

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования «Барановичский государственный университет»

М. В. Нерода  
Н. В. Спиридонов  
И. О. Соков

**ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ  
УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ  
МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ  
ШЛИФОВАНИЕМ**

Монография

Барановичи  
БарГУ  
2015

УДК 621.9.048(035.3)

**Нерода, М. В.**

Технология обработки упрочняющих покрытий магнитно-электрическим шлифованием : монография / М. В. Нерода, Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов ; М-во образования Респ. Беларусь, Барановичский государственный университет. — Барановичи : БарГУ, 2015. — 203 с. : ил. ISBN 978-985-498-656-2.

Содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса магнитно-электрического шлифования (МЭШ) газотермических упрочняющих покрытий. Рассмотрены физические закономерности процесса МЭШ. На основе разработанной методики проведены эксперименты и получены математические модели влияния технологических режимов МЭШ на качество поверхности и производительность обработки, что позволило определить оптимальные режимы шлифования упрочняющих покрытий из материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2 и сормайта.

Адресуется научным и научно-техническим работникам, аспирантам и студентам технических специальностей.

Рис. 95. Табл. 36. Прил. 12.

Рекомендовано редакционно-издательским советом учреждения образования «Барановичский государственный университет»

**Авторы:**

М. В. Нерода — гл. 1, 3—5,  
Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов — гл. 2

**Рецензенты:**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет» Н. А. Свидунович,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой упрочнения деталей машин Государственного научного учреждения «Объединённый институт машиностроения» Национальной академии наук Беларуси  
М. А. Белоцерковский

ISBN 978-985-498-656-2

© БарГУ, 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Введение</i> .....	6
-----------------------	---

### **Глава 1 Анализ методов шлифования упрочняющих покрытий, использующих в зоне обработки механическую, электрическую и магнитную энергии**

1.1 Физико-механические свойства упрочняющих покрытий и методы их нанесения на поверхности деталей машин .....	7
1.2 Методы шлифования упрочняющих покрытий, использующие в зоне обработки механическую, электрическую и магнитную энергии .....	12
1.2.1 Влияние видов энергетического воздействия на производительность обработки упрочняющих покрытий .....	17
1.2.2 Влияние видов энергетического воздействия на качество поверхности упрочняющих покрытий .....	21
1.3 Перспективы применения МЭШ для обработки упрочняющих покрытий .....	28
1.4 Выводы .....	30

### **Глава 2 Материалы, оборудование и методики проведения исследований**

2.1 Обоснование выбора марок материалов обрабатываемых упрочняющих покрытий .....	32
2.2 Оборудование и методики проведения исследований .....	33
2.2.1 Общая схема методики проведения экспериментов .....	33
2.2.2 Методики исследования структуры и шероховатости поверхности упрочняющих покрытий, определения твёрдости и температуры в зоне обработки МЭШ .....	35
2.2.3 Методики определения производительности обработки и изменения химического состава упрочняющих покрытий .....	37
2.2.4 Методика определения прочности сцепления упрочняющих покрытий с основой .....	38
2.2.5 Опытно-промышленные установки для МЭШ упрочняющих покрытий .....	40
2.3 Планирование экспериментов и обработка экспериментальных данных .....	43
2.4 Выводы .....	46

### Глава 3 Физические закономерности МЭШ упрочняющих покрытий

3.1 Виды энергетического воздействия на упрочняющее покрытие при МЭШ .....	47
3.2 Закономерности процесса резания упрочняющих покрытий зёрнами абразивного круга в процессе МЭШ .....	50
3.3 Электроискровые и электродуговые процессы в зоне обработки МЭШ и их влияние на производительность обработки и качество упрочняющих покрытий .....	54
3.4 Влияние электромагнитного поля на формирование поверхности упрочняющих покрытий при МЭШ .....	64
3.5 Термические процессы в зоне обработки МЭШ .....	76
3.6 Выводы .....	92

### Глава 4 Исследование и оптимизация режимов МЭШ упрочняющих покрытий

4.1 Исследование влияния режимов МЭШ на производительность обработки газотермических упрочняющих покрытий из материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2 и наплавки сормайтот ГН1 .....	95
4.2 Исследование влияния режимов МЭШ на качество газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2 и наплавки сормайтот ГН1 .....	100
4.2.1 Влияние режимов МЭШ на шероховатость поверхности упрочняющих покрытий .....	100
4.2.2 Исследование влияния режимов МЭШ на структуру газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 .....	106
4.2.3 Влияние режимов МЭШ на изменение химического состава поверхностного слоя газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 .....	118
4.2.4 Исследование влияния режимов МЭШ на твёрдость напылённых газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 .....	121
4.3 Влияние режимов МЭШ на прочность сцепления напылённых упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 с основой .....	125
4.4 Износостойкость газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР2 и ПГ-СР4 после МЭШ .....	128
4.5 Выводы .....	129

**Глава 5 Внедрение в производство технологических процессов  
МЭШ поверхностей с защитными покрытиями**

5.1 Разработка технологий МЭШ поверхностей деталей машин с упрочняющими покрытиями . . . . .	131
5.1.1 Технология МЭШ с оплавлением напылённых газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 . . . . .	132
5.1.2 Технология МЭШ оплавленных газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 . . . . .	133
5.1.3 Технология МЭШ наплавленных упрочняющих покрытий . . . . .	135
5.2 Технико-экономическое обоснование внедрения технологических процессов МЭШ . . . . .	135
5.2.1 Внедрение технологических процессов МЭШ упрочняющих покрытий в производство . . . . .	135
5.2.2 Внедрение МЭШ в учебный процесс . . . . .	137
5.3 Выводы . . . . .	137
Заключение . . . . .	139
Приложения . . . . .	141
Список использованных источников . . . . .	194
Резюме . . . . .	205
Резюмэ . . . . .	206
Summary . . . . .	207

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение в промышленном и ремонтном производствах получили упрочняющие технологии, позволяющие повышать эксплуатационные свойства поверхностей деталей машин и экономить материальные и трудовые ресурсы. Как правило, эти технологии ориентированы на придание повышенных физико-механических свойств поверхностному слою при сохранении неизменными свойств основного металла детали. Среди традиционных способов упрочнения наибольшее распространение получили газотермические методы нанесения упрочняющих покрытий и методы наплавки. Для формирования покрытий используются материалы, содержащие соединения никеля, хрома, а также сормайта, которые характеризуются высокими физико-механическими свойствами (твёрдостью, вязкостью), что затрудняет их последующую механическую обработку. Низкая производительность обработки, разупрочнение материала поверхностного слоя упрочняющих покрытий, происходящее вследствие высоких локальных температур и плохой обрабатываемости, требуют поиска и разработки новых методов механической обработки.

Вместе с тем до настоящего времени недостаточно полно решены вопросы, касающиеся механической обработки упрочняющих покрытий деталей машин, в частности шлифования, что приводит к повышенному расходу инструмента, низкой производительности обработки и, в результате, сдерживает их широкое применение в промышленности.

Повышение производительности обработки упрочняющих покрытий при восстановлении деталей машин может быть осуществлено путём решения двух основных задач: совершенствованием традиционных способов обработки резанием и разработкой принципиально новых технологических процессов, основанных на концентрации дополнительных видов энергии в зоне обработки. Особый интерес в последнее время вызывает интенсификация обработки упрочняющих покрытий электрофизическими методами.

Например, для обработки поверхностей деталей из высоколегированных сталей применяется магнитно-электрическое шлифование [2; 3] (далее — МЭШ). Учитывая, что упрочнённые или восстановленные самофлюсующимися сплавами на основе никеля и хрома и сормайтом поверхности деталей характеризуются высокими значениями шероховатости ( $Ra$  100...120 мкм) поверхности и твёрдости (58...62 HRC), толщиной нанесённого слоя от 0,5 до 2,5 мм, представляется перспективным для их обработки применить метод МЭШ. Однако в литературе отсутствуют сведения о механизме процессов, происходящих в зоне обработки, влиянии режимов МЭШ на физико-механические и эксплуатационные свойства упрочняющих покрытий.

Из вышеизложенного следует, что разработка технологических процессов шлифования упрочнённых поверхностей деталей с введением в зону обработки электрической и магнитной энергий в целях повышения производительности и качества обработки является актуальной задачей и требует проведения научных исследований.

# ГЛАВА 1

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ШЛИФОВАНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ В ЗОНЕ ОБРАБОТКИ МЕХАНИЧЕСКУЮ, ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ И МАГНИТНУЮ ЭНЕРГИИ

### 1.1 Физико-механические свойства упрочняющих покрытий и методы их нанесения на поверхности деталей машин

Повышение надёжности изделий, работающих в сложных условиях, при воздействии высоких нагрузок, температур в условиях абразивного изнашивания, а также других видов воздействия потребовало разработки и создания технологических процессов упрочнения и восстановления.

Повысить износостойкость рабочих поверхностей изделий можно изменением химического состава материала поверхности путём внедрения легирующих компонентов для образования структур, хорошо сопротивляющихся процессам изнашивания; механическим и тепловым воздействием на поверхность металла, приводящим к структурным изменениям в поверхностном слое детали; нанесением на поверхности деталей машин износостойких покрытий [4].

Наряду с химико-термическими способами упрочнения (цементация, азотирование) также развиваются методы нанесения на поверхности деталей упрочняющих покрытий и различные виды наплавки [5—7]. Среди них распространёнными являются газопламенное напыление порошковыми самофлюсующимися материалами и электродуговая наплавка сормайтотом.

*Электродуговая наплавка* основана на том, что при сближении двух электродов происходит электрический разряд, при котором выделяется энергия, достаточная для расплавления частицы металла. Температура в зоне контакта достигает 10 000°C, что позволяет использовать для наплавки тугоплавкие материалы типа сормайтота.

Покрытия, полученные при магнитно-электрическом упрочнении для восстановления размеров и форм изношенных деталей,

требуют последующей механической обработки [5]. Триботехнические характеристики покрытий, полученных при магнитно-электрическом упрочнении, после различных способов финишной обработки представлены в работе [8]. По ряду причин и, в частности, из-за высоких физико-механических свойств и небольшой толщины покрытий, наиболее целесообразно обрабатывать их шлифованием. Абразивным инструментом, используемым при шлифовании, являются алмазные круги на металлической или бакелитовой связке.

Наплавка сормайтотом ГН1 проводилась электродуговым способом специальными литыми электродами диаметром 3 мм. Толщина наплавленного сормайтотом слоя находится в пределах 3,5...5,0 мм. Твёрдость наплавленного сормайтотом ГН1 покрытия составляет 60...62 HRC.

От покрытий, наплавляемых сормайтотом, требуется, чтобы они противостояли деформации в процессе работы при повышенной нагрузке. Это достигается термической обработкой деталей после наплавки. Для снятия напряжений детали после наплавки подвергают отжигу по режимам, установленным для материала детали в соответствии с характеристиками применяемого упрочняющего покрытия из сормайтотом ГН1 (таблица 1.1).

*Газопламенное напыление.* Сущность газопламенного напыления заключается в том, что горючий газ и окислитель смешиваются при заданном соотношении расходов, а образовавшаяся горючая смесь через сопловое устройство подаётся к поверхности изделия, где поджигается и образует факел. В него вводят порошок, который расплавляется и под действием струи горящих газов перемещается

Т а б л и ц а 1.1 — Характеристики применяемого упрочняющего покрытия сормайтотом ГН1

Способ наплавки	Случаи применения	Примеры применения	Противостояние видам износа
Электродуговая наплавка	На новых деталях в целях повышения износостойкости; при восстановлении деталей после износа	Крупногабаритные детали, предварительный подогрев которых для наплавки газом затруднителен или невозможен	Механический износ

на поверхность детали. Процесс газопламенного нанесения покрытий на рабочие поверхности деталей машин позволяет создавать в зависимости от материалов и технологии металлизации слои с определёнными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. В результате этого повышаются износостойкость, стойкость против коррозии, эрозии, кавитации и другие свойства деталей машин [9—11].

Установка ТРУ-БПИ для газопламенного нанесения покрытий (рисунок 1.1) комплектуется распылителем 4 и газовой горелкой 5 с порошковым питателем, соединительными шлангами, пультом управления 3 и узлом газопитания 1, состоящим из ацетиленового и кислородного баллонов с редукторами и воздушного маслоотделительного фильтра 2.

Для увеличения износостойкости деталей методами плазменного и газопламенного напыления применяются самофлюсующиеся порошковые материалы на основе никеля и хрома, легированные бором и кремнием [12].

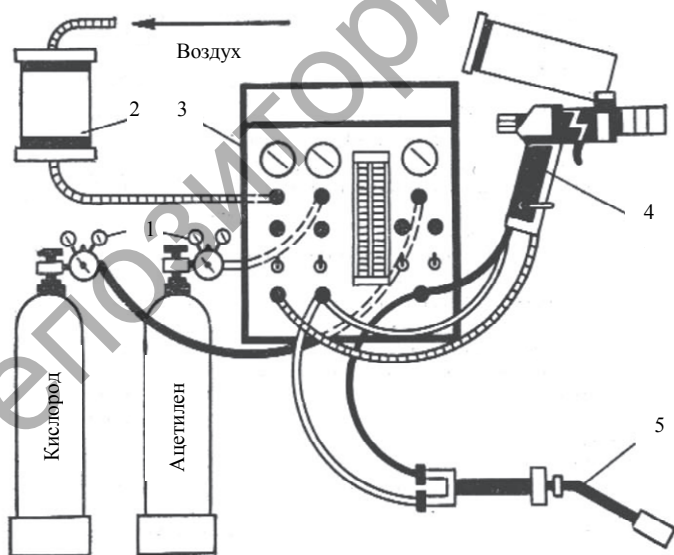
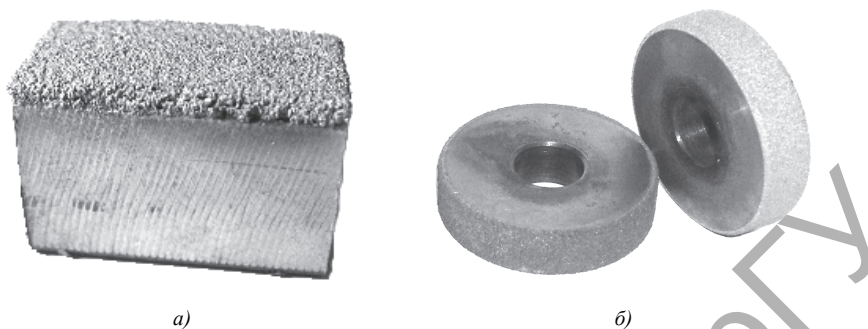


Рисунок 1.1 — Компонровка установки для газопламенного порошкового напыления [11]

Порошки для газопламенного нанесения покрытий представляют собой сплавы на основе никеля (кобальта, железа) и хрома с добавлением не менее 1,5% бора и кремния. Они характеризуются тем, что после напыления могут быть оплавлены на воздухе. Образующиеся при их плавлении соединения бора и кремния связывают окислы никеля и хрома, а также железа в стекловидные шлаки, всплывающие на поверхность оплавленного металла и защищающие его от дальнейшего окисления. При этом на детали образуется плотное, практически беспористое покрытие. Прочность сцепления с основным металлом после оплавления составляет 180...200 МПа. Следует отметить, что без оплавления после напыления пористость данных покрытий достигает 25...30% при прочности сцепления, не превышающей 50...65 МПа [11]. Твёрдость оплавленных упрочнённых покрытий из самофлюсующихся сплавов достигает значений 58...62 HRC. Они обладают высокой износостойкостью в условиях эрозионного и абразивного изнашивания. Их износостойкость по отношению к износостойкости стали может составлять 10:1. Высокая износостойкость покрытий из самофлюсующихся сплавов обусловлена особенностями их структуры, представляющей собой основу из твёрдого раствора никеля с хромом и твёрдых, равномерно расположенных включений боридов, карбидов и силицидов.

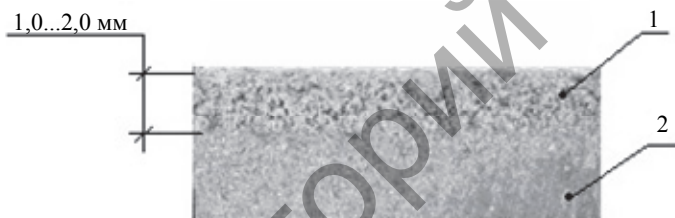
Важными свойствами покрытий из самофлюсующихся материалов являются высокая стойкость к окислению при высоких температурах и химическая стойкость во многих агрессивных средах: соляной, уксусной, плавиковой, борной и других кислотах, в расплавах стекла. Промышленно выпускаются композиции на основе самофлюсующихся сплавов, представляющие их механическую смесь с карбидами тугоплавких металлов. Покрытия из самофлюсующихся сплавов сохраняют свои физико-механические свойства при температурах 500...800°C.

Получены фотографии опытных образцов с газотермическими упрочняющими покрытиями из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 (рисунок 1.2) поверхностного слоя покрытия, полученного газопламенным напылением самофлюсующимся порошком марки ПГ-СР4 (рисунок 1.3). Поверхность упрочняющего покрытия без оплавления имеет пористую структуру. Пористость покрытия находится в пределах от 25 до 30% [11].



а) — прямоугольный образец; б) — цилиндрические образцы

Рисунок 1.2 — Образцы с газотермическими упрочняющими покрытиями из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2



1 — упрочняющее покрытие; 2 — основа

Рисунок 1.3 — Напылённое на плоскую основу газотермическое упрочняющее покрытие из самофлюсующегося порошкового материала ПГ-СР4 (вид сбоку.  $\times 60$ )

Толщина напылённых газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов ПГ-СР2, ПГ-СР4 составляет 1,0...1,2 мм.

Твёрдость газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов ПГ-СР2, ПГ-СР4 находится в пределах 40...45 HRC и 58...62 HRC соответственно. Исходная шероховатость поверхности  $Ra$  составляет 120...140 мкм.

Данные материалы покрытий являются распространёнными на машиностроительных предприятиях, использующих технологию газопламенного напыления, однако из-за высоких физико-механи-

ческих свойств покрытий (вязкости и твёрдости) существует сложность в их последующей механической обработке. Эта проблема требует проведения дальнейших исследований по разработке методов высокопроизводительной обработки упрочняющих покрытий.

Особый интерес представляет интенсификация процесса шлифования упрочняющих покрытий путём комбинированного воздействия на обрабатываемую поверхность механической, электрической и магнитной энергий в целях повышения качества и производительности обработки.

## **1.2 Методы шлифования упрочняющих покрытий, использующие в зоне обработки механическую, электрическую и магнитную энергии**

Шлифование, являясь одним из производительных методов обработки металлов, обеспечивает высокую точность обработки и размеров деталей (6...7 квалитет), малую шероховатость поверхности  $Ra$ , составляющую 0,32...0,16 мкм, и в результате уменьшения припусков может заменить токарные, строгальные и фрезерные операции. На современном этапе развития технологии обработки упрочняющих покрытий, а также наплавов сплавами актуальным является применение при шлифовании токопроводящих абразивных кругов и введение в зону обработки дополнительной энергии технологического тока. Это обеспечивает значительный рост производительности труда, снижение затрат на обработку и повышение эффективности производства при сохранении высоких эксплуатационных свойств обработанных поверхностей.

Процессы, лежащие в основе методов обработки с применением электрических и магнитных полей в зоне обработки, подразделяют на четыре группы: электроэрозионные, при которых материал покрытия удаляется в результате действия электрических разрядов; электрохимические, использующие преобразование электрической энергии в энергию, которая затрачивается на анодное растворение заготовки; лучевые, основанные на воздействии высококонцентрированных потоков энергии, и ультразвуковые, в которых обрабатываемый материал механически скалывается [13].

Перспективным направлением при обработке упрочняющих покрытий является применение электрофизических способов обработки [14—16], к которым относят электроискровой, электроимпульсный, анодно-механический, ультразвуковой, а также лучевой и др.

Электрофизические методы обработки имеют преимущества по сравнению с традиционным шлифованием: возможность производить обработку поверхностей заготовок с высокими физико-механическими свойствами (твёрдостью, вязкостью), обработка которых обычными способами затруднена; способность повысить производительность обработки; возможность изменения свойств материала покрытия в заданном направлении и т. д.

Рассмотрим основные способы шлифования труднообрабатываемых материалов.

#### *Алмазное шлифование.*

Одним из наиболее часто используемых способов резания труднообрабатываемых материалов, в том числе упрочняющих покрытий, является алмазное шлифование (далее — АШ) [17]. Рабочим инструментом при АШ служит алмазный круг на различных связках.

Достоинством данного способа является высокая производительность обработки (до  $1\,500\text{ мм}^3/\text{мин}$ ), однако твёрдость и вязкость материала обрабатываемых упрочняющих покрытий приводит к повышению сил резания, температуры в зоне обработки, повышению удельного расхода алмазов, что делает процесс шлифования экономически не выгодным [18].

#### *Электроалмазное шлифование.*

Электроалмазное шлифование (далее — ЭАШ) представляет собой высокопроизводительный способ обработки износостойких покрытий, титановых сплавов, вольфрамокобальтовых сплавов и жаропрочных сталей [18].

Работа токопроводящего круга заключается во внедрении алмазных зёрен в заготовку при приложении нормальной силы и срезании части припуска. При протекании постоянного тока через электролит, находящийся между зёрнами круга, связкой и деталью, происходит электрохимическое растворение обрабатываемого материала и облегчается работа алмазных зёрен. Вследствие контакта связки с заготовкой и высокой частоты вращения круга

в зоне обработки возникают электроэрозионные процессы, приводящие к изменению свойств обрабатываемого материала и появлению на его поверхности электроэрозионных лунок [18].

Достоинством способа является высокая производительность процесса, возможность обработки материалов с высокими физико-механическими свойствами. Недостатком служит повышенный расход алмазных зёрен, применение дорогостоящего инструмента и специального оборудования [18].

*Электроабразивное шлифование* по принципу обработки и оборудованию в основном соответствует процессу ЭАШ. Производительность данного способа на 1 мм ширины круга при глубине врезания до 1 мм достигает  $1\ 000\ \text{мм}^3/\text{мин}$  [6] при плотности тока  $1,2 \dots 1,4\ \text{А}/\text{мм}^2$ .

Положительной особенностью процесса является применение более дешевого инструмента по сравнению с АШ, но применение сложного оборудования удорожает процесс обработки [6].

*Электроэрозионное шлифование.*

Электроэрозионное шлифование является одной из технологических операций электроэрозионной обработки. Процесс электроэрозионного шлифования основан на эффекте расплавления и испарения микропорций материала под тепловым воздействием импульсных электрических разрядов между поверхностью обрабатываемой детали и электрод-инструментом, погружённым в жидкую среду.

Электроэрозионное шлифование имеет следующие основные особенности:

1) твёрдость электрод-инструмента не обязательно должна превышать твёрдость обрабатываемого материала, поэтому электрод-инструменты изготавливают из сплавов цветных металлов. Использование этих сплавов упрощает и удешевляет производство таких электродов;

2) производительность процесса и качество обработки не зависят от твёрдости материала заготовки;

3) во время обработки заготовка не контактирует с электрод-инструментом. Между ними имеется межэлектродный зазор, который позволяет снизить действующие на изделие усилия. При этом отсутствуют точечные усилия, необходимые на преодоление межмолекулярных связей при отрыве частиц материала;

4) легко осуществимы сложные технологические операции (обработка фасонных поверхностей на изделиях из твёрдых и сверхтвёрдых материалов, тонкостенных легкодеформируемых изделий, пакетов магнитопроводов при устранении замыкания пластин по поверхности обработки и т. д.), которые трудно выполнить или вообще нельзя выполнить каким-либо способом механической обработки;

5) при правильном выборе технологического процесса значительно снижается трудоёмкость обработки по сравнению с обработкой резанием, так как уменьшается число операций и переходов при обработке деталей сложной формы. В результате повышается производительность труда, уменьшается брак;

6) обработка заготовки ведётся в жидкой, вязкой диэлектрической среде, обеспечивающей демпфирование электрод-инструмента. Этот процесс шлифования применяют для чистовой обработки труднообрабатываемых материалов, магнитных и твёрдых сплавов, износостойких покрытий и упрочнённых поверхностей деталей [19].

Отклонение профиля после электроэрозионного шлифования лежит в пределах 0,005...0,05 мм, шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  составляет 2,5...0,25 мкм, производительность — до 260 мм<sup>3</sup> / мин. Дефектный слой может достигать на черновых высокопроизводительных режимах до 0,2 мм; на чистовых и доводочных — менее 0,003 мм [20].

#### *Магнитно-абразивная обработка.*

В последние годы широко исследуются и получают практическое применение методы обработки упрочнённых поверхностей деталей машин, использующие энергию магнитного поля, созданного электромагнитом на постоянном или выпрямленном переменном токе [21—23].

К ним можно отнести магнитно-абразивную обработку (далее — МАО) [24].

Особенностями МАО являются непрерывный контакт порошка с обрабатываемой поверхностью детали, что даёт возможность повысить точность её геометрических размеров и формы, снизить циклические нагрузки на систему «станок—приспособление—инструмент—деталь»; отсутствие жёсткого крепления абразивного зерна в связке, способствующее самопроизвольному

нивелированию режущего инструмента относительно формы обрабатываемой поверхности, устраняющее вероятность появления в зоне обработки критических давлений и температур и повышающее физико-механические показатели качества поверхностного слоя материала изделия; возможность управления жёсткостью инструмента и регулирование за счёт этого съёма металла с формообразующей поверхности изделия; отсутствие трения связки о поверхность изделия, существенно снижающее температуру в зоне абразивной обработки; возможность резания наиболее острой кромкой зерна магнитно-абразивного порошка (не нужна периодическая перезаточка инструмента); осуществление размерной или безразмерной (декоративной) обработки, обеспечивающей за 10...120 с съём металла или сплава 0,02...0,5 мм на диаметр; снижение шероховатости с 1,25...0,32 мкм до 0,08...0,01 мкм или с 10,0...2,5 мкм до 0,32...0,08 мкм; сохранение геометрических размеров в пределах допуска, оставленного для операции шлифования; исключение засаливания инструмента, что позволяет шлифовать мягкие и вязкие материалы [25; 26].

#### *Электрохимическое шлифование.*

При электрохимическом шлифовании (далее — ЭХШ) разрушение обрабатываемой поверхности происходит за счёт анодного растворения и абразивного воздействия зёрен шлифовального круга. Производительность процесса достигает 2 500 мм<sup>3</sup>/мин. Точность обработки находится в пределах 0,08...0,15 мм. Шероховатость обработанной поверхности находится в пределах Ra 2,5...1,25 мкм.

Рабочая среда — электролиты различного состава [8]. К основным недостаткам способа следует отнести сложное оборудование и низкую экологическую чистоту процесса.

#### *Магнитно-электрическое шлифование.*

Наиболее эффективными в ряде случаев являются комбинированные методы обработки, к числу которых относится МЭШ [1]. В его основе лежат процессы, связанные с механическим резанием зёрнами абразива, электроэрозионным и термическим воздействием технологического тока на поверхность упрочняющего покрытия под влиянием внешнего магнитного поля. МЭШ является высокопроизводительным способом обработки токопроводящих материалов с высокими физико-механическими свойствами.

Производительность обработки МЭШ может достигать  $3\ 000\ \text{мм}^3 / \text{мин}$ . Шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  находится в пределах  $0,32 \dots 1,25\ \mu\text{м}$ .

Особенностью способа является возможность изменения свойств поверхностного слоя обрабатываемого материала в заданном направлении за счёт действия технологического тока и внешнего магнитного поля.

Данный способ имеет достаточное количество преимуществ по сравнению с вышеприведёнными способами обработки. Высокая производительность процесса достигается за счёт концентрации в зоне обработки дополнительной энергии электромагнитного поля и энергии технологического тока. При обработке поверхности не требуется правка круга, так как происходит его самозатачивание за счёт электроискрового действия технологического тока на связку. С экономической точки зрения, кроме высокой производительности обработки, данный способ выгодный в применении, так как не требует создания дорогостоящего оборудования, а может быть реализован на серийных станках различных групп путём модернизации основных узлов. Также следует отметить, что не требуется применение дорогостоящего алмазного инструмента.

### **1.2.1 Влияние видов энергетического воздействия на производительность обработки упрочняющих покрытий**

Производительность электроэрозионного шлифования, как правило, оценивается не выработкой, а объёмом металла  $M_{об}$ , удаляемого с обрабатываемой поверхности в единицу времени (в  $\text{мм}^3 / \text{мин}$ ). Величину  $M_{об}$  рассчитывают по соотношению

$$M_{об} = 60 \cdot \psi_M V_3 \bar{f},$$

где  $\psi_M$  — коэффициент, учитывающий наличие не вызывающих эрозию импульсов короткого замыкания и холостых импульсов;

$V_3$  — средний объём металла, удаляемого за один импульс, м<sup>3</sup>;  
 $f$  — частота импульсов [27; 28].

Площадь обрабатываемой поверхности существенно влияет на производительность обработки: при средних и больших площадях это объясняется ролью процесса удаления из межэлектродного промежутка (далее — МЭП) продуктов эрозии, а на малых площадях — невозможностью введения в МЭП энергии оптимальной мощности. Сочетание анодного растворения и механического (абразивного) воздействия на заготовку значительно повышают производительность процесса анодно-абразивной обработки [28]. Эффективными с точки зрения производительности являются также высокочастотная, электроискровая и электроконтактная обработка. Производительность метода анодно-абразивной обработки в 30...50 раз выше, чем при искровом способе [29].

ЭХШ применяют для повышения производительности обработки, качества и геометрической точности обрабатываемых упрочняющих покрытий из твёрдых, магнитных, жаропрочных сплавов [30]. Для достижения высокой производительности обработки и уменьшения удельного расхода алмаза при ЭХШ упрочнённых поверхностей в работе [18] исследованы различные виды электролитов. Получены математические модели и построены графики зависимости производительности обработки от скорости круга и продольной подачи [18; 30].

При ЭАШ благодаря анодному растворению производительность обработки достигает 1 000 мм<sup>3</sup> / мин. Высокая стойкость инструмента достигается при обработке износостойких покрытий кругами на токопроводящей металлической связке М1, М5, МВ1 [31]. Так, при ЭАШ деталей с покрытием ПГ-ХН80СР2 кругами АС6 125/100 МВ1-100 средняя производительность обработки составила 408 мм<sup>3</sup> / мин, а абразивными кругами 24А40СМ116К — 114 мм<sup>3</sup> / мин [31; 32]. Проведено сравнение производительности обработки  $Q$  при алмазно-искровом шлифовании (далее — АИШ) и АШ (таблица 1.2).

Широкое применение находят способы электрохимической обработки упрочнённых поверхностей [33]. Так, в работе [34] исследуется влияние основных режимов процесса (напряжение на электродах ( $X_2$ ), подача электролита ( $X_3$ ) и температура электролита ( $X_1$ )) на производительность обработки закалённой стали ЭИ985 (42...45 HRC).

Т а б л и ц а 1.2 — Производительность обработки  $Q$  при АИШ и АШ

Вид шлифования	Обрабатываемый материал	$Q$ , мм <sup>3</sup> /мин
АИШ	Т15К6	549,8
	ТН-20	435,0
АШ	Т15К6	247,5
	ТН-20	193,4

Получено эмпирическое уравнение регрессии, определяющее влияние режимов на производительность обработки  $Q$ :

$$Y = 0,4965 + 0,0972X_1 + 0,2049X_2 + 0,0491X_3 + 0,0183X_{12} + 0,0310X_{13} + 0,0640X_{23} + 0,0290X_2^2 - 0,0179X_3^2,$$

где  $X_1$  — температура электролита  $T$  (°С);

$X_2$  — напряжение  $U$  (В);

$X_3$  — подача электролита  $P$ ;

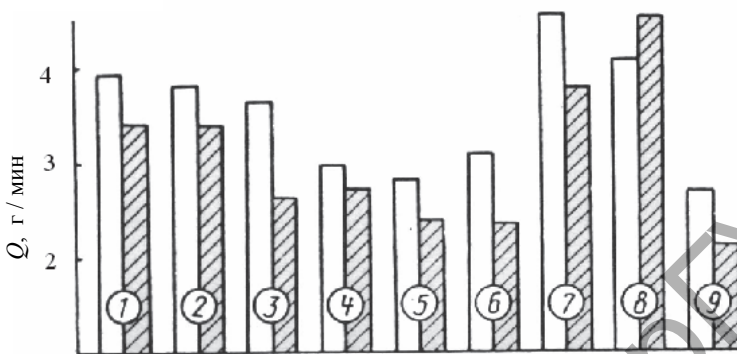
$X_{12}$  —  $T-U$ ;

$X_{13}$  —  $T-P$ ;

$X_{23}$  — парное взаимодействие  $U-P$ .

В работе [5] проведены исследования обрабатываемых упрочняющих покрытий, полученных электромагнитной наплавкой. В качестве критериев обрабатываемости использовали съём материала (производительность)  $Q$  для черновой обработки и шероховатость поверхности  $Ra$  при чистовой обработке. Эксперименты проводили на круглошлифовальном станке модели ЗБ12. Из результатов исследований, представленных в виде диаграммы (рисунков 1.4), следует, что метод нанесения покрытий не оказывает существенного влияния на обрабатываемость. В то же время химический состав материалов ферропорошков влияет на обрабатываемость покрытий. Наилучшие результаты с точки зрения производительности и качества обработанной поверхности показали материалы на основе феррованадия и ферротитана.

Основными технологическими параметрами при МАО являются: магнитная индукция  $B$ , скорость вращения круга  $\vartheta$ , глубина шлифования  $t$  и подача  $S$ . Проведены исследования влияния технологических



1 — Fe-V(2%); 2 — Fe-V(10%); 3 — Fe-Ti; 4 — С-300; 5 — P6M5K5;  
6 — P6M5Ф3; 7 — сталь 45-B(1%); 8 — Fe; 9 — ФБ-3

Рисунок 1.4 — Диаграмма изменения производительности  $Q$  при обработке покрытий, полученных магнитно-электрическим упрочнением (не заштриховано) и с поверхностно-пластическим деформированием (заштриховано) [36]

режимов на основные показатели процесса MAO закалённой стали У10А (58...62 HRC). Получены физико-математическая модель [5; 35], график зависимости производительности  $Q$  от магнитной индукции  $B$  (рисунок 1.5).

При увеличении магнитной индукции производительность обработки возрастает [5].

В целях выявления эффективности MAO покрытий, полученных электромагнитной наплавкой с поверхностно-пластическим деформированием [36], проведены исследования обработки заготовки из стали 45 с покрытием порошком P6M5K5 кругом зернистостью 250 / 180. Получена физико-математическая модель, определяющая характер зависимости съёма материала покрытия от технологических режимов MAO. Наибольшую производительность обеспечивает сочетание трёх движений обрабатываемой детали: вращение вокруг своей оси, вращение по рабочей зоне и осциллирующее, а также динамическое влияние магнитно-абразивного порошка [35].

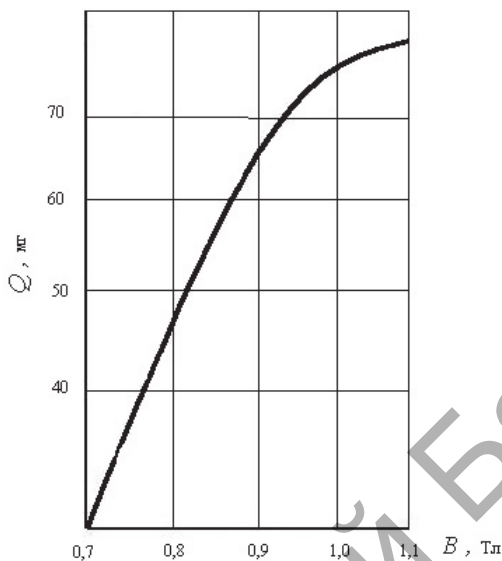


Рисунок 1.5 — Зависимость производительности  $Q$  от магнитной индукции  $B$  [36]

В последнее время получают широкое распространение технологические процессы, в которых в целях повышения производительности обработки и расширения технологических возможностей используется энергия магнитного поля, оказывающая влияние на формоизменение и состояние поверхностных слоёв изделий [12].

При МЭШ высоколегированных сталей производительность обработки зависит от значений режимов обработки и может достигать 2 500...3 000 мм<sup>3</sup> / мин.

### 1.2.2 Влияние видов энергетического воздействия на качество поверхности упрочняющих покрытий

При электроэрозионном шлифовании в результате воздействия электрических разрядов обработанная поверхность приобретает характерный микропрофиль, который определяется наличием лунок и оплавленных вершин [37]. Поверхностные слои обрабатываемой

заготовки претерпевают структурные и химические превращения, что способствует дополнительному проникновению в них тех или иных элементов из рабочей жидкости и, в некоторых случаях, из электрод-инструмента. В силу этого, как и при любых других методах размерной обработки, качество поверхности при электроэрозионном шлифовании оценивают её микротопографией и теми изменениями, которые произошли в поверхностном слое детали [28].

Профиль обработанной поверхности после электроэрозионного шлифования представляет собой результат наложения друг на друга огромного числа лунок. Получение наименьшей шероховатости поверхности возможно при уменьшении энергии разряда, а следовательно, снижении производительности.

В зависимости от типа воздействия на обрабатываемую поверхность детали обнаруживаются следующие области: 1) плавления и механических воздействий; 2) химического взаимодействия материала заготовки с материалом инструмента или рабочей средой; 3) остаточных напряжений; 4) термически изменённого слоя. Параметры микрогеометрии обрабатываемой поверхности зависят от условий проведения процесса электроэрозионного шлифования, в том числе теплофизических свойств материала электрод-заготовки, размеров обрабатываемой поверхности, типа рабочей жидкости и др. [37].

Первостепенное значение имеет электрический режим [28]. Из экспериментальных данных обработки стали X18H9T (рисунок 1.6) [37; 38] видно, что шероховатость поверхности в большей степени определяется энергией импульса, чем его длительностью.

Чем больше энергия импульса и электроэрозионная обрабатываемость материала, тем большую высоту шероховатости имеет обработанная поверхность [32].

В работе [39] рассматривается влияние электрохимического шлифования рабочих поверхностей шарикоподшипников. Установлено положительное влияние режимов электрохимического шлифования на стойкость изделий к циклическим нагрузкам. При финишной обработке дорожек качения шарикоподшипников методом электрохимического полирования (далее — ЭХП) с упрочнённой поверхностно-пластическим деформированием поверхности удаляется дефектный слой и достигается шероховатость поверхности  $Ra$  0,25...0,40 мкм.

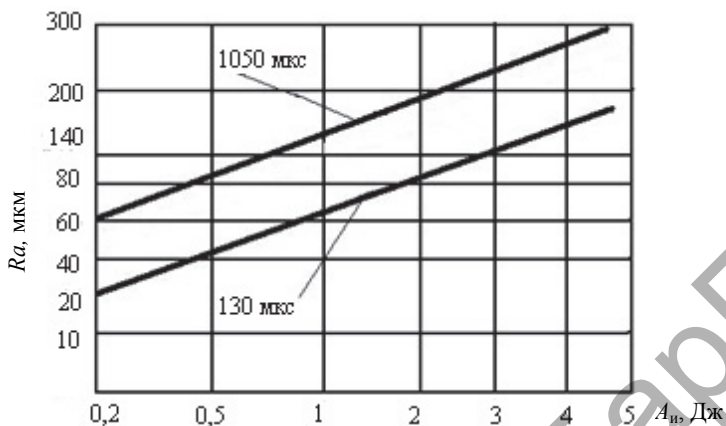


Рисунок 1.6 — Зависимость шероховатости поверхности от энергии импульса [37; 38]

Методом MAO производилась обработка поверхности высокоточных шариков из стали ШХ15 после упрочняющего шлифования. Установлено, что производительность увеличивается в 2...3 раза, шероховатость поверхности снижается с  $Ra$ , составляющей 1,00...0,63 мкм до  $Ra$  в пределах 0,63...0,32 мкм [40; 41].

В Физико-техническом институте Национальной академии наук Беларусь проводятся работы по исследованию обрабатываемости износостойких покрытий, наплавленных самофлюсующимися сплавами Ni-Cr-B-Si [42]. Изучено влияние режимов обработки твёрдости покрытий и состава смазочно-охлаждающей жидкости (далее — СОЖ) на расход алмазов и шероховатость обработанной поверхности. Установлено, что шероховатость обработанной поверхности изменяется незначительно и находится в пределах  $Ra$  0,63...1,25 мкм [43].

В статье [44] рассмотрены эксперименты, устанавливающие влияние технологических режимов MAO на геометрические и физико-механические характеристики закалённых инструментальных сталей Р6М5 (62...64 HRC) и безвольфрамовой стали 95Х6М3Ф3СТ. Определено, что увеличение магнитной индукции приводит к увеличению усилий резания, повышению деформаций

поверхностного слоя, увеличению съёма дефектного слоя и более интенсивному выглаживанию обрабатываемой поверхности с изменением параметра шероховатости  $Ra$  с 0,6 до 0,3 мкм [44].

При воздействии импульсного электромагнитного поля на режущий инструмент его стойкость повышается в 1,3...2,0 раза. Это связано с изменением твёрдости и износостойкости быстрорежущих сталей, выделением мелкодисперсных упрочняющих фаз [45].

Значительный интерес представляет изучение влияния электромагнитного поля на изменение эксплуатационных показателей поверхностного слоя покрытий.

Исследования С. Н. Постникова показывают, что магнитная обработка повышает стойкость инструмента в 2,5...3 раза [46], а износостойкость деталей — в 2...3 раза и более [47]. При этом предполагается, что происходит магнитоотрицательное упрочнение, магнитно-дисперсионное упрочнение и изменение собственной дислокационной структуры сталей под влиянием внешнего электромагнитного поля напряжённостью более 80 000 А / м. Отмечается, что закалка в магнитном поле без отпуска или с низким отпуском приводит к увеличению предела прочности сталей. Наложение электромагнитного поля при отпуске быстрорежущих сталей стимулирует структурные превращения и переход остаточного аустенита в мартенсит [48]. Увеличение стойкости намагниченного инструмента может быть связано также с влиянием магнитной индукции на процессы в зоне обработки, например, с дополнительными тепловыделениями из-за вихревых токов [49—51]. В работе [52] объяснение влияния электромагнитного поля на долговечность деталей и стойкость режущего инструмента имеет другой характер зависимостей. В поле средней напряжённости с продолжительностью импульса 0,5...1,5 с инструмент подвергается «винтовому сжатию» [53]. Возникающие электродинамические силы уплотняют кристаллы структуры и снижают внутренние напряжения, связанные с изготовлением и термообработкой инструмента. Показано влияние технологических режимов, оптимизация которых позволяет повысить твёрдость при шлифовании ножей из стали 65Г до 61...63 HRC, не прибегая к термическим операциям [54].

