоростью (до 1000 м/с) до поверхности детали. Применяется подогрев технологического газа до температуры до 1000 °С. Для достижения более высокой скорости распыление газа, проходящего через горло сопла и, следовательно, более высокие скорости частиц. Рисунок 1 схематично иллюстрирует установку ХГН. Частицы аэрозоля впрыскивается внутрь сопла для направления на подложку, подлежащую покрытию. При распылении на металл частицы пластически деформируются, что приводит к течению материала направляя наружу контактную зону, нарушая тонкую поверхностные оксидные пленки (эффект очистки).

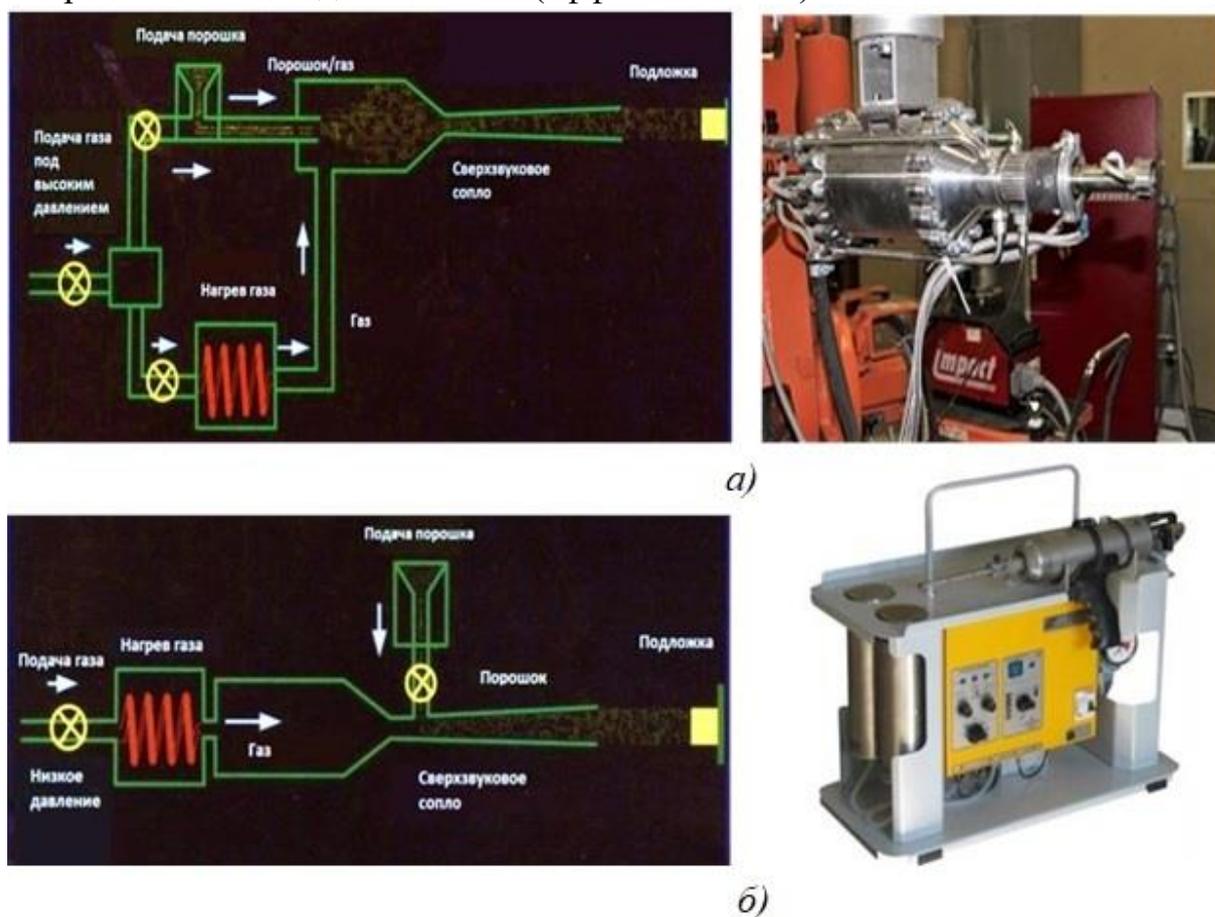


Рисунок 1 - Установки ХГН-покрытий :  
а) с высоким давлением; б) с низким давлением [5]

Частицы поверхности локально нагреваются при высокой деформации скорости, вызывающие термическое размягчение материала до пороговых значений, превышающих компенсацию деформационного упрочнения и скорости деформации упрочнение, что приводит к адиабатической сдвиговой неустойчивости. Это приводит к тесному контактному контакту между открытыми металлическими поверхностями, позволяющему механически производить металлургическое соединение, приводящее к образованию покрытия. На рисунке 2 представлены примеры ХГН [2].

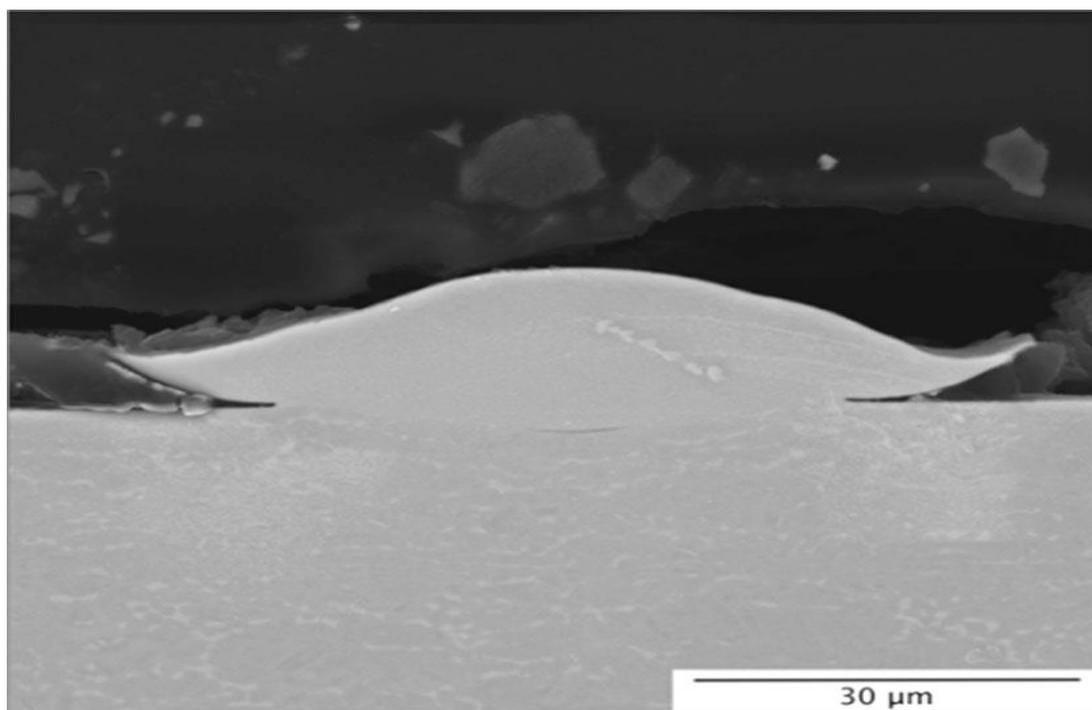


Рисунок 2 - Одиночные покрытие частиц TiAlV64 холодным напылением на титане

На рисунке 2 показана возможность покрытия частиц TiAlV64 с холодным напылением на титане, показывающие (слева) поперечное сечение, (в центре) уплощение частиц и струи в перспективе, и (справа) частицу, которая была удалена с слоя. Пример демонстрирует, что металлургическое соединение с помощью ASI происходит на границах раздела частиц с подложкой, обеспечивая более высокую прочность по сравнению со слоем материала [6].

Частицы TiAlV64 после распыления по титановой поверхности, демонстрируя высокую степень локальной деформации и металлургическая связь на границах раздела удаляемой частицы. Эффективность осаждения может достигать более 90%. В результате получаются покрытия с очень низким уровнем пористости. Процесс поддержания температуры газа обычно находится в диапазоне, при котором распыляемые частицы никогда не подвергаются воздействию температур, близких к точке их плавления. Следовательно, процесс называют как твердотельный процесс. Таким

образом, можно распылять чувствительные к температуре материалы, такие как титан (и сплавы), медь (и сплавы), алюминий (и сплавы), нанокристаллические материалы и металлические стекла без не влияя на фазовый состав порошкового сырья и не оксидное загрязнение [3].

Покрyтия ХГН обычно присутствуют сжимающие остаточные напряжения, позволяющие строить толстые покрyтия/слои. Таким образом, ХГН можно использовать не только для построения покрyтий, но и для ремонта/восстановления/восстановления деталей в качестве процесс аддитивного производства [4].

Ремонт холодным напылением до сих пор был в основном направлен на восстановление размеров обеспечивая при этом защиту от коррозии /окисления /износа. Металлический порошок, распыленный для восстановления детали, может быть, а может и нет быть из того же металла, что и восстанавливаемая деталь.

Достижения в области науки и техники для удовлетворения испытания. За последние два десятилетия ХГН превратился из метода лабораторного осаждения в надежный процесс для применений, требующих высокой чистоты покрyтия сохранение уникальных свойств сырья. На рисунке 3 показана схема центрального процессора (ЦП). блок охлаждения, обработанный ХГН (Ref 15). Различные производители предлагают ряд оборудования ХГН, каждый из которых представляет свою собственные преимущества и имеющие свою потенциальную нишу рынка и с некоторыми успешными коммерческими приложениями, либо в качестве покрyтия или в качестве процесса ремонта/восстановления.

Многие материалы были успешно распылены с помощью ХГН.включая Al, Cu, Ni, Ti, Ag, Zn, Ta, Nb и их сплавы а также композиты, такие как Cu-W, Al-SiC, Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> иназовите несколько . В настоящее время ХГН используется в военная, аэрокосмическая и энергетическая отрасли.

Текущие проблемы. Среди проблем, с которыми сталкивается ХГН, главной является востребованность на рынке и диверсификация. Несмотря на то, что многие установки были адаптированы для военной, аэрокосмической и энергетической промышленности, ХГН по-прежнему не имеет востребованности на «массовом рынок», достигнутого процессами плазменного напыления и напыления HVOF, и еще не вызвал интереса в других областях. Это можно объяснить отсутствием выхода на общие рынки, которые представляют большой потенциал для ХГН.

Немногие ремонтные мастерские имеют действующие и доступные системы ХГН, но требуется время, чтобы получить новые спецификации, предназначенные для покрyтий ХГН. В частности, циклы утверждения ремонта могут занимать некоторое время и быть дорогостоящими. Таким образом, крайне важно постоянно привлекать промышленность к информированию и обучению потенциальных пользователей, не знакомых с напылением металла, о преимуществах, проблемах и, в конечном счете, успехах ХГН.

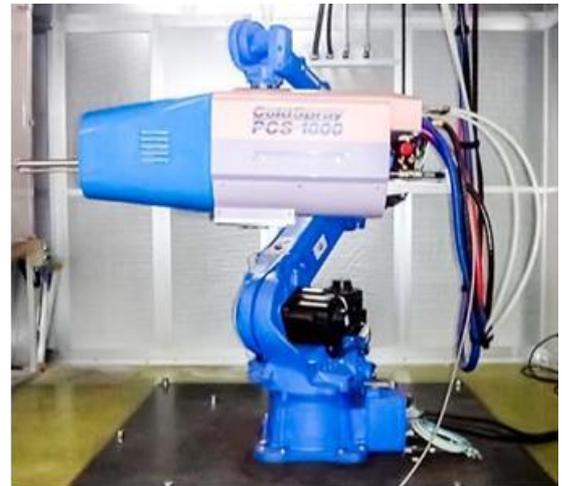
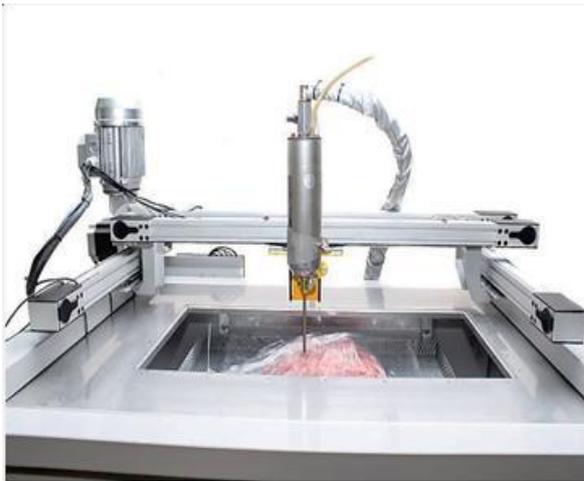


Рисунок 3 - Автоматизированные комплексы для нанесения ХГН-покрытий [7]

Компания продающая ХГН сталкивается с техническими трудностями в связи с тем, что в продаже имеется всего несколько порошков, специально предназначенных для этого процесса. Таким образом, подавляющее большинство покрытий и ремонтов, производимых ХГН, не использует оптимальные исходные порошки. Текущие усилия направлены на разработку спецификаций процесса и исходного сырья, чтобы обеспечить повышенную производительность за счет специализированных порошков исходного сырья в отношении фазового состава и чистоты, влияющих на необходимую деформируемость. Спецификации также направлены на настройку распределения размеров порошка, поскольку более мелкие и более крупные частицы могут быть не в состоянии воздействовать на подложку с достаточной скоростью, чтобы вызвать пластическую деформацию и сцепление.

За последние несколько лет ХГН рассматривался как потенциальный процесс аддитивного производства (АП), который мог бы дополнить процессы АП с порошковым слоем. Простые детали АМ были изготовлены методом холодного напыления, но те, о которых сообщалось, были ограничены небольшими размерами. Переход использования ХГН за рамки покрытий и размерных реставраций к сложным приложениям аддитивного производства сопряжен с рядом технических проблем, поскольку ХГН сталкивается с рядом коммерческих барьеров, как и другие методы АП. Основными преимуществами ХГН как аддитивного процесса по сравнению с лазерными процессами являются, главным образом, минимальные затраты тепла в процессе и существенно более высокие скорости осаждения, которые могут быть достигнуты. Эти преимущества потенциально позволяют использовать процесс без необходимости инертной среды. Что касается использования термообработки для постобработки, необходимые усилия могут быть аналогичны усилиям для лазерной АП.

За последние два десятилетия ХГН превратился из метода лабораторного осаждения в надежный процесс для применений, требующих высокой чистоты покрытия и сохранения уникальных свойств исходного сырья. Однако

адаптация существующих методов производства порошкового сырья или разработка новых инновационных процессы производства порошков исходного сырья, адаптированные к ХГН, имеют первостепенное значение для дальнейшего развития технологии.

Потенциал ХГН занять нишу в качестве процесса аддитивного производства неоспорим, но он находится на ранней стадии. На этапе проектирования методологии должны быть адаптированы к специфике ХГН (например, характерное разрешение профиля, связанного с геометрией сопла и динамикой потока частиц газа) с использованием таких инструментов, как моделирование процесса, разработка стратегии построения и инструмент программирования с помощью автоматизированного проектирования или автоматизированного производства (CAD/CAM). Хотя достижения на уровне сырья (оптимизация сырья и/или специальные порошки), а также в разработке оборудования (например, лазерное распыление, механическая обработка на месте и диагностика) позволяют использовать широкий спектр материалов могут быть распылены, получение свойств материала, эквивалентно массе, остается проблемой, и необходимо разработывать соответствующие операции постобработки. Для перехода от мелкосерийного к массовому производству также требуется дополнительное развитие в области неразрушающего контроля (НК), автоматизации и управления технологическим процессом, обеспечение надлежащего выполнения применимых мер по охране окружающей среды, здоровья и безопасности (ОСБ). С инженерной точки зрения, неуверенность в том, будут ли сборки АП работать аналогично обычным деталям, требует разработки строгих квалификационных процедур и критериев приемки.

