

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет  
машиностроения и транспорта

Кафедра  
Компьютерное проектирование  
технологического оборудования

Направление подготовки

15.04.05 Конструкторско-  
технологическое обеспечение  
машиностроительных производств

Магистерская программа

Металлообрабатывающие станки

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему

Исследование влияния электронского легирования  
на качество поверхностей деталей

ПГУ 15.04.05.08.00.00 ПЗ

(обозначение ВКР)

Студент гр. 18ММм2

  
(подпись, дата)

Писарев А.С.  
(фамилия, инициалы)

Научный руководитель

  
(подпись, дата)

Кочетков Д.В.  
(фамилия, инициалы)

Нормоконтролер

  
(подпись, дата)

Истомина Ю.В.  
(фамилия, инициалы)

Рецензент

к.т.н., начальник конструкторского бюро  
АО «ПО «Электроприбор» (г. Пенза)  
(должность, место работы)

  
(подпись, дата)

Белашов М.В.  
(фамилия, инициалы)

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 11.06.2020г. №10)

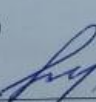
Заведующий кафедрой

  
(подпись)

Липов А.В.  
(фамилия, инициалы)

Работа защищена с оценкой хорошо  
(протокол заседания ГЭК от 25.06.2020 № 8)

Секретарь ГЭК

  
(подпись)

Истомина Ю.В.  
(фамилия, инициалы)

Пенза 2020

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой КПТО А.В. Липов

« 15 » 06 2020 г.

### ЗАДАНИЕ на магистерскую диссертацию

1. Студент гр. 18ММм2      Факультета машиностроения и транспорта,  
направления 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»

Писарев Александр Сергеевич

2. Научный руководитель магистерской диссертации

доцент Кочетков Д.В.

3. Время проектирования с 10 июня 2020 г. по 08 июля 2020 г.

4. Место преддипломной практики ФГБОУ ВО «ПГУ», кафедра «КПТО»

5. Тема магистерской диссертации

Исследование влияния электроискрового легирования на качество  
поверхностей деталей

Тема утверждена приказом ПГУ № 1047 а/о от 30.09.2019 г.

6. Техническое задание (цель проектирования, объект проектирования, его технические  
характеристики и т.п.)

спроектировать простую систему получения и насыщения азотом упрочняемой  
поверхности при электроискровом легировании (ЭИЛ), используя вихревой эффект, и в  
частности, рассчитать и сконструировать вихревой ректификатор и вакуум-насос;  
разработать конструкцию опытной установки ЭИЛ; сформулировать практические  
рекомендации по применению ЭИЛ для получения требуемого качества поверхностей  
различных деталей.

7. Объем и содержание основной части работы

7.1. Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, расчеты,  
обоснования, описания)

должна содержать актуальность темы диссертации, цель исследования, научную новизну,  
практическую ценность работы, разработку конструкции оборудования для проведения  
исследований, результаты исследования зависимости качества поверхностей после ЭИЛ,  
рекомендации по применению ЭИЛ, выводы по работе

7.2. Графическая часть (перечень и содержание чертежей, плакатов)

- 1) Цель работы, научная новизна и практическая ценность
- 2) Общие сведения об установках ЭИЛ
- 3) Результаты экспериментальных исследований
- 4) Рекомендации по применению ЭИЛ
- 5) Выводы по работе

8. Особые требования по выполнению разделов:

провести испытания различных деталей, упрочненных способом ЭИЛ, на стойкость

9. Календарный график выполнения магистерской диссертации

| Наименование этапов работы          | Объем работы, % | Срок выполнения  | Подпись руководителя |
|-------------------------------------|-----------------|------------------|----------------------|
| 1. Оформление пояснительной записки | 75              | до 18.06.2020 г. | Кочнев               |
| 2. Оформление автореферата          | 10              | до 20.06.2020 г. | Кочнев               |
| 3. Оформление презентации           | 15              | до 23.06.2020 г. | Кочнев               |

Дата выдачи задания 10 июня 2020 г.

Задание к исполнению принял Кочнев

Руководитель работы Кочнев

10 июня 2020

Магистерскую диссертацию к защите допустить

Декан Факультета машиностроения и транспорта

ОПОП освоена в полном объеме.  
К государственной итоговой  
диссертации допустить

С.Ю. Киреев

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение.....                                                                                                       | 3  |
| 1 Состояние вопроса. Задачи исследования.....                                                                       | 4  |
| 1.1 Сущность, особенности и области применения электроискрового легирования.....                                    | 4  |
| 1.2 Способы электроискрового легирования.....                                                                       | 9  |
| 1.3 Влияние межэлектродной среды на процесс электроискрового легирования.....                                       | 15 |
| 1.4 Задачи исследования.....                                                                                        | 18 |
| 2 Разработка конструкции оборудования для проведения исследований....                                               | 20 |
| 2.1 Описание установки ЭФИ-46АМ.....                                                                                | 20 |
| 2.2 Описание установки UR-121.....                                                                                  | 28 |
| 2.3 Проектирование системы получения и насыщения азотом упрочняемой поверхности при ЭИЛ.....                        | 31 |
| 3 Исследования зависимости качества поверхностей после ЭИЛ.....                                                     | 39 |
| 3.1 Исследование зависимости высоты микронеровностей покрытия от мощности режима при различных способах ЭИЛ.....    | 39 |
| 3.2 Исследование зависимости высоты микронеровностей и толщины покрытия от чистоты вибрации электрода при ЭИЛ.....  | 43 |
| 3.3 Исследование износа инструмента, упрочненного ЭИЛ.....                                                          | 47 |
| 4 Оценка стойкости изделий и влияния материала электрода на качества ЭИЛ.....                                       | 55 |
| 4.1 Производственные испытания стойкости различных изделий.....                                                     | 55 |
| 4.2 Влияние межэлектродной среды и материала электрода на микротвердость покрытия и диффузионного слоя при ЭИЛ..... | 58 |
| 4.3 Результаты исследований, их анализ, выводы.....                                                                 | 60 |
| Общие выводы.....                                                                                                   | 69 |
| Список источников.....                                                                                              | 70 |
| Приложение А – НАУЧНАЯ ПУБЛИКАЦИЯ .....                                                                             | 73 |
| Приложение Б – ПРЕЗЕНТАЦИЯ.....                                                                                     | 80 |

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в машиностроение применяют различные способы упрочнения поверхностей деталей. К этим способам относятся: нанесения покрытий различными способами, поверхностно-пластическое упрочнение и т.д.

К способам нанесения покрытия на поверхности различных деталей можно отнести: химический метод осаждения из газовой фазы (CVD), физический метод осаждения из газовой фазы (PVD), хромирование, электроискровое покрытие и т.д.

Электроискровое покрытие, известное также как и электроискровое легирование – это микро-сварочный процесс производства, часто используемый для ремонта повреждений точных или дорогостоящих деталей, таких как инструменты, часы и др.

Данный метод обладает рядом преимуществ:

- локальность покрытий в определенных местах радиусом от долей миллиметра;
- высокая адгезия;
- отсутствие нагрева и деформаций изделия;
- простота технологии;
- высок коэффициент переноса материала — от 60 до 80 %.

Изходя из выше сказанного, исследования процесса электроискрового легирования можно отнести к современным проблемам машиностроения.

## 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 1.1 СУЩНОСТЬ, ОСОБЕННОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Сущность электроискрового легирования (ЭИЛ) заключается в полярном переносе вещества электрода (анода) за счет энергии импульсных разрядов на поверхность изделия, являющегося катодом. Энергия, выделяемая конденсаторной батареей, через разрядный контур воздействует на анод и легирует поверхность катода, создавая химические соединения с диссоциированным атомарным азотом воздуха, углерода, материалом электрода и изделия, образуя так называемый «белый» слой с износоустойчивыми свойствами. Этот слой на микрофотографии [1] выглядит следующим образом: верхний «белый» слой внешне бесструктурный, нетравящийся и нижний слой (или подслой) – диффузионный, с сильно измененной структурой, постепенно переходящий в структуру основного металла. Такой слой можно получить только при электроискровом легировании, где происходят такие процессы как сверхскоростная закалка, азотирование, цементация, обогащение легирующими элементами. В таблице 1.1 приведено описание процессов, происходящих в поверхностном слое при ЭИЛ.

Механизм переноса упрочняющего вещества с анода на катод основан на ионной проводимости [2]. Канал ионной проводимости образуется за счет искрового разряда в воздушном зазоре между электродами. При этом вещество проходит все три фазовых состояния (газообразное, жидкое, твердое) по следующей схеме. При сближении электродов под действием разности потенциалов происходит электроискровой разряд. Канал искры отличается высокой плотностью тока и, как следствие, высоким тепловым эффектом. Под действием выделяющегося в канале тепла происходит не только оплавление элементарных участков электродов, но главным образом, непосредственное испарение металла. Образованные на аноде пары металла ионизируются потоком электронов с катода и, в свою очередь, образуют встречный поток ионов,

устремленных к катоду. На катоде перенесенные ионы металла нейтрализуются за счет электронной эмиссии катода, конденсируются и кристаллизуются. Жидкая фаза поглощает диссоциированный азот воздуха, а при кристаллизации происходит диффузия легирующих элементов в основной металл и образование карбидов и карбонитридов.

К особенностям ЭИЛ можно отнести [3]:

1. Высокая прочность сцепления нанесенного материала с основой (за счет механического перемешивания и взаимного диффузионного проникновения материалов электродов в формируемом слое);
2. Локальность проведения процесса (обработку можно осуществлять в строго заданных местах диаметром от долей миллиметра и более, не защищая при этом остальную поверхность изделия);
3. Отсутствие значительного термического воздействия на изделие, что исключает разупрочняющий отпуск и коробление деталей;
4. Возможность использования в качестве легирующих материалов как чистых металлов, так и многих сплавов, металлокерамических композиций, тугоплавких соединений и т.п.;
5. Простота технологического процесса, малогабаритность, транспортабельность оборудования, возможность обработки изделий различных форм и размеров;
6. Невысокая стоимость оборудования для ЭИЛ и экономичность процесса.

Важнейшая особенность ЭИЛ – формирование слоев покрытий на рабочих поверхностях изделий с разнообразными физико-химическими и механическими свойствами. Варьируя режимы ЭИЛ, материалы электродов, составы межэлектродной среды и другие параметры, можно изменять структуру, фазовый и элементный составы, шероховатость, толщину и многие другие свойства формируемых слоев, и, следовательно, получать покрытия с заданными эксплуатационными характеристиками. При этом достигается:

- повышение микротвердости изделий на 200-300%;
- повышение стойкости на 200-400%;

- увеличение усталостной прочности на 20-30%;
- повышение жаро- и коррозионной стойкости до 600%;
- восстановление размеров изделий до 0,3 мм.

Область применения ЭИЛ:

1. Увеличение износостойкости режущего инструмента:
  - металлорежущего (резцы, фрезы, сверла, метчики, плашки, развертки, протяжки, зенкера, долбяки, дисковые, ленточные пилы);
  - деревообрабатывающего (строгальные ножи, фасонные фрезы, дисковые, ленточные, рамные и цепные пилы, плоские ножи для изготовления древесного шпона, плоские ножи для лущения древесины);
  - для обработки растительного сырья (ножи для резки сахарной свеклы, ножи для измельчения лекарственных растений);
  - для мясопереработки (кутерные ножи, ножи и решетки для волчков, ножи для блокорепок, измельчители);
  - ножи для резки бумаги и картона.
2. Увеличение износостойкости слесарного инструмента (зубила, ножовочные полотна, ножницы, ножи для гильотины).
3. Увеличение износостойкости медицинского инструмента (зажимного).
4. Увеличение износостойкости штамповой оснастки:
  - штампы для холодной обработки металлов (вырубные, пробивные, вытяжные, гибочные и т.д.)
  - штампы для горячей обработки металлов (формообразующие и др.)
5. Увеличение износостойкости оснастки для горячей протяжки, высадки, прессования, прошивки и вытяжки металла.
6. Пресс-формы и литформы для изделий из резины и пластмасс.
7. Увеличение износостойкости трущихся поверхностей деталей машин, рабочих и исполнительных органов различного назначения (шейки валов, шестерни, втулки, рычаги, толкатели, шатуны, клапаны, лопатки и детали компрессорных машин, роторы, диски, турбины). Например:

- кулачки и рычаги распределительных валов автомобилей (твердый сплав, свинец, бронза);
  - зубья шестерен синхронизатора коробки передач автомобилей (твердый сплав);
  - протяжные ролики волочильных машин (твердый сплав, обкатка или полировка для повышения чистоты поверхности);
  - трущиеся поверхности деталей из титановых сплавов в авиационных двигателях (промышленный отожженный графит);
  - формирование локального антифрикционного покрытия из бронзы (Бр АЖ) взамен бронзовых вкладышей в гидросистемах шасси самолетов и вертолетов.
8. Увеличение износостойкости закаточных, зажимных и других роликов в консервной промышленности.
  9. Увеличение износостойкости облицовки (оснастки) пресс-форм для формирования алюмосиликатных изделий, фильеров для формирования карбидокремниевых нагревателей, плит пресс-форм для формовки кирпича.
  10. Увеличение износостойкости лотков (желобов) для подачи табачной смеси в табачной промышленности.
  11. Нанесение токопроводящих покрытий на детали различного назначения:
    - локальное нанесение серебра (техническое) на электрические контакты. Достигается двойной эффект на счет экономии серебра и повышенной износостойкости по сравнению с гальваническим серебрением;
    - локальное нанесение токопроводящих покрытий на поверхностях, не поддающихся пайке.
  12. Нанесение различных материалов для улучшения адгезии:
    - латуни на места пайки твердосплавных пластин;
    - нанесение меди, бронзы и т.д. на стальные детали с последующим

гальваническим покрытием.

13. Заделка микропор и других дефектов поверхности при отливке ювелирных изделий из драгоценных металлов с последующей полировкой.
14. Увеличение шероховатостей поверхности с целью повышения коэффициента трения.
15. Восстановление размеров изношенных поверхностей деталей различного назначения и мерительного инструмента в пределах наносимого слоя.
16. Получение декоративной поверхности (шагрень) на отдельных частях пластмассовых деталей путем нанесения покрытия на литформы.
17. Маркировка деталей из закаленного материала.
18. Увеличение износостойкости оснастки и инструмента в стекольной и фарфоровой промышленности:
  - литьевых форм для изготовления стеклоизделий;
  - держателей литьевых форм;
  - ножниц для резки жидкого стекла;
  - переставителей стеклотары;
  - кулачков вала синхронизатора;
  - державок резцов для резки стекла;
  - формующих роликов.

## 1.2 СПОСОБЫ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

На основании проработанных источников информации [2-29], разработана иерархическая классификация применяемых способов ЭИЛ (схемы приведены на рисунках 1.1-1.3).

Рассмотрим более подробно основные способы ЭИЛ, представленные в данной классификации. В нее включен способ **восстановления и упрочнения деталей ферромагнитными порошками в магнитном поле** [6], т.к. механизм переноса вещества происходит за счет электроискрового разряда. Схема восстановления и упрочнения цилиндрических деталей данным способом представлена на рисунке 1.1.

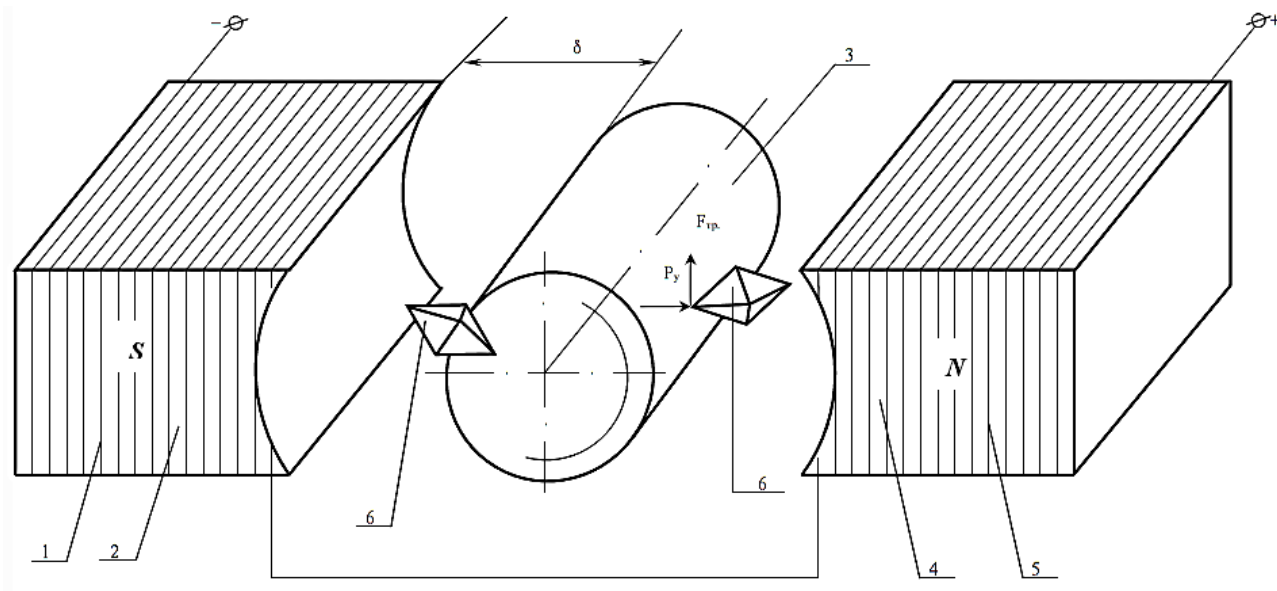


Рисунок 1.1. Схема восстановления и упрочнения цилиндрических деталей:

1 и 5 – электрообмотка; 2 и 4 – электромагниты; 3 – деталь; 6 – частицы ферромагнитного порошка;  $P_y$  – радиальные силы;  $F_{тр.}$  – силы трения

Упрочняемую деталь помещают между двумя электромагнитами с зазором. Обмотку электромагнитов выполняют так, чтобы наводимый магнитный поток пронизывал деталь в диаметральной направлении. Электромагниты питаются пульсирующим (выпрямленным) током от выпрямителя. Обрабатываемую деталь и электромагниты подключают к генератору импульсов

электрического тока. В зазор между деталью и электромагнитами подают твердый ферромагнитный порошок – ферробор, бористый чугун, ферровольфрам, белый чугун и др. Зерна порошка (6) удерживаются в зазоре между деталью и магнитами и прижимаются к поверхности вращающейся детали силами магнитного поля.

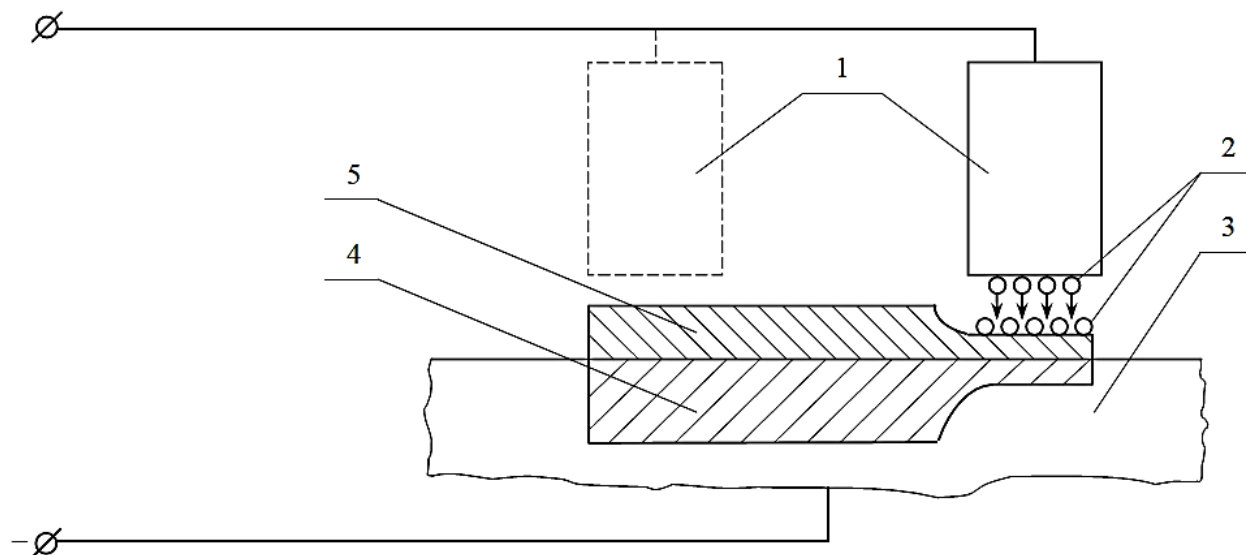


Рисунок 1.2. Схема упрочнения электродами при ЭИЛ: 1 – электрод; 2 – ионы атомов материала электрода; 3 – деталь; 4 – термически упрочненный (“белый”) слой; 5 – нанесенный слой из материала электрода.

В начале обработки обильно подается охлаждающая жидкость. Процесс восстановления и упрочнения деталей осуществляется за счет микротоков, генерируемых в ферромагнитных элементах. Постоянный контакт ферромагнитных элементов с деталью исключает возможность возникновения электрических разрядов. Явление наращивания металла объясняется тем, что между рабочим элементом (зерном ферромагнитного порошка) и поверхностью детали протекают электрические микротоки, которые оплавливают части микрогребешков поверхности детали и ферромагнитного рабочего элемента – зерна.

