

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

(наименование кафедры)

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение

машиностроительных производств»

(код и наименование направления подготовки)

Технология автоматизированного машиностроения

направленность (профиль)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: «Исследование характеристик образцов с износостойким
покрытием»

Студент

К.С. Телевных

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Научный

Н.Ю. Логинов

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

руководитель

Консультанты

В.Г. Виткалов

(И.О. Фамилия)

_____ (личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., профессор Н.М. Бобровский _____

(личная подпись)

« _____ » _____ 2017 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н., доцент Н.Ю. Логинов _____

(личная подпись)

« _____ » _____ 2017 г.

Тольятти 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт машиностроения
(наименование института полностью)
Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
к.т.н., доцент

_____ Н.Ю. Логинов
(подпись)
« ____ » _____ 2017 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
выполнения магистерской диссертации

Студента Телевных Кристины Сергеевны
по теме Исследование характеристик образцов с износостойким покрытием

Наименование раздела работы	Плановый срок выполнения раздела	Фактический срок выполнения раздела	Отметка о выполнении	Подпись руководителя
Введение	01.02.17- 10.02.17	10.02.17	Выполнено	
Глава 1. Патентный поиск	11.02.17- 10.03.17	10.03.17	Выполнено	
Глава 2 Аналитическое исследование температур поверхности тела, возникающих в процессе нанесения покрытия методом ЭИЛ	11.03.17- 15.04.17	15.04.17	Выполнено	
Глава 3 Проведение производственных испытаний и исследование образцов с	16.04.17- 09.05.17	09.05.17	Выполнено	

износостойким покрытием				
Заключение	09.05.17-15.05.17	15.05.17	Выполнено	
Список использованной литературы	16.05.17-30.05.17	30.05.17	Выполнено	

Руководитель выпускной
квалификационной работы

(подпись)

Н.Ю. Логинов

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

(подпись)

К.С. Телевных

(И.О. Фамилия)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ

(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой _____ Н.Ю.

Логинов

« ___ » _____ 2017г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

направление подготовки 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение

машиностроительных производств»

направленность (профиль) «Технология автоматизированного машиностроения»

Студент Телевных Кристина Сергеевна гр. ТМм-1501

1. Тема Исследование характеристик образцов с износостойким покрытием

2. Срок сдачи студентом законченной выпускной квалификационной работы «09» июня
2017 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе _____

4. Содержание выпускной квалификационной работы (объем 90-130 с.)

Титульный лист.

Задание. Календарный план. Аннотация. Содержание.

Введение

1) Патентный поиск

*2) Аналитическое исследование температур поверхности тела, возникающих в процессе
нанесения покрытия методом ЭИЛ*

*3) Проведение производственных испытаний и исследование образцов с износостойким
покрытием*

Заключение. Список используемой литературы.

Приложения:

Оглавление

Введение.....	6
Глава 1. Патентный поиск.....	12
Выводы из литературного обзора.....	29
Глава 2 Анализ температур поверхности тела в процессе нанесения покрытия методом ЭИЛ.....	32
2.1 Основные процессы при электроискровой обработке.....	32
2.2 Математическая модель процесса упрочнения методом ЭИЛ.....	37
2.3 Оптимизация процесса нанесения покрытий методом электроискрового легирования.....	52
Выводы из аналитических исследований:.....	58
Глава 3 Проведение производственных испытаний и исследование образцов с износостойким покрытием.....	59
3.1 Проблема износа инструмента в производственных условиях.....	59
3.2. Механизм разрушения покрытия в процессе резания.....	66
3.3 Упрочнение режущего инструмента при помощи метода электроискрового легирования.....	76
3.4 Упрочнение поверхности изделия при помощи технологии ЭИЛ с применением порошкового наноматериала.....	79
Заключение.....	82
Список используемой литературы.....	87
Приложение.....	97

Введение

Актуальностью темы диссертационного исследования является то, что в современном мире многие люди задаются вопросом: как увеличить срок службы деталей автомобиля качественно и надежно. Чаще всего износу подвергаются те детали которые во время работы соприкасаются друг с другом (зубья шестерен, направляющие и ползуны, внутренняя поверхность цилиндров двигателя и т.д), поэтому поверхности таких деталей должны обладать высокой износостойкостью к увеличению температуры во время трения, а также иметь высокую коррозионную стойкость.

Существует много способов увеличения износостойкости деталей, но самыми распространенными и эффективными способами являются технологии нанесения на рабочую поверхность различных износостойчивых покрытий.

Такие покрытия представляют собой устойчивый поверхностный слой детали, который создается путем влияния различных окружающих факторов на материал подложки. После нанесения таких материалов на деталь, увеличивается поверхностный слой самой детали, а также изменяется ее химический состав и структурно-фазовое состояние, которое существенно отличается от первоначальных характеристик детали.

На сегодняшний день существует большой выбор материалов, которые используют для создания стойких покрытий. Эти материалы обеспечивают деталь набором необходимых свойств, которые помогут увеличить стойкость детали к деформации и внешней среде.

К сожалению, многие используемые материалы являются слишком дорогостоящими. Но современные технологи выяснили, при какой толщине наносимый материал способен также обеспечить деталь нужными эксплуатационными характеристиками.

Существует много способов нанесения покрытий. Рассмотрим их классификацию.

По способу получения покрытия на основе:

- механических воздействий;
- физических воздействий;
- химических воздействий;
- электрофизических воздействий.

По использованию технологических процессов:

- гальванические процессы;
- вакуумные процессы;
- процесс наплавки.

По использованию различных материалов

- металлических материалов;
- керамических материалов;
- полимерных материалов.

По используемому физическому состоянию материалов:

- нанесение твердых покрытий (или твердом дисперсном состоянии);
- нанесение покрытия из жидкой фазы (эмульсии, суспензии, лаки, шликер);
- нанесение покрытий, состоящее из электролитических растворов;
- нанесение покрытия которое состоит из расплавов;
- нанесение покрытий из различных газовых смесей и газов.

По назначению:

- износостойкие;
- коррозионно-стойкие;
- жаростойкие;
- декоративные и т.д.

Электроискровое упрочнение поверхности или электроискровое легирование (ЭИЛ) является эффективным методом упрочнения поверхностного слоя деталей и инструментов. Оно позволяет получать покрытия, прочно сцепленные с материалом основы и обладающие высокими эксплуатационными характеристиками.

Процесс электроискрового легирования состоит в основном из воздействия на материал анода искрового разряда. Происходит процесс разрушения (эрозии) материала анода и перенос его на поверхность катода (изделия). Особенность обработки материала (детали) при помощи метода ЭИЛ зависит от материала легирующего электрода и режима обработки.

Механизм работы ЭИЛ является одним из сложных методов, который состоит из множества процессов, таких как: эрозионный, термический и термохимический процесс и контактный перенос материала.

Прочности поверхностного слоя деталей увеличивается не только из-за оседания анода на катод, но и из-за взаимодействия анода с основой и образования твердых растворов, оксидов, нитридов и различных химических соединений. Образование прочной поверхности при помощи ЭИЛ является одним из эффективных методов увеличения износостойкости детали. Это происходит за счет импульсного воздействия температур и давлений, которые приводят к измельчению структуры и образованию новых фаз.

Для того что бы увеличить прочность электродов (анода) используют твердые сплавы в состав которых входят карбиды титана, вольфрама, кобальта, хром-марганца, феррохром, хром, белый чугун, алюминий, сталь и графит.

Легирование упрочненного металла тугоплавкими соединениями бора с титаном, хромом, вольфрамом приводит к частичной диссоциации этих соединений в процессе ЭИЛ и образованию легированных твердых растворов.

При ЭИЛ получается упрочненная поверхность толщиной до 0,1 мм. Верхний белый «нетравящийся» слой состоит из аустенита и мартенсита, нитридов железа и карбидов легирующих элементов. Белый слой образуется и в том случае, если электрод изготовлен из алюминия или меди. Подслой состоит из мартенсита и троостита, а иногда и сорбита, и является диффузионным слоем, постепенно переходящим в материал основы.

Электроискровое упрочнение используют для увеличения

износостойкости и твердости деталей, которые деформируются из-за увеличения температур и внешней деформации.

Технологию ЭИЛ используют для упрочнения поверхностей различных деталей машин, таких как дорожные, строительные, землеройные машины и машины, работающие в среде характеризующейся высоким абразивным износом, а также детали и механизмы литейных цехов. Электроискровое упрочнение также применяют для восстановления и увеличения прочности посадочных мест в неподвижных сопряжениях и скользящих посадках.

Метод электроискрового легирования применяется для различных поверхностей деталей машин (кулачки, направляющие, фиксаторы поверхностей шпоночных пазов, шлицы, а также детали, изготовленные из конструкционных легированных и углеродистых сталей).

Электроискровое упрочнение не требует предварительного нагрева и последующей термообработки, а также не вызывает поверхностного коробления. Новый полученный слой отличается высокой износостойкостью, и при определенной глубине и соответствующем подборе электродов – высокую жаростойкость. Изменение структуры и фазового состава материала в процессе пластической деформации исключает неблагоприятное влияние ЭИЛ на сопротивление усталости.

Недостатком ЭИЛ является сложность получения покрытий из неэлектродных материалов и необходимость применения компактных электродов. Этот недостаток может быть частично устранен при получении ЭИЛ для нанесения покрытий из порошков. Принципиальная возможность получения такого рода покрытий найдена.

Объект исследования: процесс нанесения различных износостойких покрытий на материалы и инструменты при помощи метода электроискрового легирования. А также анализ температуры поверхности тела, которая возникает в процессе нанесения покрытия методом ЭИЛ

Предметом исследования будут являться материалы и инструменты, которые подвержены быстрому износу и образованию эрозии на поверхности.

Целью диссертационной работы является проведение аналитического исследования температуры поверхности материала (инструмента) и выявление проблемы износа инструмента в производственных условиях. Произвести нанесение упрочненное покрытие на материал (инструмент) при помощи метода электроискрового легирования и исследовать полученные характеристики образцов с износостойким покрытием.

Задачи:

– произвести литературный обзор теоретических аспектов электроискрового легирования. Рассмотреть лабораторные исследования авторов и сделать выводы;

– проанализировать температуру поверхности обрабатываемого материала во время нанесения износостойких покрытий методом электроискрового легирования;

– рассмотреть основные процессы электроискровой обработки материала;

– произвести анализ математической модели процесса упрочнения методом электроискрового легирования;

– проанализировать оптимальные режимы технологического процесса нанесения износостойких покрытий;

– рассмотреть процесс нанесения износостойких покрытий в производственных условиях;

– проанализировать причины деформации и износа деталей и инструментов в производственных условиях;

– произвести упрочнение режущего инструмента при помощи электроискрового легирования в производственных условиях;

– рассмотреть упрочнение поверхности изделия при помощи электроискрового легирования с применением порошкового наноматериала.

В первой главе будет проведён анализ литературных источников для того, чтобы выявить новые тенденции развития нанесения износостойких покрытий и определить наиболее актуальные направления в современном мире. Так же будет проведён поиск работ и публикаций специалистов, занимающихся увеличением износостойких покрытий, а также развитием иных способов и оборудования увеличения износостойкости инструмента. Это позволит разобраться в нюансах и глубже изучить особенности данной области.

Во второй главе провели аналитическое исследование температуры поверхности образца, которое образуется во время нанесения износостойких покрытий методом электроискрового легирования. Рассмотрели математическую модель процесса упрочнения при помощи ЭИЛ, и нашли оптимальные режимы для нанесения покрытий.

В третьей главе были рассмотрены способы нанесения различных материалов для упрочнения образцов. Было проведено упрочнение режущего инструмента при помощи метода электроискрового легирования, а также упрочнение поверхности изделия при помощи технологии ЭИЛ с применением порошкового наноматериала

Глава 1. Патентный поиск

На сегодняшний день способы создания и нанесения износостойких покрытий является одной из актуальных тем. Особенно метод электроискрового легирования (ЭИЛ). Он является технологически перспективным и экономически выгодным методом в решении проблем, связанных с увеличением эксплуатационных характеристик деталей машин и режущего инструмента, подвергающихся интенсивному износу.

Многие авторы рассматривали различные методы и способы нанесения износостойкого покрытия путем электроискрового легирования. Так же не оставили без внимания инструменты и материалы способствующие лучшему нанесению.

Авторы В.В. Михайлов, К.А. Бачу, и Е.А. Пасинковский, П.В. Перетятку в своих научных работах рассмотрели ЭИЛ титана и его сплавов. У данных авторов было несколько работ посвященные этой теме. В своих первых работах на начальном этапе ЭИЛ они обнаружили эффект сильной эрозии титанового катода. Данный эффект проявился при легировании анодами из переходных материалов, таких как никель. Это связано с особенностью электронной структуры данной пары материалов [45].

В своей новой работе авторы рассматривали электроискровое легирование металлами IV–VI групп. Данные группы характеризуются меньшей эрозией катода, это происходит из-за того что при взаимодействии IV–VI групп с титаном, уменьшается их активность. Также активность уменьшается при взаимодействии карбидов металлов IV–VI групп с титановым катодом.

Авторы провели эксперимент и выяснили, что при применении ЭИЛ вращающимися анодами возникает бурная реакция между анодом и катодом, продолжительность такой реакции занимает около одной минуты, далее происходит наращивание устойчивого покрытия.

Эксперимент проводился на титановых сплавах – BT9 и BT20. Этот сплав часто применяется в ракетостроении, судостроении и авиастроении, а

также в химическом и транспортном машиностроении. Во время эксперимента авторы проводили исследование самого процесса электроискрового легирования с использованием RC- и разрозненных генераторов электрических импульсов, также применяли различные типы электродов-инструментов (вибрирующие и вращающиеся).

Для того что бы достигнуть реальных показаний, ЭИЛ проводилось на специально разработанном макете механизированной установки с функцией стабилизации процесса во время автоматического регулятора точного поддержания межэлектродного промежутка. Основными элементами эксперимента являлись серебро, графит, хром и сплав Т15К6. Данные материалы выбирались по следующему принципу:

–серебро и графит плохо взаимодействуют с титаном. Данные элементы выбирались для процесса перехода металла в пассивное состояние а также для того, чтобы создать барьерные слои на титановой подложки.

–хром и сплав Т15К6 выбирался для того что бы получить высокую твердость поверхностного слоя.

Для проведения эксперимента на вибрирующем электроде-инструменте при помощи обрабатывающих электродов применялись несколько брусков размером 3x4x40 мм, для обработки вращающихся электродов-инструментов применяли стержни диаметром 2-6 мм, длиной 40 мм. Также были проведены несколько экспериментов с электродом в форме диска, диаметр составлял 16 мм, а толщина 2 мм, Такой электрод состоял из графита и Т15К6. Катоды были из титановых сплавов ВТ9 и ВТ20. Формой катода служила втулка с диаметром 30 мм, шириной 15 мм и толщиной стенки 3 мм.

ЭИЛ проводилось с диапазоном частоты электрического импульса 200-2000 Гц. Для того что бы исключить отрицательное влияние кислорода, который способствует образованию хрупких окислов, часть эксперимента пришлось провести в среде аргона марки А. Аргон подавали в экспериментальную зону обработки через специализированное устройство

небольшими дозами при избыточном давлении 0,1 атм и расходе около 0,5 л/мин.

Результаты эксперимента:

1. Если использовать ЭИЛ на вибрирующем электроде-инструменте, то мы можем нанести устойчивое покрытие толщиной до 30-35 мкм со сплошностью 90-95%, производительность будет составлять до 1,5 см²/мин.

2. При использовании ЭИЛ на вращающемся электроде-инструменте с осевым электродом Т15К6, который расположен перпендикулярно по отношению к обрабатываемой поверхности, авторы создали равномерные слои, отличающиеся высокой сплошностью (до 98%). Самая наибольшая толщина слоя достигает до 18-20 мкм.

Для того чтобы снизить количество эрозии на титановом катоде перед проведением ЭИЛ необходимо провести ряд дополнительных обработок. Для начала поверхность, которую будут использовать для легирования, необходимо обработать серебряным или графитовым отрицательным электродом при режимах: энергия 0,1 Дж с удельным временем 1 мин/см². Эта обработка необходима для пассивации поверхности катода. После обработки поверхность готова для проведения ЭИЛ, легирование осуществляют анодом из Т15К6 с удельным временем обработки 1 мин/см² и при электрическом импульсе 0,5 Дж.

Результаты, после проведения дополнительной обработки, показали, что нанесение покрытия методом ЭИЛ является эффективным, по сравнению с результатами без обработки. Это позволило снизить эрозию титанового катода на первоначальном этапе, а также помогло получить равномерную толщину электроискрового покрытия. Максимальная толщина покрытия твердого сплава Т15К6 составляла около 50 мкм.

После проведения эксперимента авторы провели микроструктурный анализ полученных образцов. Данный анализ выявил, что при использовании предварительной пассивации поверхности детали химическими малоактивными элементами (графит, серебро) и проведения обработки

электрода из никеля в необходимом режиме мы получим покрытия качества выше чем, если бы мы первоначально не обработали поверхность.

В своей статье авторы также рассмотрели оптимальные технологические режимы легирования внутренних поверхностей деталей из титанового сплава BT20 с диаметром 61-140мм.

Рассмотрим научные работы авторов Химухин С.Н., Астапов И.А., Теслина М.А. и Безматерных К.П.. Авторы изучили как повлияет синтезированный сплав Ni-Al на обработку покрытия при помощи метода электроискрового легирования, а также изучили фазовый состав полученного покрытия.

Авторы выяснили, что при взаимодействии Al с открытым воздухом, при переносе расплавленного материала с анода на катод, в сформированном слое возникает оксид. Чтобы предотвратить предотвращения оксида ЭИЛ необходимо проводить в инертной среде (аргон)

Рассмотрим рисунок 1.1. Авторы рассмотрели сплав Ni-Al с различными долями в составе. Доли распределились следующим образом:

- 1 — Ni-33,5 % Al-66,3 %;
- 2 — Ni-57,9 % Al-41,9 %;
- 3 – Ni-66,9% Al-32,9%;
- 4 — Ni-79,3% Al-20,1%;
- 5 – Ni-83,5 % Al-16,4 % [58]

Из рисунка видно, что при использовании электрода из сплава №1 массоперенос минимален, сцепление упрочненного материала с основой минимальное, из этого можно сделать вывод, что создание покрытия с необходимой консистенцией и равномерностью не происходит.

Рассмотрим сплав №2. Поверхность наносимого покрытия имеет толщину 40-70 мкм, но показатели массопереноса ниже чем у сплавов №3 и №4. Это говорит о том, что сплав №2 также имеет минимальное сцепление с исследуемой основой.

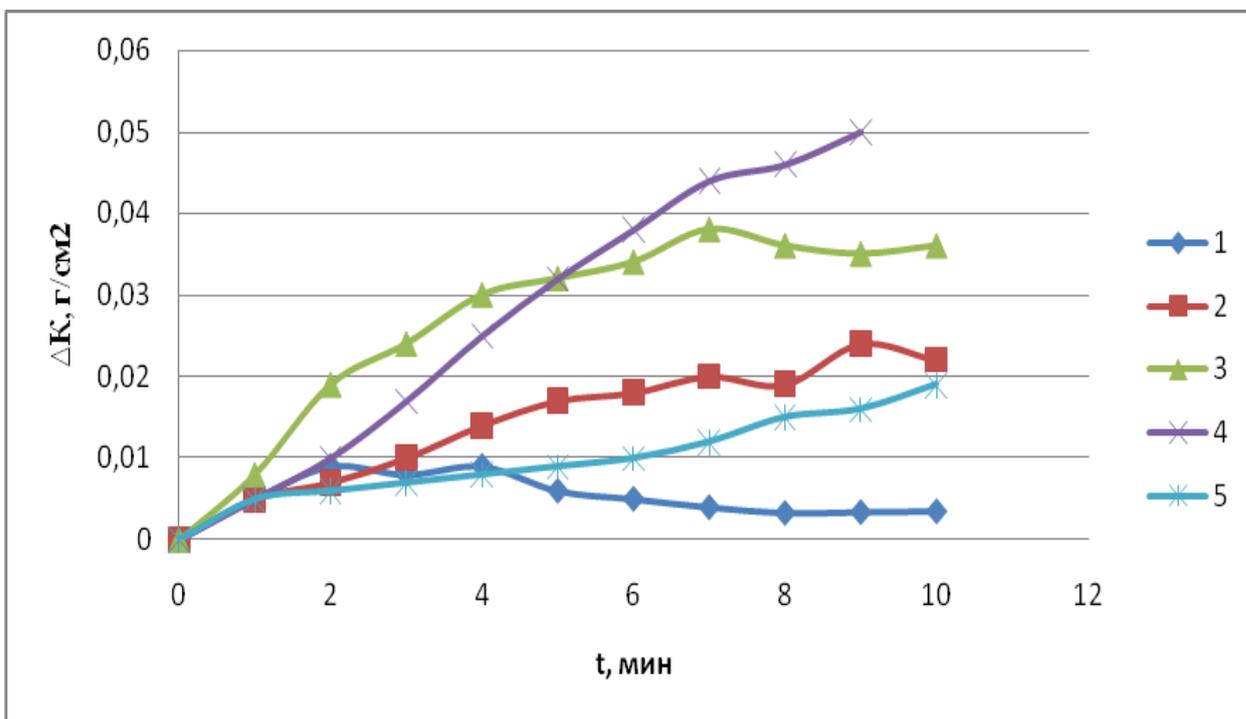


Рисунок 1.1 – Перенос масс при ЭИЛ сплавами Ni-Al в аргоне

Из всего вышесказанного можно выявить что образцы под номером 3 и 4 имеют наибольшее значение массопереноса и обладают высокими показателями сплошности между наносимым материалом и основой.

После полученных результатов авторы провели металлографический и рентгенофазовый анализ покрытия. Металлографический анализ рассмотрит микро- и макроструктуру полученного сплава, а рентгенофазовый анализ выявит необходимое количество концентрации Ni и Al для создания устойчивого покрытия.

Проведенный авторами металлографический анализ показал, что во время использования электродных материалов с пониженным содержанием никеля (образцы №1 и №2) создается неоднородный по толщине слой. Минусы такого слоя в том, что он имеет существенные трещины, из-за которых страдает свойство материала. Такие трещины приводят к хрупкости наносимого покрытия и к снижению жаростойкости образца.

Для создания более равномерного слоя покрытия (справ №3 и №4) и снижения риска образования трещин, авторы попробовали увеличить

количество никеля в исходном легирующем материале. Полученный слой имел толщину от 50 до 250 мкм. Также авторы заметили образование субструктуры в виде кристаллитов шириной 0,3 – 0,6 мкм.

Проведем рентгенофазовый анализ на сплаве №1 (Ni-33,5 % Al-66,3 %). Этот сплав отличился низким содержанием никеля при обработке в среде аргона и в нем практически не происходит образование интерметаллидов. Если же при электроискровом покрытии применять сплавы №2 и №3 (Ni-57,9 % Al-41,9 %; и Ni-66,9 % Al-32,9 %) распознана фаза NiAl, полное содержание которой достаточно велико.

После проведения всех испытаний результаты сравнивались с термограммой исходного материала стали 20X13. Результаты показали, что самым наилучшим покрытием является сплав №3 (Ni — 66,9 % Al — 32,9 %) (таблица 1.1). У образца №3 в отсутствие износостойкого покрытия потенциальный прирост массы может происходить до достижения температуры 750 °С. это происходит за счет того что на поверхности образца образуется окисный слой, который в последующем разрушается и удаляется с поверхности образца.

Защитный слой на других образцах при увеличении температуры полностью либо частично подвергались разрушению [58].

Таблица 1.1 – Результаты проведенного термического анализа при показателях T=900° С, 10°/мин, и выдержке 60 мин.

Используемое покрытие	Изменение массы, г/м ²
Исходный материал, сталь 20X13 (без покрытия)	12,763
Ni-33,5 % Al-66,3 %	-15,045
Ni-57,9 % Al-41,5 %	-16,520
Ni-66,9 % Al-32,9 %	-0,408
Ni-79,3 % Al-20,1 %	41,639
Ni-83,5 % Al-16,4 %	45,192

Авторы А.В. Шак, Р.М. Валиев, М.В. Фоминых, А.А. Вопнерук, С.Г. Купцов, А.В. Иванов, Д.В. Мухинов, Ю.Г. Ведищев рассмотрели, как влияют

различные параметры электроискрового легирования твердых сплавов на технологические свойства электроискровых покрытий. В своей работе авторы изучили нанесение упрочняющего слоя на пластины из быстрорежущей стали Р6М5. Испытание проводились на стали Х40 при скорости резанья стали 16 м/мин, полученные результаты сравнивали с эталоном Р6М5. Во время эксперимента необходимо было определить износ пластин, шероховатость нанесенного слоя на пластины, шероховатость обрабатываемой поверхности в зависимости от параметров напыления (источников питания и энергии разряда).

Данный эксперимент был разделен на три этапа. Первый этап состоял из предварительного определения оптимальных параметров процессов ЭИЛ, которые помогут получить необходимое устойчивое покрытие. Авторы выделили несколько необходимых параметров, таких как частота источника питания, напряжение, емкость (энергия) разряда, состав композиционного материала. Оптимальные области для данных параметров составили следующие значения:

- напряжение $U=100\text{В}$
- частота источника питания 1,37-22 кГц
- емкость разряда 1-6 мкФ, энергия 0,01-0,06 Дж.

В состав композиционного материала вошел сплав (TiB₂-TiNi20%)+B4C1515%, T_{сп} = 1450, t_{сп} = 90 мин, а также сплав ВК6.

На втором этапе авторы определили и использовали оптимальные технологические параметры самого процесса резанья. Они рассмотрели процесс износа на передней и задней поверхностях режущей пластины, а также рассмотрели после проведения электроискровой обработки материала шероховатость пластины и полученный поверхностный слой после процесса резания.

Доказано что:

1. При росте емкости (энергии) происходит незначительный рост шероховатости режущей пластины и обрабатываемой поверхности. Данное показание относится к сплаву Т15К6 и к сплаву TiB2-B4C15%-TiNi20%;

2. Такие же выводы можно сделать и для расчета частоты;

3. Оптимальные параметры износа передней и задней поверхности представлены в таблице 1.2 и на рисунках 1.2-1.4, результаты шероховатости детали после проведения электроискровой обработке представлены на рисунке 1.5. На втором этапе авторы выяснили оптимальные показатели и композиции для оптимизации технологических параметров процесса металлообработки. При этих данных скорость износа задней поверхности эталона Р6М5 составляет примерно 0,8 мкм/с, износ передней поверхности составляет примерно 1 мкм/с, износ при таких данных не будет зависеть от времени [39].