Чтобы раскрыть весь потенциал ХГН, недавние усилия включают междисциплинарные подходы, включающие базовые науки о материалах и технологии производства. В новых разработках материалов функциональные свойства очень хорошо адаптированы к приложениям. До сих пор только несколько методов, таких как ХГН, сводящих к минимуму тепловложение, могут сохранить или гарантировать желаемое поведение материалов. Возможность сохранить функциональные свойства порошка в покрытиях или массивных деталях обещает совершенно новый спектр разработок и рынков[28].

## **2.2 Высокоскоростное кислородно-топливное напыление**

Высокоскоростное кислородно-топливное распыление (HVOF- High Velocity Oxygen Fuel) - это усовершенствованный процесс термического напыления, используемый для нанесения высококачественных покрытий на подложки. Он включает в себя сжигание топливного газа, обычно водорода или углеводорода, смешанного с кислородом в камере сгорания высокого давления (рис. 4). Образующиеся горячие газы выбрасываются через

сужающееся-расширяющееся сопло со сверхзвуковой скоростью, создавая высокоскоростное пламя, которое плавит и ускоряет попадание порошкообразных материалов покрытия на поверхность детали.

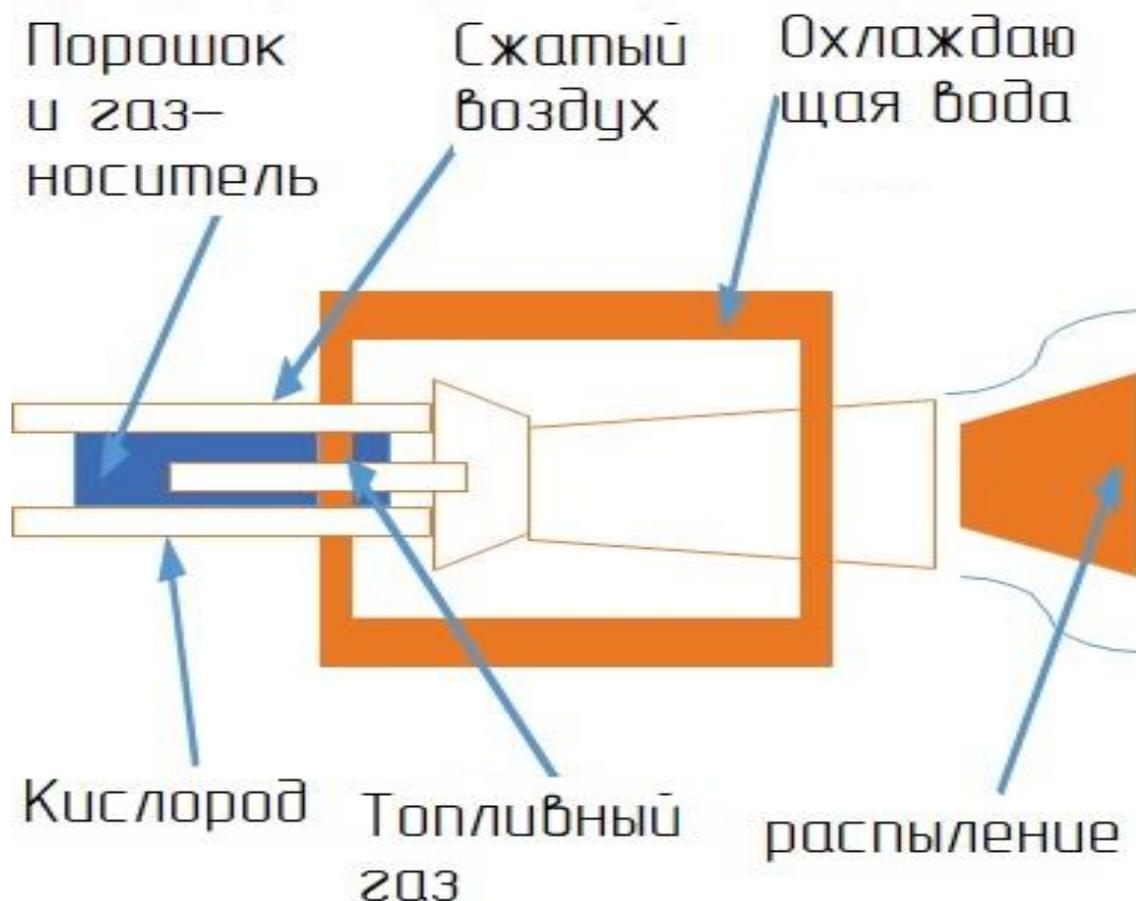


Рисунок 4 - Газовый термораспылительный пистолет высокоскоростного кислородно-топливное распыление

Он использует кислород и смеси топливного газа по направлению к субстрату. Газы типа  $H_2$ ,  $C_3H_8$ ,  $CH_4$ , пропилен, ацетилен, керосин SPRAL 29, этилен, крилен, сжиженный нефтяной газ и т. д. помогают в горение топлива. Система HVOF состоит из распылителя и трех агрегатов. Есть разные агрегаты для подачи порошка, для измерения и контроля потока газов, а также для подачи воздуха и газа-носителя. Питатель порошка состоит из бункера, одного вибратора для воздуха, счетчика для контроля скорости подачи и контроллера. материал, подлежащий покрытию, впрыскивается из устройства подачи через газ-носитель и, наконец, в пистолет, где происходит горение. Изменяя скорость подачи, можно определить количество порошка, необходимое для нанесения покрытия.

Имеет место высокая скорость и большая сила удара ускоренных частиц порошка. Покрытия, разработанные методом HVOF, имеют меньшее количество пор. Газокислородные покрытия имеют более высокую прочность

сцепления, чем другие методы напыления плазмой, пламенем и электрической дугой [6]. Типичные особенности покрытий HVOF, такие как межпластинчатые пятна, пористость, полурасплавленный верхний слой из-за высокоскоростных полурасплавленных частиц, показаны на рисунке 5.

Параметры процесса, такие как расстояние распыления, скорость потока топлива и кислорода, скорость подачи порошка, скорость частиц, температура пламени, оказывают существенное влияние на свойства покрытия. К наиболее важным характеристикам покрытия относятся уровень пористости, содержание оксидов, микротвердость, прочность сцепления и трибологические характеристики.

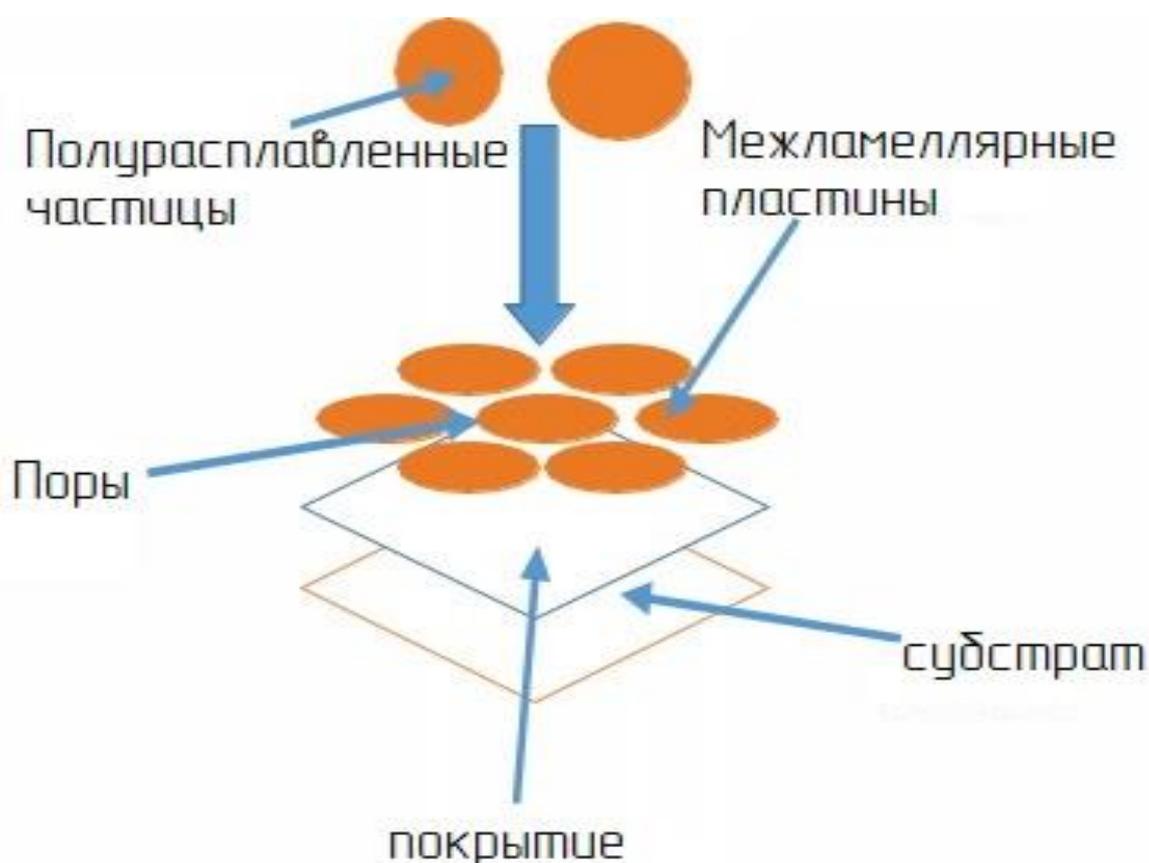


Рисунок 5 - Схема, показывающая типичные особенности покрытий высокоскоростного кислородно-топливного распыления

Физико-механические свойства покрытий. Деформация частицы выражена в жидком состоянии по сравнению с расплавленным. Покрытия имеют компактную (плотную) структуру. Твердость покрытия обусловлена высоким содержанием частиц К.Э. во время техники HVOF. В результате капли реже вступали в реакцию с кислородом. Все это происходило во время полета частиц и их сплющивания. Диффузионный механизм позволял процессу окисления протекать медленно. Высокий к.э. частиц (пластическое

состояние) допускается сплющивание в процессе деформации. В результате образовалось плотное и беспористое покрытие. Количество кислорода в покрытиях было низким.

Микро- и наноразмерные покрытия из карбида вольфрама-кобальта (WC-12%Co) были термически напылены на углеродистую сталь с использованием как плазмы, так и распыления HVOF. Расход топлива был принят равным 0,0063 л/с. Скорость подачи порошка для частиц микро- и наноразмеров принималась равной 77 и 90 г/мин соответственно. Расстояние распыления для процесса HVOF было принято равным 381 мм, тогда как для плазменного распыления оно составляло 127 мм [7]. Для HVOF micro покрытия были обозначены как H1, а для H2 – как HVOF nano. Все эти параметры привели к получению очень плотных покрытий HVOF (пористость < 1,3%) и очень низкого (менее 1,69%) количества оксида. Эти особенности очевидны на рисунке 6.

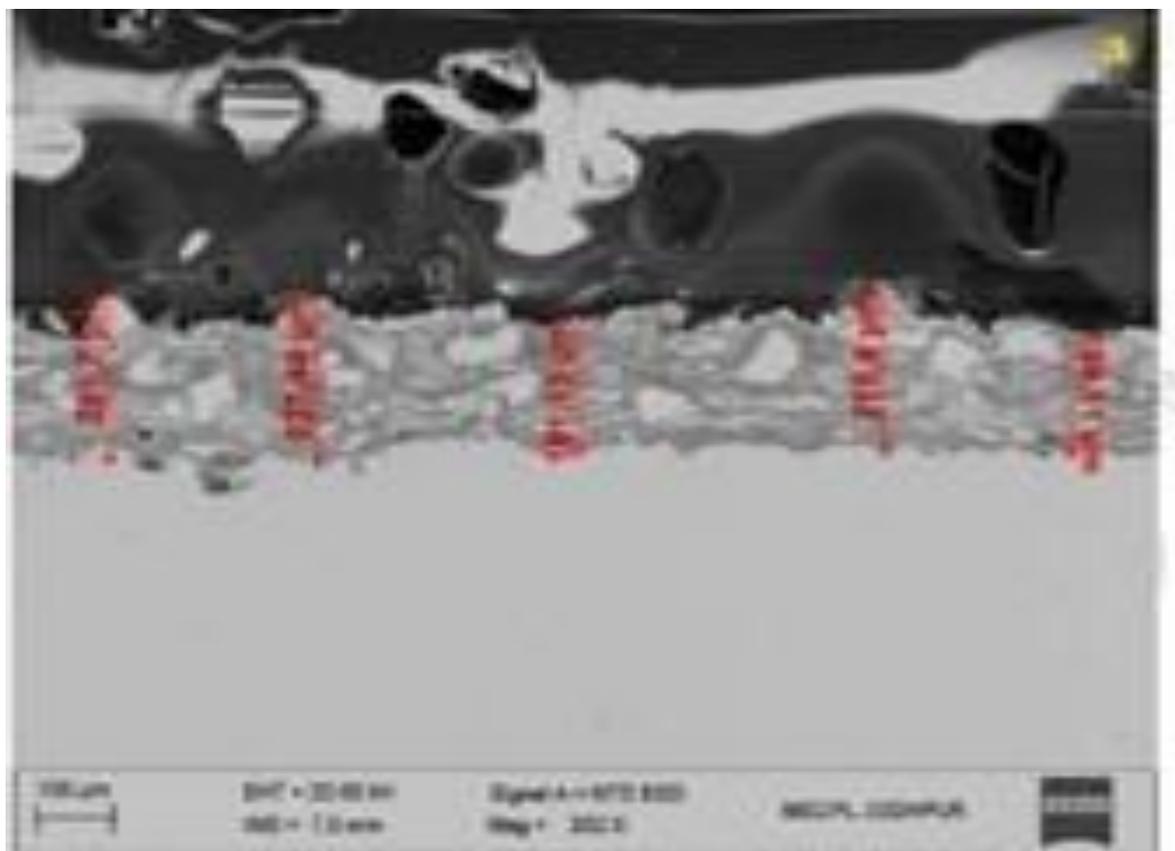


Рисунок 6 - Покрытия H1 с пустотами и острыми краями

Было обнаружено, что твердость покрытия, полученного путем напыления микроразмерного порошка с помощью HVOF, при усреднении составила 1066 HV (H1). В то время как для наноразмерных порошковых покрытий, полученных с помощью (H<sub>2</sub>), напыленных методом HVOF, оно составило 1367 HV. Это произошло за счет распределения наноразмерных порошков на большой площади. Более тонкое распределение

наноструктурированных карбидов в матрице также обусловило большую твердость покрытия H2.

Как указано в исследованиях Лекату и др. [8], авторы работы провели аналогичный анализ. Они исследовали традиционные и нано-покрытия WC 12% Co HVOF, нанесенные на Al7075 T6. Они исследовали, что наноразмерные порошковые покрытия имеют значительно меньшую пористость. Их механические свойства, такие как микротвердость и вязкость разрушения, также были лучше. Но степень обезуглероживания была выше, по сравнению с традиционными аналогами.

Далее авторами было изучена возможность покрытия обрабатываемой поверхности порошком сплава  $Ni_3Ti$ , представлена СЭМ-микрофотография (рис.7) краев в режиме поперечного сечения, показывающая толщину поперечного сечения и пластинчатую микроструктуру [9].