Под воздействием тока, текущего по расплавленному металлу, и внешнего магнитного поля жидкая фаза выбрасывается из зоны касания ферромагнитного элемента с деталью на ее поверхность. Если в зазор подается

охлаждающая жидкость, то расплавленный металл быстро затвердевает и не схватывается с поверхностью детали. При обработке без охлаждающей жидкости деталь, быстро вращаясь в магнитном поле, разогревается, и расплавленный металл, попадая на разогретую поверхность, схватывается с ней, за счет чего происходит наращивание поверхности.

Жидкая фаза в начале обработки состоит из ферромагнитного элемента и металла детали, образуя промежуточный слой. В дальнейшем после обработки без охлаждения наращенный слой будет состоять только из ферромагнитного порошка. Рассматриваемый способ исключает необходимость применения дополнительных источников возникновения электрического тока, так как ферромагнитный рабочий элемент является самостоятельным генератором электрического тока. Токи наводятся в результате многократного пересечения зерен порошка магнитными силовыми линиями. При каждом соприкосновении зерна порошка с неровностями детали проскакивают искры. Поток искр, расплавляя поверхность детали, способствует застреванию зерен ферропорошка в остывших кратерах, наращивая размер детали (охлаждающая жидкость не подается). Энергия микротоков составляет около  $10^{-8}$  Дж, но из-за большого количества ферропорошка и искр металла расплавляется значительно меньше, чем срезается. Следовательно, если порошок мягче материала детали, она все равно будет обрабатываться. Толщина наращиваемого слоя не зависит от твердости порошка.

Этот способ позволяет:

1. Обрабатывать цилиндрические, плоские и сложные поверхности, получая шероховатость до  $Ra = 0,32$  мкм.
2. Наращивать на упрочняемых поверхностях слои толщиной до 0,7 мм и твердостью до 65 HRC.
3. Осуществлять обработку с высокой производительностью – до 160 см<sup>2</sup>/мин.
4. Исключить термические деформации детали, так, что температура ее нагрева не превышает 150°C.

Традиционно ЭИЛ осуществляется электродами. В качестве электродов

могут быть использованы стержни, пластины, диски. Наиболее часто используют призматические и цилиндрические стержни. Схема ЭИЛ электродами представлена на рис. 1.3, а схема отдельных способов – на рисунке 1.3.

Вибрация электрода в вертикальной плоскости (см. рисунок 1.3, б) позволяет осуществлять коммутацию разрядного промежутка между упрочняемой деталью и электродом и стабилизировать процесс ЭИЛ. При проведении ЭИЛ без вибрации электрода коммутация разрядного промежутка осуществляется с помощью электронного устройства.

Вращение электрода, а также линейная и круговая осцилляция его в горизонтальной и вертикальной плоскости в процессе ЭИЛ (см. рисунок 1.3, в, г, д, е, ж) позволяет значительно снизить шероховатость нанесенного слоя (примерно на два класса) и увеличить его сплошность [29, 9, 23].

Для уменьшения шероховатости нанесенного слоя может быть также использован способ воздействия на нее вибрирующим стержневым электродом (см. рисунок 1.3, з). Ударное воздействие вибрирующего электрода на упрочненную поверхность приводит к пластической деформации и сплющиванию неровностей и, тем самым, улучшает ее чистоту. Такой режим обработки предусмотрен на установке UR-121 [24]. Ударное воздействие эксцентрично закрепленным вращающимся электродом (см. рисунок 1.3, и) в процессе ЭИЛ также приводит к деформации и выглаживанию неровностей микрорельефа наносимого слоя [12].

Следует выделить способы ЭИЛ [17], которые позволяют формировать специальный (упорядоченный) микрорельеф наносимого слоя с высотой неровностей, значительно превышающих обычную ( $Ra > 5 \text{ мкм}$ ). При этом (см. рисунок 1.3, к) высота неровностей в направлениях действия сил трения, возникающих в процессе эксплуатации изделия, значительно выше, чем в других направлениях ( $Rz_x \geq Rz_y$ ). Это может быть достигнуто:

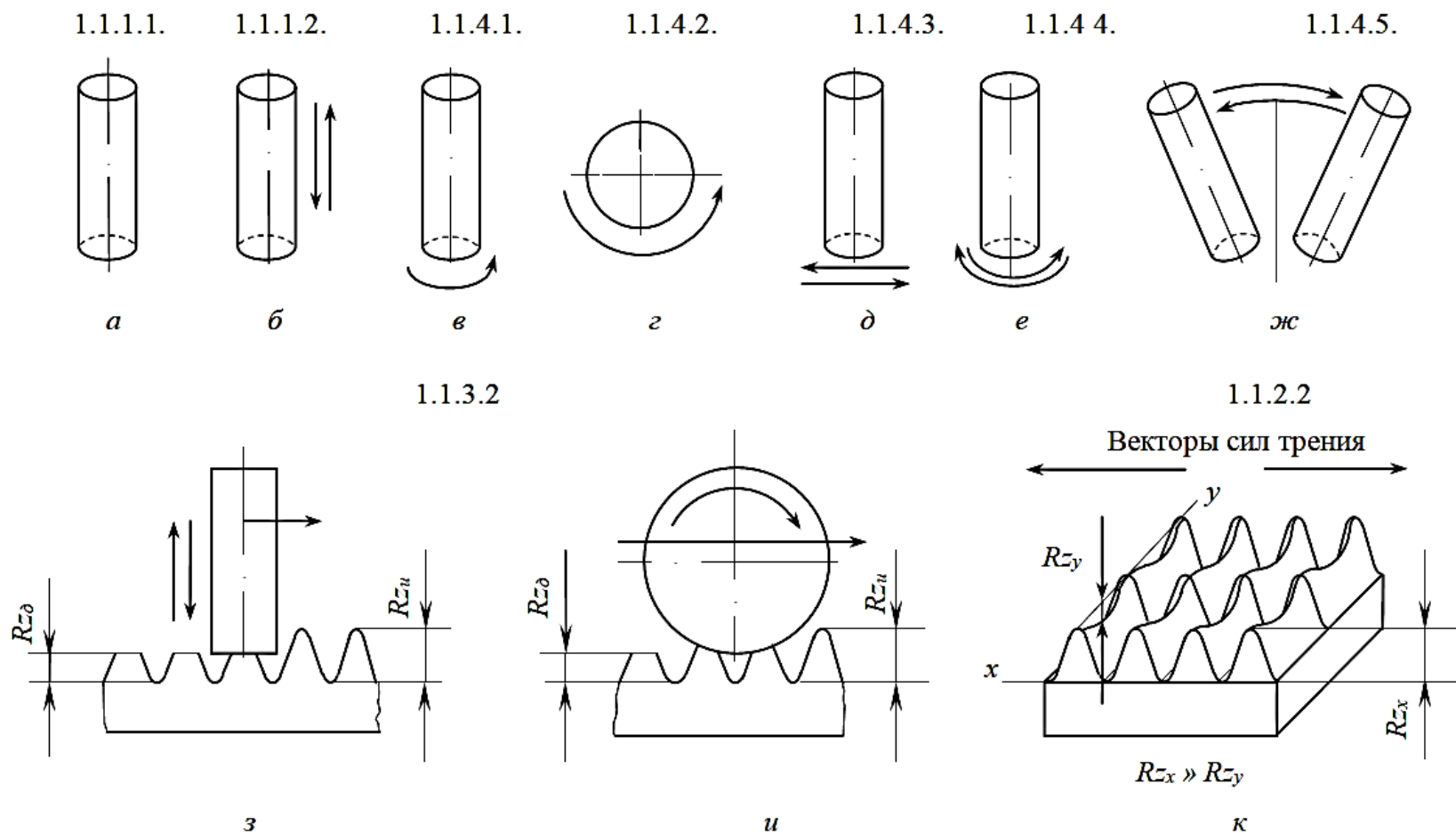


Рисунок 1.3. Схемы способов ЭИЛ электродами: *a* – без вибрации; *б* – с вибрацией в ВП; *в* – с вращением в ГП; *г* – с вращением в ВП; *д* – с линейной осцилляцией в ГП; *е* – с круговой (орбитальной) в ГП; *ж* – с круговой (орбитальной) осцилляцией в ВП; *з* – с ДВ МР вибрирующим в ВП стержневым электродом; *и* – с ДВ МР вращающимся в ВП эксцентрично закрепленным электродом; *к* – с формированием упорядоченного МР;  $Rz_u$  и  $Rz_0$  – высота неровностей нанесенного слоя, соответственно, исходная и после деформирования.

- выбором режимов обработки;
- сочетанием легирования с эрозионной обработкой путем перемены полярности в процессе ЭИЛ;
- с построчным ведением процесса ЭИЛ и пропуском неупрочненных участков поверхности.

Такие рельефы целесообразно наносить на зажимные, захватные, тянущие и др. элементы различных устройств.

### 1.3 ВЛИЯНИЕ МЕЖЭЛЕКТРОДНОЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Как было указано выше, основополагающее значение в процессе ЭИЛ имеет пробой искрового разряда между электродами. В работах [30-31] рассматривается механизм пробоя электрического разряда между электродами в воздушной среде и вакууме. На основании этих работ можно сделать вывод, что пробой между электродами наступает при определенном напряжении и расстоянии между ними, в зависимости от коэффициентов ионизации, которые зависят от состояния межэлектродной среды. Однако, влияние межэлектродной среды на пробой практически не изучено.

Влияние межэлектродной среды на процесс ЭИЛ изучалось по работе [2]. Как показали описанные в данной работе исследования, азот, получаемый из воздуха, играет важную роль в формировании и образовании высокотвердого и стойкого диффузионного слоя упрочнения. При пробивании воздушного промежутка электроискровым разрядом молекулы азота, находящегося в воздухе, расщепляются на атомы азота, которые ионизируются и вместе с наносимым металлом диффундируют в поверхность упрочняемого изделия. При этом в поверхностном слое образуются нитриды и карбонитриды легирующих элементов и твердый раствор с железом и легирующими элементами, что повышает микротвердость упрочняемой поверхности и ее износостойкость.

В работе [2] проводился газовый анализ упрочняемого слоя при ЭИЛ. Сущность этого метода состояла в плавлении пробы исследуемого металла в высоком вакууме (порядка  $10^{-4}$  мм рт. ст.) в графитовом тигле при температуре около  $1600^{\circ}\text{C}$ . Выделяющиеся при этом из расплавленного металла газы откачивались из вакуумной печи системой насосов и анализировались обычными методами химического газового анализа.

Как было выяснено, при ЭИЛ в воздушной среде содержание азота в поверхностном слое в значительной мере определяется материалом упрочняющего электрода. Наибольшее содержание азота в поверхностном слое наблюдалось при покрытии электродами из феррохрома (70% Cr) – 2,8%, что указывает

на большое сродство азота и хрома, а наименьшее при использовании электродов из белого чугуна (2,9% C; 1,01% Si) – 0,1%. При этом в последнем случае происходило насыщение поверхностного слоя как азотом, так и углеродом. В ходе проведенных исследований было установлено, что твердость упрочненного слоя мало зависит от упрочняемого материала, а в значительной степени определяется маркой электрода, способного при ЭИЛ в разных количествах поглощать азот из воздуха и в разной степени легировать упрочняемую поверхность. Кроме того, было установлено, что увеличение мощности режима ЭИЛ ведет к увеличению содержания азота в упрочненном слое.

Влияние азота на износостойкость поверхностного слоя изучалась в металловедении. Известно, что большая износостойкость азотированного слоя связана исключительно с его высокой твердостью, достигающей 1,3 ГПа по Виккеру. Она приближается к твердости алмаза и значительно превосходит пределы твердости, достигаемые в сталях обычными операциями: цементацией, закалкой, цианированием и даже хромированием. Это связано с тем, что при азотировании происходит образование высокодисперсных иглообразных нитридов, вызывающих торможение по плоскостям скольжения зерен при деформации.

ЭИЛ является процессом, близким к процессу азотирования сталей, поэтому свойства слоев, получаемых в обоих случаях, близки между собой:

1. Микроструктура этих слоев является аналогичной. В обоих случаях слой состоит из двух примерно равных частей – верхнего белого не травящегося слоя и нижнего диффузионного.
2. Оба слоя имеют высокую микротвердость, достигающую 1,3 ГПа.
3. Поверхностный слой в обоих случаях имеет очень высокую стойкость и не поддается травлению обычными реактивами.
4. Оба слоя отличаются высокой стойкостью и не снижают твердости при температуре 600-700°C.
5. Азотирование и ЭИЛ создают антикоррозионные слои.

Однако, все проведенные ранее исследования по влиянию азота на процесс ЭИЛ проводились в воздушной среде. Влияние азота в чистом виде, как

межэлектродной среды при ЭИЛ, практически не изучено.

В работе [2] изучалось также влияние на процессы ЭИЛ инертных газов (в частности, гелия) и эмульсии в качестве межэлектродной среды. Выяснилось, что инертный газ плохо охлаждает электрод и никакого влияния на твердость упрочняемого слоя не оказывает. Эмульсия, наоборот, хорошо охлаждает электрод, увеличивает глубину закаленного слоя, но не приводит к значительному увеличению микротвердости упрочненного слоя. Кроме того, в этом случае наблюдалось существенное увеличение шероховатости поверхностного слоя.

В заключение следует отметить, что глубоких исследований по влиянию, как эмульсии, так и других межэлектродных сред при различных марках упрочняющего электрода и режимах ЭИЛ не проводилось.

## 1.4 ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как было отмечено выше, способ упрочнения ЭИЛ отличается простотой, не требует сложного технологического оборудования, в т.ч. вакуумного. Он позволяет получать высокотвердый износостойкий поверхностный слой и исключительно высокую прочность сцепления наносимого покрытия с основным металлом.

Однако ЭИЛ имеет и ряд недостатков, главный из которых – большая шероховатость упрочненной поверхности.

В разделе 1.2. представлены различные способы ЭИЛ. Указанные среди них способы ЭИЛ с вращением, качанием и с различной частотой колебаний упрочняющего электрода позволяют снизить шероховатость упрочненной поверхности. Уменьшить шероховатость упрочненной поверхности после ЭИЛ можно также, используя способы электроискрового шлифования (ЭИШ) и турбосглаживания (ТС).

ЭИШ – это тоже процесс искровой обработки, но в отличие от ЭИЛ, он выполняется при прямой полярности электродов: деталь – анод, упрочняющий электрод – катод. Вследствие этого идет преобладающий перенос материала с гребешков микронеровностей упрочненной поверхности на упрочняющий электрод.

ТС – способ искровой обработки, сочетающий ЭИЛ с высокочастотным ударным воздействием электрода на упрочненную поверхность, приводящего к сглаживанию гребешков ее микронеровностей.

ЭИШ и ТС выполняются на том же оборудовании, что и ЭИЛ, с одного установка детали и на втором переходе операции упрочнения.

Вышеуказанные способы в литературе изучены мало. Данные о влиянии их на параметры шероховатости упрочненной поверхности при различных режимах обработки практически отсутствуют. Поэтому **целью выпускной квалификационной работы** является *изучение влияния режимов обработки (в первую очередь, такого параметра, как мощность) на шероховатость полученного покрытия при использовании этих способов.*

Для достижения поставленной цели следует решить ряд задач:

1. Спроектировать опытную установку ЭИЛ.
2. Изучение влияния межэлектродной среды на параметры (микротвердость) упрочненного слоя (как покрытия, так и диффузионного слоя), в зависимости от материала упрочняющего электрода.
3. Спроектировать простую систему получения и насыщения азотом упрочняемой поверхности при ЭИЛ, используя вихревой эффект, и в частности, рассчитать и сконструировать вихревой ректификатор и вакуум-насос.
4. Провести сравнительные испытания упрочненных при ЭИЛ деталей и инструментов.

**Научная новизна:** разработана модель зависимости высоты микронеровностей покрытия от мощности режима при различных способах электроискрового легирования.

**Практическая ценность работы:** разработана конструкция опытной установки ЭИЛ; сформулированы практические рекомендации по применению ЭИЛ для получения требуемого качества поверхностей различных деталей.

## 2 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

При выполнении выпускной квалификационной работы использовались две установки: ЭФИ-46АМ и UR-121.

Механизированная установка ЭФИ-46АМ применялась для исследования процесса электроискрового легирования экспериментальных образцов на средних и повышенных мощностях обработки ( $10-140 \text{ В} \cdot \text{А}$ ) и для упрочнения изнашиваемых деталей с фасонными (сферическими) поверхностями (шаровые опоры автомобилей, шаровые краны) при проведении производственных испытаний.

Установка UR-121 применялась для исследования процесса ЭИЛ при небольших мощностях обработки (ниже  $10 \text{ В} \cdot \text{А}$ ) и для упрочнения различного инструмента (свёрла, сегментные пилы, ножи) и деталей штампов при проведении опытных и производственных испытаний.

Использование этих двух установок позволило провести исследования в широком диапазоне режимов обработки ЭИЛ и упрочнить различные изделия.

### 2.1 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ЭФИ-46АМ

Установка для механизированного электроискрового легирования предназначена для упрочнения сложных фасонных поверхностей (в т.ч. сферических) металлокерамическими и другими материалами.

Технические характеристики:

Скорость поворота детали в меридианной плоскости.....0,004 об/мин;

Скорость вращения детали.....2,4-6,0 об/мин;

Длина продольного перемещения каретки с вибратором.....50 мм;

Частота вращения вибратора.....до 450 об/мин;

Амплитуда качательного движения электрода..... $0,6 \pm 0,1$  мм;

Частота качательного движения электрода..... $1,3 \pm 0,2$  Гц;

Частота вибрации электрода .....100-250 Гц;

Амплитуда вибрации электрода ..... $0,7 \pm 0,2$  мм;  
 Диаметр электрода.....до 6 мм;  
 Напряжение на электроде.....до 160 В;  
 Сила тока на электроде.....5 А;  
 Потребляемая мощность.....не более 0,5 кВт·А;  
 Питание установки от сети переменного тока  
     напряжением.....220 В;  
     при частоте.....50 Гц;  
 Производительность.....до 10 см<sup>2</sup>/мин;  
 Габаритные размеры.....900×800×770 мм;  
 Масса установки.....190 кг;  
 Поддерживание режима легирования.....автоматическое.

Установка состоит из следующих основных частей (рисунок 2.1):

- источник технологического тока;
- электродинамический вибратор;
- источник питания вибратора;
- блок следящей системы с электромеханическим приводом осевой подачи вибратора;
- электромеханические приводы вращения и качания вибратора;
- электромеханические приводы перемещения / вращения и разворота детали.

*Источник технологического тока* предназначен для генерирования обрабатывающих импульсов тока, регулирования и контроля электрических параметров процесса ЭИЛ.

В качестве источника технологического тока используется блок питания от установки ЭФИ-46А, встроенный в корпус установки так, что его лицевая панель выходит на пульт управления установкой. Принципиальная электрическая схема блока питания представлена на рисунке 2.2. Накопительные конденсаторы С3-С12 подключены через выпрямитель к трансформатору Тр. с повышенным рассеиванием. Переключатель режимов В2 коммутирует вторичные

обмотки трансформатора. Тиристоры Д7 и Д8 предназначены для защиты оператора от поражения электрическим током при работе установки в режиме холостого хода. Диоды Д2 и Д5 и резисторы R3-R8 составляют электрическую цепь управления тиристорами.