МЭШ представляет собой технологический процесс с высокой концентрацией механической, электрической и магнитной энергий,

в результате взаимодействия которых происходит изменение свойств поверхностного слоя вследствие интенсивной пластической деформации зёрнами абразива токопроводящего круга, возникновения высоких температур в локальных объёмах, создаваемых действием разряда технологического тока, и расплавлением микровыступов по пятнам контакта. Стружка и микродеформированная часть на поверхности детали плавится и подвергается воздействию внешнего магнитного поля, которое оказывает влияние на характер кристаллизации металла. При этом происходит намагничивание образца «по массе», что способствует фазовым превращениям внутренней структуры [55].

Исследование влияния электромагнитного поля на физические явления при охлаждении и фазовые переходы показало ускорение переориентации кристаллов термообработанных образцов. При этом фазовые переходы ускорялись на 15...22%, а площадь энергетической петли уменьшилась на 16% [56]. Величина изменённого поверхностного слоя деталей находилась в пределах от 0,01 до 1,8 мм в зависимости от технологических режимов и физических свойств обрабатываемого материала заготовки. Исследованиями установлено, что микротвёрдость поверхности деталей при МЭШ увеличивается по сравнению с традиционными процессами упрочнения на 15...30% в зависимости от марки обрабатываемого материала [49; 57; 58].

В работе [59] показано, что постоянное магнитное поле напряжённостью 12 000 А/м оказывает сильное тормозящее действие на рост зёрен и эволюцию текстуры кремнистого железа в условиях отжига при 800°C и связано с магнитострикционными явлениями, обусловленными существованием выше точки Кюри ферромагнетизма ближнего порядка.

Из результатов работы, представленных в источниках [60; 61], видно, что на процесс пластической деформации такой сложной системы, какой является кристаллическая решётка металлов со своими электрическими и магнитными полями, могут влиять не только напряжение и температура, но электрическое и магнитное поле. Многочисленные исследования показали, что электромагнитное и электрическое поля могут активно влиять на дислокационный процесс пластической деформации как магнитных, так и немагнитных материалов, выражая собой универ-

сальный закон взаимодействия внешних полей с электромагнитным полем реальной кристаллической решётки в области пластической деформации. Результаты исследований свидетельствуют о наличии влияния на ползучесть материалов магнитных полей с индукцией 0,05 Тл, электрических полей напряжённостью менее 10 А / мм и при плотности 0,15 А / мм<sup>2</sup> тока, проходящего по образцу. Впоследствии эти результаты были подтверждены работами [55; 62], в которых показано, что при воздействии относительно слабых магнитных полей напряжённостью до 10<sup>6</sup> А / м происходит изменение свойств и структурного состояния таких поликристаллических материалов, как ферромагнитные сплавы [38; 63].

Из вышесказанного следует, что концентрация в зоне обработки дополнительных электрической и магнитной энергий ведёт к увеличению производительности обработки, изменению физико-механических и эксплуатационных свойств материала.

Анализ физико-механических свойств упрочняющих покрытий показывает, что они относятся к труднообрабатываемым материалам [8; 11; 64]. Поэтому эффективность шлифования во многом определяется применяемыми абразивными материалами, используемыми в кругах. Для высокопроизводительного шлифования необходимо, чтобы твёрдость абразивного материала была больше твёрдости обрабатываемого материала как минимум в 1,5 раза. Наиболее подходящим инструментом для обработки упрочняющих покрытий являются алмазные круги [65; 66].

Исследования показали, что при обработке поверхностей деталей после магнитно-электрического упрочнения [67] износ круга, отнесённый к пройденному им пути, в 8...10 раз превышает износ при шлифовании контрольных образцов из закалённой стали 45. Поэтому резко возрастает время на шлифование, так как требуется операция правки круга [67].

Эффективность разных методов финишной обработки упрочняющих покрытий, использующих в зоне обработки механическую, электрическую и электромагнитную энергии, различна (таблица 1.3).

Т а б л и ц а 1.3 — Сравнение методов финишной обработки покрытий

Разновидность обработки	Абразивный инструмент	Технологические показатели			
		Объёмная производительность обработки, мм <sup>3</sup> / мин	Линейная скорость съёма, мкм / мин	Шероховатость поверхности <i>Ra</i> , мкм	Относительный износ инструмента, %
ЭАШ	Алмазные круги на металлической связке	2 000	—	0,16	0,10...0,20
Электроабразивное шлифование	Графитированные круги	120	—	0,16	20,00...40,00
	Металлоабразивные круги	4 000	—	0,16	0,05...0,10
Электрохонингование	Абразивные бруски	—	20	0,08	10,00...20,00
Суперфиниширование	Электропроводные бруски	—	10	0,04	10,00...20,00
Анодноабразивное полирование	Суспензия из мелкозернистого абразива	—	10	0,02	—
Анодноабразивное галтование	Несвязанный абразив	—	20	1,25	—
МЭШ	Металлоабразивные круги	2 500	—	0,40...1,25	0,05...0,10

### 1.3 Перспективы применения МЭШ для обработки упрочняющих покрытий

Из вышеприведённого анализа следует, что при восстановлении поверхностей деталей машин способами газопламенного нанесения покрытий порошками на основе никеля и хрома, а также наплавов сормайтотом, на поверхности детали формируется упрочняющее покрытие с высокими физико-механическими свойствами (твёрдость 58...62 HRC), что затрудняет их последующую механическую обработку.

Применяемые на машиностроительных предприятиях способы шлифования — алмазный, алмазно-искровой, электроэрозионный — обеспечивают требуемое качество поверхности упрочняющих покрытий. В этом случае повышенный расход алмазных зёрен, применение дорогостоящего оборудования и инструмента требует значительных материальных затрат. Поэтому необходимы поиск и разработка новых высокоэффективных методов, позволяющих повысить производительность обработки и качество поверхности упрочняющих покрытий. Наиболее рациональными и высокопроизводительными способами шлифования упрочняющих покрытий являются комбинированные способы обработки, использующие различные виды энергии в зоне обработки [101; 102].

Для интенсификации шлифования поверхностей деталей машин с упрочняющими покрытиями возможно применить метод МЭШ, который позволяет сконцентрировать в зоне обработки дополнительную энергию технологического тока и магнитного поля, что повысит производительность обработки и улучшит качество поверхности [103; 104].

На производительность процесса МЭШ и качество обработанной поверхности оказывают значительное влияние режимы обработки: скорость на периферии абразивного круга, технологический ток и влияние внешнего электромагнитного поля [68; 69]. Действие абразивных зёрен инструмента обуславливает рельеф поверхности, типичный для шлифования [70]. Воздействие электрических разрядов в зоне обработки формирует на поверхности упрочняющего покрытия следы в виде эрозионных лунок и канавок. Под действием сил электромагнитного поля на расплав тонкого поверхностного

слоя происходит его растекание по обработанной поверхности, что уменьшает параметры шероховатости [1]. При МЭШ в зоне обработки происходит значительное выделение теплоты, поэтому, возможно, управляя режимами МЭШ, можно изменить физико-механические свойства поверхностного слоя упрочняющих покрытий [103].

Ранее выполненные исследования [69; 71] показывают, что использование электромагнитного поля в зоне шлифования является перспективным для достижения на поверхности упрочняющего покрытия минимальной шероховатости и создания поверхностного слоя с заданными эксплуатационными характеристиками, отличными от характеристик основного металла. МЭШ, согласно терминологии источника [72], является методом комбинированной обработки токопроводящих материалов, сочетающим процессы абразивного резания с электроконтактными и/или электроэрозионными явлениями при воздействии на зону обработки электромагнитного поля [1]. Физическая сущность процесса МЭШ заключается в механическом контакте токопроводящего абразивного круга с поверхностью детали, замыкании электродов (токопроводящий абразивный круг—деталь) продуктами шлифования по локальным пятнам контакта, расплавлении контактных мостиков теплотой электроток и образовании разрядов с последующими электроэрозионными явлениями, происходящими под воздействием внешнего электромагнитного поля [73]. При МЭШ все поверхностные и граничные явления, происходящие при неустановившихся состояниях на контактирующих поверхностях, определяют энергетику процесса [74].

Интенсивность процесса разрушения детали, подвергаемой обработке МЭШ, происходит в зависимости от того, какая энергия преобладает: а) за счёт резания и пластического деформирования металла зёрнами абразива; б) за счёт контактного расплавления стружки и поверхности; в) за счёт электроискровых и магнитных воздействий на поверхность шлифования.

Применение электрической и магнитной энергии в зоне обработки МЭШ повышает производительность обработки до  $2\ 500\ \text{мм}^3 / \text{мин}$ , обеспечивает шероховатость поверхности  $Ra$  в пределах  $0,5 \dots 1,25\ \mu\text{м}$  и точность порядка шестого и седьмого квалитетов. Однако недостаточно изучены механизмы явлений, происходящих

в зоне обработки, при МЭШ упрочняющих покрытий, оказывающие влияние на производительность обработки и качество поверхности.

Для использования метода МЭШ упрочняющих покрытий необходимо располагать физико-математическими моделями, описывающими процесс, выявить механизмы влияния энергетических режимов процесса, электрического и магнитного полей на формирование физико-механических свойств и шероховатость поверхности упрочняющих покрытий. Также необходимо разработать физико-математические зависимости шероховатости поверхности и производительности обработки от режимов МЭШ и оптимизировать значения этих режимов. Для этого необходимо проведение научных исследований.

#### 1.4 Выводы

Анализ существующих способов упрочнения и восстановления деталей машин и методов их обработки, приведённых в литературных источниках, позволил сделать следующие выводы:

1) в результате упрочнения поверхностей деталей машин газотермическими методами на поверхности детали формируется упрочняющее покрытие с высокими физико-механическими свойствами (твёрдостью 58...62 HRC), что затрудняет их последующую механическую обработку;

2) основные способы шлифования труднообрабатываемых материалов — АИШ, электроэрозионное шлифование, МАО — обеспечивают требуемое качество поверхности, однако имеют недостатки, связанные с повышенными затратами на обработку в связи с применением дорогостоящего оборудования и инструмента, а также экологической чистотой;

3) известен метод МЭШ, который применяется для обработки деталей из высоколегированных сталей [1]. Он имеет высокую производительность обработки за счёт концентрации в зоне обработки дополнительной энергии электромагнитного поля и энергии технологического тока. При обработке поверхности не требуется правка круга, так как происходит его самозатачивание за счёт электроискрового действия техно-

логического тока на связку, что позволяет экономить вспомогательное время. С экономической точки зрения, кроме высокой производительности обработки, данный способ выгоден в применении, так как не требует создания дорогостоящего оборудования и применения алмазного инструмента, имеющего высокую стоимость;

4) представляется перспективным разработать технологии МЭШ газотермических и наплавленных упрочняющих покрытий деталей машин в целях повышения производительности обработки и качества поверхности.

Репозиторий БарГУ

## ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Обоснование выбора марок материалов обрабатываемых упрочняющих покрытий

Наиболее широко применяемыми на машиностроительных предприятиях при восстановлении и упрочнении поверхностей деталей машин являются упрочняющие газотермические покрытия из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2, а также поверхности, наплавленные сормайт ГН1. Исследовались наиболее твёрдый из самофлюсующихся материалов марки ПГ-СР4 (аналог ПР-Н70Х17С4Р4, 58...62 *HRC*) и наиболее мягкий марки ПГ-СР2 (аналог ПР-НХ15СР2, 40...45 *HRC*). При наплавке также широко используется сплав марки сормайт ГН1, который является сходны по физико-механическим и эксплуатационным свойствам с оплавленными упрочняющими газотермическими покрытиями из самофлюсующихся материалов. Наплавленное сормайт ГН1 упрочняющее покрытие имеет достаточно прочную адгезию с основой, однако высокая твёрдость (до 62 *HRC*) усложняет его последующую механическую обработку. Поэтому представляет интерес исследовать процесс МЭШ наплавов типа сормайт ГН1 в целях повышения производительности обработки при обеспечении требуемого качества поверхности [127].

Проблема в обработке упрочняющих покрытий сужает номенклатуру восстанавливаемых деталей и сдерживает применение методов газотермического упрочнения. Наиболее часто восстанавливают поверхности деталей машин, имеющие плоскую или цилиндрическую форму, поэтому для проведения опытов были изготовлены образцы прямоугольной и цилиндрической формы.

Химический состав материалов упрочняющих покрытий различен (таблица 2.1).

Т а б л и ц а 2.1 — Химический состав упрочняющих покрытий

Материал покрытия	Химический элемент, %							
	Ni	Mn	C	Al	Fe	Cr	Si	B
ПГ-СР4	Основа	—	0,8	—	0,7	17,0	3,5	3,0
ПГ-СР2	Основа	—	0,3	—	0,7	15,0	2,2	1,7
ГН1	5,0	1,5	3,3	—	Основа	25,0	4,2	—

## 2.2 Оборудование и методики проведения исследований

### 2.2.1 Общая схема методики проведения экспериментов

Влияние основных режимов МЭШ при обработке упрочняющих покрытий исследовалось по типовой методике, включающей следующие основные этапы: 1) постановка задачи; 2) подбор оборудования и материалов; 3) планирование эксперимента; 4) проведение эксперимента; 5) обработка экспериментальных данных; 6) анализ и принятие решения; 7) расчёт оптимальных режимов МЭШ.

В применении к проведенным исследованиям общий подход реализован в соответствии со структурной схемой методики проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных (рисунок 2.1) [105].

Этап постановки задачи включает: анализ способов обработки материалов покрытий с использованием в зоне обработки технологического тока и магнитного поля; выявление недостатков существующих способов комбинированной обработки и поиска путей их устранения; оценку перспективности использования комбинированного способа обработки МЭШ применительно к защитным покрытиям с точки зрения повышения производительности обработки и качества поверхности.

Содержание второго и третьего этапа методики заключается в подборе оборудования и материалов упрочняющих покрытий, способов их

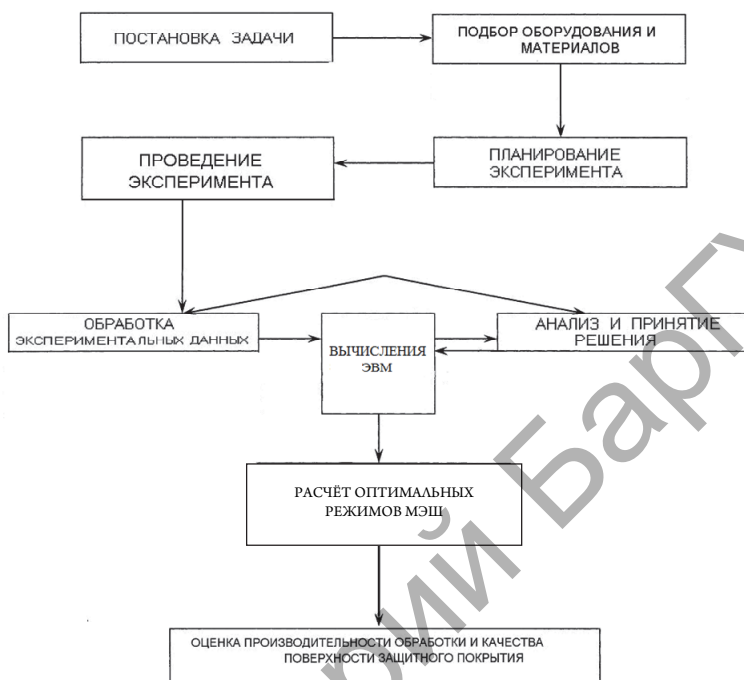


Рисунок 2.1 — Общая схема методики проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных

нанесения (газопламенное напыление и наплавка), проектировании экспериментальной установки, изготовлении опытных образцов.

Четвёртый этап содержит данные по проведению опытов на созданной установке, получение экспериментальных данных с использованием специального измерительного оборудования.

Пятый этап, связанный с обработкой экспериментальных данных, включает в себя разработку физико-математических моделей, наиболее адекватно определяющих зависимости шероховатости поверхности и производительности обработки от основных технологических режимов МЭШ, и расчёт коэффициентов регрессии. Это реализовано с помощью разработанной программы на ЭВМ средствами Excel (приложение А).

На основании разработанных физико-математических зависимостей проведён расчёт оптимальных режимов МЭШ, обеспечивающих требуемое качество поверхности при максимальной производительности обработки упрочняющих покрытий.

Восьмой этап является заключительным в проведении исследований и содержит обоснование полученных данных и разработку технологических процессов МЭШ упрочняющих покрытий, а также основные выводы.

Планирование эксперимента проводили по методике с использованием матриц планирования экспериментов, характерных для полного и дробного факторного планов вида  $2^k$  и  $2^{k-1}$  [75]. В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследований. Изучение тепловых процессов в зоне шлифования проводилось экспериментальным путём. Для выявления оптимальных режимов МЭШ упрочняющих покрытий применено математическое моделирование. Влияние режимов МЭШ на производительность обработки и качество поверхностного слоя упрочняющих покрытий определялось экспериментально.

### **2.2.2 Методики исследования структуры и шероховатости поверхности упрочняющих покрытий, определения твёрдости и температуры в зоне обработки МЭШ**

Для изучения структуры упрочняющих покрытий использовались шлифы поперечного среза. Образцы подвергались шлифованию бумажными наждачными шкурками ступенчато, переходя от крупной зернистости (60 / 40) к более мелкой (1 / 0). Риски, оставшиеся от шлифования на последней шкурке, устранялись полированием, для которого использовали вращающийся металлический диск с натянутой или приклеенной тканью. Паста с дисперсным абразивом подавалась в зону контакта поверхности образца и ткани. Хорошее качество шлифа достигалось при использовании мелкозернистой пасты ГОИ, в состав которой входят оксид хрома, стеарин, керосин, олеиновая кислота и сода.

Окончательная обработка шлифов после полирования включает операции промывки в проточной воде, сушки, обезжиривания этиловым спиртом или эфиром и заключительной сушки в струе тёплого воздуха.

Перед исследованиями шлифы были подвергнуты травлению с помощью специального раствора: 4,0 г — пикриновая кислота; 0,5 мл —  $\text{HNO}_3$ ; 95,5 мл — спирт технический. Это позволило выявить структуру металлической матрицы покрытий.

Оценку влияния режимов МЭШ на топографию поверхностного слоя покрытий проводили по фотографиям, полученным с использованием микроскопов моделей Stemi 2000C и METAM LB-32(Ю-33.25.416), максимальное увеличение которых составляет 250 и 1 000 раз соответственно.

Твёрдость поверхностей покрытий по Роквеллу (шкалы А и С) определяли согласно изложенным в ГОСТ 9013-59 [1н] методикам на твердомере модели ТКС-1М при нагрузке 150 Н. На каждом образце проводилось по три измерения. За окончательный результат измерений принимали среднее арифметическое значений твёрдости.

Влияние режимов МЭШ на шероховатость поверхности оценивали по профилограммам, полученным с помощью профилографа-профилометра модели АБРИС-ПМ7. Данный прибор соответствует степени точности 1 и относится к типу II по ГОСТ 19300-86 [2н]. Измерения шероховатости поверхности проводили по методикам, изложенным в ГОСТ 2789-73 [3н].

Температуру в зоне обработки МЭШ определяли дистанционным методом с применением пирометра модели Raynger MX4 [106]. Пирометр устанавливали на штатив, который обеспечивал жёсткое его фиксирование и обеспечение точности направления лазерного луча в зону обработки. Расстояние, с которого проводилось измерение, обеспечивало точность фиксирования показаний температуры в пределах  $\pm 0,05^\circ\text{C}$ .

Температура измерялась в точке, показанной на схеме (рисунк 2.2). В каждом опыте проводили по четыре измерения. За окончательный результат принимали среднее арифметическое значение.

Изменение величины магнитной индукции фиксировали с помощью тесламетра модели ЭМ 4305 с точностью 0,001 Тл. Данный прибор основан на эффекте Холла и позволяет фиксировать изменение величины постоянного электромагнитного поля в пределах от 0,05 до 0,5 Тл между полюсами электромагнита.

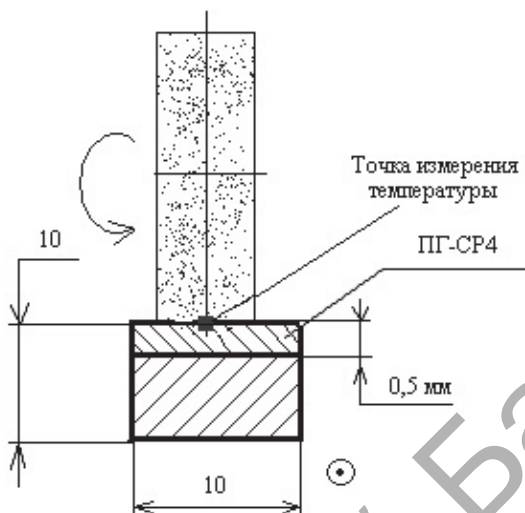


Рисунок 2.2 — Схема измерения температуры на поверхности упрочняющего покрытия пирометром Raynger MX4

### 2.2.3 Методики определения производительности обработки и изменения химического состава упрочняющих покрытий

Оценку производительности обработки МЭШ упрочняющих покрытий определяли исходя из значения съёма материала покрытия в единицу времени. Объём удалённого материала упрочняющего покрытия, снятого в единицу времени, рассчитывали после взвешивания образцов. Взвешивание образцов проводили на аналитических весах АДВ-200 с точностью до  $10^{-6}$  кг и электронных весах OHAUS Corp с точностью  $10^{-5}$  кг после каждого прохода. Припуск снимали за четыре прохода.

Наблюдение топографии поверхности упрочняющего покрытия до и после обработки МЭШ исследуемых образцов осуществлялось с помощью растрового электронного микроскопа модели LEO1455VP фирмы «Карл Цейсс». При этом регистрировался сигнал отраженных и вторичных электронов одновременно или поочерёдно.

Исследования проводились как при нормальном падении пучка на поверхность образца, так и при наклоне образца на  $30^\circ$ . Ускоряющее напряжение составляло 20 кВ.

Изображение в растровом электронном микроскопе формировалось при сканировании узким электронным лучом (диаметр пучка 50...500 Å) участка поверхности упрочняющего покрытия. При падении пучка электронов на поверхность часть электронов отражается практически без потери энергии. Коэффициент отражения растёт с ростом атомного номера элемента. Поэтому, если два соседних участка имеют разный элементный состав, формируется контрастное изображение поверхности в отраженных электронах. Другая часть электронов проникает внутрь образца. В результате взаимодействия с атомами мишени формируются вторичные электроны, имеющие невысокую энергию. Интенсивность вторичных электронов, регистрируемых датчиком, сильно зависит от угла наклона поверхности к падающему пучку, что позволяет получить изображение, имеющее различный контраст от разноориентированных участков поверхности.

Рентгеноспектральный микроанализ проводился с использованием энергодисперсионного SiLi — полупроводникового детектора фирмы Röntec (Германия). Для обеспечения удовлетворительного для статической обработки числа импульсов в пиках спектр записывался не менее 300 с. Количественный анализ осуществлялся с использованием программного анализа спектров, проводимого на основе сравнения с эталонными образцами и уровнем тормозного излучения.

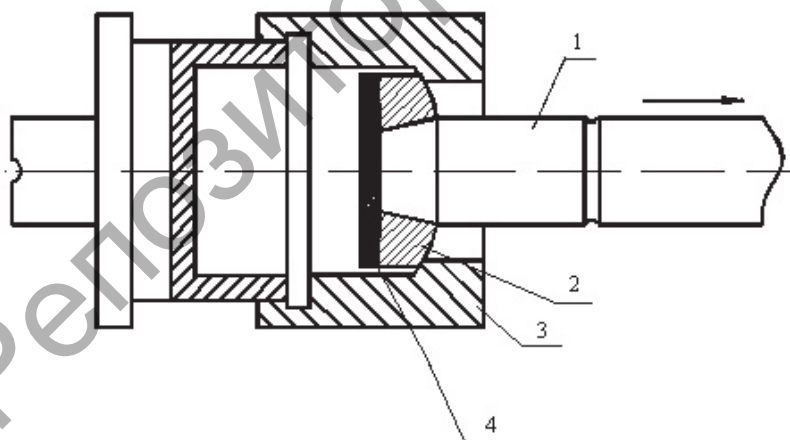
Оценку изменения химического состава в поверхностном слое упрочняющих покрытий после обработки МЭШ проводили по спектральным графикам распределения химических элементов.

#### **2.2.4 Методика определения прочности сцепления упрочняющих покрытий с основой**

Прочность сцепления покрытия с основным металлом характеризуется усилием отрыва покрытия от основы, отнесённым к проекции площади отрыва на плоскость, перпендикулярную действующей силе.

Наиболее распространённым методом определения прочности сцепления является штифтовой метод, основанный на определении силы, отрывающей покрытие от основного металла, отнесённой к его площади [76; 77]. Испытание проводилось по определённой схеме (рисунок 2.3) [78]. Соединение штифта 1 и кольца 2 выполнено по переходной посадке Н8/н8, что позволяет исключить трение между ними. Перед дробеструйной обработкой и напылением торцовые поверхности обрабатывались так, чтобы кольцо выступало относительно штифта на 0,05...0,15 мм, а после дробеструйной обработки кольцо и штифт притирались. Это позволяет исключить нарушения посадки при деформировании поверхностных объёмов металла в процессе дробеструйной обработки. Для закрепления образца в разрывной машине использовались специальные оправки, которые соединялись с захватами разрывной машины при помощи гибких тросов. Это обеспечило строгую перпендикулярность усилия отрыва торцевой поверхности образца.

В эксперименте использовалась разрывная машина RIENLE с плавно изменяющимся усилием от 0 до 50 000 Н. Применялась мини-



1 — конический штифт; 2 — шарнирное кольцо; 3 — шарнирная опора;  
4 — упрочняющее покрытие

Рисунок 2.3 — Принципиальная схема испытания покрытия на отрыв

нагрузки. Усилие  $P$ , соответствующее моменту отрыва покрытия от матрицы, отмечалось по шкале, проградуированной в килограммах, а затем переводилось в ньютоны. Значение прочности сцепления определялось по формуле

$$\sigma_{\text{сц}} = P / F ,$$

где  $F$  — площадь торцевой поверхности штифта, вычисляемая по формуле

$$F = \pi d^2 / 4 ,$$

где  $d$  — диаметр штифта, равный 12 мм.

Для обеспечения сопоставимости получаемых значений  $\sigma_{\text{сц}}$  для разных образцов толщина напыляемых покрытий выдерживалась постоянной и составляла 0,3 мм. Кроме этого, сохранялся постоянный интервал времени между подготовкой поверхности и напылением. Для обеспечения статистической достоверности полученных результатов при проведении испытаний использовалось по пять образцов с покрытиями, нанесёнными при одинаковых режимах.

### **2.2.5 Опытные-промышленные установки для МЭШ упрочняющих покрытий**

Согласно разработанным чертежам и техническим требованиям (приложение Б) были модернизированы под МЭШ: опытно-промышленные установки для МЭШ газотермических упрочняющих покрытий на базе универсально-заточного станка 3Е642Е (рисунок 2.4, см. вклейку) и на базе горизонтально-фрезерного станка модели НГФ-100 (рисунок 2.5, см. вклейку) [107].

Опытно-промышленная установка (см. рисунок 2.4) состоит из следующих основных узлов: универсально-заточного станка 3Е642Е 1, паранитовой прокладки 2, приспособления для базирования исследуемого образца 3, токопроводящего абразивного

круга 4, щёточно-коллекторного аппарата 5, понижающего трансформатора 6, блока управления электрощитами 7, лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) 8, диодного выпрямителя 9, амперметра 10, выпрямителя 11, электромагнита 12. Подвод технологического тока к абразивному кругу производится через щёточно-коллекторный аппарат 5. Приспособление 3 изолировано от корпуса станка с помощью паранитовой прокладки 2. Продольная подача осуществляется с помощью гидропривода станка 1, поперечная и вертикальная подача — вращением соответствующих рукояток станка.

Основное движение токопроводящего абразивного круга обеспечивается с помощью бесступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя от 0 до 6 400 мин<sup>-1</sup>. Контроль величины технологического тока производят с помощью амперметра постоянного тока 10 класса точности 1,5. Величину напряжения, подаваемого на катушки индуктивности электромагнита 12, контролировали с помощью встроенного в блок управления электромагнитами 7 вольтметра.

В качестве инструмента применялся абразивный токопроводящий круг марки ПП250 × 25 × 32-5С25СТ6КАЛ. Источником технологического тока являлся понижающий трансформатор 6.

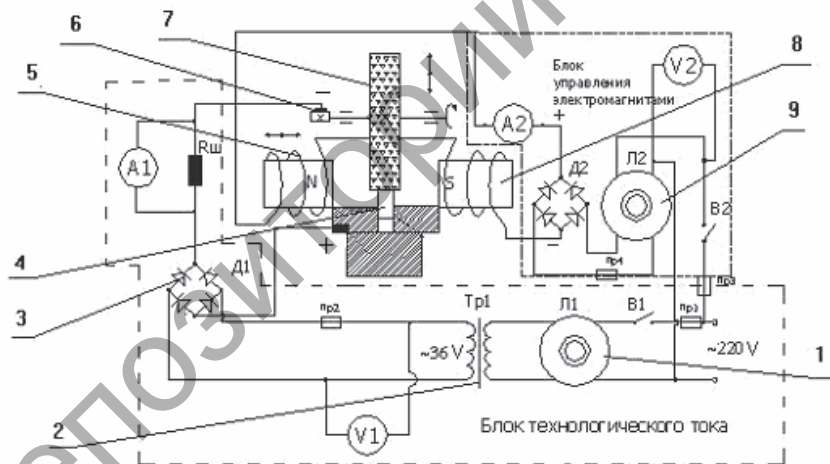
Оригинальность данной установки заключается в следующем: применении разработанного блока управления электромагнитом, позволяющего регулировать в широком диапазоне величину магнитной индукции от 0 до 0,5 Тл; разработанной конструкции электромагнита [108], обеспечивающей равномерное распределение силовых линий электромагнитного поля в зоне обработки; разработанной конструкции щёточно-коллекторного аппарата, обеспечивающего надёжный подвод технологического тока к токопроводящему абразивному кругу. Чертежи приспособлений представлены в приложении Б.

Оригинальность опытно-промышленной установки МЭШ на базе горизонтально-фрезерного станка модели НГФ-100 (см. рисунок 2.5) заключается в применении разработанного блока управления приводом продольной подачи, позволяющего бесступенчато регулировать скорость продольной подачи от 0 до 1 800 мм / мин; разработанной конструкции привода продольной подачи; разработанной конструкции щёточно-коллекторного аппарата,

обеспечивающего надёжный подвод технологического тока к токопроводящему абразивному кругу. Чертежи приспособлений представлены в приложении Б.

Обработку поверхностей образцов производили в соответствии со схемой МЭШ (рисунок 2.6). Токопроводящий абразивный круг 7 через скользящий контакт 6 и обрабатываемый образец подсоединялись к отрицательному и положительному полюсам соответственно выпрямителя 3. Магнитное поле создавалось с помощью индуктивных катушек 5 и магнитопровода 8. Регулирование силы тока в цепи и магнитной индукции производилось ЛАТРами 1 и 9.

Схема МЭШ является универсальной и может быть реализована на технологическом оборудовании машиностроительных предприятий.



1, 9 — ЛАТР; 3 — выпрямитель; 4 — заготовка; 5 — индуктивные катушки; 6 — скользящий контакт; 7 — токопроводящий абразивный круг; 8 — магнитопровод

Рисунок 2.6 — Схема МЭШ

## 2.3 Планирование экспериментов и обработка экспериментальных данных

В целях определения влияния режимов МЭШ на шероховатость поверхности и производительность процесса обработки, а также оптимизации режимов упрочняющих покрытий применяли методы планирования экспериментов.

Для разработки моделей МЭШ планирование экспериментов проводилось с использованием полного факторного эксперимента  $2^5$  [75]. Метод полного факторного эксперимента, как и другие методы планирования эксперимента, позволяет ограниченным числом экспериментов получить физико-математическую модель, связывающую исследуемый фактор технологического процесса (параметр оптимизации) с исходными параметрами (входные параметры).

Метод требует, чтобы все независимые переменные, влияющие на процесс, менялись хотя бы на двух уровнях: минимальном и максимальном.

Количество необходимых экспериментальных точек для полного факторного эксперимента определяется из выражения  $N = 2^k$ , где  $k$  — количество исследуемых переменных.

На первом этапе планирования эксперимента выбираются основные входные параметры, сильно влияющие на параметр оптимизации. Затем определяются пределы их изменения и составляется таблица исходных данных.

Для получения достоверных данных, а также возможности статистических оценок точности и воспроизводимости экспериментов, необходимо их неоднократное повторение. Кроме того, чтобы исключить влияние систематических погрешностей, эксперимент рандомизируется, т. е. опыты проводятся в случайном порядке. Чаще всего для этого используется таблица случайных чисел.

Матрица планирования экспериментов и результаты опытов представлены в приложении В, результаты анализа экспериментальных данных и расчёт коэффициентов регрессии — в приложении Г. В качестве режимов оптимизации процесса МЭШ упрочняющих покрытий приняли: шероховатость поверхности  $Ra$  ( $y_1$ ) после обработки, мкм, и производительность обработки  $Q$  ( $y_2$ ), мм<sup>3</sup>/мин. В качестве независимых переменных, определяющих

выходные параметры, использованы: технологический ток  $I$ , А; магнитная индукция  $B$ , Тл; скорость на периферии абразивного круга  $v$ , м / с; глубина шлифования  $t$ , мм; продольная подача  $S$ , мм / с (мм / мин). Постоянным параметром в опытах была принята зернистость токопроводящего круга ПП250 × 25 × 32-5С25СТ6КАЛ. В каждой точке плана проводилось по четыре параллельных опыта.

Общее уравнение связи выходного показателя и входных независимых управляемых переменных имеет вид

$$y = b_0 + \sum_1^n b_i X_i + \sum_1^n b_{ij} X_i X_j + \sum_1^n b_{ii} X_i^2.$$

Расчёт коэффициентов уравнений регрессии функции отклика и их статистический анализ выполняли с помощью специальной программы в среде Microsoft Excel на ПК. Значимость коэффициентов регрессии вычислялась по критерию Стьюдента, а адекватность уравнения регрессии — по критерию Фишера.

Для построения физико-математической модели процесса МЭШ использовались также комплексы различных порядков [1].

Комплекс порядка  $\alpha$  равен

$$K_\alpha = \frac{IBH}{S} \left( \frac{v}{S} \right)^\alpha,$$

где  $\alpha$  — произвольное число.

Комплекс порядка 0 и  $-1$  соответственно имеет вид

$$K_0 = \frac{IBH}{S}; \quad K_{-1} = \frac{IBH}{v}.$$

На основе комплексов различных порядков строились модели вида

$$Y = a_0 + a_1 K_0 + a_2 K_{-1} + \dots + a_i K_{i-1},$$

где  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{i-1}$  — коэффициенты.

Для каждой точки плана эксперимента вычислялась дисперсия воспроизводимости по формуле

$$S_u^2 \{y\} = \frac{\sum_{i=1}^{r_v} (y_{vi} - y_{cp})^2}{r_v - 1},$$

где  $y_{vi}$  — режим оптимизации;

$y_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{r_v} y_{vi}}{r_v}$  — среднее арифметическое значение режимов оптимизации  $y_{vi}$  в  $v$ -й точке эксперимента;

$r_v$  — количество опытов в точке плана [75].

Затем по критерию Кохрена проверялась их однородность. Проверка показала однородность гипотезы по уровню значимости 0,05, что позволило вычислить дисперсию воспроизводимости всего опыта по формуле

$$S^2 \{y\} = \frac{\sum_{u=1}^N f_u S_u^2 \{y\}}{\sum_{u=1}^N f_u},$$

где  $N$  — число всех точек плана;

$f_u$  — число степеней свободы в  $v$ -й точке эксперимента, вычисляемое по формуле  $f_u = (r_v - 1)$ .

Данные по расчёту дисперсий воспроизводимости приведены в приложении А.

## 2.4 Выводы

Анализ результатов исследования позволил сделать следующие выводы:

1) объектом исследования выбраны напылённые газотермические упрочняющие покрытия из самофлюсующихся порошковых материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2, нанесённые на основу из конструкционной стали 45, а также поверхности, наплавленные сормайтотом ГН1. Материалы покрытий выбраны из условий их наиболее широкого применения на машиностроительных предприятиях при восстановлении и упрочнении поверхностей деталей машин и трудностей, связанных с их последующей механической обработкой;

2) применённые методики проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных позволили адекватно оценить влияние режимов МЭШ на качество поверхности (шероховатость, прочность сцепления упрочняющего покрытия с основой, твёрдость, структуру) и производительность обработки упрочняющих покрытий;

3) планирование экспериментов проводили с использованием полного факторного эксперимента  $2^5$ . Данный метод планирования позволяет ограниченным числом экспериментов получить физико-математическую модель, связывающую параметр оптимизации (шероховатость поверхности, производительность обработки) с исходными параметрами (технологический ток  $I$ , А; магнитная индукция  $B$ , Тл; скорость на периферии абразивного круга  $v$ , м / с; глубина шлифования  $t$ , мм; продольная подача  $S$ , мм / с (мм / мин));

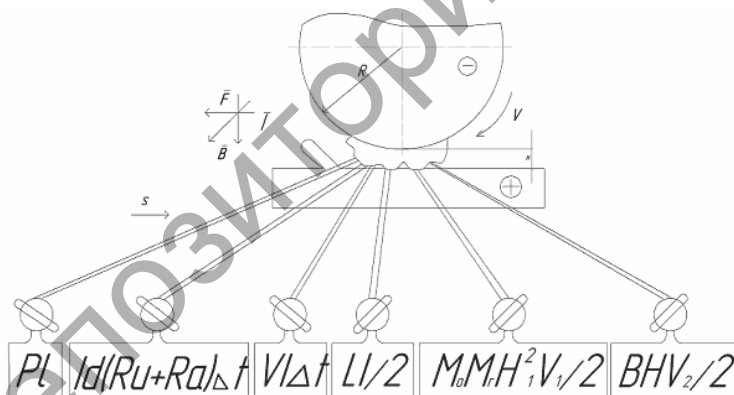
4) процесс МЭШ может быть реализован на универсальных станках моделей 3Е642Е и НГФ-100 путём модернизации их основных узлов согласно разработанным чертежам (см. приложение Б).

### ГЛАВА 3 ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МЭШ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

#### 3.1 Виды энергетического воздействия на упрочняющее покрытие при МЭШ

Для исследования влияния режимов МЭШ на поверхность упрочняющего покрытия необходимо изучить физические закономерности, лежащие в его основе. При МЭШ поверхность упрочняющего покрытия подвергается действию различных видов энергий (рисунок 3.1) [1].

Исследовали наиболее энергоёмкие процессы в зоне обработки МЭШ, влияющие на формообразование поверхности упрочняющих покрытий. К таким процессам относятся: резание и пластическое



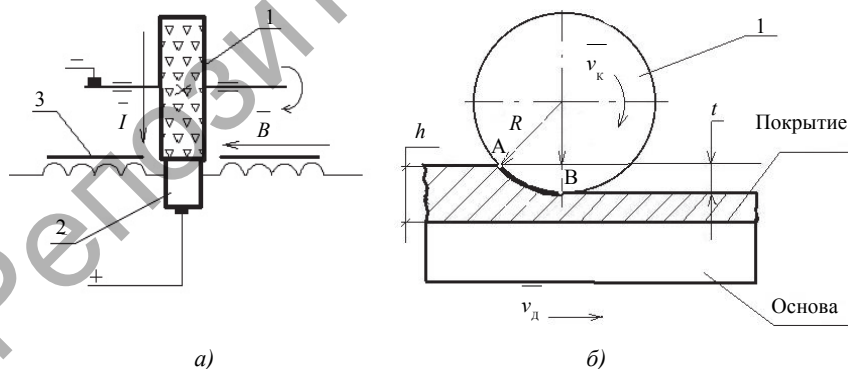
$PL$  — механическая энергия резания, сдвига или трения;  $Ld(Ru + Ra)\Delta t$  — энергия Джоуля в любых её низко- и высокочастотных проявлениях;  $VI\Delta t$  — энергия плазмы и различного рода искровых и дуговых разрядов;  $LI/2$  — энергия поля электрического тока;  $M_oM_rH_1^2V_1/2$  — энергия электромагнитного поля при любых частотах;  $BHV_2/2$  — энергия электрического тока во внешнем магнитном поле

Рисунок 3.1 — Виды энергетического воздействия на упрочняющее покрытие в зоне обработки МЭШ

деформирование зёрнами абразивного круга; электроконтактные явления, возникающие при прохождении в зоне обработки технологического тока, связанные с электрической эрозией и термодинамическими процессами в зоне обработки; электромагнитные процессы.

Магнитное поле при МЭШ создаётся в зоне обработки (рисунок 3.2, *а, б*) между двумя сердечниками электромагнита 3 или постоянными поляризованными магнитами, а технологический ток пропускается через электрод-инструмент 1, выполненный в форме абразивного круга на токопроводящей связке, и заготовку 2 с нанесённым на неё упрочняющим покрытием. При этом вектор магнитной индукции перпендикулярен вектору технологического тока. Это достигается взаимноперпендикулярным расположением электрода-инструмента (абразивного круга) и сердечниками электромагнита (см. рисунок 3.2).

Процесс обработки поверхности упрочняющего покрытия методом МЭШ можно представить следующим образом. Технологический ток, проходя через электрод-инструмент (абразивный круг на токопроводящей связке) и деталь, в местах контакта микровыступов и стружки с токопроводящей связкой абразивного круга будет разогревать поверхность упрочняющего покрытия (за счёт джоулева тепла и электроэрозионных явлений). При достижении определённой температуры контактирующей зоны (близкой к температуре плавления) металл,



*а* — фронтальный вид; *б* — вид сбоку

Рисунок 3.2 — Зона обработки МЭШ плоского образца с упрочняющим покрытием

находящийся частично в жидкой и частично в пластичной фазе, удаляется из зоны шлифования за счёт вращения токопроводящего абразивного круга  $I$  и направленного действия магнитного поля, создаваемого электромагнитами  $З$  [107; 108].

При способе МЭШ воздействие двух физических процессов нельзя принимать как простую арифметическую сумму, так как иногда совмещение даже двух физических воздействий может дать новые технологические эффекты, обеспечивающие повышение производительности обработки, качества поверхности и изменение физико-механических свойств упрочняющих покрытий.