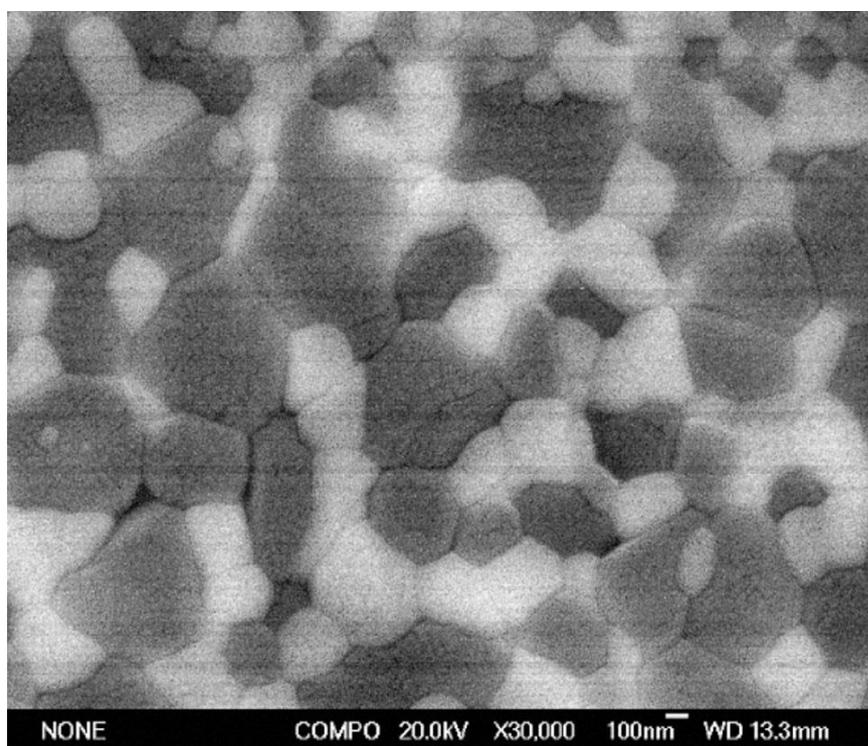


Рисунок 7 - СЭМ-микрофотография краев покрытия  $Ni_3Ti$  в режиме поперечного сечения [7], показывающая толщину поперечного сечения и пластинчатую микроструктуру [9]

При исследовании зафиксировали более высокую твердость и меньшую пористость [10] в трех покрытиях (самооплавляющийся сплав  $Cr_3C_2$ ,  $Cr_3C_2-Ni-Cr-Al-Y$ ,  $Cr_3C_2-Ni-Cr$ ), нанесенных распылением HVOF. Нанесение покрытий  $Cr_3C_2-Ni-Cr-Al-Y$  осуществлялось методом атмосферно-плазменного напыления (APS) на нимоновые диски. Они обнаружили, что покрытия CRNY, нанесенные APS, были более пористыми (6-12%), чем покрытия, нанесенные HVOF (3-8%). Параметры осаждения: расход кислорода (800, 870, 940 л/мин), расход керосина (20,8, 22,7, 24,6 л/ч) и расстояние осаждения (320, 350, 380

мм). В результате получена более высокая твердость покрытий ХВОФ (1100-1300 HV<sub>0,1</sub>) по сравнению с покрытиями, напыленными плазменным напылением (700-800 HV<sub>0,1</sub>)[29].

## 2.3 Плазменное напыление

Плазменное напыление - это усовершенствованный процесс термического напыления, используемый при нанесении покрытий на поверхности в различных отраслях промышленности для улучшения свойств подложек. Этот метод предполагает нанесение материала покрытия на поверхность подложки с помощью высокотемпературной плазменной струи.

Процесс начинается с подачи порошкообразного или проволочного материала покрытия в плазменную горелку, где он нагревается до чрезвычайно высоких температур, обычно в диапазоне от 10 000 до 15 000 градусов Цельсия. Эта температура заставляет материал плавиться или частично плавиться, образуя плазменный поток. Затем плазменный поток ускоряется через сопло и направляется к подложке, где он ударяется и быстро охлаждается, приликая к поверхности и образуя покрытие.

Плазменное напыление имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами нанесения покрытий. Во-первых, он позволяет наносить широкий спектр материалов, включая металлы, керамику и полимеры, обеспечивая универсальность состава покрытия в соответствии с конкретными требованиями применения. Кроме того, плазменное напыление позволяет создавать покрытия с превосходной адгезией, плотностью и однородностью, что приводит к получению высококачественных и однородных покрытий.

Еще одним ключевым преимуществом плазменного напыления является его способность наносить покрытия с индивидуальной микроструктурой и свойствами. Регулируя параметры процесса, такие как состав плазменного газа, расстояние распыления и температуру подложки, инженеры могут контролировать такие факторы, как пористость покрытия, фазовый состав и кристалличность, что позволяет оптимизировать характеристики покрытия для конкретных применений.

Распространение плазменного напыления на крупномасштабное производство привело к улучшению стабильности процесса, скорости осаждения, эффективности осаждения и экономики. Кроме того, ведется разработка средств управления технологическими процессами с использованием специализированного программного обеспечения, управляющего технологическим оборудованием (податчиком порошка, плазменной горелкой, устройством обработки деталей и т. д.) и датчиками, способными отслеживать характеристики частиц в полете (траектории, скорость и температура) и температура подложки значительно улучшила производительность и стабильность плазменного напыления. Однако необходимы дальнейшие шаги для удовлетворения более строгих требований

традиционных применений плазменного напыления (рис. 8), а также освоение развивающихся рынков, например. электронная промышленность, которая потребует дальнейшего совершенствования плазменных горелок.

Графически представлен исследования нестационарного и не-ЛТР газового течения плазменной струи внутри и снаружи плазмотрона с включением подложки в расчетную область, выполненный Треллесом [39].

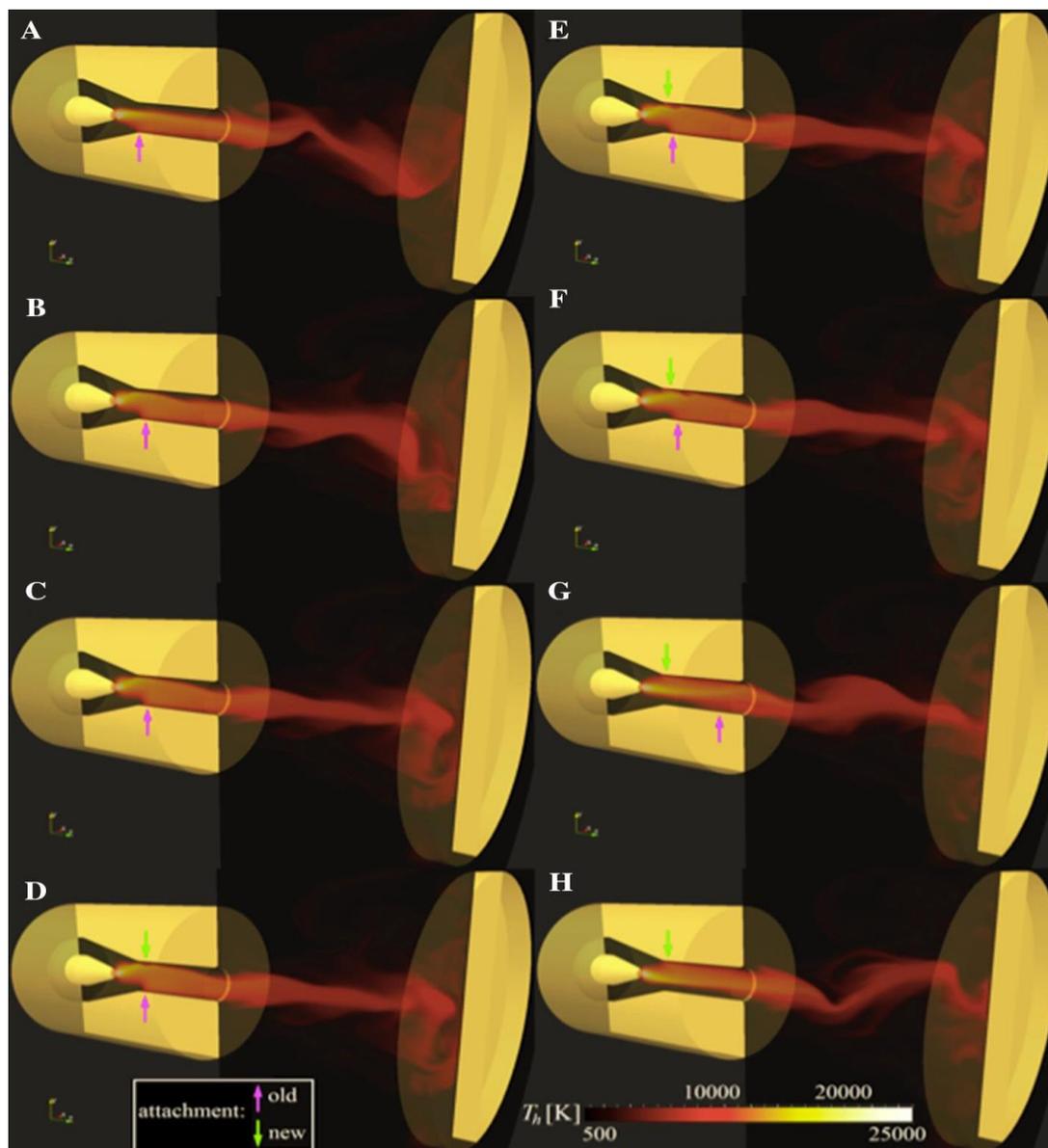


Рисунок 8 – Схема течения плазменной струи .

На рисунке показана динамика потока во время повторного присоединения дуги по температурному распределению тяжелых частиц в разное время; стрелками указано расположение исходной (старой) и сформированной (новой) анодных привязок дуги.

В массовом производстве потребуются плазменные горелки с более высокой мощностью (90 кВт) и скоростью осаждения, как те, которые

использовались в 80-х и 90-х годах для нанесения покрытий на большие валы бумагоделательных машин; также плазменные горелки с более широким диапазоном энтальпии и скорости газа, чем существующие горелки, и раздельное управление этими параметрами позволит лучше контролировать образование брызг и, следовательно, микроструктуру покрытия (например, получать плотные или пористые покрытия в зависимости от применения); а также плазменные горелки с фокусированным пятном распыления.

На основании критического анализа в области исследования дуговых плазмотронов определен ряд задач, позволяющих разработать нестационарные математические модели с учетом явлений неустойчивости, конструктивные элементы плазмотрона, учесть характеристики источника питания и осуществить верификацию численных расчетов с помощью результатов экспериментального исследования. Лучшее понимание дуговых явлений внутри плазмотрона и взаимосвязи между рабочими параметрами горелки (ток дуги, расход и состав газа, внутренняя геометрия, конструкция впрыска газа) и полями потока (энтальпия, температура, скорость, химический состав, турбулентность) также необходима. Поскольку измерения внутри горелки в настоящее время ограничиваются изменением во времени напряжения дуги, внутреннего давления, теплового КПД горелки и акустической эмиссии, математическое моделирование имеет важное значение для дальнейшей разработки плазменных горелок.

Ниже приведены результаты разработанной методики проведения экспериментальных исследований (рис. 9), целью которых является верификация нестационарной математической модели и представлены в графическом виде результаты численного моделирования и экспериментального исследования дугового плазмотрона с межэлектродными вставками, позволяющий осуществить верификацию нестационарной математической модели.

Введение и обработка в плазменной струе жидкости вместо порошка требует переосмысления механизмов управления формированием покрытий, а также адаптации плазмотрона и питателя сырья, параметров работы.

К особенностям плазменного напыления жидкостей относятся:

- Низкая удельная плотность жидкости, инжектируемой в плазменную струю, и малая инерция мелких частиц делают их очень чувствительными к пространственным и временным изменениям полей плазменного потока.

- Последовательность этапов обработки жидкости, а затем частиц или агломератов в плазменной струе. В случае суспензии они охватывают первичный и вторичный распад жидкости в зависимости от формы жидкости (сплошная струя или капли), свойств плазмы и жидкости (относительная скорость, плотность газа, поверхностное натяжение и вязкость жидкости), испарение растворителя, выделение твердое содержание в виде отдельных частиц или агломератов с возможным дроблением агломератов, плавлением частиц и агломератов, испарением и, в конечном итоге, повторным

затвердеванием перед воздействием на подложку. В случае растворов, помимо вышеуказанных явлений, растворенное вещество осаждается внутри капель по мере испарения растворителя, а ряд химических реакций (пиролиза) приводит к синтезу материала покрытия из химических предшественников (рис. 11).

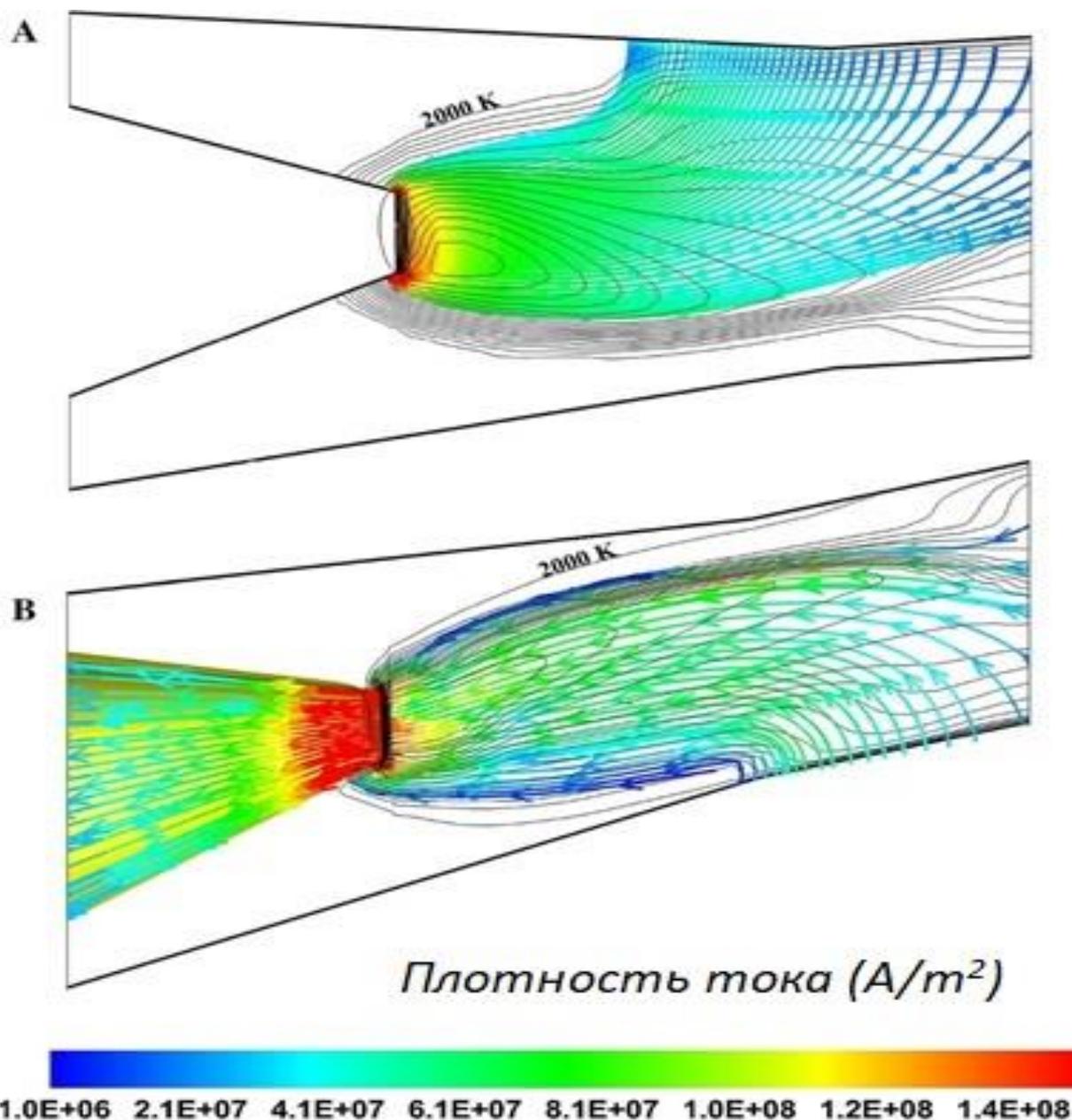


Рисунок 9 - Распределение плотности тока (цветовая шкала векторов) вблизи острия катода плазматрона с монокатодом постоянного тока и изотермы (черным цветом); а - с наложенным профилем плотности тока на поверхности катода; б) - с дуго-катодной связью (расчеты Алая и др. [23]). Ток дуги 600 А - плазменная газовая смесь аргона (45 слм) и водорода (15 слм)

- Эффект прерывистости и условия скольжения для передачи импульса,
- Между мелкими частицами и плазменным газом,

- Быстрое замедление мелких частиц, что приводит к сокращению дистанции распыления и увеличению теплового потока к подложке,
- Во время фазы удара частицы с низкой инерцией могут переноситься потоком и, таким образом, следовать по траекториям, почти параллельным поверхности подложки,
- После удара возможна дальнейшая обработка частиц и капель из-за высокой температуры подложки и теплового потока к подложке.