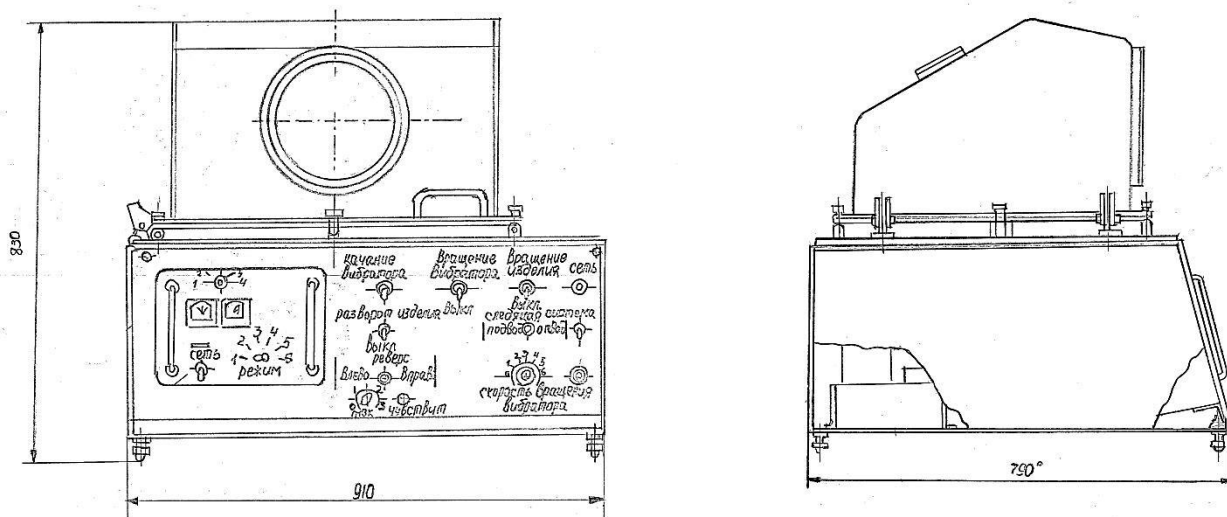


Рисунок 2.1. Общий вид установки ЭФИ-46АМ

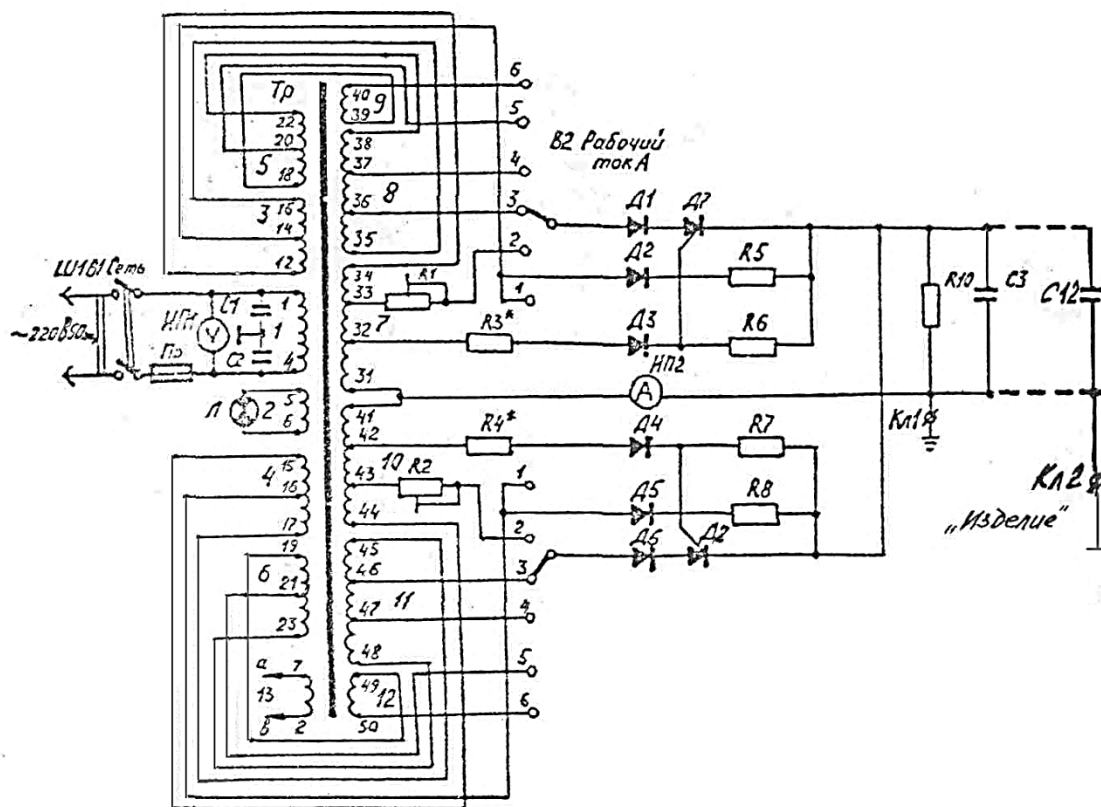


Рисунок 2.2. Принципиальная электрическая схема блока питания ЭФИ-46А

Резисторы R1 и R2 ограничивают рабочий ток установки при обработке на втором режиме. Электрический фильтр, собранный на конденсаторах C1 и C2, предназначен для защиты сети от радиопомех. Вольтметр ИП1 предназначен для измерения напряжения сети, амперметр ИП2 – для измерения рабочего тока установки.

При работе установки в режиме холостого хода (электрод отведен от изделия) управляющий ток проходит от вывода 32 трансформатора через резистор R3, диод Д3, тиристор Д7, резистор R10 к средней точке 31 вторичной обмотки трансформатора.

Сопротивление резистора R10 выбрано таким, что ток управления не достигает значения тока включения тиристора. Тиристор закрыт, а конденсаторы C3-C12 заряжены до безопасного напряжения, равного падению напряжения на резисторе R10, создаваемого управляющим током.

В момент начала работы установки электрод подводится до соприкосновения с изделием. При этом ток управления увеличивается, включается тиристор, и конденсаторы заряжаются до амплитудного значения напряжения вторичной обмотки трансформатора. Вибрирующий электрод вступает в контакт с поверхностью обрабатываемого изделия, следует разряд конденсаторов C3-C12. Разрядный импульс тока осуществляет обработку изделия. В дальнейшем описанный цикл повторяется.

При отводе электрода от поверхности изделия на конденсаторах C3-C12 остается опасное для жизни напряжение (до 220 В). Поэтому в электрической схеме предусмотрена защита, которая снижает это напряжение до безопасного в течение 0,5-1,0 с. Происходит это следующим образом. Отвод электрода от поверхности изделия сопровождается снижением тока в цепи управления и выключением тиристора в момент перехода напряжения на его аноде через нуль. Конденсаторы C3-C12 разряжаются через резистор R10 до безопасного напряжения. Электрическая цепь, составленная диодом Д2 и резистором R5, предназначена для повышения надежности выключения тиристора.

Работа симметричного плеча выпрямителя с тиристором Д8 аналогична описанной.

*Электродинамический вибратор* предназначен для сообщения электроду осевых колебаний, необходимых для периодического контактирования электрода с легируемой деталью, т.е. коммутации цепи разрядного контура. Частотой контактирования электрода с деталью ограничивается частота следования импульсов тока через искровой промежуток и, как следствие этого, производительность процесса ЭИЛ.

Использование электродинамического вибратора позволяет увеличить частоту осевых колебаний электрода в несколько раз по сравнению с обычным электромагнитным вибратором, обмотки которого питаются током промышленной частоты 50 Гц. Это позволяет увеличить массу материала электрода, переносимого в единицу времени на обрабатываемую деталь в процессе ЭИЛ.

Схема конструкции вибратора представлена на рисунке 2.3. Электрод 1 закрепляется в электрододержателе – якоре 2 вибратора. Якорь 2 установлен на упругих подвесках 4 вдоль оси корпуса вибратора 3. Внутри корпуса 3 закреплены магнитопроводящие втулки 6 и 7, между которыми находится кольцо 8 постоянного магнита. На якоре 2 установлена также катушка 5, цилиндрическая часть которой с обмоткой свободно размещается в кольцевом пазу, между втулками 6 и 7. При пропускании по обмотке катушки 5 переменного тока повышенной частоты (более 100 Гц) в результате взаимодействия его с постоянным магнитным полем кольцевого паза магнитопровода возникают вынужденные осевые колебания якоря 2 с частотой пропускаемого тока.

*Источник питания вибратора* предназначен для питания катушки электродинамического вибратора переменным током повышенной частоты (более 100 Гц) и для плавного изменения этой частоты с целью осуществления резонансной настройки вибратора.

В качестве источника питания электродинамического вибратора используется серийно изготавливаемый промышленностью генератор низкочастотных сигналов типа ГЗ-109 или ГЗ-56/1, имеющий выходное напряжение не менее 6 В при частоте от 100 до 400 Гц.

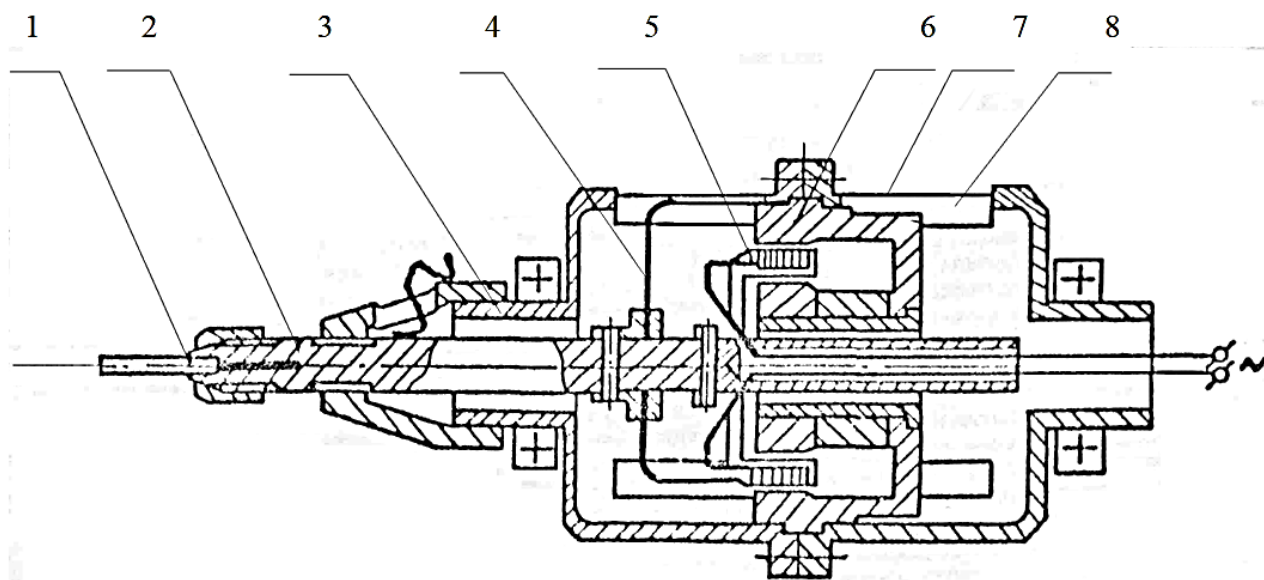


Рисунок 2.3. Схема конструкции электродинамического вибратора:  
 1 – электрод-инструмент; 2 – электрододержатель – якорь; 3 – корпус вибратора; 4 – упругая подвеска; 5 – катушка; 6 и 7 – магнитопроводящие втулки; 8 – кольцо магнита

*Блок следящей системы с электромеханическим приводом осевой подачи вибратора* предназначен для поддержания постоянства заданной величины технологического тока в процессе ЭИЛ и автоматической осевой подачи вибратора по мере электроискровой эрозии электрода. Блок следящей системы состоит из входного устройства, источника опорного напряжения предварительного усилителя, конечного усилителя мощности и источника питания блока следящей системы.

*Электромеханические приводы вращения и качания вибратора* предназначены для сообщения вибрирующему электроду дополнительно еще двух движений, что позволяет уменьшить шероховатость поверхности легированного слоя, обеспечить его максимально возможную сплошность и минимальную раковичность.

Вращение вибратору сообщает электродвигатель М4, запитываемый через выпрямитель от автотрансформатора, движком которого можно регулировать угловую скорость вращения вибратора. Качательное движение вибратору придает электродвигатель М1, на валу которого закреплен эксцентрик,

периодически отклоняющий платформу с вибратором относительно вертикальной оси.

*Электромеханические приводы вращения и разворота детали* предназначены для сообщения вращения вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, пересекающихся в центре сферы. Отличительной особенностью конструкции приводов является наличие устройства одновременного изменения угловых скоростей вращения детали в зависимости от угла наклона ее оси собственного вращения к оси, вдоль которой располагается легирующий электрод. Этим достигается сохранение постоянства относительной линейной скорости движения торца электрода вдоль обрабатываемой сферической поверхности, что обеспечивает одинаковые условия проработки всех участков детали как на полюсах, так и на экваторе, т.е. и равномерность нанесения легированного слоя по толщине.

Угловая скорость электродвигателей М3 и М2 вращения и разворота изделия регулируется резистором R2 автоматически в зависимости от угла наклона шпинделя установки к оси легирующего электрода. Изменение направления разворота оси шпинделя установки может осуществляться с помощью переключателя S4 (см. в графической части проекта).

**Конструкция установки.** В сварном корпусе установки размещается источник технологического тока, передняя панель которого выведена на пульт управления установкой. Основные электроэлементы органов управления смонтированы на передней лицевой панели установки, которая выполнена поворачивающейся относительно горизонтальной оси, располагаемой внизу. Электрический блок следящей системы установлен внутри корпуса установки. Источник питания вибратора (генератор ГЗ) может устанавливаться отдельно, рядом с установкой.

На корпусе установки сверху закрепляется плита, на которой монтируются электродинамический вибратор, электромеханические приводы осевой подачи, вращения и качания вибратора, а также вращения и разворота легируемой сферической детали. Конструкцией установки предусмотрен откидной защитный колпак с окнами-иллюминаторами, закрывающий полностью все механиз-

мы установки в процессе ЭИЛ. В конструкции установки предусмотрен подвод сжатого воздуха для охлаждения обрабатываемой детали, а также патрубок для вытяжной вентиляции рабочего пространства под колпаком установки от выделяющейся в процессе электроискровой эрозии электрода металлической пыли.

***Приспособление для крепления полусферы.*** Данное приспособление предназначено для закрепления деталей при упрочнении внутренних сферических поверхностей (полусфер) на механизированной установке электроискрового легирования ЭФИ-46АМ.

Максимальный размер упрочняемой детали – 80 мм.

Приспособление (см. чертеж) устанавливается хвостовиком\* корпуса 1 в конус установки ЭФИ-46АМ и закрепляется болтами через пазы\*\*. Приспособление с закрепленной полусферой выставляется на установке в соответствии с технологической наладкой.

При наличии у полусферы отбортовки она устанавливается в корпус 1 отверстием (пазом) на штифт 8, фиксируется планками 5 и закрепляется винтами 6.

В случае отсутствия отбортовки полусфера при установке поджимается к пружинам 7 с усилием не менее 40 Н, а затем также фиксируется планками 5 и закрепляется винтами 6.

## 2.2 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ UR-121

Установка *UR-121* (в дальнейшем установка) предназначена для упрочнения электроискровым легированием наружных и внутренних поверхностей деталей машин, режущего инструмента и штамповой оснастки, нанесения токопроводящих покрытий.

Установка содержит (рисунок 2.4) ручной электромагнитный вибратор, генератор, контактную пластину для размещения обрабатываемых деталей или инструментов, кабель для подключения контактной пластины к генератору.



Рисунок 2.4. Общий вид установки *UR-121*

Установка обеспечивает в зависимости от режимов работы, материала электрода и обрабатываемой детали или инструмента нанесение покрытий до 20 мкм.

Микротвердость поверхностно-упрочненного слоя – до 18000 МПа.

Среднеарифметическое отклонение профиля обрабатываемой поверхности – не более 3,5 мкм.

Питание установки осуществляется от однофазной сети переменного тока 220 В частотой 50 Гц.

Потребляемая установкой мощность – не более 120 В·А.

Габаритные размеры составных частей установки:

генератор – не более 264×236×125 мм;

вибратор (без кабеля) – не более 135×80×45 мм.

Масса составных частей установки:

генератора – не более 8 кг;

вибратора – не более 0,7 кг.

Установка состоит из генератора, вибратора, пластины и кабеля для подключения генератора к пластине, на которой размещают обрабатываемую деталь или инструмент.

Генератор выполнен в прямоугольном металлическом корпусе.

На передней панели генератора расположены:

- клавиша включения сети *POWER* со встроенным световым индикатором включения сети;
- ручка настройки амплитуды вибрации вибратора *VIBRATION*;
- ручка переключателя электрических режимов обработки *MODE*;
- клавиша переключателя технологических режимов *NORMA-TURBO* со встроенным световым индикатором включения режима *TURBO*;
- розетки разъемов подключения кабеля вибратора *TOOL* и кабеля *DE-TAIL* для подключения к генератору пластины.

На задней панели генератора выведен сетевой шнур с вилкой для подключения установки к сети, расположены клемма заземления и держатель предохранителя.

Вибратор выполнен в пластмассовом корпусе, внутри которого размещена магнитная система, содержащая магнитопровод, катушку и якорь. Работа вибратора аналогична рассмотренной в разделе 2 п. 2.1.

В электрододержателе якоря закрепляется электрод. К генератору вибратор подключается кабелем с разъемом.

Принцип работы установки основан на периодических разрядах накопительных конденсаторов при касании вибрирующим электродом поверхности обрабатываемой детали.

При разрядах накопительных конденсаторов происходит перенос и

диффундирование материала электрода в поверхностный слой обрабатываемой детали.

При работе установки в технологическом режиме *NORMA* частота вибраций электрода не зависит от режимов работы и равна 100 Гц (удвоенная частота сети).

В режиме *TURBO* частота вибраций устанавливается автоматически магнитной системой в пределах от 130 до 500 Гц следующим образом:

- при касании электродом обрабатываемой детали замыкается цепь питания катушки вибратора;
- через катушку протекает ток, притягивающий якорь к магнитопроводу;
- цепь питания катушки размыкается;
- пружина якоря возвращает электрод в точку касания с обрабатываемой деталью;
- замыкается цепь питания катушки, и колебательный процесс якоря вибратора повторяется. При этом частота и фаза колебаний по отношению к разрядам накопительных конденсаторов зависит от инерционности магнитной системы (зависит от параметров пружины якоря и индуктивности катушки).

Установка имеет три электрических режима:

1. <sup>ый</sup> – для процесса ЭИЛ мелкого режущего инструмента и безззорных штампов;
2. для процесса ЭИЛ мелкого и среднего режущего инструмента и технологической оснастки;
3. для процесса ЭИЛ среднего и крупного режущего инструмента, технологической оснастки и деталей машин.

Технологический режим *NORMA* используется для нанесения максимально возможной толщины покрытия при данном электрическом режиме. При необходимости повышения чистоты обработанной поверхности после или вместо режима *NORMA* используется режим *TURBO*.

## 2.3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ И НАСЫЩЕНИЯ АЗОТОМ УПРОЧНЯЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭИЛ

В качестве источника азота для насыщения им упрочняемой поверхности при ЭИЛ могут быть использованы газовые баллоны с азотом. Однако, они достаточно дороги и не обеспечивают его рационального использования. Поэтому далее будет рассмотрена оригинальная система получения азота с помощью вихревого эффекта, работающая в замкнутом цикле.

**Описание предлагаемой системы.** Блок-схема системы получения и насыщения азотом упрочняемой поверхности при ЭИЛ представлена на рисунке 2.5.

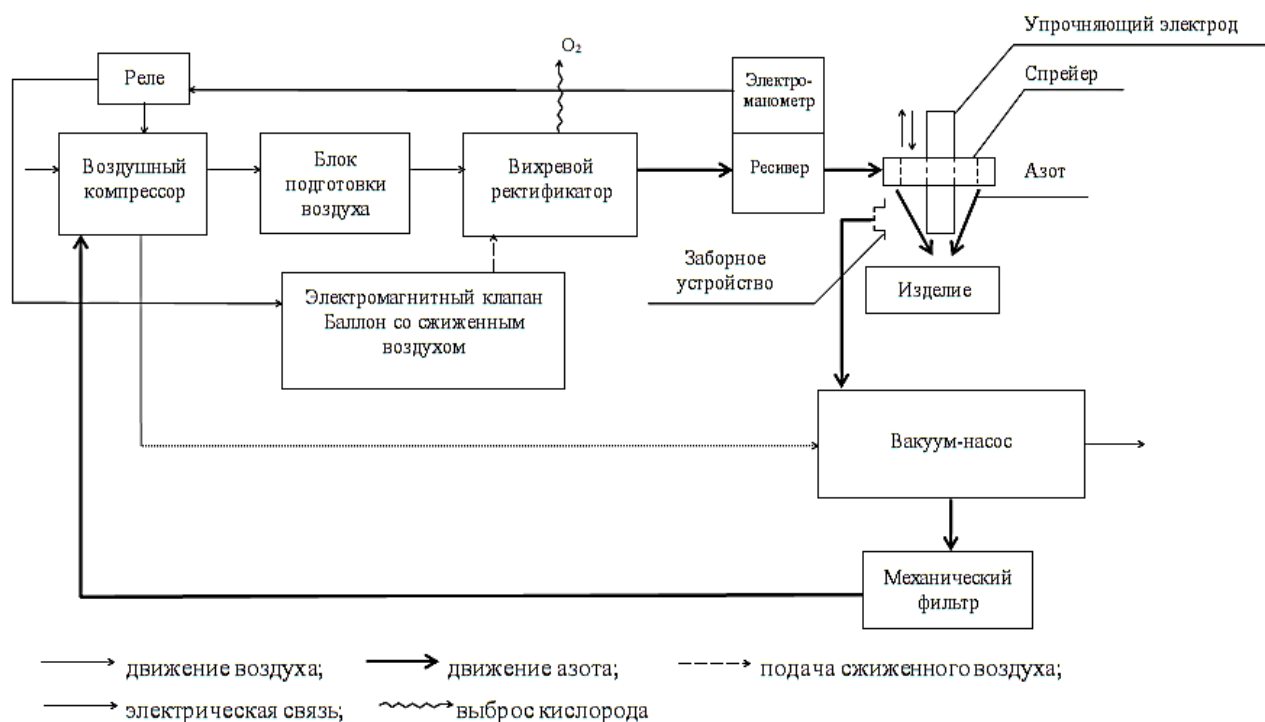


Рисунок 2.5. Блок-схема системы получения и насыщения азотом упрочняемой поверхности при ЭИЛ

Воздушный компрессор подает сжатый воздух в блок подготовки, в котором он очищается от масла и осушается до требуемых параметров. После этого он поступает в вихревой ректификатор, где разделяется на кислород и азот. Полученный азот поступает в ресивер, а оттуда в спрейер, который целенаправ-

ленно подает его в зону искровой обработки. Далее, через заборное устройство излишек азота с помощью вакуум-насоса отсасывается из камеры, и после его очистки от механической пыли в фильтре поступает обратно в компрессор.

Ресивер имеет электроманометр, настроенный на минимальное и максимальное давление азота в нем. При превышении установленного максимального давления он подает электрический сигнал на реле. Реле отключает воздушный компрессор и приводит к срабатыванию электромагнитного клапана, который перекрывает магистраль подачи сжиженного воздуха в ректификатор. И наоборот, при снижении давления азота в ресивере до минимального установленного включается компрессор, срабатывает электромагнитный клапан, освобождая магистраль для подачи сжиженного воздуха в ректификатор, который начинает вырабатывать азот, поступающий в ресивер.