Таблица 1.2 – Режимы и материалы упрочнения

№	Материал	C, мкФ	f, кГц	R _{рез} , мкм	R _{дет} , мкм	Износ, мкм
1.	T15K6	1	2,75	1,415	2,89	190
2.	T15K6	3	2,75	0,88	4,97	220
3.	T15K6	6	2,75	1,26	3,33	480
4.	T15K6	2	1,37	1,376	2,78	200
5.	T15K6	2	5,5	1,35	3,43	230
6.	T15K6	2	11	2,026	5,34	214
7.	T15K6	2	22	1,868	5,92	360
8.	TiB2-B4C15-Ni20	1	1,37	1,397	2,75	450
9.	TiB2-B4C15	3	1,37	1,507	2,9	243
10.	TiB2-B4C15	6	1,37	1,29	3,6	300
11.	TiB2-B4C15	1	2,75	1,397	2,9	234
12.	TiB2-B4C15	3	2,75	1,658	5,87	150
13.	KHT16	3	2,75	1,298	5,85	170
14.	BK6	3	2,75	1,437	3,04	500

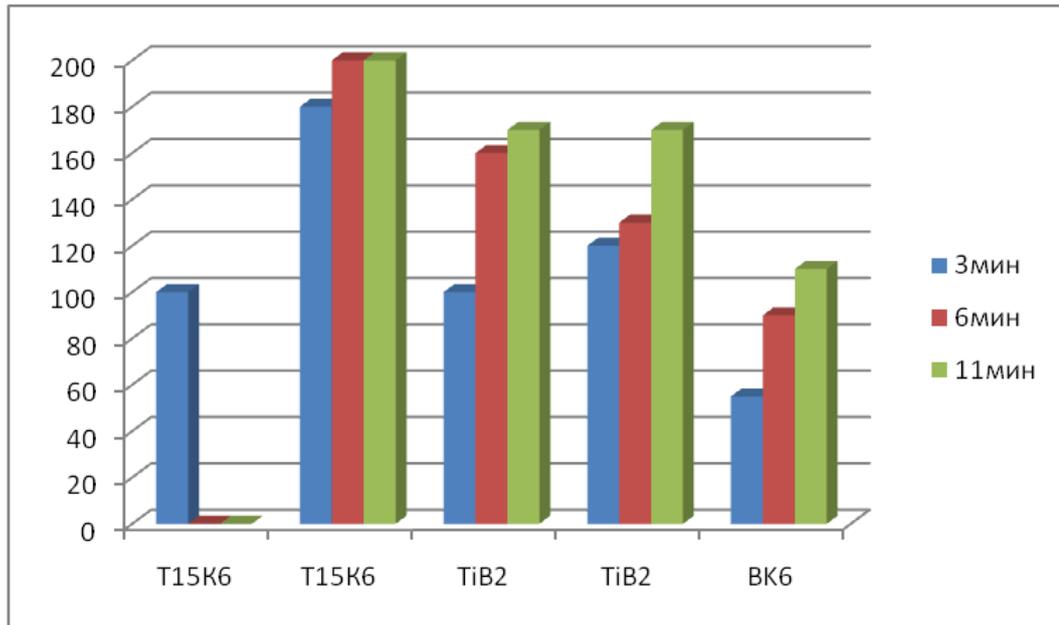


Рисунок 1.2 – Износ задней поверхности режущей пластины, мкм

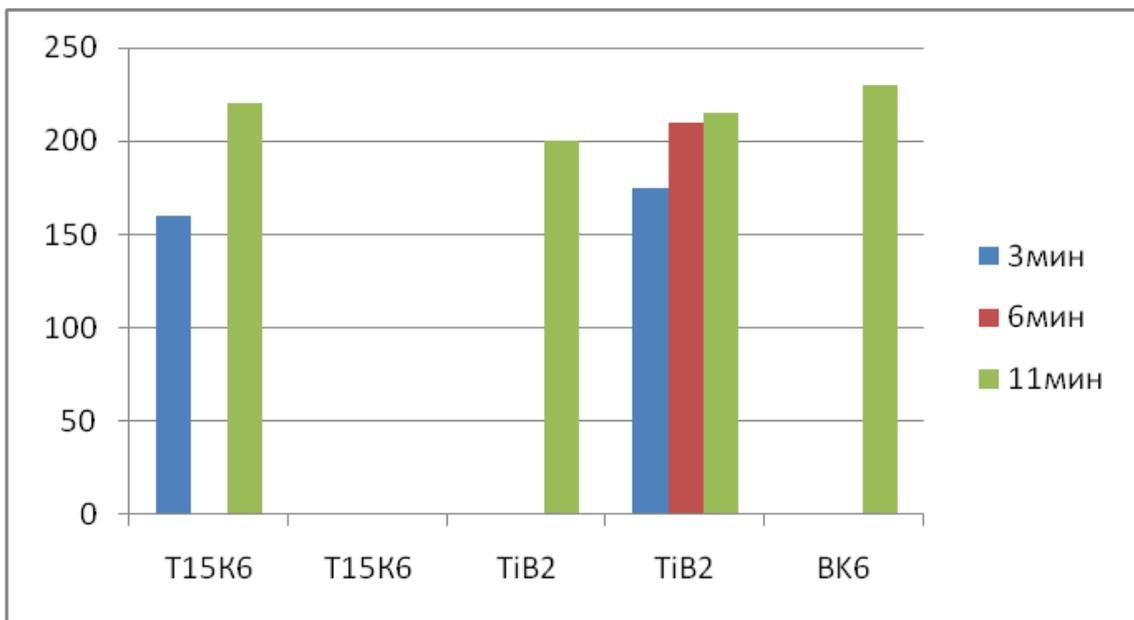


Рисунок 1.3 – Износ по радиусу передней поверхности режущей пластины, мкм

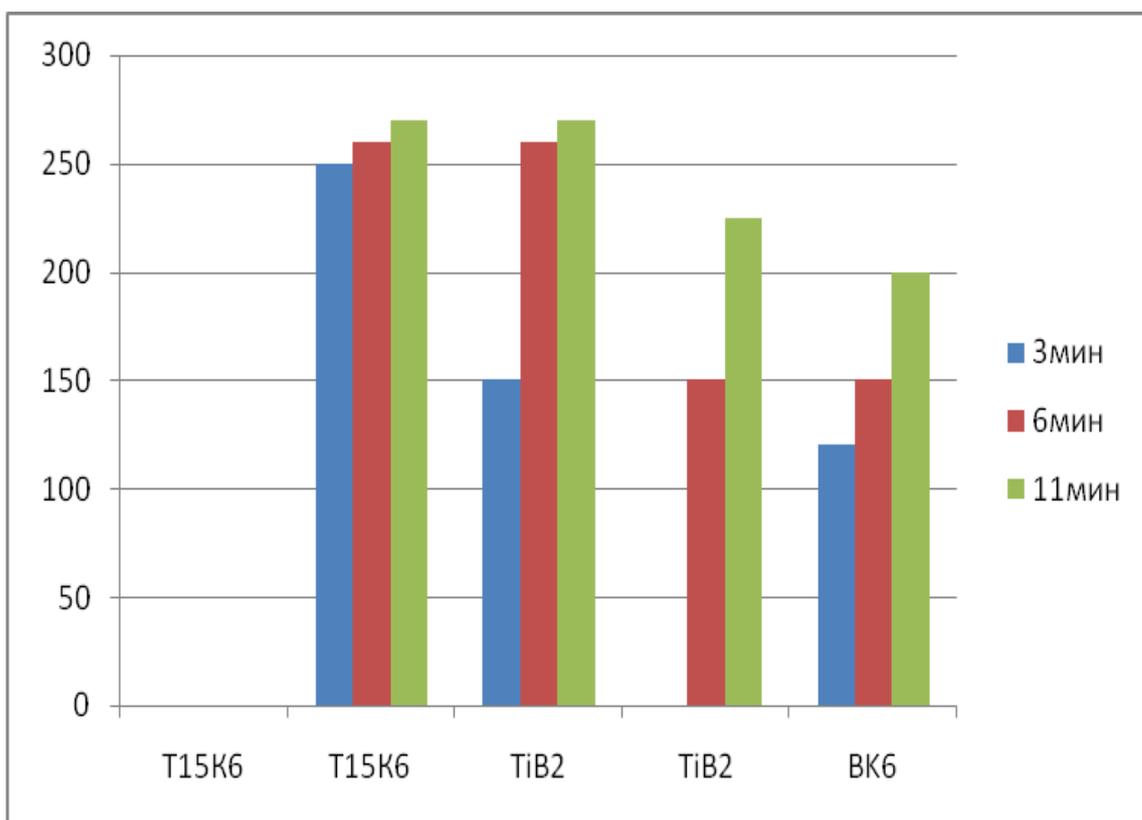


Рисунок 1.4 – Износ по канавке передней поверхности режущей пластины, мкм

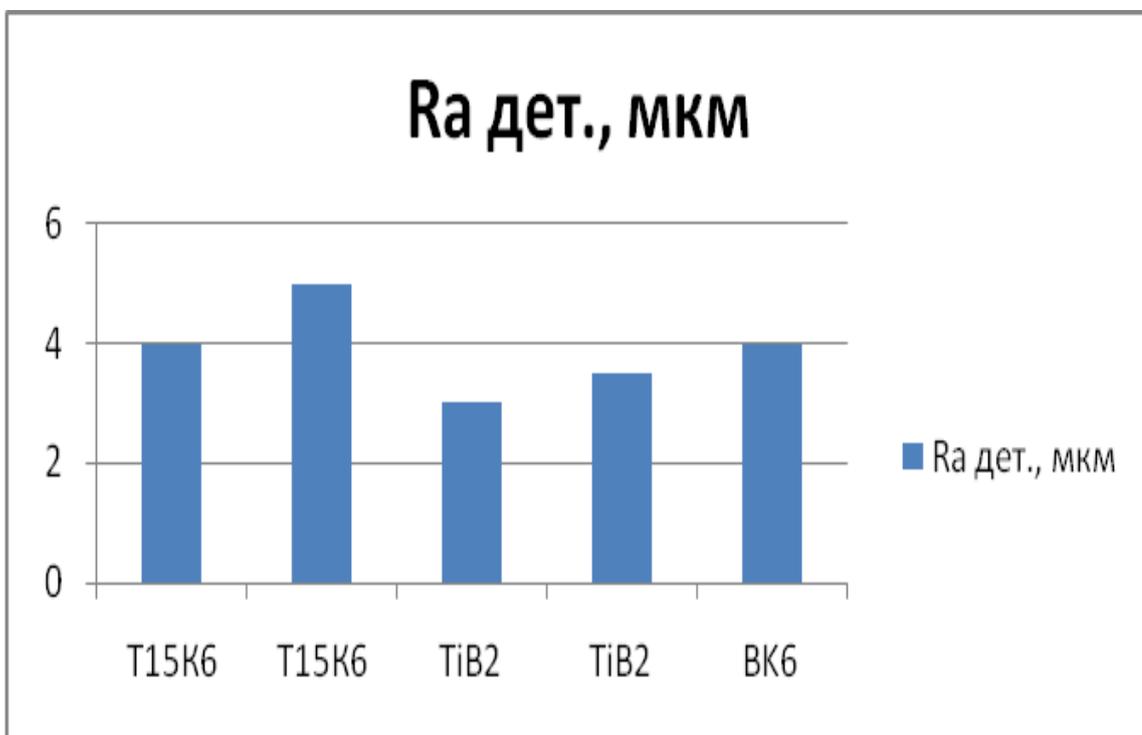


Рисунок 1.5 – Шерховатость детали после обработки, мкм TiB2-B4C15% +- Ni20%

Из диаграммы 1.4 видно, что износ по передней поверхности режущей пластины и задней поверхности, у любого из образцов, не достигает 300 мкм за 11 мин. Если рассмотреть первые три минуты, то износ исследуемой поверхности составил 2/3 от износа за 11 минут. Из этого можно сделать вывод: чем больше длится процесс резанья, тем меньше становится скорость износа. В нашем случае скорость износа уменьшилась почти в 10 раз. Это объясняется общеизвестным фактором разупрочнения поверхностного слоя в процессе электроискрового легирования. Диаграмма 1.5 показывает, что шероховатость обрабатываемой детали превышает 5 мкм только при использовании сплава Т15К6

Процесс создания упрочненного слоя титанового сплава BT18 рассмотрели такие авторы, как Верхотуров А. Д., Козырь А. В., Коневцов Л. А. Авторы рассматривали материалы, которые, при использовании электроискрового легирования образовывали с титаном жаростойкие интерметаллиды и создавали упрочненное покрытие [16].

Для эксперимента авторы отобрали несколько материалов, которые при использовании электроискрового легирования увеличивают термическую устойчивость α - сплавов титана и могут образовать с материалом подложки (катодом) жаростойкие интерметаллиды. Это такие материалы как Al, TiAl, Ni₃Al, также данные материалы способствуют значительному увеличению массопереноса при легировании, а также увеличению жаростойкости обрабатываемого материала.

Материалом, на который будут наносить износостойкое покрытие, будет являться сплав BT18. В состав сплава входит примерно 10-12% Zr, 7,2-8,2% Al, 0,2-1% Mo, 0,18% Si, и Ti который занимает оставшуюся процентную долю, также существует небольшое количество технологических примесей, таких как Nb, Fe, O, H, N, C и др.

Авторы исследовали скорость химической реакции упрочнения сплава BT18 при упрочнении алюминием (Al/BT18), Ni₃Al/BT18 и TiAl/BT18. Результаты показали, что эрозия наносимого материала (Al, TiAl, Ni₃Al)

находится в определенной подчиненности от времени электроискрового легирования и критерия теплового воздействия R . Данная зависимость соответствует «правилу Лазаренко». Эрозия анода увеличивается в том случае, когда происходит снижение значения критерия теплового воздействия и увеличивается значение режимов обработки материалов. Т.е. чем меньше критерий теплового воздействия R , тем больше происходит влияние импульсных тепловых и механических нагрузок на электрод, если критерий R увеличивается, то значение эрозии электрода уменьшается в зависимости от времени электроискрового легирования.

При использовании ЭИЛ с повышенными тепловыми воздействиями протяженностью $t=2$ мин на участок контактирования электрода, возможно образование глубокой лунки, что повлечет за собой появление микротрещин. Это происходит за счет грубых режимов с критерием R .

Авторы выяснили, с учетом известных нам особенностей, что при увеличении времени на проведение процесса электроискрового легирования до $t=8$ мин в местах контактного взаимодействия двух фаз образуются микротрещины.

При увеличении времени процесса ЭИЛ до 10 минут влечет за собой увеличения количества и глубину микротрещин в структуре исследуемого материала. Вместе с участками увеличения эрозии проявляются следы усталостного разрушения покрытия, происходят направленные перемещения массы материала, а также разбрызгивание и испарение продуктов эрозии.

Если увеличить время электроискрового легирования до 12-14 минут то сформируется глубокий рельеф, начинается процесс отслаивания частиц с поверхности нанесенного покрытия. Процесс отслаивания также может ускориться при воздействии на поверхность термоударом и увеличение эрозии границ зерен. Если ЭИЛ увеличить до 14 минут, то заметно увеличиваются размеры и число частиц новых фаз. На некоторых участках образуется крупнозернистая структура, также можно заметить углубление и

разделение поверхностного рельефа, это происходит из-за интенсивного испарения и перекристаллизации материала.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что критерий теплового воздействия R и выбранная энергия искрового разряда влияет на изменение массы катода VT18 при электроискровом легировании алюминием в большей степени, чем время обработки. При использовании критерия R при малых тепловых воздействиях уже после нескольких подходов электрода инструмента на поверхности появляются небольшие участки с разрушением легирующего слоя. Количество таких участков изменяются с увеличением количества времени на обработку поверхности ввиду вновь поступившей жидкой фазой анода. Если время обработки поверхности занимает 2-3 минуты, то поверхность образца начинает разрушаться, происходит отслаивание и выкрашивание структуры легирующего слоя, но общее количество образцов катода при этом возрастает.

Количество деформированных участков может превышать количество участков «залечивания» что приведет к быстрому разрушению легированного слоя, а также к уменьшению веса катода. Это происходит в том случае, когда режим критерия теплового воздействия R имеет повышенные тепловые воздействия на обрабатываемый участок.

Размеры контактных пятен электродов в исследуемых поверхностях изменяются в зависимости от режима критерия R. При проведении электроискрового легирования с повышенными тепловыми воздействиями контактные пятна меньше, чем при обработке на «мягком» режиме с критерием R с наименьшими тепловыми воздействиями. Но, к сожалению, глубина таких пятен и степень образования микротрещин значительно увеличивается.

Авторы В. В. Блажеев, П. Г. Иваночкин, А. С. Личковаха провели исследование механических свойств покрытий, наносимых методом ЭИЛ с применением ряда доступных материалов и последующий обоснованный

выбор материала электрода для создания покрытий с достаточно высокими механическими свойствами.

Для того чтобы произвести нанесение износостойких покрытий при помощи метода ЭИЛ в качестве отрицательного электрода использовались следующие материалы: стеллит, стеллит с бронзой (БрАЖ-9), ВК6, ВК6 с бронзой, сталь Ст65Г [32].

В качестве катода были использованы ролики из стали 45 с твёрдостью рабочей поверхности по Роквеллу (шкала С) 50-62 (HRC) при шероховатости $Ra = 2,5$ мкм.

Проведенное авторами исследование микротвёрдости наносимого покрытия (рисунок 1.6) показало, что поверхностный слой материала является наиболее твердым на глубине 20-30 мкм. Такая незначительная глубина увеличения микротвёрдости и существенное её изменение могут быть объяснены лишь следующим образом: минимальная продолжительность периода активного воздействия искрового разряда на материал, а также увеличение плотности мощности искрового разряда не допускают проникновение эрозионного массового потока вглубь материала, формируя при этом в приповерхностной зоне модифицированный упрочнённый слой [32].

Результаты исследований свидетельствуют о том, что полученный электроискровым легированием первый слой покрытия структурно неоднороден. В нём можно выделить три основные зоны.

1. Термодиффузионная зона упрочненного покрытия и основного металла.

2. Нетравящийся (белый) слой. Это твердый раствор образующий легирующие или карбидообразующие элементы, входящие в состав материал электрода.

3. Слой похожий на газотермическое покрытие, он образуется из частей застывшего металла и оксидов.

Состав наносимого покрытия похож на строение антифрикционного сплава.

Структура упрочнённого наружного слоя имеет состав наподобие антифрикционного сплава, где мелкодисперсные частицы карбидов содержатся в сравнительно мягкой основе. Перенесённый материал анода легирует с материалом детали и образует износостойкий диффузионный слой. Данный процесс легирования создает соединения с атомарным азотом воздуха, который прошел распад с углеродом материала детали. Глубина влияния термообработки на глубинный слой материала детали составляет 0,8...1,0 мм.

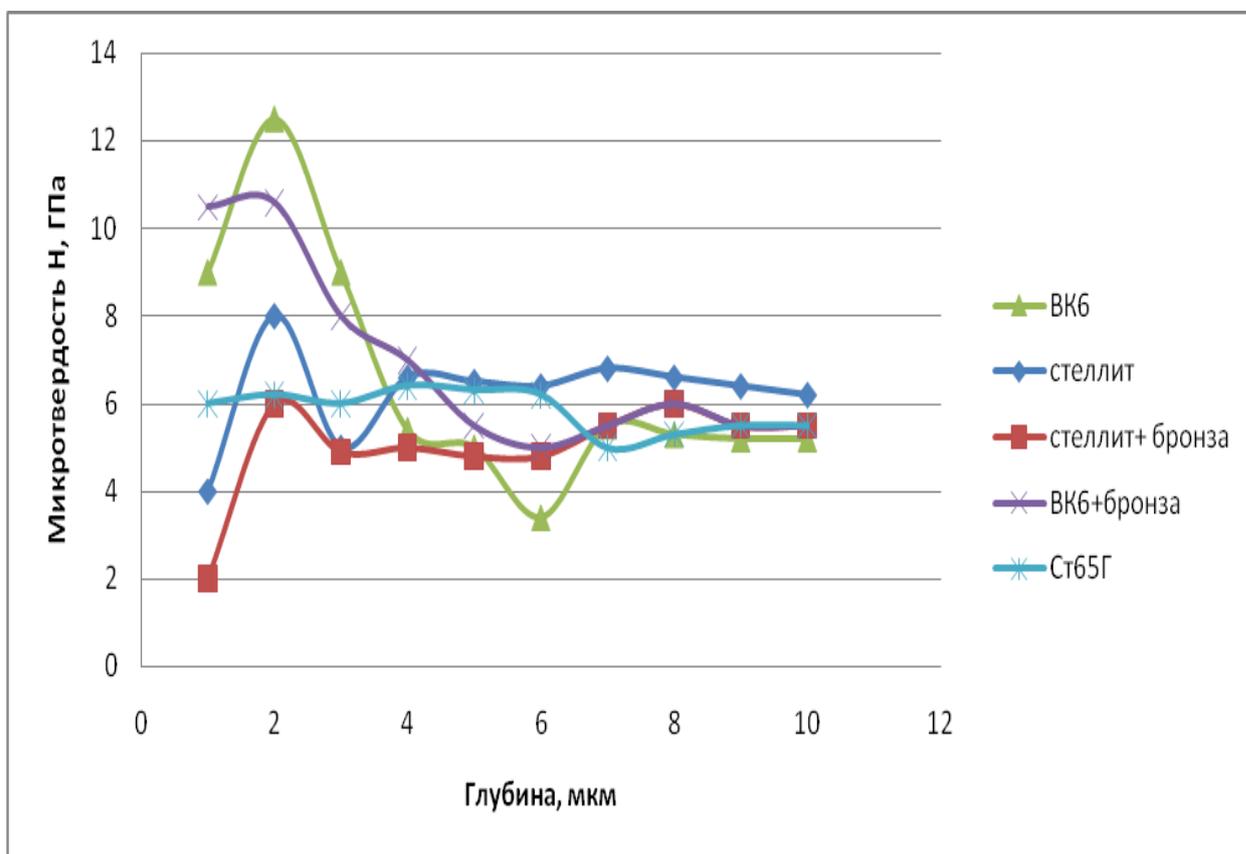


Рисунок 1.6 – Зависимость твердости различных покрытий от глубины

Из графика 1.6 можно сделать вывод что при электроискровой обработки поверхностного слоя самое большое значение микротвердости имеют те образцы которые были обработаны материалами анода ВК6 и ВК6 с

бронзой. Также график показал, что при обработки образца материалом Ст65Г микротвердость поверхностного слоя почти не изменяется.

Основная характеристика материала при индентировании – это отношение твердости H к модулю упругости (модуль Юнга) E . Данное отношение часто называют индексом пластичности материала. Отношение H/E определяет, как может измениться размер и форма материала в процессе деформации. Также данное отношение отражает структурное состояние материала путем сравнения качественных характеристик сопротивления образца при его деформации во время механического воздействия. Индекс пластичности также используется для выявления характеристик износа материала во время трения.

Рассмотрев рисунок 1.7 можно сделать вывод, что при использовании материала анода Ст65Г и стеллита можно получить, на поверхности анода, крупнокристаллические соединения, это характеризуется показателем $H/E < 0,04$.

Вместе с тем остальные материалы образуют в основном на поверхности детали, подвергшейся обработке, мелкокристаллические соединения ($H/E \approx 0,05 \div 0,09$). Для некоторых слоев материалов свойственна высокая износостойкость. Такие материалы имеют более высокие значения индекса пластичности, они имеют модуль упругости, схожий с модулем основного материала Юнга [7, 8]. Материалы ВК6, стеллит с бронзой (БрАж-9) и ВК6 с бронзой используют в качестве анода, т.к при помощи таких материалов можно получить покрытия с высокими механическими характеристиками при режиме работы с разными видами трения [32].

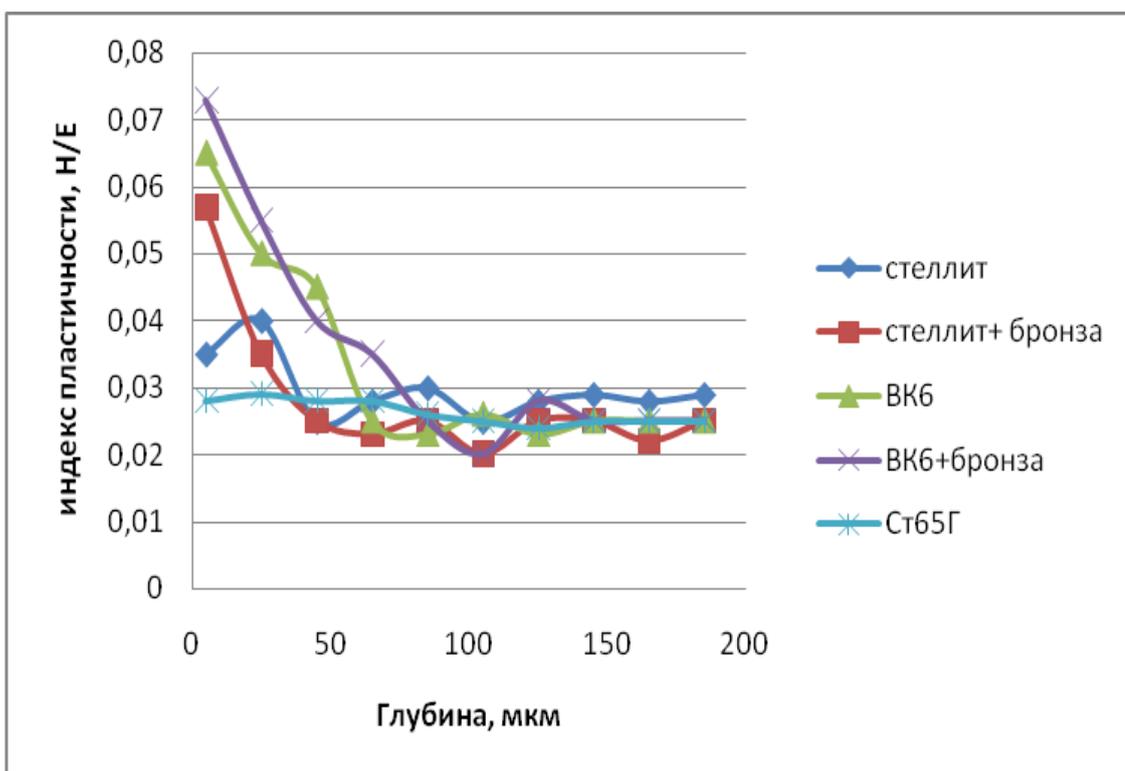


Рисунок 1.7 – Изменения индекса пластичности различных покрытий по глубине

Для того что бы оценить сопротивление материалов при пластическом деформировании используют качественную сравнительную характеристику. Для того чтобы материал был более устойчивый к деформации нужно соблюдать следующую закономерность: при высокой твердости модуль Юнга должен быть минимальным. Если сравнить все нанесенные покрытия (рисунок 5), то можно сделать вывод, что высоким индексом пластичности при высоком значении отношения является покрытие нанесенное электродом из ВК6.

При использовании исследованных материалов полученные электроискровым легированием слои покрытия обладают достаточно высокими механическими свойствами. При этом покрытия, нанесённые электродом из ВК6, отличаются высокими значениями почти по всем показателям. Также высокие показатели имеет покрытие из ВК6 с бронзой., но его градиент по глубине резко изменяется. Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что самым наилучшим материалом для нанесения

покрытия электроискровым методом будет являться покрытие ВК6. Расход такого материала при использовании процесса ЭИЛ будет незначительным.

Выводы из литературного обзора

Подводя итог все рассмотренных источников можно сделать несколько выводов.

При проведении комплексных исследований электроискрового легирования титанового сплава ВТ9 и ВТ20 и нанесенных износостойких материалов из переходных материалов IV-VI и VIII групп, алюминия, серебра, графита и твердого сплава Т15К6 авторы установили несколько основных закономерностей процесса упрочнения, а также предложили пути решения проблемы интенсивной эрозии катода. Решением стало проведение предварительной пассивации электродами из графита и серебра в режиме электрического импульса около 0,1-0,3 Дж, затем проведение обработки твердосплавным электродом из Т15К6.

Авторы Химухин С.Н., Астапов И.А., Теслина М.А. и Безматерных К.П. определили сплавы которые позволяют повысить жаростойкость стали 20Х13. Это сплавы № 2 (Ni-57,9 % Al-41,9 %) и № 3 (Ni-66,9% Al-32,9%;), при нанесении такие сплавы образуют интерметаллид NiAl в покрытии.

При проведении ряда экспериментов авторы определили, что при нанесении сплава № 2 возможно образование трещин на покрытии. Данный сплав является достаточно хрупким, во время процесса термического взаимодействия это ведет к полному разрушению слоя. Причиной такого результата может служить разница в коэффициентах термического расширения покрытия и основы. Таким оставшимся наилучшим вариантом для создания жаростойкого покрытия является сплав №3 (Ni-66,9% Al-32,9%;) [58].

Авторы Р.М. Валиев, А.А. Вопнерук, Ю.Г. Ведищев, А.В. Иванов, С.Г. Купцов, Д.В. Мухинов, М.В. Фоминых, А.В. Шак изучили области наилучших параметров для проведения электроискрового легирования на

пластинах из быстрорежущей стали Р6М5. Разработанные режимы ЭИЛ существенно увеличили износостойкость эталонных пластин. Авторы пришли к выводу, что для получения удовлетворяющего результата необходимо чтобы шероховатость упрочненных пластин не превышала 2 мкм, а шероховатость обрабатываемой поверхности не превышала 6 мкм [39].

Для того чтобы добиться более износостойкого покрытия во время использования метода электроискрового легирования авторы предложили провести ряд дополнительных исследований для понижения уровня шероховатости поверхности режущего инструмента и обрабатываемой детали, а также необходимо дополнительно рассмотреть влияние режимов резанья и геометрии режущего инструмента. Данные исследования помогут увеличить коэффициент работоспособности режущего инструмента в несколько раз.

Верхотуров А. Д., Коневцов Л. А. Козырь А. В., обнаружили несколько взаимосвязанных изменений массы катода от критерия теплового воздействия R и времени обрабатываемой площади образца во время процесса электроискрового легирования.

Проведенные электронно-микроскопические исследования создания легирующего слоя при электроискровом легировании Al/VT18 на различных тепловых воздействиях режимов с критерием R установили восемь характерных участков микроструктуры поверхности. Среди этих участков образуется площадь похожая на закристаллизовавшуюся каплю жидкости, лунки, а также на участки слабого и постепенного разрушения.

Во время использования электроискрового легирования Al/VT18 поверхность анода можно охарактеризовать четырьмя участками, которые зависят от критерия теплового воздействия R :

1. оплавление,
2. интенсивное испарение материала,
3. отсутствие блокировки рабочей поверхности электрода вторичными

структурами,

4. активная эрозия со следами контактного взаимодействия с материалом катода.

Процесс электроискрового легирования материала Al/VT18 площадью 1-2см при режимах критерия теплового воздействия $R=1,5$ А/Дж и при импульсной энергии $E=3$ Дж вынужден протекать не больше 6-7 мин, при TiAl/VT18 не больше 2-3 мин.

Если длительность процесса электроискрового легирования Al/VT18, TiAl/VT18, Ni3Al/VT18 увеличивается до 14 минут, то граница слабого разрушения (T_x) не достигает 33 А/Дж на режимах с критерием R , а также при $R=1,5$ А/Дж при Ni3Al/VT18. Это приводит к непрерывному увеличению катода и соответственно увеличивает эрозию анода [16].

При использовании исследованных материалов полученные электроискровым легированием слои покрытия обладают достаточно высокими механическими свойствами. Практически по всем показателям наивысшее значение имеет электрод из ВК6. Не отстает по показателям и электрод из ВК6 с бронзой, хотя их градиент по глубине резко изменяется. Вследствие этого лучшим материалом электрода для нанесения покрытия методом электроискрового легирования можно считать ВК6. Расход данного электрода при электроискровом легировании незначителен.

Глава 2 Анализ температур поверхности тела в процессе нанесения покрытия методом ЭИЛ

2.1 Основные процессы при электроискровой обработке

Изменение свойств стали возможно двумя способами: изменением химического состава стали, либо изменением ее структуры под влиянием внешнего энергетического воздействия различными методами (механическими, тепловыми, энергетическими или их комбинациями), включая метод электроискровой обработки (ЭИО).

Применение метода электроискровой обработки металла необходимо для создания отверстий различной формы с криволинейными и прямыми осями. Также данный метод используется для заточки инструментов из твердых сплавов, для обработки штампов пресс-форм и других деталей которые могут состоять не только из твердосплавного металла, но и из закаленной стали.

Процесс электроискрового легирования металлических поверхностей происходит путем перемещения анода на катод и создании электрической эрозии [10,30,41]. При данном процессе материал анода и катод смешиваются, приводя к созданию износостойкого покрытия. Ученые установили, путем многочисленных исследований, что больше всего разрушению и переносу подвергается материал анода. Одним из важных элементов электроискровой обработки является умение управлять процессом обработки и прогнозировать свойства покрытия: толщину, микро- и макроструктуру, физико-механические свойства (износостойкость, коррозионную стойкость, сопротивление усталости и т.д.) [10,14]. В настоящее время мы имеем большой практический опыт по получению с помощью электроискрового легирования различных износостойких покрытий. Однако до сих пор не было создано обобщенной теории электроискрового легирования, с помощью которой возможно спрогнозировать свойства покрытий [10,14]. Это происходит из-за сложности описания математического процесса, в котором отражаются параметры

материала катода и анода, состав газовой среды, частота, скважность и амплитуда токов искрового разряда, амплитуда и частота вибрации электрода, появление вторичных фаз на катоде и аноде, величина межэлектродного промежутка и т.д.