После почти 15 лет интенсивных исследований плазменное напыление в суспензии и растворе недостаточно развито, чтобы соответствовать промышленным стандартам, т.е. надежным и экономически эффективным процессам, которые легко внедрить в промышленной среде; особенно необходимо повысить стабильность процесса, эффективность осаждения и скорость осаждения (рис. 11).

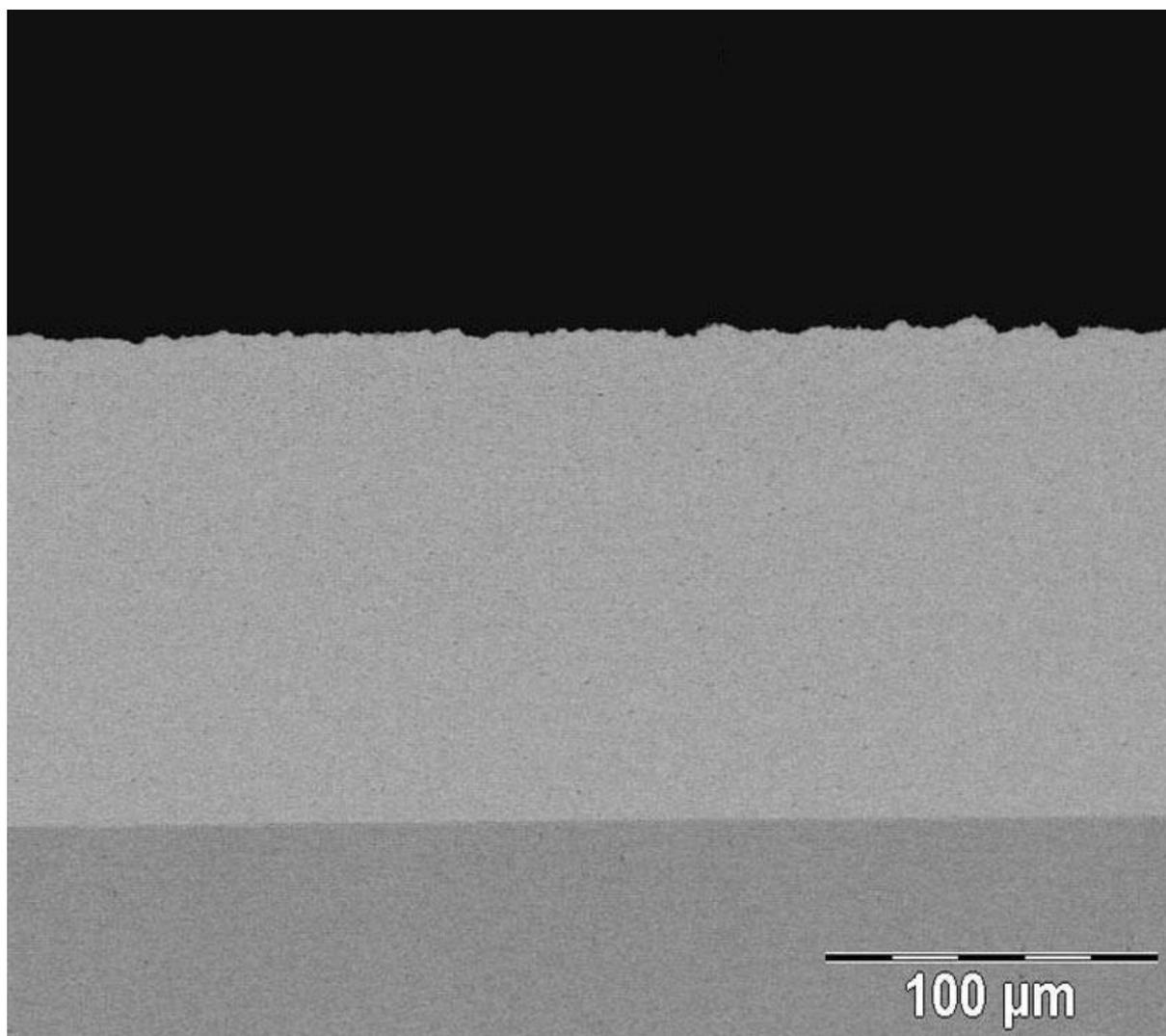


Рисунок 10 - Покрытие, нанесенное суспензионным плазменным напылением (диоксид циркония, стабилизированный иттрием), полученное Joulia et al[30].

Покрытие, нанесенное суспензионным плазменным напылением (Mg-Al-шпинель), полученное Schlegel et al имеет столбчатую структуру с поверхностью, напоминающей цветную капусту.

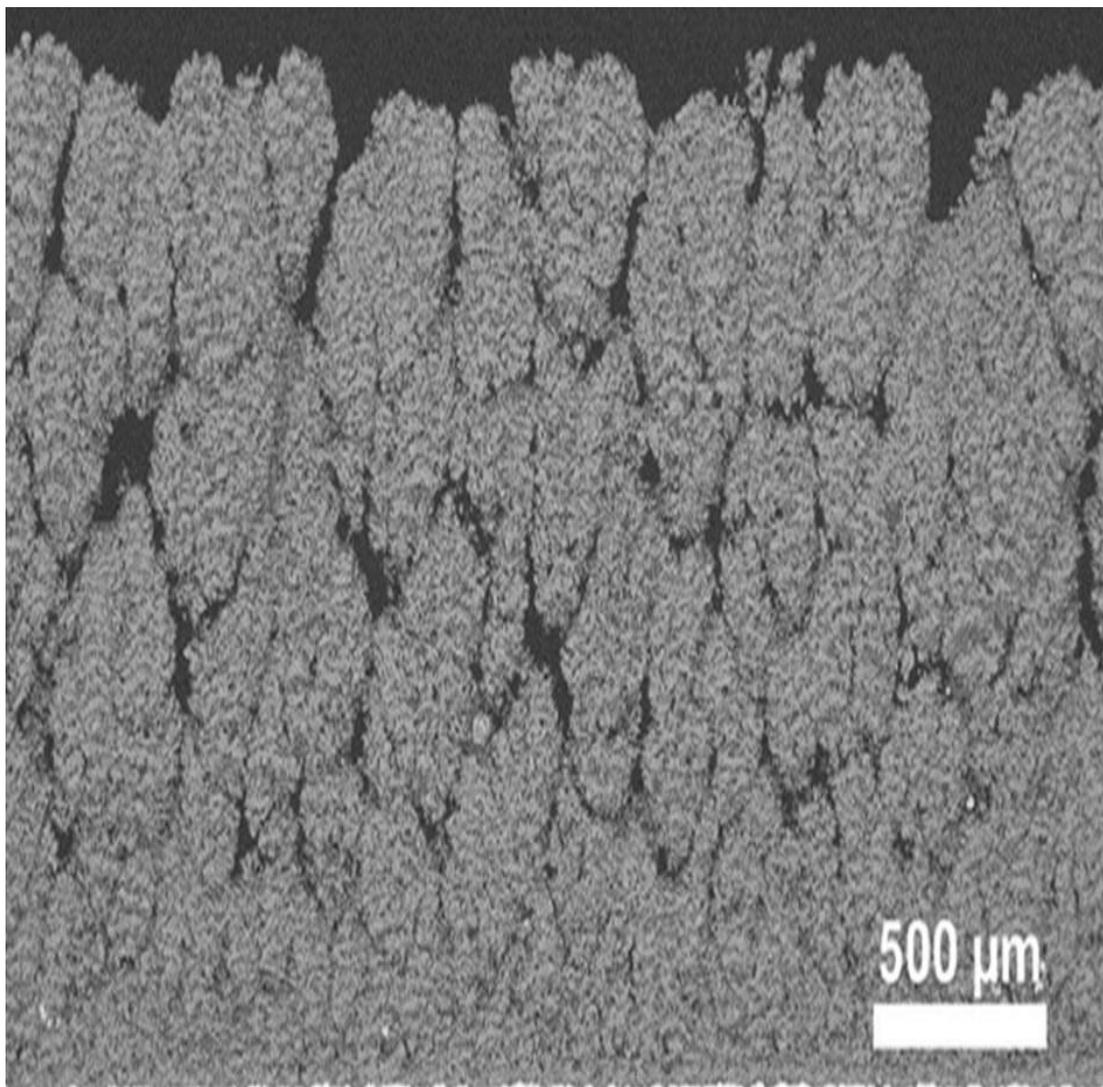


Рисунок 11 - Покрытие, нанесенное суспензионным плазменным напылением (Mg-Al-шпинель)[30]

Для решения этих задач и повышения технологической готовности необходимы дальнейшие достижения в области науки и техники. Однако, промышленные потребности в стабильных плазменных горелках не должны мешать исследователям исследовать новые идеи, поскольку импульсные плазменные струи со своевременным впрыском жидкости в плазменные кубе, предложенные Кроукой и др. [19]. Так, покрытие, напыленное плазмой очень низкого давления (стабилизированный иттрием диоксид циркония) толщиной около 40 мкм, полученное Smith et al. имеет столбчатую структуру, аналогичную покрытиям, осажденным из паровой фазы. Результаты продемонстрированы на рисунке 13[30].

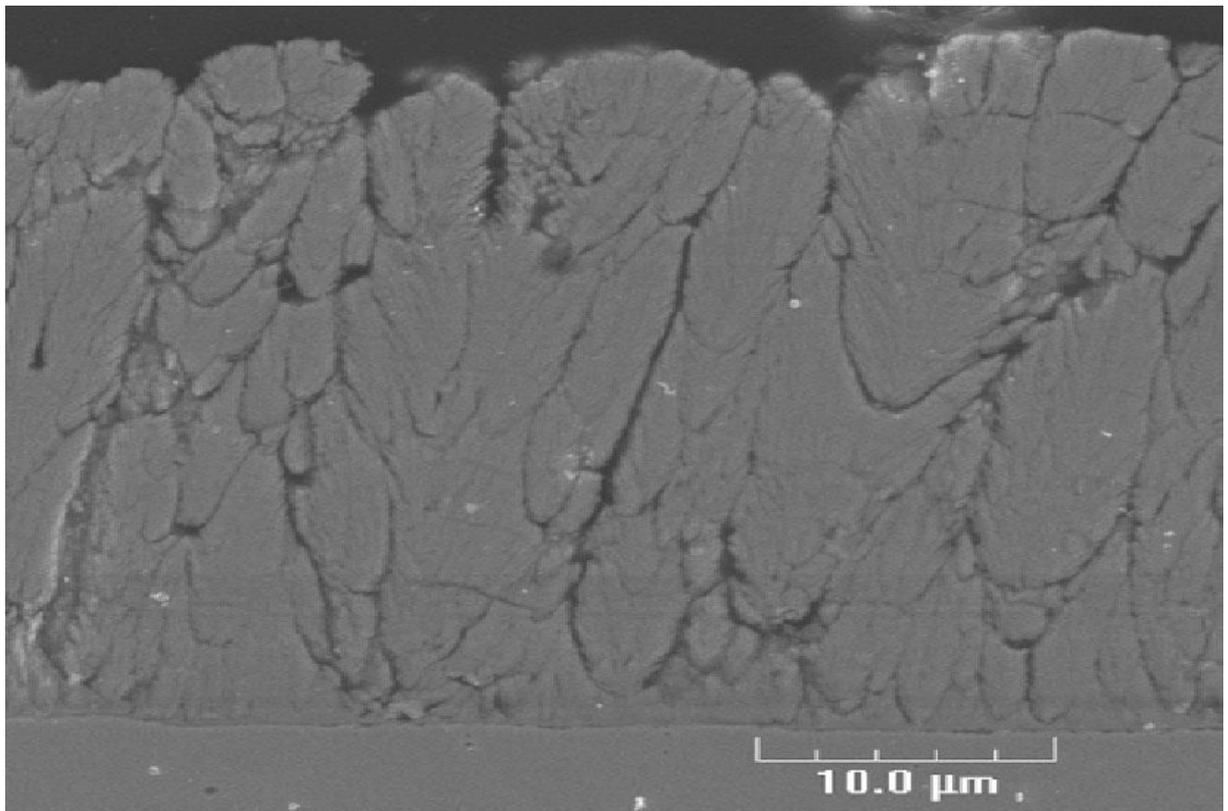


Рисунок 12 - Покрытие, напыленное плазмой (стабилизированный иттрием диоксид циркония) низкого давления[30]

### **3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ВАЛ КОНСТРУКТОРСКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

#### **3.1 Анализ причин возникновения неисправностей и износа**

Проблема износа части вала центробежного насоса является критической проблемой в сфере систем обработки жидкостей, влияя на эксплуатационную эффективность, затраты на техническое обслуживание и общую надежность.

Ниже приведены основные виды износа части вала центробежного насоса.

**Абразивные частицы.** Во многих промышленных применениях перекачиваемая жидкость содержит абразивные частицы, такие как песок, гравий или взвешенные твердые частицы. Эти частицы действуют как абразивы, постепенно изнашивая поверхность вала по мере прохождения через насос. Со временем этот абразивный износ может привести к изменению размеров и шероховатости поверхности, что ставит под угрозу целостность вала.

**Коррозия.** Коррозионные жидкости представляют значительную угрозу для долговечности валов насосов. Химические реакции между жидкостью и материалом вала приводят к коррозии, которая ослабляет структурную целостность вала. Коррозия может проявляться в различных формах, включая равномерное истончение, локальную точечную коррозию или коррозионное растрескивание под напряжением, в зависимости от конкретного состава жидкости и условий окружающей среды.

**Недостаточная смазка.** Правильная смазка необходима для уменьшения трения и минимизации износа вращающихся механизмов. Недостаточная смазка или загрязнение смазочных материалов могут ускорить износ, способствуя контакту металла с металлом и увеличивая силы трения. Неправильная смазка может привести к образованию задиров, истиранию или заеданию поверхности вала.

**Влияние температуры.** Повышенные температуры внутри насосной системы, вызванные либо высокой температурой окружающей среды, либо передачей тепла от перекачиваемой жидкости, могут усугубить износ механизмов. Циклы термического расширения и сжатия могут вызывать изменения размеров вала, что приводит к посадкам с натягом, концентрации напряжений и ускоренному износу.