Данная система экономична, работает в замкнутом цикле и позволяет наиболее оптимальным образом вырабатывать, подавать и насыщать межэлектродное пространство азотом при ЭИЛ.

**Расчет производительности воздушного компрессора.** Для разрабатываемой нами системы необходим воздушный компрессор. Мы использовали компрессор, имевшийся в лаборатории ТОО «Орион». Однако основные его характеристики (производительность  $Q$  и давление сжатого воздуха  $p$ ) были неизвестны. Эти параметры необходимы для проведения расчетов основных элементов предлагаемой системы.

Объемная производительность компрессора была определена расчетным методом по формуле

$$Q_o = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \cdot h_n \cdot n_k \cdot k_1 \cdot k_2,$$

где  $d_n$  – диаметр поршня;

$h_n$  – ход поршня;

$n_k$  – число оборотов коленвала;

$k_1$  – количество камер;

$k_2$  – коэффициент потерь.

Здесь число оборотов коленвала  $n_k$  определяется по формуле

$$n_k = n_{эл} \cdot \frac{d_1}{d_2},$$

где  $n_{эл}$  – число оборотов электродвигателя;

$d_1, d_2$  – соответственно, диаметр шкива, посаженного на вал электродвигателя, и диаметр шкива, посаженного на коленвал компрессора.

После разборки компрессора при помощи штангенциркуля были определены следующие размеры:  $d_n = 59,3$  мм и  $h_n = 40$  мм.

Измерение шкивов дало следующие результаты:  $d_1 = 70$  мм,  $d_2 = 200$  мм.

Другие параметры:  $n_{эл} = 1440 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ ;  $k_1 = 2$ ;  $k_2 \approx 0,9$ .

Подставляя исходные данные, получаем

$$n_k = 1440 \cdot \frac{70}{200} = 504 \frac{\text{об}}{\text{мин}};$$

$$Q_o = 100171016 \frac{\text{мм}^3}{\text{мин}} = 100 \frac{\text{дм}^3}{\text{мин}} = 100 \frac{\text{л}}{\text{мин}} = 0,1 \frac{\text{м}^3}{\text{мин}}.$$

При плотности воздуха  $\rho_g = 1,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  весовая производительность составит

$$Q_g = Q_o \cdot \rho_g = 0,13 \frac{\text{кг}}{\text{мин}} = 0,002 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Давление сжатого воздуха компрессора определяли по манометру при подключении вихревого аппарата. Оно составило  $p_{сж} \approx 3,5$  атм  $\approx 0,35$  МПа.

**Принцип действия и расчет вихревого ректификатора.** Разделение воздуха на азот и кислород в вихревом ректификаторе происходит при вводе в аппарат частично сжиженного воздуха ( $\beta_c = 0,3...0,4$ ). При этом возможно получение обогащенного кислородом или азотом воздуха с объемной концентрацией до 98%  $O_2$  или 97%  $N_2$ .

В вихревом ректификаторе (см. рисунок 2.6) сжатый и частично сжиженный воздух вводится через тангенциальный сопловой ввод 1 в камеру разделения 2. Здесь образуется закрученный двухфазный поток, состоящий из текущей по стенке камеры пленки жидкости и газового ядра. Осевое перемещение жидкости к диффузору 3 сопровождается увеличением в ней концентрации высоко-

кипящего компонента (кислорода), в то время как приосевой поток, текущий в противоположном направлении, обогащается низкокипящим компонентом (азотом). Часть жидкого воздуха, вытекающего из соплового ввода, отбирается в полость *a*, откуда по трубопроводу 4 подается в приосевую область камеры со стороны диффузора. В результате воздух разделяется на обогащенный кислородом поток, который выводится из диффузора 3, и обогащенный азотом поток, выходящий через отверстие в диафрагме 5.

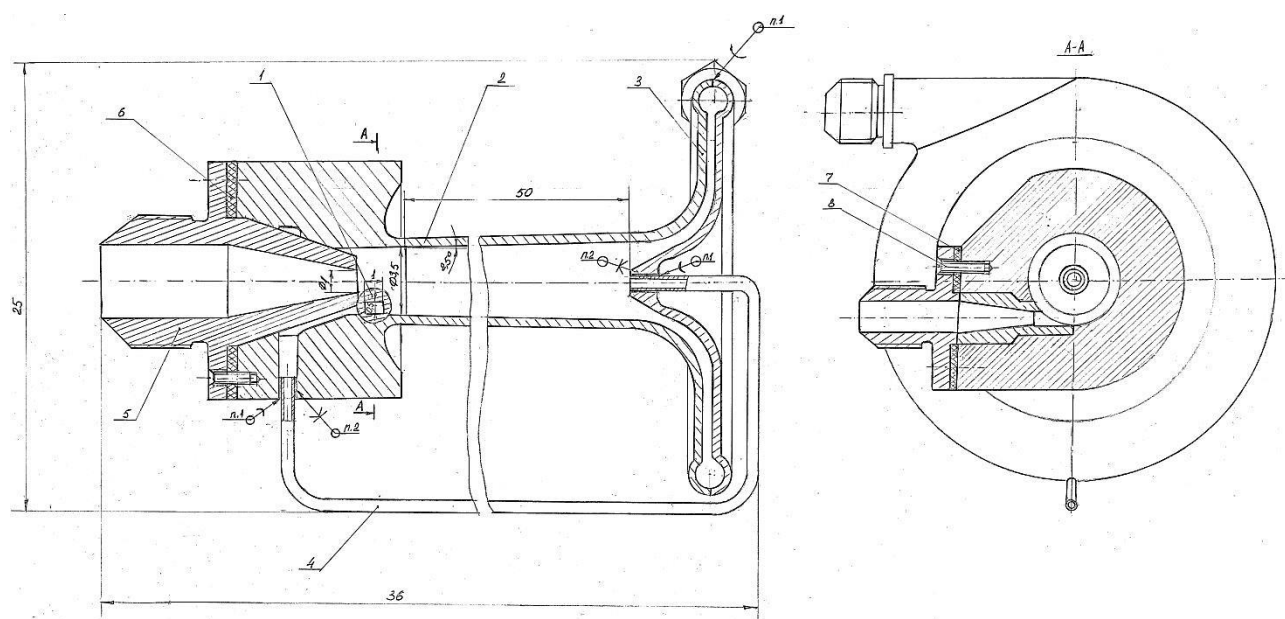


Рисунок 2.6. Ректификатор

Основной движущей силой процесса разделения является существенная неравновесность фаз, образующихся в процессах конденсации и испарения при течении газожидкостного потока в камере разделения. Неравновесность определяется значительным радиальным градиентом давления в камере. В этом случае в каждом сечении камеры взаимодействие радиально перемещающихся объемов газа и жидкости происходит при давлении, отличающемся от термодинамически равновесного для данных концентраций фаз. Это вызывает межфазный массообмен, приводящий к обогащению жидкости кислородом, а газа — азотом.

Большую роль в процессе играет тепломассообмен пленки жидкости с нагретыми периферийными слоями газа. Это приводит к обогащению жидкости

кислородом по принципу фракционированного испарения [32].

Расчет вихревого ректификатора производим по методике, предложенной в работе [32]. Исходные данные:

- производительность воздушного компрессора  $Q_в = 0,002 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;
- давление сжатого воздуха  $p_{сж} \approx 0,35 \text{ МПа}$ ;
- содержание жидкости в перерабатываемом воздухе  $\beta_c = 0,35$ ;
- концентрация азота по объему  $c_p = 95\%$ ;
- давление азота на выходе  $p_a = 0,11 \text{ МПа}$ .

1. Компрессор запитывает как ректификатор, так и вакуум-насос. Рассматривая данную систему как замкнутую и исходя из наших теоретических исследований, долю воздуха, которую необходимо через распределитель подать в ректификатор, можно определить по формуле

$$X = \frac{n}{0,006 + 0,01 \cdot n},$$

где  $n$  – коэффициент эжекции.

Он составил  $n = 0,9$ . Тогда

$$X = \frac{0,9}{0,006 + 0,01 \cdot 0,9} = 60\%.$$

2. Относительная доля азота, согласно работе [32],  $M = 0,6$ . Тогда количество вырабатываемого азота составит

$$G_a = \frac{x}{100} \cdot \mu \cdot Q_в = \frac{60}{100} \cdot 0,6 \cdot 0,002 = 0,00072 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

3. Площадь сечения соплового ввода рассчитываем по формуле

$$F_c = \frac{X \cdot Q_в}{100 \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{V_c}{p_{сж}}},$$

где  $B = 0,6...0,7$  – действительный коэффициент истечения;

$V_c \approx 24,37 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$  – удельный объем смеси [32].

$$F_c = \frac{60 \cdot 0,002}{100 \cdot 0,7} \cdot \sqrt{\frac{24,37 \cdot 10^{-3}}{0,35 \cdot 10^6}} = 0,45 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

4. Высоту соплового ввода рассчитываем по формуле

$$h = \sqrt{\frac{F_c}{2}} = 0,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

5. Ширину соплового ввода рассчитываем по формуле

$$b = \frac{F_c}{h} = 0,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

6. Диаметр камеры разделения определяем по формуле

$$D = 2,92 \cdot \sqrt{F_c \cdot \left( \frac{p_{сж}}{p_a} - 1 \right)^{0,5}} = 2,38 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

7. Диаметр отверстия диафрагмы  $d = 0,35 \cdot D = 0,83 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$

8. Угол конусности камеры разделения  $\alpha = 2...2,5^\circ$ . Принимаем  $\alpha = 2,5^\circ$ .

9. Длина камеры разделения  $L = (20...22) \cdot D = 21 \cdot 2,38 = 50 \text{ мм}.$

10. Диаметр диафрагмы (отверстия трубки ввода эжектируемого воздуха)

$$d = (0,7...0,9) \cdot D = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

11. Максимальный диаметр диффузора

$$D_\partial = 5 \cdot D = 5 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} = 27,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

12. Радиус сопряжения диффузора  $R_\partial = (0,2...0,35) \cdot D$ . При

$\varepsilon \leq 2$   $R_\partial = 0,2 \cdot D$ , при  $\varepsilon > 2$   $R_\partial = 0,35 \cdot D$ . В нашем случае  $\varepsilon = 3,5$ , т.е.

$$\varepsilon > 2. \text{ Значит } R_\partial = 0,35 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

13. Ширина (зазор между дисками) диффузора

$$\Delta_\partial = (0,1...0,25) \cdot D = 0,17 \cdot 5,5 \cdot 10^{-3} = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

**Принцип действия и расчет вихревого вакуум-насоса.** В вихревых устройствах в центральной области закрученного потока возможно возникновение зоны пониженного давления. Это свойство потока используют в аппаратах, называемых вакуум-насосами (вихревыми эжекторами) и используемых для эжекции газовых потоков и вакуумирования замкнутых объемов.

Впервые вихревой вакуум-насос (ДКМ) был создан в СССР группой ис-

следователей во главе с М.Г. Дубинским. Сжатый (эжектирующий) газ через сопловой ввод 2 (см. в графической части) поступает в камеру 1, где образуется вращающийся поток с приосевой областью пониженного давления. В эту область через трубку 3 подсасывается эжектируемый газ. Образующаяся в камере смесь через втулку 4 поступает в диффузор 6 и улитку 5, где тормозится с повышением давления. На стенке диффузора расположен регулирующий клапан 7. Выходящий из улитки поток газа подается в технологический трубопровод или сбрасывается в атмосферу (при вакуумировании замкнутых объемов).

В нашем случае вихревой вакуум-насос производит откачку из зоны ЭИЛ остатка продуваемого азота и газо-пылевидной смеси, которая выделяется в процессе искровой обработки.

Расчет вихревого вакуум-насоса производим по методике, изложенной в работах [5, 32]. Исходные данные:

- давление сжатого (эжектирующего) воздуха  $p_{сж} = 0,35$  МПа;
- температура сжатого (эжектирующего) воздуха  $T_{сж} = 293^\circ K$ ;
- давление окружающей среды  $p_o = 0,1$  МПа;
- гидравлическое сопротивление по тракту эжектируемого воздуха  $\Delta p_3 = 0,01$  МПа.

1. Степень повышения давления определяем по формуле:

$$\sigma_3 = \frac{p_o}{p_o - \Delta p_3} = \frac{0,1}{0,1 - 0,01} = 1,11.$$

2. Степень расширения

$$\varepsilon = \frac{p_{сж}}{p_o} = 3,5.$$

Коэффициент эжекции  $n = 0,9$  (согласно рис. 43 [32]).

3. Расход эжектирующего газа

$$G_3 = \frac{G_a}{n},$$

где  $G_a$  — количество азота, которое вырабатывается ректификатором и направляется в зону обработки ЭИЛ. При расчете ректификатора

$$G_a = 0,00072 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \text{ тогда}$$

$$G_{\text{э}} = \frac{0,00072}{0,9} = 0,0008 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

4. Площадь проходного сечения соплового ввода определяем по формуле:

$$F_c = \frac{G_{\text{э}} \cdot \sqrt{T_{\text{сж}}}}{0,38 \cdot p_{\text{сж}}} \cdot 10^{-5} = \frac{0,0008 \cdot \sqrt{293}}{0,38 \cdot 0,35} \cdot 10^{-5} = 0,103 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

5. Высота сопла  $h = \sqrt{\frac{F_c}{2}} = 0,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$

6. Ширина сопла  $b = \frac{F_c}{h} = 1,43 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$

7. Диаметр камеры  $D_o = (4,2...6,6) \cdot \sqrt{F_c} = 5,4 \cdot \sqrt{0,103 \cdot 10^{-5}} = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$

8. Длина камеры  $L = D = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$

9. Площадь сечения заборного устройства определяем по формуле:

$$F_{\text{заб}} = \frac{G_a}{V_{\text{заб}} \cdot \gamma_a},$$

где  $V_{\text{заб}}$  – скорость потока в сечении заборного устройства;

$\gamma_a$  – удельный вес азота.

Из условия гарантированного захвата частиц пыли, образуемой при ЭИЛ,

принимаем  $V_{\text{заб}} = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ . Учитывая, что  $\gamma_a = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,

$$F_{\text{заб}} = \frac{0,00072}{3 \cdot 1,2} = 0,0002 \text{ м}^2.$$

10. При квадратном сечении заборного устройства его сторона составит:

$$a = \sqrt{F_{\text{заб}}} = 0,014 \text{ м}.$$

### 3 ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОСЛЕ ЭИЛ

#### 3.1 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫСОТЫ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ ПОКРЫТИЯ ОТ МОЩНОСТИ РЕЖИМА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ЭИЛ

Как уже было отмечено выше, одним из основных недостатков упрочнения ЭИЛ является высокая шероховатость полученного покрытия (примерно, на 2-3 класса ниже по сравнению с исходной).

Целью данного исследования было определить влияние мощности режима ЭИЛ на шероховатость полученного покрытия и, при этом, проверить эффективность различных способов ее уменьшения.

Были рассмотрены следующие способы уменьшения шероховатости при ЭИЛ:

1. Упрочнение вращающимся электродом;
2. Упрочнение вращающимся и качающимся электродом;
3. Обработка нанесенного покрытия в режиме *TURBO* с обратной полярностью;
4. Обработка нанесенного покрытия в режиме *TURBO* с прямой полярностью.

При этом следует отметить, что режим *TURBO* (как это уже отмечалось в разделе 2 работы) реализует способ обработки с повышенной частотой вибрации электрода (в нашем случае  $f \approx 440$  Гц).

Как было отмечено в работе [2], перемена полярности при ЭИЛ с обратной на прямую приводит к уменьшению шероховатости. Поэтому в исследованиях также был рассмотрен данный способ.

Первые два способа реализованы в конструкции установки ЭФИ-46АМ. Обработка в режиме *TURBO* и *NORMA* осуществляется на установке *UR-121*.

Упрочнение производилось электродами из твердого сплава марки ВК6-ОМ Ø2,5 мм. Для упрочнения использовались стальные образцы

(сталь 45 ГОСТ 1050-88) твердостью  $H_{исх.} = 1,9$  ГПа и исходной шероховатостью  $Ra_{исх.} \approx 0,5$  мкм.

Образцы для проведения исследований на установке ЭФИ-46АМ представляли собой полые цилиндры длиной 30 мм с наружной шлифованной поверхностью  $\varnothing 30$  мм и внутренним диаметром  $d = 12$  мм для закрепления на оправке.

Образцы для проведения исследований на установке UR-121 представляли собой шлифованные пластины  $100 \times 100 \times 5$  мм.

Режимы нанесения покрытия на установке ЭФИ-46АМ:

- частота вибрации электрода .... 140 Гц;
- амплитуда вибрации электрода ..... 0,7 мм;
- частота качательного движения ..... 1,3 Гц;
- амплитуда качательного движения ..... 0,6 мм;
- частота вращения вибратора .....  $420 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ .

Удельное время обработки образцов ( $\tau$ ) на установке UR-121, в зависимости от режима работы установки, выбиралось по таблице 3.1 и не зависело от полярности.

Таблица 3.1 – Удельное время обработки образцов ( $\tau$ )

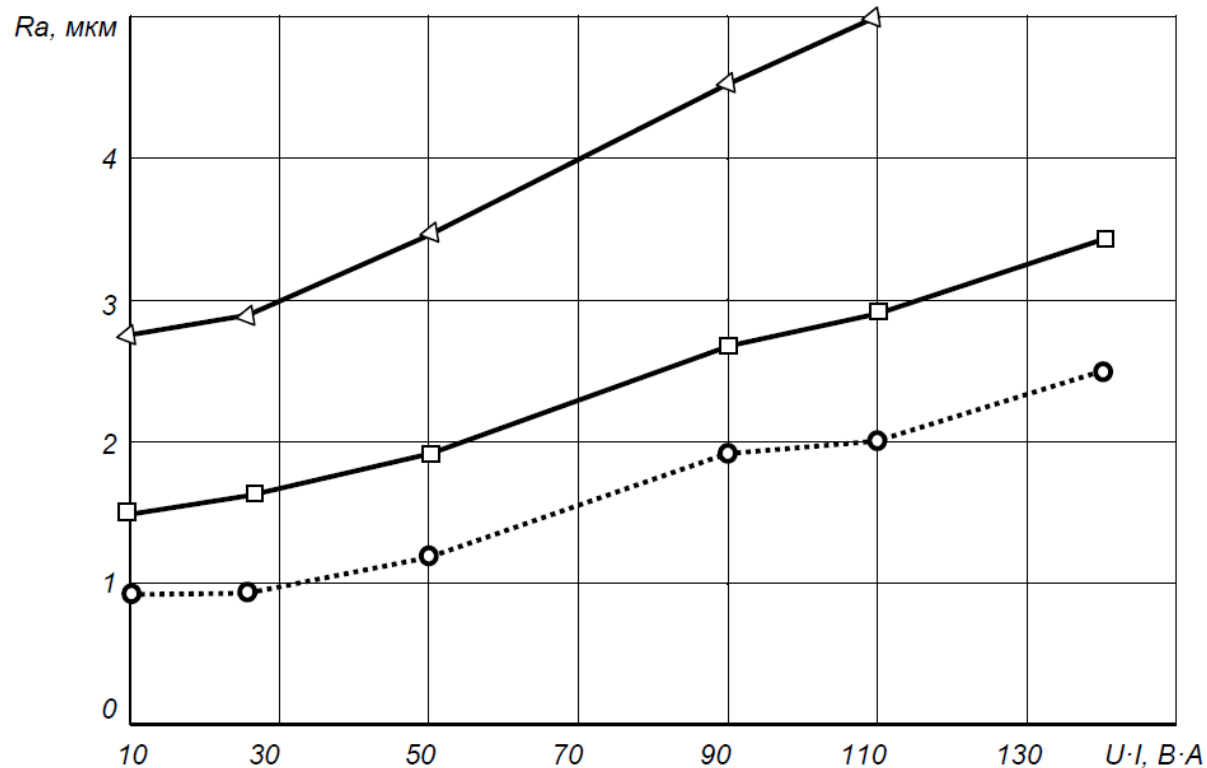
| Режим работы установки |               | $\tau, \frac{\text{мин}}{\text{см}^2}$ |
|------------------------|---------------|----------------------------------------|
| технологический        | электрический |                                        |
| NORMA                  | 1             | 2,2                                    |
|                        | 2             | 2,0                                    |
|                        | 3             | 1,7                                    |
| TURBO                  | 3             | 1,4                                    |

Для каждого режима упрочнения определялась среднеарифметическая высота микронеровностей покрытия  $Ra$ . Для этого использовался профилометр мод. 170621. Измерение  $Ra$  осуществлялось не менее трех раз для определения усредненного параметра в данной экспериментальной точке.