МЭШ объединяет в себе процессы, характерные для традиционного шлифования абразивными кругами. При этом шлифованная поверхность образуется за счёт воздействия механической энергии массового резания и пластического деформирования металла абразивными зёрнами, выглаживающего воздействия связки абразивного круга, а также электроэрозионного действия электрических разрядов при прохождении в зоне обработки технологического тока под влиянием внешнего электромагнитного поля.

В основу теоретического описания электроконтактных явлений, протекающих в процессе МЭШ, положена контактная форма электрической эрозии, когда в результате концентрированного тепловыделения разрушаются места стягивания токовых линий при увеличении плотности технологического тока и воздействии на расплав и канал электрического разряда магнитодвижущей силы [79; 80].

Таким образом, поверхность упрочняющего покрытия в процессе МЭШ подвергается воздействию механической (шлифование), электрической (технологический ток) и электромагнитной энергий. Для установления механизма влияния режимов МЭШ на производительность обработки и качество поверхности упрочняющих покрытий необходимо выявить физические закономерности механических, электроконтактных и тепловых процессов, происходящих под воздействием внешнего электромагнитного поля в зоне обработки.

### 3.2 Закономерности процесса резания упрочняющих покрытий зёрнами абразивного круга в процессе МЭШ

Без введения в зону обработки энергии технологического тока и электромагнитного поля процесс МЭШ соответствует процессу традиционного шлифования абразивными кругами. Закономерности процесса традиционного шлифования абразивными кругами подробно изложены в литературных источниках [21; 26; 71; 81; 82].

Для обработки упрочняющих покрытий с повышенной твёрдостью, например напылённых самофлюсующихся материалов, рекомендуется использовать круги со связкой средней прочности и абразивными частицами из зелёного карбокорунда или карбида кремния чёрного [11]. Для исследования процесса МЭШ упрочняющих покрытий был выбран круг марки ПП250 × 25 × 32-5С25СТ6КАЛ на токопроводящей связке.

Поверхность упрочняющего покрытия при МЭШ формируется вследствие одновременного действия на неё множества абразивных зёрен, хаотически расположенных в связке абразивного круга [109].

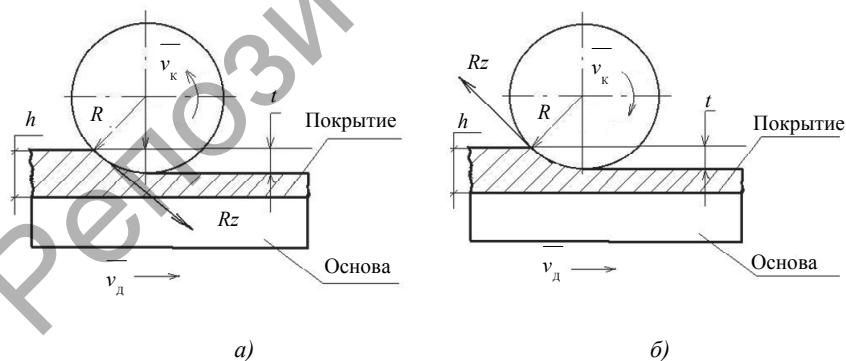
При изучении механизма образования шлифованной поверхности упрочняющего покрытия основное внимание следует уделять вопросу образования шероховатости поверхности. С геометрической точки зрения шероховатость поверхности образуется в результате копирования на обрабатываемой поверхности траектории движения режущих абразивных зёрен.

Известно, что для некоторых усреднённых условий шлифования примерно 78% абразивных зёрен являются не режущими, 12% — давящими и только 10% — режущими [81]. Наиболее нагруженными являются выступающие (режущие и давящие) зёрна. В связи с этим на поверхность упрочняющего покрытия действуют большие силы резания, которые объясняются малой площадью сечения срезаемого слоя и наличием отрицательного угла у абразивных зёрен. Большие силы резания могут привести к отслоению упрочняющего покрытия, изменению структуры его поверхностного слоя, твёрдости, т. е. повлиять на качество поверхности. Поэтому необходимо рассмотреть влияние режимов МЭШ на производительность обработки и шероховатость поверхности без введения в зону обработки дополнительных энергий технологического тока и магнитного поля.

При МЭШ упрочняющих покрытий существует две основные схемы влияния главной силы резания: одноименное движение круга и детали и детали и встречное движение круга и детали (рисунок 3.3).

При одноименном движении круга и детали главная сила резания прижимает и сдвигает покрытие относительно основы, что уменьшает вероятность отслоения покрытия. При встречном шлифовании главная сила резания стремится оторвать и сдвинуть покрытие относительно основы. В этом случае создаются более благоприятные условия шлифования, повышающие производительность обработки, однако возникают дополнительные нагрузки на покрытие, что может привести к отслоению упрочняющего покрытия. Особенно важно учитывать это при обработке напылённых газотермических упрочняющих покрытий. Поэтому для покрытий, имеющих низкую прочностью сцепления с основой, предпочтительно применять определённую схему (см. рисунок 3.3, а).

При МЭШ значение сил резания может быть уменьшено за счёт термического влияния на поверхность упрочняющего покрытия технологического тока. При прохождении технологического тока через стружку и токопроводящую связку происходит электрический разряд. При этом поверхность разогревается и расплавляется, вследствие чего шлифующее абразивное зерно испытывает меньшее сопротивление резанию. Износ абразивного круга при этом уменьшается, а стойкость увеличивается.



а — одноименное движение круга и детали; б — встречное движение круга и детали

Рисунок 3.3 — Схемы влияния главной силы резания при МЭШ

упрочняющих покрытий

Известно, что эффективность процесса шлифования, а следовательно, производительность зависит от средней и максимальной толщины срезов, снимаемых единичным зерном. Условия резания при этом определяются дугой контакта абразивного круга с поверхностью заготовки [81; 82]. Кроме того, от длины дуги контакта изменяется площадь контакта абразивного круга с деталью, что влияет на силу резания, а также плотность технологического тока в зоне обработки и, как следствие, физико-механические свойства обрабатываемого упрочняющего покрытия.

Длина дуги контакта для плоского шлифования определяется по формуле

$$L_k = \left( 1 \pm \frac{S_{\text{пр}}}{60v_k} \right) \sqrt{D_k t}, \quad (3.1)$$

где  $S_{\text{пр}}$  — продольная подача детали, м / мин;

$v_k$  — скорость на периферии абразивного круга, м / с;

$D_k$  — диаметр абразивного круга, м;

$t$  — глубина шлифования, м [82].

Из формулы (3.1) видно, что основное влияние на длину дуги контакта оказывают глубина шлифования и диаметр круга.

Скорость  $v_k$ , м / с, на периферии абразивного круга, которая является скоростью резания при МЭШ, определяем её для выбранных значений частот вращения по формуле

$$v_k = \frac{\pi D_k n_k}{60 \cdot 1000},$$

где  $D_k$  — диаметр абразивного круга, мм;

$n_k$  — частота вращения абразивного круга, мин<sup>-1</sup> [82].

Значения частоты вращения абразивного круга соответствуют значениям скорости резания при МЭШ упрочняющих покрытий (таблица 3.1). Диаметр абразивного круга является постоянной величиной  $D_k$  и равен 250 мм.

Производительность обработки  $Q_{\text{мех}}$  ( $\text{мм}^3 / \text{мин}$ ) при абразивном шлифовании периферией круга оценивается количеством материала, снятого в единицу времени зёрнами абразива, и может быть приблизительно рассчитана по формуле

$$Q_{\text{мех}} = HtS_{\text{пр}}, \quad (3.2)$$

где  $H$  — ширина шлифуемой поверхности (или высота абразивного круга), равная 10 мм;

$t$  — глубина шлифования, мм;

$S_{\text{пр}}$  — продольная подача, мм / мин [30].

Подставляя значения режимов МЭШ (таблица 3.2) в формулу (3.2), получим значения максимальной и минимальной производительности обработки.

Минимальное значение производительности обработки  $Q_{\text{мех}}$  равно  $198 \text{ мм}^3 / \text{мин}$ , а максимальное значение  $Q_{\text{мех}}$  составляет  $1404 \text{ мм}^3 / \text{мин}$ .

Влияние режимов МЭШ на шероховатость поверхности оценивали по профилограммам (приложение Г).

При МЭШ упрочняющих покрытий без наложения на зону обработки технологического тока и электромагнитного поля поверхность имеет характерную для традиционного шлифования микрогеометрию профиля продольного сечения. Микровыступы распределены равномерно и имеют заострённые вершины. Параметр шероховатости поверхности  $Ra$  находится в пределах  $1,5 \dots 3,2 \text{ мкм}$ .

Т а б л и ц а 3.1 — Значения частоты вращения абразивного круга и соответствующие значения скорости резания при МЭШ

$n, \text{мин}^{-1}$	$v, \text{м / с}$
2 000	26,0
3 000	39,2
4 000	52,3
4 500	54,9

Т а б л и ц а 3.2 — Значения режимов МЭШ

Продольная подача $S_{\text{пр}}, \text{мм / мин}$	Глубина шлифования $t, \text{мм}$
396,0	0,050
681,6	0,075
750,0	0,100

### **3.3 Электроискровые и электродуговые процессы в зоне обработки МЭШ и их влияние на производительность обработки и качество упрочняющих покрытий**

Влияние технологического тока на поверхностный слой упрочняющего покрытия может проявляться за счёт электроискровых разрядов, происходящих в зоне обработки МЭШ, при стружечном замыкании цепи «абразивный круг—поверхность упрочняющего покрытия» и при скольжении токопроводящей связки абразивного круга по обрабатываемой поверхности.

При развитой рабочей поверхности токопроводящего абразивного инструмента электроискровые разряды происходят преимущественно за счёт стружечного замыкания и через микровыступы на поверхности упрочняющего покрытия электродов, которыми являются абразивный круг и заготовка [83]. При сближении вращающегося инструмента и поверхности детали абразивные зёрна вступают в механический контакт с поверхностью упрочняющего покрытия и осуществляют процесс резания. Каждое режущее зерно инструмента снимает стружку, которая сходит по направлению к металлической связке круга и замыкает электрическую цепь «абразивный круг—заготовка». В месте касания стружки и металлической связки из-за прохождения тока высокой плотности интенсивно выделяется теплота. При этом стружка и/или микровыступ нагреваются до температуры плавления, в результате чего между электродами образуется жидкий мостик, который разрушается при температуре кипения металла. При разрушении жидкого мостика возникает электрический разряд, вызывающий электроэрозионное разрушение поверхности упрочняющего покрытия, оплавление микровыступов поверхности упрочняющего покрытия и металлической связки абразивного круга.

Согласно классификации У. Чейса [84], при коротком замыкании наблюдается четыре ситуации разрушения стружки: 1) плавление, когда подводимая энергия не достигает уровня, требуемого для полного испарения материала; 2) медленный взрыв, при этом время, необходимое для испарения замыкающего элемента, велико по сравнению со временем развития нестабильностей в расплавленном элементе; 3) быстрый взрыв, при котором время испарения

мало по сравнению с постоянной неустойчивостью; 4) взрывная абляция, когда время испарения мало по сравнению с электро-термической временной постоянной.

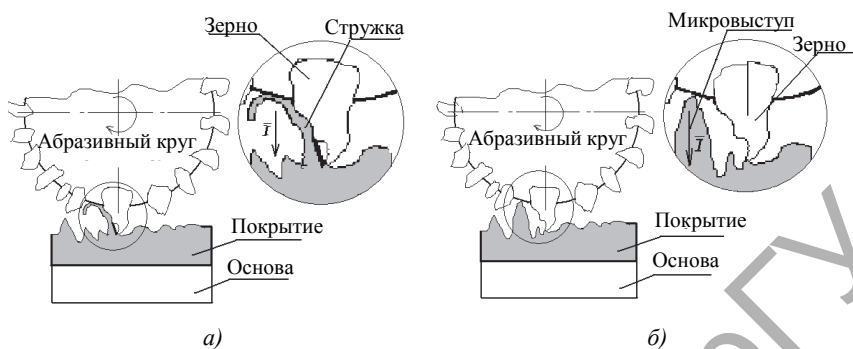
В результате этих явлений в зоне обработки МЭШ выделяется значительная тепловая энергия, которая влияет на съём материала упрочняющего покрытия и качество поверхностного слоя защитного покрытия.

Скользящий контакт возникает в том случае, когда на взаимодействующей поверхности абразивного круга отсутствуют абразивные зёрна или их количество ограничено, что происходит, например, при засаливании режущей поверхности инструмента продуктами шлифования, при износе зёрен.

Отмеченные формы электроконтактных процессов при скольжении и стружечном замыкании могут возникнуть одновременно или с последовательным чередованием, что зависит от состояния режущей поверхности абразивного круга, микрогеометрии поверхностного слоя упрочняющего покрытия и значений режимов МЭШ. При больших значениях технологического тока, в случае пробоя МЭП, могут возникать процессы электроэрозии при контакте зёрен абразивного круга с поверхностью детали. Процесс электроэрозии приводит к разрушению поверхностного слоя упрочняющего покрытия и образованию электроэрозионных лунок на поверхности детали и токопроводящей связке круга. Этот процесс влияет на формирование шероховатости поверхности и производительность обработки [85—88].

При больших значениях технологического тока  $I$ , равного 20...25 А, увеличивается плотность тока, вследствие этого значительно возрастает температура в зоне обработки, происходит расплавление материала упрочняющего покрытия, повышается его пластичность, что способствует уменьшению главных сил резания. При этом электроискровые процессы переходят в электродуговые, что приводит к выделению значительной тепловой энергии в зоне обработки. В результате этого поверхностный слой покрытия оплавляется на заданную глубину. Короткое замыкание цепи «абразивный круг—поверхность упрочняющего покрытия» может происходить по двум схемам (рисунок 3.4).

В первом случае короткое замыкание происходит через стружку, снимаемую абразивными зёрнами, во втором — через



*a*) — через стружки, снимаемые абразивными зёрнами; *б*) — через микровыступы поверхностного слоя защитного покрытия

Рисунок 3.4 — Схемы короткого замыкания цепи «токопроводящая связка абразивного круга—поверхность упрочняющего покрытия»

микровыступы поверхностного слоя покрытия. Известно, что процессы электрической эрозии протекают при значительных, порядка 100...200 А, значениях технологического тока [20]. При МЭШ площадь сечения стружки  $S_1$  является малой величиной, значение плотности тока, проходящего через стружку  $J_1$ , возрастает до значений  $1\ 000\ \text{А}/\text{мм}^2$ , при этом возникает условие процесса электроэрозионного разрушения поверхности упрочняющего покрытия.

Для установления влияния технологического тока на производительность обработки рассмотрим процесс удаления материала упрочняющего покрытия только за счёт электрической эрозии, происходящей при стружечном замыкании (см. рисунок 3.4, *a*).

Производительность обработки  $Q$  ( $\text{мм}^3/\text{мин}$ ) при МЭШ от электроэрозионного разрушения упрочняющего покрытия можно определить по зависимости

$$Q = k'V_3 / t_0, \quad (3.3)$$

где  $k'$  — коэффициент, учитывающий условия протекания процесса МЭШ;

$V_3$  — объём материала покрытия, удаляемого за счёт эрозионного разрушения единичным искровым разрядом,  $\text{мм}^3$ ;

$t_0$  — время действия электрического разряда, мин [85].

Коэффициент  $k'$  равен количеству стружек, снимаемых периферией круга за один проход и замыкающих цепь «абразивный круг—поверхность упрочняющего покрытия», и вычисляется по формуле

$$k' = \pi D_k H n_k i_p L / S_{пр}, \quad (3.4)$$

где  $i_p$  — количество режущих зёрен на единице площади периферии абразивного круга, шт. / мм<sup>2</sup>;

$L$  — длина обрабатываемой поверхности, мм;

$S_{пр}$  — продольная подача, мм / мин [82].

Подставляя в формулу (3.4) численные значения величин для процесса МЭШ упрочняющих покрытий ( $D_k$ , равный 250 мм,  $H$  — 25 мм,  $n$  — 2 000 мин<sup>-1</sup>,  $i_p$  — 3,  $L$  — 20 мм,  $S_{пр}$ , равная 936 мм / мин), имеем

$$k' = 3,14 \cdot 250 \cdot 25 \cdot 2\,000 \cdot 3 \cdot 20 / 936 = 2\,516\,025.$$

Принимая количество стружек, замыкающих цепь «абразивный круг—поверхность упрочняющего покрытия», за количество электрических разрядов, при которых возникает процесс электрической эрозии, определим среднюю мощность  $P_{ср}$  каждого из них по закону Джоуля—Ленца [89—91] с помощью формулы

$$P_{ср} = I^2 R_c, \quad (3.5)$$

где  $I$  — величина технологического тока, равная 20...25 А;

$R_c$  — электрическое сопротивление стружки, Ом.

Электрическое сопротивление стружки зависит от её формы, размеров и свойств обрабатываемого материала и определяется по формуле

$$R_c = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.6)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление стружки (для никеля  $\rho$  составляет  $7,3 \cdot 10^{-8}$  Ом · м);

$l$  — длина стружки, м;

$S$  — площадь поперечного сечения стружки,  $\text{м}^2$  [92].

Для расчёта электрического сопротивления стружки примем следующие допущения. Длину стружки  $l$  примем из условия, что размер части зерна, находящейся в связке круга, составляет  $2 / 3a_0$ , где  $a_0$  — размер зерна, равный 0,25 мм, тогда  $l = 0,25 - 2 / 3 \cdot 0,25 = 0,083 \text{ мм} = 8,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ .

Площадь поперечного сечения рассчитаем для принятой идеализированной формы стружки, представленной в виде полуцилиндра с радиусом  $R$  и высотой  $h$ , равной длине стружки  $l$  и замыкающей цепь между поверхностью покрытия и связкой круга (рисунок 3.5).

Тогда площадь поперечного сечения стружки определяется по формуле

$$S = \pi R^2 / 2, \quad (3.7)$$

где  $R$  — радиус сечения полуцилиндра, м.

Для расчёта площади поперечного сечения стружки значение  $R$  выберем исходя из зернистости круга, предполагая, что стружка в процессе резания сходит по всей ширине зерна (для зернистости 25 примем  $R$  равным 0,00025 м).

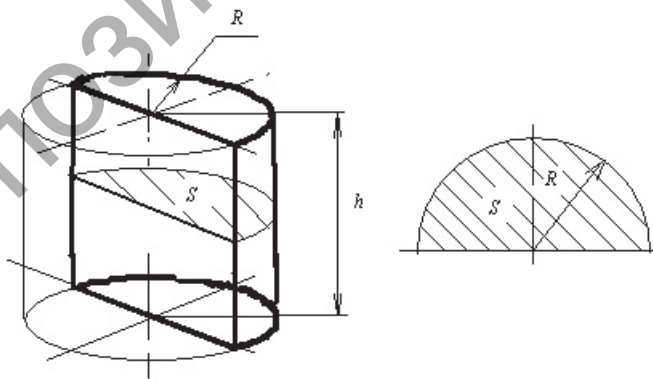


Рисунок 3.5 — Идеализированная форма стружки, принятая для расчёта площади поперечного сечения

Подставляя формулу (3.7) в (3.6), получим зависимость, по которой можно приближённо определить выражения значение электрического сопротивления стружки:

$$R_c = \rho \frac{l}{\pi R^2 / 2}. \quad (3.8)$$

Подставляя численные значения режимов для процесса МЭШ упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СР4 ( $\rho$  равно  $7,3 \cdot 10^{-8}$  м · м), получим

$$R_c = 7,3 \cdot 10^{-8} \frac{8,3 \cdot 10^{-5}}{3,14 \cdot 0,00025^2 / 2} = 6,17 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Подставляя формулу (3.8) в выражение (3.5), получим зависимость, по которой можно определить мощность  $P_{cp}$ , (Вт) единичного разряда:

$$P_{cp} = \frac{I_c^2 \rho l}{\pi R^2 / 2}.$$

Для вышеприведённых численных значений получим

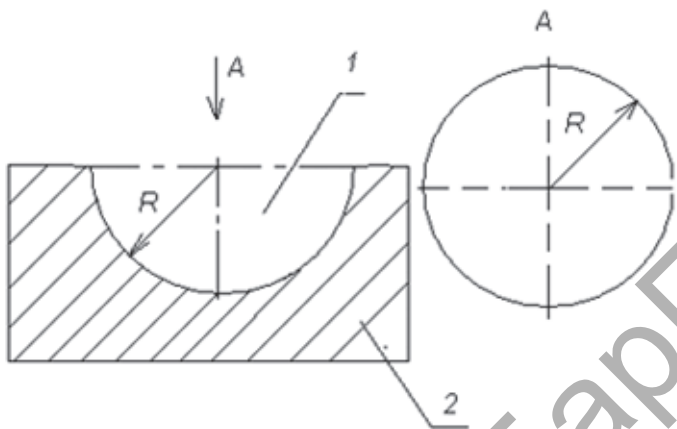
$$P_{cp} = 20^2 \cdot 6,17 \cdot 10^{-5} = 0,024 \text{ Вт.}$$

Объём материала  $V_9$  покрытия, удаляемого за счёт эрозионного разрушения единичным искровым разрядом, рассчитываем из условия, что идеальная форма электроэрозионной лунки представляет собой полусферу с определёнными геометрическими размерами (рисунок 3.6).

Тогда объём полусферы равен

$$V_9 = \frac{2}{3} \pi R_{\Pi}^3, \quad (3.9)$$

где  $R_{\Pi}$  — радиус полусферы, мм.



1 — полусфера (электроэрозионная лунка); 2 — упрочняющее покрытие

Рисунок 3.6 — Геометрические размеры полусферы ( $\times 1\ 000$ )

Среднее численное значение диаметра электроэрозионной лунки определим из анализа топографии поверхности упрочняющего покрытия из материала ПГ-СР4 (рисунок 3.7, см. вклейку).

Из анализа микрошлифа покрытия с электроэрозионной лункой (рисунок 3.8, см. вклейку) видно, что средняя глубина лунки  $h$  составляет  $\frac{1}{4}R_{\text{п}}$ . Это связано с тем, что не вся энергия единичного искрового разряда расходуется на электроэрозионное разрушение материала покрытия.

Поэтому формулу (3.9) представим в виде

$$V_3 = \frac{2}{3}\pi R_{\text{п}}^3 - \frac{2}{3}\pi \cdot h = \frac{1}{6}\pi R^3, \quad (3.10)$$

где  $R$  — радиус электроэрозионной лунки, мм.

Подставляя численные значения в формулу (3.10), получим объём удаляемого материала с поверхности покрытия за счёт электроэрозионного разрушения единичным электрическим разрядом:

$$V_3 = \frac{1}{6} \cdot 3,14 \cdot 0,02^3 = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3.$$

Время действия электрических разрядов равно времени обработки поверхности упрочняющего покрытия  $T_0$  и определяется из скорости продольной подачи  $S_{пр}$  по формуле

$$t_0 = \frac{L}{S_{пр}}, \quad (3.11)$$

где  $L$  — длина обрабатываемой поверхности, мм;

$S_{пр}$  — продольная подача, мм / мин.

Подставляя значения в формулу (3.11), для режимов МЭШ получим

$$t_0 = \frac{20}{936} = 0,021 \text{ мин.}$$

Подставляя формулы (3.4), (3.10) и (3.11) в формулу (3.3), получим формулу, по которой можно рассчитать производительность обработки  $Q_{эр}$  (мм<sup>3</sup> / мин), происходящей за счёт электроэрозионного разрушения поверхности упрочняющих покрытий при МЭШ:

$$Q_{эр} = \frac{\pi D_k H n_i R^3}{6}. \quad (3.12)$$

Подставляя численные значения режимов МЭШ в формулу (3.12), получим значение производительности обработки упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СР4 за счёт электроэрозионного разрушения, происходящего при стружечном замыкании цепи «абразивный круг—поверхность упрочняющего покрытия»:

$$Q_{эр} = 2\,516\,025 \cdot 1,3 \cdot 10^{-6} / 0,021 = 155,7 \text{ мм}^3 / \text{мин}.$$

Расчитанное значение производительности обработки является приближённым, так как в процессе МЭШ размеры лунок не одинаковые, их количество при различных режимах разное, следовательно, и объём материала, удаляемого за счёт эрозионного разрушения, также не одинаков. В представленных выше расчётах

приняты усреднённые значения геометрических размеров электроэрозионных лунок. Рассчитано максимальное значение производительности обработки  $Q_{\text{эп}}$  за счёт электроэрозионного разрушения поверхности с газотермическим упрочняющим покрытием из самофлюсующегося порошкового материала ПГ-СР2 для исследуемых режимов МЭШ, которое составляет  $205,8 \text{ мм}^3 / \text{мин}$ . Для сормаита ГН1 максимальное расчётное значение производительности обработки  $Q_{\text{эп}}$  равно  $240,6 \text{ мм}^3 / \text{мин}$ .

Технологический ток оказывает влияние на формирование шероховатости поверхности. Анализируя профилограммы поверхностей упрочняющих покрытий, полученных традиционным шлифованием и после МЭШ, отметим, что микровыступы во втором случае более пологие, чем в первом. Это связано с тем, что в результате МЭШ при прохождении технологического тока через микровыступы происходит их оплавление.

Для объяснения явления оплавления микровыступа поверхности упрочняющего покрытия представим его в виде конуса с геометрическими размерами (рисунок 3.9).

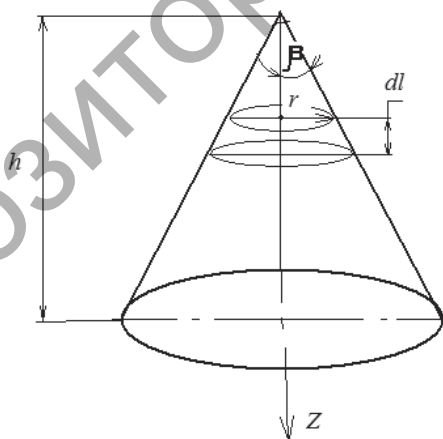


Рисунок 3.9 — Микровыступ профиля упрочняющего покрытия, представленный в виде конуса

Электрическое сопротивление  $dR$  элементарного участка микровыступа высотой  $dl$  определяется по формуле

$$dR = \rho \cdot \frac{dl}{S}, \quad (3.13)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление микровыступа (для никеля  $\rho$  равно  $7,3 \cdot 10^{-8}$  Ом  $\cdot$  м) [92].

Площадь поперечного сечения микровыступа можно определить по формуле

$$S = \pi r^2 = \pi (l \operatorname{tg} \beta)^2, \quad (3.14)$$

где  $r$  — радиус, м;

$\beta$  — угол при вершине конуса, град.

Подставляя уравнение (3.14) в выражение (3.13) и интегрируя его по высоте микровыступа  $h$ , получим формулу для определения электрического сопротивления конуса:

$$R = \rho \int_0^h \frac{dl}{\pi (l \operatorname{tg} \beta)^2} = \frac{\rho}{\pi \operatorname{tg}^2 \beta} \int_0^h \frac{dl}{l^2} = \frac{\rho}{\pi \operatorname{tg}^2 \beta} \left( -\frac{1}{l} \Big|_0^h \right) = \frac{\rho}{\pi \operatorname{tg}^2 \beta} \left( \frac{1}{0} - \frac{1}{h} \right).$$

Сопротивление участка микровыступа  $R_{\text{уч}}$  поверхности упрочняющего покрытия определяется по формуле

$$R_{\text{уч}} = \frac{\rho}{\pi \operatorname{tg}^2 \beta} \left( \frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_2} \right),$$

где  $h_1$ ,  $h_2$  — начальная и конечная высоты, ограничивающие участок микровыступа, м.

Теплота, выделяемая при прохождении технологического тока через микровыступ в единицу времени, определяется по формуле

$$d\Theta = I^2 R_{\text{уч}} dt.$$

Так как площадь поперечного сечения участка микровыступа у вершины  $S_v$  меньше, чем у основания  $S_o$ , то значение электрического сопротивления при вершине конуса будет соответственно больше, чем у основания. Следовательно, значение теплоты, выделяемой на вершине микровыступа  $d\Theta_v$ , будет выше, чем теплота, выделяемая у его основания  $d\Theta_o$ . Поэтому при МЭШ происходит оплавление вершин микронеровностей. В результате оплавления шероховатость поверхности уменьшается, так как выступы становятся более пологие, увеличивается площадь опорной поверхности упрочняющего покрытия, что оказывает влияние на его эксплуатационные свойства.

### 3.4 Влияние электромагнитного поля на формирование поверхности упрочняющих покрытий при МЭШ

В процессе МЭШ упрочняющих покрытий наложение на зону обработки электромагнитного поля при определённом направлении векторов технологического тока и магнитной индукции создаёт силу  $F$ , влияющую на канал разряда в момент прохождения технологического тока через стружку или микронеровности поверхности в зоне обработки [110]. Возникающая сила  $F$  направлена в одном направлении с главной силой резания  $P_z$  (рисунок 3.10) и создаёт момент, определяемый по формуле

$$M = \int_0^R I l d l B ,$$

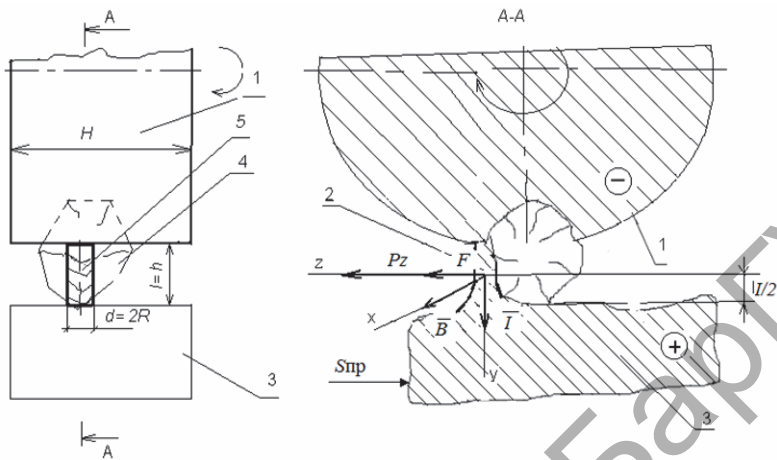
где  $I$  — сила тока в цепи «абразивный круг—деталь», А;

$R$  — радиус токопроводящего абразивного круга, м;

$l$  — длина стружки, по которой протекает ток, м;

$B$  — величина магнитной индукции электромагнитного поля в зоне контакта, Тл [92].

Механическая энергия, возникающая при действии силы  $F$ , способствует удалению продуктов шлифования из зоны обработки.



1 — абразивный круг; 2 — векторы сил; 3 — поверхность упрочняющего покрытия; 4 — режущее абразивное зерно

Рисунок 3.10 — Схема векторов сил, действующих на стружку, снимаемую единичным режущим зерном в процессе МЭШ

Технологический ток, проходя через стружку, разогревает её. В этот момент стружку можно считать проводником с током, находящимся в магнитном поле [68]. Сила, действующая на стружку, по которой протекает ток, может вызывать разрыв жидкой перемычки, образовавшейся за счёт её нагрева ещё до момента, когда она перегреется, и температура её достигнет температуры кипения.

Если взаимодействие технологического тока и магнитных полей будет достаточно сильным, то появятся условия для возникновения электрической дуги. Время её существования будет зависеть от силы тока, протекающего по ней, и напряженности окружающего магнитного поля.

Момент разрыва дуги можно рассматривать как длительный импульсный электрический разряд, т. е. часть электронов с катода и после прекращения горения дуги ещё продолжает свой путь к аноду и, сталкиваясь с ним, оказывает на анод действие, подобное импульсному разряду. Следовательно, и после того, как дуга погаснет, магнитное поле оказывает своё влияние на поток электронов

(заряженных частиц) и может изменять траектории их движения к детали-аноду. Поэтому увеличивается время действия разряда на поверхность упрочняющего покрытия. Смещение дуги разряда магнитным полем увеличивает площадь её электроэрозионного воздействия на поверхность упрочняющего покрытия, следовательно, повышается производительность обработки.

Рассмотрим влияние силы  $F$  со стороны электромагнитного поля на стружку, снимаемую единичным режущим абразивным зерном в процессе МЭШ.

Для разработки идеализированной физико-математической модели, определяющей силовое влияние электромагнитного поля на стружку в момент прохождения по ней технологического тока при МЭШ, примем следующие допущения: обрабатываемая поверхность имеет малую высоту микронеровностей по отношению к размерам зерна, что обеспечивает съём стружки и замыкание цепи по схеме (см. рисунок 3.4, а); длина стружки обеспечивает протекание технологического тока по цепи «абразивный круг—поверхность упрочняющего покрытия»; форму стружки для упрощения расчётов будем рассматривать в виде полуцилиндра с радиусом основания  $R$  и высотой  $h$ , равной зазору  $l$  между поверхностью покрытия и связкой круга (рисунок 3.11).

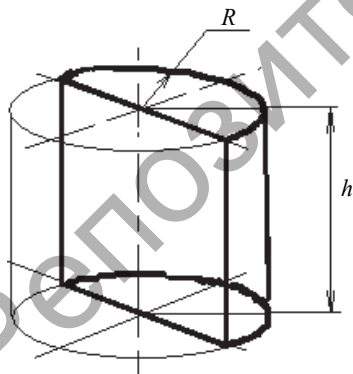


Рисунок 3.11 — Идеализированная форма стружки, снимаемая единичным зерном абразивного круга, принятая для расчёта силы  $F$

Мгновенная величина силы в результате взаимодействия электромагнитного поля и стружки, по которой протекает технологический ток, определяется по формуле

$$F = I_{\text{стр}} B l \sin \alpha, \quad (3.15)$$

где  $I_{\text{стр}}$  — средняя величина технологического тока, проходящего через стружку, А;  
 $B$  — величина магнитной индукции в зоне обработки, равная 0,25 Тл;

- $l$  — длина стружки, равная 0,00017 м;  
 $\alpha$  — угол между направлениями векторов полей, равный  $90^\circ$  [92].

При этом сила  $F$ , действующая на стружку, будет нормальна к плоскости, проходящей через ось вращения круга и точку контакта его с изделием.

Таким образом, формулу (3.15) можно представить в виде

$$F = I_{\text{стр}} Bl. \quad (3.16)$$

Средняя величина технологического тока  $I_{\text{стр}}$ , протекающего через стружку, отличается от значения технологического тока в цепи «абразивный круг—поверхность покрытия»  $I$ , так как оно зависит от количества одновременно контактирующих стружек, т. е. от величины и концентрации зёрен в круге и площади контакта абразивного круга с поверхностью упрочняющего покрытия. Тогда средняя величина технологического тока, проходящего через единичную стружку, равна

$$I_{\text{стр}} = \frac{I}{k}, \quad (3.17)$$

где  $I$  — значение технологического тока в цепи «абразивный круг—поверхность упрочняющего покрытия» в пределах длины дуги контакта;

$k$  — общее количество зёрен, участвующих в резании, на площади, ограниченной длиной дуги контакта с поверхностью упрочняющего покрытия и высотой абразивного круга.

Величину  $k$  можно определить по формуле

$$k = HL_k i_p, \quad (3.18)$$

где  $H$  — высота круга, равная 0,025 м;

$L_k$  — длина дуги контакта абразивного круга с обрабатываемой поверхностью (рассчитывается для плоского шлифования периферией круга по формуле (3.1));

$i_p$  — количество режущих зёрен на единице площади, ограниченной длиной дуги контакта и высотой абразивного круга, шт. / м<sup>2</sup>.

Подставляя формулу (3.18) в выражение (3.17), а формулы (3.17) и (3.1) в выражение (3.16), получим физико-математическую модель определения силы  $F$ , действующей на стружку, по которой протекает технологический ток со стороны электромагнитного поля:

$$F = \frac{IBl}{H \left( 1 \pm \frac{S_{\text{пр}}}{60v_{\text{к}}} \right) \sqrt{D_{\text{к}} t i_{\text{р}}}}, \quad (3.19)$$

где  $I$  — значение технологического тока в цепи «абразивный круг—поверхность упрочняющего покрытия» в пределах длины дуги контакта, А;

$B$  — величина магнитной индукции в зоне обработки, Тл;

$l$  — длина стружки, м;

$H$  — высота круга, м;

$S_{\text{пр}}$  — продольная подача, м / мин;

$v_{\text{к}}$  — скорость на периферии абразивного круга, м / с;

$D_{\text{к}}$  — диаметр абразивного круга, м;

$t$  — глубина шлифования, м;

$i_{\text{р}}$  — количество режущих зёрен на единице площади, ограниченной длиной дуги контакта и высотой абразивного круга, шт. / м<sup>2</sup>.

Подставляя значения режимов в формулу (3.19), получим зависимости силы от основных режимов МЭШ  $F(I)$ ,  $F(B)$ ,  $F(t)$ ,  $F(S)$ ,  $F(v_{\text{к}})$ .

Переменные значения режимов МЭШ для расчёта силы  $F$  представлены в таблице 3.3.

Т а б л и ц а 3.3 — Переменные значения режимов МЭШ

$v_{\text{к}}$ , мин <sup>-1</sup>	$S$ , мм / мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл
26,0	120	5	0,005	0,1
39,2	1 400	10	0,025	0,2
52,3	2 800	15	0,05	0,3
54,9	3 000	20	0,1	0,4

Графики зависимостей силы  $F$ , действующей на стружку, снимаемую единичным режущим абразивным зерном, от основных режимов МЭШ  $F(I)$ ,  $F(B)$ ,  $F(t)$ ,  $F(S)$ ,  $F(v_k)$  показаны на рисунках 3.12—3.16.

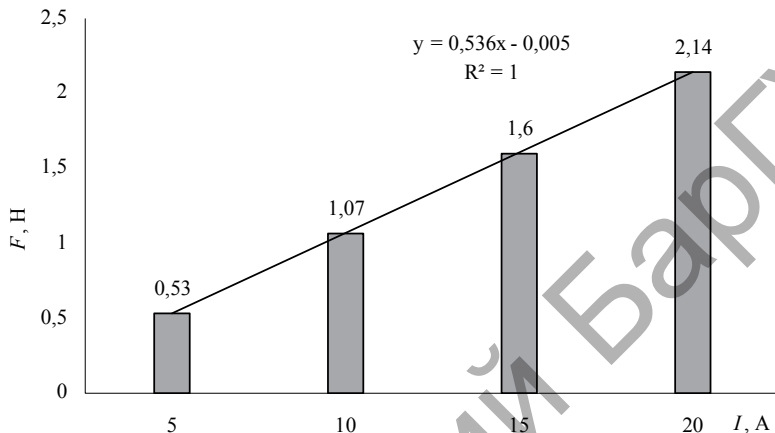


Рисунок 3.12 — Зависимость силы  $F$ , действующей на стружку, от технологического тока  $I$  при МЭШ

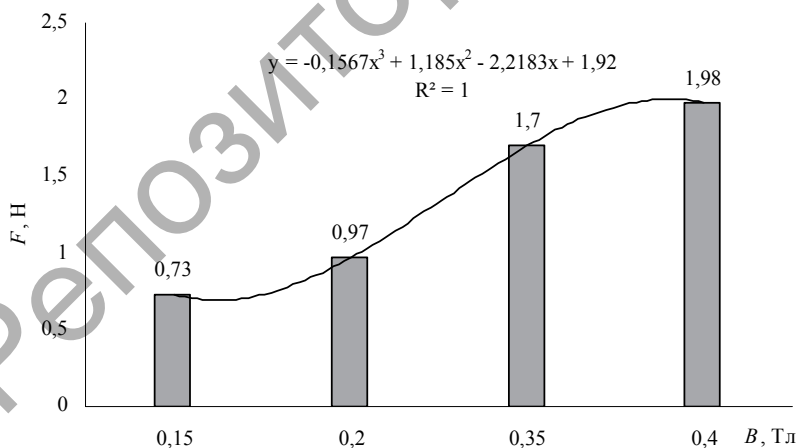


Рисунок 3.13 — Зависимость силы  $F$ , действующей на стружку, от величины магнитной индукции  $B$  при МЭШ

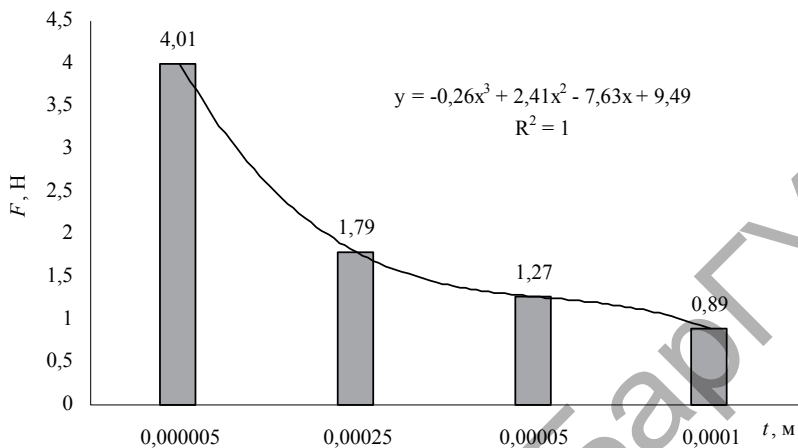


Рисунок 3.14 — Зависимость силы  $F$ , действующей на стружку, от глубины шлифования  $t$  при МЭШ

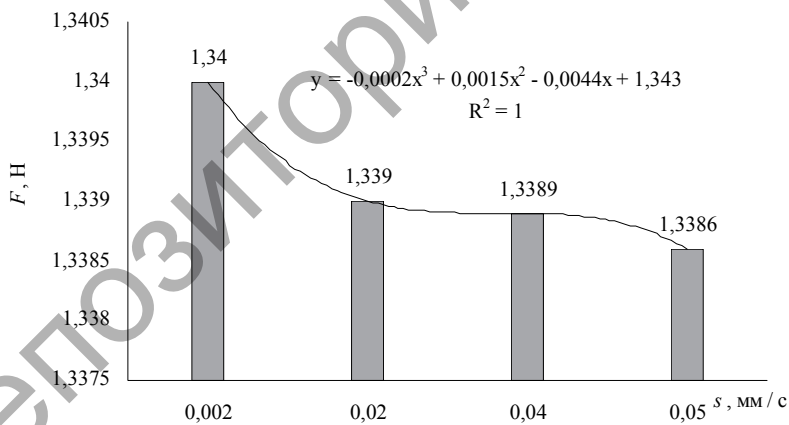


Рисунок 3.15 — Зависимость силы  $F$ , действующей на стружку, от продольной подачи  $S$  при МЭШ

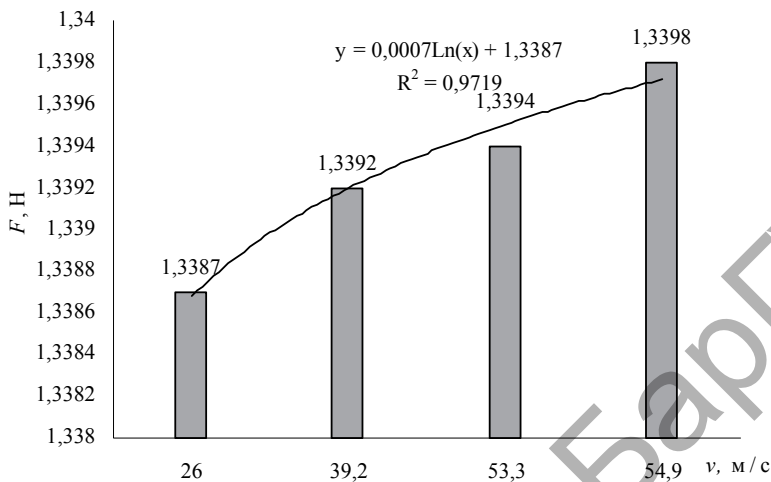
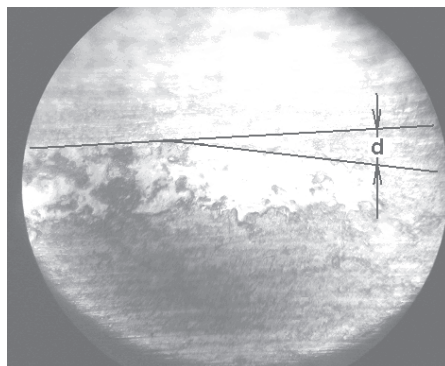


Рисунок 3.16 — Зависимость силы  $F$ , действующей на стружку, от скорости на периферии абразивного круга  $v_k$  при МЭШ

Физико-математическая модель (3.19) представляет собой приближенную идеализированную модель, по которой можно определить механизм влияния силы  $F$  внешнего электромагнитного поля на канал электрического разряда в момент прохождения технологического тока через стружку или микровыступ на поверхности защитного покрытия.