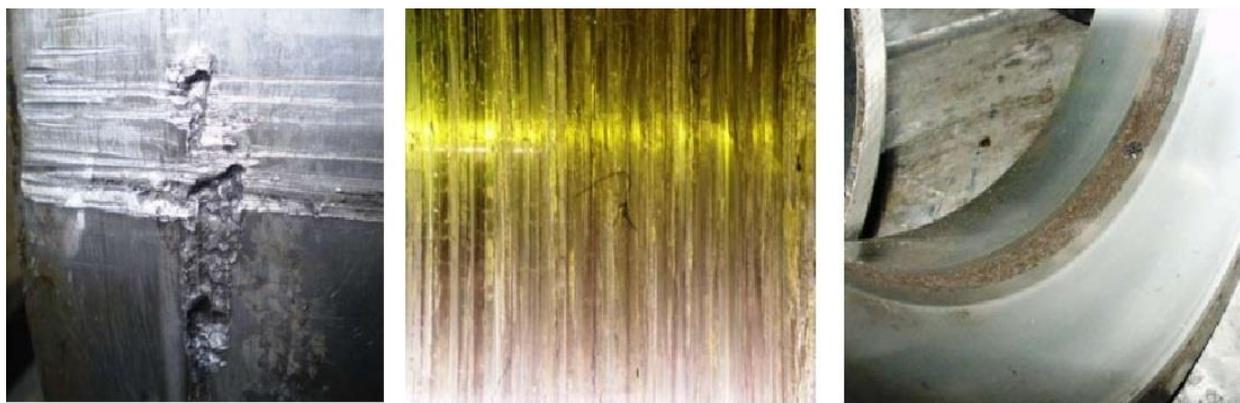
**Динамический дисбаланс.** Дисбаланс вращающихся компонентов насоса, таких как рабочие колеса или муфты вала, может создавать силы вибрации, которые способствуют износу вала. Динамический дисбаланс может привести к неравномерной нагрузке на подшипники вала, вызывая локальный износ и сокращая срок службы подшипников.

**Выбор материала и покрытий.** Выбор материала для вала насоса имеет решающее значение для определения его устойчивости к износу.

Высокопрочные сплавы, нержавеющие стали или антикоррозионные покрытия позволяют повысить долговечность вала в агрессивных условиях эксплуатации. Однако неправильный выбор материала или неадекватная обработка поверхности могут снизить износостойкость и привести к преждевременному выходу из строя.

Усталостное разрушение. Циклическая нагрузка, испытываемая валом насоса, особенно при высоких скоростях или высоком давлении, со временем может вызвать усталостное разрушение. Повторяющиеся циклы напряжений вызывают возникновение и распространение микроскопических трещин, что в конечном итоге приводит к катастрофическому разрушению. Такие факторы, как неправильная конструкция, выбор материала или условия эксплуатации, могут усугубить усталостный износ.

Механический износ: Вал центробежного насоса во время работы подвергается значительным механическим нагрузкам. Постоянное вращение в сочетании с передачей энергии перекачиваемой жидкости приводит к абразивному износу. Этот износ происходит в первую очередь из-за контакта между валом и другими компонентами, такими как подшипники, уплотнения и рабочие колеса[31].



а) Износ схватыванием первого рода

б) Износ схватыванием второго рода

в) Окислительный износ



г) Остевидный износ



д) Абразивный износ

Рисунок 13- Виды износов в структуре насоса

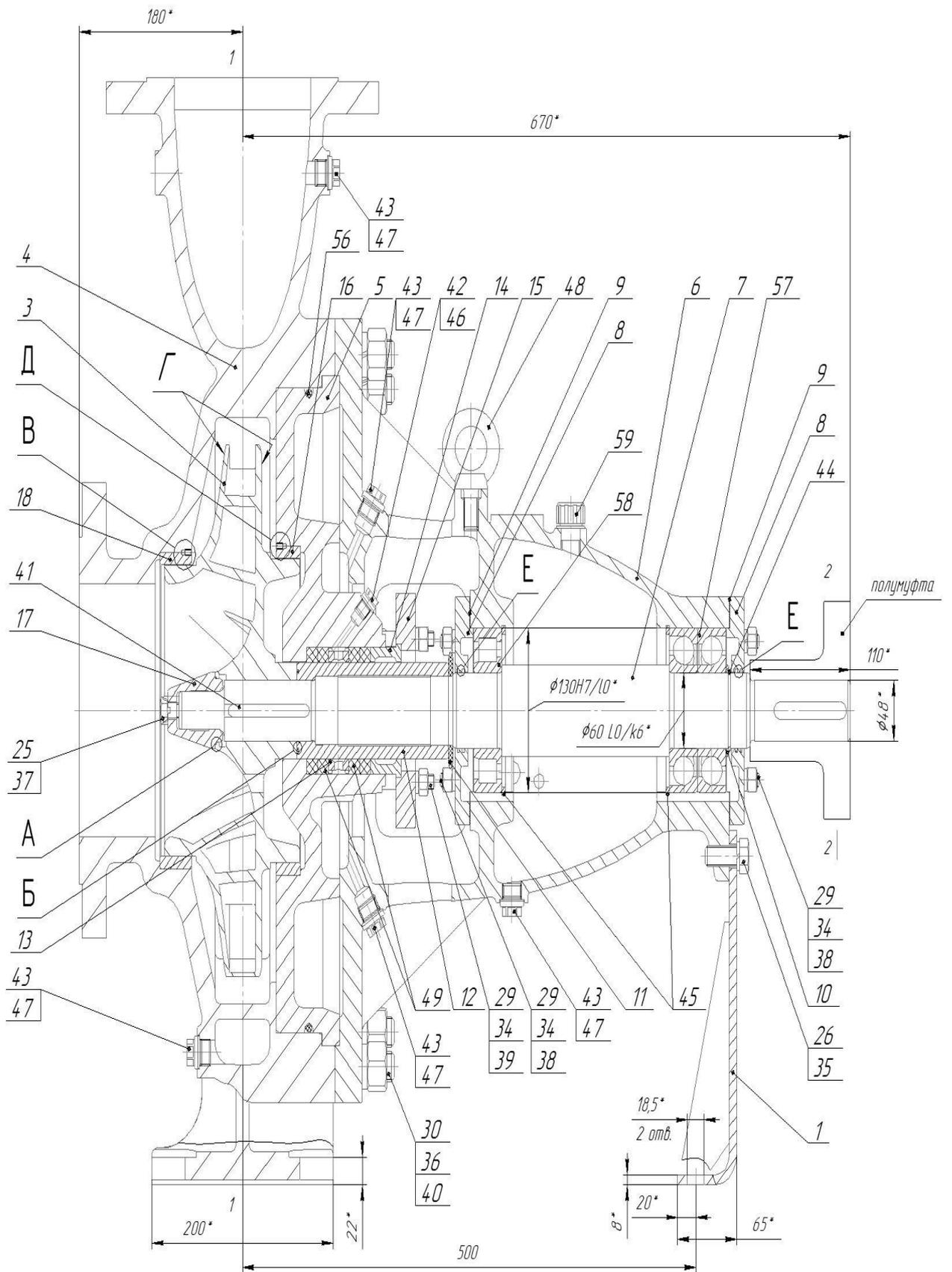


Рисунок 14- Чертеж центробежного консольного насоса СНР 150-500. Часто износ вала возникает в контакте с деталью рабочее колесо поз.3, втулка упорная поз.12 , также подшипники 57,58 в случаях подшипники просто заменяют

### 3.2 Расчеты нагрузки на вал

Для расчета нагрузки на вал центробежного насоса СНР 150-500 при откачивании воды, мы можем использовать следующие данные:

Мощность двигателя: 90 кВт (90000 Вт)

Частота вращения: 1500 об/мин

Напор: 62 м

Производительность: 300 м<sup>3</sup>/ч

Масса ротора: 51,2 кг

Материал вала: сталь 40х

Для этого используем формулу крутящего момента:

$$T = \frac{P}{2\pi n} \quad (1)$$

где:

$P$  — мощность двигателя в ваттах (90 кВт = 90000 Вт),

$n$  — частота вращения вала в об/мин (1500 об/мин).

Переведем частоту вращения в секунды:

$$n = \frac{1500}{60} = 25 \text{ об/с} \quad (2)$$

Теперь подставим значения в формулу крутящего момента:

$$T = \frac{90000}{157,08} = 573 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Таким образом, вал насоса должен быть рассчитан на выдерживание крутящего момента примерно 573 Н·м.

Изгибающий момент можно оценить, используя формулу для гидравлической мощности:

$$P_{\text{гидр}} = \rho g Q H \quad (3)$$

где:

•  $\rho$  — плотность жидкости (для воды примерно 1000 кг/м<sup>3</sup>),

•  $g$  — ускорение свободного падения (9.81 м/с<sup>2</sup>),

•  $Q$  — производительность насоса (300 м<sup>3</sup>/ч),

•  $H$  — напор (60 м).

Переведем производительность в м<sup>3</sup>/с:

$$Q = \frac{300}{3600} = 0.0833 \text{ м}^3/\text{с} \quad (4)$$

Теперь подставим значения в формулу гидравлической мощности:

$$P_{\text{гидр}} = 1000 \cdot 9,8 \cdot 0,0833 \cdot 62 = 294300 \text{ Вт}$$

Это гидравлическая мощность, которую необходимо передать через вал.

Рассмотрим статическую нагрузку, которая включает в себя вес ротора и гидравлическую нагрузку. Вес ротора создает осевую нагрузку на вал, которую можно рассчитать как:

$$F_{\text{ось}} = m \cdot g \quad (5)$$

где:

$m$  — масса ротора (51,2 кг),

$g$  — ускорение свободного падения (9.81 м/с<sup>2</sup>).

Подставим значения:

Это осевая нагрузка, действующая на вал из-за веса ротора.

$$F_{\text{ось}} = 2 \cdot 9,81 = 510,2\text{Н}$$

Также для определение можно выполнить расчет на радиальную нагрузку

$$F_r = K_r \cdot \rho \cdot g \cdot H \cdot D_2 \cdot b_2 \quad (6)$$

$$F_r = 0,36 \cdot 1000 \cdot 9,8 \cdot 62 \cdot 0,420 \cdot 0,149 = 13688\text{Н}$$

где  $K_r$ - коэффициент радиальной силы, ( $K_r = 0,36$  принят согласно [10]);

$D_2$  — диаметр колеса на выходе,  $D_2 = 0,420$  м;

$b_2$ - ширина колеса на выходе,  $b_2 = 0,149$  м;

$\rho$  - плотность жидкости,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;

$g$  - ускорение свободного падения;

$H$  - текущий напор, м.

### 3.3 Применение метода конечных элементов и разработка алгоритм расчета

Метод конечных элементов (МКЭ) - это численный метод, используемый для решения сложных инженерных задач путем разделения конструкции на более мелкие и простые элементы, анализа каждого элемента индивидуально, а затем объединения их эффектов для понимания поведения всей конструкции.

Преимущества использования метода конечных элементов, особенно с таким программным обеспечением, как Компас 3Д, включают:

Точность: FEM (Finite element method) может обеспечить очень точные результаты при правильном применении, позволяя инженерам с уверенностью прогнозировать поведение сложных конструкций, таких как валы.

Универсальность: FEM может обрабатывать широкий спектр граничных условий, свойств материалов и сценариев нагрузки, что делает его подходящим для анализа различных типов конструкций валов и условий эксплуатации. Чертеж вала представлен( рис.15)

Эффективность: хотя FEM требует значительных вычислительных ресурсов, современное программное обеспечение, такое как Компас 3Д,

использует передовые алгоритмы и методы параллельной обработки для эффективного решения сложных моделей в разумные сроки.

Оптимизация. FEM можно использовать итеративно для оптимизации конструкции валов путем оценки различных конфигураций, материалов и размеров для соответствия критериям производительности при минимизации веса, стоимости или других факторов.

Визуализация: программное обеспечение FEM обеспечивает интуитивно понятную визуализацию результатов, позволяя инженерам быстро выявлять проблемные области, оптимизировать проекты и эффективно сообщать результаты заинтересованным сторонам[35].

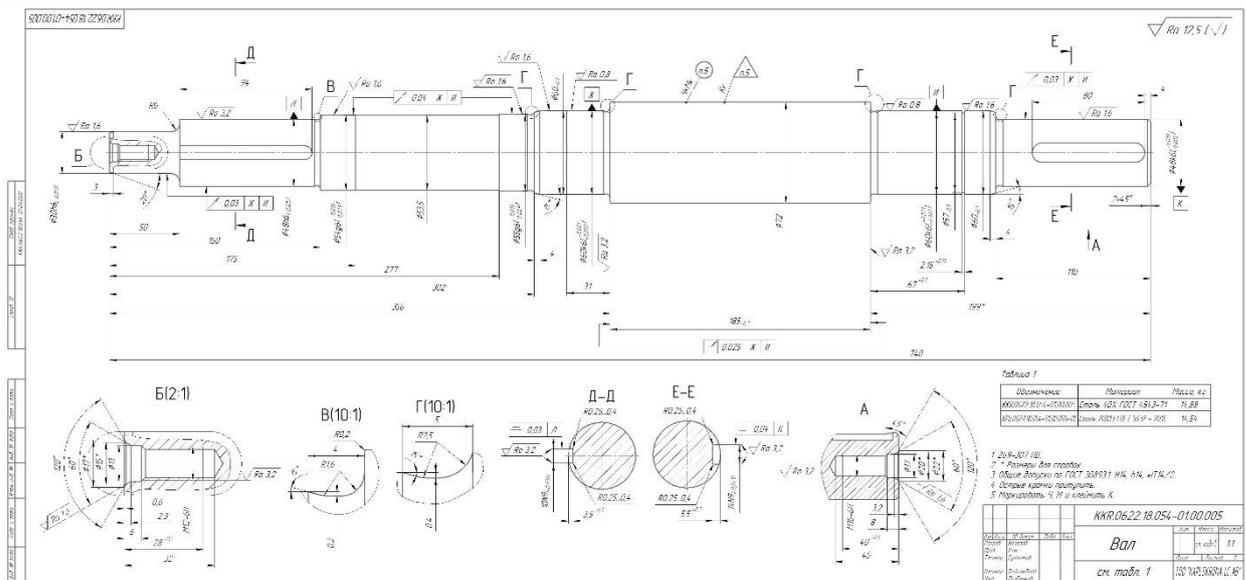


Рисунок 15- Чертеж вала

### Алгоритм расчета

Расчет произведен методом конечно-элементного анализа. 3D модель рассчитываемого вала изображена на рисунке 16. Вал нагружен прилегающей нагрузкой 13688 Н.



Рисунок 16 - 3D модель вала

Таблица 3.3.1 - Физико - механические свойства материала вала сталь 40Х ГОСТ 4543-71

<b>Предел текучести [МПа]</b>	<b>785</b>
Модуль упругости нормальный [МПа]	210000
Коэффициент Пуассона	0.3
Плотность [кг/м <sup>3</sup> ]	7850
Температурный коэффициент линейного расширения [1/С]	0.000012
Теплопроводность [Вт/(м*С)]	46
Предел прочности при сжатии [МПа]	980
Предел выносливости при растяжении [МПа]	443
Предел выносливости при кручении [МПа]	245

Разбивка модели на конечные элементы приведена на рисунке 18. Инерционные характеристики приведены в таблице 3.3.2, параметры и результаты разбиения приведены в таблице 3.3.3.