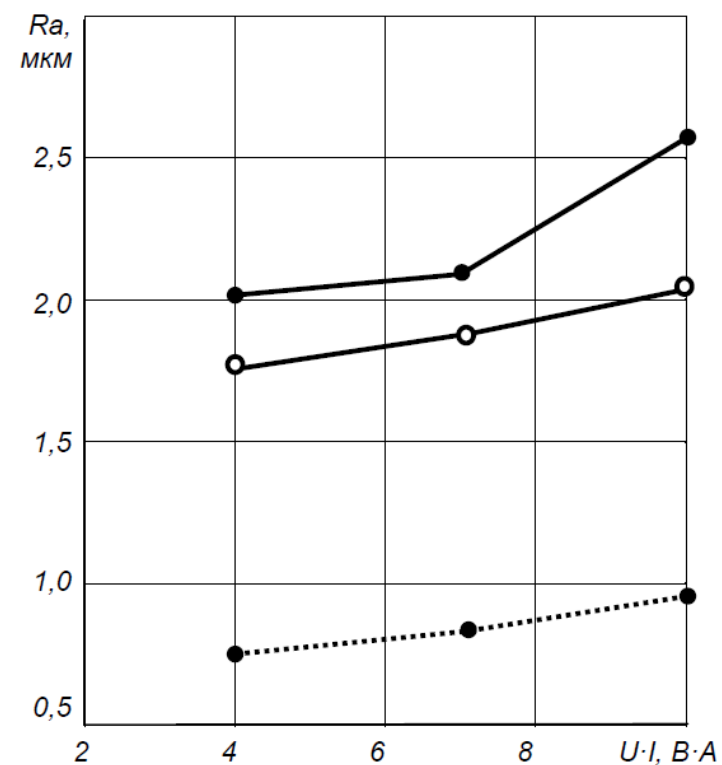
Результаты испытаний приведены на рисунке 3.1. Анализ представленных зависимостей показал, что:

1. Увеличение мощности режима упрочнения ( $U \cdot I$ ) приводит к увеличению  $Ra$ . Но последующая обработка упрочненной поверхности в режиме TURBO с обратной полярностью (ОП) на установке UR-121 сглаживает это негативное влияние, а обработка в режиме TURBO с прямой полярностью практически нивелирует это влияние;
2. Использование при упрочнении вращающегося электрода позволяет уменьшить  $Ra$  примерно в 1,5 раза, а применение при этом дополнительного качания электрода – в 2 раза;
3. Использование дополнительной обработки упрочненной поверхности в режиме TURBO 3 с ОП (зависимость 5) уменьшает высоту шероховатости примерно на 20%, но не решает кардинально данную проблему;
4. Использование же дополнительной обработки в режиме TURBO 3 с ПП позволяет получать высоту шероховатости на уровне исходной её величины.

Таким образом, использование способов ЭИЛ с одновременным вращением и качанием электрода и дополнительной обработки в режиме TURBO с ПП позволяют добиваться требуемой шероховатости покрытия, сравнимой с шероховатостью исходной поверхности.



Установка ЭФИ 46-АМ (электрод ВК6-ОМ, Ø 2,5 мм)



Установка UR-121 (электрод ВК6-ОМ, Ø 2,5 мм)

- ▲— без вращения и качания электрода
- с вращением электрода
- с вращением и качанием электрода
- NORMA с обратной полярностью (ОП)
- NORMA (ОП) + TURBO 3 (ОП)

Рисунок 3.1. Зависимость высоты микронеровностей ( $Ra$ ) покрытия от мощности режима ( $U \cdot I$ ) при различных способах ЭИЛ

### 3.2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫСОТЫ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ И ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ ОТ ЧИСТОТЫ ВИБРАЦИИ ЭЛЕКТРОДА ПРИ ЭИЛ

Целью данного исследования было установить зависимость влияния частоты вибрации электрода  $f$  на толщину  $\Delta$  и высоту микронеровностей  $Ra$  при ЭИЛ.

Упрочнение образцов при различной частоте вибрации электрода осуществлялось на установке ЭФИ-46АМ. При этом диапазон исследуемых частот составлял  $f = 100 \dots 1000$  Гц ( $f_1 = 100$  Гц;  $f_2 = 400$  Гц;  $f_3 = 700$  Гц;  $f_4 = 1000$  Гц).

Амплитуда вибрации электрода  $0,7$  мм.

Вращение и качание электрода не производились.

Упрочнение образцов производилось на двух режимах установки ЭФИ-46АМ:

- 1) Режим III ( $U=25$  В,  $I=2,0$  А,  $N=50$  В·А);
- 2) Режим IV ( $U=56$  В,  $I=2,5$  А,  $N=140$  В·А).

Экспериментальные образцы представляли собой полые цилиндры длиной  $30$  мм наружной шлифованной поверхностью  $\varnothing 20$  мм и внутренним отверстием  $\varnothing 12$  мм для закрепления их на оправке установки. Образцы изготавливались из нормализованной стали 45, наружная поверхность имела среднюю микротвердость  $H_{исх} = 1,9$  ГПа, усредненную высоту микронеровностей  $Ra = 0,5$  мкм.

Упрочнение производилось электродом из твердого сплава марки ВК6-ОМ,  $\varnothing 2,5$  мм.

Толщина покрытия измерялась путем разницы усредненных диаметров образцов до упрочнения и после упрочнения. При этом использовался немецкий микрометр фирмы «STUNDE» с ценой деления  $0,001$  мкм. Образцы измерялись в двух взаимно перпендикулярных сечениях по диаметру и в трех метках по длине, а затем среднеарифметически усреднялись.

Измерение микротвердости поверхностного слоя осуществлялось на приборе ПМА-3 по ГОСТ 9450-76.

Измерение высоты микронеровностей покрытия  $Ra$  осуществлялось на профилометре мод. 170621. Измерение  $Ra$  осуществлялось по направляющей образцов не менее трех раз для определения усредненного параметра  $Ra$  в данной экспериментальной точке. Результаты приведены на рисунке 3.2.

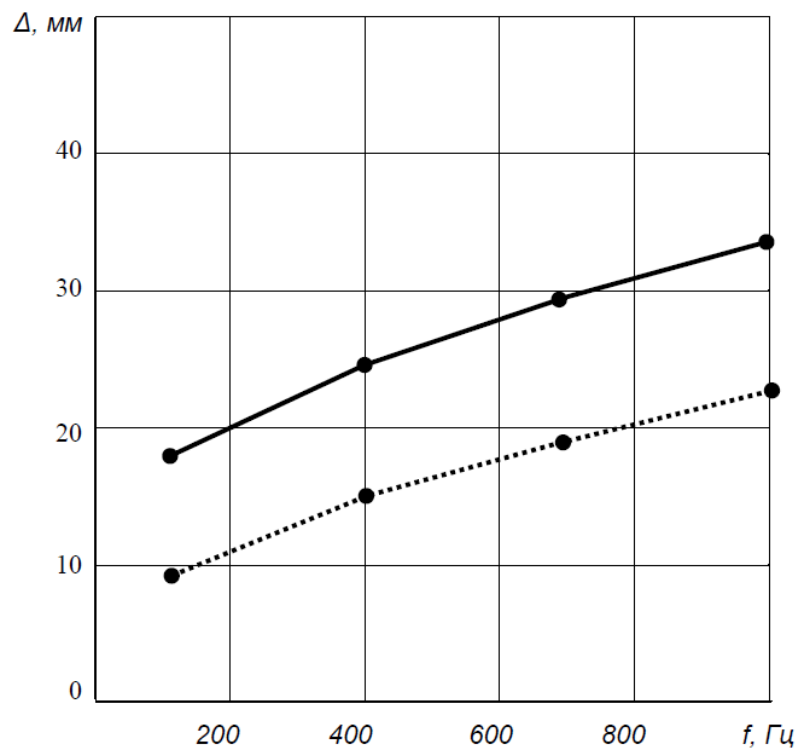
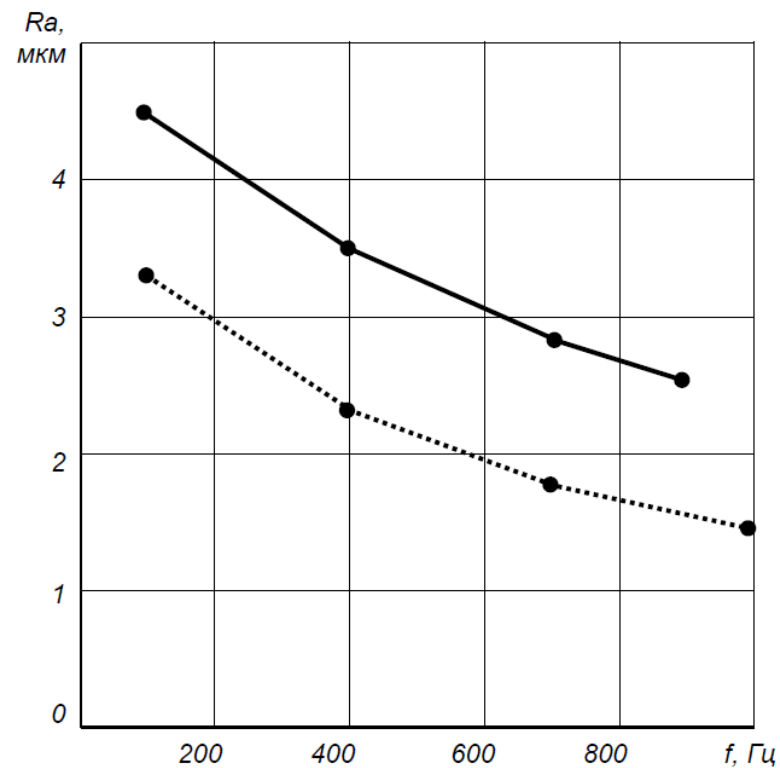
Анализ полученных результатов:

1. Толщина покрытия  $\Delta$  с увеличением частоты вибрации электрода  $f$  возрастает линейно. Причем для более мощного режима VI, по сравнению с режимом III, значения толщины  $\Delta$  больше примерно на 50-75%.
2. Рост толщины покрытия с увеличением частоты вибрации электрода объясняется тем, что в единицу времени при большей частоте вибрации электрода происходит больший перенос материала с электрода на упрочняемую поверхность.
3. При увеличении мощности режима также большее количество распыляемого с электрода материала переносится на упрочняемую деталь.

Следует отметить, что разница толщины покрытия на двух сравниваемых режимах при увеличении частоты вибрации электрода остается практически неизменной и составляет величину  $\sim 10$  мкм.

4. Высота микронеровностей покрытия  $Ra$  с увеличением частоты вибрации электрода в исследуемых пределах снижается на 75-100%, на менее мощном режиме (III) – в большей степени. При этом также, как и ранее, разность  $Ra$  при этих двух режимах при увеличении частоты вибрации электрода была практически одинакова и составила величину  $\sim 10$  мкм.
5. Уменьшение высоты микронеровностей  $Ra$  с увеличением частоты вибрации  $f$  можно объяснить тем, что при большей частоте вибрации в единицу времени происходит большее наложение на единицу площади упрочняемой поверхности микрокапель распыленного с электрода материала, которые, взаимно перекрываясь, обеспечивают более

равномерный микрорельеф покрытия.



- Режим III ( $U=25$  В,  $I=2,0$  А,  $N=50$  В·А)  
 ●.....● Режим IV ( $U=56$  В,  $I=2,5$  А,  $N=140$  В·А)

Электрод: ВК60М,  $\varnothing 3$  мм

Образцы: сталь 45,  $H_{исх}=1,9$  ГПа;  $Ra_{исх}=0,5$  мкм

Охлаждение: воздушно-спрейерное,  $t=-20^{\circ}\text{C}$ ;  $G=0,039$  кг/с

Рисунок 3.2. зависимость толщины ( $\Delta$ ) и высоты микронеровностей ( $Ra$ ) покрытия от частоты вибрации электрода ( $f$ ) при различных режимах упрочнения на установке ЭФИ-46АМ: образцы - сталь 45,  $H_{исх}=1,9$  ГПа,  $Ra_{исх}=0,5$  мкм; охлаждение: воздушно-спрейерное,  $t=-20^{\circ}\text{C}$ ;  $G=0,039$  кг/с

6. С увеличением мощности режима «разбрызгивание» микрокапель на упрочняемой поверхности увеличивается и, следовательно, происходит рост высоты микронеровностей получаемого покрытия.

Выводы:

1. Для уменьшения высоты микронеровностей покрытия при ЭИЛ следует увеличивать частоту вибрации электрода.
2. Для увеличения толщины покрытия и, следовательно, для роста производительности процесса ЭИЛ следует также предусматривать повышение частоты вибраций электрода ( $f > 700$  Гц).

### 3.3 ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА, УПРОЧНЕННОГО ЭИЛ

В качестве исследуемых инструментов использовались отрезные сегментные пилы 2257-0162 ГОСТ 4047-82. Их параметры следующие:

- наружный диаметр пилы,  $D = 710j_516$ ;
- диаметр отверстия,  $d = 80H8$ ;
- число зубьев пилы,  $z = 96$ ;
- число зубьев на каждом сегменте,  $z_c = 4$ .

Сегментные пилы были выбраны для эксперимента, исходя из следующих соображений:

1) Пила представляет собой многозубый инструмент, следовательно, можно изучать износ нескольких зубьев для повышения достоверности результатов эксперимента и уменьшения количества исследуемых инструментов;

2) ГОСТ 4047-82 достаточно полно описывает методику испытаний стойкости сегментных пил.

Цель эксперимента заключалась в определении износа зубьев:

- а) неупрочненной пилы;
- б) пилы, упрочненной ЭИЛ по передней поверхности;
- в) пилы, упрочненной ЭИЛ по передней и задней поверхности.

Сегменты пилы, выполненные из быстрорежущей стали Р9 ГОСТ 19265-73, проходили перед сборкой контроль твердости и шероховатости боковых поверхностей. Твердость и шероховатость рабочей части сегментов, согласно ГОСТ 4047-82, проверялась на 2-5 мм ниже впадины зуба по направлению к центру пилы, нерабочей части – на 2 мм выше паза.

Осуществлялся контроль твердости (по методу Роквелла, см. ГОСТ 9013-59) и микротвердости.

Для измерения твердости по методу Роквелла ( $HRC$ ) использовался прибор типа ТК с алмазным конусом (угол при вершине  $120^\circ$ ), а для измерения микротвердости ( $H$ ) – прибор типа ПМТ-3 с алмазной четырехгранной

пирамидой (угол при вершине  $136^\circ$ ).

Для измерения шероховатости (параметр  $Ra$ ) использовался прибор 170621.

Измерялись твердость  $HRC$  и  $H$  и высота неровностей  $Ra$  неупрочненных сегментов и микротвердость  $H$  и  $Ra$  упрочненных сегментов.

ЭИЛ участков ( $10 \times 5$  мм) боковых поверхностей сегментов осуществлялось на установке UR-121 электродами  $\varnothing 2,5$  и  $\varnothing 3$  мм твердого сплава ВК6-ОМ по следующей технологической схеме:

- упрочнение (У) – на технологическом режиме NORMA и электрическом режиме 2 ( $U \cdot I = 7 \text{ В} \cdot \text{А}$ ), удельное время обработки  $\tau = 1,9 \text{ мин/см}^2$ ;
- электроискровое шлифование (ЭШ) – на технологическом режиме TURBO (с обратной полярностью) и электрическом режиме 3 ( $U \cdot I = 10 \text{ В} \cdot \text{А}$ ), удельное время обработки  $\tau = 1,5 \text{ мин/см}^2$ .

Всего было испытано десять сегментов. Результаты испытаний представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты испытаний сегментов пил

| Параметры                        | Значения параметров |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Неупрочненные сегменты           |                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <i>HRC</i> , ед.                 | 63                  | 63   | 64   | 63   | 65   | 64   | 64   | 63   | 64   | 64   |
| <i>H</i> ·10 <sup>-2</sup> , МПа | 92                  | 91   | 92   | 91   | 92   | 91   | 93   | 91   | 91   | 92   |
| <i>Ra</i> , мкм                  | 1,05                | 1,10 | 1,10 | 0,95 | 0,95 | 1,04 | 1,05 | 1,10 | 1,15 | 0,95 |
| Упрочненные сегменты             |                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <i>H</i> ·10 <sup>-2</sup> , МПа | 116                 | 115  | 116  | 115  | 113  | 115  | 118  | 116  | 115  | 116  |
| <i>Ra</i> , мкм                  | 1,10                | 1,25 | 1,20 | 1,15 | 1,15 | 1,20 | 1,20 | 1,25 | 1,25 | 1,15 |

Средние значения параметров боковых частей сегментов составили:

- неупрочненные сегменты:  $HRC = 64$ ,  $H = 9200 \text{ МПа}$ ,  $Ra = 1,04 \text{ мкм}$ ;
- упрочненные сегменты:  $H = 1155 \text{ МПа}$ ,  $Ra = 1,2 \text{ мкм}$ .

По этим измеренным параметрам можно судить о твердости и

шероховатости задних и передних поверхностей зубьев сегментов.

После установки сегментов на диске и расклепывания производилось затывание зубьев собранной пилы по задней поверхности. Затем на установке UR-121 осуществлялось упрочнение с последующим электроискровым шлифованием двух пил по режимам, описанным выше. У первой пилы упрочнялись передние поверхности зубьев, у второй – передние и задние поверхности зубьев. После чего с помощью лупы увеличения  $4\times$  по ГОСТ 25706-83 сравнивались участки на боковых поверхностях сегментов (на которых ранее прибором измерялась шероховатость) с передними и задними поверхностями зубьев как упрочненных пил, так и неупрочненной. Это сравнение показало, что у всех трех пил (неупрочненной, упрочненной по передней поверхности зубьев, упрочненной по передней и задней поверхности зубьев) параметр  $Ra$  не превышает значения 1,25 мкм, регламентированного ГОСТом 4047-82.

В качестве разрезаемого материала использовались прутки из стали 45 ГОСТ 1050-88 диаметром 10 мм, соответствии с п. 4.8. ГОСТа 4047-82.

Твердость по Бринеллю данного материала измерялась с помощью прибора ТШ (ГОСТ 7038-54). Среднее значение твердости составило  $HV = 1900$  МПа, что соответствует условиям испытаний по ГОСТ 4047-82.

Испытания пил проводились на фрезерно-отрезном полуавтомате 8В66. в качестве смазочно-охлаждающей жидкости применялся 5%-ный (по массе) раствор эмульсола в воде с расходом 25 л/мин.

Режимы резания при испытании пил, согласно п. 4.10. ГОСТа 4047-82, должны быть следующими:

- скорость резания  $V = 21$  м/мин;
- подача на зуб  $S_z = 0,1$  мм.

Тогда расчетное число оборотов шпинделя в минуту составит:

$$n_{расч.} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 21}{3,14 \cdot 710} = 9,4 \text{ об/мин.}$$

Принятое по паспорту станка  $n_{наст.} = 9,3$  об/мин.

Рассчитываем минутную подачу бабки пильного диска:

$$S_M = S_z \cdot \frac{z \cdot 1000 \cdot V}{\pi \cdot d} = 0,1 \cdot \frac{96 \cdot 1000 \cdot 21}{3,14 \cdot 710} = 90 \text{ мм/мин},$$

что соответствует паспортному значению станка.

Расчетное время, затрачиваемое непосредственно на один рез заготовки ( $d_{заг.} = 100 \text{ мм}$ ), определялось по формуле:

$$T_{рез.} = \frac{d_{заг.}}{S_M} = \frac{100}{90} = 1,11 \text{ мин},$$

что соответствует времени, определенному по хронометражу в процессе резания заготовок при проведении испытаний.

Согласно п. 2.24. ГОСТа 4047-82, критерием затупления пил является износ зубьев задней поверхности. Его величина должна быть не более  $h_{зпред.} = 0,8 \text{ мм}$ . Провести испытания стойкости зубьев в полном объеме не представлялось возможным, т.к. пришлось бы отрезать следующее количество заготовок:

$$n = \frac{T}{T_{рез.}} = \frac{348}{1,11} = 314 \text{ заготовок},$$

где  $T$  – 95%-ный период стойкости пилы (согласно ГОСТу 4047-72,  $T = 348 \text{ мин}$ ).

В этом случае испытания заняли бы слишком большой отрезок времени. Поэтому в эксперименте количество резов (отрезанных заготовок)  $a$  примерно и ограничилось величиной  $h_{зпред.}$ .

Для определения величины износа зубьев пил по задней поверхности измерялась высота зубьев после определенного количества проведенных резов и сравнивалась с первоначальной высотой зубьев. Для измерения высоты зубьев пилы использовался микрометрический глубиномер ГМ-25-1 ГОСТ 7470-78 с пределом измерения 0-25 мм класса точности 1 (предельная погрешность  $\pm 0,002 \text{ мм}$ ). Высота зубьев пилы измерялась от вершины до впадины.

Измерение высоты зубьев осуществлялось непосредственно на станке, не снимая пилы. Это значительно сократило время проведения эксперимента. При этом измерялась высота одних и тех же зубьев, которые обезжиривались растворителем после удаления с них стружки и металлической пыли. Замер

высоты зубьев проводился через каждые 20 резов (отрезанных заготовок) в трех сегментах (для повышения достоверности полученных результатов).

Результаты измерения высоты зубьев и полученные по ним величины износа для каждой из трех пил после определенного количества резов представлены в табл. 3.3 (результаты измерения высоты зубьев  $h$  – в числителе, вычисления величины их износа по задней поверхности  $h_3$  – в знаменателе).