Электромагнитное поле оказывает силовое влияние на канал разряда, образующийся при коротком замыкании цепи «абразивный круг—поверхность упрочняющего покрытия» продуктами шлифования [93; 94]. При влиянии магнитной индукции на электрический или дуговой разряд может происходить его смещение в направлении действия электромагнитной силы, в результате этого форма электроэрозионной лунки изменяется и смещается в направлении действия силы (рисунок 3.17). Величина смещения увеличивается с ростом значения магнитной индукции.

Из графиков следует, что основное влияние на электромагнитную силу, а следовательно, на смещение электрических разрядов, оказывают технологический ток и магнитная индукция.



$I$  равно 5...10 А;  $B$  — 0,15...0,20 Тл;  $S$  — 2 800 мм/мин,  $t$  — 0,005...0,025 мм;  $v$  — 26 м/с

Рисунок 3.17 — Фотография электроэрозионной лунки на поверхности покрытия ПГ-СР4, смещённой в направлении действия силы  $F$  ( $\times 1\ 000$ )

В результате этого смещения увеличивается площадь электроэрозионного воздействия электрического разряда, а следовательно, объём электроэрозионных лунок, в 2,0...2,5 раза, и, соответственно, объём удаляемого материала упрочняющего покрытия, что ведёт к увеличению производительности обработки до значений  $Q_{\text{эп}}$ , составляющих 400...600 мм<sup>3</sup>/мин, что в 2,5 раза выше, чем при алмазном шлифовании. Производительность обработки  $Q$  (мм<sup>3</sup>/мин) рассчитывается по формуле (3.3).

Электроэрозионные лунки могут накладываться друг на друга, при этом изменяется направление микронеровностей поверхности. Магнитное поле оказывает влияние на расплавленный материал упрочняющего покрытия, образованный за счёт термического действия электроискровых разрядов. Имеются существенные различия в значениях магнитной проницаемости парамагнитного материала покрытия ( $\mu_{\text{покр}} \approx 1,05$ ) и ферромагнитной основы ( $\mu_{\text{осн}} \approx 1000$ ), при этом расплавленный материал покрытия стремится растечься по обрабатываемой поверхности. Это

объясняется разностью давления на поверхности расплавленного материала покрытия и внутри покрытия, определяемого по формуле

$$P = \Delta W = \frac{\mu_0 \mu_{\text{mat}} H^2}{2} - \frac{\mu_0 \mu_{\text{осн}} H^2}{2},$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;

$\mu_{\text{mat}}$  — магнитная постоянная парамагнитного материала покрытия (расплава);

$\mu_{\text{осн}}$  — магнитная постоянная ферромагнитного материала основы;

$H$  — напряжённость магнитного поля, А / м [92].

Явление растекания расплава парамагнитного материала покрытия на поверхности ферромагнитной основы показано на рисунке 3.18.

Расплав заполняет микровпадины на поверхности покрытия, что способствует уменьшению шероховатости поверхности.

При МЭШ электрические разряды и магнитное поле воздействуют не только на стружку и связку инструмента, но и на материал поверхности упрочняющего покрытия. Это и определяет, в основном, специфику структурных изменений в поверхности

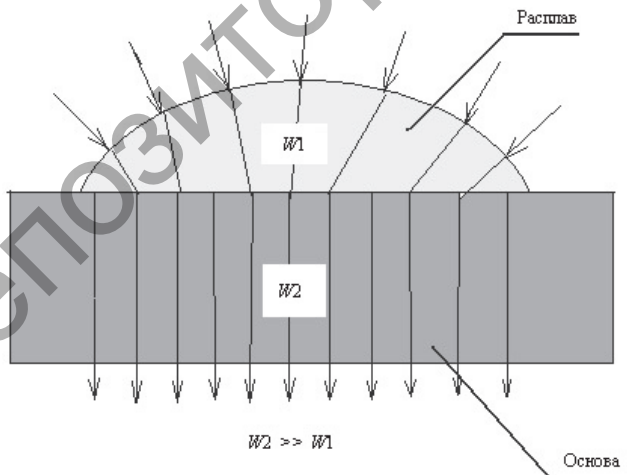


Рисунок 3.18 — Явление растекания расплава парамагнитного материала покрытия на поверхности ферромагнитной основы

упрочняющего покрытия. Множество режимов и различных результатов их взаимодействий обуславливает необходимость детального исследования качества и свойства поверхностей упрочняющих покрытий после обработки МЭШ.

Тепловые, электрические и диффузионные процессы в металле могут математически рассматриваться как потоки энергии. Для МЭШ особое значение имеют некоторые характерные поточные дифференциальные уравнения Максвелла. Одно из них определяет электрическое поле в металле:

$$\frac{\partial E}{\partial \tau} = \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}; \quad (3.20)$$

второе — магнитное поле:

$$\frac{\partial B}{\partial \tau} = \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 B}{\partial x^2},$$

где  $E$  — электрический потенциал;

$\tau$  — время;

$\rho$  — удельное сопротивление;

$\mu$  — магнитная проницаемость;

$x$  — координата;

$B$  — магнитная индукция [48].

Следует отметить, что электрический ток не может существовать без магнитного поля, которое сжимает линии протекающего по проводнику электрического тока. Если ток проходит в другой среде (газовой или жидкостной), то магнитное поле не позволяет растекаться линиям электрического тока на значительное расстояние, что определяет существование канала разряда.

Математическое описание этого процесса можно рассмотреть на следующем примере. Уравнение теплопроводности для точечного источника теплоты имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (3.21)$$

где  $\alpha$  — теплопроводность материала.

Уравнение теплопроводности (3.21) и уравнение электромагнитного поля (3.20) отличаются друг от друга только физическими константами и природой функций  $B$  и  $T$ . В остальном они формально математически полностью подобны. При рассмотрении модели потоков  $Q$  и  $I$  по проводнику ограниченного размера их движения подобны (рисунок 3.19).

При прохождении потоков энергии в пространство 2—3, т. е. в металлическую пластину, электрический ток выходит из этой пластины в область 3—4 таким же по величине, каким он вошёл в неё, какие бы искривления он ни претерпевал внутри пластины.

Тепловой поток теряет в пластине значительную долю своего потенциала и выходит из пластины значительно ослабленным. Это свидетельствует о том, что тепловой поток внутри пластины не сжимается никакими силами, а электрический ток сжат магнитным полем. При протекании разряда во время шлифования внутренний магнитный поток при напряжённости поля  $H_B = H/2 = 1/4\pi$  определится следующим образом:

$$\Phi_B = \mu I \Delta / 4\pi.$$

Плотность потока электромагнитного поля изменяется с глубиной проникновения тока. Эквивалентная глубина проникновения тока вычисляется по формуле

$$\Delta = \frac{1}{K} \sqrt{2/\omega\mu_0\mu\gamma} = 503\sqrt{\rho/\mu f},$$

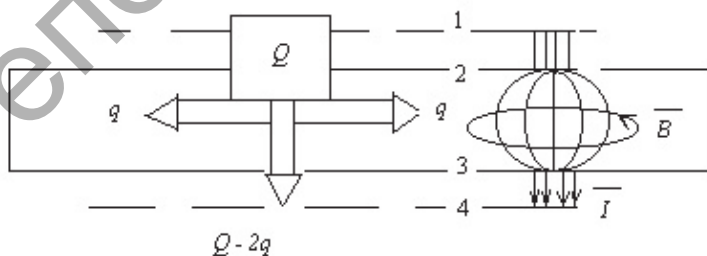


Рисунок 3.19 — Схема влияния электромагнитного поля на прохождение тока по проводнику

где  $K$  — коэффициент;  
 $\rho$  — удельное электрическое сопротивление проводника (стружки);  
 $\mu$  — относительная магнитная проницаемость материала упрочняющего покрытия;  
 $f$  — частота электроискровых разрядов [89].

### 3.5 Термические процессы в зоне обработки МЭШ

При обработке МЭШ поверхность упрочняющего покрытия подвергается значительным температурным воздействиям. От степени нагрева металла, характера распределения теплоты и деформаций обрабатываемого поверхностного слоя зависят структурные и фазовые превращения: механические, технологические и эксплуатационные свойства поверхности. Кроме того, от интенсивности протекания тепловых процессов в зоне обработки зависит производительность обработки и качество поверхностного слоя покрытия. При обработке упрочнённых поверхностей возможно изменение физико-механических свойств материала покрытия: потеря или повышение твёрдости поверхности, изменение остаточных напряжений и т. д. [111]

На теплообразование в зоне обработки МЭШ влияет ряд регулируемых переменных: механическая энергия резания, сдвига и трения; сопротивление контакта и металла; время прохождения технологического тока по проводнику; мощность разрядов; глубина шлифования; скорость резания; влияние внешнего электромагнитного поля на технологический ток и расплав [95].

При МЭШ на обрабатываемой поверхности можно выделить две основные зоны термического влияния [112]. Первая зона — непосредственно зона обработки. Характеризуется термическим влиянием технологических режимов МЭШ (технологического тока, сил трения, магнитной индукции и т. д.). Вторая — это зона после обработки. Характеризуется процессом охлаждения, конвективным теплообменом между поверхностью детали и окружающей средой, а также образованием диффузионных связей на границе «упрочняющее покрытие—основа».

Теплота, выделяемая в процессе МЭШ от преобразования механической и электрической энергий, распространяется от поверхности обработки упрочняющего покрытия к основанию, а теплота, образующаяся в результате преобразования энергии электромагнитного поля, передаётся за счёт теплопроводности от основы к покрытию.

Для напылённых газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов одним из качественных показателей является обеспечение прочности сцепления покрытия с основой. Прочная металлическая связь напылённого газотермического упрочняющего покрытия с основой образуется при значении температуры на границе «упрочняющее покрытие—основа», равной температуре плавления материала покрытия (для самофлюсующихся сплавов ПГ-СР4 и ПГ-СР2  $T_{пл1}$  равна  $990^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{пл2}$  составляет  $1050^{\circ}\text{C}$  в соответствии с ТУ 14-22-33-90) [4н].

Основными требованиями к режимам оплавления напылённых упрочняющих покрытий являются: 1) получение прочной связи с основой при минимальном содержании элементов основного металла в покрытии; 2) сохранение его высоких эксплуатационных свойств. Процесс термического влияния режимов МЭШ должен быть достаточным для образования прочной диффузионной связи упрочняющего покрытия с основой при сохранении химического состава поверхностных слоёв, что достигается ограничением температуры и времени контакта твёрдой и жидкой фаз. Поэтому необходимо определить численные значения режимов МЭШ, обеспечивающих условие оплавления поверхностного слоя покрытия на заданную глубину с сохранением его качественных показателей. При МЭШ напылённых газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов ПГ-СР4 и ПГ-СР2 на первых проходах необходимо обеспечить максимальную производительность обработки и снятие дефектного слоя припуска, величину погрешности установки детали, погрешность формы.

Для выяснения механизма термического влияния электрических разрядов во второй зоне, связанных с оплавлением поверхности упрочняющего покрытия, необходимо разработать соответствующую математическую модель, связывающую температуру в зоне обработки с параметром технологического тока и основными физико-механическими свойствами материала покрытия. Для этого

необходимо решить уравнение теплового баланса, которое для МЭШ упрочняющих покрытий можно представить в следующем виде:

$$\Theta_T = \Theta_{\text{стр}} + \Theta_{\text{абр. к}} + \Theta_{\text{пов. покр}}$$

- где  $\Theta_T$  — общее количество теплоты, выделяемое всеми электрическими разрядами в зоне обработки МЭШ;
- $\Theta_{\text{стр}}$  — количество теплоты, переходящее в стружку;
- $\Theta_{\text{абр. к}}$  — количество теплоты, переходящее в абразивный круг;
- $\Theta_{\text{пов. покр}}$  — количество теплоты, переходящее в поверхность покрытия.

Для разработки математической модели примем следующие допущения. Поверхность упрочняющего покрытия шлифуется периферией токопроводящего абразивного круга, высота которого равна  $H$ . Источником тепла является зона, представляющая собой квазилинейный, движущийся со скоростью продольной подачи заготовки  $S$ , источник с интенсивностью  $q$  и длиной  $L$  (рисунок 3.20), равной длине дуги контакта  $L_k$  абразивного круга с поверхностью покрытия, определяемой по формуле (3.1). Поверхность нагрева

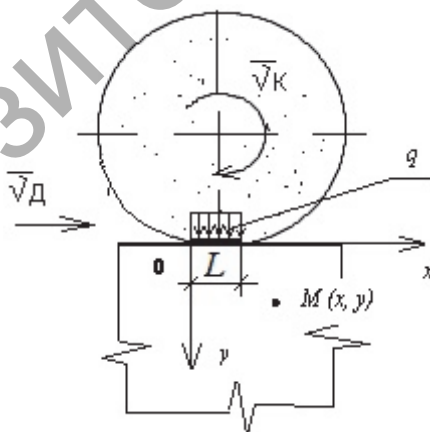


Рисунок 3.20 — Движущийся квазилинейный источник теплоты

определяется как множество точечных источников теплоты с одинаковой мощностью, распределённых по высоте токопроводящего абразивного круга в пределах длины дуги контакта [113]. Количество теплоты, образующееся вследствие стружечного замыкания токопроводящей связки абразивного круга с деталью, принимаем равным 10%, а за счёт замыкания через микровыступы поверхности упрочняющего покрытия — 12%. Данное условие принимаем исходя из количества находящихся в работе зёрен в процессе шлифования [82].

Количество теплоты  $d\Theta_{\tau}$ , передаваемое поверхности от единичного разряда за промежуток времени  $d\tau$ , определяется по формуле

$$d\Theta_{\tau} = qd\tau, \quad (3.22)$$

где  $q$  — эффективная тепловая мощность, Вт [92].

Эффективная тепловая мощность определяется по формуле

$$q = \eta I_{\text{cp}}^2 R, \quad (3.23)$$

где  $\eta$  — КПД;

$R$  — электрическое сопротивление микронеровностей покрытия или стружки, Ом, определяемое по формуле (3.13);

$I_{\text{cp}}$  — средняя величина технологического тока, проходящего через микровыступ поверхности или стружку, А [96].

Подставляя формулу (3.23) в (3.22), получим

$$d\Theta_{\tau} = \eta I^2 R d\tau. \quad (3.24)$$

Интегрируя обе части уравнения (3.24) по времени обработки поверхности  $d\tau$ , получим количество теплоты, расходуемое на нагрев всей поверхности обработки за один проход:

$$\Theta_{\tau} = \eta I^2 R \tau, \quad (3.25)$$

где  $\tau$  — время обработки поверхности, с.

Количество теплоты, необходимое для плавления стружки и микронеровностей поверхности упрочняющего покрытия, определяется по формуле

$$d\Theta_{\text{стр}} + d\Theta_{\text{пов}} = \rho dV_{\text{стр}} c (T_{\text{пл}} - T_{\text{дет}}) + \lambda dV_{\text{пов}} \rho, \quad (3.26)$$

где  $\rho$  — плотность материала упрочняющего покрытия, кг / м<sup>3</sup>;

$dV_{\text{стр}}$ ,  $dV_{\text{пов}}$  — элементарный объём стружки и микронеровностей поверхности в пределах дуги контакта, м<sup>3</sup>;

$c$  — удельная теплоёмкость материала упрочняющего покрытия, Дж / (кг · К);

$T_{\text{пл}}$  — температура плавления материала упрочняющего покрытия, К;

$T_{\text{дет}}$  — температура поверхности детали до обработки, К;

$\lambda$  — удельная теплота плавления, Дж / кг [96].

Среднее значение объёма стружки, определяемое на площади, ограниченной дугой контакта  $dL$  абразивного круга с поверхностью упрочняющего покрытия и высотой круга  $H$ , определим по формуле

$$dV_{\text{стр}} = 0,1 f_{\text{стр}} H dL, \quad (3.27)$$

где  $f_{\text{стр}}$  — средняя высота стружки, м;

Объём микронеровностей поверхности на площади, ограниченной элементарным участком длины дуги контакта  $dL$  абразивного круга с поверхностью упрочняющего покрытия и высотой круга  $H$ , определяется по формуле

$$dV_{\text{пов}} = 0,12 f_{\text{пов}} H dL, \quad (3.28)$$

где  $f_{\text{пов}}$  — средняя высота микронеровностей поверхности, м.

Подставляя уравнения (3.27) и (3.28) в (3.26) и интегрируя обе части по длине дуги контакта, получим уравнение количества

теплоты, затрачиваемого на плавление стружки и микронеровности поверхности упрочняющего покрытия:

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{стр}} + \Theta_{\text{пов. покр}} &= \rho \cdot 0,1 f_{\text{стр}} HL_{\text{к}} c (T_{\text{пл}} - T_{\text{дет}}) + \lambda \cdot 0,12 \cdot f_{\text{пов}} HL_{\text{к}} \rho = \\ &= \rho HL_{\text{к}} \left[ 0,1 f_{\text{стр}} c (T_{\text{пл}} - T_{\text{дет}}) + 0,12 \cdot f_{\text{пов}} \lambda \right]. \end{aligned} \quad (3.29)$$

Теплота от действия электрических разрядов, переходящая в круг, определяется по формуле

$$\Theta_{\text{кр}} = c_{\text{к}} m \Delta T, \quad (3.30)$$

где  $c_{\text{к}}$  — удельная теплоёмкость материала связки круга, Дж / (кг · К);

$m$  — масса нагретого материала связки круга, кг;

$\Delta T$  — разность температуры плавления и начальной температуры материала связки круга, К, определяемая из выражения  $T_{\text{пл}} - T_0$ .

Приравняв уравнения (3.30), (3.29) и (3.25), получим уравнение теплового баланса, из которого можно определить оптимальное значение технологического тока, необходимого для оплавления поверхностного слоя детали при МЭШ:

$$\eta I^2 R \tau = \rho HL_{\text{к}} \left[ 0,1 f_{\text{стр}} c (T_{\text{пл}} - T_{\text{дет}}) + 0,12 f_{\text{пов}} \lambda \right] + c_{\text{к}} m \Delta T.$$

Тогда величина технологического тока, необходимая для оплавления поверхностного слоя напылённого газотермического упрочняющего покрытия из самофлюсующихся материалов, равна

$$I = \sqrt{\frac{\rho HL_{\text{к}} \left[ 0,1 f_{\text{стр}} c (T_{\text{пл}} - T_{\text{дет}}) + 0,12 f_{\text{пов}} \lambda \right] + c_{\text{к}} m \Delta T}{\eta R \tau}}, \quad (3.32)$$

где  $\rho$  — плотность материала упрочняющего покрытия, кг / м<sup>3</sup>;

$H$  — высота абразивного круга, м;

$L_{\text{к}}$  — длина дуги контакта поверхности абразивного круга с деталью, м;

$f_{\text{стр}}$  — средняя высота стружки, м;

- $c$  — удельная теплоёмкость материала упрочняющего покрытия, Дж / (кг · К);  
 $T_{\text{пл}}$  — температура плавления материала упрочняющего покрытия, К;  
 $T_{\text{дет}}$  — температура поверхности детали до обработки, К;  
 $f_{\text{пов}}$  — средняя высота микронеровностей поверхности в пределах длины дуги контакта, м;  
 $\lambda$  — удельная теплота плавления материала упрочняющего покрытия, Дж / кг;  
 $c_{\text{к}}$  — удельная теплоемкость материала связки круга, Дж / (кг · К);  
 $m$  — масса нагретого материала связки круга и зерна, кг;  
 $\Delta T$  — разность температуры плавления и начальной температуры материала связки круга, К, вычисляемая из выражения  $T_{\text{пл}} - T_0$  ;  
 $\eta$  — КПД;  
 $R$  — электрическое сопротивление микронеровностей покрытия, Ом;  
 $\tau$  — время обработки поверхности, с.

Из формулы (3.32) видно, что величина технологического тока находится в прямой зависимости от скорости на периферии круга и температуры плавления материала упрочняющего покрытия. Подставляя в формулу (3.32) значения режимов МЭШ, можно определить величину технологического тока, необходимую для оплавления упрочняющего покрытия на заданную глубину и уменьшения шероховатости поверхности [114—116].

Значения режимов МЭШ напылённых газотермических упрочняющих покрытий, обеспечивающих максимальную производительность обработки на первых проходах, должны находиться в пределах:  $I$ , равное 2,5...5,0 А;  $B$  — 0,1...0,2 Тл;  $S$  — 750...936 мм / мин;  $t$  — 0,10...0,15 мм;  $v$  — 13,2...21,0 м / с. При достижении значения припуска 0,4 мм на предпоследнем проходе обработку МЭШ необходимо вести на режимах ( $I$  равно 15...20 А;  $B$  — 0,3...0,4 Тл;  $S$  — 391...681 мм / мин;  $t$  — 0,05 мм;  $v$  — 8,4...13,2 м / с), обеспечивающих оплавление поверхностного слоя на глубину, равную величине

допуска на износ  $\Delta = \delta_{\text{и}} = 0,4$  мм. На последнем проходе обеспечивается удаление шлаков, образующихся в процессе оплавления, и продуктов электроэрозионного действия электрических разрядов с поверхности оплавленного газотермического упрочняющего покрытия. Обработка в этом случае осуществляется только на кинематических режимах (с отключением технологического тока и магнитной индукции). Оптимальные значения режимов для последнего прохода:  $S$  равно 750...936 мм / мин;  $t$  — 0,005 мм;  $v$  — 35...42 м / с.

Согласно теории теплопередачи, приращение температуры твёрдого тела зависит от следующих показателей: энергии импульса электрического разряда  $A_{\text{и}}$ , Дж; расстояния  $r$  от источника теплоты до точки, в которой рассчитывается температура, м; удельной теплоёмкости  $c$  материала упрочняющего покрытия, Дж / (кг · К); плотности материала  $\rho$  упрочняющего покрытия, кг / м<sup>3</sup>, и выражается формулой

$$T = T_0 + \frac{\Theta \eta_{\text{и}} A_{\text{и}}}{c \rho r^3}, \quad (3.33)$$

где  $T$  — температура в расчётной точке поверхностного слоя упрочняющего покрытия К;

$T_0$  — начальная температура поверхностного слоя упрочняющего покрытия, К;

$\eta_{\text{и}}$  — коэффициент полезного действия энергии электрического разряда;

$\Theta$  — безразмерный параметр температуры, который учитывает температуропроводность  $\chi$  материала упрочняющего покрытия и время  $\tau_{\text{и}}$  действия тепла и определяется по формуле

$$\Theta = \frac{e^{-\frac{1}{4}F_0}}{8\pi F_0 \sqrt{\pi F_0}}, \quad (3.34)$$

где  $F_0$  — критерий Фурье, вычисляемый по формуле

$$F_0 = \frac{\lambda \tau_{\text{и}}}{r^2} [65; 97].$$

Значение энергии электрических разрядов  $A_{и}$  численно равно количеству теплоты, расходуемому на нагрев поверхности упрочняющего покрытия, определяемому по формуле (3.25)

$$A_{и} = \Theta_{т} = I^2 R \tau . \quad (3.35)$$

Учитывая разработанную физико-математическую модель для определения технологического тока (3.32) МЭШ упрочняющих покрытий, уравнение для определения энергии электрических разрядов  $A_{и}$  можно представить в виде

$$A_{и} = \rho H L_{к} I \left[ 0,1 f_{стр} c (T_{пл} - T_{дет}) + 0,12 f_{пов} \lambda \right] + c_{к} m \Delta T . \quad (3.36)$$

Подставляя уравнение (3.35) в выражение (3.33), получим

$$T = T_0 + \frac{\Theta \eta_{и} \rho H L_{к} I \left[ 0,1 f_{стр} c (T_{пл} - T_{дет}) + 0,12 f_{пов} \lambda \right] + c_{к} m \Delta T}{c \rho r^3} . \quad (3.37)$$

где  $T$  — температура в расчётной точке поверхностного слоя упрочняющего покрытия, К;

$T_0$  — начальная температура поверхностного слоя упрочняющего покрытия, К;

$\Theta$  — безразмерный параметр, учитывающий температуропроводность материала упрочняющего покрытия и время действия тепла;

$\eta_{и}$  — КПД энергии импульса;

$r$  — расстояние от источника теплоты до точки, в которой рассчитывается температура, м;

$c$  — удельная теплоёмкость материала упрочняющего покрытия, Дж / (кг · К);

$\rho$  — плотность материала упрочняющего покрытия, кг / м<sup>3</sup>.

Единицы измерения остальных величин указаны в пояснении к формуле (3.32).

Для расчета температуры необходимо знать значение коэффициента  $\eta_{и}$ , который характеризует долю энергии импульса

электрического разряда, используемую на расплавление материала упрочняющего покрытия. Принимаем среднее значение  $\eta_{и}$  равным 0,4. Время электрического разряда в среднем  $\tau_{и}$  равно 0,006...0,008 с.

Следует отметить, что точно определить температуру в окрестностях электрического разряда сложно из-за отсутствия точных сведений о расположении температурных полей. Поэтому решение задачи носит приближённый характер, целью которого является оценка глубины оплавления поверхности упрочняющего покрытия без нарушения его качественных характеристик и правильного выбора значения режимов МЭШ. Поэтому для расчёта температуры приняты следующие допущения: разряд принимается стационарным точечным источником теплоты; теплофизические параметры остаются постоянными во всё время протекания процесса; тепловые потоки усредняем по времени.

Теплота, выделяемая в объёме образца (основы) от действия электромагнитного поля, определяется по формуле

$$Q_{м.п} = \left( \frac{\mu_1 \mu_0 H^2}{2} - \frac{\mu_2 \mu_0 H^2}{2} \right) V, \quad (3.38)$$

где  $\mu_1, \mu_2$  — магнитная проницаемость ферромагнетика (основы) и парамагнетика (материал газотермического упрочняющего покрытия из самофлюсующихся материалов) соответственно;

$\mu_0$  — магнитная постоянная;

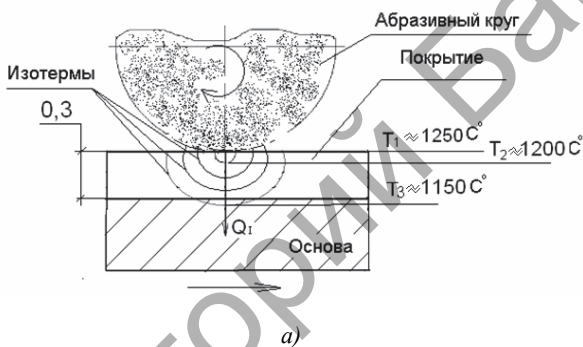
$H$  — величина напряжённости магнитного поля, А/м;

$V$  — объём нагреваемого материала (основы), м<sup>3</sup> [92].

На основании расчётов, проведенных по формулам (3.37) и (3.38) для исследуемых режимов МЭШ (таблица 3.4) ( $I$  равно 15...20, А;  $B$  — 0,3...0,4, Тл;  $S$  — 391...681 мм/мин;  $t$  — 0,05 мм;  $v$  — 8,4...13,2 м/с), были построены схемы распределения температурных полей (изотермы) в поверхностном слое напылённых газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов ПГ-СР4 и ПГ-СР2 (рисунок 3.21). Видно (см. рисунок 3.21 а), что температура  $T_3$  на границе «упрочняющее покрытие—основа» составляет  $\approx 1150^\circ\text{C}$ , это значит что материал упрочняющего покрытия находится в жидкой фазе.

Т а б л и ц а 3.4 — Значение режимов МЭШ, при которых измерялась температура [111]

Технологический ток $I$ , А	Магнитная индукция $B$ , Тл	Скорость вращения абразивного круга $v$ , м / с	Продольная подача $S_{пр}$ , мм / мин	Глубина шлифования $t$ , мм
2,5	0,1	8,4	396	0,025
5,0	0,2	13,2	681	0,050
10,0	0,3	21,0	750	0,100
15,0	0,4	33,6	936	0,150



а — при преобразовании механической и электрической энергии в процессе МЭШ;  
 б — при преобразовании электромагнитной энергии в процессе МЭШ

Рисунок 3.21 — Схемы распределения температурных полей в поверхностном слое напылённого газотермического упрочняющего покрытия

Это способствует образованию диффузионной связи газотермического упрочняющего покрытия с основой. Для образования прочной диффузионной связи важным условием является также длительность контакта жидкой и твёрдой фаз. Длительность процесса контакта жидкой и твёрдой фаз при МЭШ можно задавать значениями продольной подачи. Экспериментально установлено, что значения продольной подачи, исключающие перегрев материала упрочняющего покрытия при максимальной глубине оплавления, должны находиться в пределах  $S$ , составляющих 391...681 мм / мин. Глубина оплавленного слоя напылённого газотермического упрочняющего покрытия зависит также от значения технологического тока, определяющего мощность и длительность электрических разрядов в зоне обработки. Значения технологического тока должны находиться в пределах  $I$ , равных 15...20 А, так как экспериментально определено, что увеличение значения технологического тока  $I$  более 25 А приводит к перегреву материала напылённого газотермического упрочняющего покрытия и его разрушению.

При значениях магнитной индукции  $B$ , составляющих 0,3...0,4 Тл, происходит равномерный нагрев упрочняющего покрытия на граничной зоне «упрочняющее покрытие—основа» до температуры  $T_1 \approx 900^\circ\text{C}$ , теплота при этом распространяется от основы (см. рисунок 3.21, б). Это способствует более длительному протеканию диффузионных процессов по всей площади контакта упрочняющего покрытия с основой.

Приведены значения режимов МЭШ, при которых измерялась температура в зоне обработки МЭШ (см. таблицу 3.4).

Результаты измерения температуры приведены в соответствующих таблицах и графиках приложения Д.

На графиках (рисунок Д.1, а, б) видно наличие трёх температурных зон. Первая зона — это зона интенсивного нагрева поверхности ( $10^2 \dots 10^3$  град / с) за счёт контакта токопроводящего абразивного круга с этой поверхностью и термического влияния электрических разрядов стружечного замыкания, вторая — зона установившейся температуры, третья — зона охлаждения поверхности покрытия.

Из анализа графиков температуры видно, что с увеличением технологического тока  $I$ , составляющего 2,5...5,0 А, температура

в зоне обработки значительно возрастает — от  $740^{\circ}\text{C}$  до  $850^{\circ}\text{C}$ . Это объясняется большой мощностью электрических разрядов, реализуемых в зоне обработки. Температурный всплеск происходит за достаточно короткий промежуток времени ( $0,08$  с), далее температура начинает медленно падать в связи с удалением части припуска. Наличие резких изменений в значениях температуры объясняется биением токопроводящего абразивного круга, а также нестабильностью электрических разрядов, связанных с изменением сопротивления цепи технологического тока и выхода токопроводящего абразивного круга [112]. Максимальная температура  $T_{\text{max}}$ , равная  $850^{\circ}\text{C}$ , достигается в зоне шлифования при значениях технологического тока  $I$ , равных  $15 \dots 20$  А. Средняя установившаяся температура  $T_{\text{cp, уст}}$  равна  $800 \dots 870^{\circ}\text{C}$ .

Исходя из полученных экспериментальных данных для режимов МЭШ упрочняющих покрытий, значения параметра технологического тока  $I$  должны находиться в пределах  $10 \dots 15$  А. Это обеспечивает оплавление поверхностного слоя упрочняющего покрытия на глубину  $\Delta$ , составляющую  $0,25 \dots 0,35$  мм, и получение в нём более мелкой дисперсной структуры. Следует отметить, что повышение значений технологического тока более  $25$  А способствует резкому росту температуры, возникновению электродуговых разрядов, что приводит к отслаиванию покрытия от основы, поэтому оптимальные значения параметра МЭШ технологического тока должны находиться в пределах  $I$ , равных  $15 \dots 20$  А.

Введение в зону обработки постоянного электромагнитного поля позволяет сконцентрировать дополнительную энергию, которая создаёт дополнительную силу, влияющую на продукты шлифования и канал электрического разряда в зоне обработки. Результаты анализа экспериментальных данных показывают, что значения температуры в зоне обработки МЭШ при наложении внешнего электромагнитного поля меньше, чем обработка без магнитного поля. Это объясняется тем, что происходит смещение дуги электрического разряда шлифования за счёт действия электромагнитной силы (рисунок Д.2). Оптимальное значение магнитной индукции, при заданных параметрах МЭШ напылённых покрытий, должно находиться в пределах  $B$ , равных  $0,2 \dots 0,3$  Тл. Это обеспечивает среднюю установившуюся температуру  $T_{\text{cp, уст}}$  в зоне обра-

ботки МЭШ в пределах 760...800°C и обеспечивает получение оплавленного слоя  $\Delta$ , равного 0,25...0,3 мм.

В таблице Д.3 приведены фиксированные режимы МЭШ, при которых проводилось исследование влияния параметра продольной подачи на температуру в зоне обработки. С изменением значения величины продольной подачи  $S_{пр}$  можно изменять время термического действия технологического тока на поверхность упрочняющего покрытия. При малых значениях продольной подачи проплавливающая способность технологического тока увеличивается, что приводит к увеличению толщины оплавленного слоя упрочняющего покрытия до 0,45 мм. Увеличение температуры покрытия происходит скачкообразно за короткий промежуток времени. При увеличении числа рабочих ходов температура растёт, а затем начинает падать, так как происходит удаление слоя материала покрытия (рисунок Д.3). Для повышения производительности обработки продольная подача  $S_{пр}$  должна быть максимальной и находиться в пределах 750...936 мм / мин. Средняя установившаяся температура в зоне обработки при этом составляет 800...850°C, а максимальная  $T_{max}$  — 1 100°C. Назначение больших значений продольной подачи уменьшает время термического действия технологического тока. При этом толщина оплавленного слоя находится в пределах  $\Delta$ , равных 0,06...0,12 мм, при  $S_{пр}$ , составляющей 750...936 мм / мин.

В таблице Д.4 приведены фиксированные режимы МЭШ, при которых проводилось исследование влияния скорости на периферии абразивного круга на температуру в зоне обработки. С увеличением скорости вращения абразивного круга мощность электрических разрядов в зоне обработки уменьшается. При высоких значениях скорости на периферии токопроводящего абразивного круга (30...50 м / с) происходит смещение дуги электрического разряда, время термического влияния на поверхность упрочняющего покрытия уменьшается, поэтому толщина оплавленного слоя также уменьшается и находится в пределах  $\Delta$ , составляющих 0,03...0,08 мм. Для повышения толщины оплавленного слоя параметры режимов МЭШ необходимо назначать с меньшими значениями скорости на периферии абразивного круга (до 20 м / с). Максимальная температура в зоне обработки наблюдается при  $v$ , равной 33,6 м / с и достигает значения  $T_{max}$ , равного 1 000°C,

средняя установившаяся температура в зоне обработки при этом составляет 850...870°C.

В таблице Д.5 приведены фиксированные режимы МЭШ, при которых проводилось исследование влияния параметра глубины шлифования на температуру в зоне обработки.

С увеличением глубины шлифования в межэлектродном пространстве реализуются большие мощности, связанные с увеличением количества электроискровых разрядов. Температура при этом возрастает (рисунок Д.5). Пики температур на графиках объясняются разрядами в зоне обработки за счёт прохождения технологического тока. Глубина шлифования для оплавления поверхности упрочняющего покрытия на заданную глубину должна быть выбрана из условий удаления припуска, обеспечивающего требуемую точность обработки, исключения припекания материала связки круга к поверхности покрытия, обеспечения прочности сцепления покрытия с основой и предотвращения его отслаивания. Максимальная температура при заданных режимах МЭШ  $T_{\max}$  достигает 950°C. Средняя установившаяся температура  $T_{\text{ср. уст}}$  находится в пределах 700...750°C. Глубина оплавленного слоя  $\Delta$  составляет 0,20...0,30 мм.

Исходя из вышеприведённых результатов измерения максимальной температуры в зоне обработки, построена диаграмма (рисунок 3.22), которая позволяет оценить степень влияния режимов МЭШ на теплообразование в зоне обработки.

Из диаграммы видно, что наибольшее влияние на теплообразование в зоне обработки МЭШ упрочняющих покрытий оказывают параметры технологического тока, глубины шлифования, продольной подачи, магнитной индукции и скорости на периферии абразивного круга.

Основное термическое влияние на поверхность упрочняющего покрытия оказывает параметр технологического тока  $I$ , изменение значения которого в пределах 5...15 А обеспечивает нагрев поверхности до температуры 1020...1060°C, что позволяет получить оплавленный слой  $\Delta$  толщиной до 0,3 мм с заданными эксплуатационными свойствами [116].

Изменение величины продольной подачи позволяет регулировать время термического действия технологического тока. При величинах продольной подачи  $S_{\text{пр}}$ , находящихся в пределах 396...681 мм / мин,

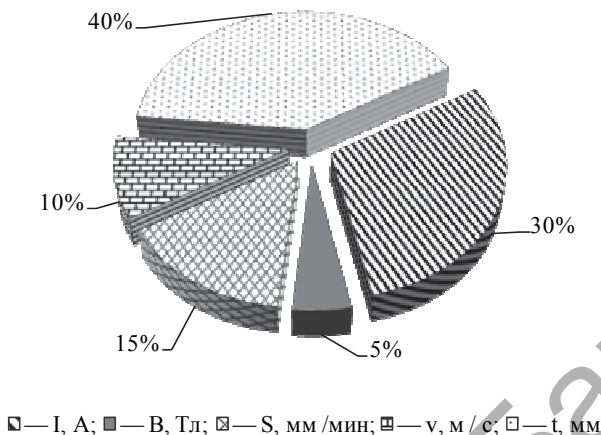


Рисунок 3.22 — Степень влияния режимов МЭШ на теплообразование в зоне обработки

глубина оплавленного слоя  $\Delta$  изменяется в пределах 0,3...0,4 мм. Для обеспечения прочности сцепления покрытия с основой величина продольной подачи  $S$  должна находиться в пределах 300...450 мм / мин. Минимальная толщина защитного покрытия для снятия припуска и оплавления поверхности слоя на глубину, при которой образуется адгезионная связь с основой, должна находиться в пределах 0,5...1 мм.

Из приведённых выше данных экспериментальных исследований выявлены значения режимов МЭШ, при которых обеспечивается оплавление поверхностного слоя упрочняющих покрытий из материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2 на заданную глубину (таблица 3.5).

Т а б л и ц а 3.5 — Значения режимов МЭШ, обеспечивающих оплавление поверхностного слоя упрочняющих покрытий из материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2

Толщина покрытия, мм	Прочность сцепления, МПа	Материал покрытия	Технологические параметры МЭШ				
			$v$ , м / с	$S_{\text{пр}}$ , мм / мин	$I$ , А	$B$ , Тл	$t$ , мм
0,25...0,3	170...190	ПГ-СР4	13...15	390...400	15...20	0,3...0,4	0,05
0,3	180...200	ПГ-СР2	8...13	250...350			

### 3.6 Выводы

Из вышеприведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1) при МЭШ на формирование поверхности упрочняющего покрытия оказывают влияние три вида энергии: механическая (шлифование зёрнами абразивного круга); электрическая (электроэрозионное и термическое действие технологического тока); электромагнитная (магнитная индукция);

2) без введения в зону обработки энергии технологического тока и электромагнитного поля процесс МЭШ упрочняющих покрытий аналогичен процессу традиционного шлифования абразивными кругами. Производительность процесса в этом случае определяется формулой  $Q_{\text{мех}} = HtS$  и находится в пределах  $Q$ , составляющих 198...1 404 мм<sup>3</sup>/мин. Шероховатость поверхности  $Ra$  находится в пределах 1,5...3,2 мкм;

3) разработана формула вида  $Q_{\text{эр}} = \frac{\pi D_k H n i_p R^3}{6}$ , позволяющая рассчитать производительность обработки  $Q_{\text{эр}}$  (мм<sup>3</sup>/мин), происходящей за счёт электроэрозионного разрушения поверхности упрочняющих покрытий при МЭШ.