Таблица 3.3.2- Характеристики конечно-элементной сетки

<b>Наименование</b>	<b>Значение</b>
Максимальная длина стороны элемента [мм]	5
Максимальный коэффициент сгущения на поверхности	1
Коэффициент разрежения в объеме	1.5
Количество конечных элементов	86438
Количество узлов	18452

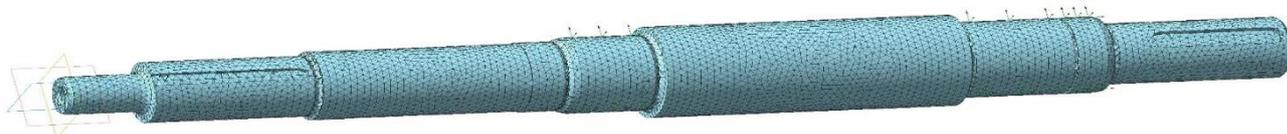


Рисунок 17- Конечно - элементная сетка вала

Таблица 3.3.3 - Характеристики конечно-элементной сетки

<b>Наименование</b>	<b>Значение</b>
Масса модели [кг]	14.870176
Центр тяжести модели [м]	(-0.000096; 0.399581; -0.000001)
Моменты инерции модели относительно центра масс [кг*м <sup>2</sup> ]	( 0.003557; 2.842788; 0.003581)
Реактивный момент относительно центра масс [Н*м]	(-0.000001; 0.147886; 4003.762328)
Суммарная реакция опор [Н]	( 13272.528503; 0; 0.000002)
Абсолютное значение реакции [Н]	13272.528503
Абсолютное значение момента [Н*м]	4003.762331

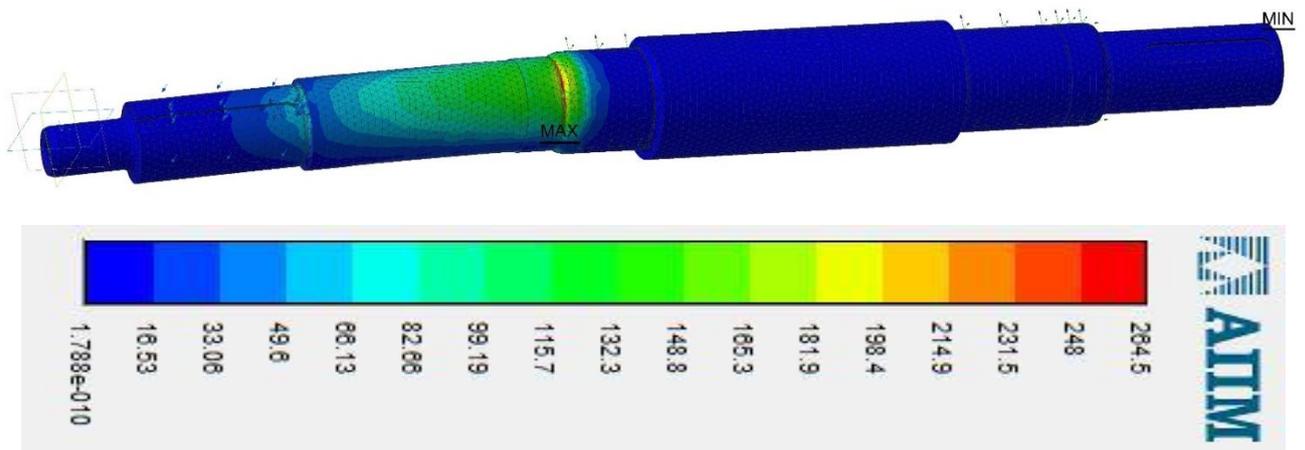


Рисунок 18 - Карта напряжений

На рисунке 18 представлена карта напряжений, приведен статический расчет. Карта напряжений показывает следующие данные - эквивалентное напряжение по мизесу: мин. - 0 МПа, макс. – 264,5 МПа.

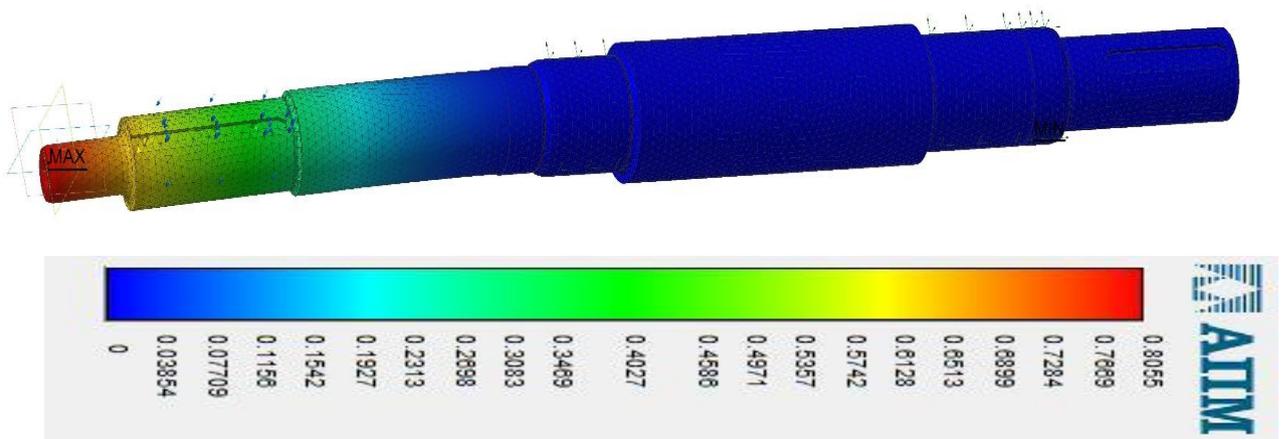


Рисунок 19 - Карта перемещений

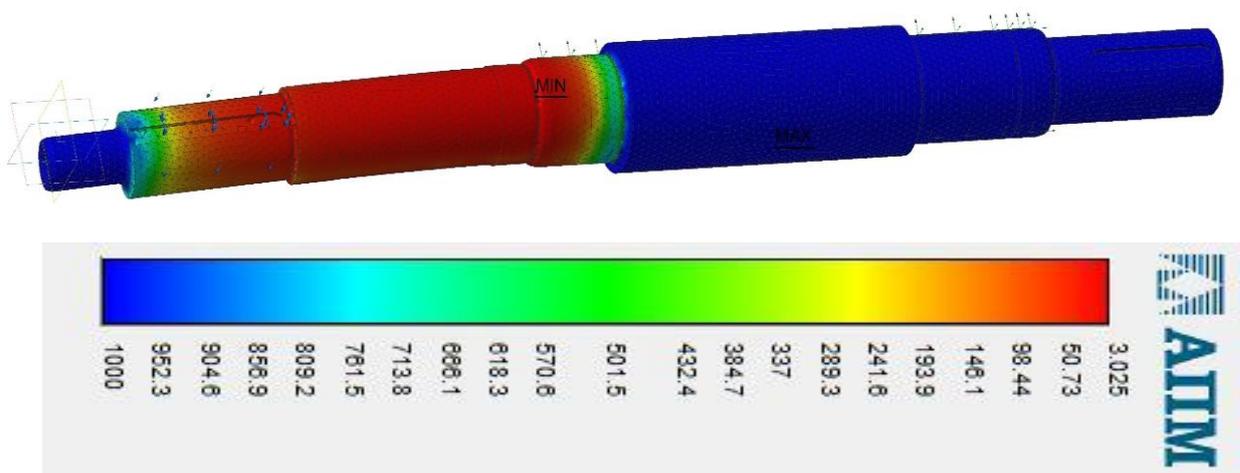


Рисунок 20 – Карта коэффициента запаса по текучести

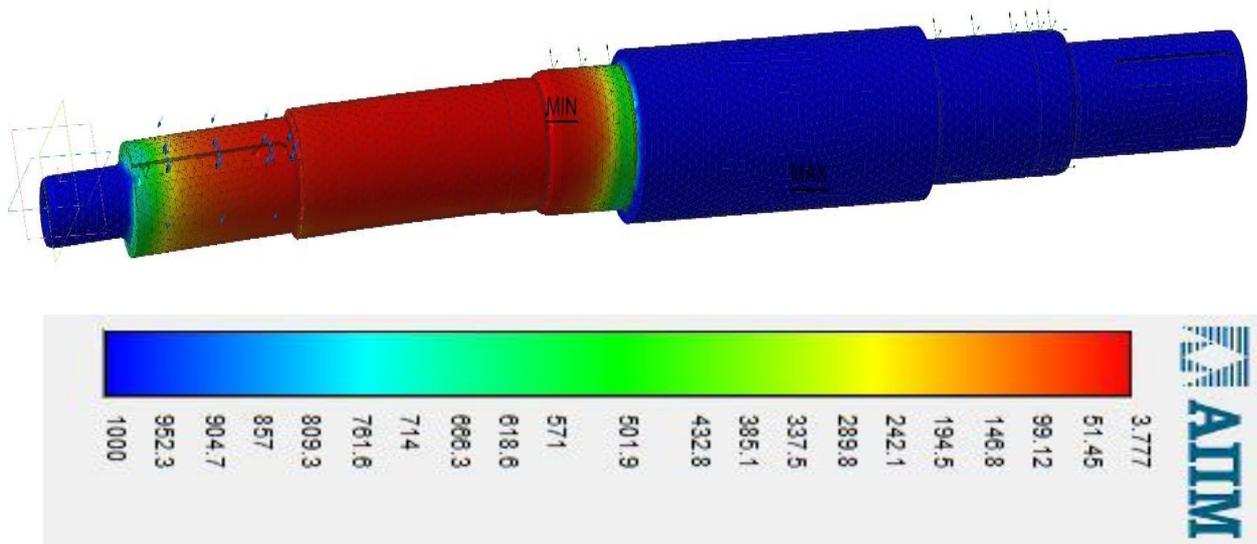


Рисунок 21- Карта распределения запаса прочности

На рисунке 19 представлена карта перемещение и приведен статический расчет. Карта показывает суммарное линейное перемещение: мин. значение - 0 мм; макс. Значение - 0,805 мм.

На рисунке 20 представлена карта коэффициента запаса по текучести.

На рисунке 21 представлена карта распределения запаса прочности и указан статический расчет. Карта показывает коэффициент запаса прочности: мин. значение - 3,77; макс. значение – 1000.

Все результаты исследования представлены в таблицах 3.3.4 и 3.3.5.

Таблица 3.3.4 - Результаты статического расчета

Наименование	Минимальное значение	Максимальное значение
Эквивалентное напряжение по мизесу, МПа	0	264,5
Суммарное линейное перемещение	0	0,805
Коэффициент запаса прочности	3,77	1000

Таблица 3.3.5.- Результаты расчета собственных частот

№	Частота [рад/сек]	Частота [Гц]
1	3516.282521	559.633745
2	3525.465801	561.095309
3	15897.42557	2530.153862
4	16058.651891	2555.813828
5	16664.117749	2652.176712

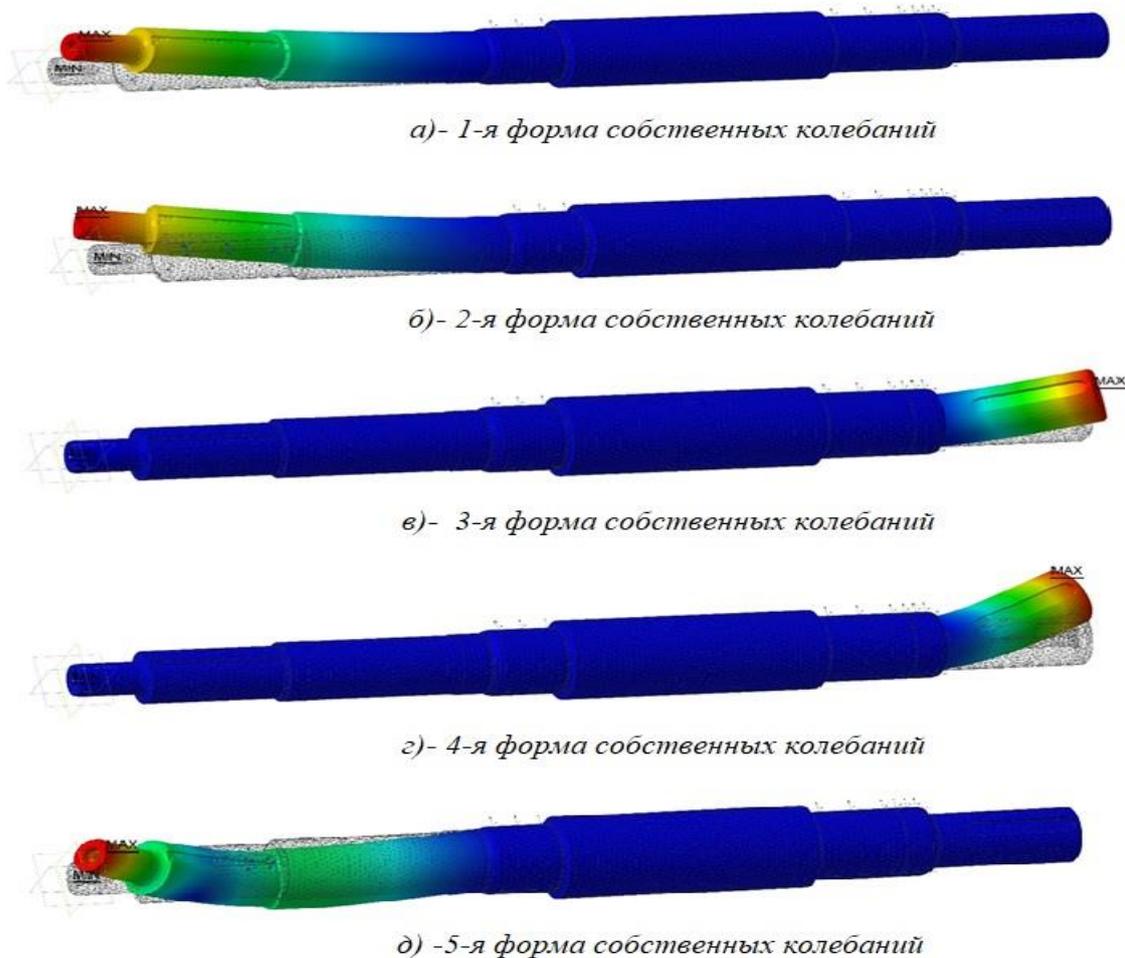


Рисунок 22- Карта результата на расчет собственных частот

Таким образом, были выполнены расчеты методом конечных элементов для детали вал[36].

### 3.4 Результат исследование и обоснование выбора метода ХГДН

Получено, что метод высокоскоростного холодного газодинамического напыления (ХГДН) позволяет производить напыление пленок и покрытий с толщиной от 1 мкм до нескольких миллиметров. Покрытия, получаемые при помощи данного метода, имеют высокую износостойкость. Твердость покрытия выше, чем у обычных материалов без покрытия и выше, чем у материалов с металлическими покрытиями, полученными классическим методом холодного напыления. Предлагаемый способ в настоящее время уже опробован на некоторых специализированных механических производственных участках.

Для полноценного анализа результатов и оптимизации решения исследуется износостойкость в зависимости от времени, условий эксплуатации и других характеристик. Техничко-экономический эффект от

применения предлагаемого способа нанесения износостойкого покрытия по сравнению с действующими в настоящее время выразится в увеличении надежности работы узлов за счет увеличения износостойкости, сплошности, а также повышения когезии и адгезии покрытия с поверхностью.

Исходя приведенного анализа можно смело заявить что метод холодного напыление является самым оптимальным для повышение износостойкости вала.

Этот метод является основным методом для ремонта и восстановление деталей машин в таких странах как Латвия, Турция, Болгария, Румыния и Греция. Последние сделали несколько лабораторных экспериментов с данным методом , где данный метод показал свою высшую эффективность учитывая что выше перечисленные страны не являются ведущими в мире области машиностроение. Кроме валов насоса они успешно применили на несколько деталей из судостроение,автомобилистроение и другое. Рисунки перечислен ниже[37].

Высокая адгезия и плотность покрытия. Метод ХГДН обеспечивает высокую адгезию между напыляемыми частицами и поверхностью, в результате чего получаются покрытия с высокой плотностью и прочностью.

Минимальное искажение свойств материала: ХГДН вызывает минимальное повреждение или искажение структуры и свойств напыляемого материала благодаря отсутствию высоких температур, типичных для традиционных методов термического напыления.

Экономия материалов: ХГДН значительно снижает потери материала благодаря высокой эффективности осаждения и минимальному образованию отходов.