Опубликовано много научных трудов связанных с электроискровым легированием. Рассмотрим непосредственно работу Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко [10]. Авторы определили электрическую эрозию как физическое явление, в котором происходит направленный выброс электродов под воздействием электрического разряда, протекающего между ними. [10].

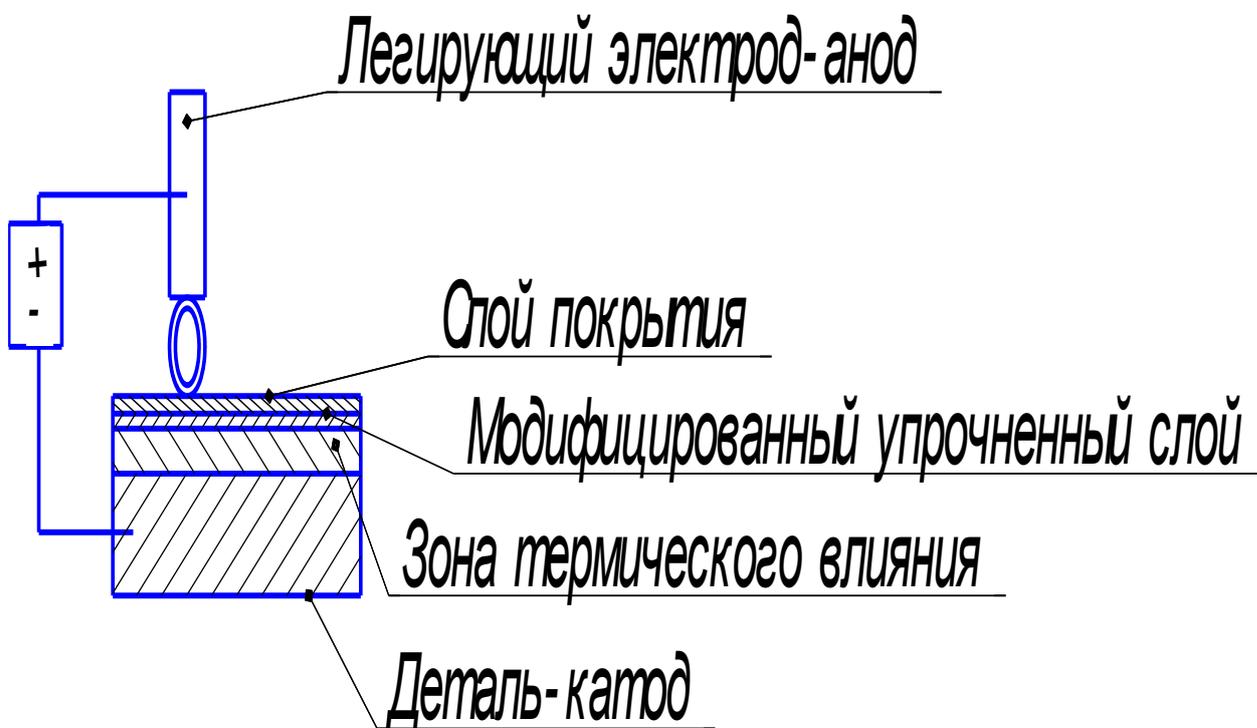


Рисунок 2.1 – Схема процесса ЭИЛ

Смысл такой модели состоит в том, что электрическая напряженность поля увеличивается, когда электрод сближается. Когда электроды достигают необходимой величины напряженности поля, между ними происходит пробой промежутка, это приводит к появлению канала сквозной проводимости. Через данный канал, поток электронов устремляется к аноду, а поток ионов движется к катоду. Поток электронов фокусировано

соприкасается с твердой металлической поверхностью анода, в результате чего происходит их торможение с выделением большого количества тепла. В результате мгновенного разогрева, от электрода отделяется небольшое количество расплавленного металла и движется к детали.

Капля, которая отделилась от электрода, нагревается до температуры ее кипения и взрывается, после чего к катоду широким фронтом уже летят оставшиеся ее частицы. После того как расплавленные частицы анода достигают катода происходит их сваривание и частичное внедрение частиц в поверхность катода. Хочу заметить, что во время полета частицы анода соприкасаются с окружающим его каналом газа, при таком взаимодействии частицы могут образовывать оксиды, нитриды и т.д. Поэтому их химический состав может существенно отличаться от состава анода. После того как на катоде образовались скопления частиц, движущийся вслед за электронами анод, обрабатывает полученное покрытие. При контакте электродов происходит увеличение температуры поверхностного слоя катода, который помогает свариванию частиц между собой. При этом прогреве поверхностного слоя происходит диффузия частиц анода в глубину поверхностного слоя катода. В следующей фазе анод поднимается вверх и цикл повторяется. На поверхности катода, за счет диффузии, образуется прочное соединяющее покрытие. При движении анода на катоде образуется совокупность гребней и впадин, которая определяет шероховатость и сплошность обработанной методом электроискрового легирования поверхности. [118].

Б.Р. Лазаренко и В.И. Лазаренко считали что использование метода электроискрового легирования помогает создавать новые композиционные материалы. Данное предположение относится к тугоплавким покрытиям. Так как при применении метода электроискрового легирования происходили существенные изменения в свойствах поверхностного слоя таких покрытий. Определить данные изменения можно при помощи следующих параметров:

- состав поверхностного слоя

- структура поверхностного слоя
- свойства поверхностного слоя
- технологические параметры процесса ЭИЛ

При проведении ЭИЛ поверхностный слой обрабатываемых металлов проходит структурные и базовые изменения. Данные изменения подробно изучали такие авторы, как Б.Р. Лазаренко и В.И. Лазаренко, Л.С. Палатника и другие исследователи. Проанализировав множество работ по металлографическому исследованию, мы выяснили, что зона нанесенного упрочненного материала делится на три слоя:

1. Во время ЭИЛ на материале появляется белый слой. Он не поддается удалению гальванического слоя химическими реактивами, и находит применение на материале основы.

2. Под белым слоем располагается переходный слой. Этот слой состоит из влияния теплового режима на электрический импульс и взаимопроникновения диффузных элементов анода и катода.

3. Еще ниже находится область со структурой. Она принадлежит основному материалу подложки – катоду.

Также возможно образование усложненных структур. Сложными структурами считается то, когда кроме белого и переходного слоя появляются еще дополнительные подслои. Такое формирование зависит от используемых материалов, энергии импульсов, электродов, и длительности обработки материала.

Проведенный металлографический анализ поперечных срезов образцов из стали и титана после электроискрового легирования показал, что поверхностный слой, находящийся на катоде, является белым слоем, который имеет четкую границу с основным материалом или плавно переходящую зону. Состав переходного слоя состоит из диффузной зоны и зоны термического влияния.

Существуют несколько основных причин, из-за которых образуются «Белые слои»:

- воздействие высокой температуры и давления на определенные участки материала;
- суммарное влияние дефектов тонкой кристаллической структуры;
- дислокация;
- мартенситное превращение.

После проведения электроискрового легирования структура слоя в основном состоит из:

- аустенит (иногда феррит)
- нитрид
- карбид
- карбонид
- закалочные структуры (мартенсит, сорбит, тростит)

Сделаем вывод, что в «белый» слой входят различные составляющие легирующего материала и окружающей среды. Количество этих элементов уменьшается по глубине слоя, а повышается с возрастанием режима обработки.

Существуют два условия взаимодействия между упрочняемым слоем и поверхностным слоем основного материала, которые необходимо учитывать при нанесении износостойких покрытий на режущий инструмент методом ЭИЛ:

- обязательно должны протекать диффузные и конвекционные процессы на границе данных поверхностей. Это обеспечивает прочность соединения покрытия с основой;
- теплота, выделяющаяся при нанесении покрытий должна оказывать минимальное воздействие на структурное состояние поверхности режущего инструмента.

Этим двум условиям отвечает технология, предусматривающая нагрев упрочняемой поверхности до температуры равной температуре плавления материала режущего инструмента.

$$\Theta(x, z)|_{y=0} = T_{пл} \quad (2.1)$$

Такая технология поможет сохранить физикомеханические свойства поверхностного слоя основного материала и обеспечить необходимое качество упрочненной поверхности.

Таким образом, по мнению авторов, изменение и упрочнение поверхностного слоя происходит при помощи нескольких этапов [54]:

- осаждение (конденсация) материала анода на поверхности катода;
- диффузия частиц материала анода в поверхностный слой материала катода; образование твердых растворов и химических соединений (оксиды, карбиды, интерметаллиды);
- образование мелкозернистой структуры, зоны взаимной кристаллизации, фаз, а также неравновесных структур.

Также существует альтернативное мнение автора А.Д. Верхотурова. Автор представлял модель электроискрового легирования в виде кинетического процесса, в котором учитывал поверхностные явления, происходящие на аноде и катоде. Данные явления включают в себя:

- разрушение электродов в различных фазах (жидкие, паровые и твердые фазы)
- схватывание анода и катода в момент контакта;
- существенное изменение свойств рабочей поверхности из-за переноса материала и импульсных нагрузок;
- обеспечение перекристаллизации материалов и их физико-механических взаимодействий;
- получение слоя определенной толщины из-за внутренних напряжений и термоусталости.

2.2 Математическая модель процесса упрочнения методом ЭИЛ.

На рисунке 2.2. показан схематический процесс теплообмена при электроискровом упрочнении [173]. Электрод с положительным зарядом из материала имеющий твердый сплав скользит со скоростью v по поверхности упрочняемой детали. В месте соприкосновения электрода с положительным

зарядом и изделием с отрицательным зарядом образуются электрические разряды, которые нагревают изделие и электрод.

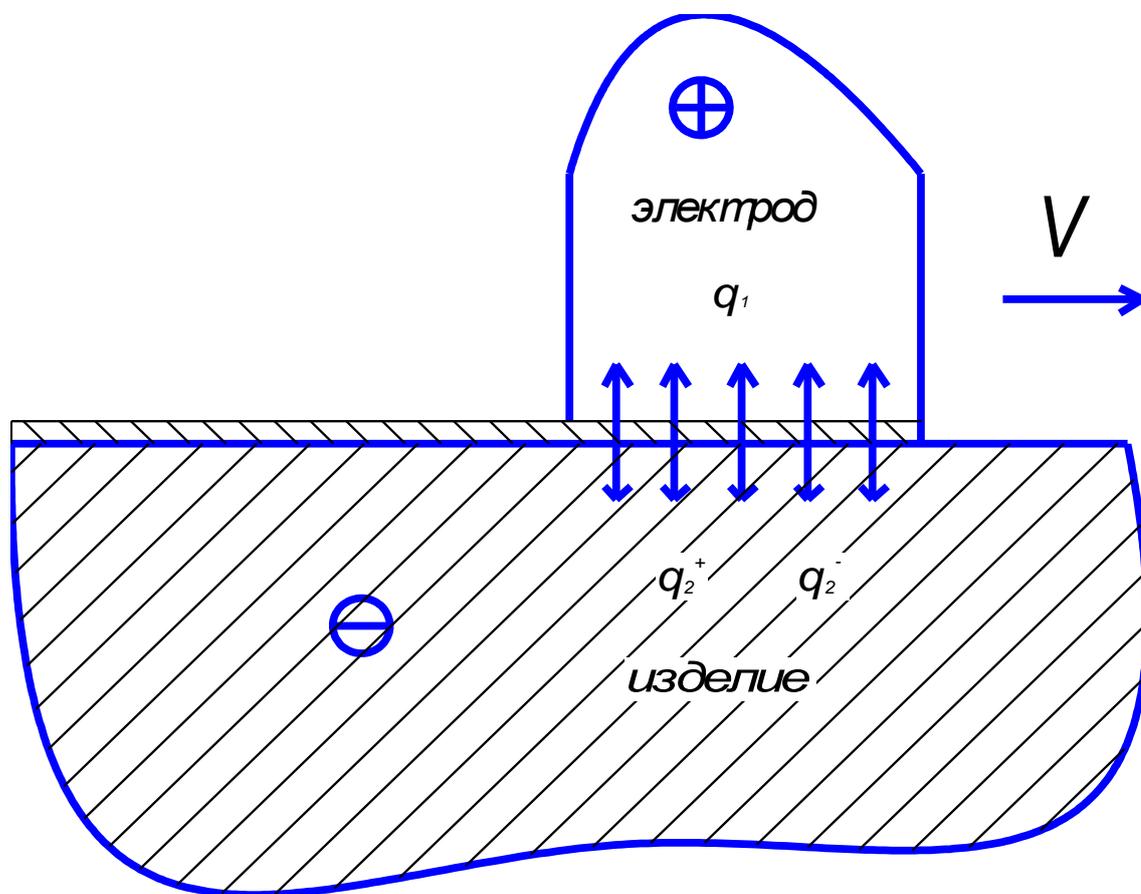


Рисунок 2.2. – Схематизация процесса теплообмена. q_1 – интенсивность теплового потока в электроде, q_2 интенсивность теплового потока в изделии.

В момент электрического разряда положительно и отрицательно заряженные частицы притягиваются друг к другу, а движущиеся им на встречу ионы оседают на поверхности изделия.

Поверхность электрода нагревается до температуры плавления за счет направления в электрод $p=0,6...0,65$ [158] полной мощности подводимой энергии. Дополнительным источником нагрева изделия q_3 служит материал электрода, который переносится на изделие.

Рекомендуется использовать данную технологию в то время, когда температура поверхности изделия будет равна температуре его плавления. Это необходимо для того что бы избежать отслаивания и уменьшения глубины отпущенного слоя материала изделия.

Опишем математическую модель процесса распространения тепла в изделии с помощью дифференциального уравнения в частных производных:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \omega \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \quad (2.1)$$

где θ – температура точки на данный момент времени,

x, y, z – координаты точек,

τ - время,

ω – коэффициент температуропроводности.

Условия однозначности:

Коэффициент скорости изменения температуры ω , зависит от температуры точки которую мы будем рассматривать. Возьмем величину ω за постоянную, т.к. в первую очередь нам интересна температура поверхности тела которая близкая к температуре плавления. Исследуемая температура принимается за постоянное значение из-за малого разброса значений, это позволит нам существенно упростить решение задачи.

Область применения:

Нам необходимо определить температуру поверхности тела неограниченных размеров, из этого следует, что:

- 1) координата x изменяется от $-\infty$ до $+\infty$, $x \in (-\infty, +\infty)$;
- 2) координата y изменяется от 0 до $+\infty$, $y \in (0, +\infty)$;
- 3) координата z изменяется от $-\infty$ до $+\infty$, $z \in (-\infty, +\infty)$.

Начальные условия:

Примем температуру на начальный момент времени равной нулю, она же будет равна температуре окружающей среды.

Граничные условия:

1) Первое условие включает в себя описание движения источника теплоты q_0 по поверхности исследуемого объекта. Тело нагревается от двух источников теплоты. Первым источником является тепло идущее от электроискровых разрядов в тело упрочняемой детали q_2 . Вторым источником является тепло перенесенное наплавленным металлом электрода q_3 . Данное граничное условие описывается выражением (2.2).

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} = q_2 + q_3, \text{ верхняя граница имеет температуру } \theta = T_{\text{пл}}. \quad (2.2)$$

$$q_2 = \frac{W}{S_{\text{э}}} \cdot K_2, \quad (2.3)$$

$$q_3 = L_{\text{фэ}} \cdot m_{\text{э}}, \quad (2.4)$$

$$K_2 = 1 - \frac{2}{p+1}, \quad (2.5)$$

$$p = \sqrt{\frac{\lambda_{\text{э}} \cdot C_{\text{э}} \cdot \rho_{\text{э}}}{\lambda \cdot C \cdot \rho}}. \quad (2.6)$$

где W – мощность генератора;

$S_{\text{э}}$ – площадь сечения электрода;

$L_{\text{фэ}}$ – скрытая теплота плавления материала электрода;

$m_{\text{э}}$ – масса наплавленного в единицу времени материала электрода;

$\lambda_{\text{э}}, C_{\text{э}}, \rho_{\text{э}}, \lambda, C, \rho$ - коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и плотности соответственно электрода и изделия.

2) Введем еще одно граничное условие для поверхности упрочняемого тела, граничное условие первого рода.

$$\theta(x, y, z, \tau) = 0, \text{ при } \tau = 0.$$

Данные условия позволят привести тело ограниченных размеров к неограниченному.

Решим дифференциальное уравнение (2.1) методом источников, который был разработан академиком Рыкалиным Н.Н. [119] и усовершенствован в отношении к процессу резания профессором Резниковым А.Н. [112].

Данный метод поможет нам решить задачи о распределении теплоты между соприкасающимися телами и получить нужные результаты. Метод учитывает ограниченность размера тела полупространством путем ведения систем отраженных источников тепла. Правило отражения заключается в том, что необходимо к одному определенному, оригинальному телу прикладывать ряд схожих для него тел с мнимыми источниками или стоками теплоты. Каждое последующее тело – это зеркальное отражение предыдущего тела относительно плоскости их соприкосновения. Это приводит ограниченное тело к неограниченному с новой системой источника тепла.

Для того, что бы определить температуру твердого тела в определенной точке с координатами x, y, z , в котором перемещается точечный источник тепловой мощностью Q , необходимо считать источник тепла движущимся.

Это происходит при условии, когда критерий Пекле, равняется $Pe = \frac{v \cdot l}{\omega}$, и будет меньше 8. Для нашего случая критерий Пекле должен быть $Pe \leq 6$.

Многие специалисты-теплофизики выяснили, что скорость распространения теплоты, у движущихся источников тепла, больше чем скорость движения самого источника.

Это отражено в уравнении для мгновенного источника тепла [112]:

$$\theta(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi\lambda R} \exp\left[-\frac{v(x_u - x) + vR}{2\omega}\right]. \quad (2.7)$$

где: λ и ω – являются коэффициентами температуропроводности и теплопроводности твердых тел;

v – скорость источника;

$$R = \sqrt{(x_u - x)^2 + (y_u - y)^2 + (z_u - z)^2}; \quad (2.8)$$

x_u, y_u, z_u – координаты источника.

Иначе будет выглядеть формула (2.7) если тело будет являться полупространством, а источник будет двигаться по его поверхности. В таком случае определим температуру поверхности полупространства. Выбираем

начало координат данной поверхности, ось x находится на линии действия вектора υ , а ось y располагается на нормалях по отношению к поверхности полупространства. В таком случае $y_u = y = 0$,

$$\theta(x, z) = \frac{Q}{2\pi\lambda\sqrt{(x_u - x)^2 + (z_u - z)^2}} \exp\left[-\frac{\upsilon(x_u - x) + \sqrt{(x_u - x)^2 + (z_u - z)^2}}{2\omega}\right]. \quad (2.8)$$

Плотность тепловыделения плоского источника, который равномерно распределен по круговому пятну диаметром d :

$$q(x_u, z_u) = q_0, \text{ Вт/см}^2, \quad (2.9)$$

Что бы перейти от точечного источника к плоскому необходимо проинтегрировать с учетом формулы 2.9 выражение (2.8) в районе пятна нагрева:

$$\theta(x, z) = \frac{q}{2\pi\lambda} \int_0^{d/2} dx_u \int_{-\sqrt{x_u(d-x_u)}}^{\sqrt{x_u(d-x_u)}} \frac{dz_u}{\sqrt{(x_u - x)^2 + (z_u - z)^2}} \cdot \exp\left[-\frac{\upsilon(x_u - x) + \sqrt{(x_u - x)^2 + (z_u - z)^2}}{2\omega}\right] \quad (2.10)$$

Рассмотрим интеграл

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_{-\sqrt{x_u(d-x_u)}}^{\sqrt{x_u(d-x_u)}} \frac{dz_u}{\sqrt{(x_u - x)^2 + (z_u - z)^2}} \exp\left[-\frac{\upsilon(x_u - x) + \sqrt{(x_u - x)^2 + (z_u - z)^2}}{2\omega}\right] = \\ &= \exp\left[-\frac{\upsilon(x_u - x)}{2\omega}\right] \cdot \int_{-\sqrt{x_u(d-x_u)}}^{\sqrt{x_u(d-x_u)}} \frac{dz_u}{\sqrt{(x_u - x)^2 + (z_u - z)^2}} \exp\left[-\frac{\upsilon\sqrt{(x_u - x)^2 + (z_u - z)^2}}{2\omega}\right] = \\ &= \exp\left[-\frac{\upsilon(x_u - x)}{2\omega}\right] \cdot I_2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Подставляя $z_u - z = u$; $dz_u = du$; $x_u - x = a$ и $-\frac{\upsilon}{2\omega} = k$, имеем

$$I_2 = \int_{-\sqrt{x_u(d-x_u)}}^{\sqrt{x_u(d-x_u)}} \frac{du}{\sqrt{a^2 + u^2}} \cdot \exp\left[k\sqrt{a^2 + u^2}\right]. \quad (2.12)$$

Для решения интеграла I_2 воспользуемся условием, что

$$e^t = 1 + \frac{t}{1!} + \frac{t^2}{2!} + \dots + \frac{t^n}{n!} + \dots, \quad t \in (-\infty, +\infty), \quad \text{то при } t = k\sqrt{a^2 + u^2}:$$

$$\exp \left[\sqrt{a^2 + u^2} \right] = 1 + k\sqrt{a^2 + u^2} + \frac{1}{2}k^2(a^2 + u^2) + \frac{1}{6}k^3\sqrt{(a^2 + u^2)^3} + \dots + \frac{1}{n!}k^n\sqrt{(a^2 + u^2)^n} + \dots$$

$$u \in (-\infty, +\infty).$$
 (2.13)

Функция под интегралом представляется следующей формулой

$$\frac{\exp \left[\sqrt{a^2 + u^2} \right]}{\sqrt{a^2 + u^2}} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + u^2}} + k + \frac{1}{2}k^2\sqrt{a^2 + u^2} + \frac{1}{6}k^3\sqrt{a^2 + u^2} + \dots + \frac{1}{n!}k^n\sqrt{(a^2 + u^2)^{n-1}} + \dots$$

$$u \in (-\infty, +\infty).$$
 (2.14)

Разложим данную формулу:

$$\sqrt{a^2 + u^2} = a\sqrt{1 + \frac{u^2}{a^2}} = a \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{a^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(-1)}{2} \cdot \frac{u^4}{a^4} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(-1)}{2} \cdot \frac{(-3)}{2} \cdot \frac{u^6}{a^6} + \dots \right) =$$

$$= a + \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{a} - \frac{1}{8} \cdot \frac{u^4}{a^3} + \frac{1}{16} \cdot \frac{u^6}{a^5} + \dots$$
 (2.15)

$$\frac{1}{\sqrt{a^2 + u^2}} = (a^2 + u^2)^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{a} \left(1 + \frac{u^2}{a^2} \right)^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{a} \left(1 + \frac{-\frac{1}{2}}{1!} \cdot \frac{u^2}{a^2} + \frac{-\frac{1}{2}(-\frac{3}{2})}{2!} \cdot \frac{u^4}{a^4} + \frac{-\frac{1}{2}(-\frac{3}{2})(-\frac{5}{2})}{3!} \cdot \frac{u^6}{a^6} + \dots \right) =$$

$$= \frac{1}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{a^3} + \frac{3}{8} \cdot \frac{u^4}{a^5} - \frac{5}{16} \cdot \frac{u^6}{a^7} + \dots$$
 (2.16)

Тогда

$$\frac{\exp \left[\sqrt{a^2 + u^2} \right]}{\sqrt{a^2 + u^2}} = a - \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{a^3} + \frac{3}{8} \cdot \frac{u^4}{a^5} - \frac{5}{16} \cdot \frac{u^6}{a^7} + \dots + k + \frac{1}{2}k^2 \left(a + \frac{1}{2} \cdot \frac{u^2}{a} - \frac{1}{8} \cdot \frac{u^4}{a^3} + \frac{1}{16} \cdot \frac{u^6}{a^5} + \dots \right) +$$

$$+ \frac{1}{6}k^3(a^2 + u^2) + \dots = u \left(a + k + \frac{1}{2}k^2a + \frac{1}{6}k^3a^2 \right) + u^2 \left(-\frac{1}{2a^3} + \frac{1}{4a}k^2 + \frac{1}{6}k^3 \right) + u^4 \left(\frac{3}{8a^3} - \frac{1}{16a^3}k^2 \right) + \dots$$
 (2.17)

Оценим значимость показателей полученного ряда. При следующих значениях $d = 2$ мм, $a = 2$, $u = 1$ и $k = 0,7$ первый показатель ряда

$$u \left(a + k + \frac{1}{2}k^2a + \frac{1}{6}k^3a^2 \right) \approx 3,17.$$

Второй показатель полученного ряда

$$u^2 \left(-\frac{1}{2a^3} + \frac{1}{4a}k^2 + \frac{1}{6}k^3 \right) \approx 0,42$$

на немного меньше чем первый, в связи с этим в

полученном решении подынтегральной функции остановимся на первом показателе ряда.

Отсюда следует, что интеграл I_2 равняется:

$$I_2 = \left(a + k + \frac{1}{2}k^2a + \frac{1}{6}k^3a^2 \right) u \Big|_{-\sqrt{x_u(d-x_u)}}^{\sqrt{x_u(d-x_u)}}. \quad (2.18)$$

После того как подставим имеющиеся пределы интегрирования получим:

$$I_2 = \left(a + k + \frac{1}{2}k^2a + \frac{1}{6}k^3a^2 \right) \left(\sqrt{x_u(d-x_u)} \right) \exp \left[(x_u - x) \right]. \quad (2.19)$$

Представим выражение (2.10) следующим образом:

$$\theta(x, z) = \frac{q_0}{2\pi\lambda} \int_0^{d/2} \left((x_u - x) + k + \frac{1}{2}k^2(x_u - x) + \frac{1}{6}k^3(x_u - x) \right) \cdot 2\sqrt{x_u(d-x_u)} \exp \left[(x_u - x) \right] dx_u \quad (2.20)$$

Так как интеграл не берется в чистовом виде, используем численное решение. Для этого нам необходимо представить выражение (2.20) следующим образом:

$$\theta(x, z) = \frac{q_0}{2\pi\lambda} F(k), \text{ где} \quad (2.21)$$

$$F(k) = \int_0^{d/2} \left((x_u - x) + k + \frac{1}{2}k^2(x_u - x) + \frac{1}{6}k^3(x_u - x) \right) \cdot 2\sqrt{x_u(d-x_u)} \exp \left[(x_u - x) \right] dx_u. \quad (2.22)$$

Для того чтобы решить уравнение (2.22) предположим, что $d = 0 \dots 2,5$ мм; $k = 0 \dots 4$. Используем MathCad для того чтобы получить значение функции $F(k)$ в виде семейства кривых. При значении $a = 0,5$ матрица $F(k)$ равняется:

$$z = \begin{bmatrix} 0,097 & 0,075 & 0,058 & 0,045 & 0,035 & 0,027 & 0,021 & 0,017 & 0,013 \\ 0,371 & 0,287 & 0,222 & 0,171 & 0,133 & 0,102 & 0,079 & 0,061 & 0,047 \\ 0,785 & 0,603 & 0,463 & 0,355 & 0,273 & 0,209 & 0,161 & 0,124 & 0,095 \\ 1,301 & 0,99 & 0,754 & 0,574 & 0,438 & 0,334 & 0,255 & 0,194 & 0,148 \\ 1,887 & 1,423 & 1,074 & 0,812 & 0,614 & 0,465 & 0,353 & 0,268 & 0,203 \\ 2,522 & 1,884 & 1,411 & 1,059 & 0,796 & 0,599 & 0,452 & 0,341 & 0,258 \\ 3,19 & 2,363 & 1,756 & 1,308 & 0,978 & 0,732 & 0,549 & 0,413 & 0,311 \\ 3,883 & 2,853 & 2,105 & 1,559 & 1,159 & 0,864 & 0,646 & 0,484 & 0,364 \\ 4,593 & 3,348 & 2,454 & 1,808 & 1,338 & 0,994 & 0,741 & 0,554 & 0,416 \\ 5,317 & 3,847 & 2,803 & 2,056 & 1,516 & 1,123 & 0,835 & 0,623 & 0,467 \\ 6,05 & 4,347 & 3,152 & 2,302 & 1,692 & 1,25 & 0,928 & 0,691 & 0,517 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Представим на рисунке 2.3 график функции $F(k)$ со следующими значениями: $a = 0,5$, $d = 1$ и $k=0\dots4$

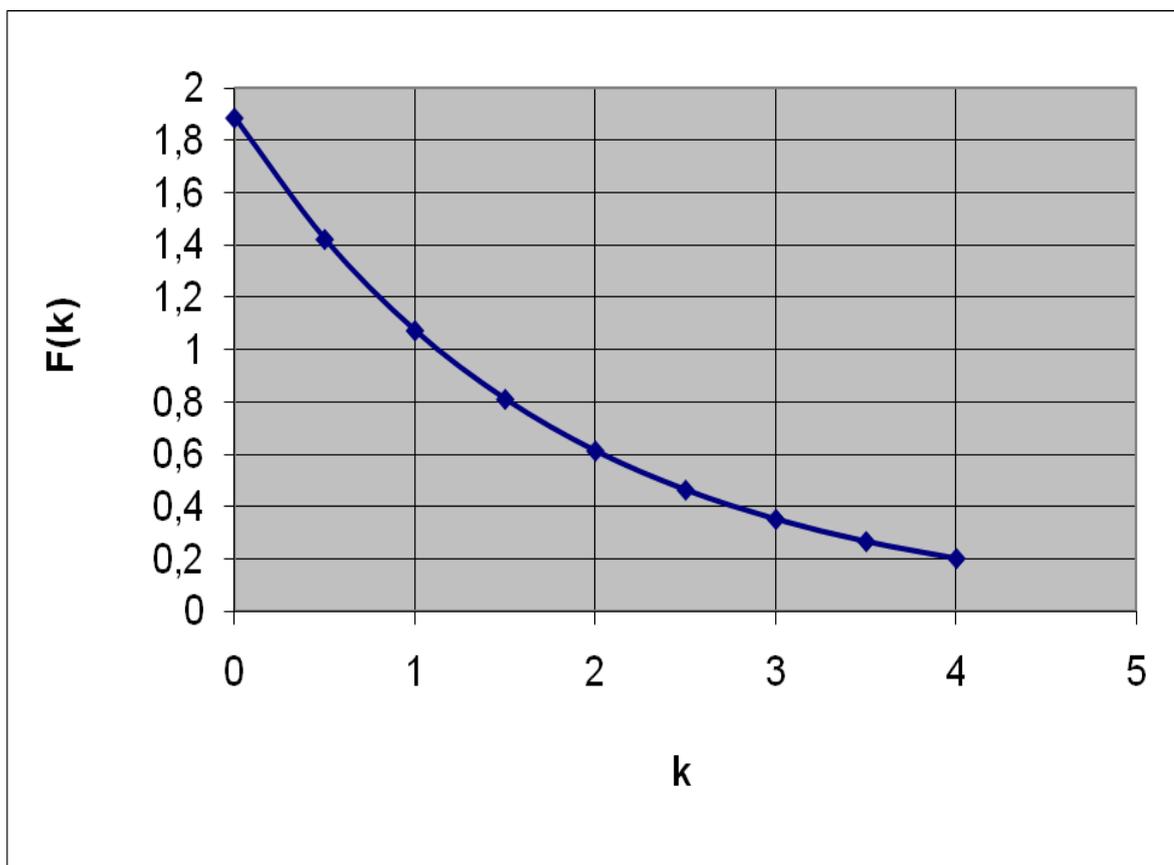


Рисунок 2.3 – График функции $F(k)$ при значениях $d=1$, $k=0\dots4$ и $a=0,5$.