Для газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся порошковых материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2  $Q_{\text{эр}}$  равно 155,7 и 205,8 мм<sup>3</sup>/мин соответственно. Для сормаита ГН1 максимальное расчетное значение производительности  $Q_{\text{эр}}$  обработки равно 240,6 мм<sup>3</sup>/мин;

4) в процессе МЭШ наложение на зону обработки электромагнитного поля при определённом направлении векторов технологического тока и магнитной индукции создаёт силу  $F$ , действующую на каналы искровых разрядов в момент прохождения тока через стружки или микровыступы поверхности. При этом производительность обработки  $Q_{\text{эр}}$  за счёт электроэрозионного разрушения поверхности газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся порошковых материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 для исследуемых режимов МЭШ достигает значений 400...600 мм<sup>3</sup>/мин, что в 2,5 выше раза выше, чем при алмазном шлифовании;

5) электромагнитное поле в процессе МЭШ оказывает влияние на формирование шероховатости поверхности упрочняющих покрытий. В связи со значительным различием в значениях магнитной проницаемости материалов покрытий ( $\mu_{\text{покр}} \approx 1,05$ ) и ферромагнитной основы ( $\mu_{\text{осн}} \approx 1\,000$ ) плотность векторов магнитной индукции в основе образца выше, чем в поверхностном слое покрытия. В результате этого материал упрочняющего покрытия стремится растечься по обрабатываемой поверхности. Расплав заполняет микровпадины на поверхности упрочняющего покрытия, что способствует уменьшению шероховатости поверхности  $Ra$  с 3,2...2,5 мкм до 0,5...1,25 мкм. При МЭШ наплавленного упрочняющего покрытия из сормаита ГН1 шероховатость поверхности уменьшается до значения 0,3...0,4 мкм;

6) в процессе МЭШ образуется теплота, выделяемая от преобразования механической и электрической энергий, которая распространяется от поверхности обработки упрочняющего покрытия к основанию, а теплота, образующаяся в результате преобразования энергии электромагнитного поля, передаётся за счёт теплопроводности от основы к покрытию. Выявлены оптимальные значения МЭШ ( $I$ , равное 15...20 А;  $B$  — 0,3...0,4 Тл;  $S$  — 391...681 мм/мин;  $t$  — 0,05 мм;  $v$  — 8,4...13,2 м/с), обеспечивающие оплавление поверхностного слоя на глубину  $\Delta$ , равную величине допуска на износ  $\Delta = \delta_{\text{и}} = 0,4$  мм, что приводит к образованию прочной адгезионной связи между покрытием и основой;

7) в результате решения уравнения теплового баланса разработана физическая модель, учитывающая связь технологического тока с режимами МЭШ и физическими свойствами материала упрочняющего покрытия,

$$I = \sqrt{\frac{\rho H L_{\kappa} \cdot [0,1 f_{\text{стр}} c (T_{\text{пл}} - T_{\text{дет}}) + 0,12 f_{\text{пов}} \lambda] + c_{\kappa} m \Delta T}{\eta R \tau}},$$

на основании которой рассчитаны значения температур и построены изотермы, позволяющие определить, что температура на границе «упрочняющее покрытие—основа»  $T_3$  составляет  $\approx 1\,150^{\circ}\text{C}$ . Материал упрочняющего покрытия при этом находится в жидкой

фазе, что способствует образованию диффузионной связи газотермического упрочняющего покрытия с основой;

8) преимуществом МЭШ перед другими способами обработки газотермических упрочняющих покрытий является возможность управлять процессами, протекающими на границе «упрочняющее покрытие—основа», и, как следствие, уровнем механических свойств путём изменения режимов обработки, задающих температуру нагрева.

Репозиторий БарГУ

## ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ МЭШ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

### 4.1 Исследование влияния режимов МЭШ на производительность обработки газотермических упрочняющих покрытий из материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2 и наплавки сормайтот ГН1

Шлифование образцов проводили согласно плану эксперимента для выбранных режимов МЭШ в соответствии с требуемыми значениями (таблица 4.1).

Обработку полученных результатов экспериментов и построение физико-математических моделей, описывающих процесс МЭШ, проводили с использованием компьютерной программы Microsoft EXCEL (см. приложение А), которая позволила рассчитать выходные параметры во всём диапазоне исследуемых режимов. На основании полученных физико-математических моделей были построены графики зависимостей производительности обработки и шероховатости поверхности от режимов МЭШ и произведён их анализ.

Производительность обработки МЭШ оценивали по количеству материала, удаляемого с обрабатываемой поверхности в единицу времени. Полученные результаты по отчёту времени каждого эксперимента пересчитывали на минутный съём материала покрытий ( $\text{мм}^3 / \text{мин}$ ).

Т а б л и ц а 4.1 — Значения режимов МЭШ

Уровень параметра	$I$ , А	$V$ , Тл	$v$ , м / с	$t$ , мм	$S$ , мм / с
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
$-\alpha$	2,48	0,20	2,52	0,12	8,417
-1	8,00	0,14	8,30	0,05	10,000
0	12,00	0,24	12,50	0,25	13,330
+1	16,00	0,34	16,70	0,4	16,670
$+\alpha$	21,51	0,47	22,48	1,08	16,670

Оценку влияния технологических режимов МЭШ на производительность обработки  $Q$ , а также оптимизацию режима обработки, определяли по полученному уравнению регрессии [107]

$$Y_2 = Q = 360 + 95IB - 23S / IB + 11,51B / S^2vI^3 - 31,3tS + 5I^2B^2/t^2S^3. \quad (4.1)$$

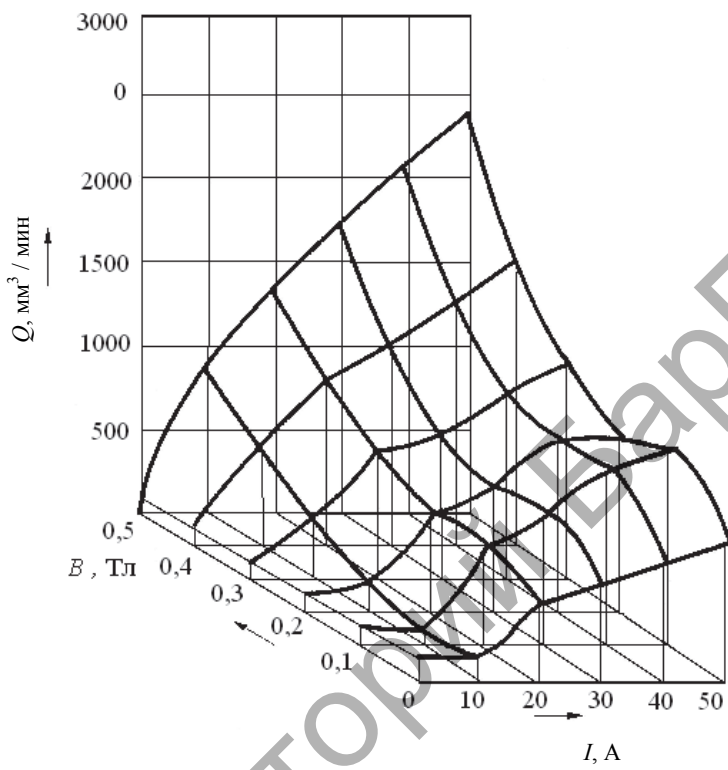
После подстановки численных значений режимов МЭШ в уравнение (4.1) были построены графики зависимостей производительности обработки упрочняющих покрытий.

Установлено, что на производительность обработки оказывают влияние технологический ток и магнитная индукция. Максимальное значение производительности обработки упрочняющего покрытия  $Q$  составляет 1 746 мм<sup>3</sup>/мин при значениях технологического тока  $I$ , равного 25...30 А, и магнитной индукции  $B$ , равной 0,30...0,35 Тл (рисунок 4.1). Однако параметр шероховатости поверхности  $Ra$  является достаточно высоким и составляет 39,43 мкм. Поэтому необходимо рассматривать условия, при которых обеспечивается максимальная производительность обработки при минимальной шероховатости поверхности газотермических упрочняющих покрытий.

На графике (рисунок 4.2, см. вклейку)  $I$ — $B$  такой участок рассматривается на перегибе при  $I$ , равном 20 А, и  $B$ , составляющей от 0,05 до 0,30 Тл, с уменьшением  $Ra$  от 0,72 до 0,54 мкм при постоянных величинах скорости на периферии абразивного круга  $v$ , равной 12,5 м / с, глубины шлифования  $t$  — 0,1 мм, продольной подачи  $S$  — 13,3 мм / с.

Рассмотрим параметры МЭШ, при которых обеспечивается минимальная шероховатость поверхности упрочняющего покрытия при наивысшей производительности обработки, и выявим оптимальные режимы обработки.

Из анализа зависимости  $I$ — $v$  (рисунок 4.3, см. вклейку) видно, что производительность обработки  $Q$  достигает максимального значения 1 360 мм<sup>3</sup> / мин при параметрах технологического тока  $I$ , равного 20...25 А, скорости на периферии абразивного круга  $v$ , составляющей 26 м / с, при постоянной величине магнитной индукции  $B$ , равной 0,3 Тл, глубине шлифования  $t$ , — 0,1 мм, продольной подаче  $S$ , составляющей 13,3 мм / с.



Скорость на периферии абразивного круга  $v$ , равная 12,5 м / с; глубина шлифования  $t = 0,3$  мм; продольная подача  $S = 13,3$  мм / с

Рисунок 4.1 — Зависимость производительности обработки поверхности, наплавленной сормайтот ГН1, от технологического тока  $I$  и магнитной индукции  $B$  при МЭШо

На графике зависимости  $I-t$  максимум производительности обработки  $Q$ , равный 860...1 000 мм<sup>3</sup> / мин, соответствует параметрам  $I$ , равного 20...25 А,  $t$ , составляющей 0,05...0,10 мм при постоянных величинах магнитной индукции  $B$ , равной 0,3 Тл, скорости на периферии абразивного круга  $v$ , составляющей 12,5 м / с, продольной подачи  $S$ , равной 13,3 мм / с (рисунок 4.4, см. вклейку).

Из графика зависимости  $I-S$  видно, что максимум производительности обработки  $Q$ , равной 1 107 мм<sup>3</sup> / мин, достигается при

значениях технологического тока  $I$ , равного 20...25 А и продольной подаче  $S$ , составляющей 8...14 мм / с. Параметры МЭШ: магнитная индукция  $B$  равна 0,3 Тл, скорость на периферии абразивного круга  $v$  — 12,5 м / с, глубина шлифования  $t$ , равная 0,1, являются постоянными (рисунок 4.5, см. вклейку).

На графике зависимости  $B-v$  видно, что производительность обработки  $Q$  составляет 1 051...1 120 мм<sup>3</sup>/мин при значениях  $B$ , равной 0,05 Тл,  $v$  — 8 м / с и постоянных величинах технологического тока  $I$  — 24 А, глубины шлифования  $t$  — 0,1 мм, продольной подачи  $S$ , составляющей 13,3 мм / с (рисунок 4.6, см. вклейку).

Зависимость  $B-t$  (рисунок 4.7, см. вклейку) имеет максимум производительности обработки  $Q$ , равной 1 107 мм<sup>3</sup>/мин при  $B$ , составляющей 0,4 Тл,  $t$  — 0,05 мм и постоянных величинах технологического тока  $I$ , равного 24 А, скорости на периферии абразивного круга  $v$  — 12,5 м / с, продольной подачи  $S$  — 13,3 мм / с.

Сложная зависимость производительности обработки (при варьировании магнитной индукции  $B$  и продольной подачи  $S$ ), говорит о взаимном влиянии режимов МЭШ и находится в пределах  $Q$ , равной 1 224...1 500 мм<sup>3</sup>/мин, но в малой области, при  $B$  — 0,1 Тл,  $S$  — 8 мм / с. Постоянными остаются величины технологического тока  $I$ , равного 24 А, скорости на периферии абразивного круга  $v$ , составляющей 12,5 м / с, глубины шлифования  $t$ , равной 0,1 мм (рисунок 4.8, см. вклейку).

При шлифовании поверхностей без наложения технологического тока  $I$  и магнитной индукции  $B$  взаимодействие скорости на периферии круга  $v$  и продольной подачи  $S$  влияет на производительность обработки  $Q$ .

В результате процесса МЭШ производительность обработки  $Q$  остаётся практически на одном уровне и составляет 665...919 мм<sup>3</sup>/мин.

Для производительности обработки зависимости  $t-S$  принимают максимальное значение 1 200 мм<sup>3</sup> / мин при  $S$ , равной 8...10 мм / с в исследуемом диапазоне глубины шлифования  $t$ , составляющей 0,05...0,3 мм, и постоянных величинах технологического тока  $I$ , равного 24 А, магнитной индукции  $B$  — 0,3 Тл и скорости на периферии абразивного круга  $v$  — 12,5 м / с (рисунок 4.9, см. вклейку).

В пространстве технологических режимов МЭШ имеются три расположенные друг над другом области, соответствующие

различным механизмам протекания физического процесса МЭШ. Область производительности 1 200...1 300 мм<sup>3</sup> / мин соответствует традиционному шлифованию, где наибольшее влияние оказывают кинематические режимы МЭШ (скорость на периферии абразивного круга, продольная подача, глубина шлифования). Во второй области совместное воздействие кинематических и электрофизических режимов определяет производительность в 1 400...1 500 мм<sup>3</sup> / мин. В области наивысшей производительности 1 500...1 700 мм<sup>3</sup> / мин преобладающее влияние имеют электромагнитные режимы [118; 119].

Рассмотрим пространственную зависимость «производительность обработки—технологический ток—магнитная индукция» (см. рисунок 4.1) при обработке поверхности, наплавленной сормайт ГН1 [120; 121]. Из результатов экспериментальных данных и анализа зависимостей видно, что производительность обработки  $Q$  наплавленных сормайт покрытий выше, чем при обработке покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2, и достигает значения 2 500...2 700 мм<sup>3</sup> / мин. Это связано с тем, что действие магнитной силы на стружку больше из-за содержания в сормайте железа (до 60...65%) [117].

При постоянной величине магнитной индукции  $B$ , равной 0,2 Тл, с увеличением технологического тока  $I$  от 10 до 40 А производительность обработки растёт вследствие реализации больших мощностей в зоне обработки. С повышением магнитной индукции  $B$  от 0,05 до 0,4 Тл при постоянном значении технологического тока в зоне шлифования происходит ускорение выброса продуктов шлифования, микрорасплава и стружки направленным магнитным полем. В этом случае значительная часть энергии расходуется на плавление микровыступов поверхности покрытия, а не на плавление стружки и продуктов эрозии, что увеличивает производительность обработки при МЭШ. Таким образом, пространственная диаграмма зависимостей «производительность обработки—технологический ток—магнитная индукция» (см. рисунок 4.1) имеет максимум производительности процесса обработки  $Q$  для наплавов типа сормайт и составляет 2 000 мм<sup>3</sup> / мин. При дальнейшем увеличении значений технологического тока более 30...35 А и магнитной индукции  $B > 0,35$  Тл на поверхности образуются эрозионные

лунки, происходит изменение химического состава материала покрытия, что значительно ухудшает качество поверхности покрытий. Шероховатость обрабатываемых поверхностей  $Ra$  наплавов в зависимости от режимов МЭШ составила 0,400...1,25 мкм.

## 4.2 Исследование влияния режимов МЭШ на качество газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2 и наплавки сормайтот ГН1

### 4.2.1 Влияние режимов МЭШ на шероховатость поверхности упрочняющих покрытий

Оценку качества поверхности упрочняющих покрытий производили по величине параметра шероховатости поверхности  $Ra$ , мкм.

В результате реализации плана эксперимента были разработаны уравнения регрессии

$$Y_1 = Ra = 0,510 + 0,100X_1 - 0,049X_2 + 0,081X_3 + 0,093X_4 - 0,06X_5 - 1,161X_1X_2 - 0,008X_1X_3 + 0,062X_1X_4 - 0,079X_1X_5 + 0,046X_2X_3 + 0,266X_1^2 + 0,061X_2^2 + 0,081X_3^2 + 0,038X_4^2 + 0,399X_5^2;$$

$$Y_1 = Ra = 0,474 + 0,206I^2Bv - 0,307IB/vt + 0,16I^3/vS + 0,066BS^{0,5}/t^{0,5}.$$

Они определяют зависимость шероховатости поверхности, наплавленной сормайтот ГН1 и газотермическими упрочняющими покрытиями из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2, от режимов МЭШ [122]. Значения варьируемых режимов МЭШ представлены выше (см. таблицу 4.1).

Совместное влияние режимов МЭШ на шероховатость поверхности показано на графиках зависимостей (рисунок 4.10, см. вклейку). При увеличении скорости на периферии абразивного круга мощность в зоне обработки уменьшается, так как

уменьшается средняя толщина среза, снимаемая одним шлифующим зерном. Кроме того, при скорости на периферии абразивного круга  $v > 20$  м / с происходит смещение канала разряда при прохождении технологического тока через стружку и перемещении его по периферии круга. Поэтому наименьшая шероховатость поверхности наблюдается в диапазоне  $Ra$ , составляют 0,6...1,2 мкм при  $v$ , равной 15 м / с,  $I$  — 10...15 А.

С увеличением глубины шлифования реализуются большие мощности в зоне обработки, и шероховатость поверхности в этом случае резко возрастает (рисунок 4.11). При значении технологического тока  $I$ , равного 20 А, шероховатость поверхности находится в пределах  $Ra$ , составляющей 0,5...1,5 мкм. С увеличением значения технологического тока более 25 А происходит резкое увеличение шероховатости поверхности  $Ra$  вследствие образования эрозионных лунок большой глубины (до 39 мкм) (рисунок 4.11, см. вклейку).

Влияние технологического тока и продольной подачи на шероховатость обработанной поверхности показано на рисунке 4.13 (см. вклейку). Шероховатость обработанной поверхности  $Ra$  находится в пределах 0,26...1,16, мкм при  $I$ , равном 20 А, и  $S$ , составляющей 8...26 мм / с соответственно. Увеличение значения технологического тока (см. рисунок 4.13, см. вклейку) приводит к увеличению шероховатости поверхности покрытия.

Как известно, магнитное поле обладает безынерционным действием, поэтому представляет интерес исследование совместного влияния режимов МЭШ на качество поверхности покрытий. Шероховатость поверхности принимает минимальное значение  $Ra$  0,30...0,44 мкм при  $v$ , равной 16 м / с и  $B$ , составляющей 0,2...0,4 Тл. Как видно из графика зависимости (рисунок 4.14, см. вклейку), шероховатость поверхности с увеличением скорости на периферии абразивного круга  $v$  от 8 до 16 м / с круто падает вниз, достигает значения  $Ra$  0,2 мкм, а затем с показателя 20 м / с начинает увеличиваться. Такая закономерность наблюдается при обработке различных типов упрочняющих покрытий, но для данного типа покрытий смещается диапазон магнитной индукции  $B$  от 0,15 до 0,35 Тл. Влияние технологического тока и магнитной индукции на формирование поверхности упрочняющего покрытия будет минимальным при окружных скоростях токопроводящего круга  $v$ , составляющих 12...20 м / с.

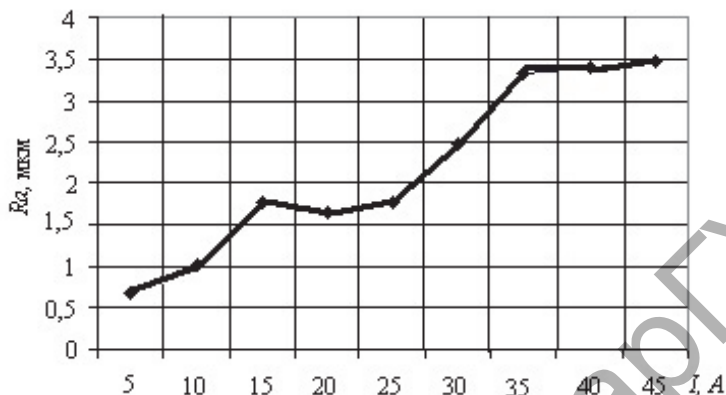


Рисунок 4.11 — Зависимость шероховатости поверхности покрытия из материала марки ПГ-СР4 от технологического тока  $I$  при постоянных значениях магнитной индукции  $B$ , равной 0,3 Тл; глубины шлифования  $t$  — 0,1 мм; продольной подачи  $S$  — 13,3 мм / с; скорости на периферии абразивного круга  $v$  — 16 м / с

Глубина шлифования совместно с внешним магнитным полем влияет как на производительность обработки, так и на шероховатость поверхности упрочняющего покрытия. Из графика зависимости  $B-t$  (рисунок 4.15, см. вклейку) видно, что увеличение глубины шлифования  $t$  с 0,05 до 0,3 мм, а также увеличение магнитной индукции  $B$  от 0,1 до 0,4 Тл приводит к повышению шероховатости поверхности  $R_a$  в пределах 0,71...1,36.

Зависимость шероховатости поверхности от поперечной подачи имеет практически линейную зависимость: с увеличением  $S$  от 8 до 26 мм / с  $R_a$  уменьшается с 1,5 до 0,4 мкм (рисунок 4.16, см. вклейку).

Взаимодействие кинематических режимов МЭШ при фиксированных значениях технологического тока и магнитной индукции можно рассмотреть на зависимостях (рисунок 4.17, см. вклейку). Из графиков видно, что с увеличением глубины шлифования наименьший параметр шероховатости поверхности  $R_a$ , составляющий 0,1...1,82 мкм, находится в диапазоне  $v$ , равной 16...18 м / с.

При шлифовании упрочняющего покрытия без введения в зону обработки технологического тока и магнитной индукции на

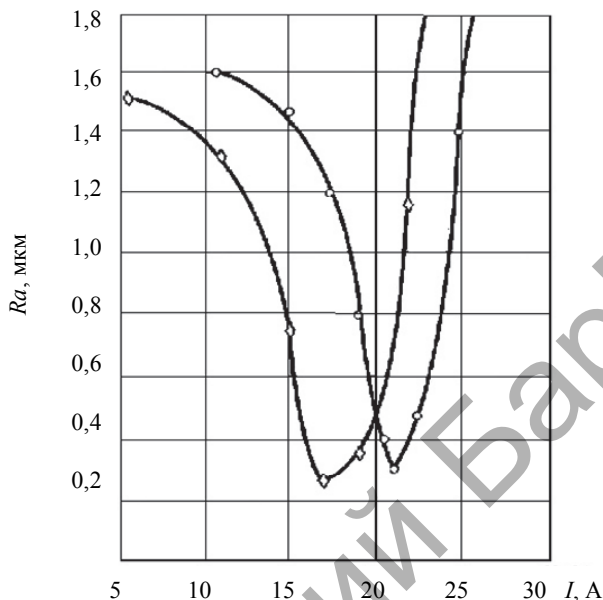
изменение шероховатости поверхности влияют скорость на периферии абразивного круга и продольная подача. Для обеспечения шероховатости поверхности  $Ra$ , равной  $0,1 \dots 0,2$  мкм, диапазон окружной скорости  $v$  находится в пределах  $14 \dots 20$  м / с. Шероховатость поверхности с низкой микрогеометрией ( $Ra$ , равная  $0,7$  мкм) наблюдается при окружной скорости токопроводящего абразивного круга  $v$ , составляющей  $16$  м / с, при  $S$ , равной  $18$  мм / с (рисунок 4.18, см. вклейку).

При  $S$ , равной  $8 \dots 20$  мм / с, и глубине резания  $t$ , составляющей  $0,05 \dots 0,30$  мм, зависимости шероховатости поверхности представляют собой прямые линии, на которых определяется влияние режимов прямо противоположное, в отличие от механической обработки традиционным шлифованием (рисунок 4.19, см. вклейку).

Исследованиями установлено, что электрофизические параметры совместно с кинематическими оказывают влияние на энергетические показатели процесса МЭШ, которыми можно управлять для получения заданных выходных режимов производительности обработки и шероховатости поверхности упрочняющих покрытий [103].

Анализ результатов экспериментов и математическая обработка данных показывают, что с увеличением технологического тока повышается производительность обработки. В процессе МЭШ зависимости величины шероховатости поверхности от режимов обработки имеют сложную форму. Таким образом, при МЭШ существует два механизма съёма материала (электрофизический и кинематический), которые совмещаются в одном процессе как в пространстве, так и во времени. Следовательно, для каждого кинематического режима шлифования существует свой оптимальный электрофизический режим, и любое отклонение от этого соотношения вызывает изменение производительности обработки, а также качественных показателей (шероховатости поверхности).

Представлена зависимость шероховатости поверхности от технологического тока для поверхностей, наплавленных сормайтотом ГН1 (рисунок 4.20).



$\circ$  —  $B$  (0,51 Тл);  $\diamond$  —  $B$  (0,11 Тл) при  $v$ , равном 12,5 м/с;  $H$  — 0,3 мм;  $S$  — 13,3 мм/с

Рисунок 4.20 — Зависимость шероховатости поверхности, наплавленной сормайтот ГН1, от технологического тока  $I$  и магнитной индукции  $B$

Анализ зависимости показывает, что с увеличением скорости шлифования и магнитной индукции шероховатость поверхности увеличивается, но с определённого значения. На зависимости явно прослеживается экстремальная точка шероховатости  $Ra$ , равная 0,3 мкм.

Электрофизические и кинематические параметры МЭШ взаимосвязаны между собой [64]. При больших скоростях круга ( $v$  равно 20...50 м/с) уменьшается действие на поверхность обработки технологического тока, так как происходит смещение канала электрического разряда направленным внешним магнитным полем. Таким образом, средняя мощность технологического тока в зоне контактного взаимодействия становится меньше. Расплав-

ляется только часть приподнятых над основным металлом стружек и возвышенностей. При малых скоростях вращения абразивного круга ( $v$  равно 3...5 м/с) ток успевает расплавить стружку, а магнитное поле — сгладить расплавленные гребешки выступов микронеровностей. В этом случае шероховатость поверхности снижается, в отличие от обычного традиционного шлифования абразивными кругами.

Взаимодействие технологического тока и электромагнитного поля происходит следующим образом: с увеличением силы тока до 20 А зависимость шероховатости поверхности от магнитной индукции и скорости на периферии абразивного круга изменяется. Оказывая влияние на разряд в зоне шлифования, магнитное поле в этом диапазоне увеличивает проплавляющую способность тока и локализует его в узкой области. В результате все микронеровности оплавляются, и расплав под действием внешнего электромагнитного поля растекается по поверхности детали, уменьшая шероховатость поверхности.

Из профилограмм, полученных на профилометре-профилографе модели АБРИС ПМ7, видно, что шероховатость поверхностей образцов из стали 45 с газотермическим защитным покрытием из материала марки ПГ-СР4, меньше, и выступы более пологие, чем при шлифовании без магнитного поля. Профилограммы обработанных МЭШ поверхностей газотермических упрочняющих покрытий представлены в приложении Г. Таким образом, шероховатость поверхности покрытий изменяется за счёт варьирования режимов МЭШ.

Результаты исследований свидетельствуют о сложной зависимости шероховатости поверхности упрочняющих покрытий от величины магнитной индукции и технологического тока. Это влияние определяется характером и состоянием образовавшейся среды в зоне обработки и требует дальнейших исследований.

#### **4.2.2 Исследование влияния режимов МЭШ на структуру газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2**

Наложение электромагнитного поля на зону обработки в процессе МЭШ сопровождается целым рядом изменений, происходящих как в структуре обрабатываемого материала, так и в перераспределении энергии технологического тока, воздействующего на материал покрытия. Значительные изменения происходят при комбинированном воздействии энергий электрических и магнитных полей совместно с абразивным шлифованием, которое можно считать сочетанием резания с пластическим и упругим деформированием.

На изменение структуры обработанной поверхности оказывают значительное влияние параметры МЭШ. Абразивные зёрна инструмента формируют рельеф поверхности, типичный для шлифования. Непосредственное воздействие электрических разрядов формирует на поверхности следы в виде эрозионных лунок и канавок. Под действием сил электромагнитного поля на расплав тонкого поверхностного слоя происходит его выброс из зоны шлифования или растекание по обработанной поверхности. С наложением электромагнитного поля на зону обработки может происходить образование мелкодисперсных фаз в поверхностных слоях детали и повышение твёрдости покрытия [100].

Важным направлением исследований является изучение воздействия электромагнитных и электрических полей на обрабатываемую поверхность газотермических упрочняющих покрытий, а также физико-механические свойства поверхностного слоя материалов.

Обработка опытных образцов проводилась на модернизированном универсально-заточном станке 3Е642Е (рисунок 2.4, см. вклейку). В качестве инструмента применялся абразивный круг марки ПП250 × 25 × 32-5С25СТ6КАЛ. Оценку влияния режимов МЭШ на микроструктуру упрочняющих покрытий проводили по топографиям и фотографиям шлифов поперечного среза, полученным на микроскопе Stemi-2000С, металлографическом инвертированном микроскопе МЕТАМ ЛВ-32 и электронном микроскопе модели LEO1455VP фирмы «Карл Цейсс». Образцами служили

прямоугольные заготовки с газопламенным напылением порошками марки ПГ-СР4 и ПГ-СР2, оплавленные ацетиленовой горелкой и без оплавления.

Обработку поверхностей образцов проводили в соответствии со схемой (см. рисунок 2.1), и режимами обработки МЭШ (таблица 4.2).

Закономерности формирования поверхностного слоя покрытий при МЭШ определяются действием технологического тока  $I$ , магнитной индукцией  $B$ , частотой вращения абразивного круга  $n$ , глубиной шлифования  $t$ , продольной подачей  $S$ . При МЭШ газотермических упрочняющих покрытий поверхностный слой подвергается температурным, механическим и электроэрозионным воздействиям, которые оказывают влияние на структурные изменения покрытия и основного металла. Из данных исследований установлено, что доминирующее влияние на структуру упрочняющих покрытий оказывает технологический ток [125].

Показана топография поверхности газотермического упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СР4 после обработки МЭШ на черновых режимах ( $I$  равен 15...20 А,  $B$  — 0,3...0,4 Тл,  $S$  — 1 400 мм / мин,  $t$  — 0,05 мм,  $n$  — 2 000 мин<sup>-1</sup>) (рисунок 4.21).

На поверхности покрытия отчётливо видны оплавленные участки, которые являются результатом термического влияния электроискровых и электродуговых разрядов в зоне обработки МЭШ, следы электроэрозионного разрушения, а также следы, оставленные зёрнами абразивного круга.

Из результатов анализа шлифов поверхностей с защитными покрытиями видно, что режимы МЭШ оказывают влияние на формирование структуры трёх зон образца. Зона 1 представляет

Т а б л и ц а 4.2 — Значения режимов МЭШ [105]

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$S$ , мм / мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл
2 000	120	5	0,005	0,1
3 000	1 400	10	0,025	0,2
4 000	2 800	15	0,050	0,3
4 200	3 000	20	0,100	0,4

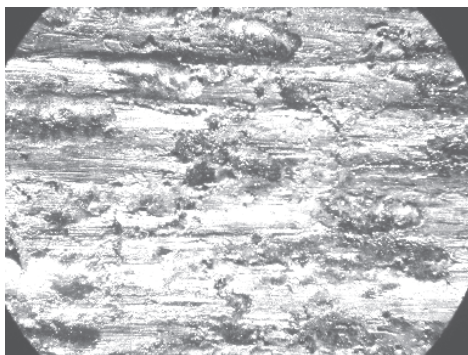


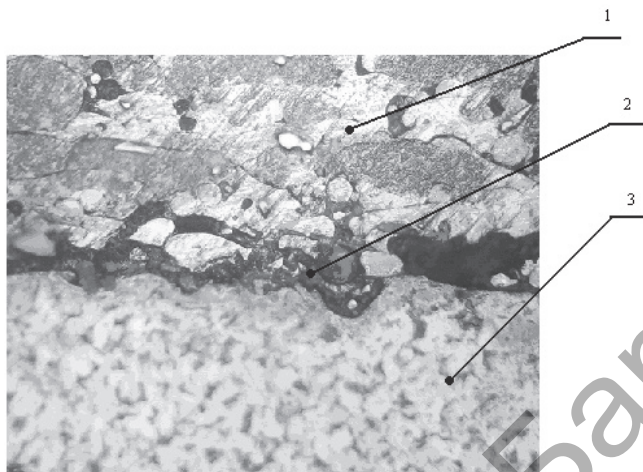
Рисунок 4.21 — Топография поверхности газотермического упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СР4 после черновой обработки МЭШ ( $\times 60$ )

собой материал упрочняющего покрытия, зона 2 — граничная, расположена между материалом упрочняющего покрытия и основой (подслоем), зона 3 — основа.

На фотографии поперечного шлифа (рисунок 4.22) показана структура поверхности газотермического упрочняющего покрытия ПГ-СР 2 до обработки МЭШ, на которой видно, что покрытие имеет поры, крупнозернистую структуру (толщина покрытия  $\Delta$  составляет 0,5 мм).

После обработки МЭШ структура поверхности газотермического упрочняющего покрытия ПГ-СР2 изменилась (рисунок 4.23). Видно, что поверхностный слой газотермического упрочняющего покрытия оплавлен. Микрочастицы порошка сплавляются между собой, уменьшается зернистость покрытия и пористость. Образующаяся в процессе обработки жидкая фаза способствует протеканию поверхностной и объёмной диффузии. При этом удаляются поры, исчезают границы между частицами материала упрочняющего покрытия, а развитие диффузионных процессов способствует образованию граничной зоны 2 [107; 126]. Граничная зона 2 становится плотной, объёмная пористость уменьшается.

Граничная зона 2 испытывает значительные температурные воздействия. Тепловой поток, возникающий от действия технологического тока и механической энергии резания зёрнами абразивного круга, распространяется от обрабатываемой поверхности



1 — упрочняющее покрытие; 2 — границная зона (подслои);  
3 — основа

Рисунок 4.22 — Структура поверхности газотермического защитного покрытия ПГ-СР 2 до обработки МЭШ ( $\times 500$ )

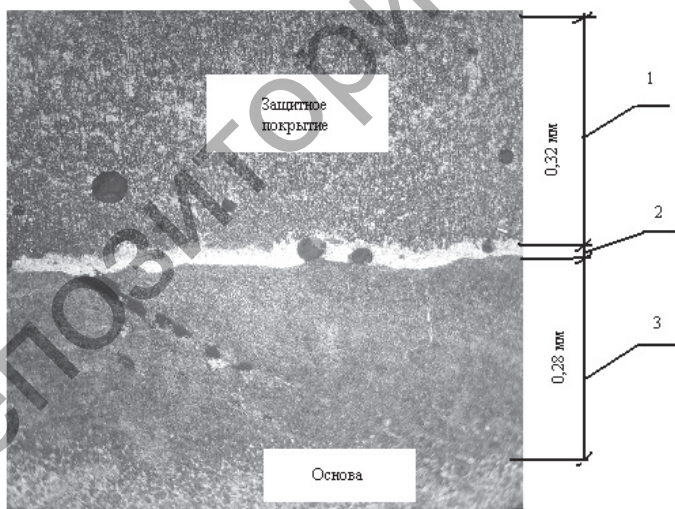


1 — упрочняющее покрытие; 2 — границная зона; 3 — основа

Рисунок 4.23 — Структура газотермического упрочняющего покрытия ПГ-СР2 после обработки МЭШ ( $I$  равно 15...20 А;  $B$  — 0,3 — 0,4 Тл;  $S$  — 400 мм / мин,  $t$  — 0,05 мм;  $n$  — 2 000 мин<sup>-1</sup>), толщина упрочняющего покрытия после МЭШ составляет 0,3 мм ( $\times 500$ )

упрочняющего покрытия, а теплота, возникающая от действия электромагнитного поля, распространяется от основы за счёт теплопроводности. В результате этого в зоне 2 происходят диффузионные процессы, приводящие к образованию химических соединений. На границе раздела «упрочняющее покрытие—основа» наблюдается светлая прослойка (линия сварки), которая образуется в результате контакта жидкой и твёрдой фаз и представляет собой твёрдый раствор железа в никеле. Наличие светлой полосы свидетельствует о том, что между защитным покрытием и основой образовалась прочная металлическая связь. Толщина линии сварки зависит от режимов МЭШ и находится в пределах от 3 до 5 мкм.

При МЭШ упрочняющих покрытий, нанесённых на основу из стали 45, в зоне термического влияния происходит закалка прилегающих участков материала основы на величину до 0,28 мм, что способствует улучшению эксплуатационных характеристик детали (рисунок 4.24).

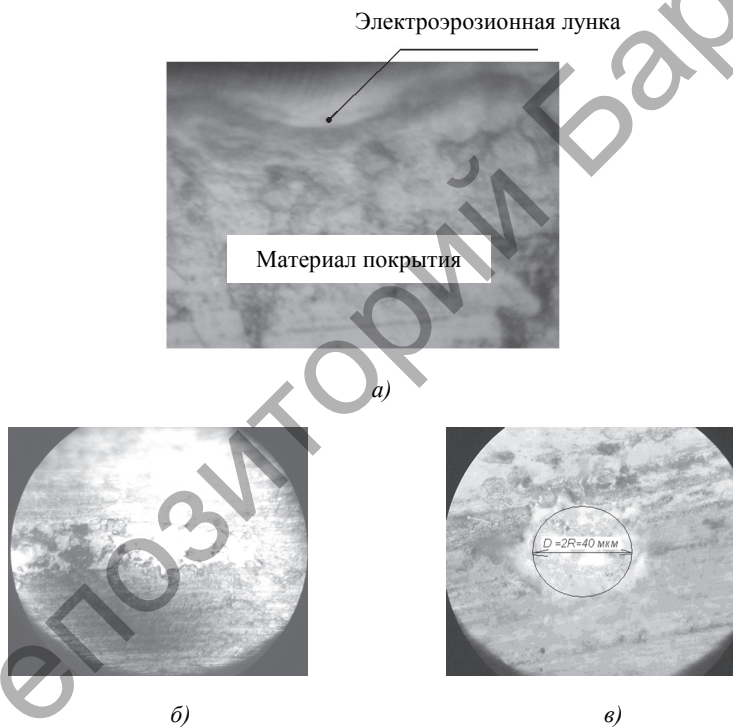


- 1 — оплавленный слой упрочняющего покрытия; 2 — границная зона;  
3 — зона термического влияния технологического тока на основу

Рисунок 4.24 — Термическое влияние технологического тока на изменение структуры основы при МЭШ (× 60)

При обработке упрочняющих покрытий вследствие электрических разрядов большой мощности на поверхности появляются электроэрозионные лунки, которые влияют на шероховатость поверхности. Электроэрозионные лунки различной формы на поверхности газотермического упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СР4 показаны на фото (рисунок 4.25).

Из анализа топографий поверхностей упрочняющих покрытий выяснилось, что наиболее распространённые формы лунок при МЭШ бывают двух типов: продолговатой (см. рисунок 4.25, б) и круглой



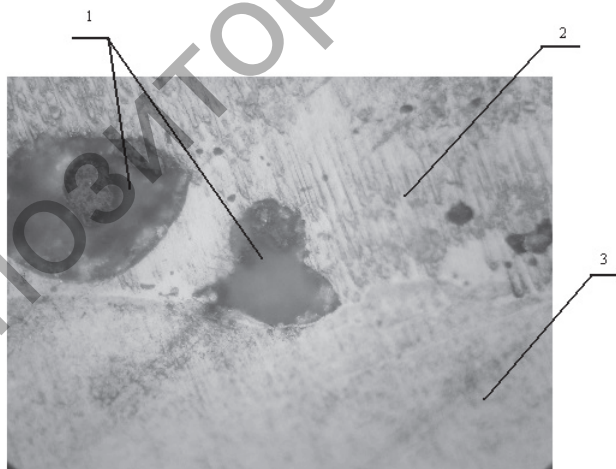
а — поперечный вид лунки; б — продолговатая форма лунки;  
в — круглая форма лунки

Рисунок 4.25 — Электроэрозионные лунки различной формы на поверхности покрытия из материала марки ПГ-СР4 после МЭШ ( $\times 1\,000$ )

формы (см. рисунок 4.25, в). Поперечный вид лунки показан на рисунке 4.25, а. На размеры и форму лунки основное влияние оказывают технологический ток, магнитная индукция, частота вращения токопроводящего абразивного круга, глубина шлифования и продольная подача, так как от этих режимов зависит мощность и время существования канала электрического разряда, оставляющего след.

Продолговатая форма лунки образуется в направлении вращения токопроводящего абразивного круга при электроконтактном явлении скольжения токопроводящей связки абразивного круга по поверхности упрочняющего покрытия в процессе МЭШ. Длина лунки зависит от частоты вращения абразивного круга, которая определяет время существования канала электрического разряда. Чем выше частота вращения абразивного круга, тем меньше время воздействия канала разряда.

При больших значениях технологического тока ( $I$  равно 25...30 А), продольной подачи и глубины шлифования в поверхностном слое покрытия могут возникнуть микротрещины, поры и окалина (рисунки 4.26 и 4.27).



1 — поры; 2 — упрочняющее покрытие; 3 — основа

Рисунок 4.26 — Поры в поверхностном слое упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СР4 ( $\times 1000$ )

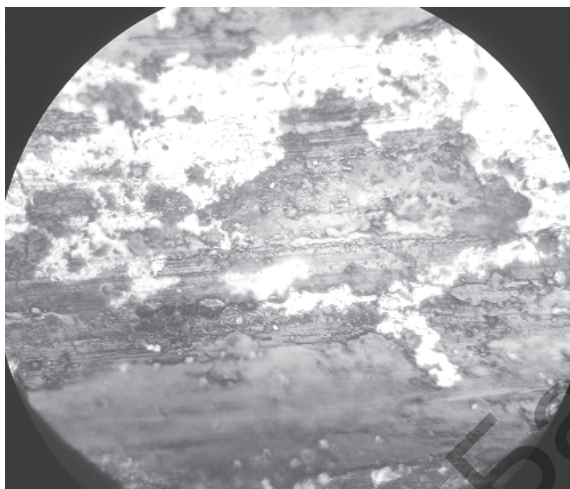


Рисунок 4.27 — Оксидная плёнка на поверхности покрытия после МЭШ ( $\times 500$ )

На поверхности основы образуются оксидные соединения, изменяется химический состав граничной зоны 2. Образование на поверхности упрочняющего покрытия окалины (см. рисунок 4.27) оказывает влияние на изменение физико-механических свойств обрабатываемого материала покрытия, в частности, твёрдости поверхности, и изменение химического состава материала покрытия.

Рассмотрим топографии поверхностей газотермических упрочняющих покрытий, обработанных при различных режимах МЭШ (приложение Е).

Проанализируем топографию поверхности газотермического упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СР4 после обработки МЭШ при значениях режимов (таблица 4.3) (рисунок 4.28).

Т а б л и ц а 4.3 — Параметры МЭШ обработки газотермического упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СР4

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$S$ , мм / мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл	$Ra$ , мкм
2 000	120	5	0,005	0,01	3,8

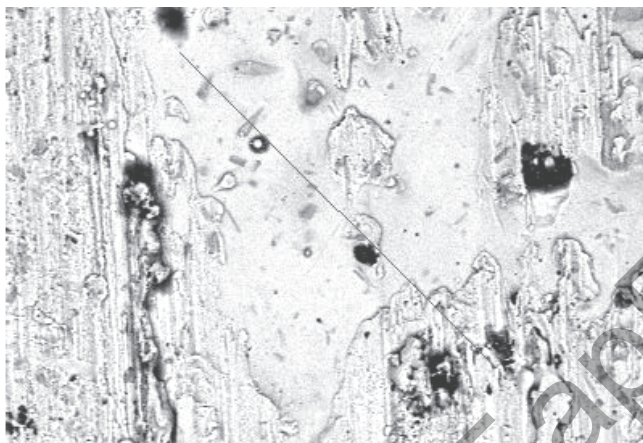


Рисунок 4.28 — Топография поверхности покрытия из материала марки ПГ-СР4 после обработки МЭШ

На топографии видны оплавленные участки поверхности (за счёт термического действия электрических разрядов при прохождении технологического тока через стружку) и микровыступы, следы электроэрозионного воздействия (тёмные пятна), а также следы, оставленные зёрнами абразивного круга.