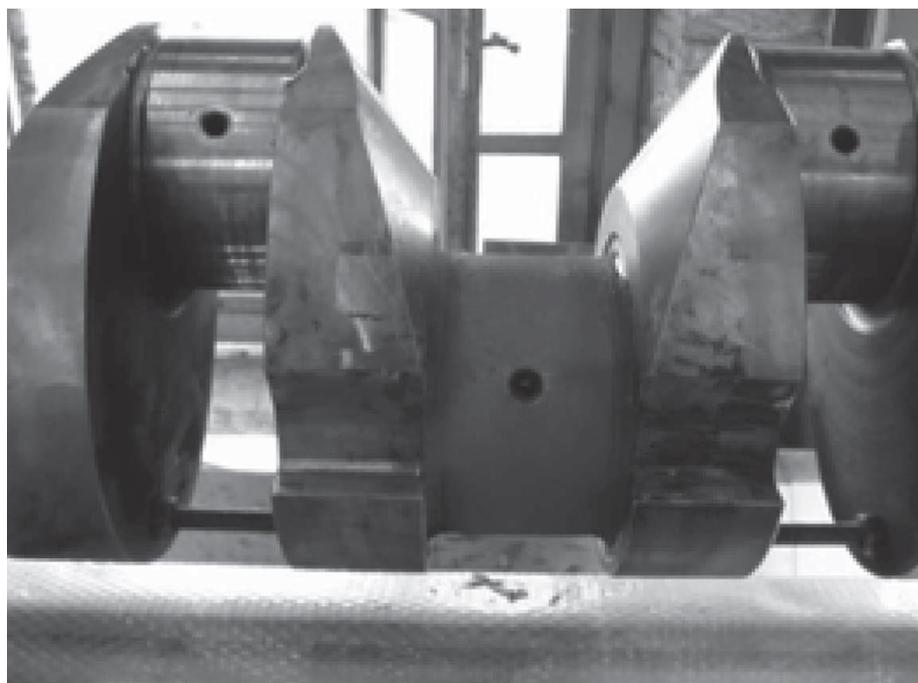


Рисунок 23- Восстановлена шейка коленвала[37].



Рисунок 24 - Внутреннее восстановление[37]. цилиндра двигателя

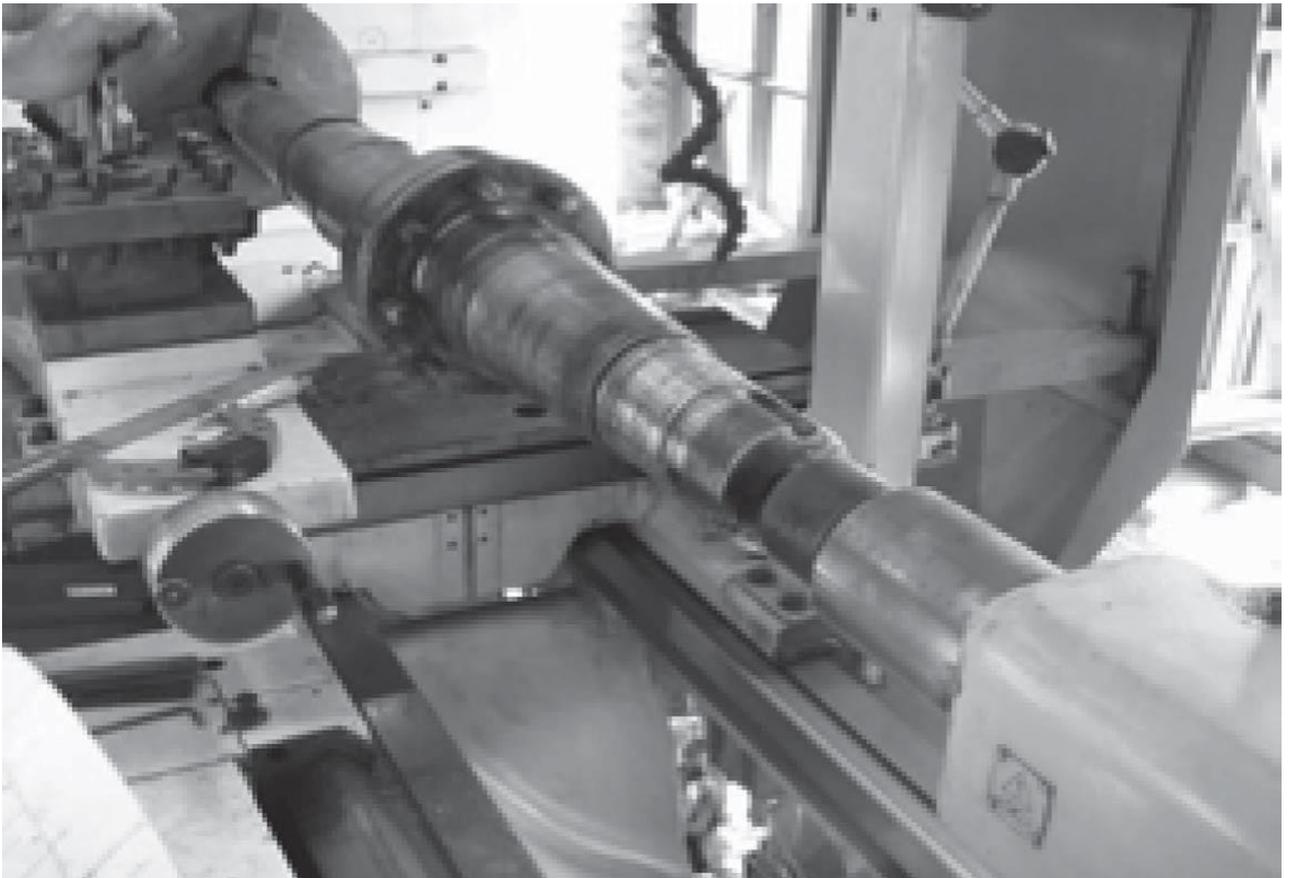


Рисунок 25- Вал колеса поезда[37]

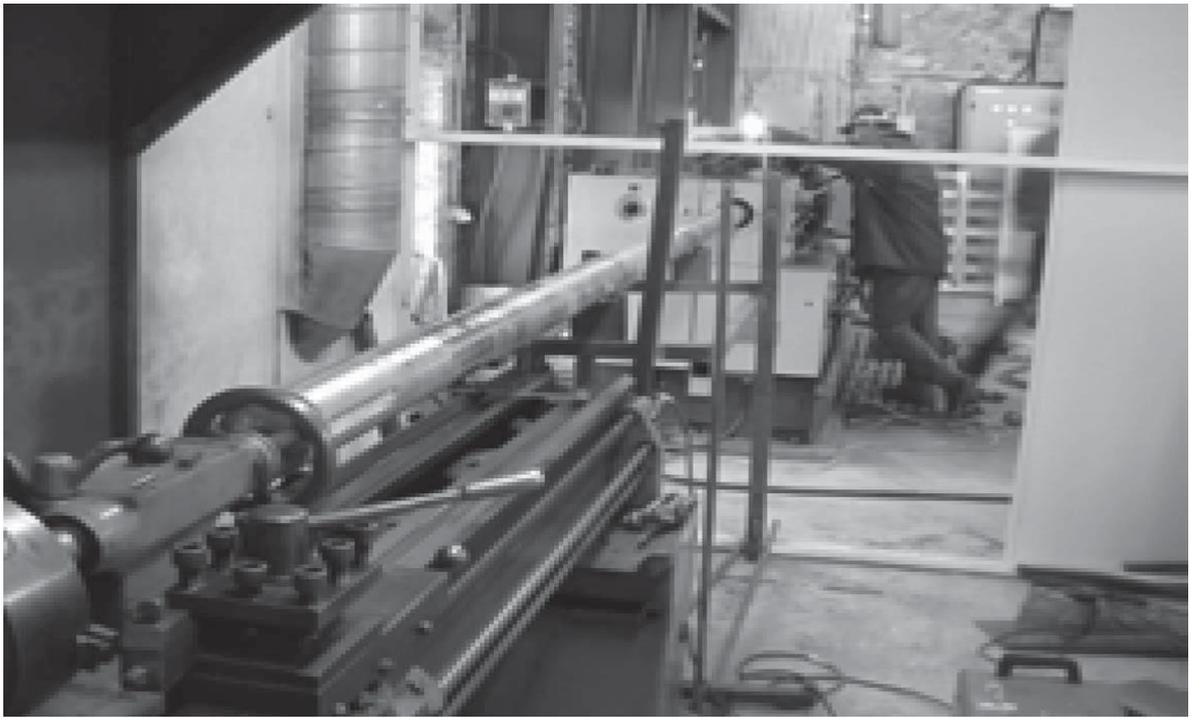


Рисунок 26 - Корабельный трансмиссионный вал[37].

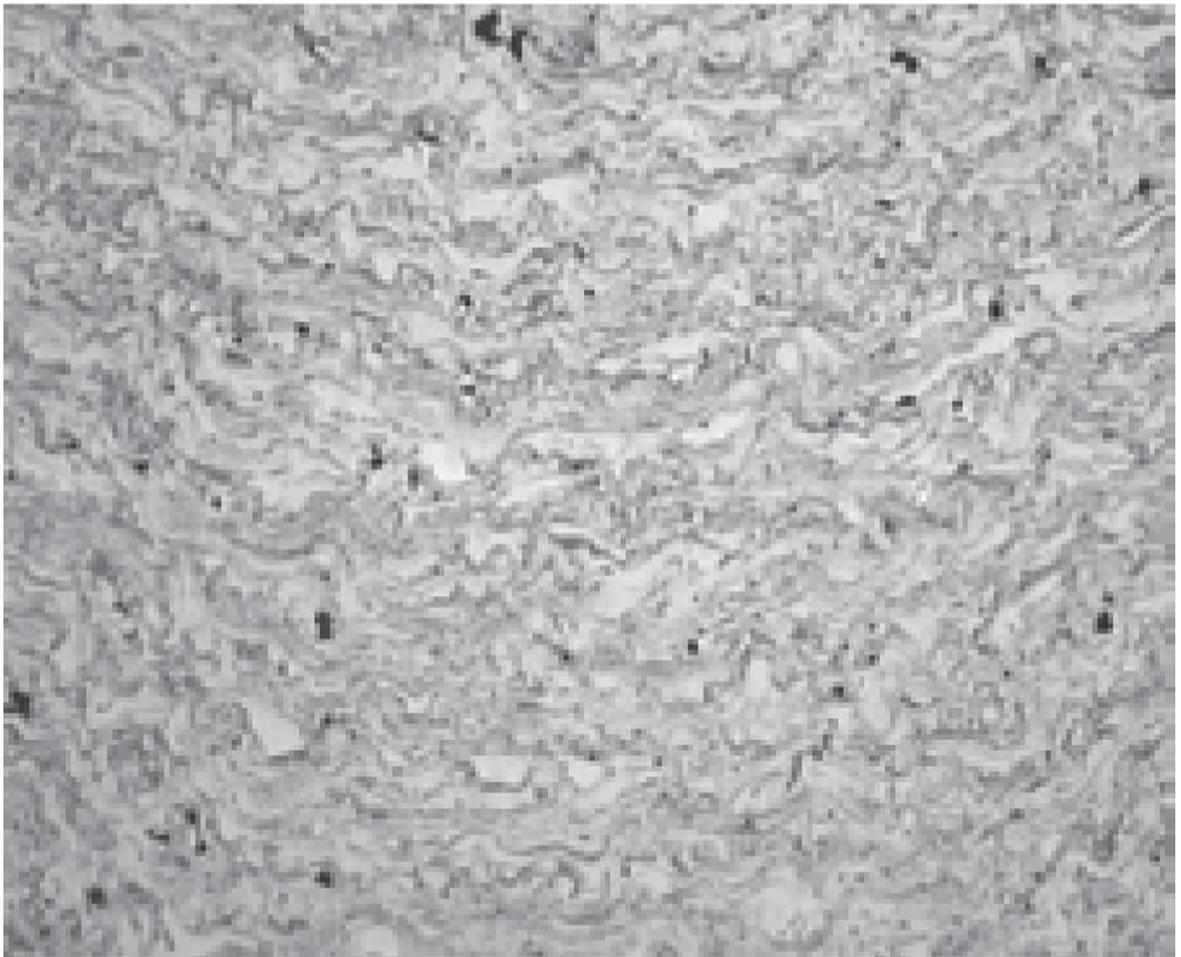


Рисунок 27 –Успешно примененный компонент Fe–13Cr[37].



Рисунок 28 – Компонент ХРТ 512[37].

Таблица 3.4.1 – Экономическая-техническая сравнительная характеристика 3 видов напыление

Методы напыление	Холодное газодинамическое напыление	(HVOF) напыление	Плазменное напыление
Прочность адгезии	Высокий	Высокий	Умеренный
Плотность покрытия	Высокий	Умеренный	Низкий
Эффективность осаждения	Высокий	Умеренный	Низкий
Уровень пористости	Низкий	Низкий	Высокий
Контроль толщины покрытия	Хороший	Хороший	Умеренный
Чистота поверхности	Отличный	Хороший	Умеренный
Гибкость выбора материала	Высокий	Умеренный	Умеренный
Экономическая эффективность	Умеренный	Высокий	Низкий
+Увеличенная твердость по HRC	+15.....25	+20.....30	+20.....35

Продолжение таблицы 3.4.1

Средняя цена услуги нанесение за площадь м <sup>2</sup>	1.....5 \$ США	20.....50 \$ США	10.....30\$ США
Цена оборудование	10тыс.....50тыс\$ США и выше	100тыс.....500тыс \$ США и выше	20тыс.....100тыс \$ США и выше
Серийность производства	мелкосерийная и единичном	крупносерийный и среднесерийный	серийный и массовый
Распыляемый компонент	алюминий, медь, никель, титан, сталь и их сплавы.	никель, кобальт, сталь, алюминий, титан и их сплавы.	никель, кобальт, алюминий, титан и их сплавы.
Скорость распыление частиц м/с	от 300 до 1200	от 500 до 1000	от 150 до 300
Температура	до 500°С.	от 2500°С до 3 500°С.	от 10000°С до 15000°С.

В таблице 3.4.1 приведены сравнительные характеристики всех вышеперечисленных методов напыления.

1. Прочность адгезии. Холодное газодинамическое напыление демонстрирует высокую прочность адгезии, обеспечивая прочную связь между покрытием и подложкой, что имеет решающее значение для долговечности.

2. Плотность покрытия. Высокая плотность покрытия, достигаемая за счет холодного газодинамического напыления, способствует превосходной износостойкости по сравнению с методами плазменного напыления и HVOF.

3. Эффективность осаждения. Холодное газодинамическое напыление демонстрирует высокую эффективность осаждения, позволяя эффективно наносить покрытие и минимизировать отходы материала.

4. Уровень пористости. Холодное газодинамическое напыление обеспечивает низкий уровень пористости, снижая вероятность появления дефектов и повышая общую целостность покрытия.

5. Качество поверхности. Превосходное качество поверхности, достигнутое за счет холодного газодинамического напыления, способствует более плавной работе и снижению трения в компонентах машины.

6. Гибкость выбора материала. Холодное газодинамическое напыление обеспечивает высокую гибкость в выборе материала, позволяя создавать покрытия, отвечающие конкретным требованиям к производительности.

7. Экономическая эффективность. Хотя холодное газодинамическое напыление может повлечь за собой умеренные затраты, его превосходные характеристики и долговечность оправдывают инвестиции, особенно по сравнению с более низкой эффективностью и более высокими затратами, связанными с методами плазменного напыления и HVOF.