График функции $F(k)$ при значениях $d = 1,5$, $k = 0\dots4$ и $a = 0,5$ рассмотрен на рисунке 2.4

На рисунке 2.6 представим графическое изображение решения исходного уравнения в рассматриваемых диапазонах $d=0\dots2,5$, $k=0\dots4$, $a=0,5$. Данное графическое изображение показано в виде семейства кривых.

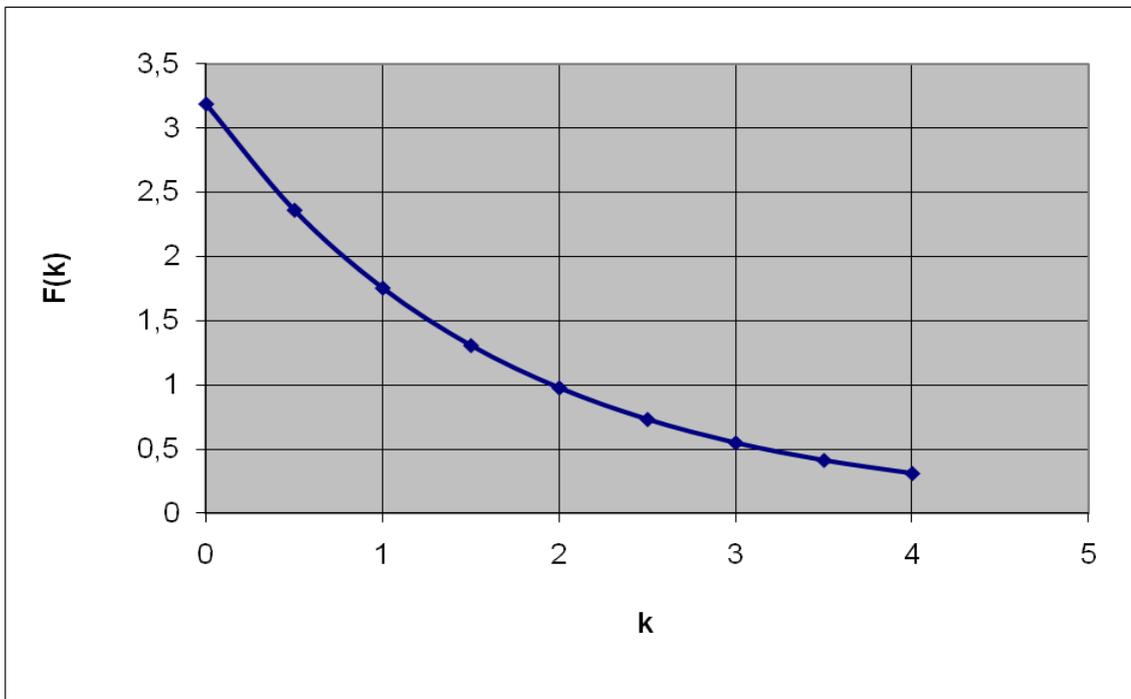


Рисунок 2.4 – График функции $F(k)$ при $d=1,5$, $k=0\dots4$ и $a=0,5$.

Представим график функции $F(k)$ на рисунке 2.5 со значениями: $d = 2$, $k = 0\dots4$ и $a = 0,5$.

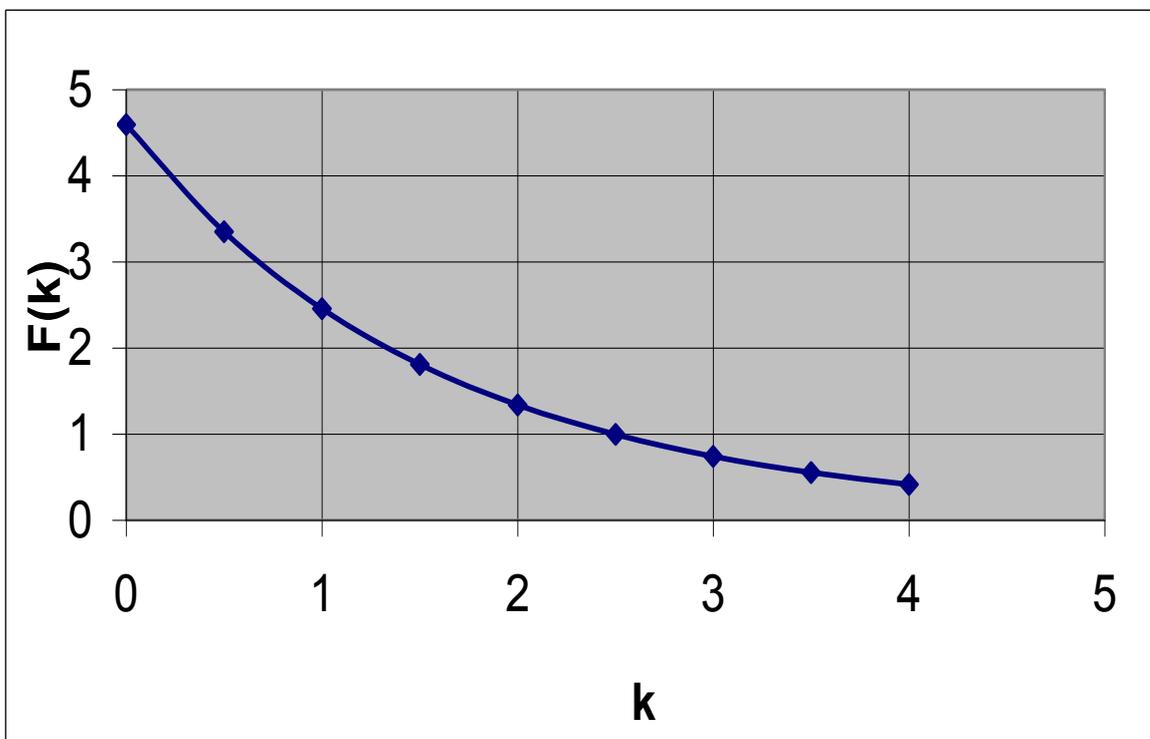


Рисунок 2.5 – График функции $F(k)$ при $d=2$, $k=0\dots4$ и $a = 0,5$.

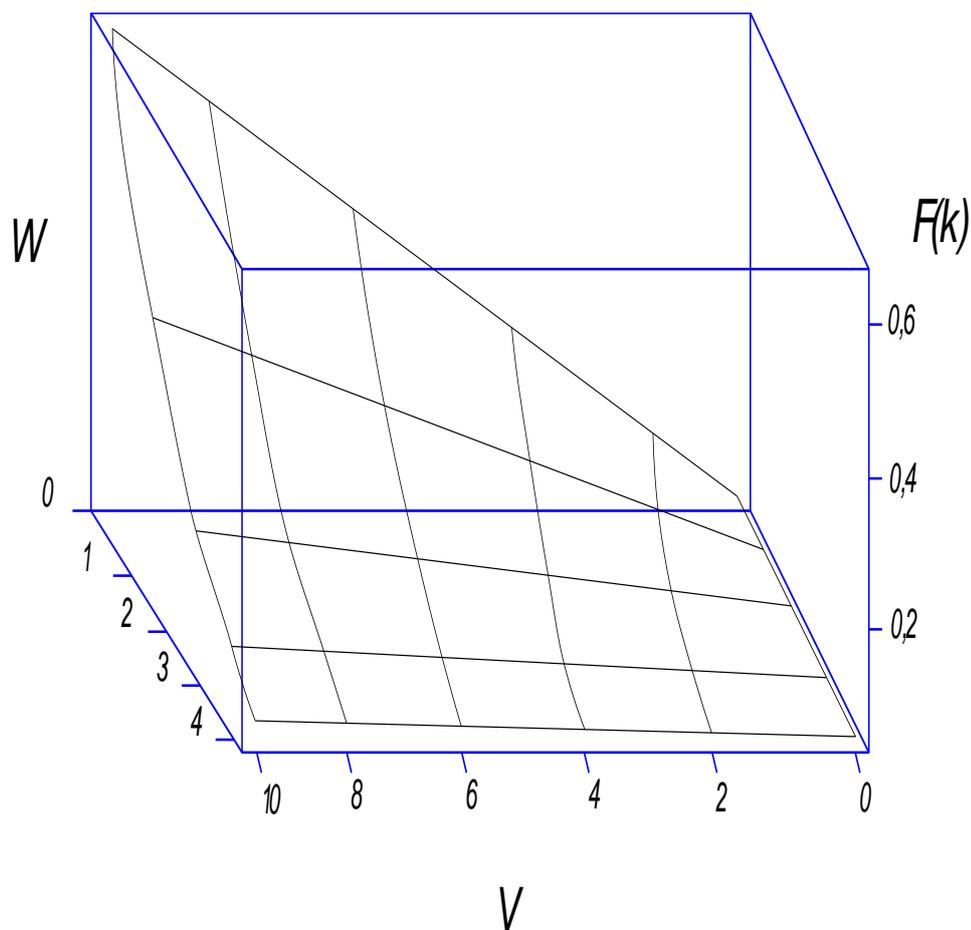


Рисунок 2.6 – График функции $F(k)$ при $a = 0,5$.

Относительные величины были отложены по оси абсцисс $d_i = \frac{i+1}{4}$, а по оси ординат - $k_j = \frac{j}{2}$, $i \in (0,10)$, $j \in (0,10)$.

При $a = 1$ значение матрицы $F(k)$ равняется:

$$z = \begin{bmatrix} 0,024 & 0,015 & 8,971 \cdot 10^{-3} & 5,436 \cdot 10^{-3} & 3,294 \cdot 10^{-3} & 1,996 \cdot 10^{-3} \\ 0,097 & 0,058 & 0,035 & 0,021 & 0,013 & 7,782 \cdot 10^{-3} \\ 0,213 & 0,128 & 0,077 & 0,046 & 0,028 & 0,017 \\ 0,371 & 0,222 & 0,133 & 0,079 & 0,047 & 0,028 \\ 0,563 & 0,334 & 0,198 & 0,118 & 0,07 & 0,042 \\ 0,785 & 0,463 & 0,273 & 0,161 & 0,095 & 0,056 \\ 1,033 & 0,603 & 0,353 & 0,207 & 0,121 & 0,071 \\ 1,301 & 0,754 & 0,438 & 0,255 & 0,148 & 0,087 \\ 1,587 & 0,911 & 0,525 & 0,303 & 0,176 & 0,102 \\ 1,887 & 1,074 & 0,614 & 0,353 & 0,203 & 0,117 \\ 2,199 & 1,241 & 0,705 & 0,402 & 0,231 & 0,133 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Представим график функции $F(k)$ на рисунке 2.7 при показателях $d = 1$, $k = 0 \dots 2,5$ и $a = 1$.

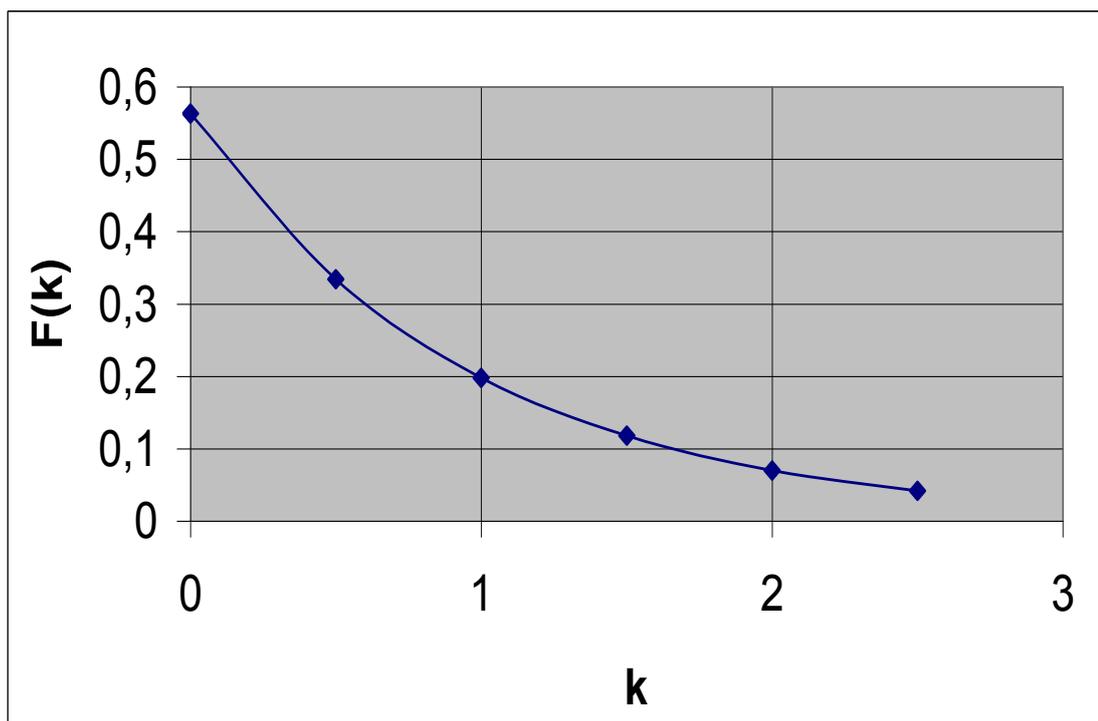


Рисунок 2.7 – График функции $F(k)$ при $d=1$, $k=0 \dots 2,5$ и $a = 1$.

Представим график функции $F(k)$ на рисунке 2.8 при значениях $d = 1,5$, $k = 0 \dots 2,5$, $a = 1$.

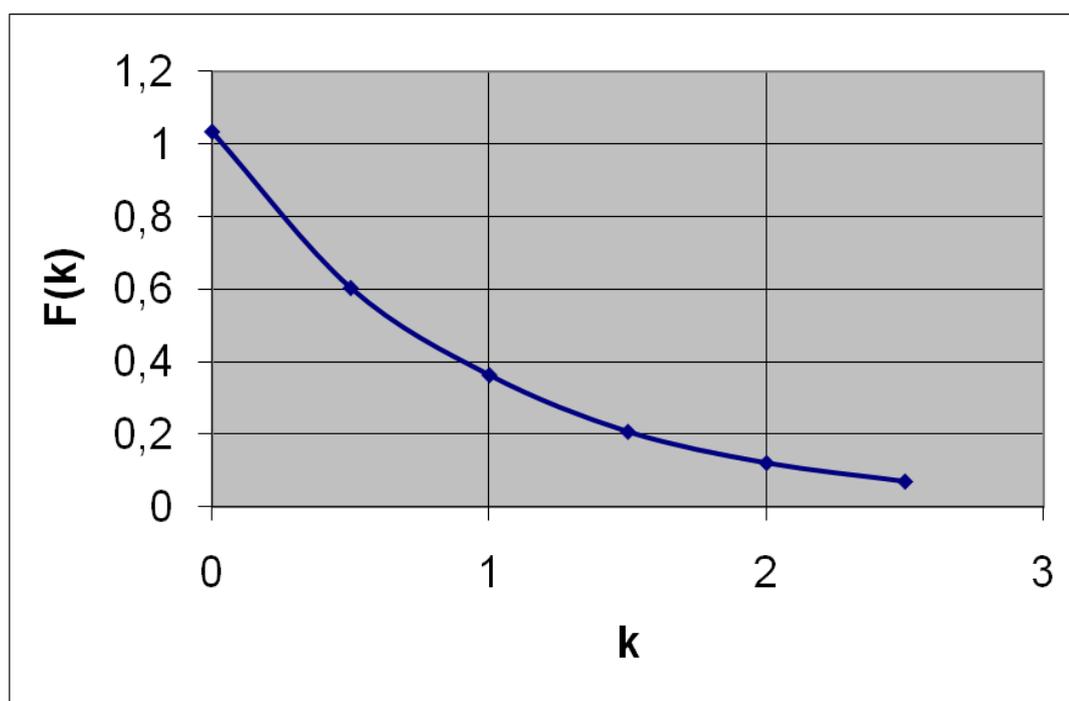


Рисунок 2.8 – График функции $F(k)$ при $d=1,5$, $k=0 \dots 2,5$ и $a = 1$.

Представим график функции $F(k)$ на рисунке 2.9 при значениях $d = 2$, $k = 0 \dots 2,5$, $a = 1$.

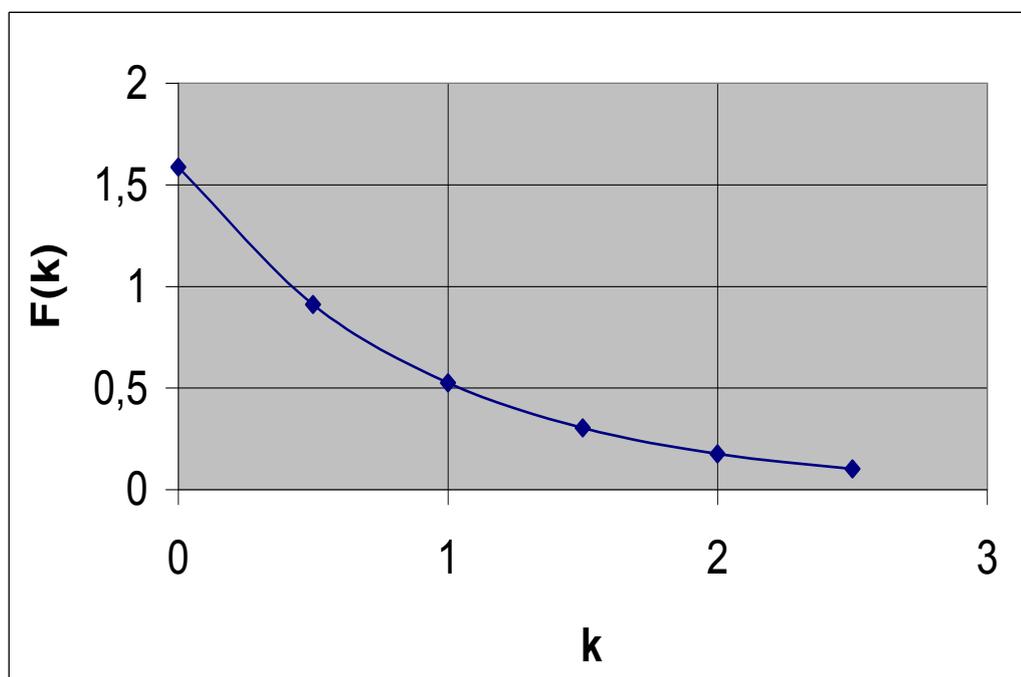


Рисунок 2.9 – График функции $F(k)$ при $d=2$, $k=0 \dots 2,5$ и $a = 1$.

На рисунке 2.10 представили поверхность состоящую из кривых, которая изображает графическое решение исследуемого уравнения в рассматриваемых диапазонах: $d = 0 \dots 2,5$, $k = 0 \dots 4$, $a = 1$.

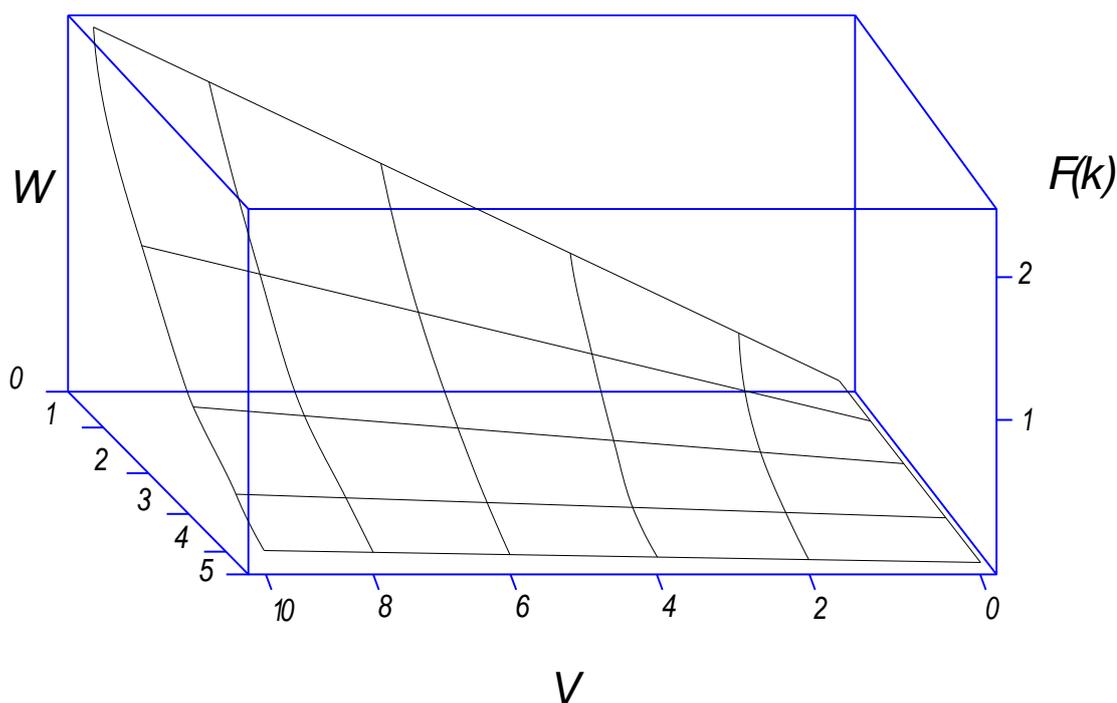


Рисунок 2.10 – График функции $F(k)$ при $a = 1$.

При $a = 2$ значение матрицы $F(k)$ равняется:

$$z = \begin{bmatrix} 6,126 \cdot 10^{-3} & 2,252 \cdot 10^{-3} & 8,282 \cdot 10^{-4} & 3,045 \cdot 10^{-4} & 1,12 \cdot 10^{-4} \\ 0,024 & 8,971 \cdot 10^{-3} & 3,294 \cdot 10^{-3} & 1,209 \cdot 10^{-3} & 4,44 \cdot 10^{-4} \\ 0,055 & 0,02 & 7,34 \cdot 10^{-3} & 2,689 \cdot 10^{-3} & 9,849 \cdot 10^{-4} \\ 0,097 & 0,035 & 0,013 & 4,703 \cdot 10^{-3} & 1,717 \cdot 10^{-3} \\ 0,15 & 0,054 & 0,02 & 7,2 \cdot 10^{-3} & 2,619 \cdot 10^{-3} \\ 0,213 & 0,077 & 0,028 & 0,01 & 3,665 \cdot 10^{-3} \\ 0,287 & 0,103 & 0,037 & 0,013 & 4,83 \cdot 10^{-3} \\ 0,371 & 0,133 & 0,047 & 0,017 & 6,09 \cdot 10^{-3} \\ 0,463 & 0,164 & 0,058 & 0,021 & 7,422 \cdot 10^{-3} \\ 0,563 & 0,198 & 0,07 & 0,025 & 8,805 \cdot 10^{-3} \\ 0,671 & 0,235 & 0,082 & 0,029 & 0,01 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Представим график функции $F(k)$ на рисунке 2.11 при значении: $d = 1$, $k = 0 \dots 2$, $a = 2$

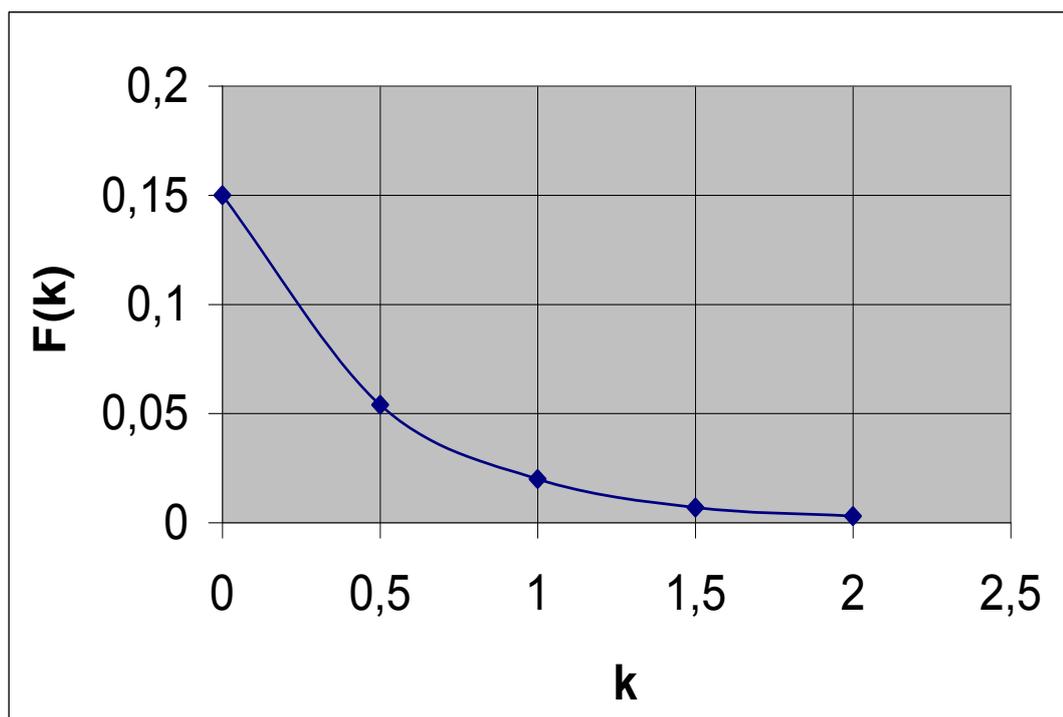


Рисунок 2.11 – График функции $F(k)$ при $d=1$, $k=0 \dots 2$ и $a = 2$.

Представим график функции $F(k)$ на рисунке 2.12 при значении $d = 1,5$, $k = 0 \dots 2$, $a = 2$

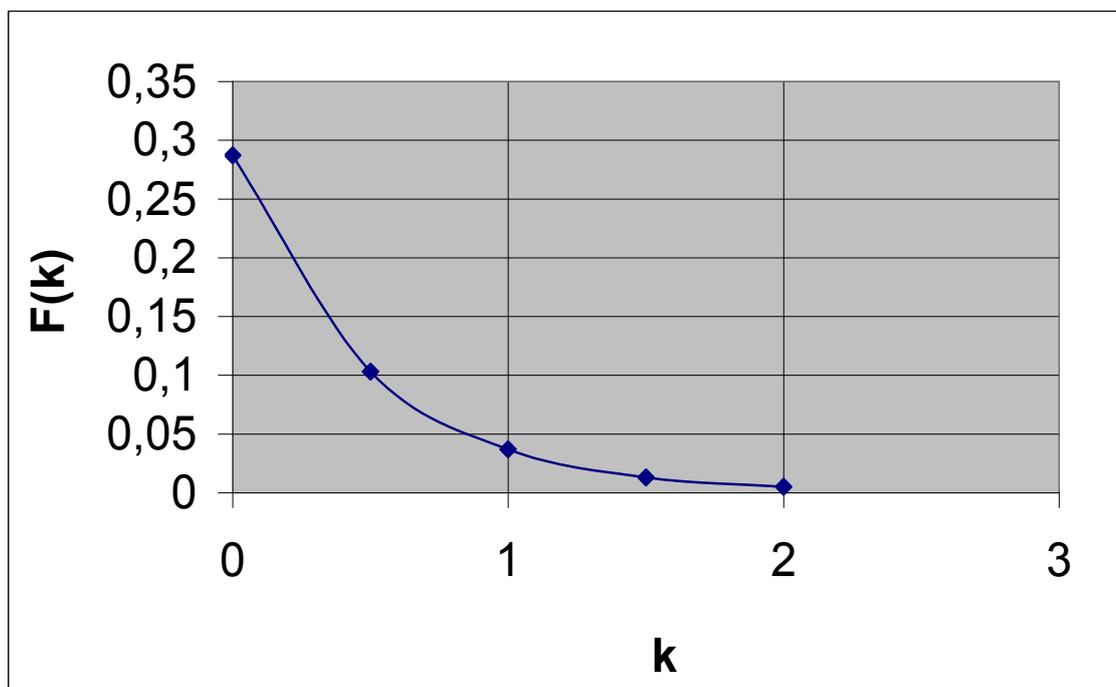


Рисунок 2.12 – График функции $F(k)$ при $d=1,5$, $k=0...2$ и $a = 2$.