Таблица 3.3 – Результаты измерения высоты зубьев фрез

| № сегмента                                                    | Количество резов, $a$ |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                                               | 0                     | 20                  | 40                  | 60                  | 80                  | 100                 | 120                 | 140                 |
| Неупрочненная пила                                            |                       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| 1                                                             | $\frac{8,25}{-}$      | $\frac{8,14}{0,11}$ | $\frac{8,09}{0,16}$ | $\frac{8,04}{0,21}$ | $\frac{7,97}{0,28}$ | $\frac{7,78}{0,47}$ | $\frac{7,52}{0,73}$ | $\frac{7,22}{1,03}$ |
| 2                                                             | $\frac{8,05}{-}$      | $\frac{7,84}{0,21}$ | $\frac{7,82}{0,23}$ | $\frac{7,78}{0,27}$ | $\frac{7,71}{0,34}$ | $\frac{7,50}{0,55}$ | $\frac{7,23}{0,82}$ | $\frac{6,94}{1,11}$ |
| 3                                                             | $\frac{8,49}{-}$      | $\frac{8,39}{0,10}$ | $\frac{8,37}{0,12}$ | $\frac{8,34}{0,15}$ | $\frac{8,24}{0,25}$ | $\frac{8,07}{0,42}$ | $\frac{7,79}{0,70}$ | $\frac{7,51}{0,98}$ |
| $h_{3cp.}$                                                    | —                     | 0,14                | 0,17                | 0,21                | 0,29                | 0,48                | 0,75                | 1,04                |
| Пила с зубьями, упрочненными по передней поверхности          |                       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| 4                                                             | $\frac{8,65}{-}$      | $\frac{8,51}{0,14}$ | $\frac{8,49}{0,16}$ | $\frac{8,48}{0,17}$ | $\frac{8,42}{0,23}$ | $\frac{8,33}{0,32}$ | $\frac{8,22}{0,43}$ | $\frac{8,04}{0,61}$ |
| 5                                                             | $\frac{8,57}{-}$      | $\frac{8,47}{0,10}$ | $\frac{8,44}{0,13}$ | $\frac{8,42}{0,15}$ | $\frac{8,38}{0,19}$ | $\frac{8,30}{0,27}$ | $\frac{8,16}{0,41}$ | $\frac{7,99}{0,58}$ |
| 6                                                             | $\frac{8,38}{-}$      | $\frac{8,29}{0,09}$ | $\frac{8,28}{0,10}$ | $\frac{8,25}{0,13}$ | $\frac{8,20}{0,18}$ | $\frac{8,10}{0,28}$ | $\frac{7,99}{0,39}$ | $\frac{7,80}{0,58}$ |
| $h_{3cp.}$                                                    | —                     | 0,11                | 0,13                | 0,15                | 0,20                | 0,29                | 0,41                | 0,59                |
| Пила с зубьями, упрочненными по передней и задней поверхности |                       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| 7                                                             | $\frac{8,51}{-}$      | $\frac{8,45}{0,06}$ | $\frac{8,41}{0,10}$ | $\frac{8,38}{0,13}$ | $\frac{8,36}{0,15}$ | $\frac{8,31}{0,20}$ | $\frac{8,26}{0,25}$ | $\frac{8,21}{0,30}$ |
| 8                                                             | $\frac{8,25}{-}$      | $\frac{8,23}{0,02}$ | $\frac{8,22}{0,03}$ | $\frac{8,21}{0,04}$ | $\frac{8,18}{0,07}$ | $\frac{8,14}{0,11}$ | $\frac{8,05}{0,16}$ | $\frac{8,05}{0,20}$ |
| 9                                                             | $\frac{8,32}{-}$      | $\frac{8,28}{0,04}$ | $\frac{8,27}{0,05}$ | $\frac{8,25}{0,07}$ | $\frac{8,21}{0,11}$ | $\frac{8,18}{0,14}$ | $\frac{8,13}{0,19}$ | $\frac{8,07}{0,25}$ |
| $h_{3cp.}$                                                    | —                     | 0,04                | 0,06                | 0,08                | 0,11                | 0,15                | 0,20                | 0,25                |

Величины высоты зубьев  $h$ , износа их по задней поверхности  $h_3$  и усредненное значение  $h_{3cp.}$  выражены в миллиметрах. При этом

$$h_{3cp.} = \frac{h_{3i} + h_{3i+1} + h_{3i+2}}{3},$$

где  $h_{3i}$ ,  $h_{3i+1}$ ,  $h_{3i+2}$  - величины износа зубьев, соответственно  $i$ -го,  $i+1$ -го,  $i+2$ -го сегментов. Графические зависимости усредненных величин  $h_3$  от количества резов ( $a$ ) при упрочнении ЭИЛ различных поверхностей пилы представлены на рисунке 3.3.

Анализ полученных зависимостей показал следующее:

1. Износ зубьев неупрочненной пилы при всем количестве резов выше, чем у пилы, прошедшей ЭИЛ зубьев по передней и задней поверхности (ЭПЗП). Причем интенсивность износа у нее резко возрастает после 80 резов, а предельная величина износа наступает примерно при 120 резах.
2. До 60 резов износ зубьев пилы с ЭПП (зависимость 2) на 20% меньше износа зубьев неупрочненной пилы (зависимость 1) и характер кривых одинаков. После 60 резов интенсивность износа у пилы с ЭПП, по сравнению с неупрочненной, начинает заметно отставать и при 140 резах износ ее в 2 раза меньше, что, безусловно, связано с влиянием упрочнения передней поверхности зубьев.
3. Износ зубьев пилы с ЭПЗП (зависимость 3) в 3-4 раза меньше, чем у неупрочненной, и в среднем в 2 раза меньше, чем у пилы с ЭПП. При этом интенсивность износа пилы с ЭПЗП меняется не столь существенно (в начале 2 мкм, в конце 5 мкм), чем у пилы с ЭПП (в начале 2 мкм, в конце 18 мкм), и, тем более, у неупрочненной пилы (в начале 2 мкм, в конце 29 мкм), что подтверждается характером кривой 3, которая приближается к линейной. Это можно объяснить суммарным влиянием упрочнения передней и задней поверхности зубьев на величину и характер их износа.

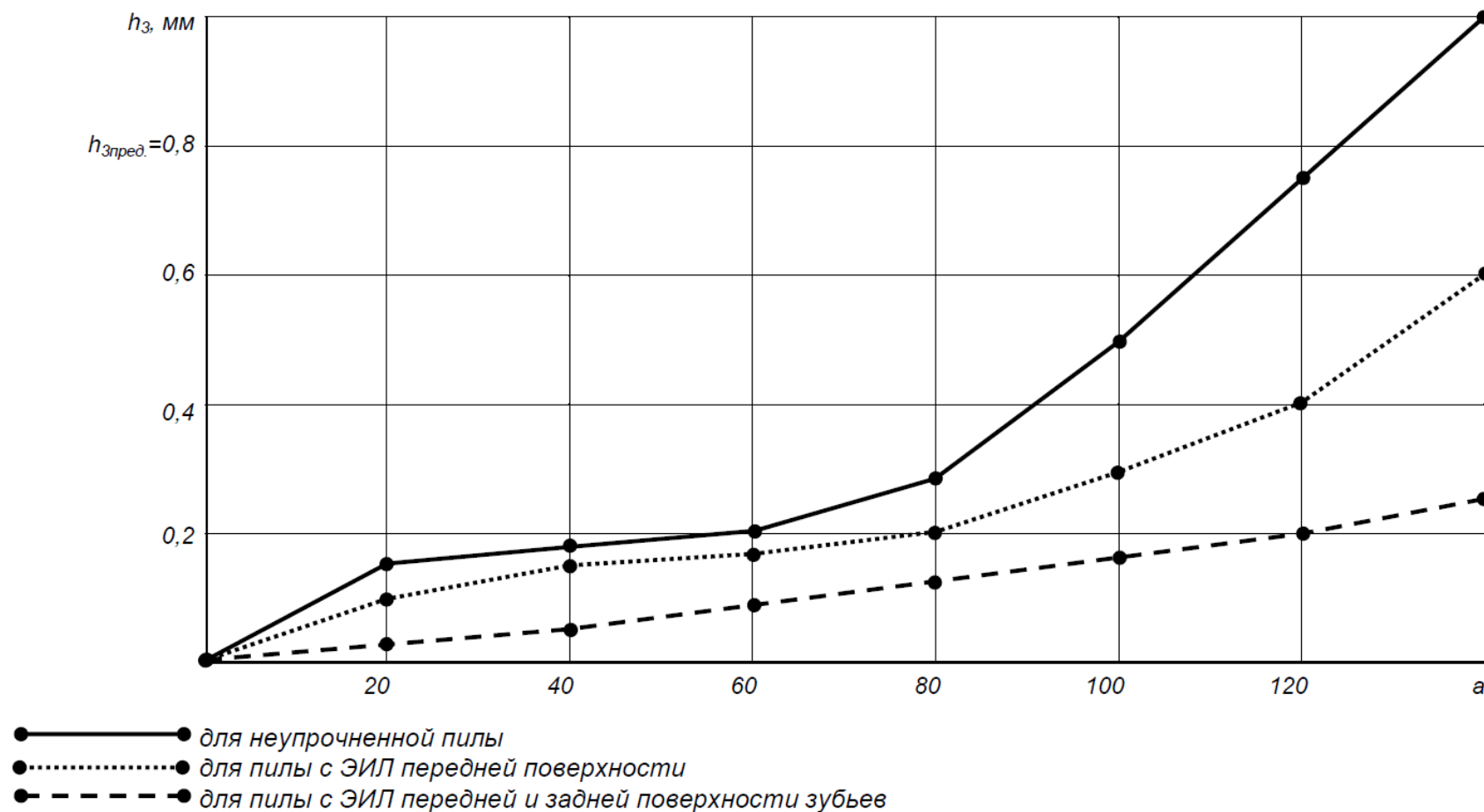


Рисунок 3.3. Зависимость износа зубьев по задней поверхности ( $h_3$ ) от количества резов ( $a$ ) при ЭИЛ различных поверхностей сегментной пилы: пила -  $\varnothing 710$  мм,  $B = 6,3$  мм,  $z = 96$ , P9 ( $HRC_{исх.} = 64$ ); заготовка -  $\varnothing 100$  мм, сталь 45 ( $HB = 1900$  МПа); ЭИЛ - установка UR-121, электрод  $\varnothing 5$  мм, ВК60М; упрочнение - режим NORMA 2 ( $\tau = 1,9$  мин/см<sup>2</sup>) + электроискровое шлифование: режим TURBO 3 ( $\tau = 1,5$  мин/см<sup>2</sup>); отрезка -  $n/a$  8В66,  $V = 21$  м/мин,  $S_z = 0,1$  мм/зуб.

4. Износ зубьев пилы с ЭПЗП (зависимость 3) в 3-4 раза меньше, чем у неупрочненной, и в среднем в 2 раза меньше, чем у пилы с ЭПП. При этом интенсивность износа пилы с ЭПЗП меняется не столь существенно (в начале 2 мкм, в конце 5 мкм), чем у пилы с ЭПП (в начале 2 мкм, в конце 18 мкм), и, тем более, у неупрочненной пилы (в начале 2 мкм, в конце 29 мкм), что подтверждается характером кривой 3, которая приближается к линейной. Это можно объяснить суммарным влиянием упрочнения передней и задней поверхности зубьев на величину и характер их износа.
5. Выбранные режимы обработки ЭИЛ обеспечивают высокую эффективность упрочнения.

Выводы и рекомендации:

1. Применение ЭИЛ увеличивает стойкость сегментных пил в 2-4 раза.
2. ЭИЛ рекомендуется осуществлять по следующей технологической схеме:

- **упрочнение** на мягких и средних режимах:

мощность обработки  $U \cdot I = 7 \text{ В} \cdot \text{А}$ ;

энергия импульса  $Q \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$ ;

длительность обработки  $\tau = 1,9 \text{ мин/см}^2$ ;

- **электроискровое шлифование** на средних режимах:

мощность обработки  $U \cdot I = 10 \text{ В} \cdot \text{А}$ ;

энергия импульса  $Q \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$ ;

длительность обработки  $\tau = 1,5 \text{ мин/см}^2$ .

## 4 ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ИЗДЕЛИЙ И ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДА НА КАЧЕСТВА ЭИЛ

### 4.1 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТОЙКОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

**Испытание износостойкости пальца шаровой опоры автомобиля.** Для проведения испытаний использовались пальцы нижней шаровой опоры автомобилей. По заводской технологии они изготавливаются методом высадки и проходят двухступенчатую закалку (общую и специальную) для обеспечения износостойкости трущихся поверхностей. Однако, как показал опыт автомобилистов, поверхность полусферы пальца интенсивно изнашивается, особенно при тяжелых условиях эксплуатации. Для повышения износостойкости полусферы (Ø32 мм) она упрочнялась способом ЭИЛ.

Для упрочнения использовалась установка ЭФИ-46АМ с вращением и качанием электрода для обеспечения низкой шероховатости покрытия. Использовался электрод марки ВК6-ОМ Ø2,5 мм. Режимы упрочнения следующие:

- частота вибрации электрода – 440 Гц;
- амплитуда вибрации электрода – 0,7 мм;
- частота качательного движения – 1,3 Гц;
- амплитуда качательного движения – 0,6 мм;
- частота вращения вибратора – 380 об/мин.

Для обеспечения оптимального сочетания шероховатости, микротвердости и глубины упрочненного слоя (см. выше) был выбран 3<sup>ий</sup> электрический режим, для которого  $U \cdot I = 50 \text{ В} \cdot \text{А}$ .

Шаровые опоры с упрочненными пальцами в количестве 3 шт. испытывались после пробега автомобилей 20 тыс. км шаровые опоры разбирались, и измерялся износ полусфер пальцев, которые сравнивались с износом неупрочненных пальцев автомобиля, также прошедшего примерно такой же пробег и эксплуатировавшегося в аналогичных условиях.

**Испытание износостойкости пробки шарового крана.** Для проведения испытаний использовались шаровые краны, в которых пробка изготавливалась из стали 20 и имела диаметр сферической поверхности 32 мм. Эта поверхность в процессе эксплуатации крана также изнашивается, что приводит к появлению протечек уплотняемой среды.

Для упрочнения данной поверхности также использовалась установка ЭФИ-46АМ. Режимы упрочнения, материал и диаметр электрода такие же, как и при упрочнении шаровой опоры автомобиля. Затем упрочненная поверхность полировалась до получения требуемой шероховатости. Таким образом, были упрочнены три пробки.

Испытания кранов проводились на специализированном предприятии при использовании стенда, имитирующего цикл закрывания и открывания крана. После 8 000 циклов кран разбирался и измерялся износ пробки.

**Испытание стойкости наконечников шуруповёрта.** Для проведения испытаний использовались стандартные наконечники для шуруповёртов.

Как показала практика, в процессе их эксплуатации происходит изнашивание их торцевой упорной поверхности, особенно у конца инструмента.

Нами были упрочнены 20 наконечников. Упрочнение осуществлялось вручную на установке UR-121 на максимальном режиме NORMA III ( $U = 12 \text{ В}$ ;  $I = 0,8 \text{ А}$ ;  $N = 10 \text{ В} \cdot \text{А}$ ) – для получения максимальной микротвердости упрочненной поверхности и шероховатости. Большое значение шероховатости упрочненной поверхности, в данном случае, играло положительную роль, т.к. обеспечивало большую сцепляемость рабочей поверхности наконечника с крестообразной поверхностью шурупа.

Для упрочнения использовались электроды из твердого сплава марки ВК6-ОМ, Ø1,6 мм.

Удельное время обработки наконечника составило примерно  $\tau \approx 2,2 \text{ мин/см}^2$ .

Упрочненные наконечники были переданы для испытаний на частные предприятия г. Заречного и г. Пензы, которые занимались производством

мебели.

Обобщая полученные от них данные, выяснилось, что в среднем неупрочненные наконечники из быстрорежущей стали российского производства стоят 1,5 месяца, упрочненные же нами наконечники простояли более 8 месяцев.

## 4.2 ВЛИЯНИЕ МЕЖЭЛЕКТРОДНОЙ СРЕДЫ И МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДА НА МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОКРЫТИЯ И ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ ПРИ ЭИЛ

На основании задач, поставленных в разделе 1, целью данных исследований было изучить влияние межэлектродной (охлаждающе-насыщающей) среды и материала электрода на микротвердость.

В качестве образцов использовались пластины размером 40×20×8 мм, выполненные из стали 45, прошедшей нормализацию.

Поверхность пластин под упрочнение обрабатывалась фрезерованием и два раза шлифовалась на плоскошлифовальном станке с получением средней шероховатости  $Ra = 1,4$  мкм. Средняя исходная микротвердость поверхностного слоя образцов составила  $H_{исх} = 2,1$  ГПа.

Измерение микротвердости осуществлялось на приборе ПМТ-3 по ГОСТ 9450-76 четырехгранной алмазной пирамидкой с квадратным основанием в десяти различных точках на поверхности образца. По результатам измерений определялось среднее арифметическое значение микротвердости по формуле:

$$H_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{10} H_i}{10},$$

где  $H_i$  – результат  $i$ -го измерения.

Микротвердость покрытия определялась путем вдавливания пирамиды в поверхностный слой покрытия.

Для определения микротвердости диффузионного слоя испытываемые образцы подготавливались с косым срезом под углом  $1^\circ 30'$ , путем двух операций шлифования на плоскошлифовальном станке с последующей полировкой обработанной поверхности пастой ГОИ. Затем на металлографическом микроскопе определялась средняя глубина диффузионного слоя, и по данным меткам производилось измерение микротвердости этого слоя.

Измерение шероховатости  $Ra$  поверхностного слоя осуществлялось на

профилометре мод. 170621 согласно приложенной к нему инструкции.

В качестве межэлектродной среды использовались следующие вещества:

- воздух;
- углекислый газ;
- азот;
- эмульсия.

Для обеспечения одинаковых условий эксперимента и единой сравнительной базы газы (углекислый, воздух и азот) прокачивались через межэлектродный зазор с одинаковым расходом  $G = 0,0007$  кг/с. При этом воздух подавался от компрессора, углекислый газ – из баллона ротаметром, азот – из системы, описанной выше.

Водная эмульсия (5%) была приготовлена на основе эмульсола ЭГТ (ТУ 38 101149-75) и подавалась с расходом  $G = 0,2$  л/мин.

Подача газов в межэлектродный промежуток осуществлялась при помощи кольцевого спрейера, установленного на вибраторе установки ЭФИ-46А. подача эмульсии в зону упрочнения производилась через сопловую насадку.

В качестве *электродов* использовались следующие материалы:

- твердый сплав Т15К6;
- феррохром (0,13% С; 75% Сг; остальное – Fe);
- твердый сплав ВК6-ОМ;
- ферробор(0,13% С; 7-9% В; остальное – Fe);
- ферробор-алюминий (0,13% С; 14% В; 8% Al; остальное – Fe).

Электроды из данных материалов Ø3 мм и длиной  $l = 25$  мм изготавливались в ВНИИТС, согласно действующим стандартам и техническим условиям.

### 4.3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ИХ АНАЛИЗ, ВЫВОДЫ

Результаты производственных испытаний износостойкости различных деталей приведены на рисунке 4.1. Из рисунка видно:

1. Износ неупрочненных пальцев составил  $\Delta=0,62$  мм, упрочненных –  $\Delta=0,22$  мм. Следовательно, износостойкость увеличивается в 3 раза.
2. Средний износ неупрочненной пробки составил  $\Delta = 0,115$  мм, упрочненной –  $\Delta = 0,045$  мм. Следовательно, износостойкость увеличилась в 2,6 раза.
3. Стойкость их при упрочнении ЭИЛ выросла более чем в 5 раз по сравнению с неупрочнённым.

Результаты исследований межэлектродной среды и материала электрода на микротвердость покрытия и диффузионного слоя при ЭИЛ представлены на рис. 3.5-3.8.

Анализ полученных результатов:

1 Максимальная микротвердость покрытия для всех исследованных материалов электродов достигалась при использовании в качестве межэлектродной среды азота. Это подтверждает положения, выдвинутые в разделе 1.3.

При этом наименьшая микротвердость имеет место для электродов из феррохрома ( $H = 7,8$  ГПа) и твердого сплава марки Т15К6 ( $H = 7,3$  ГПа), а наибольшая – для ферробор-алюминия ( $H = 14$  ГПа), ферробора и твердого сплава марки ВК6-ОМ ( $H = 13$  ГПа). Это связано с тем, что при активной подаче азота в зону обработки при ЭИЛ, в покрытии более интенсивно идет образование нитридов бора и вольфрама, имеющих очень высокую твердость.

2 Менее эффективным для получения высокой микротвердости покрытия при ЭИЛ является использование в качестве межэлектродной среды эмульсии. Для электродов из ферробора и ВК6-ОМ она составила  $H = 10,7$  ГПа, а для ферробор-алюминия –  $H = 12$  ГПа.

Для электродов из Т15К6 и феррохрома микротвердость покрытия при использовании азота и эмульсии примерно одинакова  $H = 6,8...7,8$  ГПа.