При значениях режимов МЭШ поверхности газотермического упрочняющего покрытия из материала ПГ-СР4 (таблица 4.4) топография поверхности сформирована в основном зёрнами абразивного круга (рисунок 4.29). Это объясняется тем, что с увеличением значения продольной подачи электроэрозионное и термическое влияние электрических разрядов на поверхность покрытия уменьшается. Происходит уменьшение мощности электрических разрядов в зоне обработки, поэтому поверхность покрытия оплавляется на меньшую глубину. Микрогеометрия поверхностного слоя упрочняющего покрытия при этом имеет оплавленные выступы,

Т а б л и ц а 4.4 — Значения режимов МЭШ поверхности упрочняющего покрытия из материала ПГ-СР4

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$S$ , мм / мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл	$Ra$ , мкм
2 000	2 800	5	0,05	0,2	1,2



Рисунок 4.29 — Топография поверхности покрытия из материала марки ПГ-СР4 после обработки МЭШ

характерные для процесса МЭШ, шероховатость поверхности при этом уменьшается с  $Ra$ , равной 3,2 мкм, до  $Ra$ , составляющей 1,25 мкм.

При скольжении связки круга по поверхности упрочняющего покрытия при значениях режимов МЭШ (таблица 4.5) с увеличением глубины шлифования в зоне обработки преобладают электроискровые и электродуговые явления.

При увеличении значения глубины шлифования более 0,10...0,15 мм в зоне обработки реализуются большие мощности за счёт увеличения площади контакта абразивного круга с поверхностью покрытия. Также увеличиваются силы резания, а на поверхности покрытия возникают растягивающие напряжения, в результате чего на поверхности образуются микротрещины (рисунок 4.30). Поэтому значения глубины шлифования должны находиться в пределах  $t$ , составляющих 0,025...0,050 мм.

Т а б л и ц а 4.5 — Параметры режимов МЭШ поверхности упрочняющего покрытия из материала ПГ-СР4

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$S$ , мм / мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл	$Ra$ , мкм
2 000	120	5	0,1	0,15	1,26

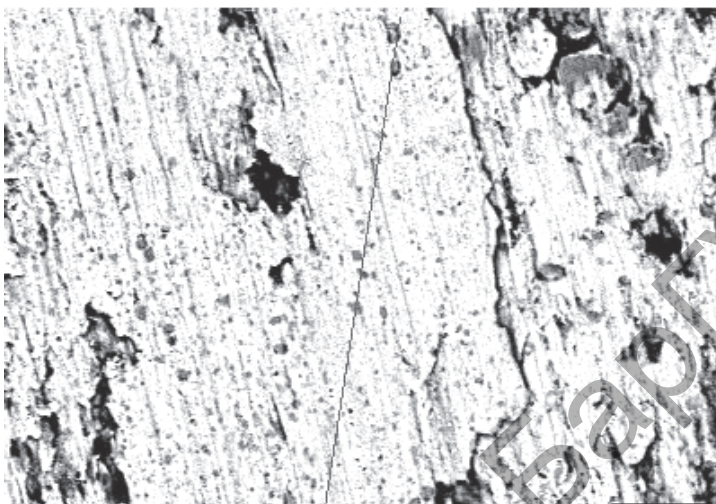


Рисунок 4.30 — Топография поверхности покрытия ПГ-СР4 после обработки МЭШ

При обработке МЭШ упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СР4 на определённых режимах (таблица 4.6) с увеличением значения технологического тока  $I$  до 15 А возрастает температура в зоне обработки. Это связано с ростом мощности электрических разрядов в зоне обработки.

Поверхность оплавляется на глубину 0,2...0,3 мм. Происходят структурные изменения в поверхностном слое покрытия. С увеличением значения технологического тока  $I$  более 20 А происходит резкое возрастание мощности в зоне обработки. Металл, находящийся в жидко-пластическом состоянии, удаляется из зоны под действием механической силы резания зёрнами абразивного круга и под влиянием внешнего магнитного поля. В этом случае поверхность упрочняющего покрытия оплавляется на глубину более 0,4 мм.

Т а б л и ц а 4.6 — Режимы обработки МЭШ

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$S$ , мм / мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл	$Ra$ , мкм
2 000	2 800	15	0,05	0,15	0,57

При обработке поверхности газотермического упрочняющего покрытия на других режимах (таблица 4.7) на топографии поверхности (рисунок 4.31) видно более равномерное распределение микронеровностей, ширина электроэрозионных лунок не превышает 0,1 мкм. Шероховатость поверхности  $Ra$  находится в пределах 0,46 мкм.

Из вышеприведённых исследований выявлено, что для получения качественной поверхности покрытий значения технологического тока  $I$  должны находиться в пределах 5...15 А. При увеличении значения продольной подачи  $S$  до показателей 120...2 800 мм / мин происходит уменьшение термического влияния разрядов технологического тока, поверхность покрытия оплавляется на малую глубину. Поэтому меньшие значения продольной подачи необходимо назначать для неоплавленных поверхностей упрочняющих

Т а б л и ц а 4.7 — Режимы обработки МЭШ

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$S$ , мм / мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл	$Ra$ , мкм
3 000	1 400	10	0,025	0,15	0,46



Рисунок 4.31 — Топография поверхности покрытия из материала марки ПГ-СР4 после обработки МЭШ

покрытий. Большие значения продольной подачи необходимо назначать для оплавленных газотермическим методом упрочняющих покрытий в целях повышения производительности их обработки. Частота вращения абразивного круга должна находиться в пределах  $2\ 000 \dots 3\ 000\ \text{мин}^{-1}$ . Это связано с необходимостью обеспечить условие максимальной производительности обработки за счёт электроэрозионного разрушения поверхности упрочняющих покрытий, происходящего за счёт действия технологического тока и магнитной индукции при МЭШ. При больших значениях частоты вращения круга происходит уменьшение мощности электрического разряда.

#### **4.2.3 Влияние режимов МЭШ на изменение химического состава поверхностного слоя газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2**

Оценку изменения химического состава в поверхностном слое упрочняющих покрытий после обработки МЭШ проводили по спектральным графикам распределения химических элементов согласно методике, изложенной во второй главе настоящего издания. Рентгеноспектральный микроанализ проводился с использованием энергодисперсионного SiLi-полупроводникового детектора фирмы Röntec (Германия).

Вышеприведенные исследования показывают, что на обрабатываемую поверхность упрочняющего покрытия при МЭШ оказывают влияние тепловые и электромагнитные процессы в зоне обработки, происходящие от действия технологического тока и магнитной индукции и резания зёрнами абразивного круга. Для точного определения и оценки влияния режимов МЭШ на качество поверхности газотермических упрочняющих покрытий требуется исследовать, как изменяется химический состав материала покрытий с изменением режимов МЭШ.

Исследовалось влияние режимов МЭШ при различных значениях (см. таблицы 4.3—4.7) на изменение химического состава поверхностного слоя газотермических упрочняющих покрытий

из материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2. Данные измерения химического состава поверхностного слоя покрытий после МЭШ приведены в приложении И.

Приведём спектральный график распределения химических элементов в поверхностном слое покрытия из материала марки ПГ-СР4 без обработки МЭШ (рисунок 4.32, см. вклейку). Видно, что без обработки МЭШ распределение химических элементов в поверхностном слое покрытия неравномерное. Основными химическими элементами в поверхностном слое материала покрытия являются Ni и Cr.

После обработки покрытия способом МЭШ распределение химических элементов на поверхности становится более равномерным (рисунки 4.32—4.35, см. вклейку). Процентное содержание основных элементов: Ni — 65% и Cr — 20%. Наблюдается повышение процентного содержания Al до 7...10%. Это объясняется диффузией элементов, содержащихся в связке абразивного круга. Антифрикционные свойства алюминия могут оказывать влияние на износостойкость газотермического упрочняющего покрытия.

В химическом составе поверхностного слоя (рисунок 4.33, см. вклейку) после обработки МЭШ при значениях режимов (см. таблицу 4.6) преобладает Ni — 66% и Cr — 26%. Процентное содержание Al уменьшается до 2...5%. Это связано с увеличением значения продольной подачи и уменьшением значения мощности электрических разрядов в зоне обработки. Следовательно, уменьшается интенсивность разрушения токопроводящей алюминиевой связки абразивного круга и диффузия алюминия в материал упрочняющего покрытия.

Анализируя данные распределения химических элементов в поверхностном слое (рисунок 4.34, см. вклейку) при значениях определённых режимов (см. таблицу 4.6), можно отметить, что с уменьшением значения продольной подачи увеличивается процентное содержание Al в поверхностном слое покрытия до 5...6%. Это связано с повышением мощности электрических разрядов в зоне резания и припеканием материала связки круга к поверхности покрытия.

При увеличении значения технологического тока  $I$  до 15...20 А в поверхностном слое покрытия наблюдается неравномерность распределения Cr и Ni, а также увеличение процентного содержа-

ния Al до 15...20% за счёт диффузии материала связки токопроводящего абразивного круга (рисунок 4.36 и 4.37, см. вклейку).

Из экспериментальных данных измерения химического состава поверхностного слоя упрочняющих покрытий можно сделать вывод, что технологические параметры МЭШ оказывают влияние на распределение химических элементов, причём основное влияние оказывают электрофизические параметры процесса (технологический ток и магнитная индукция).

При увеличении значения технологического тока  $I$  до 15...20 А после МЭШ в поверхностном слое происходит перераспределение многофазных структур, в том числе твёрдых — боридов никеля ( $Ni_3B$ ) и хрома ( $CrB$ ,  $Cr_2B$ ), а также карбидов хрома ( $Cr_7C_3$ ) в никелевой матрице, что оказывает влияние на износостойкость покрытий. Наблюдается увеличение процентного содержания алюминия в поверхностном слое покрытия до 15...20%. Это связано с диффузией элементов связки токопроводящего абразивного круга на поверхность упрочняющего покрытия.

Использование абразивного инструмента на токопроводящей алюминиевой связке осуществляет дополнительное насыщение поверхности газотермического упрочняющего покрытия алюминием. Это повышает антифрикционные свойства упрочняющего покрытия и способствует уменьшению поверхностной пористости. Кроме того, после обработки МЭШ распределение основных химических элементов на поверхности газотермического упрочняющего покрытия становится более равномерным, что также способствует увеличению его износостойкости и долговечности, а следовательно, повышению качества поверхности.

#### 4.2.4 Исследование влияния режимов МЭШ на твёрдость напылённых газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2

Эксплуатационные свойства детали зависят от твёрдости поверхности, восстановленной упрочняющими покрытиями [99;100]. В данной работе рассмотрено влияние режимов МЭШ на твёрдость напылённых поверхностей газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 [124]. Для измерения твёрдости поверхности покрытия использовали твердомер модели ТКС-1М. Данные измерения твёрдости поверхностного слоя покрытий из материалов марок ПГ-СР2 и ПГ-СР4 приведены в приложении И.

Результаты изменения твёрдости газотермических упрочняющих покрытий до и после обработки МЭШ показаны на диаграммах (рисунки 4.38 и 4.39). Видно, что твёрдость поверхностного слоя газотермических упрочняющих покрытий после обработки МЭШ при различных параметрах изменяется.

Для покрытия из материала марки ПГ-СР4 увеличение твёрдости поверхности наблюдается на поверхности образцов: 4 от 44,3 до 52,0 *HRA*; 12 — от 46,5 до 59,3 *HRA*; 15 — от 38,0 до 59,0 *HRA*; 18 — от 51,8 до 61,0 *HRA*; 19 — от 40,3 до 60,3 *HRA*; 20 — от 39,3 до 55,0 *HRA*; 22 — от 40,0 до 56,3 *HRA*; 24 — от 43,8 до 57,7 *HRA*. Уменьшение твёрдости поверхности наблюдается на поверхности образцов: 9 — от 54,3 до 52,3 *HRA*; 11 — от 56,2 до 52,7 *HRA*; 23 — от 60,5 до 46,3 *HRA*.

Выявлены режимы обработки образцов, при которых достигается максимальная твёрдость при минимальной шероховатости поверхности (таблица 4.8).

Для покрытия ПГ-СР2 наблюдается увеличение твёрдости поверхности после обработки МЭШ на поверхности образцов: 3 — от 60,0 до 73,7 *HRA*, 4 — от 56,0 до 79,7 *HRA*, 5 — от 69,0 до 79,0 *HRA*. Уменьшение твёрдости наблюдается на поверхности образца 1 — от 70,0 до 68,0 *HRA*, образца 2 — от 63,0 до 54,2 *HRA*.

Анализируя полученные данные измерений, можно утверждать, что увеличение твёрдости покрытий происходит за счёт действия

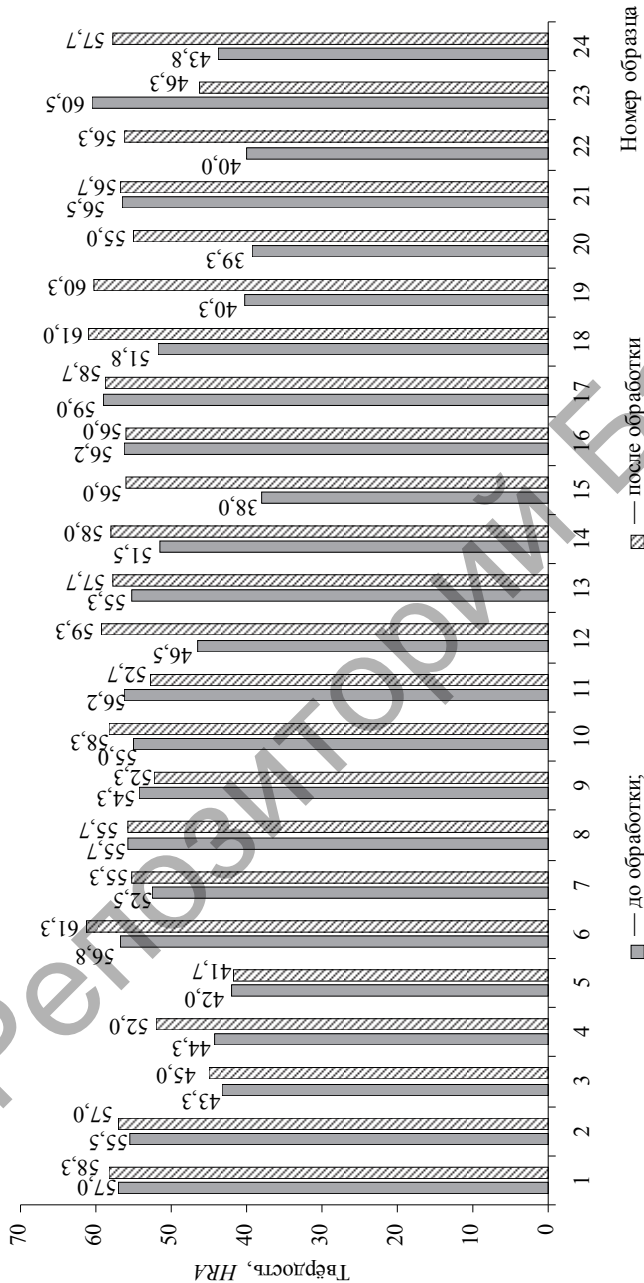


Рисунок 4.38 — Диаграмма изменения твёрдости газотермического упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СП4 до и после обработки МЭШ

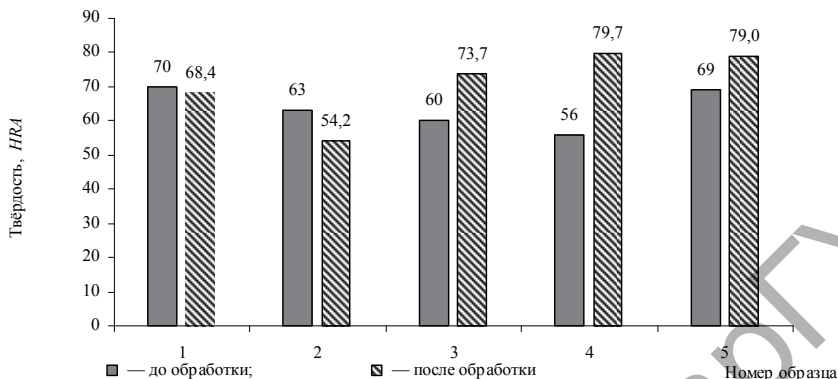


Рисунок 4.39 — Диаграмма изменения твёрдости газотермического упрочняющего покрытия ПГ-СР2 до и после обработки МЭШ

Т а б л и ц а 4.8 — Значения режимов МЭШ, при которых достигается максимальная твёрдость покрытия

Твёрдость, HRA	Шероховатость поверхности Ra, мкм	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$S$ , мм / мин	$I$ , А	$t$ , мм	$B$ , Тл
52,0...56,0	1,15	2 000	120	20	0,025	—
59,3...61,0	1,50	2 000	2 800	15	0,005	0,01
59,0...63,0	1,58	4 000	120	5	0,050	0,01
61,0...63,0	0,49	4 000	2 800	5	0,005	0,01
60,3...62,0	1,47	4 000	2 800	5	0,050	0,15
55,0...58,0	2,00	4 000	2 800	15	0,005	0,20
56,3...60,0	0,57	3 000	120	10	0,025	0,15
57,7...60,0	1,20	3 000	1 400	10	0,025	0,01

режимов МЭШ. В процессе обработки поверхностный слой газотермического защитного покрытия подвергается термическому и электроэрозионному воздействию технологического тока, силовому воздействию зёрен абразивного круга, а также энергии внешнего магнитного поля. В процессе обработки происходит удаление дефектного слоя, уменьшается шероховатость поверхности,

происходит оплавление поверхностного слоя упрочняющего покрытия. Представлена диаграмма (рисунок 4.40), показывающая изменение твёрдости газотермического покрытия ПГ-СР2 без оплавления от величины технологического тока.

Из диаграммы (см. рисунок 4.40) видно, что с изменением значений технологического тока  $I$  до 15...20 А твёрдость покрытия резко увеличивается. Это связано с тем, что в поверхностном слое покрытия образуется мелкозернистая структура и происходит перераспределение карбидной и боридной фаз в никелевой матрице.

С дальнейшим увеличением значения технологического тока  $I$  от 20 до 30 А твёрдость покрытия резко уменьшается. Это связано с реализацией в зоне обработки больших мощностей, что приводит к перегреву материала покрытия, химическому изменению в его поверхностном слое и образованию оксидных соединений. В результате анализа полученных экспериментальных данных выделены параметры режимов МЭШ, при которых твёрдость покрытия достигает максимального значения (см. таблицу 4.8).

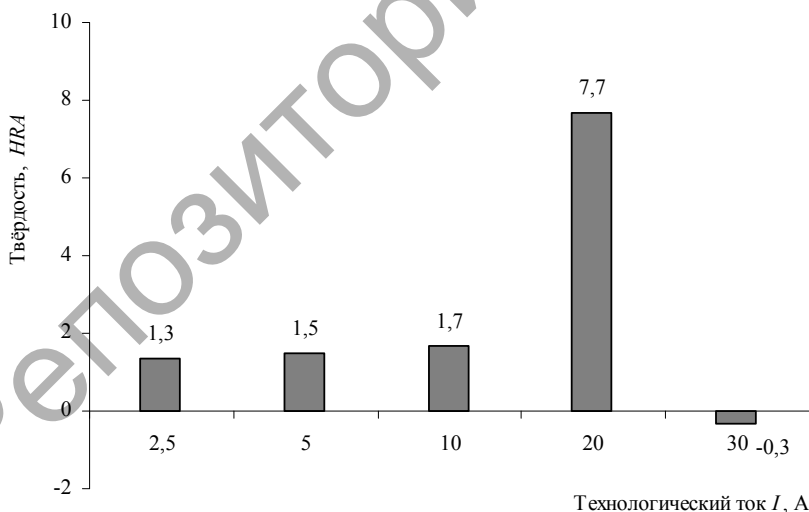


Рисунок 4.40 — Диаграмма изменения твёрдости газотермического упрочняющего покрытия марки ПГ-СР2 от величины технологического тока

#### 4.3 Влияние режимов МЭШ на прочность сцепления напылённых упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 с основой

Из вышеприведённых исследований следует, что основное влияние на теплообразование в зоне обработки оказывают электрические разряды, связанные с прохождением технологического тока через стружку или микровыступы на поверхности покрытия, и действие электромагнитного поля на основу. С изменением значения технологического тока  $I$  в интервале 10...15 А происходит оплавление материала покрытия на глубину  $\Delta$ , равную 0,25...0,30 мм, а значит, происходит увеличение прочности сцепления покрытия с основой.

Представлена графическая зависимость прочности сцепления упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СР4 от величины технологического тока (рисунок 4.41).

Величина технологического тока оказывает влияние на прочность сцепления покрытия с основой. Полученная зависимость (см. рисунок 4.41) свидетельствует о том, что максимальная прочность сцепления упрочняющего покрытия достигается при значениях

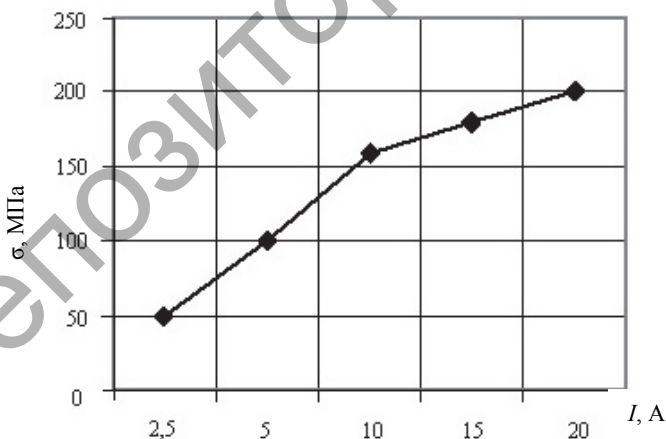


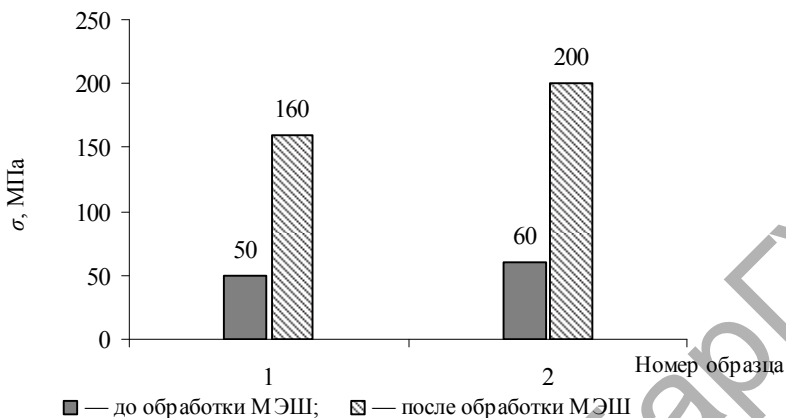
Рисунок 4.41 — Зависимость прочности сцепления покрытия из материала марки ПГ-СР4 с основой от величины технологического тока при МЭШ

технологического тока  $I$ , составляющих 10...15 А. При дальнейшем увеличении значения параметра технологического тока  $I$  до 25...30 А в межэлектродном промежутке реализуется большая тепловая мощность, температура достигает 1 200°С. В связи с тем, что коэффициенты температурного расширения материалов основы и покрытия различны, в нём возникают критические остаточные напряжения, приводящие к его отслаиванию.

На прочность сцепления оказывает влияние параметр продольной подачи  $S$ . С увеличением значения продольной подачи  $S$  от 300...400 до 700...900 мм / мин уменьшается время термического действия на поверхность упрочняющего покрытия электрических разрядов, тепловая мощность падает и глубина оплавленного слоя уменьшается. При малых значениях продольной подачи ( $S$  равно 200...300 мм / мин) проплавляющая способность технологического тока увеличивается, что приводит к увеличению глубины оплавления газотермического упрочняющего покрытия до 0,3 мм, прочность сцепления с основой при этом возрастает. Получены значения прочности сцепления напылённого газотермического упрочняющего покрытия из самофлюсующегося материала марки ПГ-СР4 до и после обработки МЭШ (рисунок 4.42).

Видно, что прочность сцепления упрочняющего покрытия с основой увеличилась в несколько раз (до 180...200 МПа) за счёт оплавления поверхностного слоя на глубину 0,3 мм, обеспечивающую диффузионную связь с основой. Следует отметить, что выбор режимов МЭШ, необходимых для оплавления поверхности на заданную глубину, нужно назначать с учётом толщины нанесённого упрочняющего покрытия, которая должна быть в пределах 0,5...1,0 мм. Толщина нанесённого слоя газотермического упрочняющего покрытия должна находиться в пределах, учитывающих: величину допуска на износ —  $\delta_{и}$  (для МЭШ  $\delta_{и}$  составляет 0,3...0,4 мм); величину погрешности установочных детали —  $\delta_{уст}$ ; величину дефектного слоя припуска —  $\delta_{л}$ ; величину усадки покрытия —  $\delta_{ус}$ .

Определены режимы МЭШ, обеспечивающие повышение прочности сцепления напылённых газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марки ПГ-СР4 и ПГ-СР2 с основой при оплавлении их на заданную глубину (таблица 4.9). Прочность сцепления покрытия до МЭШ составляла 50...65 МПа.



$I$  равно 15 — 20 А;  $B$  равно 0,3 — 0,4 Тл;  $S$  равно 391 — 681 мм / мин;  
 $t$  равно 0,05 мм;  $v = 8,4 — 13,2$  м/с

Рисунок 4.42 — Значения прочности сцепления напыленного газотермического упрочняющего покрытия из самофлюсующегося материала марки ПГ-СР4 (толщина покрытия  $\Delta$  равна 0,3 мм)

Т а б л и ц а 4.9 — Режимы МЭШ, обеспечивающие повышение прочности сцепления напыленных газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 с основой

Толщина покрытия, мм	Прочность сцепления, МПа	Материал покрытия	Режимы МЭШ				
			$v$ , м / с	$S_{пр}$ , м / мин	$I$ , А	$B$ , Тл	$t$ , мм
0,25...0,30	170...190	ПГ-СР4	13...15	390...400	15...20	0,3...0,4	0,05
0,30	180...200	ПГ-СР2	8...13	250...350			

#### 4.4 Износостойкость газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР2 и ПГ-СР4 после МЭШ

Оценку износостойкости покрытия из материала марки ПГ-СР4 проводили в промышленных условиях на комплекте деталей «Упор направляющей ленточной пилы» [108]. Два опытных образца с рабочими поверхностями, восстановленными покрытием из материала марки ПГ-СР4 после МЭШ, а также два опытных образца из стали 18ХГТ ГОСТ 4543-71 [98] с твёрдостью рабочей поверхности 57...58 HRC после традиционного чистового шлифования были установлены попарно в ленточной пиле модели 8А544 на заготовительном участке БСЗ ЗАО «Атлант». Предварительно были произведены замеры размера основной поверхности. После отработанного ресурса, составляющего 336 ч непрерывной работы, опытные образцы были сняты со станка для проведения измерения рабочих поверхностей.

Получены результаты опытных данных износостойкости рабочей поверхности деталей «Упор направляющей ленточной пилы» (таблица 4.10).

Установлено (см. таблицу 4.10), что величина износа образцов № 3 и № 4 в 2...5 раз выше, чем образцов № 1 и № 2.

Износостойкость газотермических упрочняющих покрытий после МЭШ увеличивается в 2,5...3,0 раза за счёт оплавления поверхностного слоя покрытия, когезии, более равномерного распределения в поверхностном слое твёрдых фаз и уменьшения шероховатости поверхности.

Т а б л и ц а 4.10 — Опытные данные износостойкости рабочей поверхности детали «Упор направляющей ленточной пилы»

Номер образца	Рабочий размер, мм		Материал поверхности образца	Величина износа, мм
	До установки на станок	После снятия со станка		
1	21,07	20,95	ПГ-СР4	0,12
2	21,02	20,92	ПГ-СР4	0,10
3	20,90	20,67	18ХГТ	0,23
4	20,92	20,35	18ХГТ	0,57

## 4.5 Выводы

Исходя из результатов исследований, представленных в главе 4, сделаны следующие основные выводы:

1) в результате экспериментальных исследований зависимости шероховатости поверхности и производительности обработки упрочняющих покрытий от режимов МЭШ и оптимизации полученных эмпирических моделей установлены режимы для черновой ( $I$  равно 15...20 А,  $B$  — 0,3...0,4 Тл,  $S$  — 1 400 мм/мин,  $t$  — 0,05 мм,  $v$  — 26...32 м/с) и чистовой ( $I$  равно 5...10 А,  $B$  — 0,15...0,20 Тл,  $S$  — 2 800 мм/мин,  $t$  — 0,005...0,025 мм,  $v$  — 26...32 м/с) обработки упрочняющим газотермическим покрытием из самофлюсующихся материалов (далее — УГТП СМ) марок ПГ-СР4, ПГ-СР2, а также режимы обработки наплавки сормайт (далее — НС) ( $I$  равно 15...20 А,  $B$  — 0,25...0,3 Тл,  $S$  — 1 400...2 800 мм/мин,  $t$  — 0,025...0,05 мм,  $v$  — 26...32 м/с). Режимы МЭШ обеспечивают уменьшение шероховатости поверхности  $Ra$  до значений 0,50...1,25 мкм (для УГТП СМ) и 0,3...0,4 мкм (для НС) при достижении производительности обработки  $Q$ , равной 1 500...1 700 мм<sup>3</sup>/мин и 2 500...2 700 мм<sup>3</sup>/мин соответственно;

2) после обработки МЭШ значения твёрдости газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся порошковых материалов марок ПГ-СР2 и ПГ-СР4 составляют 40...45 HRC и 58...62 HRC соответственно. Это связано с оплавлением поверхностного слоя упрочняющих покрытий, когезией, образованием в нём мелкодисперсных структур, более равномерным распределением боридов никеля (Ni<sub>3</sub>B), боридов хрома (CrB, Cr<sub>2</sub>B), а также карбидов (Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>) в никелевой матрице. Равномерность распределения карбидов и боридов в никелевой матрице позволяет сделать вывод о гомогенности (однородности) упрочняющего покрытия. Структура основы феррито-перлитная без следов перегрева и пережога, что свидетельствует об оптимальности выбора режимов МЭШ;

3) экспериментально определены режимы МЭШ напылённых газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 ( $I$  равно 15...20 А;  $B$  — 0,3...0,4 Тл;  $S$  — 391...681 мм/мин;  $t$  — 0,05 мм;  $v$  — 8,4...13,2 м/с),

при которых происходит оплавление поверхностного слоя покрытия на глубину  $\Delta$ , равную 0,3 мм, и образование прочной металлической связи (линии сварки) на границе «покрытие—основа» толщиной 3...5 мкм, что обеспечивает повышение прочности сцепления покрытия с основой в 3,3...3,6 раза (с 50...65 до 180...200 МПа);

4) износостойкость напылённого газотермического упрочняющего покрытия из материала марки ПГ-СР4, нанесённого на рабочую поверхность детали «Упор направляющей ленточной пилы», после МЭШ увеличилась в 2,5...3,0 раза.

Репозиторий БарГУ

## ГЛАВА 5 ВНЕДРЕНИЕ В ПРОИЗВОДСТВО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЭШ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

### 5.1 Разработка технологий МЭШ поверхностей деталей машин с упрочняющими покрытиями

Результаты вышеприведённых исследований использованы для разработки и внедрения технологии МЭШ газотермических упрочняющих покрытий. Получен патент на изобретение «Способ обработки газотермического упрочняющего покрытия» [129], копия патента размещена в приложении К. Акты внедрения технологии представлены в приложении Л.

Технология МЭШ упрочняющих покрытий может быть реализована на любых машиностроительных предприятиях, использующих способы восстановления и упрочнения поверхностей деталей машин газотермическими способами и наплавкой.

Технологический процесс МЭШ упрочняющих покрытий состоит из следующих общих этапов: 1) подготовки оборудования; 2) назначения оптимальных режимов обработки; 3) обработки покрытия; 4) контроля качества покрытия.

Первый этап включает в себя подготовку станка к работе, установку необходимых приспособлений и устройств для закрепления заготовки, размещения электромагнита, приборов регулирования и контроля величины магнитной индукции и технологического тока в зоне МЭШ.

На втором этапе проходит выбор оптимальных режимов МЭШ, необходимых для получения требуемого качества поверхностного слоя упрочняющего покрытия при максимальной производительности процесса обработки. Также второй этап содержит вспомогательный переход закрепления заготовки в специальном приспособлении и ориентирования её относительно абразивного круга и электромагнита. По технологии МЭШ необходимо, чтобы обрабатываемая поверхность находилась между полюсами электромагнита, линии магнитной

индукции должны замыкаться на поверхности обработки и быть перпендикулярными относительно режущего инструмента [101].

Третий этап состоит из операций настройки инструмента на заданный размер, последовательного включения привода основного движения, обеспечивающего вращение абразивного круга, включения продольной или поперечной подачи, подвода к инструменту технологического тока и включения питания электромагнита. После обработки поверхности производится отвод инструмента от поверхности, отключение технологического тока и электромагнита, отключение привода подач и основного движения.

Четвёртый этап включает операции контроля качества поверхностного слоя упрочняющего покрытия: требуемую шероховатость поверхности, твёрдость поверхностного слоя, проверку на отсутствие трещин, пор и т. д.

Технология МЭШ может применяться для обработки как плоских, так и цилиндрических поверхностей с упрочняющими покрытиями.

### **5.1.1 Технология МЭШ с оплавлением напылённых газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2**

По полученным данным исследований выявлено, что в процессе МЭШ происходит увеличение прочности сцепления покрытия с основой в 3,3...3,6 раза за счёт оплавления поверхностей напылённых газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся сплавов. Основное термическое действие на упрочняющее покрытие, при котором происходит оплавление поверхности, оказывают следующие режимы МЭШ: технологический ток, продольная подача и магнитная индукция. Технология МЭШ с оплавлением газотермических упрочняющих покрытий позволяет совмещать операции термической обработки и шлифования, что значительно (в 2,0...2,5 раза) повышает производительность процесса обработки.

Значения режимов МЭШ напылённых газотермических упрочняющих покрытий, обеспечивающих максимальную производи-

тельность обработки на первых проходах, должны находиться в пределах:  $I$  равно 2,5...5,0 А;  $B$  — 0,1...0,2 Тл;  $S$  — 750...936 мм / мин;  $t$  — 0,1...0,15 мм;  $v$  — 13,2...21,0 м / с. При достижении значения припуска 0,4 мм на предпоследнем проходе обработку МЭШ необходимо вести на режимах ( $I$  равно 15...20 А;  $B$  — 0,3...0,4 Тл;  $S$  — 391...681 мм / мин;  $t$  — 0,05 мм;  $v$  — 8,4...13,2 м / с), обеспечивающих за двойной проход оплавление поверхностного слоя на глубину  $\Delta$ , равную величине допуска на износ ( $\Delta = \delta_{и} = 0,3$  мм). На последнем проходе обеспечивается удаление шлаков, образующихся в процессе оплавления, продуктов электроэрозионного действия электрических разрядов с поверхности оплавленного газотермического упрочняющего покрытия. Обработка в этом случае осуществляется только на кинематических режимах (с отключением технологического тока и магнитной индукции). Оптимальные значения режимов для последнего прохода:  $S$  равно 750...936 мм / мин;  $t$  — 0,025 мм;  $v$  — 35...42 м / с.

Приведены значения оптимальных режимов МЭШ с оплавлением газотермических упрочняющих покрытий (таблица 5.1).

### **5.1.2 Технология МЭШ оплавленных газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2**

Технология МЭШ может быть применима для обработки газотермических упрочняющих покрытий, оплавленных различными способами. Обработка данных покрытий может осуществляться на черновых и чистовых режимах.

Основной задачей для таких покрытий является обеспечение максимальной производительности обработки при достижении заданного качества поверхности.

Приведены оптимальные значения режимов МЭШ оплавленных газотермических упрочняющих покрытий, обеспечивающие требуемое качество поверхности при максимальной производительности обработки (таблица 5.2.)

Т а б л и ц а 5.1 — Оптимальные режимы МЭШ с оплавлением газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов ПГ-СР2 и ПГ-СР4

Режим обработки	Материал покрытия	Режимы МЭШ						$R_a$ , мкм	$Q$ , мм <sup>3</sup> /мин
		$v$ , м/с	$S_{пр}$ , мм/мин	$I$ , А	$B$ , Тл	$t$ , мм	$R_a$ , мкм		
Черновой	ПГ-СР4	13,2...21,0	750...936	2,5...5,0	0,1...0,2	0,10...0,15	1,63	1 520	
	ПГ-СР2	21	750...936	2,5...5,0	0,1...0,2	0,10...0,15	3,2	1 200	
	ПГ-СР4	13,2...15,0	391...681	15...20	0,3...0,4	0,05	0,68	400	
Оплавление (припуск не более 0,4 мм)	ПГ-СР2	8,4...13	391...681	15...20	0,3...0,4	0,05	1,5	600	
	ПГ-СР4	35...42	750...936	—	—	0,025	0,50...1,25	—	
Чистовой (один проход)	ПГ-СР4	35...42	750...936	—	—	0,025	0,50...1,25	—	
	ПГ-СР2	35...42	750...936	—	—	0,025	0,50...1,25	—	

Т а б л и ц а 5.2 — Оптимальные значения режимов МЭШ оплавленных газотермических упрочняющих покрытий

Режим обработки	Материал покрытия	Режимы МЭШ						$R_a$ , мкм	$Q$ , мм <sup>3</sup> /мин
		$v$ , м/с	$S_{пр}$ , мм/мин	$I$ , А	$B$ , Тл	$t$ , мм	$R_a$ , мкм		
Черновой	ПГ-СР4, ПГ-СР2	26...32	1 400	15...20	0,3...0,4	0,05	1,58	1 500	
	ПГ-СР4, ПГ-СР2	20	2 800	5...10	0,15...0,20	0,005...0,025	0,60	800	

### 5.1.3 Технология МЭШ наплавленных упрочняющих покрытий

Вышеприведённые исследования показывают, что технология МЭШ позволяет повысить производительность обработки поверхностей, наплавленных материалами типа сормайт. Содержание этапов технологического процесса МЭШ наплавки аналогично этапам технологии МЭШ газотермических упрочняющих покрытий без оплавления. Приведены оптимальные значения режимов МЭШ, обеспечивающие требуемое качество поверхности при максимальной производительности обработки покрытий типа сормайт ГН1 (таблица 5.3).

Т а б л и ц а 5.3 — Оптимальные значения режимов МЭШ наплавленных упрочняющих покрытий

Материал покрытия	Режим обработки	Режимы МЭШ					$Ra$ , мкм	$Q$ , мм <sup>3</sup> /мин
		$v$ , м / с	$S_{пр}$ , мм / мин	$I$ , А	$B$ , Тл	$t$ , мм		
Сормайт ГН1	Черновой	26...32	1 400	20	0,25	0,05	1,47	2 800
	Чистой	26...32	2 800	15	0,30	0,025	0,40	900

## 5.2 Технико-экономическое обоснование внедрения технологических процессов МЭШ

### 5.2.1 Внедрение технологических процессов МЭШ упрочняющих покрытий в производство

Разработанный новый метод обработки газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов имеет следующие особенности: 1) возможность проводить одновременно термическую (оплавление) и механическую (шлифование) обработку, что сокращает технологическое время на выполнение

операции шлифования в 1,5...2 раза; 2) не требуется создания специального оборудования (процесс МЭШ может быть реализован на серийных станках с модернизацией механизмов, которые позволят осуществить выбранный способ обработки).

Применение для обработки упрочняющих покрытий способа МЭШ позволило: 1) повысить качество и производительность обработки поверхностей деталей с упрочняющими покрытиями за счёт концентрации в зоне обработки механической, электрической и электромагнитной энергий; 2) экономить средства на приобретение дорогостоящего инструмента, так как алмазные круги на металлической связке значительно дороже применяемых абразивных кругов на алюминиевой связке; 3) экономить средства на приобретение специального оборудования путём модернизации существующего на заводах универсального оборудования; 4) экономить средства на затраты электроэнергии в связи с уменьшением сил резания в зоне обработки и мощности основного привода станка; 5) повысить эффективность обработки, так как не требуется правка абразивного круга, что уменьшает вспомогательное время.

Технология МЭШ была реализована на модернизированном универсально-заточном станке 3Е642Е с помощью разработанных приспособлений (магнитная система 3Е642Е-МС-СБ; щёточно-коллекторный узел НГФ-100-ЩКУ-00-СБ; приспособление для закрепления опытных образцов 3Е642Е-ПР.ПЛ.-00-СБ) на Барановичском станкостроительном заводе ЗАО «Атлант».

Обработку деталей «Упор направляющей ленточной пилы» (№ ТП Т2510.00.00) и «Плита» (№ ТП С7602-7012.01) проводили по разработанным технологическим процессам МЭШ с рассчитанными оптимальными режимами резания. Технологический процесс изготовления детали «Упор направляющей ленточной пилы» на БСЗ ЗАО «Атлант» с операцией МЭШ приведён в приложении М.

Базовая и изменённая (с операцией МЭШ) калькуляции на изготовление детали «Упор направляющей ленточной пилы» на БСЗ ЗАО «Атлант» приведены в приложении Н.

В результате внедрения в технологический процесс изготовления детали «Упор направляющей ленточной пилы»

операции МЭШ производительность обработки увеличилась в 1,5 раза; затраты на заработную плату уменьшились в 3 раза, затраты на выполнение операции — в 2 раза.

Количество комплектов деталей «Упор направляющей ленточной пилы» составляет 1 600 шт. В комплекте находится 4 детали.

В результате внедрения технологических процессов МЭШ для изготовления детали «Плита» производительность обработки увеличилась в 2 раза, затраты на заработную плату уменьшились в 2 раза, затраты на выполнение операции — в 2 раза.

Количество деталей в комплекте — 4 шт.

В результате годовой экономической эффект составил 17 млн белорус. р. в ценах на 2009 г.