Представим график функции $F(k)$ на рисунке 2.13 при значении $d = 2$, $k = 0...2$, $a = 2$

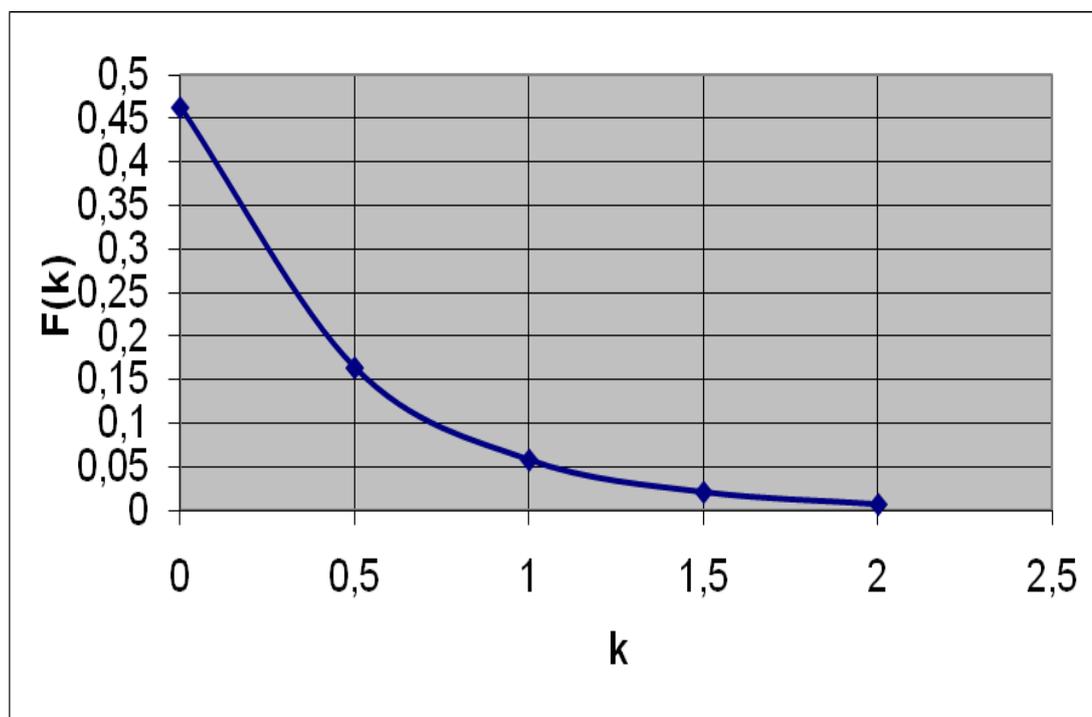


Рисунок 2.13 – График функции $F(k)$ при $d=2$, $k=0...2$ и $a = 2$.

На рисунке 2.14 графически изображено решение уравнения в исследуемом диапазоне: $d = 0 \dots 2$, $k = 0 \dots 4$, $a = 2$. Графическое изображение представлено в виде семейства кривых

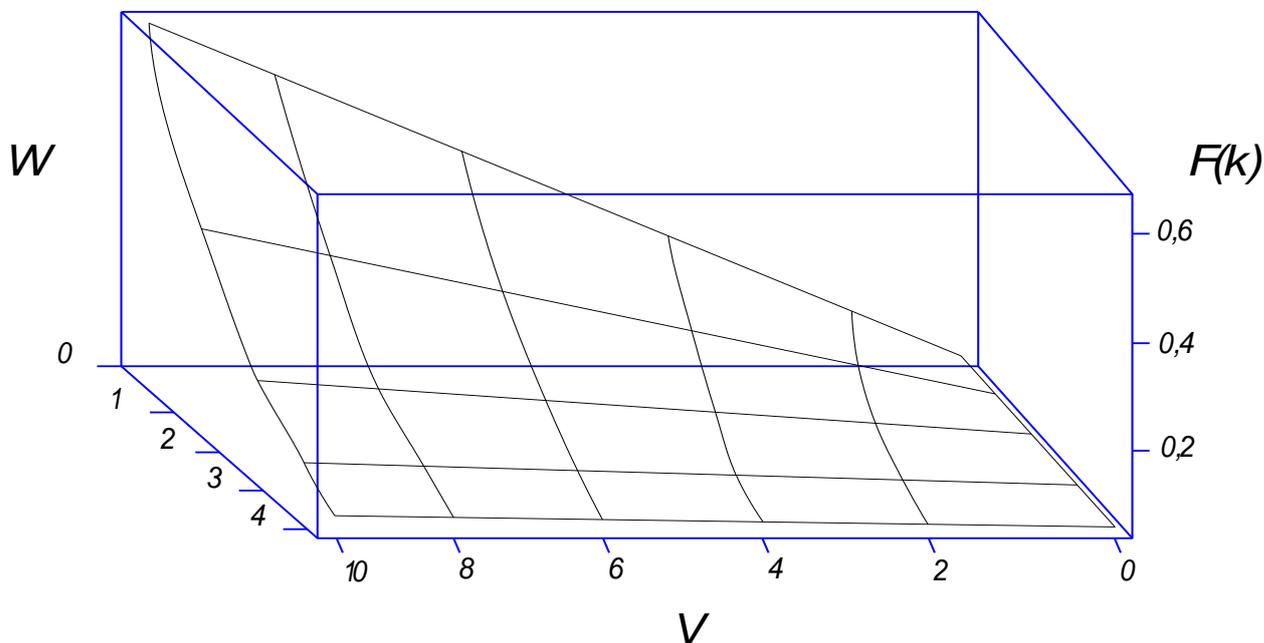


Рисунок 2.14 – График функции $F(k)$ при $a = 2$.

2.3 Оптимизация процесса нанесения покрытий методом электроискрового легирования.

Для нанесения покрытия при помощи метода электроискровой обработки используем следующие параметры:

- 1) мощность генератора импульсов, W ;
- 2) скорость перемещения электрода, v ;
- 3) толщина наносимого покрытия, h .

Чтобы получить покрытие с упрочненным соединением материала катода с анодом (изделием) необходимо чтобы температура поверхности катода и температура плавления $\theta = T_{пл}$ были равными. Следовательно, формула (2.21) будет изменена следующим образом:

$$T_{пл} = \frac{q_0}{2\pi\lambda} \cdot F(k) \quad (2.26)$$

В данной формуле неизвестными величинами будут являться интенсивность источника q_0 , и скорость движения источника, которая является аргументом функции $F(k)$.

Увеличение температуры катода, по формуле (2.21) происходит от двух источников, общая мощность этих источников равна мощности генератора импульсов.

$$q_2 + q_3 = q_0 = \eta \cdot \frac{W}{S_{\text{Э}}}, \quad (2.27)$$

где η – коэффициент полезного действия генератора импульсов, $\eta \approx 0,8$,

W – мощность разряда, зависит от того какой генератор применяют в данный момент.

Выражение (2.26) является техническим ограничением «снизу», данная функция имеет одинаковую температуру, при которой обеспечивается совокупная величина следующих параметров: скорость движения источника v (на данный момент она учитывается функцией $f(k)$) и мощность генератора W .

При расчете наилучшего режима процесса нанесения покрытий необходимо выбрать наибольшую скорость движения источника. Для системы оптимизации оптимальным критерием является выражение ($v \rightarrow \max$).

С учетом выражения 2.27 выражение (2.26) представляется таким образом:

$$W = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot S_{\text{Э}} \cdot T_{\text{пл}}}{\eta \cdot F(k)}. \quad (2.28)$$

Для того, что бы определить толщину наносимого покрытия необходимо предположить, что вся энергия, которая поступает в анод (электрод), во время установившегося процесса электроискрового легирования, тратится на его частичное расплавление и переносится на

катод. Данное предположение возможно, так как установившийся процесс электрода (анода) отдает тепло катоду через перемещаемый материал и в окружающую среду. Теплообмен с окружающей средой происходит при помощи воздуха. Воздух будет плохим проводником тепла. Многие авторы считают, что [39, 85] при использовании некоторых материалов возможно появление ограничения толщины формируемого покрытия на катоде, даже при использовании наиболее комфортных режимах с позиции качественных показателей и производительности процесса. Данное ограничение толщины происходит из-за недостаточной осведомленности в практическом использовании ЭИЛ. Поэтому проблема совершенствования метода ЭИЛ и поиск возможностей целенаправленного управления им является достаточно актуальной.

Путем многочисленных экспериментальных исследований было выявлено что, с течением времени в процессе ЭИЛ замедляется оседание анода на катод, это происходит из-за того что совершается процесс испарения в окружающую среду. Если использовать совокупность всех механических и физико-химических воздействий на поверхность рабочих электродов, то можно объяснить, почему толщина слоя анода может иметь определенные ограничения. Также имеются предположения, что для определения характера роста и ограничения толщины формируемого слоя необходимо использовать фазовые и структурные превращения под воздействием процессов многократного импульсного теплового и механического воздействия на материал. Это приведет к возникновению в слоях материала остаточных напряжений I и II рода [30, 67, 72, 101, 122], что будет характеризовать их конечное необратимое напряженное состояние.

В заключение вышесказанного можно сделать вывод, закон сохранения энергии определяет условия комплекса процессов нанесения износостойких покрытий, которые протекают между анодом и катодом.

Составим формулу интенсивности теплового потока перенесенной энергии, но с некоторыми изменениями, которые связаны с процессом

испарения материалов в окружающую среду (некоторые авторы считают, что испарения составляют 3-5%):

$$q_3 = \eta \cdot p \cdot \frac{W}{S_{\text{э}}} = m_{\text{э}} \cdot L_{f\text{э}}. \quad (2.29)$$

Выражение (2.29) описывает скорость расплавления (нанесения) материала легирующего электрода.

$m_{\text{э}}$ - масса переносимого в единицу времени электрода, ее можно найти путем произведения плотности и объема:

$$m_{\text{э}} = \rho_{\text{э}} \cdot d \cdot h \cdot v. \quad (2.30)$$

Следовательно, выражение (2.29) представим следующим образом:

$$\eta \cdot p \cdot \frac{4W}{\pi \cdot d^2} = \rho \cdot h \cdot d \cdot v \cdot L_{f\text{э}}, \quad (2.31)$$

откуда

$$W = \frac{\pi \cdot \rho \cdot L_{f\text{э}} \cdot d^3}{4 \cdot \eta \cdot p} \cdot h \cdot v. \quad (2.32)$$

Данное выражение объединяет показатели толщины покрытия и скорости движения анода с мощностью генератора импульсов в определенных условиях. Необходимо учесть, что для различных материалов и условий эксплуатации толщина покрытия может быть разной при увеличении толщины покрытия материал становится более хрупким. Поэтому толщину покрытия режущего инструмента чаще всего выбирают в пределах 8...12 мкм. При применении в производственных условиях покрытия режущего инструмента толщиной 20 мкм и более быстро изнашивались путем скалывания.

Из вышесказанного можно составить систему уравнений процесса ЭИЛ:

$$W = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot S_{\text{э}} \cdot T_{\text{ПЛ}}}{\eta \cdot F(k)}. \quad (2.33)$$

$$W = \frac{\pi \cdot \rho \cdot L_{f\exists} \cdot d^3}{4 \cdot \eta \cdot p} \cdot h \cdot v \quad (2.34)$$

$$W \leq W_{\max} \quad (2.35)$$

$$W \geq W_{\min} \quad (2.36)$$

Для примера нанесем безвольфрамовое покрытие СТИМ-3 ($\rho = 5,37$ г/см³, $\lambda = 0,21$ Вт/(см⁰С), $L_{f\exists} = 1,45 \cdot 10^7$ Вт/(г⁰с)) на инструмент из быстрорежущей стали ($T_{пл} = 1550$ °С) применяя следующие условия: $a = 1$, $d = 2$ мм. Для этих условий $F(k)$ удовлетворительно аппроксимизация экспоненциальной функцией:

$$F(k) = \exp\left[-0,82 \frac{v}{2\omega}\right] \quad (2.37)$$

Допустим мощность установки равна $W = 200 \dots 400$ Вт.

Полученные решения отобразим в таблице 2.1. Результаты также представим графиками функций на рисунке 2.15.

Таблица 2.1 – Результаты решений

Скорость v , см/с	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Мощность по уравнению (2.30)	121	182	275	413	622	944
Мощность по уравнению (2.31)	122	249	367	489	612	734
Минимальная мощность генератора	150	150	150	150	150	150
Максимальная мощность генератора	400	400	400	400	400	400

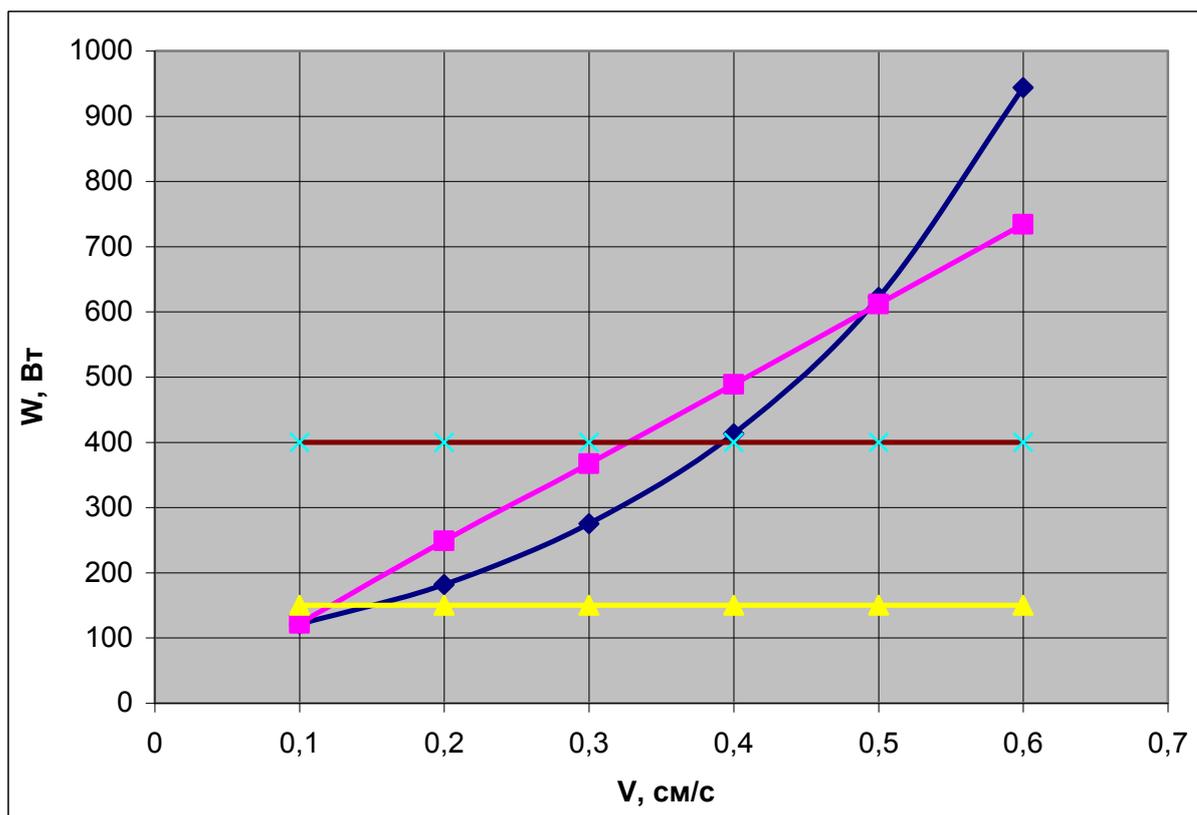


Рисунок 2.15 – Оптимизация процесса ЭИЛ быстрорежущей стали электродом из СТИМ-3.

На рисунке 2.15 мы отобразили график функции по уравнению 2.30,. На графике можно увидеть значение мощности генератора $W=F(v)$. Данное значение указывает, что температура поверхности упрочняемого изделия равна температуре плавления. Описанная функция представляет собой ограничение снизу в системе оптимизации.

Построенный по уравнению 2.34, в системе оптимизации, график функции показывает ограничение сверху. Функция отражает максимальное значение мощности $W = F(v)$, которая помогает обеспечивать принятую толщину покрытия.

Аналогичными являются и функции уравнений (2.35) и (2.36), они так же представляют собой ограничениями сверху и снизу.

Подведем итог. На рисунке 2.15 мы отобразили графики функций (2.30-2.33) и выявили оптимальное решение для точки v_{max} . Которая лежит на кривой равных температур с значением $v \approx 0,39$ см/с.

Из вышесказанного сделаем вывод, что бы соблюсти все условия нанесения износостойких покрытий мы должны соблюсти оптимальные режимы во время проведения технологического процесса: $v \approx 0,39$ см/с; $W = 400$ Вт и $h = 12$ мкм.

Выводы из аналитических исследований:

1. Для того чтобы исключить процесс отслаивания во время технологии нанесения покрытия методом электроискрового легирования необходимо определить количество тепловых процессов на поверхности изделия.

2. Температура поверхности упрочняемой детали прямо пропорциональна мощности генератора. Она зависит от нескольких факторов: теплофизические характеристика анода и катода, диаметр электрода, а также она связана со скоростью перемещения легирующего электрода зависимостью близкой к отрицательной экспоненциальной.

3. Также возможно провести оптимизацию процесса нанесения износостойкого покрытия. В данном процессе ограничением «снизу» будет являться линия равных температур ($\theta(x, y, z) = T_{пл}$), а ограничением «сверху» будет являться требуемая толщина покрытия.

Глава 3 Проведение производственных испытаний и исследование образцов с износостойким покрытием

3.1 Проблема износа инструмента в производственных условиях

В условиях сильной загруженности предприятий происходит быстрое старение различной техники, оборудования и запасных частей. Это приводит к возникновению потребности в частой замене изношенных деталей, что является достаточно затратным. В связи с этим огромная часть техники попадает в ремонт не из-за поломок, а из-за износа рабочих поверхностей. Поэтому повышение износостойкости и долговечности деталей, является важной и актуальной задачей современности.

Для устранения либо минимизации количества таких задач различные научные деятели рассматривают множество методов по увеличению износостойкости деталей, а так же по уменьшению себестоимости восстановительных работ, которые могут достигать до полутора раз экономии денежных средств в отличие от покупки совершенно новых деталей.

В машиностроении зачастую из-за высоких технологических и потребительских свойств большое применение имеют детали из сплавов алюминия. Такие детали отличаются высокими конструкционными свойствами, их применяют во многих отраслях машиностроения, судостроения, автомобилестроения. Главной особенностью и преимуществом таких сплавов является высокое значение прочности, коррозионная стойкость, хорошая тепло- и электропроводность. Такие сплавы могут уступать сплавам на основе железа по величине модуля упругости почти в 3 раза, но их твердость и износостойкость оказывается ниже, чем у стали. Это и является их минусом.

При выборе технологического способа восстановления деталей из алюминиевого сплава необходимо уделить внимание величине максимального износа, при которой деталь становится непригодной к дальнейшей эксплуатации. На практике примерно 85% деталей при износе не

более 0,2÷0,3 мм становятся непригодными к эксплуатации, хотя большинство деталей после восстановления (около 80%) имеют максимальный износ до 0,2 мм.

Существует много методов повышения стойкости режущего инструмента. Одним из таковых является электроискровое легирование (ЭИЛ). Такой способ, в отличие от остальных, имеет ряд преимуществ, а именно локальность нанесения покрытий, возможность обработки на воздухе, простота оборудования [1-3]. После нанесения покрытий у деталей существенно повышаются эксплуатационные свойства рабочей поверхности. Этот метод позволяет наносить исключительно токопроводящие покрытия. Наряду с преимуществами этот метод характерен и следующими недостатками: высокая шероховатость поверхности детали после ЭИЛ, малая автоматизация процесса [2].

Метод ЭИЛ нашел применение для увеличения ресурса различного рода инструментов и процессов [4-6].

Больше всего износу подвергаются сверла с большим диаметром. В зависимости от различных факторов повреждению подвергаются разные участки сверла. Самая распространенная часть сверла, которая подвергается изнашиванию, является задняя поверхность сверла у периферийной части режущей кромки. Повреждение этой части возникает из-за увеличения температуры во время резанья, чем выше скорость резанья, тем быстрее изнашивается эта часть. Также возможен износ перемычки сверла, он возникает во время обработки твердых материалов на высокой скорости резанья. Если проводить процесс глубокого сверления, то повреждению подвергается сверло по передней поверхности. Еще изнашиванию подвергаются участки ленточек, которые примыкают к режущей части сверла. Износ данного участка зависит от величины деформирования, увода сверла и от многих других факторов. Для того чтобы выяснить насколько изнашивался инструмент необходимо рассмотреть технологические критерии износа сверла. Существуют показатели допустимого износа, превышение

которых приведет к несоответствию деталей техническим требованиям. Данный критерий включает в себя показатели шероховатости обработанной поверхности, а также полученные размеры. Он измеряется во время чистовой обработки детали. К примеру: технологическим критерием износа мерного инструмента для чистовой обработки отверстия (например, разверток) будет являться износ по задней поверхности. Несоответствие техническим требованиям будет считаться, если обрабатываемое отверстие не будет укладываться в допустимые размеры или в допустимые показатели качества поверхности.

Рассмотрим рисунок 3.1а и 3.1б. На рисунке 3.1а наглядно показан характер износа быстрорежущего сверла по задней поверхности (1), ленточкам (2), уголкам (3) а также по передней поверхности (4). На рисунке 3.1б показан характер износа сверла с пластинами из твердого сплава по уголкам (5) и ленточке (6). Износ задней поверхности сверла происходит из-за трения от образующуюся стружку.

Можно считать, что инструмент является износостойким, если он способен длительное время обрабатывать различные заготовки в соответствии с техническими требованиями без частой переточки. Период стойкости инструмента – это величина стойкости, которая определяется временем работы инструмента, за исключением времени перерывов, от переточки до переточки. Темп резания существенно влияет на стойкость инструмента. Если повысить скорость резания на 50%, то стойкость инструмента снизится примерно на 75%, хотя такое же увеличение подачи снижает стойкость на 60%.

$$\begin{cases} I\ddot{\phi}(t) + \eta\dot{\phi}(t) + j\phi(t) - j_{x\phi}x(t) = M_{KР}(n, S, d) + K_{\phi}(x(t - \tau) + x(t - \frac{T}{2} - \tau)) \\ m\ddot{x}(t) + h\dot{x}(t) + cx(t) - c_{\phi x}\dot{\phi}(t) = P_0(n, S, d) + K_x(x(t - \tau) + x(t - \frac{T}{2} - \tau)) \end{cases} \quad (3.1)$$

где m , I – приведенная масса в кг и приведенный момент инерции колебательной системы в кг·м²;

h , η – обобщенные коэффициенты демпфирования в продольном (Н·с/м) и скручивающим направлениях (Н·м·с/рад);

c , j – коэффициенты суммарной жесткости в продольном (Н/м) и скручивающим направлениях (Н·м/рад) [13];

$c_{\phi x}$, $j_{x\phi}$ – коэффициенты координатной связи в продольном (Н/рад) и скручивающим направлениях (Н·м/м), которые учитывают взаимное влияние осевой силы и крутящего момента;

x , ϕ – осевое смещение (м), вызванное приложением осевой силы и крутильное смещение (рад), созданное приложением крутящего момента;

P_0 – осевая сила (Н);

$M_{KР}$ – крутящий момент (Н·м);

t – время (с);

τ – фазовая характеристика силы резания (с), т. е. отставание изменения силы резания от изменения толщины срезаемого слоя;

T – время одного оборота сверла (с), которая учитывает резание «по следу» второй режущей кромки;

K_x , K_{ϕ} – коэффициенты резания в продольном (Н/м) и скручивающем (Н·м/м) направлении [13].

Для того чтобы определить коэффициент жесткости в продольном и скручивающем направлении, а также определить коэффициенты координатной связи $c_{\phi x}$, $j_{x\phi}$ необходимо произвести компьютерное моделирование спирального сверла геометрической формы и проанализировать трехмерную твердотельную модель, а также при помощи метода конечных элементов. Для определения собственных частот, логарифмических декрементов колебаний, а также приведенные масса и момент инерции необходимо провести эксперименты с использованием

графиков свободных затухающих колебаний инструмента. После автоматического расчета сверл, которые изготовлены по ГОСТ 10902-77 [24] и ГОСТ 10903-77 [25] с такими параметрами, как колебания сверл диаметрами 5...20 мм, и длиной рабочей части $l = 52...140$ мм и проанализировав существующие выражения, которые применяются для того чтобы рассчитать крутящийся момент и осевую силу при сверлении можно сказать, что данные параметры не учитывают влияние скорости резания, а также в них отсутствует необходимая точность. Экспериментальные зависимости точны в узком диапазоне режимов резания. При сверлении чугуна СЧ-20 ГОСТ 1412-85 [26] создали уравнение для того, чтобы рассчитать крутящийся момент и осевую силу при помощи приближения экспериментальных данных на основе метода наименьших квадратов. При этом среднее отклонение составило не более 5%. Уравнение для расчета крутящего момента описано ниже:

$$M_{KP} = a_1 \cdot n \cdot S^{\alpha_1} \cdot \left(e^{-\beta_1 \cdot n} + \frac{e}{0,01 + b_1 \cdot n} \right) \cdot d^{\gamma_1}, H \cdot m \quad (3.2)$$

чтобы рассчитать осевую силу:

$$P_o = a_2 \cdot n^{\alpha_2} \cdot S^{\beta_2} \cdot d^{\gamma_2}, H \quad (3.3)$$

где n – частота вращения, об/мин;

S – подача, мм/об;

d – диаметр сверла, мм;

$a_1, b_1, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1$, – коэффициенты и показатели степени для расчета крутящего момента (таблица 1);

$a_2, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2$, – коэффициенты и показатели степени для расчета осевой силы (таблица 1).

Проанализировав математическую модель системы нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка (1) можно сделать вывод, что спиралевидное сверло может создавать колебания, на всех участках исследуемых режимов резания имея следующие значения:

– подача $S=0,1...0,47$ мм/об,

– скорость резания $V=0,102\dots0,392$ м/с ($n=195\dots750$ об/мин).

Таблица 3.1 Коэффициенты и показатели степени для расчета крутящего момента и осевой силы

Подача, мм/об	Для расчета крутящего момента	Для расчета осевой силы
0,03...0,1	$a_1 = 0,0037; b_1=0,082; \alpha_1=0,65;$ $\beta_1= 0,012; \gamma_1=1,97$	$a_2= 750, \alpha_2= 0,175 \beta_2=0,8$ $\gamma_2=0,9$
0,1...0,21	$a_1 = 0,0038; b_1=0,082; \alpha_1=0,7;$ $\beta_1= 0,0125; \gamma_1=1,99$	$a_2= 758, \alpha_2= 0,173, \beta_2=0,85,$ $\gamma_2=0,91$
0,21...0,36	$a_1 = 0,0039; b_1=0,09; \alpha_1=0,71;$ $\beta_1= 0,012; \gamma_1=2,04$	$a_2= 769, \alpha_2=0,169, \beta_2=0,86,$ $\gamma_2=0,92$
0,36...0,47	$a_1 = 0,0042; b_1=0,095; \alpha_1=0,8;$ $\beta_1= 0,014; \gamma_1=2,1$	$a_2= 774, \alpha_2=0,167, \beta_2=0,87,$ $\gamma_2=0,94$

Создание колебаний во время процесса сверления может зависеть от нескольких критериев. От частоты вращения зависит характеристика крутящего момента, а от величины толщины срезаемого слоя - запаздывание изменения силы резания (рисунок 3.2).

После того как была проанализирована математическая модель можно сделать вывод, что значительное влияние на амплитуду колебаний имеют фазовые характеристики силы резания τ . (рисунок 3.2). Как нам стало известно, что уменьшение показателя τ можно достигнуть при помощи изменения нескольких параметров: при увеличении скорости резания, значения переднего угла инструмента, а также при помощи уменьшения коэффициента усадки стружки. Исследования вибраций при точении и фрезеровании, проведенные И.Г Жарковым, подтверждают данные результаты.

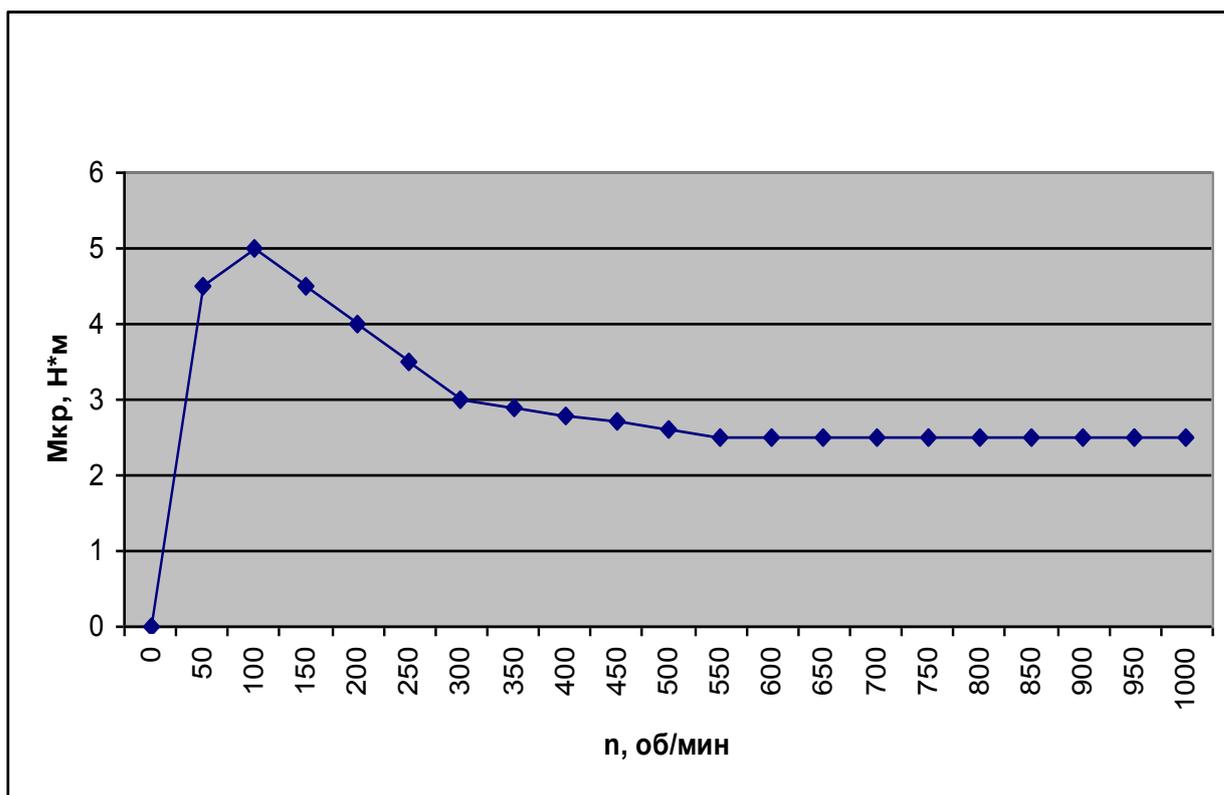


Рисунок 3.2 – Зависимость крутящего момента $M_{кр}$ от частоты вращения n (подача $S=0,1$ мм/об, диаметр сверла $d=10$ мм)

Отсюда следует, что разработанная модель нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка процесса сверления и БД, помогает рассчитать наилучшие параметры колебаний во время процесса сверления для большого диапазона типоразмеров сверл и различных режимов резания.