Таким образом, всесторонняя оценка методов нанесения покрытий подчеркивает превосходство холодного газодинамического напыления в

повышении износостойкости компонентов машин. Сочетание высокой адгезионной прочности, плотности, эффективности осаждения, низкой пористости, превосходного качества поверхности, гибкости материала, твердости, экономической эффективности, умеренной стоимости оборудования, пригодности для крупносерийного производства и более низкой рабочей температуры делает его предпочтительным выбором для достижения оптимальной производительности и долговечности в промышленном применении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сфере машиностроения, где долговечность и долговечность компонентов машин имеют первостепенное значение, стремление повысить износостойкость остается постоянной задачей. Эта диссертация положила начало исследованию и оценке методологий, направленных на укрепление деталей машин, с особым акцентом на критический компонент вала. В целях повышения износостойкости компонентов машин, особенно таких важных частей, как вал, в этом исследовании был использован ряд методологий. Целью данного исследования было определение наиболее эффективного подхода посредством тщательного анализа существующих методов обеспечения износостойкости и детального анализа методом конечных элементов компонента вала.

После тщательного исследования и оценки был сделан вывод, что холодное газодинамическое напыление является оптимальным решением для повышения износостойкости. Этот метод демонстрирует замечательный потенциал в защите деталей машин от износа, тем самым продлевая срок их эксплуатации.

Обоснованный выбор холодного газодинамического напыления заключается в его способности наносить покрытия при относительно низких температурах, обеспечивая при этом надежную износостойкость. Сохраняя целостность материала и обеспечивая превосходную защиту от износа, этот метод является практичным и эффективным средством удовлетворения требований к износостойкости инженерных компонентов.

Используя принципы холодного газодинамического напыления, инженеры могут защитить валы и аналогичные детали от суровых условий эксплуатации, тем самым сокращая затраты на техническое обслуживание и время простоя, связанное с преждевременными отказами. Этот подход соответствует общей цели повышения эффективности и долговечности оборудования в различных отраслях.

Таким образом, задача повышения износостойкости деталей машин, на примере детали вала, находит перспективное решение в холодном газодинамическом напылении. В заключение, путь к повышению износостойкости, воплощенный в случае компонента вала, находит многообещающего союзника в виде холодного газодинамического напыления. Это исследование выступает за его принятие, основываясь на его доказанной эффективности, практической осуществимости и потенциале совершить революцию в инженерной практике. Поскольку отрасли по-прежнему отдают приоритет долговечности и надежности своего оборудования, внедрение инновационных методов, таких как холодное газодинамическое напыление, обещает сыграть важную роль в достижении этих целей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Stepanova Elina Vyacheslavovna, Sotnikova Yana Aleksandrovna World experience in the production of steel structures // Age of Science. 2015. No4.  
Ginne Svetlana Viktorovna On methods of protecting building steel structures against corrosion that reduce the aggressiveness of a corrosive environment // The Age of Science. 2019. №18.
- 2 Fist V.V. To the question of the protection of steel from corrosion / Science and Youth: Problems, Searches, Solutions: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists. -Novokuznetsk: Publishing. Center SibGIU, 2016. - Vol. 20. - Part IV. Technical science. 1922 pp.
- 3 Балдаев Л.Х., Буткевич М.Н., Панфилов Е.А., Пузряков А.Ф., Хамицев Б.Г. Перспективы применения газотермического напыления при ремонте и сервисе оборудования жилищно-коммунального хозяйства, текстильной и других отраслей промышленности // Технология машиностроения. 2006. № 6. С. 58–63.
- 4 Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: Издво МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.
- 5 International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016 O.V. Burlachenkoa, D.P. Klochkova International Journal of Scientific & Technology Research · March 2020-Berdiyev D.M. Yusupov A.A. Umarova M Improving Wear Resistance Of Steel Products To Unconventional Heat Treatment Methods
- 6 Царева Э.Э., Присакарь И.С. Повышение износостойкости деталей автомобилей при реновации // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6. – С. 82-82;
- 7 Вышинский В.А. Новая система постулатов (аксиом) – решение шестой проблемы Д. Гильберта, Единый всероссийский научный вестник, Москва, – 2016, №2 С.29-35.
- 8 Металлографические исследования электроискровых и газодинамических покрытий / Денисов В.А., Иванов В.И., Задорожний Р.Н. // Технология металлов. 2013. № 12. С. 31-38.
- 9 Мамасолиева, М. И. Методы повышения износостойкости деталей / М. И. Мамасолиева. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 3 (137). — С. 121-122.
- 10 Ренев Д.Ю. Осложненный фонд ПАО «ЛУКОЙЛ» // Инженерная практика. 2016. № 4 [Электронный источник]. Режим доступа: <http://glavteh.ru/осложненный-фонд-лукойл-пермь/> (дата обращения: 11.09.2017).
- 11 Деговцов А.В., Соколов Н.Н., Ивановский А.В. О возможности замены литых ступеней ЭЦН при осложненных условиях эксплуатации // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2016. № 6. С. 16–20.
- 12 Смирнов Н.И., Григорян Е.Е., Смирнов Н.Н. Износ и вибрация насосных секций УЭЦН // Бурение и нефть. 2016. № 2. С. 52–56
- 13 Төлен Ә., Керимжанова М.Ф. Методы повышения износостойкости

детали типа вал /Труды междуна. научно-техн.конф. , посвященной 85-летию со дня рождения академика МАН ВШ, д.т.н., проф. Давильбекова Н.Х. 30 ноября 2022 г. - С.32-34

14 ASM Handbook, Volume 5A: Thermal Spray Technology, R.C. Tucker, Ed., (2013) Global Thermal Spray Market—Segmented by Product Type, By End-User Industry, and Geography—Trends and Forecasts (2015-2020), Mordor Intelligence, May 2016

15 Kablov E.N. Innovative developments of FSUE VIAM of the State Research Center of the Russian Federation on the implementation of "Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030" //Aviation materials and technologies. 2015. №1 (34). PP. 3-33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33. <https://journal.viam.ru/ru/archive/2015/1>

16 Kablov E.N., Startsev O.V. Fundamental and applied studies of corrosion and aging of materials in climatic conditions (overview) //Aviation materials and technologies. 2015. №4. (37) PP. 38-52. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52. [https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2015/2015\\_4\\_7\\_1.pdf](https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2015/2015_4_7_1.pdf)  
[https://journal.viam.ru/en/system/files/uploads/pdf/2017/2017\\_S\\_14\\_1.pdf](https://journal.viam.ru/en/system/files/uploads/pdf/2017/2017_S_14_1.pdf)

17 Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Overview of foreign experience in corrosion research and corrosion protection means //Aviation materials and technologies. 2015. №2 (35). PP. 76-87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87. [https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2015/2015\\_2\\_12\\_1.pdf](https://journal.viam.ru/ru/system/files/uploads/pdf/2015/2015_2_12_1.pdf)

18 Kablov E.N., Nikiforov AA, Demin SA, Chesnokov D.V., Vinogradov S.S. Promising coatings for corrosion protection of carbon steels //Steel. 2016. №6. PP. 70-81. <https://istina.msu.ru/publications/article/25736572/>

19 Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Demin S.A., Chesnokov D.V. Corrosion protection of carbon steels //Aviation materials and technologies. 2017. №5. PP. 242-263. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.

20 ASM Handbook, Volume 5A: Thermal Spray Technology, R.C. Tucker, Ed., (2013)

21 Төлен Ә., Керимжанова М.Ф. Құбыр арматурасының тұрқысына статикалық талдауы/«Интеграция энергетикасы және машинаөнері: инновациялық технологиялар және практика» Материалдары Халықаралық ғылым-техникалық конференциясының 24-ші маусымы 2023 ж. - С.216-221.

22 K. Holmberg and A. Erdemir, "Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions," vol. 5, no. 3, pp. 263–284, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>.

23 Alaya M, Chazelas C, Mariaux G, Vardelle A (2014) J Thermal Spray Technol 24

24 Machmud M N, Maulana D and Husaini 2013 *Jurnal Teknik Mesin Unsyiah* 1 33.

25 Muhammad, W. & Deen, K. M. Failure analysis of water pump shaft. *Journal of Failure Analysis and Prevention* (2010) doi:10.1007/s11668-010-9332-0.

26 Zambrano, O. A., Coronado, J. J. & Rodríguez, S. A. Failure analysis of a

bridge crane shaft. *Case Studies in Engineering Failure Analysis* (2014) doi:10.1016/j.csefa.2013.12.002.

27 Tamin, M. N. & Hamzah, M. A. Fatigue Failure Analysis of a Centrifugal Pump Shaft. In *Failure Analysis and Prevention* (InTech, 2017). doi:10.5772/intechopen.70672.

28 Patel, B., Prajapati, H. R., Patel, B. P. & Patel, N. v. Investigation of Stress Concentration Factor for Keyway on Shaft under Different Loading Conditions: A Case Study. *University Journal of Research* **01**, 1 (2015).

29 Das, G., Sinha, A. N., Mishra, S. K. & Bhattacharya, D. K. Failure analysis of counter shafts of a centrifugal pump. *Engineering Failure Analysis* (2019) doi:10.1016/S1350-6307(98)00037-5.

30 Төлен Ә., Керимжанова М.Ф. Құбыр арматурасының тұрқысына статикалық талдауы /Труды междун.научно-практ. конф. "Ұлытау - Қазақстан металлургиясының бесігі", посвященной к 110-летию со дня рождения Заслуж.деят.науки КазССР, чл.-корр. АН КазССР, д.т.н., профессора И.А.Онаева 18-19 мая 2023г. - С.329-334.

31 Dykha A.V. Prediction the wear of sliding bearings. ISSN 2227–524X / A.V. Dykha, D.D. Marchenko // International Journal of Engineering and Technology (UAE). India: "Sciencepubco–logo" Science Publishing Corporation. Publisher of International Academic Journals. – 2018. – Vol. 7, No 2.23 (2018). – pp. 4–8. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11872>.

32 Prof. S. G. Kolgiri, Prof .Sudarshan D Martande, Prof. Nitin S Motgi, Stress Analysis for Rotor Shaft of Electric Motor, International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, Volume 2, Issue 7, July 2013.

33 Anees U. Malik, Mohammad Al-Hajri And Fahd Al-Muaili, Determination Of The Cause Of Failureof Rotor Shaft Of Air Compressor Motor, Shoaiba Phase-I Plant, Research And Development Center Saline Water Conversion Corporation.

34 Sumit P. Raut, Laukik P. Raut, FailureAnalysis and Redesign of Shaft of Overhead Crane,Sumit P. Raut Int. Journal of Engineering Research and ApplicationsISSN : 2248-9622, Vol. 4, Issue 6( Version 3), June 2014, pp.130-135.

35 Sumit P.Raut1, LaukikP.Raut, A Review of Various Techniques Used for Shaft Failure Analysis, International Journal of Engineering Research and General Science Volume 2, Issue 2, Feb-Mar 2014 ISSN 2091-2730.

36 D. K. Padhal, D. B. Meshram, Analysis and Failure Improvement of Shaft of Gear Motor in CRM Shop, Research Inveny: International Journal of Engineering and Science Vol.3, Issue 4 (July 2013), PP 17-24.

37 O.A. Zambrano, J.J. Coronado, S.A. Rodriguez, Failure analysis of a bridge crane shaft, Research Group of Fatigue and Surfaces, Mechanical Engineering School, Universidad Del Valle, AA 25360 Melendez, Cali, Colombia.

38 Kasim M. Daws , Zouhair I. AL-Dawood ,Sadiq H. AL-Kabi,Selection of Metal Casting Processes: A Fuzzy Approach,Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering,Volume 2, Number 1, Mar. 2008 ISSN 1995-6665.

39 Khosravifard, E. Salahinejad, A. H. Yaghtin, A. Araghi, and A. Akhbarizadeh, "Tribochemical behavior of alumina coatings deposited by high-

velocity oxy fuel spraying,” *Ceram. Int.*, vol. 41, no. 4, pp. 5713–5720, 2015, doi: 10.1016/j.ceramint.2015.01.002.

40 R. C. Lima *et al.*, “Developing alternative coatings for repair and restoration of pumps for caustic liquor transportation in the aluminum and nickel industry,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 268, pp. 123–133, 2015, doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.08.010.

41 T. Peat, A. M. Galloway, A. I. Toumpis, and D. Harvey, “Evaluation of the synergistic erosion- corrosion behaviour of HVOF thermal spray coatings,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 299, pp. 37–48, 2016, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.04.072.

42 T. Peat, A. Galloway, A. Toumpis, D. Harvey, and W. H. Yang, “Performance evaluation of HVOF deposited cermet coatings under dry and slurry erosion,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 300, pp. 118–127, 2016, doi: 10.1016/j.surfcoat.2016.05.039.

42 S. Li *et al.*, “Corrosion behavior of HVOF sprayed hard face coatings in alkaline-sulfide solution,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 416, pp. 69–77, 2017, doi: 10.1016/j.apsusc.2017.04.149.

43 M. A. R. Mojena, A. S. Roca, R. S. Zamora, M. S. Orozco, H. C. Fals, and C. R. C. Lima, “Neural network analysis for erosive wear of hard coatings deposited by thermal spray: Influence of microstructure and mechanical properties,” *Wear*, vol. 376–377, pp. 557–565, 2017, doi: 10.1016/j.wear.2016.12.035.

44 Zheng *et al.*, “Experimental study on the erosion behavior of WC-based high-velocity oxygen-fuel spray coating,” *Powder Technol.*, vol. 318, pp. 383–389, 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2017.06.022.

45 J. Singh, S. Kumar, and S. K. Mohapatra, “Tribological analysis of WC–10Co–4Cr and Ni–20Cr2O<sub>3</sub> coating on stainless steel 304,” *Wear*, vol. 376–377, pp. 1105–1111, 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.01.032.

46 S. Lavigne, F. Pougoum, S. Savoie, L. Martinu, J. E. Klemberg-Sapieha, and R. Schulz, “Cavitation erosion behavior of HVOF CaviTec coatings,” *Wear*, vol. 386–387, pp. 90–98, 2017, doi: 10.1016/j.wear.2017.06.003.

47 Marchenko D.D. Improving the contact strength of V-belt pulleys using plastic deformation / D.D. Marchenko, K.S. Matvyeyeva // *Problems of Tribology*. – Khmel'nitsky, 2019. – Vol 24. – No 4/94 (2019) – S. 49–53. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-94-4-49-53>.

48 Marchenko D.D. Investigation of tool wear resistance when smoothing parts / D.D. Marchenko, K.S. Matvyeyeva // *Problems of Tribology*. – Khmel'nitsky, 2020. – Vol 25. – No 4/98 (2020) – S. 40–44. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-98-4-40-44>

49 Dykha A.V. Study and development of the technology for hardening rope blocks by reeling. ISSN 1729–3774 / A.V. Dykha, D.D. Marchenko, V.A. Artyukh, O.V. Zubiekhina–Khaiiat, V.N. Kurepin // *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*. Ukraine: PC «TECHNOLOGY CENTER». – 2018. – №2/1 (92) 2018. – pp. 22–32. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126196>.

50 Dykha A.V. Prediction the wear of sliding bearings. ISSN 2227–524X / A.V. Dykha, D.D. Marchenko // *International Journal of Engineering and Technology*

(UAE). India: “Sciencepubco–logo” Science Publishing Corporation. Publisher of International Academic Journals. – 2018. – Vol. 7, No 2.23 (2018). – pp. 4–8. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11872>.

51 Marchenko D.D. Analysis of the influence of surface plastic deformation on increasing the wear resistance of machine parts / D.D. Marchenko, V.A. Artyukh, K.S. Matvyeyeva // Problems of Tribology. – Khmel'nitsky, 2020. – Vol 25. – No 2/96 (2020) – S. 6–11. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-96-2-6-11>.

52 Han Xiaoling, Liu Xia. Method of repairing machine hydrostatic spindle thermal spraying [J]. manufacturing technology and machine tool, based on the 2013 (2): 98-100.