### **5.2.2 Внедрение МЭШ в учебный процесс**

По результатам исследований произведено внедрение в учебный процесс инженерного факультета учреждения образования «Барановичский государственный университет» технологии МЭШ, реализуемой на опытно-промышленной установке на базе фрезерного станка НГФ-100. Установка позволяет выполнять практические и лабораторные работы по дисциплинам «Теория резания», «Технология машиностроения», «Резание материалов», а также проводить научно-исследовательскую работу по изучению влияния режимов обработки на качество поверхности.

## **5.3 Выводы**

1. Разработаны три технологии МЭШ упрочняющих покрытий:

- 1) технология МЭШ напылённых газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2, позволяющая проводить одновременно термическую (оплавление) и механическую (шлифование) обработку, что сократило техно-

логическое время на выполнение операции шлифования в 1,5...2,0 раза;

- 2) технология МЭШ оплавленных газопламенным методом газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов ПГ-СР4 и ПГ-СР2, позволяющая повысить производительность обработки в 1,5 раза по сравнению с традиционным шлифованием;
- 3) технология МЭШ наплавленных сормайтотом поверхностей, при которой производительность обработки повышается в 1,5...2,0 раза по сравнению с традиционным шлифованием.

2. На основании разработанных приспособлений (магнитная система ЗЕ642Е-МС-СБ; приспособление для закрепления опытных образцов ЗЕ642Е-ПР.ПЛ.-00-СБ; щёточно-коллекторный узел НГФ-100-ЩКУ-00-СБ) модернизирован под опытно-промышленную установку для МЭШ упрочняющих покрытий универсально-заточной станок ЗЕ642Е и внедрён в производство на БСЗ ЗАО «Атлант».

3. Результаты проведённых исследований внедрены в учебный процесс учреждения образования «Барановичский государственный университет» и позволяют выполнять лабораторные и практические занятия по дисциплинам «Теория резания», «Технология машиностроения», проводить научно-исследовательскую работу по изучению влияния режимов МЭШ на качество поверхности токопроводящих материалов.

4. Разработанные технологические процессы МЭШ упрочняющих газотермических покрытий из самофлюсующихся материалов позволяют повысить производительность их обработки в 1,5...2,0 раза по сравнению с традиционными методами обработки абразивным инструментом.

5. Применение разработанных технологических процессов МЭШ для обработки рабочих поверхностей деталей «Упор направляющей ленточной пилы» и «Плита» с газотермическими упрочняющими покрытиями из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 позволяет повысить их долговечность в 3 раза. При этом годовой экономический эффект от внедрения технологии МЭШ составил 17 млн белорус. р. в ценах на 2009 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании результатов математического моделирования процесса МЭШ установлен механизм влияния электромагнитной силы на производительность обработки, заключающийся в смещении электрических разрядов в направлении действия электромагнитной силы и увеличении площади электроэрозионного действия технологического тока и объёма электроэрозионных лунок в 2,0...2,5 раза. Данный механизм приводит к повышению производительности обработки  $Q$  УГТП СМ до значений 1 559,7...1 700 мм<sup>3</sup>/мин, что в 2,5 раза выше, чем при алмазном шлифовании.

2. На основании анализа тепловых полей, полученных при численной реализации разработанных физических моделей, учитывающих теплофизические свойства материала упрочняющего покрытия (температуру плавления, плотность, удельную теплоёмкость), а также геометрические размеры зоны обработки, установлены режимы МЭШ напылённых УГТП СМ марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 ( $I$  равно 15...20 А,  $B$  — 0,3...0,4 Тл,  $S$  — 391...681 мм/мин,  $t$  — 0,05 мм;  $v$  — 8,4...13,2 м/с), при которых происходит оплавление поверхностного слоя покрытия на глубину  $\Delta$ , равную 0,3...0,4 мм.

3. В результате экспериментальных исследований зависимости шероховатости поверхности и производительности обработки упрочняющих покрытий от режимов МЭШ и оптимизации полученных эмпирических моделей установлены режимы для черновой ( $I$  равно 15...20 А,  $B$  — 0,3...0,4 Тл,  $S$  — 1 400 мм/мин,  $t$  — 0,05 мм,  $v$  — 26...32 м/с) и чистовой ( $I$  равно 5...10 А,  $B$  — 0,15...0,2 Тл,  $S$  — 2 800 мм/мин,  $t$  — 0,005...0,025 мм,  $v$  — 26...32 м/с) обработки УГТП СМ марок ПГ-СР4, ПГ-СР2, а также режимы обработки наплавом сормайтотом (НС) ( $I$  равно 15...20 А,  $B$  — 0,25...0,30 Тл,  $S$  — 1 400...2 800 мм/мин,  $t$  — 0,025...0,05 мм,  $v$  — 26...32 м/с). Режимы МЭШ обеспечивают уменьшение шероховатости поверхности  $Ra$  до значений 0,50...0,25 мкм (для УГТП СМ) и 0,3...0,4 мкм (для НС) при достижении производительности обработки  $Q$ , равной 1 500...1 700 мм<sup>3</sup>/мин и 2 500...2 700 мм<sup>3</sup>/мин соответственно. Уменьшение шероховатости поверхности происходит в результате оплавления микровыступов на поверхности покрытия и заполнения образующимся расплавом микровпадин [123].

4. В результате экспериментальных исследований влияния режимов МЭШ на структуру и свойства напылённых УГТП СМ установлено, что при значениях технологического тока  $I$ , составляющих 15...20 А износостойкость повышается в 2,5...3,0 раза по сравнению с необработанным МЭШ напылённым упрочняющим покрытием, что объясняется формированием в поверхностном слое при таких режимах мелкодисперсной структуры с равномерным распределением карбидо-боридной фазы в пересыщенном растворе никеля. При этом за счёт формирования сварной переходной зоны, образующейся в результате контакта жидкой и твёрдой фаз и представляющей собой твёрдый раствор железа в никеле, обеспечивается повышение прочности сцепления покрытия с основой в 3,3...3,6 раза по сравнению с необработанным МЭШ напылённым УГТП СМ [128].

Рекомендации по практическому использованию результатов.

1. Разработанная технология МЭШ напылённых УГТП СМ марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 позволяет проводить одновременно термическую (оплавление) и механическую (шлифование) обработку, что повышает эксплуатационные показатели упрочняемых поверхностей деталей машин, а также позволяет сокращать в 1,5...2,0 раза технологическое время на выполнение операции шлифования.

2. В результате производственных испытаний опытной партии деталей «Упор направляющей ленточной пилы» (№ ТП Т2510.00.00) и «Плита» (№ ТП С7602-7012.01) на БСЗ ЗАО «Атлант» с УГТП СМ марки ПГ-СР4, ПГ-СР2 после обработки МЭШ их долговечность увеличилась в 3 раза. При этом годовой экономический эффект от внедрения технологии МЭШ составил 17 млн белорус. р. в ценах на 2009 г.

3. Разработанные технологии МЭШ могут быть использованы на промышленных и ремонтных предприятиях, занимающихся упрочнением и восстановлением деталей машин методами газопламенного напыления и наплавки.

# **ПРИЛОЖЕНИЯ**

Репозиторий Баргу

Репозиторий БарГУ

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
(справочное)

## Анализ данных и расчёт коэффициентов регрессии

**Полная квадратичная модель**

План  
Копичество повторностей m  
Число коэффициентов в уравнении d  
Число строк плана N  
Уравнения в матричной форме

Центр. Ротатаб
d
21
52
$B=(X^*X)^{-1}(X^*Y)$
$\Phi=(X^*X)$
$K=s(\Phi)^2(X^*X)^{-1}$
0,08999
0,13148399
0,942558

Дисперсия воспроизводимости  $s(\sigma)^2$   
Дисперсия адекватности  $S(ад)^2$   
Коэффициент корреляции

**Проверка однородности дисперсий**

Критерий Кокрена

G
n= 52
m= 4

Табличный 0,23

<b>Вывод</b>
0,227228 <b>Однородны</b>
1,461118 <b>Адекватно</b>
19,95245 <b>Достоверен</b>

**Проверка адекватности уравнения регрессии**

Критерий Фишера

число степеней свободы

$k1=N$ -число факторов

$k2=N*(m-1)$

1,55  
47  
156

**Проверка достоверности коэффициента корреляции**

Критерий Стьюдента

число степеней свободы

$k=N-2$

2,57  
50

**Проверка значимости коэффициентов регрессии**

Критерий Стьюдента

число степеней свободы

2,14  
156

Номер строки плана	Опытные значения по повторностям				Среднее $\bar{Y}$	Дисперсия $S_y^2$
	1	2	3	4		
1	1,18	1,14	1,29	1,23	1,210	0,00420
2	1,18	1,30	1,27	1,37	1,280	0,00620
3	1,47	1,45	1,24	1,20	1,340	0,01953
4	0,90	0,72	0,92	1,20	0,935	0,03930
5	1,31	0,95	1,08	0,83	1,043	0,04223
6	0,75	0,64	0,73	2,67	1,198	0,96596
7	1,79	2,18	1,89	1,49	1,838	0,08102
8	1,51	1,25	1,58	1,67	1,503	0,03263
9	1,14	1,21	1,52	1,67	1,385	0,06337

Продолжение табл.

Номер строки плана	Опытные значения по повторностям				Среднее $\bar{y}$	Дисперсия $S_y^2$
	1	2	3	4		
10	1,88	1,84	1,75	1,95	1,855	0,00697
11	1,54	1,21	1,69	1,20	1,410	0,05980
12	1,85	0,19	1,22	1,20	1,365	0,10470
13	0,58	0,61	0,63	0,59	0,603	0,00049
14	1,27	1,29	1,31	1,30	1,293	0,00029
15	1,54	1,67	1,56	2,10	1,718	0,06829
16	0,92	0,79	0,84	0,83	0,845	0,00297
17	1,87	1,97	1,93	1,84	1,903	0,00343
18	2,21	1,25	1,31	1,29	1,515	0,21530
19	1,56	1,44	1,51	2,32	1,708	0,16916
20	0,89	1,08	1,29	1,06	1,080	0,02687
21	2,06	2,08	2,27	2,21	2,155	0,01030
22	1,97	1,91	1,96	1,93	1,943	0,00076
23	1,23	2,68	1,64	1,32	1,718	0,44269
24	1,20	0,78	0,75	0,95	0,920	0,04260
25	1,68	1,62	1,70	1,59	1,648	0,00263
26	1,68	1,54	1,73	1,62	1,643	0,00669
27	1,32	1,95	1,75	1,82	1,710	0,07447
28	1,15	1,44	1,22	1,15	1,240	0,01887
29	1,25	0,69	0,72	0,73	0,848	0,07229
30	1,02	1,21	1,13	1,07	1,108	0,00669
31	1,41	0,71	1,312	0,69	1,031	0,14731
32	0,34	0,60	0,51	0,42	0,468	0,01263
33	2,52	3,65	1,64	1,36	2,293	1,06329
34	0,89	0,91	0,88	0,93	0,903	0,00049
35	1,78	1,42	0,62	0,51	1,083	0,38069
36	1,25	0,73	0,94	0,82	0,935	0,05150
37	0,87	0,62	0,84	0,95	0,820	0,01993



ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
(справочное)

Чертежи приспособлений, необходимых для модернизации  
под процесс МЭШ станков моделей НГФ-100 и ЗЕ642Е

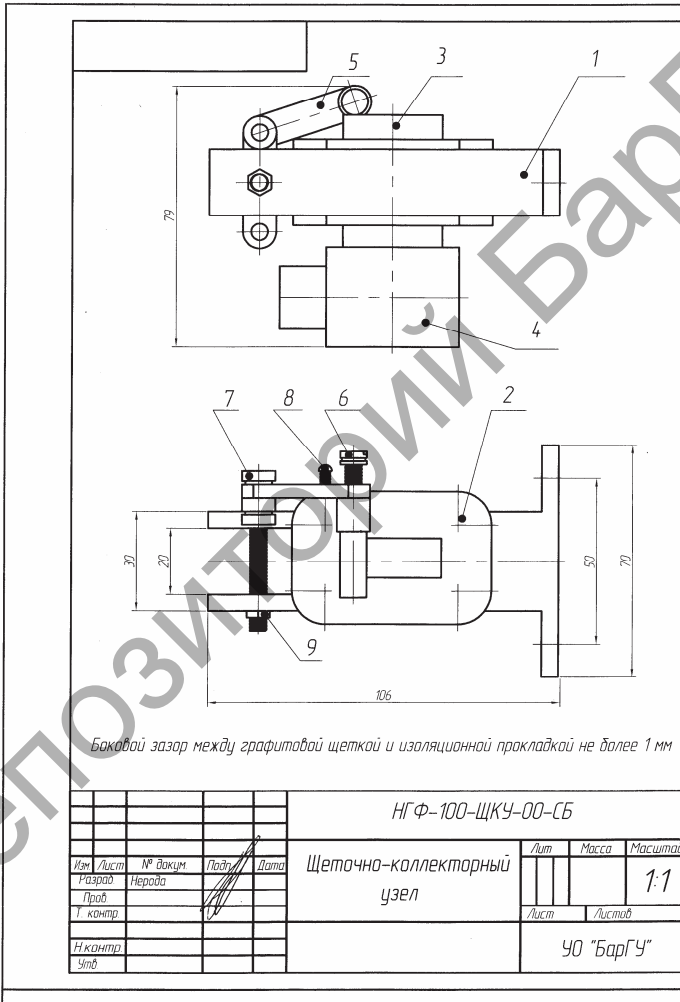


Рисунок Б.1 — Щеточно-коллекторный узел



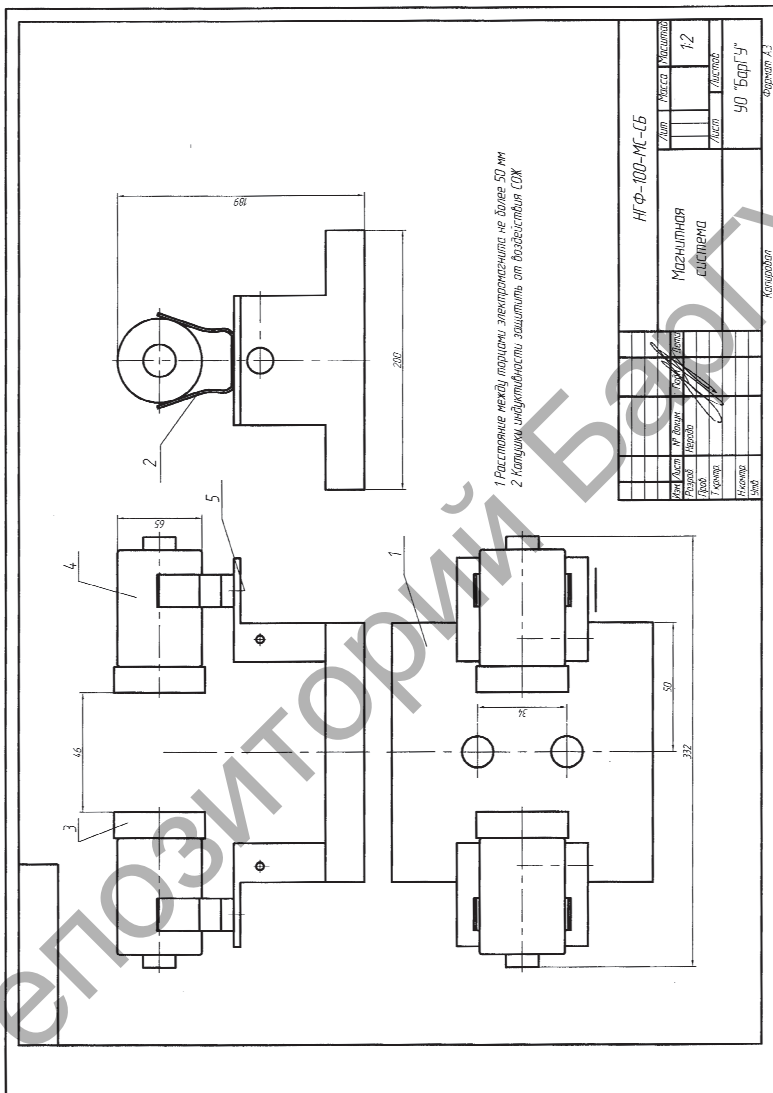


Рисунок Б.3 — Магнитная система НГФ-100



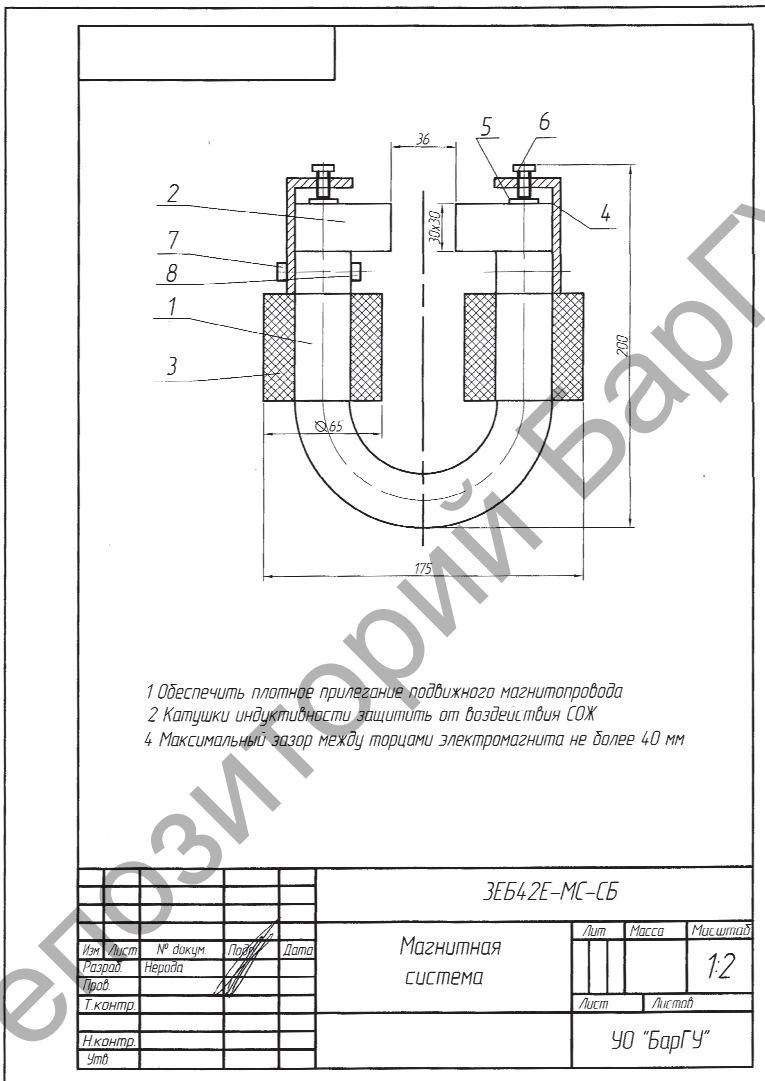


Рисунок Б.5 — Магнитная система ЗЕБ42Е


Формат	Зона	Поз	Обозначение	Наименование	Кол	Прим.
				<u>Документация</u>		
A4			ЗЕБ42Е-МС-00-СБ	Сборочный чертеж		
				<u>Сборочные единицы</u>		
		1	ЗЕБ42Е-МС-01	Магнитопровод	1	
		2	ЗЕБ42Е-МС-02	Подвижный магнитопровод	2	
		3	ЗЕБ42Е-МС-03	Катушки индуктивности	2	
		4	ЗЕБ42Е-МС-04	Держатель катушки индуктивности	2	
		5	ЗЕБ42Е-МС-05	Шайба	2	Ø25
				<u>Стандартные изделия</u>		
				Винты зажимные		
				М6 – 6g×40	2	
				ГОСТ 14731		
				Винты		
				М6-6g×40	2	
				ГОСТ 11738-84		
				Гайки М6	2	
				ГОСТ 5916		
				<b>ЗЕБ42Е-МС-00-СБ</b>		
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата		
Разраб.		Нерода				
Пров.						
Н. Контр.						
Утв.						
<b>Магнитная система</b>				Лит	Лист	Листов
				Т	1	1
				<i>УО «БарГУ»</i>		

Рисунок Б.6 — Спецификация к чертежу магнитной системы ЗЕБ42Е




Формат	Зона	Поз	Обозначение	Наименование	Кол	Прим.			
				<u>Документация</u>					
A4			НГФ-100-ПР.ЦИЛ.-00-СБ	Сборочный чертеж					
				<u>Сборочные единицы</u>					
		1	НГФ-100-ПР.ЦИЛ.-01	Основание	1				
		2	НГФ-100-ПР.ЦИЛ.-02	Центра	2				
				<u>Стандартные изделия</u>					
		3		Винты зажимные М10 – 6g×40 ГОСТ 14731	2				
<b>НГФ-100-ПР.ЦИЛ.-00-СБ</b>									
Изм. Лист	№ докум	Подпись	Дата	<b>Приспособление для закрепления опытных образцов</b>					
Разраб.	Нерода						Лит	Лист	Листов
Пров.							Т	1	3
Н. Контр.								<i>УО «БарГУ»</i>	
Утв.									

Рисунок Б.8 — Спецификация к чертежу приспособления для закрепления опытных образцов

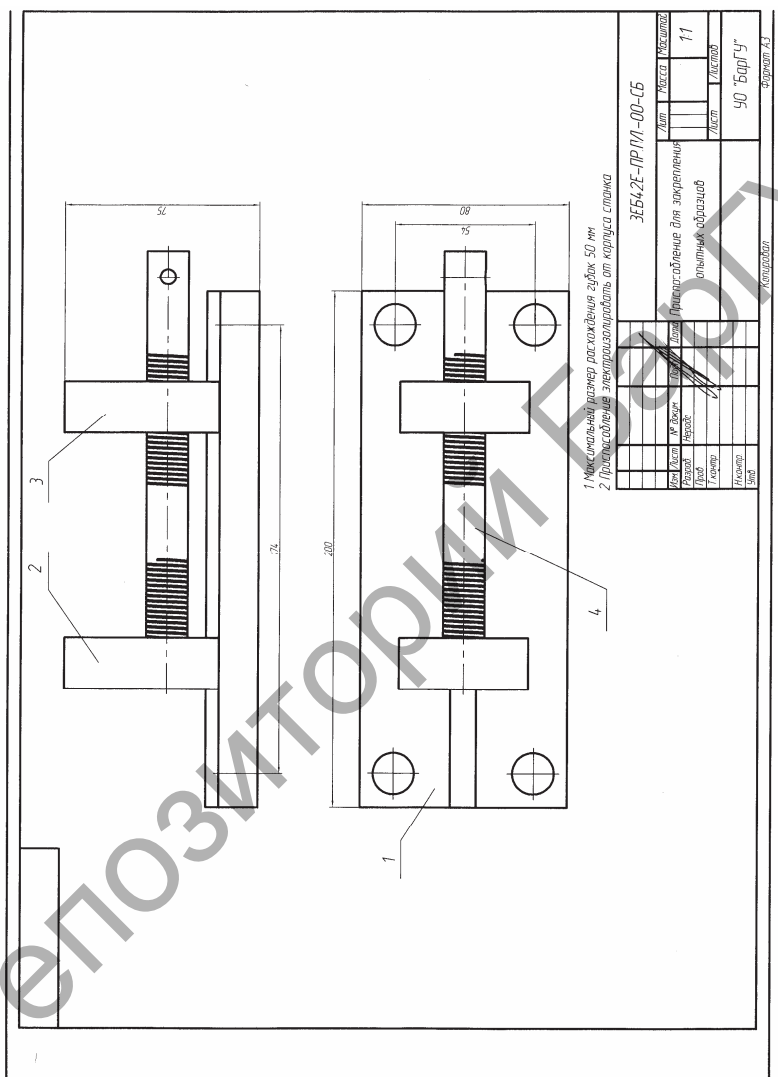


Рисунок Б.9 — Принадлежность для закрепления опытных образцов



ПРИЛОЖЕНИЕ В  
(справочное)

**Матрица планирования экспериментов и результаты опытов**

Номер экспериментального результата	Уровни факторов				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
1	+1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	+1
3	+1	-1	+1	+1	+1
4	-1	-1	+1	+1	+1
5	+1	+1	-1	+1	+1
6	-1	+1	-1	+1	+1
7	+1	-1	-1	+1	+1
8	-1	-1	-1	+1	+1
9	+1	+1	+1	-1	+1
10	-1	+1	+1	-1	+1
11	+1	-1	+1	-1	+1
12	-1	-1	-1	-1	+1
13	+1	+1	-1	-1	+1
14	-1	+1	-1	-1	+1
15	+1	-1	+1	-1	+1
16	-1	-1	+1	-1	+1
17	+1	+1	+1	+1	-1
18	-1	+1	-1	+1	-1
19	+1	-1	-1	+1	-1
20	-1	-1	-1	+1	-1
21	+1	+1	+1	+1	-1
22	-1	+1	+1	+1	-1
23	+1	-1	+1	+1	-1
24	-1	-1	-1	+1	-1
25	+1	+1	-1	-1	-1

Окончание табл.

Номер экспериментального результата	Уровни факторов				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
26	-1	+1	-1	-1	-1
27	+1	-1	+1	-1	-1
28	-1	-1	+1	-1	-1
29	+1	+1	+1	-1	-1
30	-1	+1	-1	-1	-1
31	+1	-1	-1	-1	-1
32	-1	-1	-1	-1	-1
33	$+\alpha$	0	0	0	0
34	0	$+\alpha$	0	0	0
35	0	0	$+\alpha$	0	0
36	0	0	0	$+\alpha$	0
37	0	0	0	0	$+\alpha$
38	$-\alpha$	0	0	0	0
39	0	$-\alpha$	0	0	0
40	0	0	$-\alpha$	0	0
41	0	0	0	$-\alpha$	0
42	0	0	0	0	$-\alpha$
43	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0

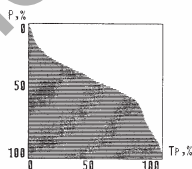
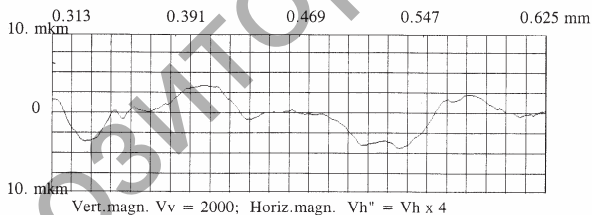
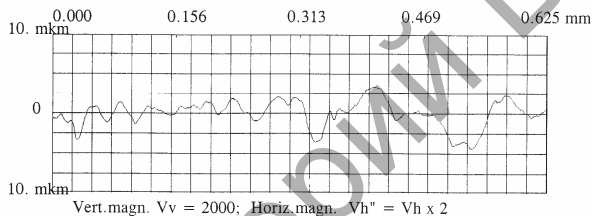
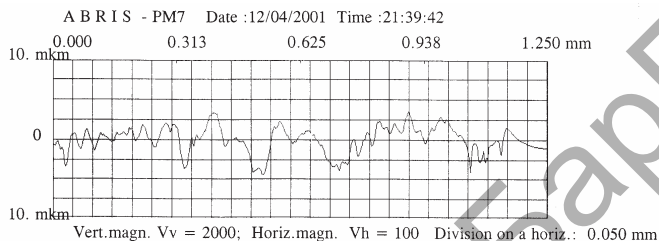
## Результаты опытов

Номер экспериментального результата	Уровни факторов					Параметры оптимизации	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$Y_1$	$Y_2$
1	28,00	0,34	16,70	0,15	16,67	1,210	204
2	8,000	0,34	16,70	0,15	16,67	1,280	221
3	28,00	0,14	16,70	0,15	16,67	1,340	265
4	8,000	0,14	16,70	0,15	16,67	0,935	238
5	28,00	0,34	8,30	0,15	16,67	1,043	190
6	8,000	0,34	8,30	0,15	16,67	1,198	218
7	28,00	0,14	8,30	0,15	16,67	1,838	252
8	8,000	0,14	8,30	0,15	16,67	1,503	299
9	28,00	0,34	16,70	0,05	16,67	1,385	280
10	8,000	0,34	16,70	0,05	16,67	1,855	273
11	28,00	0,14	16,70	0,05	16,67	1,410	182
12	8,000	0,14	16,70	0,05	16,67	1,365	258
13	28,00	0,34	8,30	0,05	16,67	0,603	252
14	8,000	0,34	8,30	0,05	16,67	1,293	272
15	28,00	0,14	8,30	0,05	16,67	1,718	288
16	8,000	0,14	8,30	0,05	16,67	0,845	281
17	28,00	0,34	16,70	0,15	10,00	1,903	305
18	8,000	0,34	16,70	0,15	10,00	1,515	298
19	28,00	0,14	16,70	0,15	10,00	1,708	270
20	8,000	0,14	16,70	0,15	10,00	1,080	185
21	28,00	0,34	8,30	0,15	10,00	2,155	205
22	8,000	0,34	8,30	0,15	10,00	1,943	238
23	28,00	0,14	8,30	0,15	10,00	1,718	242
24	8,000	0,14	8,30	0,15	10,00	0,920	216
25	28,00	0,34	16,70	0,05	10,00	1,648	309
26	8,000	0,34	16,70	0,05	10,00	1,643	201
27	28,00	0,14	16,70	0,05	10,00	1,710	191

Окончание табл.

Номер экспериментального результата	Уровни факторов					Параметры оптимизации	
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$Y_1$	$Y_2$
28	8,000	0,14	16,70	0,05	10,00	1,240	186
29	28,00	0,34	8,30	0,05	10,00	0,848	213
30	8,000	0,34	8,30	0,05	10,00	1,108	190
31	28,00	0,14	8,30	0,05	10,00	1,031	258
32	8,000	0,14	8,30	0,05	10,00	0,468	262
33	41,7	0,24	12,50	0,1	13,33	2,293	274
34	18	0,47	12,50	0,1	13,33	0,903	315
35	18	0,24	22,48	0,1	13,33	1,083	298
36	18	0,24	12,50	0,1	13,33	0,935	360
37	18	0,24	12,50	0,1	16,67	0,820	368
38	5,7	0,24	12,50	0,1	13,33	1,753	368
39	18	0,20	12,50	0,1	13,33	0,768	315
40	18	0,24	2,520	0,1	13,33	0,858	392
41	18	0,24	12,50	0,21	13,33	0,535	258
42	18	0,24	12,50	0,1	5,417	1,493	316
43	18	0,24	12,50	0,1	13,33	1,213	358
44	18	0,24	12,50	0,1	13,33	0,440	370
45	18	0,24	12,50	0,1	13,33	0,480	372
46	18	0,24	12,50	0,1	13,33	0,300	390
47	18	0,24	12,50	0,1	13,33	0,400	321
48	18	0,24	12,50	0,1	13,33	0,320	343
49	18	0,24	12,50	0,1	13,33	0,380	378
50	18	0,24	12,50	0,1	13,33	0,500	392
51	18	0,24	12,50	0,1	13,33	0,632	269
52	18	0,24	12,50	0,1	13,33	0,452	295

**Профилограммы МЭШ поверхностей газотермических  
упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов  
марок ПГ-СР4 и ПГ-СР2 после МЭШ**



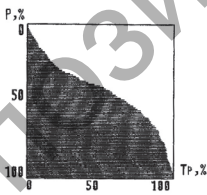
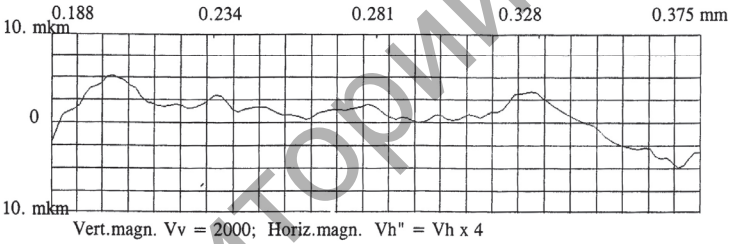
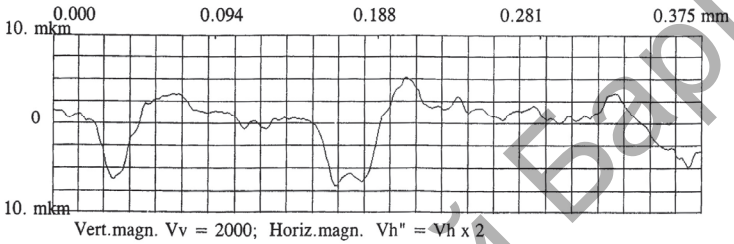
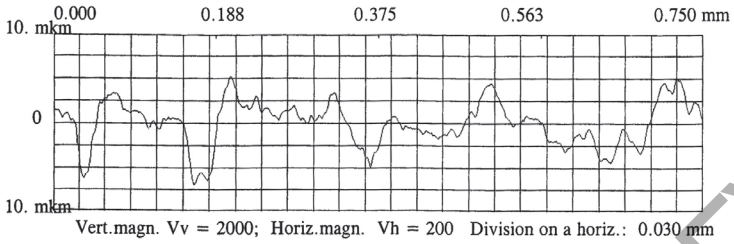
Ra, %	Tr, %	Ra, %	Tr, %
5	1,9	40	45,2
10	3,4	50	67,7
15	5,3	60	82,6
20	9,5	70	86,5
25	15,5	80	91,6
30	24,5	90	97,3

Ra = 1.076 mkm Rz = --- mkm  
Rmax = 5.797 mkm Sm = 42.53 mkm

Designation:

Signature:

A B R I S - PM7 Date :17/04/2001 Time :22:09:00

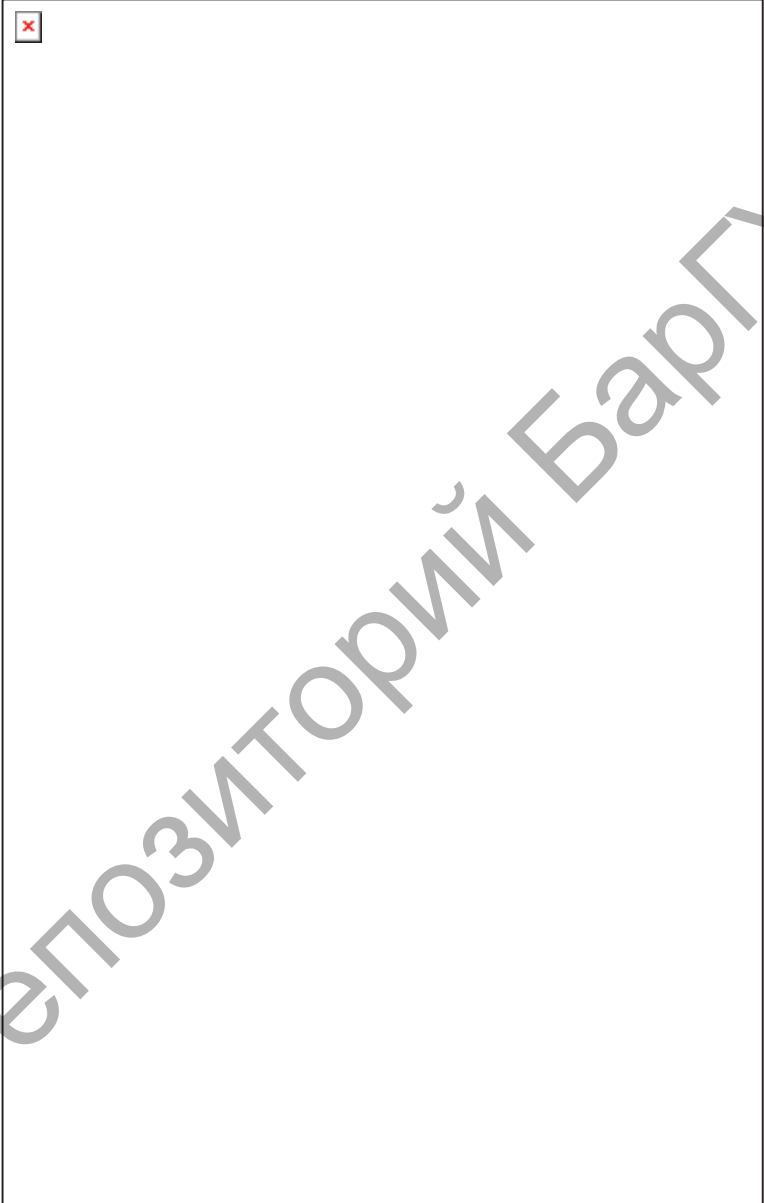


$P, \%$	$T_p, \%$	$P, \%$	$T_p, \%$
5	1,9	40	49,9
10	5,4	50	68,2
15	8,2	60	80,6
20	13,3	70	89,9
25	17,6	80	94,4
30	24,1	90	96,8

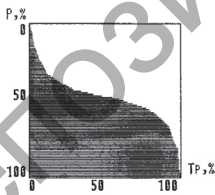
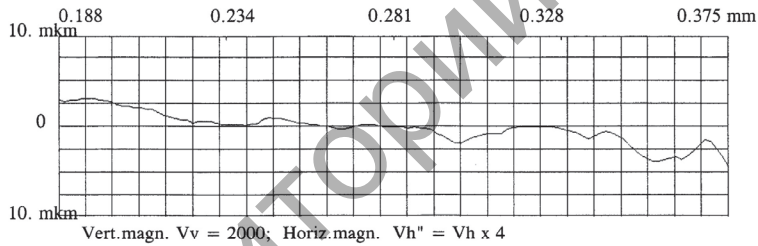
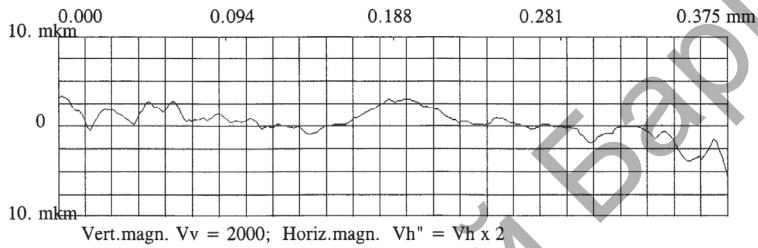
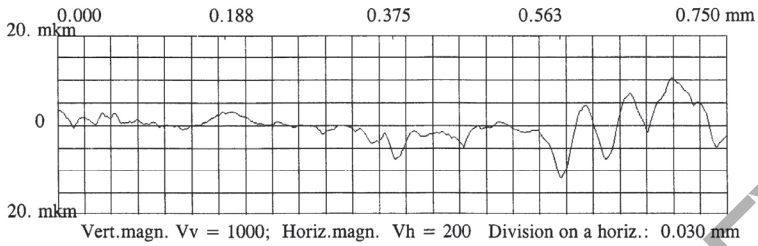
$R_a = 1.913 \text{ mkm}$        $R_z = \text{---} \text{ mkm}$   
 $R_{max} = 10.619 \text{ mkm}$        $S_m = 86.74 \text{ mkm}$

Designation: \_\_\_\_\_

Signature: \_\_\_\_\_



A B R I S - PM7 Date :17/04/2001 Time :21:39:00



$P, \%$	$TP, \%$	$P, \%$	$TP, \%$
5	1,5	40	24,7
10	2,6	50	62,2
15	3,7	60	84,5
20	5,6	70	93,1
25	8,2	80	96,8
30	10,5	90	98,3

$R_a = 2.055 \text{ mkm}$      $R_z = \text{----} \text{ mkm}$   
 $R_{max} = 10.480 \text{ mkm}$      $S_m = 53.23 \text{ mkm}$

Designation:

\_\_\_\_\_

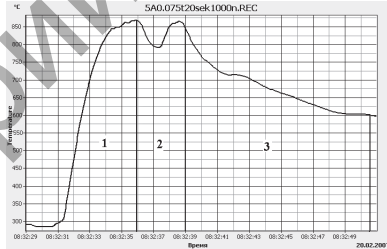
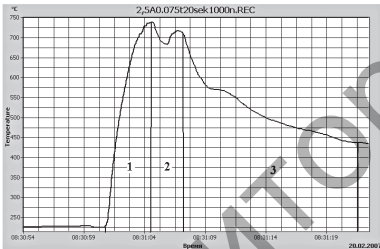
Signature:

\_\_\_\_\_

**Данные измерения температуры в зоне обработки МЭШ  
напылённых газотермических упрочняющих покрытий  
из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР2, ПГ-СР4**

Т а б л и ц а Д.1 — Значения постоянных режимов МЭШ при измерении температуры  $T(I)$

$I, A$	Температура $T_{max}, ^\circ C$	Постоянные параметры режимов МЭШ		
		$S_{пр}, MM / MIN$	$t, MM$	$v, M / C$
2,5	720	396	0,075	33,6
5	750	396	0,075	33,6
10	780	396	0,075	33,6
15	850	396	0,075	33,6



а)

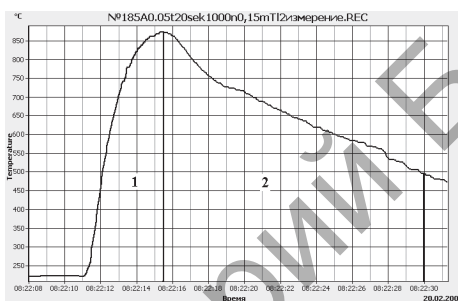
б)

1 — зона интенсивного нагрева поверхности; 2 — зона выхода токопроводящего абразивного круга; 3 — зона охлаждения; а, б — изменение температуры

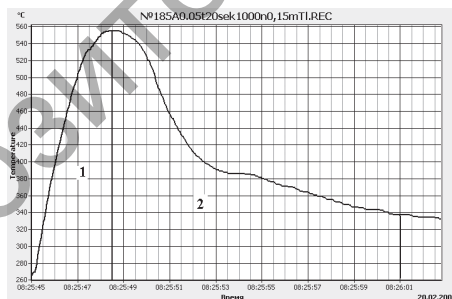
Рисунок Д.1 — Влияние технологического тока  $I$  на теплообразование в зоне обработки

Т а б л и ц а Д.2 — Значения постоянных режимов МЭШ при измерении температуры  $T(B)$

$B$ , Тл	Температура $T_{\max}$ , °С	Постоянные параметры режимов МЭШ		
		$I$ , А	$t$ , мм	$v$ , м / с
0,1	865	5	0,05	33,6
0,2	784	5	0,05	33,6
0,3	690	5	0,05	33,6
0,4	560	5	0,05	33,6



а)