3.2. Механизм разрушения покрытия в процессе резания

Многие авторы изучали механизм разрушения покрытия во время токарной обработке заготовок из АК12М инструментом из инструментальной быстрорежущей стали 11M5Ф с одноэлементными покрытиями TiN, TiCN и многоэлементными TiZrN, TiZrCN.

АК12М – это алюминиевый литейный сплав на основе системы алюминий-кремний-магний (силумин). Данный сплав применяется для изготовления плотных герметичных отливок сложной формы, такой сплав

отличается высокой герметичностью. Механические свойства данного сплава: предел кратковременной прочности 147-157МПа, относительное удлинение при разрыве около 2-3%. Твердость данного сплава равняется $50 \cdot 10^{-1}$ МПа. Физические свойства материала при температуре 100 Град имеют такие значения: коэффициент температурного (линейного) расширения равен 21,1 1\Град, теплоемкость материала равняется 168 Вт/(м*град), а удельная теплоемкость материала равна 838 Дж/(кг*град).

В таблице 3.2 описаны механические и структурные свойства покрытий.. Для обработки заготовки авторы использовали следующие режимы резания: скорость резания V равняется 160-210 м/мин, подача $S=0.1-0.3$ мм/об, глубина резания $t=1$ мм.

Таблица 3.2. Структурные параметры и механические свойства однослойных покрытий

Покрытие	TiN	TiCN	TiZrN		TiZrCN	
	Ti	Ti	Ti	Zr	Ti	Zr
Период кристаллической решетки a, нм	0,4243	0,4292	0,4291	0,4570	0,4291	0,4587
Текстура J111/J200	50	44	67	101	118	186
Полуширина рентгеновской линии β_{111} , град	0,55	0,78	1,20	1,25	1,20	1,30
Остаточные напряжения σ_0 , МПа	-720	-2890	-2660		-3250	
Коэффициент отслоения K_0	0,8	1,5	1,2		1,7	
Микротвердость H_c , ГПа	21.1	29,4	33,2		37,6	

Проанализировав исследования многих авторов, мы установили, что из-за образования трещин на режущих кромках инструмента происходит разрушение покрытия. Также образуется фаска износа на задней поверхности инструмента. Чем дольше работает инструмент, тем больше на нем образуется трещин. Их распространение происходит как в сторону режущей кромки инструмента, так и от нее. В связи с этим образуется сетка трещин. Если продолжить использовать инструмент, это может привести к образованию поперечных трещин, которые будут располагаться на участке пластического контакта параллельно режущей кромке и иметь существенные размеры. Увеличение количества поперечных трещин вдоль режущей кромки приводит к сколу по краям трещин, а в дальнейшем к смягчению отдельных участков покрытия. Также происходит удаление сходящей стружки с обнажением инструментальной основы. Далее возникают лунки износа по передней поверхности. Если скорость резания равняется 210 м/мин, а подача $S = 0,1$ мм/об, то трещины на участке упругого контакта инструмента с покрытием TiN образуются через 5,1 мин. Время образование трещин увеличивается в 1,5, 1,9 и 2 раза, если использовать покрытие TiCN, TiZrN и TiZrCN. Во время снижения скорости резания и подачи увеличивается время до начала образования трещин и уменьшается разница данных показателей для инструментов с различными покрытиями.

Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что процесс разрушения покрытия происходит из-за того что на инструменте образуются трещины. Причиной появления трещин является адгезионно-усталостные процессы, которые протекают на передней поверхности инструмента и упругопластическая деформация режущего клина. Процесс образования трещин также зависит от состава покрытий и режимов резания. Нанесение различных износостойких покрытий помогает снизить упругопластическую деформацию режущего клина, а также обеспечить инструмент многоэлементными покрытиями. Покрытие подвержено минимальной интенсивности процессов трещинообразования, так как оно обладает

следующими характеристиками: высокие физико-механические свойства, положительный уровень сжимающих остаточных напряжений и микрослоистость.

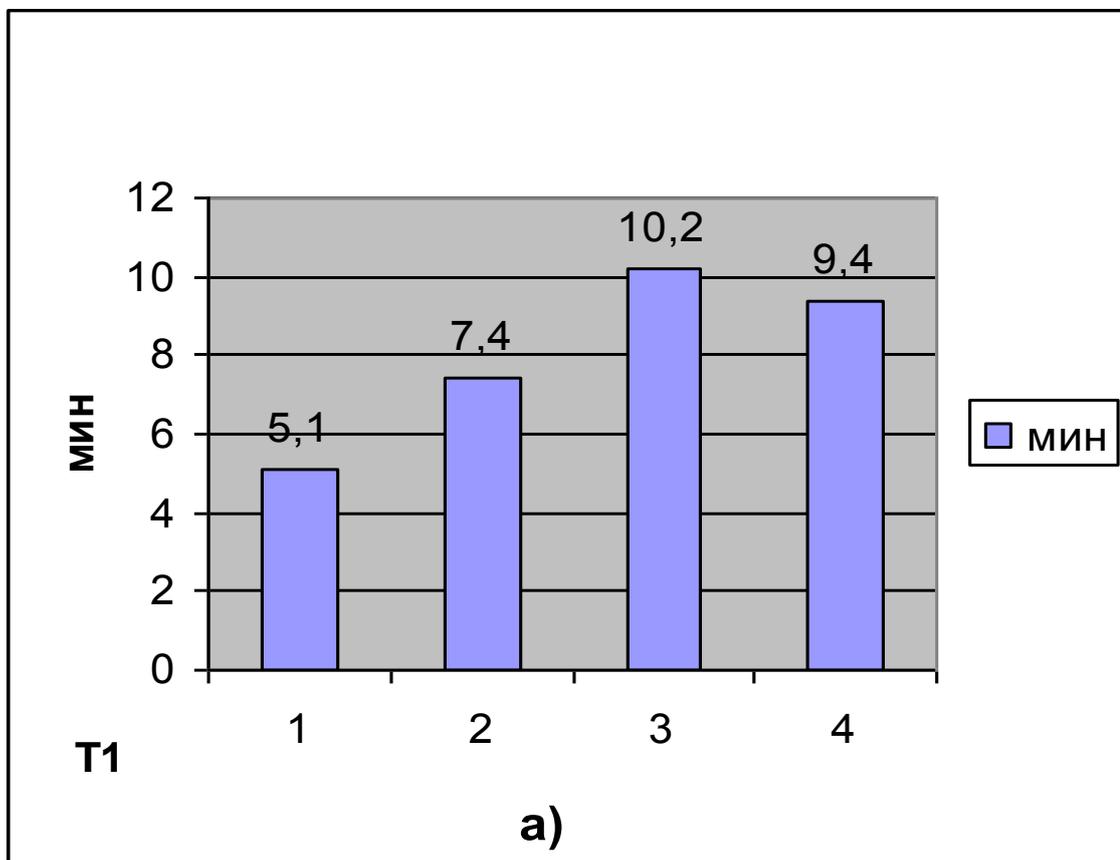


Рисунок 3.2 а – График влияния покрытия из 1 – TiN; 2 – TiCN; 3 – TiZrN; 4 – TiZrCN на время работы инструмента до момента образования трещин на участке упругого T1 контакта стружки при точении заготовок из АК12М: $V = 210$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об.

Обработка отверстий образцов из серого чугуна СЧ-20, которые изготовлены по ГОСТ 1412-85 [26] происходила спиральными сверлами, которые изготовлены из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 10 мм, ГОСТ 10903-77. Параметры данного режима резания варьировались в следующих значениях: скорость резания равнялась от 0,102 до 0,392 м/с, частота вращения варьировалась от 195 до 750 об/мин, подача от 0,1 до 0,47 мм/об.

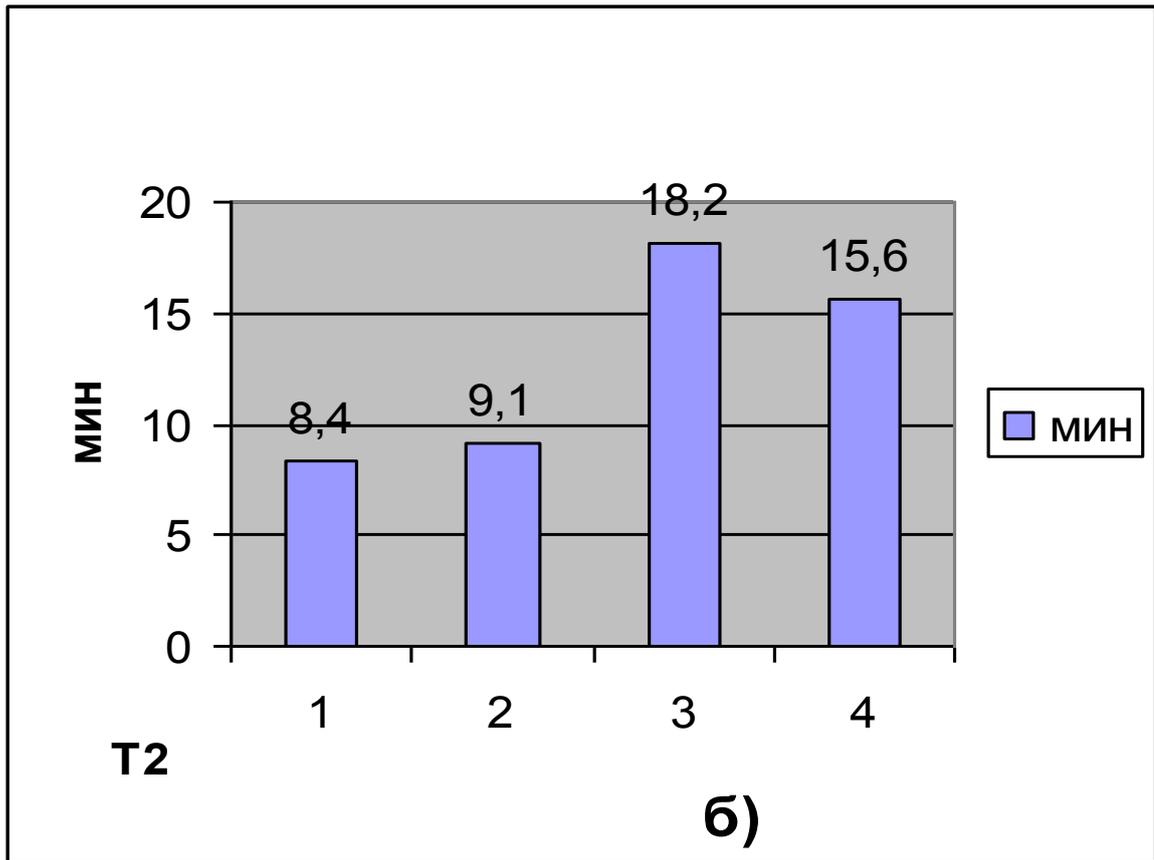


Рисунок 3.2 б – График влияния покрытия из 1 – TiN; 2 – TiCN; 3 – TiZrN; 4 – TiZrCN на время работы инструмента до момента образования трещин на участке пластического T2 контакта стружки при точении заготовок из АК12М: $V = 210$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об.

Для проведения исследования динамики процесса сверления, учеными была разработана экспериментальная установка, которая состоит из вертикально-сверлильного станка 2А135 и устройства для отвода сверла из зоны резания. Исследование проводилось на специальных образцах из серого чугуна для сверления СЧ-20. Данное устройство помогает уводить сверло из зоны резания с той скоростью которая превышает скорость резания и которой достаточно для того чтобы сохранить вибрационные волны на дне образца (рисунок 3.4).

После проведения полного факторного эксперимента научные деятели получили степенную модель которая зависит от амплитуды продольных колебаний $A_{\text{п}}$, от скорости резания V и подачи S :

$$A_{\Pi} = 0,27 \cdot V^{-0,39} \cdot S^{0,32}, \text{ мм} \quad (3.4)$$

А также степенную модель, которая зависит от частоты продольных колебаний f_{Π} и спирального сверла со скоростью резания V и подачей S :

$$f_{\Pi} = 2708,73 \cdot V^{1,07} \cdot S^{-0,3}, \text{ Гц} \quad (3.5)$$

где V – скорость резания, м/с; S – подача, мм/об

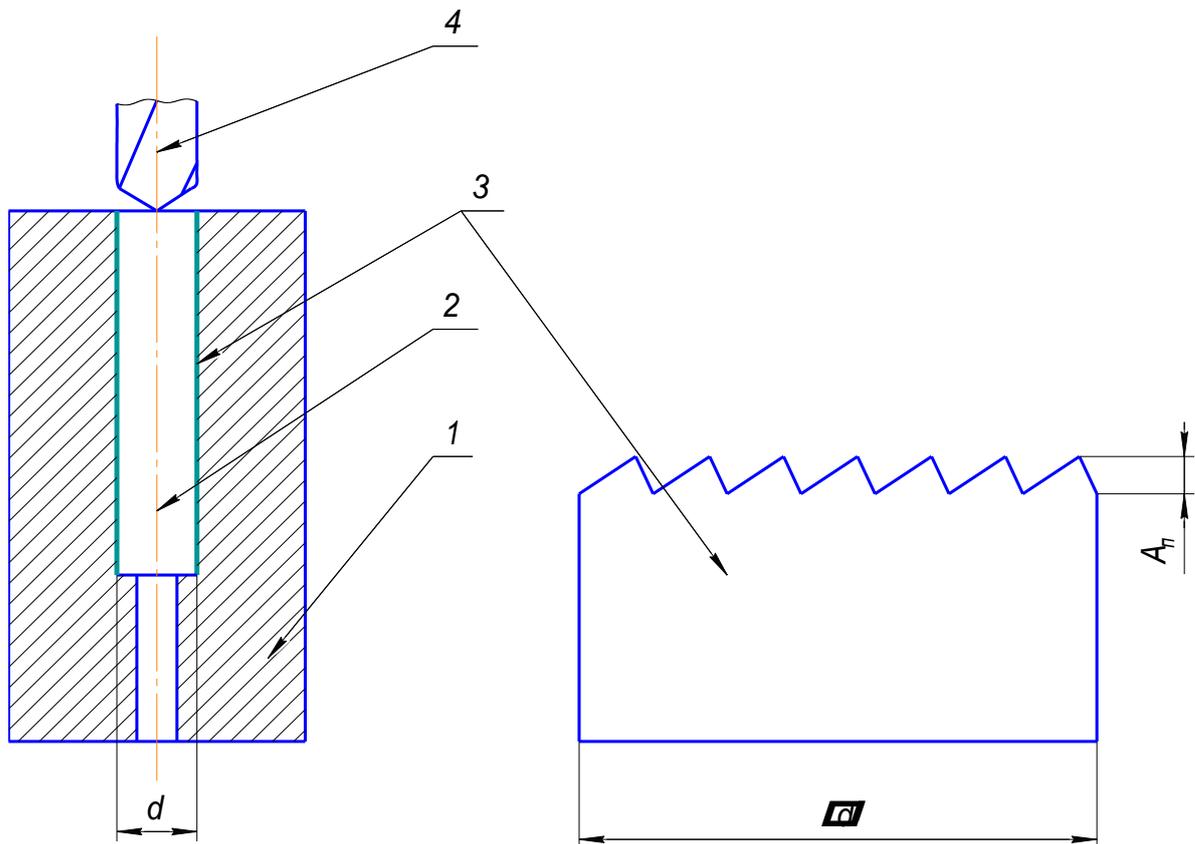


Рисунок 3.4 – Схема образец для сверления: 1 – тело образца, 2 – стержень 3 – медная фольга, 4 – спиральное сверло

Было выяснено, что спиральное сверло колеблется в исследуемом диапазоне режима резания с частотой $f_{\Pi} = 190 \dots 1500$ Гц и амплитудой A_{Π} равной $0,2 \dots 0,5$ мм. Результат данного экспериментального исследования сходится с полученными данными математической модели. В таком случае существует небольшая погрешность при определении амплитуды продольных колебаний A_{Π} которая составляет не больше 14,7%. Это

помогает сделать вывод, что разработанная математическая модель адекватна по отношению к процессу сверления.

Проанализировав работы А.А. Барзова, В.М. Баранова, Ю.Б. Дробота, А.В. Кибальченко, В.Н. Подураева, Н.Н. Рассказова, А.И. Свириденко и работы различных зарубежных авторов можно сделать вывод, что метод акустической эмиссии также может быть использован для исследований динамики процесса сверления.

Для того чтобы зарегистрировать сигнал акустической эмиссии (САЭ) во время процесса резания необходимо использовать экспериментальную установку, которая собирается на базе ЭВМ. Установка состоит из: спирального сверла, образца для сверления, пьезокерамического датчика, зажимного приспособления станка, усилителя, датчика оборотов, аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и ЭВМ.

Метод акустической эмиссии помог определить показатели амплитуды крутильных колебаний (A_k) спирального сверла. Проанализировав записи сигнала акустической эмиссии, во время процесса сверления, можно выявить отставание сигналов, которые соответствуют отставание работы режущей кромки и ленточек спирального сверла от сигналов с датчиков оборотов (рисунок 3.5). Такое отставание сигнала акустической эмиссии является следствием раскручивания спирального сверла вокруг своей оси на некоторый угол раскручивания под действием крутящего момента.

Результатом исследования динамики процесса сверления методом акустической эмиссии стала степенная модель в которой отражена зависимость амплитуды скручивающих колебаний (A_k) спирального сверла от скорости резания V и подачи S :

$$A_k = 12,32 \cdot V^{-0,28} \cdot S^{0,37}, \text{ градусы} \quad (3.6)$$

где V – скорость резания, м/с;

S – подача, мм/об.

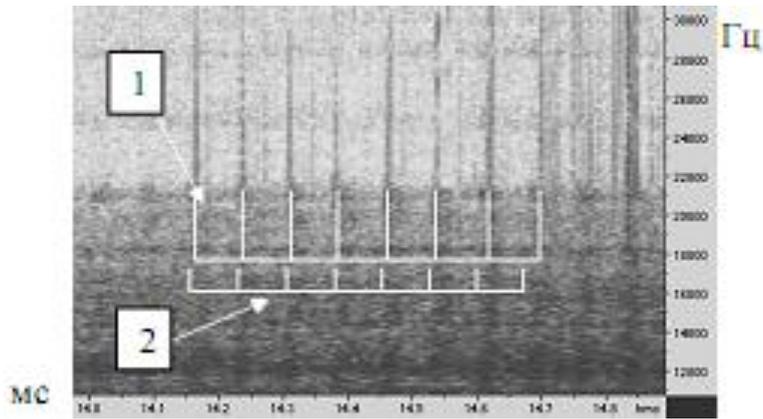


Рисунок 3.5 – увеличенный участок спектрограммы. 1 – риски соответствующие частотным всплескам в момент прохождения режущих кромок сверла вблизи преобразователя АЭ; 2 – разметка, построенная по сигналу с датчика оборотов

Рассчитаем амплитуду продольных колебаний спирального сверла по формулам В.И. Денисенко:

$$A_{\Pi} = \frac{\int_{d_0}^d b_x \cdot \Delta l_x \cdot \vartheta(d_x)}{\frac{\pi d_0^2}{8} + \int_{d_0}^d b_x \cdot \vartheta(d_x)}, \text{ мм} \quad (3.7)$$

где d – диаметр сверла, мм;

d_0 – диаметр сердцевины, мм;

b_x – длина дуги пера в минимальном разрезе на произвольном диаметре d_x , мм;

Δl_x – удлинение единичного волокна относительно вершины сверла на произвольном диаметре d_x :

$$\Delta l_x = \frac{\sqrt{H^2 + (\pi d_x)^2} \cdot l_p}{H \cdot \cos\left(\frac{d_x A_K}{2H}\right) + \pi d_x \cdot \sin\left(\frac{d_x A_K}{2H}\right)} \left[\frac{\pi d_x \cdot \sin\left(\frac{d_x A_K}{2H}\right)}{H} + \cos\left(\frac{d_x A_K}{2H}\right) - 1 \right], \text{ мм} \quad (3.8)$$

где H – длина шага спирали, мм;

l_p – длина рабочей части сверла, мм;

A_K – амплитуда крутильных колебаний, градусы.

В итоге научными исследователями был разработан способ который помогал быстро и точно определить параметры колебания спирального

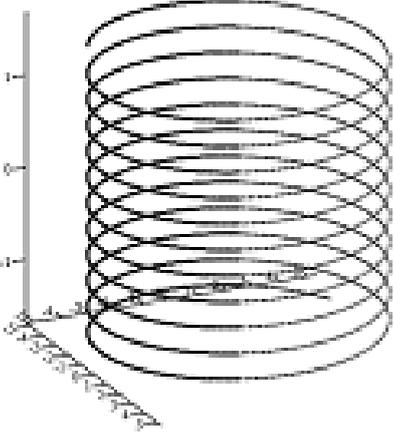
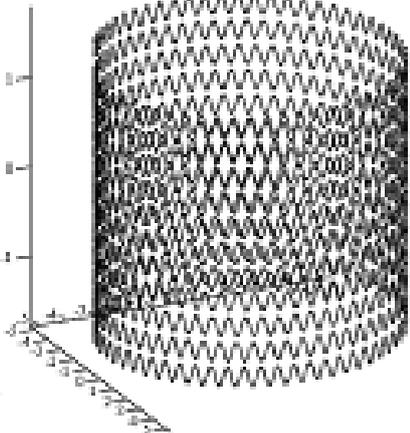
сверла методом акустической эмиссии. Этот метод позволяет существенно уменьшить трудоемкость определения оптимальных режимов резания.

Проанализировав литературные источники можно установить, что при обработке серого чугуна износ по направляющим ленточкам и уголку является лимитирующим видом износа спирального сверла. Для того чтобы проанализировать интенсивность износа направляющих ленточек спирального сверла необходимо провести исследования на установке для моделирования процесса износа физическим методом. Данная установка спроектирована на основе моделирующих установок Г.И. Грановского. Такая установка располагается на универсальном токарном станке 1К62 на месте резцедержателя. Конструкция экспериментальной установки исключает возникновение колебаний, которые связаны с достаточно низкой крутильной жесткости спирального сверла (примерно 30 Н·м/рад). Поэтому она имеет большую жесткость (примерно $2,3 \cdot 10^7$ Н/м) в направлении оси индентора, чем продольная жесткость спирального сверла ($\approx 1,5 \cdot 10^6$ Н/м). Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что экспериментальная установка позволяет проанализировать интенсивность износа ленточек спирального сверла при отсутствии колебания инструмента.

Для того, чтобы определить величину давления на ленточках спирального сверла ученые разработали способ, который определяет длину участка которого касаются ленточки концевой инструмента и обрабатываемая поверхность при помощи метода акустической эмиссии. Для того чтобы определить величину допустимого износа $h_{пр}$ ученые изобрели устройство которое управляет процессом обработки отверстий.

Из анализа литературных источников мы выяснили, что при увеличении интенсивности износа направляющих ленточек увеличивается путь, который прошел инструмент во время колебания. Для того чтобы изучить как влияют колебания на износостойкость спирального сверла было проведено моделирование траектории перемещения ленточек, которое показано в таблице 3.2.

Таблица 3.3 – Траектория перемещения ленточек

При отсутствии колебаний инструмента	При наличии продольных колебаний инструмента
Формулы для расчета координат точек траектории перемещения ленточки	
$x = r \cdot \cos(\omega t), \text{ мм} \quad (3.9)$ $y = r \cdot \sin(\omega t), \text{ мм} \quad (3.10)$ $z = \frac{S \cdot t}{2\pi}, \text{ мм} \quad (3.11)$ <p>где r – радиус сверла, мм; $\omega = 2\pi n$ – круговая частота (n – частота вращения, об/с), рад/с; S – подача, мм/об</p>	$x = r \cdot \cos(\omega t), \text{ мм} \quad (3.14)$ $y = r \cdot \sin(\omega t), \text{ мм} \quad (3.15)$ $z = \frac{S \cdot t}{2\pi} + A_{\text{п}} \cdot \sin(\omega_{\text{п}} t), \text{ мм} \quad (3.16)$ <p>где $A_{\text{п}}$ – амплитуда продольных колебаний, мм; $\omega = 2\pi \cdot f_{\text{п}}$ – круговая частота продольных колебаний ($f_{\text{п}}$ – частота продольных колебаний, Гц), рад/с</p>
Траектории	
 <p style="text-align: center;">Рисунок 3.6</p>	 <p style="text-align: center;">Рисунок 3.7</p>
Формулы для расчета длины отрезка кривой, пройденной за время t	
$L_1 = \int_0^t \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial t}(r \cdot \cos(\omega t))\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial t}(r \cdot \sin(\omega t))\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{S \cdot t}{2\pi}\right)\right)^2} dt, \text{ мм} \quad (3.12)$	$L_2 = \int_0^t \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial t}(r \cdot \cos(\omega t))\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial t}(r \cdot \sin(\omega t))\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{S \cdot t}{2\pi} + A_{\text{п}} \cdot \sin(\omega_{\text{п}} t)\right)\right)^2} dt, \text{ мм} \quad (3.17)$
Формулы для расчета периода стойкости T	
$T_1 = \frac{h_{\text{пр}}}{60 \cdot I_{\text{л}}}, \text{ мин} \quad (3.13)$ <p>где $h_{\text{пр}}$ – величина допустимого износа по ленточке, мм; $I_{\text{л}}$ – интенсивность износа направляющих ленточек, мм/с</p>	$T_2 = \frac{L_1}{L_2} \cdot T_1 = \frac{L_1 h_{\text{пр}}}{L_2 \cdot 60 \cdot I_{\text{л}}}, \text{ мин} \quad (3.18)$ <p>$\frac{L_1}{L_2}$ – отношение длин отрезков кривой, пройденных ленточками при наличии L_2 и в отсутствии колебаний инструмента L_1</p>

Для того чтобы описать на сколько сильно изнашиваются ленточки спирального сверла за счет использования различных режимов резания необходимо провести полный факторный эксперимент на моделирующей установке. Результатом данного эксперимента стала степенная модель:

$$I_{\text{л}} = 82,41 \cdot V^{1,94} \cdot S^{1,7}, \text{мкм/с} \quad (3.19)$$

В заключении можно сделать вывод, что были изучены различные зависимости параметров колебаний спирального сверла от различных режимов резания. Также были исследованы различные режимные параметры которые влияют на интенсивность износа направляющих ленточек спирального сверла, а также лимитирующую стойкость инструмента во время обработки серого чугуна. Также мы рассмотрели уравнение, которое было разработано для расчета времени стойкости учитывая колебание спирального сверла.

3.3 Упрочнение режущего инструмента при помощи метода электроискрового легирования

Нами были проведены испытания сверл на производстве. Показателем эффективности являлся ресурс опытных образцов и сравнивался с серийным инструментом. Наряду с этим оценивалась точность обработки поверхности и ее шероховатость.

Электроискровая обработка образцов проводилась на оборудовании «UR-121» электродами Ст-1 (табл. 3.3) диаметром 2 мм.

Таблица 3.3. Характеристики материала легирующего электрода

Название электрода	Структура электрода	Твердость, HRA	Плотность, г/см ³	$\sigma_{\text{изг}}$, кг/мм ²
Ст-1	79TiC-16Ni-5Mo	90,0-91,0	5,4-5,43	100-110

Ст-1 – это конструкционная, углеродистая сталь обыкновенного качества. Данный материал характеризуется высокой вязкостью и низкой твердостью.

ЭИЛ велось по задней и передней поверхности сверл на чистовых режимах малой мощности. Выбор таких режимов вызван требованиями шероховатости обрабатываемой поверхности инструмента, которая сказывается на изделии. Перед упрочнением образцы проходили необходимую подготовку, проводилась очистка обрабатываемых поверхностей и обезжиривание. Покрытие наносилось на полную длину режущей кромки и перемычку сверл. Ширина покрытия составляла приблизительно 2 мм, а толщина зависела от режима упрочнения и варьировалась в пределах от 5 до 15 мкм.

В таблице 3.4 представлены основные данные проведенного эксперимента.

Таблица 3.4. Параметры обработки детали

Материал инструмента	Обрабатываемый материал	Деталь	Режимы работы инструмента
11М5Ф	АК12М	Картер сцепления	V=38,2 м/мин; S=241,6 мм/мин

Упрочненный инструмент работал на автоматической линии, оператор которой вел непрерывное наблюдение за параметрами обработки. Условием замены инструмента являлось снижение параметров качества обработки за пределы допустимых.

Обрабатываемой на автоматической линии деталью являлся картер сцепления, материалом которого был алюминиевый сплав АК12М. На этом оборудовании одновременно работает 42 различных инструмента. Время такта обработки составляло 32 секунды, а период замены этих инструментов составлял 18 минут, в связи с этим увеличение износостойкости хотя бы некоторых позиций существенно увеличивало коэффициент использования

оборудования. Режимы обработки представлены в табл. 2. Нормативная стойкость сверл составляла 1000 деталей при износе по задней поверхности 0,3...0,4 мм. Опытные сверла с покрытием имели стойкость от 10000 до 20000 деталей при износе 0,3...0,4 мм по задней поверхности, при этом разброс размеров и качество поверхности были в заданных чертежом пределах. Этот же инструмент проходил испытания после переточки, проводимой по задней поверхности, без электроискрового упрочнения.



Рисунок 3.8. – Режущая часть сверла с покрытием

Оказалось, что стойкость переточенных сверл находится в пределах 1500...1600 деталей. Это свидетельствует о необходимости производить ЭИЛ задней поверхности после каждой переточки. Упрочнение инструмента после каждой переточки увеличивает его суммарный срок службы до 160 раз.