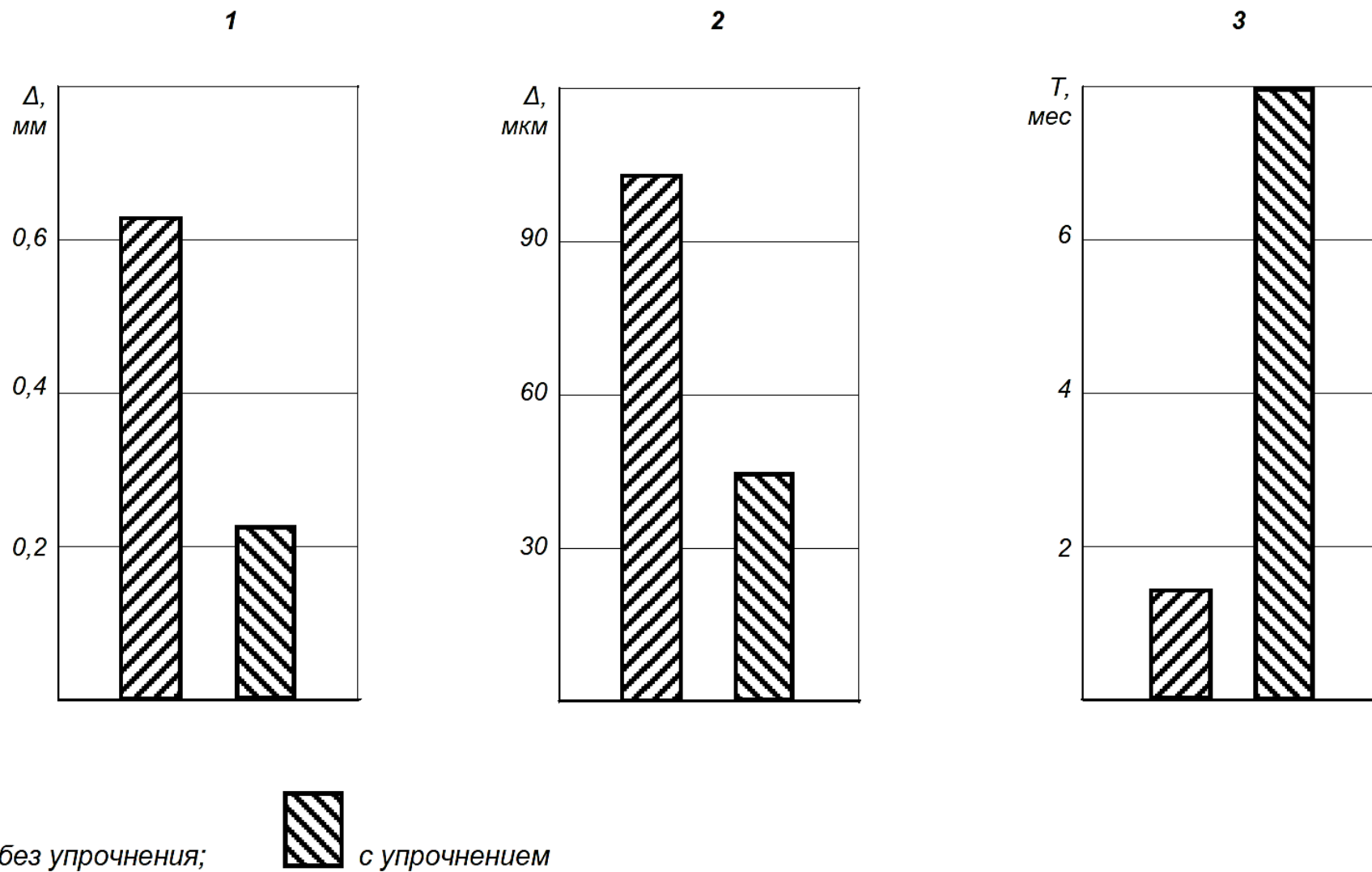
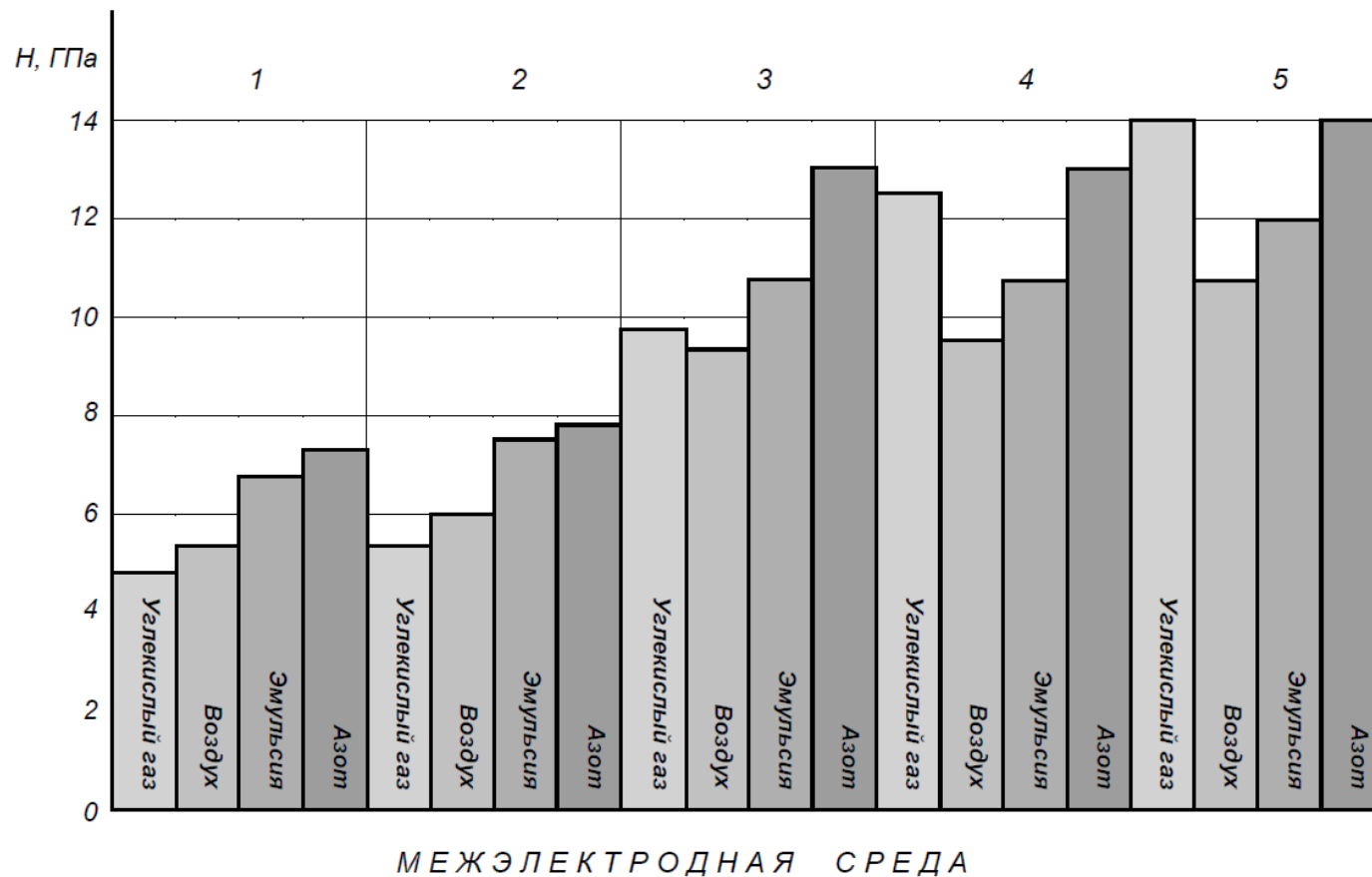


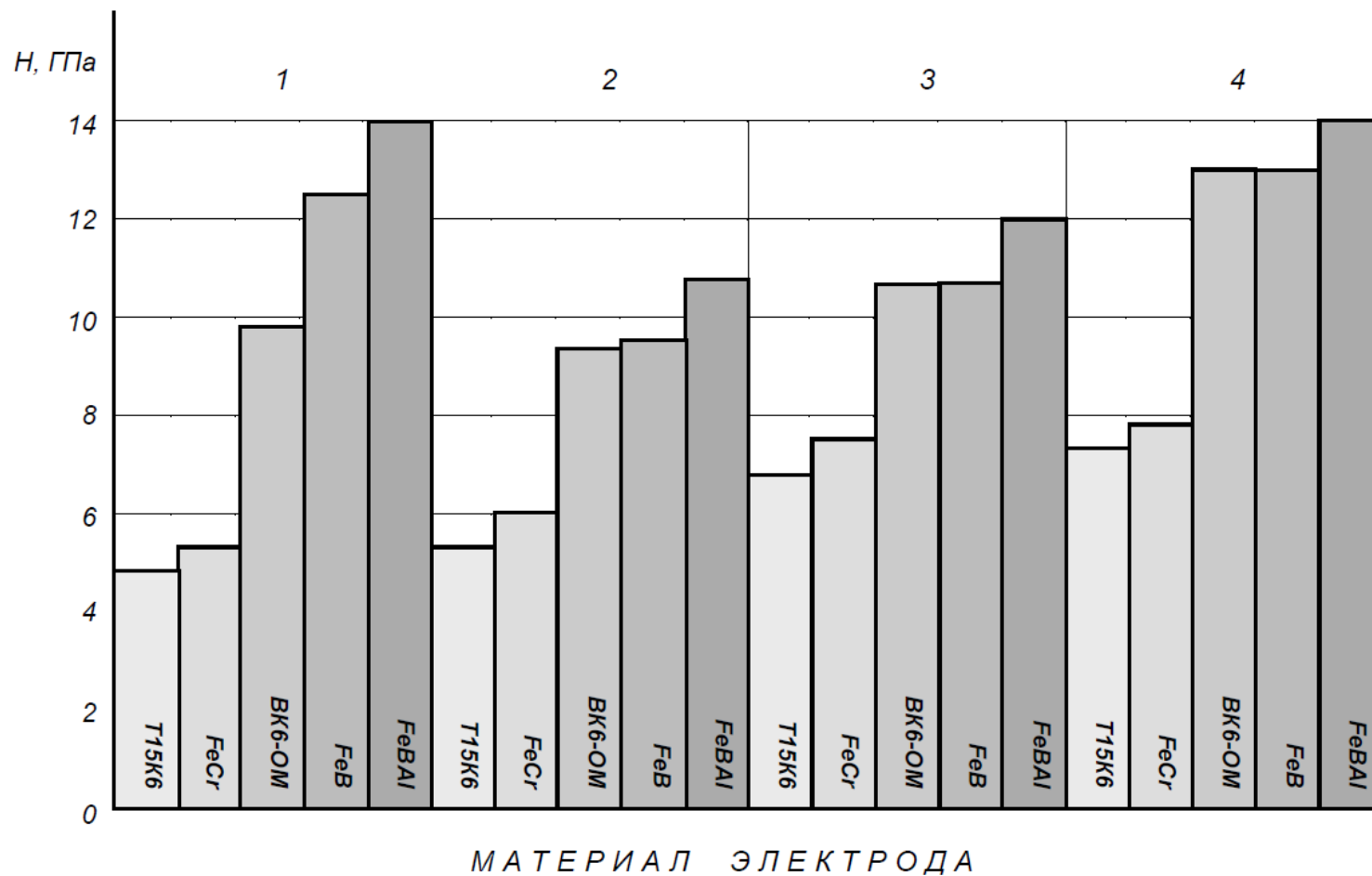
Рисунок 4.1. Результаты производственных испытаний износостойкости деталей  $\Delta$  и стойкости инструментов  $T$ , упрочненных ЭИЛ: 1 – палец шаровой опоры автомобиля; 2 – пробка шарового крана; 3 – наконечник шуруповёрта



**Материал электродов:** 1 – твердый сплав Т15К6; 2 – феррохром (FeCr); 3 – твердый сплав ВК6-ОМ;  
4 – ферробор (FeB); 5 – ферробор-алюминий (FeBAl)

**Образцы:** сталь 45,  $H_{исх}=2,1$  ГПа;  $Ra_{исх}=1,4$  мкм **Установка** ЭФИ-46А; **Режим VI**  $U=50$  В,  $I=2,8$  А,  $N=140$  В·А

Рисунок 4.2. Диаграмма влияния межэлектродной среды на микротвердость покрытия  $H$  при ЭИЛ в зависимости от материала электрода.

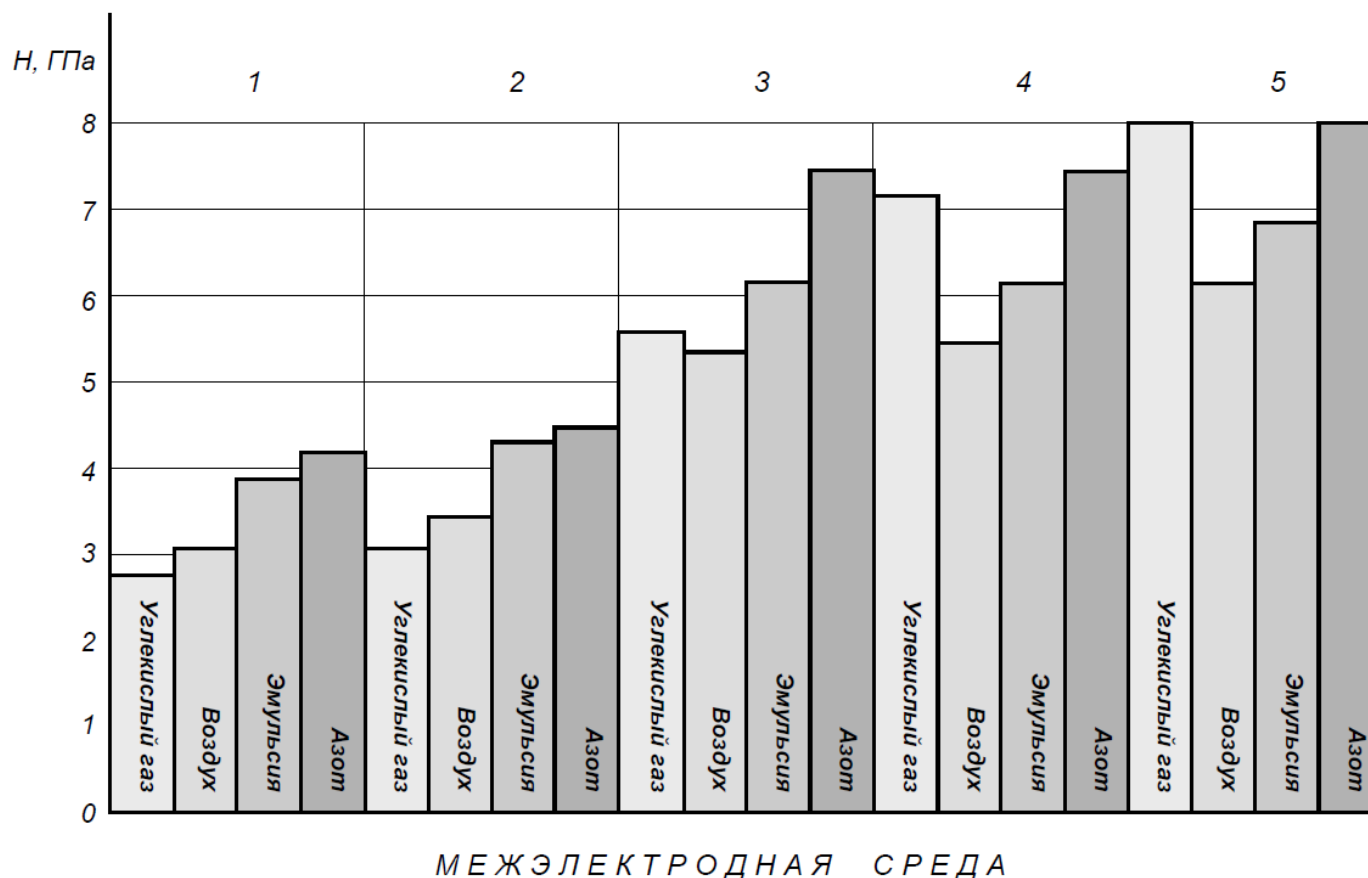


**Межэлектродная среда:** 1 – углекислый газ; 2 – воздух; 3 – эмульсия; 4 – азот

**Образцы:** сталь 45,  $H_{исх}=2,1$  ГПа;  $Ra_{исх}=1,4$  мкм

**Установка ЭФИ-46А; Режим VI**  $U=50$  В,  $I=2,8$  А,  $N=140$  В·А

Рисунок 4.3. Диаграмма влияния межэлектродной среды на микротвердость покрытия  $H$  при ЭИЛ в зависимости от материала электрода.



МЕЖЭЛЕКТРОДНАЯ СРЕДА

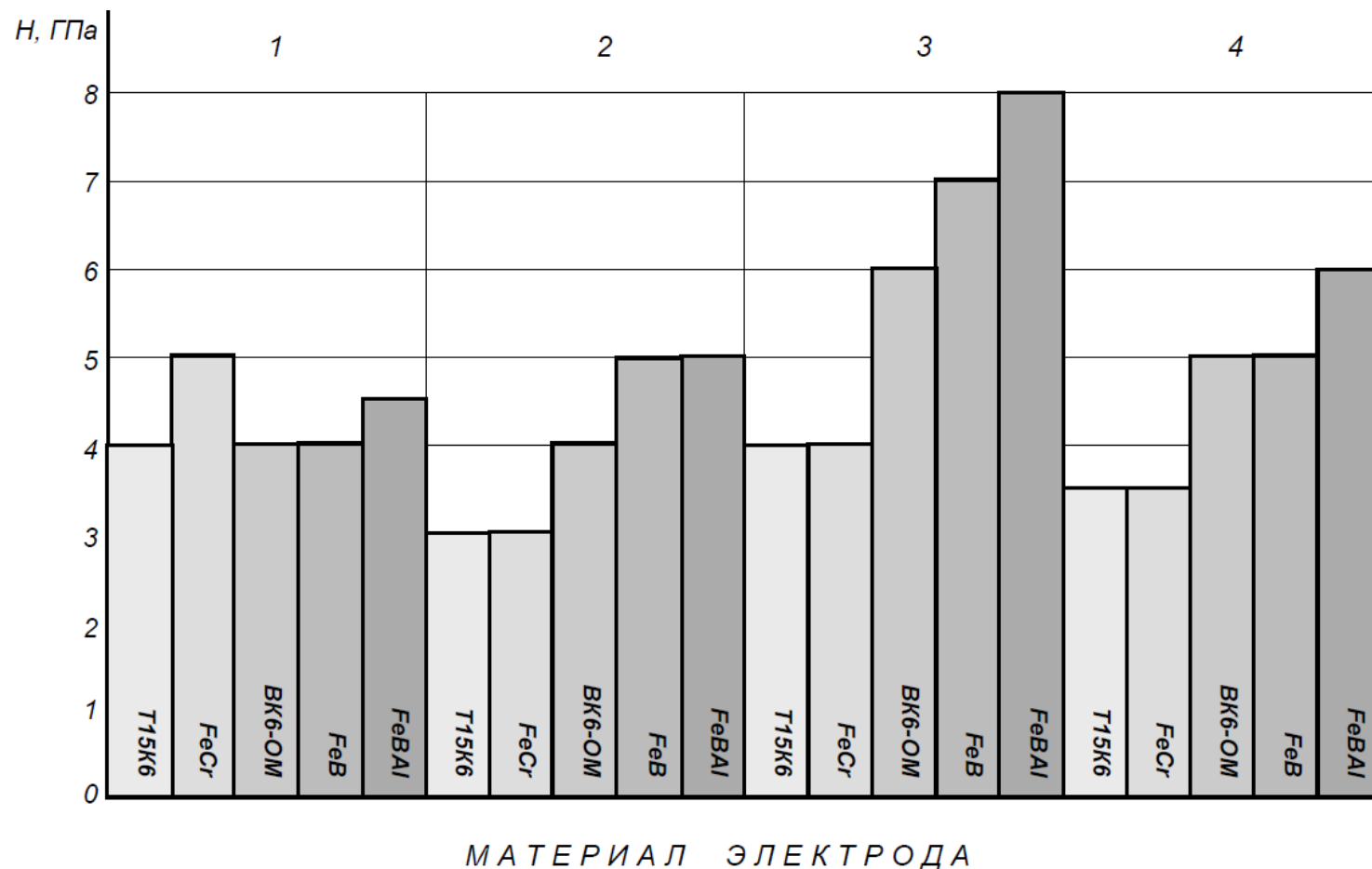
**Материал электродов:**

1 – твердый сплав Т15К6; 2 – феррохром (FeCr); 3 – твердый сплав ВК6-ОМ;

4 – ферробор (FeВ); 5 – ферробор-алюминий (FeВAl)

**Образцы:** сталь 45,  $H_{исх}=2,1$  ГПа;  $Ra_{исх}=1,4$  мкм; **Установка** ЭФИ-46А; **Режим VI**  $U=50$  В,  $I=2,8$  А,  $N=140$  В·А

Рисунок 4.4. Диаграмма влияния межэлектродной среды на микротвердость диффузионного слоя  $H$  при ЭИЛ в зависимости от материала электрода.



**Межэлектродная среда:** 1 – углекислый газ; 2 – воздух; 3 – эмульсия; 4 – азот

**Образцы:** сталь 45,  $H_{исх}=2,1$  ГПа;  $Ra_{исх}=1,4$  мкм

**Установка** ЭФИ-46А; **Режим VI**  $U=50$  В,  $I=2,8$  А,  $N=140$  В·А

Рисунок 4.5. Диаграмма влияния материала электрода на микротвердость диффузионного слоя  $H$  при ЭИЛ в зависимости от межэлектродной среды

Достаточно высокая микротвердость покрытия при использовании эмульсии обусловлена появлением при ЭИЛ твердых закалочных структур за счет большой охлаждающей способности эмульсии.

Следует, однако, иметь в виду, что при использовании эмульсии в процессе ЭИЛ резко повышается шероховатость покрытия, что требует в дальнейшем введения дополнительных операций электроискрового или алмазного шлифования.

3 Интересными представляются полученные результаты исследования микротвердости покрытия при использовании в качестве межэлектродной среды углекислого газа.

Высокая микротвердость покрытия получена для электродов из ферробора ( $H = 12,5$  ГПа) и ферробор-алюминия ( $H = 14$  ГПа), что объясняется, на наш взгляд, появлением в процессе ЭИЛ большого количества ионов углерода из углекислого газа, которые приводят к интенсивному процессу микроцементации и образованию при этом сложных карбидо-боридных слоев в покрытии и поверхностном слое.