Таким образом, сделаем выводы:

1) инструмент на который нанесли покрытие методом электроискрового легирования меньше подвергается износу и имеет существенно большую стойкость.

2) Производственные испытания показали, что для того чтобы рационально использовать инструмент с износостойким покрытием, которое нанесли при помощи метода электроискрового легирования, необходимо на заточных участках после каждой переточки инструмента наносить новое покрытие по основным поверхностям.

3.4 Упрочнение поверхности изделия при помощи технологии ЭИЛ с применением порошкового наноматериала

Для проведения эксперимента по упрочнению поверхности изделий возьмем за образец из сплава алюминия (Д16Т) и используем технологию ЭИЛ с применением порошкового наноматериала (НМ) нитрида ванадия VN нитрида титана TiN в качестве упрочнителей. Нитрид ванадия увеличивает предел прочности и твердость Д16Т, а так же увеличивает усталостную прочность сплава. Нитрид титан закрепляет все полученные характеристики, а так же увеличивает свариваемость сплава.

Д16Т - это сплав, состоящий из алюминия, магния и меди. Такие сплавы называются дюралюми и применяются в авиационной, судостроительной и космической промышленности. Главное отличие такого сплава - это достаточная легкость, высокая прочность, а также у такого сплава повышенное сопротивление к деформациям во время эксплуатации, и у него хорошая податливость обработке на токарных и фрезеровочных станках.

Выбранную технологию упрочнения опробовали на литых заготовках из алюминиевого сплава Д16Т. Поверхность сплава предварительно промыли 10-15 мин в 15 % растворе кальцинированной соды при температуре 50°C, после чего высушили образцы в термокамере. Кальцинированная сода используется как заменитель щелочи, она имеет более низкую стоимость, чем каустическая сода, и поэтому при использовании она более экономична.

Следующим этапом было втирание НМ в поверхность металла в течение 4 минут, после чего с помощью установки «SE-5.01» применяя графитовый электрод диаметром 7 мм (графит марки МПГ-7) велась электроискровая обработка поверхности при круговых перемещениях электрода со скоростью 0,05...0,08 мм/мин, частоте вибрации $f = 500$ Гц и рабочем токе $I_p = 1$ А. Далее из полученных упрочненных заготовок вырезали цилиндрические образцы диаметром 16 мм и высотой 18 мм. На приборе HV-1000 проводилось измерение микротвердости упрочненной поверхности (по Бринеллю, НВ). Далее образцы испытывались на износ. Это мероприятие производили на специально оборудованном стенде при возвратно-поступательном перемещении образцов по контртелу в течение 2,5 ч при удельной нагрузке 12 Н/мм². Для смазки использовалось масло индустриальное И20А. И20А, которое применяют в различных системах промышленного оборудования для деталей, подвергающихся воздействию открытого воздуха. Индустриальное масло обладает высокой стойкостью против окисления, а так же ему присуще хорошие деэмульгирующие свойства. Комфортный температурный режим для данного масла от -5 до +70 °С при высоком режиме эксплуатации. Преимущества данного масла заключается в том, что оно дает возможность защитить детали и механизмы от коррозионных отложений, очищает трущиеся части от грязевых образований, способствует замедлению процесса износа деталей, а так же данное масло можно использовать как уплотняющее средство. Данную смазку необходимо непрерывно подавать в зону трения. В процессе выполнения лабораторных исследований определялась потеря массы образцов взвешивая их на аналитических весах ВЛ-210 до и после испытания.

Проведенные исследования показали, что ЭИЛ поверхности образцов из сплава Д16Т графитовым электродом повышает ее микротвердость в 1,5 раза по сравнению с необработанным сплавом (с 230 до 352 ед. НВ), а обработка НМ VN с последующей ЭИЛ графитовым электродом — в 1,7 раза (до 393 ед. НВ) и обработка НМ TiN и ЭИЛ графитовым электродом — в 2 раза (до

460 ед. НВ) (рис. 1). При этом износ упрочненной поверхности уменьшился соответственно в 1,3; 2,2 и в 3 раза.

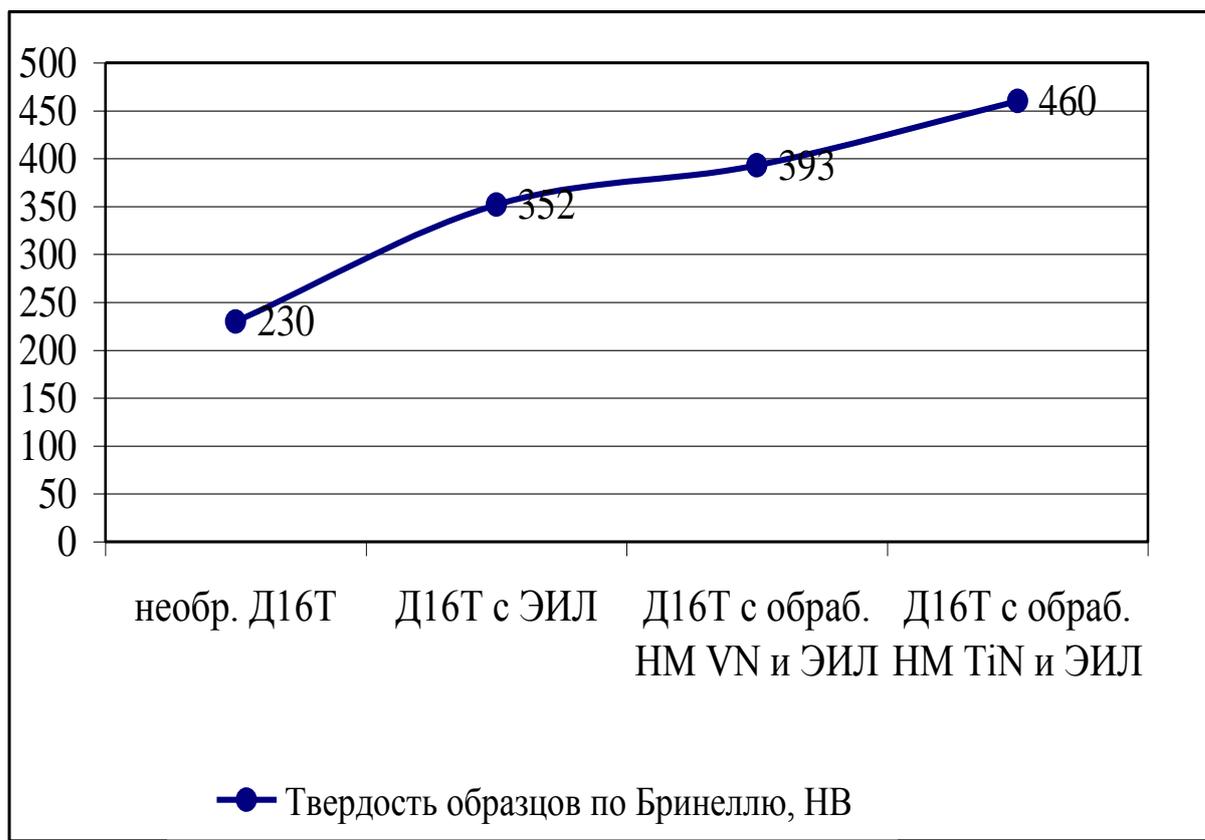


Рисунок 3.9 – Результаты проведенных исследований

Тем самым можно прийти к выводу, что для достижения большего повышения стойкости деталей при производстве кокилей, а именно увеличения микротвердости поверхности и уменьшения износа упрочненной поверхности, целесообразно проводить обработку НМ TiN и ЭИЛ графитовым электродом.

Заключение

Подведем итог диссертационной работы. При проведении комплексных исследований электроискрового легирования титанового сплава BT9 и BT20 и нанесенных износостойких материалов из переходных материалов IV-VI и VIII групп, алюминия, серебра, графита и твердого сплава T15K6 авторы установили несколько основных закономерностей процесса упрочнения, а также предложили пути решения проблемы интенсивной эрозии катода. Решением стало проведение предварительной пассивации электродами из графита и серебра в режиме электрического импульса около 0,1-0,3 Дж, затем проведение обработки твердосплавным электродом из T15K6.

Авторы Химухин С.Н., Астапов И.А., Теслина М.А. и Безматерных К.П.. определили сплавы которые позволяют повысить жаростойкость стали 20X13. Это сплавы № 2 (Ni-57,9 % Al-41,9 %) и № 3 (Ni-66,9% Al-32,9%;), при нанесении такие сплавы образуют интерметаллид NiAl в покрытии. При проведении ряда экспериментов авторы выяснили, что при нанесении сплава № 2 возможно образование трещин на покрытии. Данный сплав является достаточно хрупким, во время процесса термического взаимодействия это ведет к полному разрушению слоя. Причиной такого результата может служить разница в коэффициентах термического расширения покрытия и основы. Таким оставшимся наилучшим вариантом для создания жаростойкого покрытия является сплав №3 (Ni-66,9% Al-32,9%;) [58].

Авторы Р.М. Валиев, Ведищев, Воннерук, Ю.Г. А.В. Иванов, С.Г. Купцов, Д.В. Мухинов, М.В. Фоминых, А.А. А.В. Шак изучили области наилучших параметров для проведения электроискрового легирования на пластинах из быстрорежущей стали P6M5. Разработанные режимы ЭИЛ существенно увеличили износостойкость эталонных пластин. Авторы пришли к выводу, что для получения удовлетворяющего результата необходимо, чтобы шероховатость упрочненных пластин не превышала 2 мкм, а шероховатость обрабатываемой поверхности не превышала 6 мкм.

Для того чтобы добиться более износостойкого покрытия во время использования метода электроискрового легирования авторы предложили провести ряд дополнительных исследований для понижения уровня шероховатости поверхности режущего инструмента и обрабатываемой детали, а также необходимо дополнительно рассмотреть влияние режимов резанья и геометрии режущего инструмента. Данные исследования помогут увеличить работоспособность режущего инструмента в несколько раз [39].

Козырь А. В., Верхотуров А. Д., Коневцов Л. А. обнаружили несколько зависимостей изменения массы катода во время процесса ЭИЛ прослеживающиеся от критерия теплового воздействия R и времени обработки единичной площади.

Проведенные электронно-микроскопические исследования создания легирующего слоя при электроискровом легировании Al/VT18 на различных тепловых воздействиях режимов с критерием R установили восемь характерных участков микроструктуры поверхности. Среди этих участков выделяют места взаимодействия электродов в виде капель закристаллизовавшейся жидкости, лунок, а также участки слабого и усталостного разрушения [16].

Во время использования электроискрового легирования Al/VT18 поверхность анода можно охарактеризовать четырьмя участками, которые зависят от критерия теплового воздействия R :

5. оплавление,
6. интенсивное испарение материала,
7. отсутствие блокировки рабочей поверхности электрода вторичными структурами,
8. активная эрозия со следами контактного взаимодействия с материалом катода.

Процесс электроискрового легирования материала Al/VT18 площадью 1-2см должен проходить не больше 6-7 минут при режимах критерия теплового воздействия $R=1,5$ А/Дж и при энергии в импульсе $E=3$ Дж, а для

материала TiAl/VT18 не более 2-3 мин.

Если длительность процесса электроискрового легирования Al/VT18, TiAl/VT18, Ni3Al/VT18 увеличивается до 14 минут, то граница слабого разрушения (T_x) не достигает 33 А/Дж на режимах с критерием R, а также при $R=1,5$ А/Дж при Ni3Al/VT18. Это приводит к непрерывному увеличению катода и соответственно увеличивает эрозию анода.

При использовании исследованных материалов полученные электроискровым легированием Верхотуров А. Д., Коневцов Л. А. Козырь А. В. Выяснили, что слои покрытия обладают достаточно высокими механическими свойствами. Практически по всем показателям наивысшее значение имеет электрод из ВК6. Не отстает по показателям и электрод из ВК6 с бронзой, хотя их градиент по глубине резко изменяется. Вследствие этого лучшим материалом электрода для нанесения покрытия методом электроискрового легирования можно считать ВК6. Расход данного электрода при электроискровом легировании незначителен.

После проведения аналитического исследования температуры поверхности тела, которая возникает во время нанесения износостойкого покрытия методом электроискрового легирования можно сделать несколько выводов, что:

1. Для того чтобы исключить процесс отслаивания во время технологии нанесения покрытия методом электроискрового легирования необходимо определить количество тепловых процессов на поверхности изделия.

2. Температура поверхности упрочняемой детали прямо пропорциональна мощности генератора. Она зависит от нескольких факторов: теплофизическая характеристика анода и катода, диаметр электрода, а также она связана со скоростью перемещения легирующего электрода зависимостью близкой к отрицательной экспоненциальной.

3. Также возможно провести оптимизацию процесса нанесения износостойкого покрытия. В данном процессе ограничением «снизу» будет

являться линия равных температур ($\theta_{x,y,z} = T_{пл}$), а ограничением «сверху» будет являться требуемая толщина покрытия.

Также мы выяснили, с какими проблемами износа инструмента мы сталкиваемся во время проведения технологического процесса. После анализа составленной математической модели мы пришли к выводу, что на износ инструмента влияет амплитуда колебания, которая создается сверлом в режиме работы. Амплитуда колебания зависит от фазовых характеристики силы резания τ . (рисунок 3.2). Как нам стало известно, что уменьшение показателя τ можно достигнуть при помощи изменения нескольких параметров: при увеличении скорости резания, значения переднего угла инструмента, а также при помощи уменьшения коэффициента усадки стружки. Исследования вибраций при точении и фрезеровании, проведенные И.Г Жарковым, подтверждают данные результаты.

Также были исследованы различные режимные параметры, которые влияют на интенсивность износа направляющих ленточек спирального сверла, а также лимитирующую стойкость инструмента во время обработки серого чугуна. Также мы рассмотрели уравнение, которое было разработано для расчета времени стойкости, учитывая колебание спирального сверла.

Было проведено упрочнение режущего инструмента при помощи метода электроискрового легирования в производственных условиях и сделаны выводы, что:

1) инструмент с нанесенным покрытием методом электроискрового легирования, подвергается износу меньше и имеет повышенную стойкость.

2) С помощью проведенных производственных испытаний было выявлено, что для рационального использования инструмента с износостойким покрытием, нанесенным при помощи метода электроискрового легирования, необходимо чтобы на заточных участках после каждой переточки инструмента наносить новое покрытие по основным поверхностям.

Также мы провели упрочнение поверхности изделия при помощи технологии ЭИЛ с применением порошкового наноматериала.

Проведенные исследования показали, что ЭИЛ поверхности образцов из сплава Д16Т графитовым электродом увеличивает ее микротвердость в 1,5 раза по сравнению с необработанным сплавом (с 230 до 352 ед. НВ), а обработка НМ VN с последующей ЭИЛ графитовым электродом — в 1,7 раза (до 393 ед. НВ) и обработка НМ TiN и ЭИЛ графитовым электродом — в 2 раза (до 460 ед. НВ) (рис. 1). При этом износ упрочненной поверхности уменьшился соответственно в 1,3; 2,2 и в 3 раза.

Тем самым можно прийти к выводу, что для достижения большего повышения стойкости деталей при производстве кокилей, а именно увеличения микротвердости поверхности и уменьшения износа упрочненной поверхности, целесообразно проводить обработку НМ TiN и ЭИЛ графитовым электродом.

Список используемой литературы

1. Бугаев А.А., Веселовский В.М., Перевертун А.И., Попов В.Е. Скороход В.А., Особенности механизированного электроискрового упрочнения дисковых ножей. Херсон. 1976. 15 С. // Рукопись депонир. УкрНИИНТИ 13.08.1976. № 500.
2. Некрасов Н.С., Логинов Н.Ю., Зотов А.В., Кузьмич И.В. Выбор оптимальной конструкции концевой фрезы при черновой обработке пресс-формы // Технические науки – от теории к практике. – 2014. – № 35. – С. 31–36.
3. Аникин, В.Н. Композитное покрытие для режущего инструмента [Текст] / В.Н. Аникин, А.И. Пьянов, А.А. Пьянов // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: в 2-х ч. Часть 2: Материалы 15-й Междунар. науч.-практ. конф. – Санкт-Петербург. – 2013. – С. 38-40.
4. Бабенко, Э.Г. Комбинированная обработка стали Ст3 электроискровым легированием и газоелектрической наплавкой в среде CO₂ [Текст] / Э.Г. Бабенко, С.В. Николенко, Е.Н. Кузьмичев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – №8(104). – С. 14-21.
5. Безыкорнов А.И., Корниенко А.И., Прейс Г.А., Михайлов В.В. Остаточные напряжения при электроискровом легировании. // Электронная обработка материалов, 1976. № 6. С. 20-22.
6. Биленко, Э.Г. Структура и физико-механические свойства стали Х12ВМ, подвергнутой ионно-лучевой обработке азотом [Текст] / Э.Г. Биленко // Трение и износ. – 2004. – Т.25. – №3. – С. 310-315.
7. Братушка, С.Н. Структура и триботехнические характеристики стали, легированной Мо или W в режиме оплавления плазменной струей [Текст] / С.Н. Братушка, Ю.Н. Тюрин, О.В. Колисниченко, А.Д. Михалев, Р.Ю. Ткаченко, Н.А. Махмудов, А.В. Пшик, Р. Денисенко, И.В. Якущенко // Трение и износ. – 2012. – Том 33. – №1. – С. 32-45.

8. Будовских, Е.А. Закономерности формирования поверхностных слоев металлов и сплавов при электровзрывном легировании [Текст] / Е.А. Будовских, С.В. Карпий, В.Е. Громов // Материаловедение. – 2009. – №11. – С. 49-53.

9. Бурумкулов Ф.Х., Латыпов Р.А., Лельчук Л.М. и др. Восстановление и упрочнение деталей электроискровым методом. // Сварочное производство. 1998. № 2. С. 37-39.

10. Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В., Иванов В.И., Величко С.А., Ионов П.А., Марочкин А.С. Кинематическая модель электроискрового легирования. // В сб.: Обеспечение надежности машин при эксплуатации и ремонте: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Саранск. 1998. С. 55-58.

11. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Парканский Н.Я. и др. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.

12. Верхотуров А.Д., Зайцев Е.А., Адамовский А.А. Остаточные напряжения первого рода в стальных образцах при электроискровом легировании переходными металлами. // Вестник машиностроения. 1976. № 1. С. 41-43.

13. Верхотуров А.Д., Зайцев Е.А., Пополотай В.В. Износостойкость стали 45 после электроискрового легирования тугоплавкими металлами, карбидами и твердыми сплавами. // Вестн. Машиностроения. 1976. № 7. С. 49-51.

14. Верхотуров А.Д., Ковальченко М.С., Лемешко А.М. Действие высококонцентрированных потоков энергии на тугоплавкие металлы и соединения. // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1979. т.15. № 4. С. 574-579.

15. Верхотуров А.Д., Коневцов Л.А., Подчерняева И.А., Востриков Я.А. Особенности формирования измененного поверхностного слоя в условиях высокоэнергетического ЭИЛ сталей композитными материалами // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2014. – № 5 (48). – С. 73–79. 2. Коломейченко А.В., Кузнецов И.С. Теория и практика электроискрового

упрочнения режущих деталей машин аморфными и нанокристаллическими сплавами. – Орел: Орловский государственный аграрный университет, 2015. – 174 с. 3. Кузнецов И.С. Расчетная оценка массопереноса при электроискровой обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 12 (132). – С. 41–44.

16.Верхотуров, А. Д. Исследование процесса формирования поверхностного слоя титанового сплава при электроискровом легировании с учетом критерия теплового воздействия [Текст] / А. Д. Верхотуров, А. В. Козырь, Л. А. Коневцов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2015. – Т.1. – №1(21). – 68-75.

17.Верхотуров, А. Д. Формирование износостойкого покрытия методом ЭИЛ твердыми сплавами и переходными металлами IV – VI групп [Текст] / А. Д. Верхотуров, Л. А. Коневцов, Я. А. Востриков // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2014. – №10. – С. 3-8.

18.Верхотурова, И. В. Исследование свойств двухслойных электроискровых покрытий на основе сплавов и графита [Текст] / И. В. Верхотурова, Д. А. Салыкина, Н. А. Волкова // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2012. – №59. – С. 46-51.

19.Востриков, Я. А. Классификация электродных материалов для электроискрового легирования [Текст] / Я. А. Востриков, Л. А. Коневцов, В. М. Макиенко, А. Д. Верхотуров // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2013. – Т.1. – С 93-97.

20.Гадалов В.Н., Рыжков Ф.Н. Современное состояние методов поверхностного упрочнения конструкционных и инструментальных материалов. // В сб.: Материалы и упрочняющие технологии-99, VII Российская научно-техническая конференция, Курский государственный технический университет. Курск. 1999. 144 с.

21.Гадалов, В. Н. Упрочнение быстрорежущих сталей [Текст] / В. Н. Гадалов, Р. Е. Абашкин // В сборнике: Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации / материалы VIII Международной научно-технической конференции: в двух частях. – 2011. – С. 119-124.

22.Головкин, В. В. Определение остаточных напряжений при механической обработке лезвийным инструментом [Текст] / В. В. Головкин, О. В. Ромашкина // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – Т.12. – №21 (148). – С. 11-14.

23.Горбашко, Е. А. Управление качеством [Текст]: учебное пособие / Е. А. Горбашко, Ю. А. Рыкова, Л. Е. Скрипко. – СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2016. – 126 с.

24.ГОСТ 10902-77 Сверла спиральные с цилиндрическим хвостовиком. Средняя серия. Основные размеры. – М.: ГКС Классификатор государственных стандартов, 1977. – 46-58 с.

25.ГОСТ 10903-77 Сверла спиральные с коническим хвостовиком. Основные размеры. – М.: ГКС Классификатор государственных стандартов, 1977. – 59-67 с.

26.ГОСТ 1412-85 Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. – 1-6 с.

27.Григорьев, С. Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента [Текст]: монография / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. – Ульяновск: Ульяновский ГТУ, 2012. – 268 с.

28.Гуляев, В. А. Увеличение износостойкости режущего инструмента методом электроискрового нанесения покрытий [Текст] / В. А. Гуляев, А. О. Кучеров // Новый университет. – 2014. – №10 (32). – С. 4-8.

29.Душенко В.Ф., Ткаченко В.Н., Гитлечив А.Е. Оценка влияния фактора среды на движение импульсного потока при нанесении порошкового

материала мощным искровым разрядом. // Электронная обработка материалов. 1975. № 5. С. 31-33.

30. Жура В.И., Юхненко В.В. и др. Электроискровое легирование образцов с предварительно деформированным поверхностным слоем. // Электронная обработка материалов. 1978. № 2. С. 29-31.

31. Зеленин В.Н., Лубенский А.Ф., Мартюшев В.Е., Рябова Т.В., Никулин В.В., Музафаров Р.С. Работоспособность дисковых фрез, легированных электроискровым способом. // В сб.: Совершенствование процессов обработки металлов резанием. Ижевск. 1974. вып. 5. С. 134-137.

32. Иванов, В. И. Упрочнение и увеличение ресурса объектов электроискровым методом: классификация, особенности технологии [Текст] / В. И. Иванов, Ф. Х. Бурумкулов // Электронная обработка материалов. – 2010. – №5 (265). – С. 27-36.

33. Иваночкин П. Г., Блажеев В. В, Личковаха А. С. Исследование механических свойств покрытия, наносимого методом электроискрового легирования / П. Г. Иваночкин, В. В. Блажеев, А. С. Личковаха // Вестник ДГТУ. – 2014. – Т.14, №3(78). – С. 111-117.

34. Игнатков Д.А. К образованию остаточных напряжений при электроискровом легировании. // Электронная обработка материалов. № 4. 2001. С. 9-14.

35. Инадзе М.В., Бусел Н.А., Подлесов В.В., Карпеченко А.В., Хусид Б.М., Столин А.М. Электроэрозионное легирование сталей электродами, полученными СВС – экструзией. // Весці АН БССР. Сер. фізю-тэхн.н. № 2.1991. С. 13-16.

36. Коваленко, О. А. Исследование влияния исходной шероховатости инструмента, упрочняемого электроискровым легированием на износостойкость штампованного инструмента [Текст] / О. А. Коваленко. // Сб. научных трудов ДонГТУ. - 2011. - №35. - С. 228-234.

37.Кондратьев А.И., Маслов Б.Я., Николаенко С.В., Коротеев В.А. О применении метода акустической эмиссии для контроля качества покрытий при электроискровом легировании. // Дефектоскопия. № 5. 1998. С. 86-90.

38.Копейкин С.В., Пилипенко П.А., Ингеманссон А.Р. Повышение эффективности чистовой обработки глубоких отверстий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 78–82. 5. Логинов Н.Ю., Воронов Д.Ю. Фрезерование радиусных участков штампов концевыми фрезами // Научные труды Sworld. – 2012. – Т. 7, № 3. – С. 70–71.

39.Коротаев Д.Н., Никитин Ю.Б., Иванова Е.В. Управление качеством формирования эксплуатационных параметров поверхностей при упрочнении электроискровым легированием. // Машиностроитель. № 4. 2003. С. 65-69.

40.Коротков В.А., Трекин Г.Е., Кабанов Д.В. Исследование электроискрового легирования. // Физика и химия обработки материалов. № 6. 1995. С. 62-65.

41.Купцов, С. Г. Разработка технологии электроискрового легирования быстрорежущей стали твердыми сплавами на основе фаз внедрения [Текст] / С. Г. Купцов, М. В. Фоминых, Д. В. Мухинов, [и др.]. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2010. - Т.12. - №1 (2). - С. 407-411.

42.Лазаренко Б.Р. Вступительное слово на Всесоюзной конференции по электроискровому легированию металлических поверхностей. // Электронная обработка материалов. 1977. № 3. С. 28-33.

43.Лариков Л.Н., Дубовицкая Н.В., Захаров С.М., Снежков В.А. Структурные изменения в поверхностных слоях Ст45 при электроискровом легировании. // Электронная обработка металлов. 1981. № 6. С.22-24.

44.Логинов, Н. Ю. Влияние частоты вибрации электрода на шероховатость получаемого покрытия при электроискровом легировании [Текст] / Н. Ю. Логинов, Д. В. Назаров // Технические науки - от теории к

практике / Сб. ст. по материалам LVII междунар. науч. - практ. конф. - № 4 (52). - Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2016. - С. 117-123.

45. Мартынов И.Н., Нестеров В.А., Зуев И.В., Лезин В.В., Завалюев А.А. Повышение срока службы режущего инструмента электроискровым легированием. // Машиностроитель. 1979. № 9. С. 21.

46. Меерсон Г.А., Кассир Г.А., Темников Е.М. Электроимпульсный способ получения порошков металлов и сплавов. // Порошковая металлургия. 1975. № 2. С. 9-15.

47. Михайлов В.В., Бачу К.А., Пасинковский Е.А., Перетятку П.В. К вопросу электроискрового легирования титана и его сплавов/ В.В. Михайлов, К.А. Бачу, Е.А. Пасинковский, П.В. Перетятку // Электронная обработка материалов, 2006, № 3, С. 106–111

48. Мулин, Ю. И. Электроискровое легирование поверхностей титановых сплавов [Текст] / Ю. И. Мулин, А. Д. Верхотуров, В. Д. Власенко // Перспективные материалы. - 2006. - №1. - С. 79-85.

49. Назаров, Д. В. Исследование влияния износостойких покрытий при фрезеровании [Текст] / Д. В. Назаров, К. О. Семенов // Новый университет. Серия: Технические науки. - 2016. - №1(47). - С. 44-48.

50. Нарва В.К., Полеченко А.В. и др. Электроконтактное упрочнение стальной поверхности карбидостаями с использованием отходов металлообработки. // Черная металлургия. № 5. 1995. С. 42-43.

51. Памфилов Е.А., Буглаев А.М., Северин В.Д., Петренко Н.М. К вопросу повышения износостойкости острых кромок, работающих в условиях ударного нагружения электроискровым легированием. // В сб.: Краткие тез. докл. 8-й всесоюзн. научн.–произв. конф. по электрофиз. и электрохим. методам обр. «Элфа-77». Л. 1977. С. 179-180.

52. Петрик И.Е., Голембиевский Н.Н., Преснов В.А. Получение контактов к синтетическим полупроводниковым алмазам электроискровым способом. // Электрическая обработка материалов. 1977. № 5. С. 39-41

53.Пожидаев М.В. Об эффекте легирования поверхностных слоев в процессе электроэрозионной обработки. // Электронная обработка материалов. 1978. № 1. С. 25-27.

54.Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука. 1987. 592 с.

55.Резников А.Н. Теплофизика резания. М.: Машиностроение. 290 с.

56.Розеберг О.А., Делеви В.Г., Шейкин С.Е. и др. Повышение работоспособности рабочих элементов деформирующих протяжек электроискровым легированием. // Сверхтвердые материалы. № 2. 1992. С. 41-47.

57.Сеплярский Б.С., Ивлева Т.П., Левашов Е.А., Харламов Е.И. Математическое моделирование процесса терморекреационного электроискрового упрочнения. // Цветная металлургия. № 4. 2000. С. 51-56.

58.Слепцов В.М., Кириленко С.Н., Верхотуров А.Д., Науменко В.Я. Закономерности эрозии и формирования упрочненного слоя при электроискровом легировании электродами на основе карбида титана и нержавеющей стали. // Электрическая обработка материалов. 1976. № 2. С. 27-29.

59.Сычев В.С. О некоторых закономерностях электроискрового легирования тугоплавких металлов боридами. // В сб.: Исслед. в обл. новых материалов. Киев. 1977. С. 38-43.

60.Тимошенко Б.И., Морозенко В.Н. О динамике электроискровой обработки деталей системой незакрепленных электродов-инструментов. // Электронная обработка материалов. 1976. № 2. С. 22-25.

61.Тимошенко Б.И., Морозенко В.Н., Высоцкий В.И. Упрочнение деталей электрокомбинированным методом. // Электронная обработка материалов. 1977. № 4. С. 82-84.

62.Химухин С.Н., Астапов И.А., Теслина М.А. Безматерных К.П. Формирование жаростойких покрытий методом электроискрового легирования с использованием интерметаллидных сплавов Ni-Al //

Технические науки - от теории к практике: сб. ст. по матер. XV междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2012.

63. Чупина Л.А., Иванов В.И., Сандуца В.И. К вопросу о лб электроискровом легировании режущих инструментов. // В сб.: Современные технич. и технологич. методы повышения качества надежности и долговечности дет машин.: Тез. докл. и сообщ. на респ. научн.-тех. конф. Кишинев. 1976. С. 76-78.

64. Partnership for accelerated insertion of new technology: case study for thermal spray technology [Text] / Sanjay Sampath¹, Gopal Dwivedi, Alfredo Valarezo and Brian Choi // Integrating Materials and Manufacturing Innovation, Pg 1-35, 2013.

65. Three-body abrasive wear resistance of iron matrix composites reinforced with ceramic particles [Text] / Kaihong Zheng, Yimin Gao, Yefei Li, Sanmei Zhao and Juan Wang, // J Engineering Tribology 2014, Vol 228 No 1 Pg 3–10, 2013.

66. Interlaminar stress distribution of laminated composites using the mixed-dimensional transition element [Text] / IJae-Seok Ahn and Kwang-Sung Woo // Journal of Composite Materials 2014, Vol 48(1) Pg 3–20, 2014.

67. Surface and Wear Analysis of Zinc Phosphate Coated Engine Oil Ring and Cylinder Liner Tested with Commercial Lubricant, [Text] / DoLuG Özkan and Hakan Kaleli, Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering Volume 2014, Article ID 150968, 12 pages,

68. Investigation of Metal and Metal Oxide nanocoating on Fins in HPHE with Silver Water NanoFluid, [Text] / Aysar A. Alamery, Zainab F. Mahdi, Hussein A. Jawad, American Journal of Mechanical Engineering, 2015, Vol. 3, No. 1, 21-25

69. Microstructure and Properties of Fe-Based Coating on Column Surface Formed by High Frequency Induction Cladding, [Text] / Huilong Yang, Yufu Sun, Jingjie Shen, Sumeng Hu, Qing Zhao, Xiangcai Jia, Jingchao Zhang, Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology, 2012, 2, 40-43,

70. Influence of Carbon Content of WC-Co Electrode Materials on the Wear Resistance of Electrospark Coatings, [Text] / Alexander A. Burkov, Sergey A.

Pyachin, Alexey V. Zaytsev, Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology, 2012, 2, 65-70

71. Electrospark Coatings Based on WC-Co Alloys with Aluminium Oxide and Carbon Additives, [Text] / Sergey A. Pyachin, Sergey V. Nikolenko, Alexander A. Burkov*, Nikolay A. Suy, Materials Sciences and Applications, 2013, 4, 186-190

72. Influence of Cryogenic Treatment on Microstructure and Properties Improvement of Die Steel, [Text] / Shangtan Liu, Xiaochun Wu, Lei Shi, Yiwen Wu, Wei Qu, Journal of Materials Science and Chemical Engineering, 2015, 3, 37-46

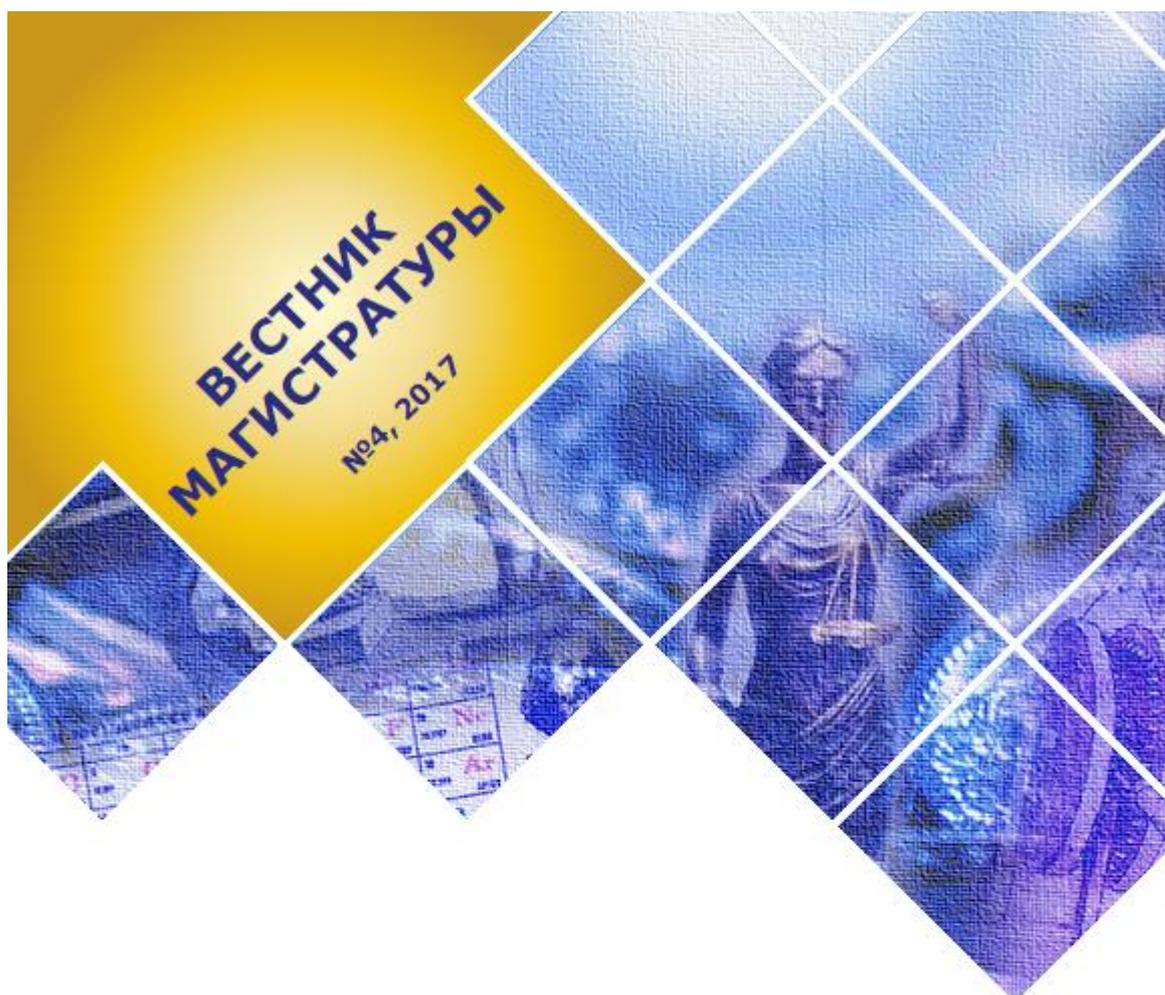
73. Corrosion Behavior of Nanostructured TiAlN and AlCrN Thin Coatings on ASTM-SA213-T-11 Boiler Steel in Simulated Salt Fog Conditions, [Text] / Vikas Chawla, Materials Science and Metallurgy Engineering, 2013, Vol. 1, No. 2, 31-36

Приложение

Приложение А. Сертификат участника



Рисунок А.1 – Сертификат, участника III международной научно-практической конференции «Вестник магистратуры» 2017 №4 (67)



СОВРЕМЕННАЯ МАГИСТРАТУРА: НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРАКТИКА ОБУЧЕНИЯ

 Журнал доступен на
LIBRARY.RU

Материалы III Международной
научно-практической конференции

20 апреля 2017 г.
Йошкар-Ола, Россия

ВЕСТНИК 4 (67) **МАГИСТРАТУРЫ** 2017

Научный журнал

издается с сентября 2011 года

Учредитель:

ООО «Коллоквиум»

Полное или частичное воспроизведение материалов, содержащихся в настоящем издании, допускается только с письменного разрешения редакции.

Адрес редакции:

424002, Россия,
Республика Марий Эл,
г. Йошкар-Ола,
ул. Первомайская, 136 «А».
тел. 8 (8362) 65 – 44-01.
e-mail: magisterjourn@gmail.com.
[http:// www.magisterjournal.ru](http://www.magisterjournal.ru).
Редактор: Е. А. Мурзина
Дизайн обложки: Студия PROекТ
Перевод на английский язык
Е. А. Мурзина

Распространяется бесплатно.
Дата выхода: 20.04.2017.

ООО «Коллоквиум»
424002, Россия,
Республика Марий Эл,
г. Йошкар-Ола,
ул. Первомайская, 136 «А».

Главный редактор Е. А. Мурзина

Редакционная коллегия:

Е. А. Мурзина, канд. экон. наук, доцент (главный редактор).

- А. В. Бурков, д-р. экон. наук, доцент (г. Йошкар-Ола).
- В. В. Носов, д-р. экон. наук, профессор (г. Москва)
- В. А. Карачинов, д-р. техн. наук, профессор (г. Великий Новгород)
- Н. М. Насыбуллина, д-р. фарм. наук, профессор (г. Казань)
- Р. В. Бисалиев, д-р. мед. наук, доцент (г. Астрахань)
- В. С. Макеева, д-р. педаг. наук, профессор (г. Орел)
- Н. Н. Сентябрев, д-р. биолог. наук, профессор (г. Волгоград)
- И. В. Корнилова, д-р. истор. наук, доцент (г. Елабуга)
- А. А. Чубур, канд. истор. наук, профессор (г. Брянск).
- М. Г. Церивадзе, канд. филол. наук, профессор (г. Кутаиси).
- Н. В. Мирошниченко, канд. экон. наук, доцент (г. Саратов)
- Н. В. Бекузарева, канд. педаг. наук, доцент (г. Красноярск)
- К. В. Бугаев, канд. юрид. наук, доцент (г. Омск)
- Ю. С. Гайдученко, канд. ветеринарных наук (г. Омск)
- А. В. Марьяна, канд. экон. наук, доцент (г. Уфа)
- М. Б. Удалов, канд. биолог. наук, науч. сотр. (г. Уфа)
- Л. А. Ильина, канд. экон. наук. (г. Самара)
- А. Г. Пастухов, канд. филол. наук, доцент, (г. Орел)
- А. А. Рыбанов, канд. техн. наук, доцент (г. Волжский)
- В. Ю. Сапьянов, канд. техн. наук, доцент (г. Саратов)
- О. В. Раецкая, канд. педаг. наук, преподаватель (г. Сызрань)
- А. И. Мосалёв, канд. экон. наук, доцент (г. Муром)
- С. Ю. Бузоверов, канд. с-хоз. наук, доцент (г. Барнаул)

© ООО «Коллоквиум», 2017

**УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВА АЛЮМИНИЯ (Д16Т)
С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ЭИЛ**

В работе приводятся лабораторные исследования износа деталей с покрытием выполненным методом электроискрового легирования (ЭИЛ). Данный метод нанесения покрытий является одним из наиболее эффективных методов. После нанесения покрытий у деталей существенно повышаются эксплуатационные свойства рабочей поверхности. Этот метод позволяет наносить исключительно токопроводящие покрытия. Целью работы является повышение износостойкости сплава алюминия при помощи ЭИЛ с применением порошкового наноматериала. Проведенные исследования показали, что при использовании ЭИЛ увеличилась микротвердость образца из сплава Д16Т, а так же уменьшился износ упрочненной поверхности детали.

Ключевые слова: Электроискровое легирование, нитрид титана, нитрид ванадия, сплав алюминия, кальцинированная сода, масло индустриальное И20А.

Многие годы вопросы об упрочнении и восстановлении старых или изношенных деталей в автомобильной промышленности не теряют своей актуальности, а в последнее время на предприятиях данная тема поднимается все чаще и чаще. Данная тема стала актуальна в связи увеличением рыночной стоимости многих деталей и комплектующих используемых в производстве.

В условиях сильной загруженности предприятий происходит быстрое старение различной техники, оборудования и запасных частей. Это приводит к возникновению потребности в частой замене изношенных деталей, что является достаточно затратным. В связи с этим огромная часть техники попадает в ремонт не из-за поломок, а из-за износа рабочих поверхностей. Поэтому повышение износостойкости и долговечности деталей, является важной и актуальной задачей современности.

Для устранения либо минимизации количества таких задач различные научные деятели рассматривают множество методов по увеличению износостойкости деталей, а так же по уменьшению себестоимости восстановительных работ, которые могут достигать до полутора раз экономии денежных средств в отличии от покупки совершенно новых деталей.

В машиностроении зачастую из-за высоких технологических и потребительских свойств большое применение имеют детали из сплавов алюминия. Такие детали отличаются высокими конструкционными свойствами, их применяют во многих отраслях машиностроения, судостроения, автомобилестроения. Главной особенностью и преимуществом таких сплавов является высокое значение прочности, коррозионная стойкость, хорошая тепло- и электропроводность. Такие сплавы могут уступать сплавам на основе железа по величине модуля упругости почти в 3 раза, но их твердость и износостойкость оказывается ниже, чем у стали. Это и является их минусом.

При выборе технологического способа восстановления деталей из алюминиевого сплава необходимо уделить внимание величине максимального износа, при которой деталь становится непригодной к дальнейшей эксплуатации. На практике примерно 85% деталей при износе не более $0,2 \pm 0,3$ мм становятся непригодными к эксплуатации, хотя большинство деталей после восстановления (около 80%) имеют максимальный износ до 0,2 мм.

Одним из перспективных и экономичных способов восстановления изношенных деталей из алюминиевых сплавов является нанесение покрытий необходимой толщины методом электроискрового легирования (ЭИЛ). Данный метод нанесения покрытий является одним из наиболее эффективных методов, его можно использовать не только в специально оборудованном помещении, но даже в лабораторных условиях. После нанесения покрытий у деталей существенно повышаются эксплуатационные свойства рабочей поверхности. Этот метод позволяет наносить исключительно токопроводящие покрытия [2].

Для проведения эксперимента по упрочнению поверхности изделий возьмем за образец из сплава алюминия (Д16Т) и используем технологию ЭИЛ с применением порошкового наноматериала (НМ) нитрида ванадия VN нитрида титана TiN в качестве упрочнителей. Нитрид ванадия увеличивает предел

прочности и твердость Д16Т, а так же увеличивает усталостную прочность сплава. Нитрид титан закрепляет все полученные характеристики, а так же увеличивает свариваемость сплава.

Д16Т - это сплав, состоящий из алюминия, магния и меди. Такие сплавы называются дюралюми и применяются в авиационной, судостроительной и космической промышленности. Главное отличие такого сплава - это достаточная легкость, высокая прочность, а также у такого сплава повышенное сопротивление к деформациям во время эксплуатации, и у него хорошая податливость обработке на токарных и фрезеровочных станках [1].

Выбранную технологию упрочнения опробовали на литых заготовках из алюминиевого сплава Д16Т. Поверхность сплава предварительно промыли 10-15 мин в 15 % растворе кальцинированной соды при температуре 50°C, после чего высушили образцы в термокамере. Кальцинированная сода используется как заменитель щелочи, она имеет более низкую стоимость, чем каустическая сода, и поэтому при использовании она более экономична [4]. Следующим этапом было втирание НМ в поверхность металла в течение 4 минут, после чего с помощью установки «SE-5.01» при использовании графитового электрода диаметром 7 мм (графит марки МПГ-7) велась электроискровая обработка поверхности при круговых перемещениях электрода со скоростью 0,05...0,08 мм/мин, частоте вибрации $f = 500$ Гц и рабочем токе $I_p = 1$ А. Из полученных упрочненных заготовок вырезали цилиндрические образцы диаметром 16 мм и высотой 18 мм. На приборе HV-1000 проводилось измерение микротвердости упрочненной поверхности (по Бринеллю, НВ). Далее образцы испытывались на износ. Это мероприятие производили на специально оборудованном стенде при возвратно-поступательном перемещении образцов по контртелу в течение 2,5 ч при удельной нагрузке 12 Н/мм². В качестве смазки использовалось масло индустриальное И20А. И20А, которое применяют в различных системах промышленного оборудования для деталей, подвергающихся воздействию открытого воздуха. Индустриальное масло обладает высокой стойкостью против окисления, а так же ему присуще хорошие деэмульгирующие свойства. Комфортный температурный режим для данного масла от -5 до +70 °С при высоком режиме эксплуатации. Преимущества данного масла заключается в том, что оно дает возможность защитить детали и механизмы от коррозионных отложений, очищает трущиеся части от грязевых образований, способствует замедлению процесса износа деталей, а так же данное масло можно использовать как уплотняющее средство [3]. Данную смазку необходимо непрерывно подавать в зону трения. В процессе выполнения лабораторных исследований определялась потеря массы образцов путем их взвешивания на аналитических весах ВЛ-210 до и после испытания.

Проведенные исследования показали, что ЭИЛ поверхности образцов из сплава Д16Т графитовым электродом повышает ее микротвердость в 1,5 раза по сравнению с необработанным сплавом (с 230 до 352 ед. НВ), а обработка НМ VN с последующей ЭИЛ графитовым электродом — в 1,7 раза (до 393 ед. НВ) и обработка НМ TiN и ЭИЛ графитовым электродом — в 2 раза (до 460 ед. НВ) (рис. 1). При этом износ упрочненной поверхности уменьшился соответственно в 1,3; 2,2 и в 3 раза.



Рис. 1. Результаты проведенных исследований

Тем самым можно прийти к выводу, что для достижения большего повышения стойкости деталей при производстве кокилей, а именно увеличения микротвердости поверхности и уменьшения износа упрочненной поверхности, целесообразно проводить обработку НМ TiN и ЭИЛ графитовым электродом.

Список литературы:

1. Иванов В.И. Увеличение толщины электроискровых покрытий Состояние вопроса. Часть 1. Причины ограничения толщины покрытий. Часть 2. Методы увеличения толщины электроискровых покрытий. Труды ГОСНИТИ том 113. М. 2013 г. 429- 435 с, 150-456 с.
2. Канарчук В.Е., Чигринец А.Д., Голяк О.Л., Восстановление автомобильных деталей. Технология и оборудование. М. : Транспорт.1995 г. - 303 с.
3. Кременский И.Г. Восстановление изношенных отверстий И.Г. Кременский Ремонт восстановление, модернизация. 2014 г. No4
4. Е.В.Юрченко, В.И.Юрченко, А.И. Дикусар Наноструктурирование поверхности из алюминиевых сплавов в условиях электроискрового легирования. Наноинженерия - 2013. -No2. - С.12-24.

ТЫЩЕНКО КРИСТИНА СЕРГЕЕВНА – магистрант, Тольяттинский государственный университет, Россия.



ИННОВАЦИИ В НАУКЕ

*Сборник статей по материалам
LXIV международной научно-практической конференции*

№ 12 (61)
Декабрь 2016 г.

Часть II

Издается с октября 2011 года

Новосибирск
2016

УДК 08
ББК 94
И66

Ответственный редактор: Васинович М.А.

Председатель редколлегии: д-р психол. наук, канд. мед. наук **Дмитриева Наталья Витальевна**.

Редакционная коллегия:

канд. юрид. наук **Л.А. Андреева**,
канд. техн. наук **Р.М. Ахмеднабиев**,
д-р техн. наук, проф. **С.М. Ахметов**,
канд. юрид. наук **О.А. Бахарева**,
канд. мед. наук **В.П. Волков**,
канд. пед. наук **М.Е. Виговская**,
канд. тех. наук, д-р пед. наук
О.В. Виштак,
канд. филос. наук **Т.А. Гужавина**,
д-р филол. наук **Е.В. Грудева**,
канд. техн. наук **Д.В. Елисеев**,
канд. юрид. наук **В.Н. Жамулдинов**,
канд. физ.-мат. наук **Т.Е. Зеленская**,
канд. хим. наук **Ж.А. Ибатаев**,
канд. пед. наук **С.Ю. Иванова**,
д-р психол. наук **В.С. Карапетян**,
канд. филос. наук **В.Е. Карпенко**,
д-р хим. наук **В.О. Козьминных**,
канд. техн. наук **А.Ф. Копылов**,
канд. физ.-мат. наук **В.С. Королев**,
канд. геол.-минерал. наук **Н.Г. Корвет**,
канд. экон. наук, канд. филол. наук
С.Ю. Костылева,
канд. искусствоведения **И.М. Кривошей**
д-р культурологии, проф. **И.А. Купцова**
канд. ист. наук **К.В. Купченко**,

д-р биол. наук, проф. **М.В. Ларионов**,
канд. мед. наук **Е.А. Лебединцева**,
канд. пед. наук **Т.Н. Ле-ван**,
канд. экон. наук **Г.В. Леонидова**, канд.
техн. наук **С.П. Максимов**,
канд. филол. наук **Ж. Н. Макушева**,
д-р мед. наук **О.Ю. Милушкина**,
канд. филол. наук **Т.В. Павловец**,
д-р социол. наук **И.В. Попова**,
канд. ист. наук **Д.В. Прошин**,
канд. техн. наук **А.А. Романова**,
канд. физ.-мат. наук **П.П. Рымкевич**,
канд. психол. наук **Н.В. Сидячева**,
канд. ист. наук **И.С. Соловенко**,
канд. ист. наук **А.Н. Сорокин**,
д-р филос. наук, канд. хим. наук
Е.М. Сулеймен,
д-р филос. наук **Я.В. Тарароев**,
канд. биол. наук **В.Е. Харченко**,
д-р пед. наук, проф. **Н.П. Ходакова**,
д-р филол. наук **Л.Н. Чурилина**,
канд. ист. наук **В.Р. Шаяхметова**,
канд. экон. наук **Н.Н. Юманова**,
канд. с-х. наук **Т.Ф. Яковишина**,
канд. пед. наук **С.Я. Якушева**.

И66 **Инновации в науке** / Сб. ст. по материалам LXIV междунар. науч.-
практ. конф. № 12 (61). Часть II. Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2016. 130 с.

Учредитель: АНС «СибАК»

Сборник статей «Инновации в науке» включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). Статьи, принятые к публикации, размещаются в полнотекстовом формате на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU.

При перепечатке материалов издания ссылка на сборник статей обязательна.

ISSN 2308-6009

© АНС «СибАК», 2016

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА С ПОКРЫТИЕМ, НАНЕСЕННЫМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ МЕТОДОМ

Тыщенко Кристина Сергеевна

*студент Тольяттинского государственного университета,
РФ, г. Тольятти
E-mail: kristina.kz_93@mail.ru*

Логинов Николай Юрьевич

*канд. техн. наук, доц.
Тольяттинского государственного университета,
РФ, г. Тольятти,
E-mail: loginovnik@mail.ru*

THE EXPERIENCE OF USING THE TOOL WITH THE COATING APPLIED ELECTRO-SPARK METHOD

Kristina Tyshenko

*student of Togliatti State University,
Russia, Togliatti*

Nikolay Loginov

*candidate of Science,
assistant of professor of Togliatti State University,
Russia, Togliatti*

АННОТАЦИЯ

Приведен опыт применения сверл с покрытием, выполненным электроискровым легированием. Описаны материалы покрытия и основы. Проанализирован эффект от нанесения покрытия.

ABSTRACT

The experience of using drills with a coating made of electro-spark alloying is given. The coating materials and foundations are described. The effect of coating is analyzed.

Ключевые слова: электроискровое легирование, покрытие, испытание, инструмент.

Keywords: electro-spark alloying, coating, testing, tool.

Существует много методов повышения стойкости режущего инструмента. Одним из таковых является электроискровое легирование (ЭИЛ). Такой способ, в отличие от остальных, имеет ряд преимуществ, а именно локальность нанесения покрытий, возможность обработки на воздухе, простота оборудования [1–3]. Наряду с преимуществами этот метод характерен и следующими недостатками: высокая шероховатость поверхности детали после ЭИЛ, малая автоматизация процесса [2].

Метод ЭИЛ нашел применение для увеличения ресурса различного рода инструментов и процессов [4–6].

В работе представлены испытания сверл на производстве. Показателем эффективности являлся ресурс опытных образцов и сравнивался с серийным инструментом. Наряду с этим оценивалась точность обработки поверхности и ее шероховатость.

Электроискровая обработка образцов проводилась на оборудовании «UR-121» электродами из твердого сплава Ст-1 (табл. 1) диаметром 2 мм.

Таблица 1.

Характеристики материала легирующего электрода

Название электрода	Структура электрода	Твердость, НРА	Плотность, г/см ³	$\sigma_{ИЗГ}$, кг/мм ²
Ст-1	79TiC-16Ni-5Mo	90,0-91,0	5,4–5,43	100–110

ЭИЛ велось по задней и передней поверхности сверл на чистовых режимах малой мощности. Выбор таких режимов вызван требованиями шероховатости обрабатываемой поверхности инструмента, которая сказывается на изделии. Перед упрочнением образцы проходили необходимую подготовку, проводилась очистка обрабатываемых поверхностей и обезжиривание. Покрытие наносилось на полную длину режущей кромки и перемычку сверл. Ширина покрытия составляла приблизительно 2 мм, а толщина зависела от режима упрочнения и варьировалась в пределах от 5 до 15 мкм.

В таблице 2 представлены основные данные проведенного эксперимента.

Таблица 2.

Параметры обработки детали

Материал инструмента	Обрабатываемый материал	Деталь	Режимы работы
11M5Ф	AK12M	Картер сцепления	V=38,2 м/мин; S=241,6 мм/мин

Упрочненный инструмент работал на автоматической линии, оператор которой вел непрерывное наблюдение за параметрами обработки. Условием замены инструмента являлось снижение параметров качества обработки за пределы допустимых.

Обрабатываемой на автоматической линии деталью являлся картер сцепления, материалом которого был алюминиевый сплав АК12М. На этом оборудовании одновременно работает 42 различных инструмента. Время такта обработки составляло 32 секунды, а период замены этих инструментов составлял 18 минут, в связи с этим увеличение износостойкости хотя бы некоторых позиций существенно увеличивало коэффициент использования оборудования. Режимы обработки представлены в табл. 2. Нормативная стойкость сверл составляла 1000 деталей при износе по задней поверхности 0,3 ... 0,4 мм. Опытные сверла с покрытием имели стойкость от 10000 до 20000 деталей при износе 0,3 ... 0,4 мм по задней поверхности, при этом разброс размеров и качество поверхности были в заданных чертежом пределах. Этот же инструмент проходил испытания после переточки, проводимой по задней поверхности, без электроискрового упрочнения.

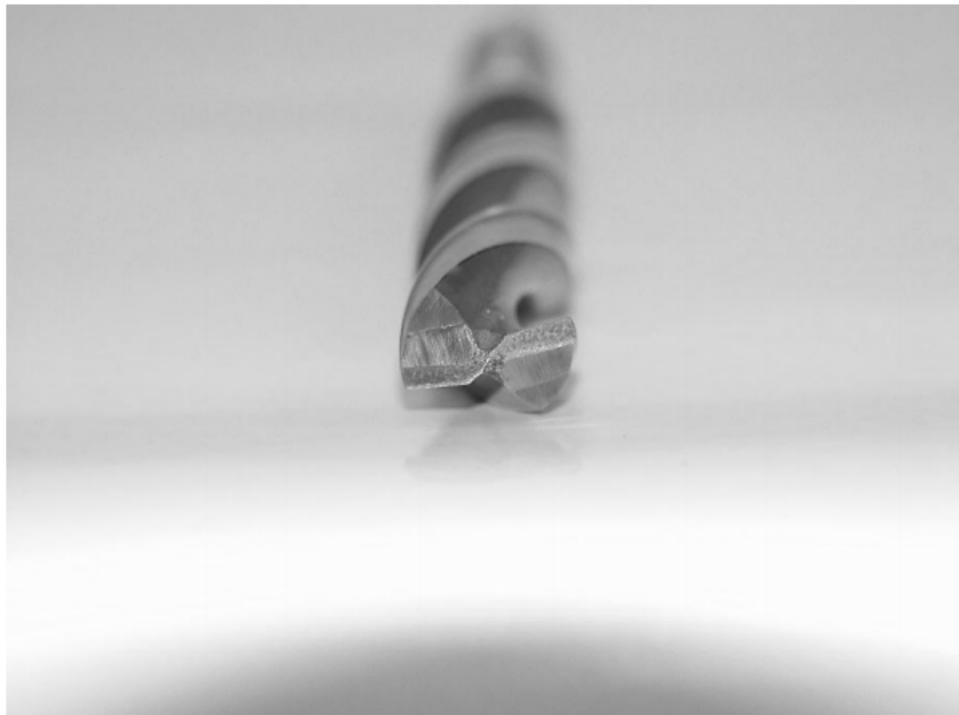


Рисунок 1. Режущая часть сверла с покрытием

Оказалось, что стойкость переточенных сверл находится в пределах 1500 ... 1600 деталей. Это свидетельствует о необходимости производить ЭИЛ задней поверхности после каждой переточки. Упрочнение инструмента после каждой переточки увеличивает его суммарный срок службы до 160 раз.

Таким образом, по работе можно сделать следующие выводы:

1) Инструмент с покрытием, выполненным методом ЭИЛ, имеет меньший износ и существенно более высокую стойкость.

2) Производственные испытания показали, что для рационального использования инструмента с покрытиями, наносимыми методом ЭИЛ, необходимо на заточных участках после каждой переточки инструмента наносить новое покрытие по основным поверхностям.

Список литературы:

1. Верхотуров А.Д., Коневцов Л.А., Подчерняева И.А., Востриков Я.А. Особенности формирования измененного поверхностного слоя в условиях высокоэнергетического ЭИЛ сталей композитными материалами // Вестник института тяги и подвижного состава. – 2014. – № 5 (48). – С. 73–79.
2. Коломейченко А.В., Кузнецов И.С. Теория и практика электроискрового упрочнения режущих деталей машин аморфными и нанокристаллическими сплавами. – Орел: Орловский государственный аграрный университет, 2015. – 174 с.
3. Кузнецов И.С. Расчетная оценка массопереноса при электроискровой обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 12 (132). – С. 41–44.
4. Копейкин С.В., Пилипенко П.А., Ингеманссон А.Р. Повышение эффективности чистовой обработки глубоких отверстий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 2 (63). – С. 78–82.
5. Логинов Н.Ю., Воронов Д.Ю. Фрезерование радиусных участков штампов концевыми фрезами // Научные труды Sworld. – 2012. – Т. 7, № 3. – С. 70–71.
6. Некрасов Н.С., Логинов Н.Ю., Зотов А.В., Кузьмич И.В. Выбор оптимальной конструкции концевой фрезы при черновой обработке пресс-формы // Технические науки – от теории к практике. – 2014. – № 35. – С. 31–36.