Следует также отметить, что при использовании углекислого газа наблюдается наиболее выраженная градация микротвердости покрытия для исследуемых материалов электродов – от  $H = 4,8$  ГПа до  $H = 14$  ГПа. Это связано, по нашему мнению, с различным взаимодействием при ЭИЛ ионов углерода с ионами элементов материала электродов.

1. Стабильные и достаточно высокие результаты микротвердости покрытия для всех исследуемых материалов электродов получены при использовании в качестве межэлектродной среды воздуха – от  $H = 5,3$  ГПа до  $H = 10,7$  ГПа.
2. В общем случае для всех исследованных сред выявлена следующая закономерность повышения микротвердости покрытия в зависимости от материалов электродов:  $T15K6 \rightarrow FeCr \rightarrow BK6-OM \rightarrow FeB \rightarrow FeBAI$ .
3. При исследовании микротвердости диффузионного слоя (МДС) выяснилось, что наибольшие значения МДС были получены при

использовании в качестве межэлектродной среды (МЭ) эмульсии. Причем для электродов из T15K6 и FeCr значения МДС получились одинаковыми и составили  $H = 4$  ГПа, а для электродов из BK6-OM, FeV и FeBAI наблюдался их пропорциональный рост с  $H = 6$  ГПа до  $H = 8$  ГПа.

Высокие значения МДС при ЭИЛ с использованием эмульсии можно объяснить интенсивной поверхностной закалкой и получением при этом многофазных структур с образованием большого количества карбидов и боридов.

4. Значения МДС при использовании электродов из T15K6 и FeCr в случае применения при ЭИЛ эмульсии и азота практически совпадают ( $H = 3,5...4$  ГПа). Значения МДС при использовании азота для электродов из BK6-OM, FeV и FeBAI на 15-20% меньше, чем при использовании эмульсии.

Для всех исследованных материалов электродов МДС при использовании воздуха мало отличается от МДС при использовании азота, т.к. их физико-химические свойства не различаются существенно, а охлаждающие способности практически одинаковы. Вследствие этого механизм формирования диффузионного слоя при ЭИЛ с использованием этих газов будет примерно одинаковым и, следовательно, значения микротвердости не должны отличаться значительно.

5. Наиболее стабильные результаты по МДС получены при ЭИЛ с использованием углекислого газа. Значения МДС в этом случае составляли  $H = 4...5$  ГПа.
6. Сравнение МДС и МП показало их высокую корреляционную зависимость при использовании воздуха, эмульсии и азота для всех исследованных марок электродов. Такой корреляционной зависимости не наблюдается при использовании в качестве МЭ углекислого газа.

Выводы и рекомендации:

- 1) Оптимальный выбор межэлектродной среды может быть сделан с учетом следующих факторов:

- толщина и микротвердость покрытия;
- глубина и микротвердость диффузионного слоя;
- шероховатость покрытия;
- стоимость межэлектродной среды;
- материал электрода;
- материал упрочняемой детали.

2) Для получения высокой микротвердости покрытия при ЭИЛ следует использовать следующие межэлектродные среды:

- азот (с применением электродов из твердого сплава марки ВК6-ОМ, FeV и FeBAI);
- углекислый газ (с применением электродов из FeV и FeBAI).

3) Для получения высокой микротвердости диффузионного слоя при ЭИЛ следует использовать эмульсию (с применением электродов из FeV и FeBAI).

Обобщая результаты по МДС и МП и учитывая шероховатость получаемого покрытия, ЭИЛ среднеуглеродистых сталей на среднemoshностных режимах рекомендуется производить:

Для особо ответственных деталей:

- с использованием азота и электродов из FeV, FeBAI и твердого сплава марки ВК6-ОМ;
- с использованием углекислого газа и электродов из FeV и FeBAI.

Для несопрягаемых деталей, к которым не предъявляются высокие требования по частоте упрочненной поверхности:

- с использованием эмульсии и электродов из FeV, FeBAI и твердого сплава марки ВК6-ОМ.

Для обычной практики: на воздухе с использованием широкой гаммы твердых сплавов и ферросплавов.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Представлено описание и область применения электроискрового легирования. Описаны способы реализации ЭИЛ. Выполнен анализ влияния межэлектродной среды на процесс ЭИЛ. Сформулированы цель работы и задачи.
2. В работе приведено описание установок для реализации ЭИЛ. Спроектирована система получения и насыщения азотом упрочняемой поверхности при ЭИЛ.
3. Проведены исследования: зависимости высоты микронеровностей покрытия от мощности режима при различных способах ЭИЛ; зависимости высоты микронеровностей покрытия от мощности режима при различных способах ЭИЛ; износа инструмента, упрочненного ЭИЛ.
4. На основе проведенных исследований разработаны рекомендации по применению ЭИЛ.
5. Проведены производственные испытания различных деталей на стойкость, что подтвердило актуальность применения ЭИЛ.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Буглаев, А.М. Установка для электродеформационного упрочнения дерево-режущих ножей / А.М. Буглаев, Е.А. Памфилов, А.А. Андронов // Деревообрабатывающая промышленность. – 1991. – №9. – с. 37-39.
2. Иванов, Г.П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. – М.: Машгиз, 1961. – 303 с.
3. Дунюшкин, В.В. Установка для упрочнения режущего инструмента методом электроискрового легирования // Информационный листок: Челябинский ЦНТИ. – 1997. – №14. – 3 с.
4. Аренков, А.Б. Основы электрофизических методов обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1967. – 372 с.
5. Меркулов, А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. – М.: Машиностроение, 1969. – 183 с.
6. Стерин, И.С. Слесарь-ремонтник металлорежущих станков. – Л.: Лениздат, 1990. – 304 с.
7. Технологические основы обеспечения качества машин/ под общ. ред. К.С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1990. – с. 203-207.
8. Технология и автоматизация производственных процессов в машиностроении. – Пенза: Пензенский политехнический институт, 1978.
9. Электроискровое легирование металлических поверхностей. – Киев: Наукова Думка, 1976. – 219 с.
10. Абугов, А.Л. Иглофрезерные станки для обработки цилиндрических заготовок // Станки и инструмент, 1990, №7. – с. 41-42.
11. Андреев, В.И. Устройство для электроискрового легирования// Машиностроитель. – 1978. – №2. – с. 31-34.
12. Андреев В.И., Деревянко В.И. Устройство для виброискрового упрочнения// Машиностроитель. – 1976. – №11. – с. 17-19.
13. Бурмукулов, Ф.Х. Упрочнение пил для резки древесины электроимпульсной обработкой / Ф.Х. Бурмукулов, Р.А. Латыпов, Л.М. Ленчук // Сварочное производство. – 1997. – №10. – с. 37-38.

14. Дмитриев, П.А. Электроискровое упрочнение инструмента / П.А. Дмитриев, В.Д. Шнайдер // Машиностроитель. – 1978. – №4. – с. 23-26.
15. Ермилов, В.В. Электроэрозионная обработка поверхностей инструмента и деталей машин / В.В. Ермилов, Л.И. Сафонова, А.К. Васильев // Машиностроитель. – 1991. – №8. – с. 18-19.
16. Калининченко, А.В. Установка для упрочнения штампов «Элитрон-АП-400»// Информационный листок: Черкасский ЦНТИ. – 1992. – №32. – 3 с.
17. Климухин, Ю.И. Многоэлектродное устройство для электроэрозионного легирования / Ю.И. Климухин, М.Р. Глебов // Информационный листок: Пензенский ЦНТИ. – 1999. – №152. – 2 с.
18. Коваленко, Л.П. Электроискровое упрочнение// Информационный листок о научно-техническом достижении: Харьковский ЦНТИ. – 1991. – №260. – 3 с.
19. Мартынов, И.Н. Повышение срока службы режущего инструмента// Машиностроитель. – 1979. – №9. – с. 31-33.
20. Мартынов, И.Н. Установка для упрочнения инструмента / И.Н. Мартынов, И.А. Руденко // Машиностроитель. – 1980. – №10. – с. 22-26.
21. Мезинова, В.В. Установка электроискрового легирования «Звезда»// Информационный листок: Горьковский ЦНТИ. – 1990. – №479. – 2 с.
22. Паустовский, А.В. Повышение износостойкости инструментальных сталей электроискровым легированием / А.В. Паустовский, Т.В. Куринная, И.А. Руденко // Станки и инструмент. – 1988. – №2. – с. 29-30.
23. Тимощенко, В.А. Самозатачивание режущих инструментов / В.А. Тимощенко, А.В. Тимощенко // Машиностроитель. – 1993. – №2. – с. 2.
24. Трофимов, В.И. Автоматизация процесса электроискрового легирования сложных металлических поверхностей / В.И. Трофимов, В.А. Розанов // Электронная обработка материалов. – 1972. – №1. – с. 42-46.
25. Установка UR-121 для нанесения износостойкого покрытия на режущие кромки инструмента// Деревообрабатывающая промышленность. – 1996. – №1, 3. – с. 25-27.
26. Электроискровое упрочнение// Информационный листок: Харьковский

ЦНТИ. – 1991. – №260. – 3 с.

27. Абрамчук, А.П. Устройство для электроэрозионного легирования: А.с. 1540972 СССР: В23Н9/00.
28. Тарасов, В.С. Установка для электроэрозионного легирования: А.с. 1549685 СССР: В23Н9/00, 1990.
29. Топала, П.А. Способ электроэрозионного легирования и устройство для его осуществления: А.с. 1704971 СССР: В23Н9/00.
30. Мик, Дж. Электрический пробой в газах / Дж. Мик, Дж. Крэкс. Перевод на русский язык. – М., 1960. – 605 с.
31. Леб, Л.Б. Основные процессы электрических разрядов в газах. – Л., Гостехиздат, 1950 г. – 672 с.
32. Вихревые аппараты. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
33. Трение, изнашивание и смазка: справочник. В 2-х кн. Кн. 2. / Под ред. И.В. Крачельского и В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.
34. Смирягин, А.П. Промышленные цветные металлы и сплавы. – М.: ГОСНТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1956. – 559 с.

## Приложение А – НАУЧНАЯ ПУБЛИКАЦИЯ



**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА  
ПУТЕМ ЕГО УПРОЧНЕНИЯ**

**ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ**

П.Г. Павловский, А.С. Писарев, Д.В. Кочетков

**INCREASING RESISTANCE OF CUTTING TOOL  
BY HARDENING IT BY ELECTRIC SPARKING**

P.G. Pavlovsky, A.S. Pisarev, D.V. Kochetkov

**Аннотация.** Приведены результаты исследования влияния упрочнения электроискровым легированием на стойкость режущего инструмента. Установлено, что применение электроискрового легирования повышает стойкость инструмента из быстрорежущей стали в 2-4 раза.

**Ключевые слова:** электроискровое легирование, режущий инструмента, твердость, стойкость

**Annotation.** The results of a study of the effect of hardening by spark doping on the resistance of a cutting tool are presented. It is established that the use of electrospark alloying increases the tool life of high-speed steel by 2-4 times.

**Keywords:** electrospark alloying, cutting tool, hardness, resistance

В настоящее время для повышения стойкости режущего инструмента применяются различные способы [1, 2]: нанесение различных покрытий, притупление кромки, упрочнение рабочих поверхностей и т.д. К способам повышения стойкости инструмента можно отнести и электроискровое легирование (ЭИЛ). Суть ЭИЛ заключается в полярном переносе вещества электрода (анода) за счет энергии импульсных разрядов на поверхность изделия, являющегося катодом. Энергия, выделяемая конденсаторной батареей, через разрядный контур воздействует на анод и легирует поверхность катода, создавая химические соединения с диссоциированным атомарным азотом воздуха, углерода, материалом электрода и изделия, образуя так называемый «белый» слой с изнosoустойчивыми свойствами. Этот слой на микрофотографии [2] выглядит следующим образом: верхний «белый» слой

внешне бесструктурный, нетравящийся и нижний слой (или подслои) – диффузионный, с сильно измененной структурой, постепенно переходящий в структуру основного металла. Такой слой можно получить только при электроискровом легировании, где происходят такие процессы как сверхскоростная закалка, азотирование, цементация, обогащение легирующими элементами.

Для оценки влияния ЭИЛ на стойкость режущего инструмент использовались отрезные сегментные пилы 2257-0162 ГОСТ 4047-82. Их параметры следующие: наружный диаметр пилы –  $D = 710j_516$ ; диаметр отверстия –  $d = 80H8$ ; число зубьев пилы –  $z = 96$ ; число зубьев на каждом сегменте –  $z_c = 4$ ; материал режущей части – быстрорежущая сталь Р9 ГОСТ 19265-73.

ЭИЛ участков ( $10 \times 5$  мм) боковых поверхностей сегментов осуществлялось на установке UR-121 электродами ( $\varnothing 2,5$  мм и  $\varnothing 3$  мм) твердого сплава ВК6-ОМ по следующей технологической схеме: упрочнение (У) – на технологическом режиме NORMA и электрическом режиме 2 ( $U \cdot I = 7 \text{ В} \cdot \text{А}$ ), удельное время обработки –  $\tau = 1,9 \text{ мин/см}^2$ ; электроискровое шлифование (ЭШ) – на технологическом режиме TURBO (с обратной полярностью) и электрическом режиме 3 ( $U \cdot I = 10 \text{ В} \cdot \text{А}$ ), удельное время обработки –  $\tau = 1,5 \text{ мин/см}^2$ .

В ходе экспериментов измерялись твердость  $HRC$  и микротвердость  $H$ , и высота неровностей  $Ra$  неупрочненных сегментов и, –  $H$  и  $Ra$  упрочненных сегментов. Для этого использовалось следующее оборудование: для измерения твердости по методу Роквелла ( $HRC$ ) использовался прибор типа ТК с алмазным конусом (угол при вершине  $120^\circ$ ); для измерения микротвердости ( $H$ ) – прибор типа ПМТ-3 с алмазной четырехгранной пирамидой (угол при вершине  $136^\circ$ ); а для измерения шероховатости (параметр  $Ra$ ) использовался прибор 170621.

Результаты экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1

| Параметры                        | Значения параметров |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Неупрочненные сегменты           |                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <i>HRC</i> , ед.                 | 63                  | 63   | 64   | 63   | 65   | 64   | 64   | 63   | 64   | 64   |
| <i>H</i> ·10 <sup>-2</sup> , МПа | 92                  | 91   | 92   | 91   | 92   | 91   | 93   | 91   | 91   | 92   |
| <i>Ra</i> , мкм                  | 1,05                | 1,10 | 1,10 | 0,95 | 0,95 | 1,04 | 1,05 | 1,10 | 1,15 | 0,95 |
| Упрочненные сегменты             |                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <i>H</i> ·10 <sup>-2</sup> , МПа | 116                 | 115  | 116  | 115  | 113  | 115  | 118  | 116  | 115  | 116  |
| <i>Ra</i> , мкм                  | 1,10                | 1,25 | 1,20 | 1,15 | 1,15 | 1,20 | 1,20 | 1,25 | 1,25 | 1,15 |

Из таблицы видно, что средние значения параметров боковых частей сегментов составили: неупрочненные сегменты:  $HRC = 64$ ,  $H = 9200$  МПа,  $Ra = 1,04$  мкм; упрочненные сегменты:  $H = 1155$  МПа,  $Ra = 1,2$  мкм. По этим измеренным параметрам можно судить о твердости и шероховатости задних и передних поверхностей зубьев сегментов.

Для оценки стойкости режущего инструмента упрочненного ЭИЛ, обработанными сегментами пил осуществлялось пиления прутка из стали 45 диаметром 10 мм на фрезерно-отрезном полуавтомате 8В66. Износ инструмента контролировался путем измерения высоты зуба пилы, не снимая ее со станка, при помощи микрометрического глубинометра ГМ-25-1 ГОСТ 7470-78 с пределом измерения 0 – 25 мм класса точности 1 (предельная погрешность  $\pm 0,002$  мм). Высота зубьев пилы измерялась от вершины до впадины.

Результаты опытов, после обработки, приведены на рисунке 1.

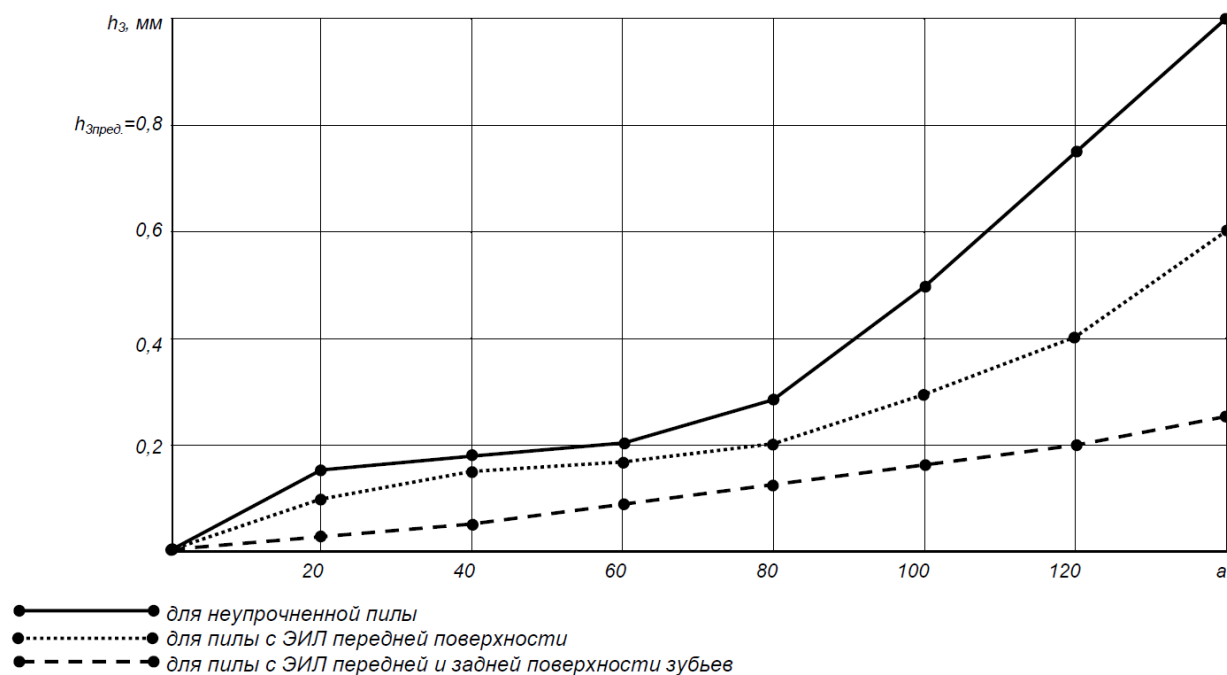


*Рисунок 1. Зависимость износа зубьев по задней поверхности ( $h_3$ ) от количества резов ( $a$ ) при ЭИЛ различных поверхностей сегментной пилы*

Из графика видно, что износ зубьев неупрочненной пилы при всем количестве резов выше, чем у пилы, прошедшей ЭИЛ зубьев по передней и задней поверхности (ЭПЗП). Причем интенсивность износа у нее резко возрастает после 80 резов, а предельная величина износа наступает примерно при 120 резах.

До 60 резов износ зубьев пилы с ЭПП (зависимость 2) на 20% меньше износа зубьев неупрочненной пилы (зависимость 1) и характер кривых одинаков. После 60 резов интенсивность износа у пилы с ЭПП, по сравнению с неупрочненной, начинает заметно отставать и при 140 резах износ ее в 2 раза меньше, что, безусловно, связано с влиянием упрочнения передней поверхности зубьев.

Износ зубьев пилы с ЭПЗП (зависимость 3) в 3-4 раза меньше, чем у неупрочненной, и в среднем в 2 раза меньше, чем у пилы с ЭПП. При этом интенсивность износа пилы с ЭПЗП меняется не столь существенно (в начале 2 мкм, в конце 5 мкм), чем у пилы с ЭПП (в начале 2 мкм, в конце 18 мкм), и, тем более, у неупрочненной пилы (в начале 2 мкм, в конце 29 мкм), что подтверждается характером кривой 3, которая приближается к линейной. Это

можно объяснить суммарным влиянием упрочнения передней и задней поверхности зубьев на величину и характер их износа.

Таким образом, установлено, что применение ЭИЛ увеличивает стойкость режущего инструмента из быстрорежущей стали в 2-4 раза.

#### Библиографический список

1. Ящерицын, П.И. Теория резания: учебник / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. – Мн.: Новое знание, 2006. – 512 с.
2. Липов А.В. Отделочно-зачистная обработка твердосплавного инструмента / А.В. Липов, П.Г. Павловский, А.А. Леонов // Техника и технология современных производств: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2019. – с. 108-112.
3. Буглаев, А.М. Установка для электродеформационного упрочнения дереворежущих ножей/А.М. Буглаев, Е.А. Памфилов, А.А. Андронов // Деревообрабатывающая промышленность. – 1991. – №9. – с. 37-39.

**Павловский Павел Геннадьевич**, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия, E-mail: [mrs@pnzgu.ru](mailto:mrs@pnzgu.ru), **Pavlovsky P.G.**, Penza State University, Penza, Russia

**Писарев Александр Сергеевич**, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия, E-mail: [pisarevaleksandr2009@rambler.ru](mailto:pisarevaleksandr2009@rambler.ru), **Pisarev A.S.**, Penza State University, Penza, Russia

**Кочетков Денис Викторович**, Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия, E-mail: [denis.kochetkov80@yandex.ru](mailto:denis.kochetkov80@yandex.ru), **Kochetkov D.V.**, Penza State University, Penza, Russia

## Приложение Б – ПРЕЗЕНТАЦИЯ