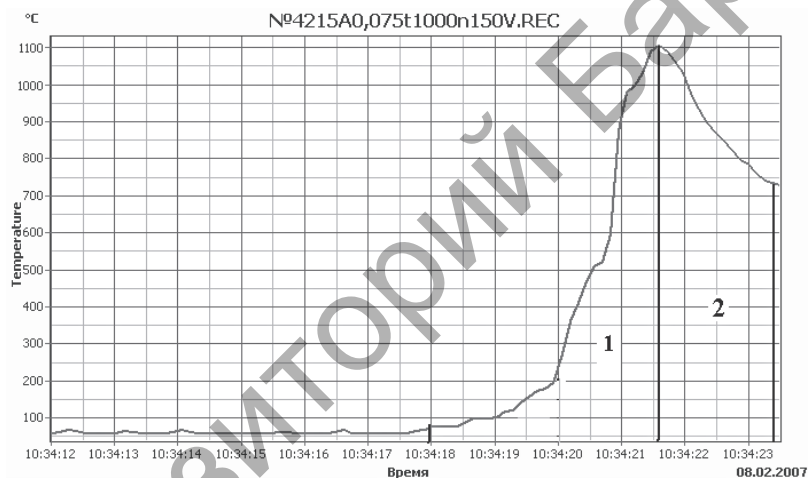
б)

1 — зона интенсивного нагрева поверхности;  
2 — зона установившейся температуры; а, б —  
изменение температуры

Рисунок Д.2 — Влияние магнитной индукции  $B$  на теплообразование в зоне обработки

Т а б л и ц а Д.3 — Значения постоянных режимов МЭШ при измерении температуры  $T(S)$

$S_{пр}$ , мм / мин	Температура $T_{max}$ , °C	Постоянные параметры режимов МЭШ		
		$I$ , А	$t$ , мм	$v$ , м / с
396,0	1 120	15	0,075	33,6
681,6	986	15	0,075	33,6
750,0	931	15	0,075	33,6
936,0	1 100	15	0,075	33,6

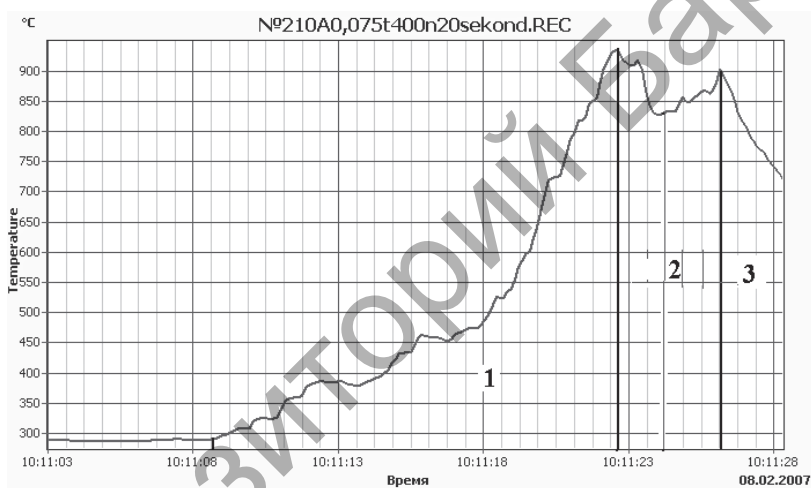


1 — зона интенсивного нагрева поверхности; 2 — зона установившейся температуры

Рисунок Д.3 — Влияние продольной подачи  $S_{пр}$  на теплообразование в зоне обработки МЭШ

Т а б л и ц а Д.4 — Значения постоянных режимов МЭШ при измерении температуры  $T(v)$

$v$ , м / с	Температура $T_{\max}$ , °С	Постоянные технологические параметры		
		$I$ , А	$t$ , мм	$S$ , мм / мин
8,4	830	10	0,075	750
13,2	855	10	0,075	750
21	950	10	0,075	750
33,6	1 000	10	0,075	750

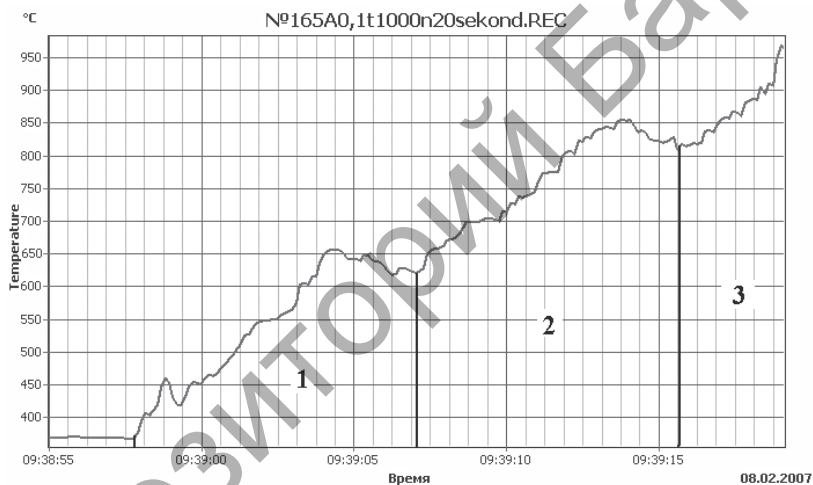


1 — зона интенсивного нагрева поверхности; 2 — зона установившейся температуры; 3 — зона охлаждения

Рисунок Д.4 — Влияние скорости вращения шлифовального круга  $v$  при МЭШ на теплообразование в зоне обработки

Т а б л и ц а Д.5 — Значения постоянных режимов МЭШ при измерении температуры  $T(t)$

$t$ , мм	Температура $T_{\max}$ , °С	Постоянные технологические параметры		
		$I$ , А	$v$ , м / с	$S_{\text{пр}}$ , мм / мин
0,05	580	10	33,6	750
0,075	600	10	33,6	750
0,100	900	10	33,6	750
0,125	950	10	33,6	750



1 — зона интенсивного нагрева поверхности; 2 — зона нагрева поверхности за второй проход; 3 — зона нагрева поверхности за третий проход

Рисунок Д.5 — Влияние глубины шлифования  $t$  на теплообразование в зоне обработки

ПРИЛОЖЕНИЕ Е  
(справочное)

**Топографии поверхностей газотермического  
упрочняющего покрытия из самофлюсующегося материала  
марки ПГ-СР2, обработанного при различных режимах МЭШ**

ОБРАЗЕЦ № 1  
(× 60)



Т а б л и ц а Е.1 — Технологические режимы МЭШ

Материал покрытия	Параметры МЭШ					Ra, мкм
	$n, \text{мин}^{-1}$	$S_{\text{пр}},$ мм / мин	$I, \text{А}$	$B, \text{Тл}$	$t, \text{мм}$	
ПГ-СР2	2 000	120	2,5	0,1	0,025	0,63

ОБРАЗЕЦ № 2  
(× 60)



Т а б л и ц а Е.2 — Технологические режимы МЭШ

Материал покрытия	Параметры МЭШ					<i>R<sub>a</sub></i> , МКМ
	<i>n</i> , мин <sup>-1</sup>	<i>S</i> <sub>пр</sub> , мм / мин	<i>I</i> , А	<i>B</i> , Тл	<i>t</i> , мм	
ПГ-СР2	2 000	120	2,5	0,1	0,025	1,63

ОБРАЗЕЦ № 3  
(× 60)



Т а б л и ц а Е.3 — Технологические режимы МЭШ

Материал покрытия	Параметры МЭШ					$R_a$ , мкм
	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$S_{пр}$ , мм / мин	$I$ , А	$B$ , Тл	$t$ , мм	
ПГ-СР2	2 000	120	2,5	0,1	0,025	1,63

ОБРАЗЕЦ № 17  
(× 60)



Т а б л и ц а Е.4 — Технологические режимы МЭШ

Материал покрытия	Параметры МЭШ					$Ra$ , мкм
	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$S_{пр}$ , мм / мин	$I$ , А	$B$ , Тл	$t$ , мм	
ПГ-СР2	4 000	120	15	0,2	0,025	0,55

ОБРАЗЕЦ № 24  
(× 60)



Т а б л и ц а Е.5 — Технологические режимы МЭШ

Материал покрытия	Параметры МЭШ					$Ra$ , мкм
	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$S_{np}$ , мм / мин	$I$ , А	$B$ , Тл	$t$ , мм	
ПГ-СР2	3 000	1 400	10	0,1	0,025	1,2

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж  
(справочное)

**Химический состав поверхностного слоя газотермических  
упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов  
марок ПГ-СР4 и ПР-СР2 после МЭШ**

```
=====
RONTEC EDWIN WinTools 11-O 05.01.2009 (15:02)
=====
NT vers: 3.2 eng Eo:20.0 keV (TO:35.0 TI:16.0)
=====
```

```
*** PUzaf results ***
elem/line P/B B F c c(atom) _confid_h_
Fe K-alpha 63.4 1.04882 1.26849 7.98 7.86 +- 1.43 *
Ni K-alpha 391.3 1.05260 1.03483 65.03 60.98 +- 8.87
Al K-ser 2.3 1.01323 1.00460 0.47 0.96 +- 0.46
Si K-ser 22.8 1.01706 1.00644 4.01 7.86 +- 1.15
Cr K-alpha 161.7 1.04474 1.16773 21.10 22.34 +- 3.24
-----
standardless 98.59 100.00 [2s]
```

```
*** PUzaf results ***
elem/line P/B B F c c(atom) _confid_h_
C K-ser @Coat? 1.00000 1.00000 3.45 11.66 +- 2.30 n
O K-ser @ 1.00000 1.00000 7.36 18.65 +- 3.35 n
Fe K-alpha 64.4 1.04627 1.26935 7.56 5.49 +- 0.87
Ni K-alpha 398.7 1.04985 1.03584 61.77 42.67 +- 5.75
Al K-ser 2.0 1.01253 1.00459 0.37 0.56 +- 0.31
Si K-ser 22.8 1.01617 1.00645 3.76 5.42 +- 0.76
Cr K-alpha 163.8 1.04239 1.16841 19.95 15.56 +- 1.85
-----
standardless 104.22 100.00 [2s]
```

```
=====
6-O 05.01.2009 (15:04)
=====
Eo:20.0 keV (TO:35.0 TI:20.0)
=====
```

```
*** PUzaf results ***
elem/line P/B B F c c(atom) _confid_h_
Fe K-alpha 49.9 1.04862 1.29447 6.13 5.89 +- 0.92 *
Ni K-alpha 407.3 1.05239 1.03486 67.38 61.59 +- 7.53
Al K-ser 12.8 1.01317 1.00446 2.57 5.11 +- 0.76
Si K-ser 20.4 1.01699 1.00635 3.58 6.84 +- 0.83
Cr K-alpha 154.3 1.04455 1.17473 19.93 20.57 +- 2.49
-----
standardless 99.59 100.00 [2s]
```

```
*** PUzaf results ***
elem/line P/B B F c c(atom) _confid_h_
C K-ser @Coat? 1.00000 1.00000 2.35 8.55 +- 1.66 n
O K-ser @ 1.00000 1.00000 4.38 11.98 +- 2.15 n
Fe K-alpha 51.1 1.04701 1.29405 6.02 4.71 +- 0.66 *
Ni K-alpha 414.3 1.05065 1.03549 65.59 48.88 +- 5.63
Al K-ser 13.0 1.01274 1.00446 2.51 4.07 +- 0.62
Si K-ser 20.9 1.01643 1.00635 3.52 5.49 +- 0.66
Cr K-alpha 156.7 1.04308 1.17487 19.39 16.31 +- 1.69
-----
```

=====

RONTEC EDWIN WinTools 20-O 24.12.2008 (14:15)

=====

NT vers: 3.2 eng Eo:20.0 keV (TO:35.0 TI: 0.0)

\*\*\* PUzaf results \*\*\*

elem/line	P/B	B	F	c	c(atom)	confid_h
C K-ser @Coat?	1.00000	1.00000	4.28	12.36	+ - 2.25	n
O K-ser @	1.00000	1.00000	14.29	30.99	+ - 5.20	n
Fe K-alpha 35.2	1.04299	1.20743	3.96	2.46	+ - 0.42	
Ni K-alpha 315.1	1.04632	1.03900	44.28	26.18	+ - 3.24	
Al K-ser 7.0	1.01165	1.00567	1.20	1.55	+ - 0.33	
Si K-ser 48.2	1.01503	1.00685	7.26	8.97	+ - 0.97	
Cr K-alpha 226.6	1.03939	1.12135	26.22	17.50	+ - 1.79	
standardless			101.49	100.00		[2s]

\*\*\* PUzaf results \*\*\*

elem/line	P/B	B	F	c	c(atom)	confid_h
Cr K-alpha @226.0	1.04315	1.11990	29.35	29.89	+ - 3.06	
Ni K-alpha @314.3	1.05074	1.03700	49.70	44.84	+ - 5.59	
Si K-ser @ 53.1	1.01646	1.00680	8.93	16.83	+ - 1.86	
Fe K-alpha @ 35.7	1.04709	1.20509	4.51	4.28	+ - 0.75	
Al K-ser @ 10.3	1.01276	1.00583	1.98	3.89	+ - 0.81	
Ti K-alpha @ 2.0	1.03886	1.19971	0.24	0.27	+ - 0.22	
standardless			94.70	100.00		[2s]

=====

3C-O 24.12.2008 (14:17)

=====

Eo:20.0 keV (TO:35.0 TI:18.0)

\*\*\* PUzaf results \*\*\*

elem/line	P/B	B	F	c	c(atom)	confid_h
C K-ser @Coat?	1.00000	1.00000	3.68	13.25	+ - 2.63	n
Cr K-alpha 143.9	1.04281	1.18239	17.55	14.61	+ - 1.80	
O K-ser @	1.00000	1.00000	6.15	16.63	+ - 3.07	n
Fe K-alpha 47.5	1.04673	1.30908	5.48	4.25	+ - 0.74	*
Ni K-alpha 405.5	1.05034	1.03528	63.71	46.97	+ - 6.37	
Al K-ser 0.1	1.01266	1.00441	0.02	0.03	+ - 0.26	<
Sj K-ser 16.6	1.01633	1.00643	2.76	4.26	+ - 0.76	
standardless			99.35	100.00		[2s]

\*\*\* PUzaf results \*\*\*

elem/line	P/B	B	F	c	c(atom)	confid_h
Fe K-alpha 47.3	1.04928	1.31037	5.84	6.05	+ - 1.19	*
Ni K-alpha 406.4	1.05310	1.03429	68.43	67.41	+ - 9.84	
Si K-ser 15.4	1.01722	1.00643	2.74	5.65	+ - 1.08	
Cr K-alpha 144.0	1.04515	1.18272	18.78	20.89	+ - 3.10	

=====  
 RONTEC EDWIN WinTools 1T-O 05.01.2009 (14:58)  
 =====  
 NT vers: 3.2 eng Eo:20.0 keV (TO:35.0 TI: 2.0)

\*\*\* PUzaf results \*\*\*

elem/line	P/B	B	F	c	c(atom)	confid_h
Fe K-alpha	44.2	1.04934	1.39656	5.13	4.80	+ - 0.44 *
Ni K-alpha	483.9	1.05316	1.03386	81.75	72.76	+ - 5.77
Al K-ser	11.9	1.01337	1.00411	2.43	4.71	+ - 0.46
Si K-ser	12.7	1.01724	1.00618	2.27	4.22	+ - 0.41
Cr K-alpha	106.7	1.04521	1.22616	13.46	13.52	+ - 1.02
standardless			105.03	100.00		[2s]

\*\*\* PUzaf results \*\*\*

elem/line	P/B	B	F	c	c(atom)	confid_h
C K-ser @Coat?	1.00000	1.00000	3.51	12.01	+ - 1.93	n
O K-ser @	1.00000	1.00000	4.99	12.81	+ - 2.04	n
Fe K-alpha	44.1	1.04728	1.39240	4.87	3.58	+ - 0.30 *
Ni K-alpha	484.0	1.05094	1.03466	77.32	54.14	+ - 4.15
Al K-ser	12.3	1.01281	1.00414	2.37	3.62	+ - 0.36
Si K-ser	13.3	1.01652	1.00622	2.24	3.28	+ - 0.32
Ca K-alpha	3.6	1.03428	1.08050	0.46	0.47	+ - 0.08
Cr K-alpha	106.7	1.04332	1.22403	12.76	10.09	+ - 0.69
standardless			108.53	100.00		[2s]

=====  
 2T-O 05.01.2009 (15:00)  
 =====  
 Eo:20.0 keV (TO:35.0 TI:32.0)

\*\*\* PUzaf results \*\*\*

elem/line	P/B	B	F	c	c(atom)	confid_h
Fe K-alpha	42.2	1.04935	1.39434	4.92	4.62	+ - 0.93 *
Ni K-alpha	481.7	1.05317	1.03386	81.47	72.73	+ - 10.23
Al K-ser	13.8	1.01337	1.00404	2.83	5.50	+ - 0.86
Si K-ser	9.3	1.01725	1.00621	1.67	3.11	+ - 0.65
Cr K-alpha	110.0	1.04522	1.22373	13.93	14.04	+ - 2.13
standardless			104.82	100.00		[2s]

\*\*\* PUzaf results \*\*\*

elem/line	P/B	B	F	c	c(atom)	confid_h
C K-ser @Coat?	1.00000	1.00000	2.72	9.57	+ - 1.91	n
O K-ser @	1.00000	1.00000	4.95	13.07	+ - 2.42	n
Fe K-alpha	42.6	1.04752	1.39393	4.73	3.57	+ - 0.64 *
Ni K-alpha	484.2	1.05120	1.03454	77.94	56.07	+ - 7.34
Al K-ser	14.1	1.01287	1.00406	2.76	4.31	+ - 0.67
Si K-ser	10.4	1.01661	1.00620	1.77	2.67	+ - 0.52
Cr K-alpha	109.7	1.04354	1.22384	13.24	10.75	+ - 1.37

```

=====
RONTEC EDWIN WinTools 4C-O 05.01.2009 (15:07)
=====
NT vers: 3.2 eng Eo:20.0 keV (TO:35.0 TI: 0.0)

```

\*\*\* PUzaf results \*\*\*

elem/line	P/B	B	F	c	c(atom)	confid.	h_
Ni K-alpha @390.3	1.05012	1.03547	60.94	46.62	+ - 3.74		
Cr K-alpha @134.4	1.04263	1.18431	16.26	14.04	+ - 1.01		
Si K-ser @ 20.6	1.01626	1.00634	3.41	5.46	+ - 0.50		
Fe K-alpha @ 40.9	1.04652	1.31739	4.67	3.75	+ - 0.41 *		
O K-ser @	1.00000	1.00000	6.33	17.77	+ - 3.05 n		
Al K-ser @ 4.5	1.01260	1.00451	0.86	1.43	+ - 0.30		
C K-ser @Coat?	1.00000	1.00000	2.92	10.93	+ - 1.98 n		
standardless		95.39	100.00			[2s]	

\*\*\* PUzaf results \*\*\*

elem/line	P/B	B	F	c	c(atom)	confid.	h_
Fe K-alpha 44.9	1.04889	1.31754	5.46	5.38	+ - 0.78 *		
Ni K-alpha 415.9	1.05267	1.03456	69.30	64.98	+ - 7.24		
Al K-ser 5.4	1.01325	1.00453	1.09	2.22	+ - 0.45		
Si K-ser 23.5	1.01709	1.00631	4.14	8.11	+ - 0.93		
Cr K-alpha 141.6	1.04479	1.18495	18.25	19.31	+ - 2.12		
standardless		98.23	100.00			[2s]	

ПРИЛОЖЕНИЕ И  
(справочное)

**Результаты измерения твёрдости поверхности  
газотермических упрочняющих покрытий  
из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2  
до и после обработки МЭШ**

Т а б л и ц а И.1 — Результаты измерения твёрдости поверхности газотермических упрочняющих покрытий из самофлюсующихся материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2 до и после обработки МЭШ

Единицы измерения *HRA*

Номер образца	До обработки				После обработки			
	1	2	3	ср.	1	2	3	ср.
<i>ПГ-СР4</i>								
1	51,0	36,0	57,0	57,0	56,0	62,0	57,0	58,3
2	49,5	66,0	54,0	56,5	47,0	62,0	62,0	57,0
3	34,0	43,0	55,0	44,0	50,0	46,0	39,0	45,0
4	34,0	50,0	49,0	44,3	50,0	54,0	52,0	52,0
5	46,0	44,5	35,5	42,0	46,0	44,0	35,0	41,7
6	50,0	49,0	71,5	56,8	61,0	62,0	61,0	61,3
7	45,0	54,5	58,0	52,5	57,0	51,0	58,0	55,3
8	51,0	54,0	62,0	55,7	51,0	54,0	62,0	55,7
9	41,0	60,0	62,0	54,3	49,0	52,0	56,0	52,3
10	47,5	61,0	56,5	55,0	61,0	50,0	64,0	58,3
11	66,0	49,5	53,0	56,2	42,0	55,0	61,0	52,7
12	46,0	43,0	50,5	46,5	60,0	61,0	57,0	59,3
13	44,0	63,0	59,0	55,3	60,0	52,0	61,0	57,7
14	44,0	52,0	58,5	51,5	55,0	60,0	59,0	58,0
15	35,0	32,0	47,0	38,0	61,0	53,0	54,0	56,0
16	48,5	61,0	59,0	56,2	48,0	61,0	59,0	56,0
17	55,5	54,5	67,0	56,2	48,0	61,0	59,0	56,0
18	47,0	51,5	57,0	51,8	64,0	61,0	58,0	61,0

Окончание табл. И.1

Номер образца	До обработки				После обработки			
	1	2	3	ср.	1	2	3	ср.
19	31,0	45,0	45,0	40,3	56,0	62,0	63,0	60,3
20	38,0	45,0	35,0	39,3	53,0	62,0	50,0	55,0
21	55,5	55,5	58,5	56,5	57,0	55,0	58,0	56,7
22	24,0	44,0	52,0	40,0	57,0	55,0	57,0	56,3
23	50,5	70,0	61,0	60,5	45,0	40,0	54,0	46,3
24	38,0	54,5	39,0	43,8	58,0	60,0	55,0	57,7
<i>ПГ-СР4 (оплавленный)</i>								
1	76,5	60,0	74,0	70,0	68,0	69,3	67,9	68,4
2	63,0	77,0	49,5	63,0	74,0	80,2	88,4	54,2
3	46,0	62,0	72,5	60,0	70,0	75,0	76,0	73,7
4	49,0	60,0	59,0	56,0	81,0	79,0	79,0	79,7
5	65,0	76,0	66,0	69,0	81,0	76,0	80,0	79,0
<i>ПГ-СР2 (оплавленный)</i>								
1	45,5	44,5	40,5	43,5	66,0	62,0	65,0	64,3
2	53,5	47,0	47,0	49,0	43,0	51,0	51,0	48,3

Описание к патенту на изобретение

РЭСПУБЛІКА БЕЛАРУСЬ



ПАТЭНТ

НА ВЫНАХОДСТВА

№ 10934

Способ шлифования газотермического защитного покрытия

выдадзены  
Нацыянальным цэнтрам інтэлектуальнай уласнасці  
ў адпаведнасці з Законам Рэспублікі Беларусь  
«Аб патэнтах на вынаходствы, карысныя мадэлі, прамысловыя ўзоры»

Патэнтаўладальнік (патэнтаўладальнікі):  
Учреждение образования "Барановичский государственный университет" (BY)

Аўтар (аўтары):  
Нерода Михаил Владимирович (BY)

Заяўка №	а 20070071	Дата падачы:	2007.01.26
Зарэгістравана ў Дзяржаўным рэестры вынаходстваў:			2008.04.23
Дата пачатку дзеяння:			2007.01.26

Генеральны дырэктар Л.І. Варанецкі



Репозиторий Баргу

Изобретение относится к металлообработке и может быть использовано для обработки труднообрабатываемых поверхностей, в частности для обработки газотермического защитного покрытия.

Из уровня техники известно, что газотермические защитные покрытия отличаются высокой прочностью, твердостью и малой вязкостью и поэтому существуют трудности при их обработке. Известен способ абразивной обработки газотермических защитных покрытий с использованием шлифовальных кругов из электрокорунда титанового, электрокорунда белого на керамической связке или кругами из карбида кремния зеленого [1]. Недостатком такого способа является низкая производительность и надежность процесса обработки, так как шлифовальные круги быстро засаливаются, подлежат правке, а покрытие имеет плохое качество.

Кроме того, известен способ шлифования газотермических защитных покрытий с использованием алмазных шлифовальных кругов [2], при котором создаются более благоприятные условия обработки, по сравнению с абразивной, но из-за интенсивного износа алмазных зерен такой способ шлифования требует значительных экономических вложений.

Известен способ шлифования газотермических защитных покрытий с проведением обработки алмазным токопроводящим шлифовальным кругом [3]. Данный аналог наиболее близкий, т.е. прототип. Недостатком данного способа является сложность процесса, большая стоимость оборудования процесса электроалмазного шлифования, что не оправдывается в условиях мелкосерийного и единичного производства.

Задача, на которую направлено данное изобретение, – повышение надежности, уменьшение затрат на шлифование и повышение качества обработанных поверхностей, упрочненных газотермическими покрытиями.

Данная задача решается тем, что обработку проводят токопроводящим шлифовальным кругом, через который пропускают технологический ток в зону обработки к поверхности обрабатываемой детали. Отличие состоит в том, что применяют технологический ток величиной 20...28 А, шлифовальный круг помещают в магнитное поле, величина индукции которого составляет 0,3...0,4 Тл, а его линии перпендикулярны вектору технологического тока и замкнуты на поверхности обрабатываемой детали.

Кроме того, предложенный способ позволяет повысить производительность обработки газотермического защитного покрытия за счет концентрации электрической и магнитной энергии в зоне обработки, применять дешевые абразивные круги и обеспечить их надежную длительную работу.

Данное изобретение поясняется чертежами, где на фигуре представлена схема способа шлифования газотермических защитных покрытий.

Способ шлифования газотермического защитного покрытия с проведением обработки токопроводящим шлифовальным кругом 1, через который пропускают технологический ток, в зону обработки к поверхности обрабатываемой детали 2, подводится через контакты 3, 4. При этом шлифовальный круг помещен в магнитном поле, величина индукции которого составляет 0,3...0,4Тл, а его линии В перпендикулярны вектору  $\vec{I}$  технологического тока и замыкаются на поверхности обрабатываемой детали 2.

Технологический ток величиной 20...28 А, проходя через шлифовальный круг 1 и обрабатываемую деталь 2 с газотермическим защитным покрытием, благодаря микронеровностям в точке контакта будет разогревать место контакта до температуры, близкой к температуре плавления. При этом металл газотермического защитного покрытия этой зоны контакта, находящийся частично в жидкой и в плазменной фазе, будет вырван и выброшен из зоны контакта за счет механического движения шлифовального круга и энергии магнитного поля. В момент удаления металла газотермического защитного покрытия из зоны контакта произойдет разрыв электрической цепи шлифовальный круг 1 - обрабатываемая деталь 2, нарушая процесс обработки. В следующий момент, вращаясь, шлифо-

## ВУ 10934 С1 2008.08.30

вальный круг войдет в соприкосновение с новой точкой на поверхности газотермического защитного покрытия обрабатываемой детали 2 и процесс повторится.

Экспериментальным путем получено, что наилучшие режимы обработки получаются при величине технологического тока 20...28 А и индукции магнитного поля 0,3...0,4 Тл.

Предложенный способ шлифования позволяет использовать при обработке абразивный токопроводящий круг ПП1250Х25Х32-5С25СТ6КАЛ1 на алюминиевой токопроводящей связке, который является дешевым и обеспечивает надежность в работе, при которой не требуется его правка. Предложенный способ позволяет получать качественную обработку поверхности за счет оплавления гребешков микронеровностей газотермического защитного покрытия обрабатываемой детали 2. Перпендикулярность векторов технологического тока и магнитной индукции обеспечивают интенсивное удаление продуктов шлифования из зоны резания и увеличивают сьем металла.

### Источники информации:

1. Юшков В.В. Опыт внедрения абразивной и алмазной обработки при восстановлении деталей машин. - М.: Машиностроение, 1989. - С. 19.
2. Ящерицин П.И., Забавский М.Т., Кожуро Л.М., Акулович Л.М. Алмазноабразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле. - Мн.: Наука 1988. - С. 29.
3. Узунян М.Д., Краснощек Ю.С. Высокопроизводительное шлифование безвольфрамовых твердых сплавов. - М.: Машиностроение, 1988. - С. 20 (прототип).

ПРИЛОЖЕНИЕ Л  
(справочное)

Акты внедрения МЭШ

УТВЕРЖДАЮ  
Главный инженер  
БСЗ ЗАО «Атлант»  
Барановичский станкостроительный завод  
(подпись)  
А.А. Моргун  
(инициалы, фамилия)  
«10» 09 2008 г.

СПРАВКА

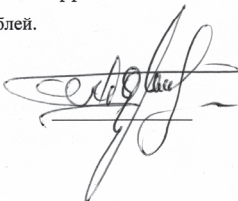
о возможном практическом использовании результатов исследования

в промышленности

Настоящим подтверждаю, что Барановичским станкостроительным заводом «Атлант» проведена оценка возможности использования опытно-промышленной установки для магнитно-электрического шлифования на базе универсально-заточного станка модели ЗЕ642Е, режимов обработки газотермических защитных покрытий полученных Неродой Михаилом Владимировичем при выполнении проекта «Разработка и исследование процессов финишной обработки поверхностей деталей машин, упрочненных газотермическими защитными покрытиями путем воздействия механических, электрических и магнитных энергий» для повышения производительности механической обработки упрочненных газотермическими защитными покрытиями поверхностей деталей машин, труднообрабатываемых токопроводящих материалов на основании чего проведена обработка направляющих ленточной пилы восстановленных газотермическим защитным покрытием ПГ СР 4, получены технологические режимы магнитно-электрического шлифования газотермических защитных покрытий ПГ СР 4, Х4ГСР, ПГ СР 2, Сормайт, Ферробор, получены профилограммы обработанных поверхностей, эмпирические зависимости для определения оптимальных режимов обработки. Износостойкость обработанного поверхностного слоя покрытия увеличилась в 2,5...3 раза.

Ожидаемый экономический эффект от использования результатов может составить 7000,0 тыс. рублей.

Начальник цеха № 15  
БСЗ ЗАО «Атлант»



М.М. Таранда

10.09.2008  
(дата)



Репозиторий Баргу



УТВЕРЖДАЮ  
Главный инженер  
БСЗ ЗАО «Атлант»

(подпись)

А. Моргун

(инициалы, фамилия)

«06» апреля 2009 г.

**АКТ  
изготовления опытных образцов**

Комиссия в составе зав. НИИЛ ПилТ Спиридонова Н.В., науч.сотр. НИИЛ ПилТ Володько А.С., механика ОГМ Коренихи Р.А., преподавателя инженерного факультета УО «БарГУ» Нероды М.В. настоящим подтверждает, что в НИИЛ ПилТ БНТУ были упрочнены опытные образцы деталей с газотермическими защитными покрытиями марки ПГ-СР4 в количестве 4 шт. и обработаны на БСЗ ЗАО «Атлант» согласно разработанной Неродой Михаилом Владимировичем технологией шлифования газотермических защитных покрытий при выполнении проекта «Разработка и исследование процессов финишной обработки поверхностей деталей машин, упрочненных газотермическими защитными покрытиями путем воздействия механических, электрических и магнитных энергий».

Опытные образцы деталей соответствуют техническим требованиям на изготовление.

Члены комиссии:

Зав. НИИЛ ПилТ, д.т.н., проф.  
Н.В. Спиридонов

Механик ОГМ  
БСЗ ЗАО «Атлант»  
Коренихи Р.А.

Науч. сотр. НИИЛ ПилТ  
А.С. Володько

Преподаватель УО «БарГУ»  
М.В. Нерода

УТВЕРЖДАЮ  
 Главный инженер  
 БСЗ ЗАО «Атлант»

Барнаулский станкабудаучный завод

(подпись) \_\_\_\_\_  
 А.И. Моргунов  
 (инициалы, фамилия)

2009 г.

**АКТ**  
**предварительных испытаний**  
в промышленности

Комиссия в составе зав. НИИЛ ПилТ БНТУ Спиридонова Н.В., науч.сотр. НИИЛ ПилТ Володько А.С., механика ОГМ Корениха Р.А., преподавателя инженерного факультета УО «БарГУ» Нероды М.В. настоящим подтверждает, что на БСЗ ЗАО «Атлант» проведено опытно-промышленное испытание полученных Неродой Михаилом Владимировичем результатов исследований при выполнении проекта «Разработка и исследование процессов финишной обработки поверхностей деталей машин, упрочненных газотермическими защитными покрытиями путем воздействия механических, электрических и магнитных энергий» для повышения производительности обработки и износостойкости упрочненных газотермическими защитными покрытиями поверхностей деталей на основании чего проведены предварительные исследования образцов деталей «Упор ленточной пилы».

1. Данные и результаты испытания образцов:

Номер образца	Рабочий размер, мм		Материал поверхности образца	Величина износа, мм
	До установки на станок	После снятия со станка		
1	21,07	20,95	ПГ-СР4	0,12
2	21,02	20,92	ПГ-СР4	0,1
3	20,90	20,67	18ХГТ	0,23
4	20,92	20,35	18ХГТ	0,57

2. Комиссия рассмотрела результаты проведенных испытаний опытных образцов деталей «Упор ленточной пилы» и установила:

- предъявленные опытные образцы деталей с покрытиями выдержали предварительные испытания и могут быть рекомендованы для применения на ленточных пилах модели 8А544 в промышленных условиях завода.

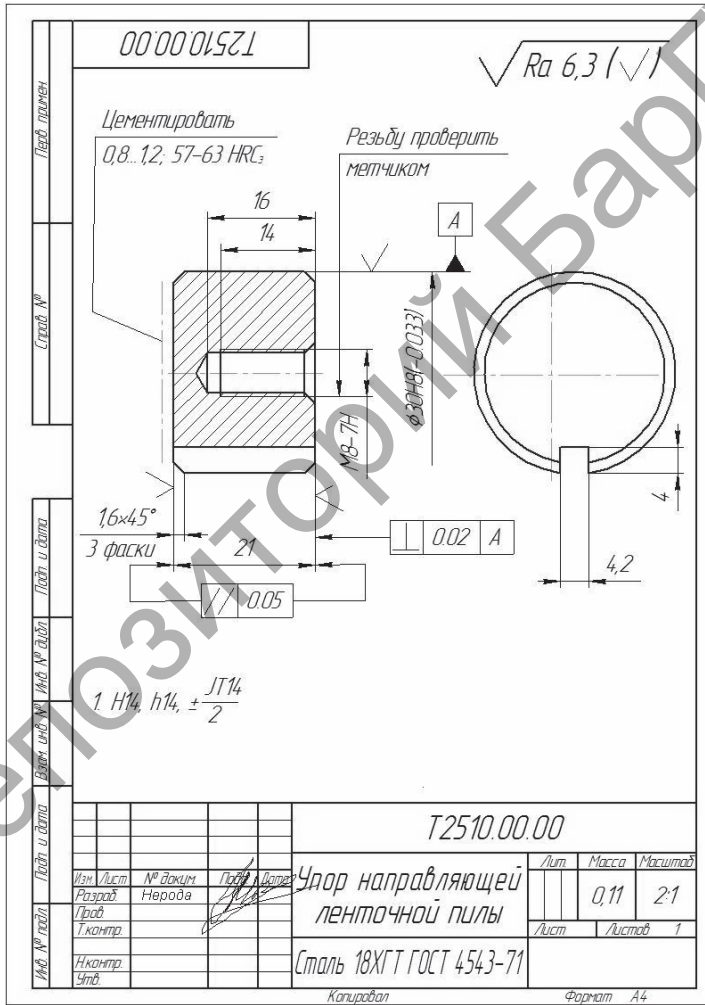
Члены комиссии: Зав. НИИЛ ПилТ, д.т.н., проф.  
 \_\_\_\_\_ Н.В. Спиридонов

Науч. сотр. НИИЛ ПилТ  
 \_\_\_\_\_ А.С. Володько

Преподаватель УО «БарГУ»  
 \_\_\_\_\_ М.В. Нерода

Механик ОГМ  
 БСЗ ЗАО «Атлант»  
 \_\_\_\_\_ Корениха Р.А.

**Технологический процесс изготовления детали  
«Упор направляющей ленточной пилы»  
на БСЗ ЗАО «Атлант» с операцией МЭШ**



Датум: Выдан: Номер:																
Разработчик: Проект:	Т2510.00.00															
И. Компр.	Упор направляющей ленточной пилы															
БСЗ «Атлант» ЗАО Сталь 18ХГТ ГОСТ4543-71																
Кол.	ВВ	МД	ЕН	Н.расх	КИМ	Код загот.	Профиль и размеры		КД	МЗ						
	кг	10	1	-	0,32	прокат	Ø35		1	МЗ						
А	Цех	Уч.	РМ	Опер.	Обозначение документа						Т.гр.					
Б	Код, наименование оборудования				СМ	Проф	Р	УТ	КР	КОВД	ЕН	ОП	К.ст.	Т.м.	Т.гр.	
01	Экологический ярлык «Углеродистая стальная стружка №2 15А»															
02	21	005 5280 Заготовительная 8Г240				ИОТ№37					0,15	0,02				
03	Отрезать заготовку в размеры Ø35×40. (С учетом длины технологической части).															
04																
05	21	010 4114 Токарная МК6056				ИОТ№37										
06	Подрезать торец написто. Точить Ø35 в размер Ø25 на длине 13. (Технологически). Перустановить. Подрезать торец в 0,2 размер 34.4(21). (Технологически).															
07																
08																
09	21	015 972 Контрольная				ИОТ№12										
10																
11	08	020 Химико-термическая				ИОТ№29										
12																
13	21	025 4114 Токарная МК6056				ИОТ№37					0,1	0,3				
14	Подрезать торец Ø35/Ø25, поддерживая размер 10. Точить Ø25 в размер Ø18 на длине 10. (Технологически). Сверлить															
МК																

Дубль...		Взам. Подр.		Упор направляющей ленточной пилы		БЭС Т2510.00.00		Технический архив БСЗ ЗАО «Атлант»											
Разраб. Прев.		БЭС «Атлант» ЗАО		Т2510.00.00															
Н. Контр.	А	Цех	Уч.	РМ	Опер. Код, наименование оборудования	Кол. наименования операции	СМ	Проф	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	К.вр.	Т.гр.	Т.вр.	Н. расх.	
																			Обозначение, код
01	01				Наименование детали, сб. единицы или материала														Сверлить отверстие Ø6.7(М8) на длине 26.2(16). Рассверлить отверстие Ø6.7 в размер Ø9 на длине 10.2. (Технологически). Нарезать резбу М8 на длине 14. Точить фаску в размер 2(1.6)×45°.
02	02																		Переустановить. Точить Ø35 в размер Ø30.4(Ø30н8) на проход. Точить фаску в размер 2(1.6)×45°.
04	04																		
05	05	21			030 972 Контрольная														ИОТ№12
06	06																		
07	07	21			035 4261В. Фрезерная 6ТЧФ20														ИОТ№37
08	08				Фрезеровать паз на проход, выдерживая размеры 4; 2; 4.														0,1 0,12
09	09																		
10	10	21			040 0108 Слесарная														ИОТ№37
11	11				Опилить заусенцы.														
12	12	21			045 972 Контрольная														ИОТ№12
13	13																		
14	14	08			050 Термическая														ИОТ№29
15	15																		
16	16	21			055 4131 К.шлифовальная ЗУ131ВМ														ИОТ№37
МК	МК																		0,2 0,1



ПРИЛОЖЕНИЕ Н  
(справочное)

Базовая и проектная (с операцией МЭШ) калькуляции  
на изготовление детали «Упор направляющей ленточной  
пилы» на БСЗ ЗАО «Атлант»

УТВЕРЖДАЮ  
Главный инженер  
БСЗ ЗАО «Атлант»  
(подпись)  
А.А. МоргуН  
(инициалы, фамилия)  
2009 г.

Базовый  
стадионный  
заезд

в том числе

№ п/п	Наименование статей калькуляции	Упор ленточной направляющей пилы	Зачетный 005	в том числе					Шифровая 075
				Товарная 010	Товарная 025	Фрезерная 035	Шифровая 055	Товарная 065	
1	Сырье и основные материалы	336	336	0	0	0	0	0	0
2	Возвратные отходы	-4	-14	0	0	0	0	0	0
3	Вспомогательные материалы								
4	Комплекующие изделия								
5	ТЗР	11	11	0	0	0	0	0	0
6	Итого материалов	342	333	0	0	0	0	0	0
7	Основная заработная плата	5 058	1 124	1 686	674	562	225	674	121
8	Дополнительная заработная плата	910	202	303	121	101	40	121	281
9	Налог и отчисления, исчисляемые от заработной платы	2 107	47	702	281	234	94	281	897
10	Общепроизводственные расходы	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Общехозяйственные расходы	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Отчисления в инновационный фонд	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Итого прямые затраты	8 418	512	1 795	2 692	1 077	897	359	1 077

Шмагина Ю.В.

Экономист ОПБА



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Дмитриченко, Э. И.* Разработка и исследование процесса магнитно-электрического шлифования деталей машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05. 02. 08 / Э. И. Дмитриченко ; Моск. автомобилестроит. ин-т. — М. : [б. и.], 1991. — 17 с.
2. *Шулев, Г. С.* Магнитно-электрическая обработка токопроводящих материалов / Г. С. Шулев, Э. Г. Кузнецов, Ю. Э. Кузнецов / Электротехн. пром-сть. — 1976. — № 9. — С. 1—2.
3. Повышение износостойкости деталей машин комплексным магнитно-электрическим способом / Г. С. Шулев [и др.] // Трение и износ. — № 5. — Минск : Наука и техника, 1987. — 943 с.
4. Исследование триботехнических характеристик электромагнитных покрытий из легированных порошков на железной основе / Ж. А. Мрочек [и др.] ; Вести Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-тех. наук. — Минск, 2000. — С. 150.
5. *Мрочек, Ж. А.* Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. — Минск : Технопринт, 2002. — 268 с.
6. *Клубникин, В. С.* Плазменное напыление покрытий в активных средах / В. С. Клубникин, М. В. Карасёв, Г. К. Петров — Л. : О-во «Знание» РСФСР, ЛО, ЛДНТП, 1990. — 20 с.
7. *Кожуро, Л. М.* Электромагнитная наплавка легированных порошков на железной основе / Л. М. Кожуро, Ж. А. Мрочек. // Технологическое обеспечение работоспособности деталей машин, механизмов и инструмента. — Киев : Знание, 1997. — С. 123—124.
8. Проектирование технологических процессов в машиностроении : учеб. пособие для вузов / И. П. Филонов [и др.] ; под общ. ред. И. П. Филонова. — Минск : Технопринт, 2003. — 910 с.
9. *Спиридонов, Н. В.* Исследование физико-механических и триботехнических свойств антифрикционных газотермических покрытий на основе бронз и баббитов // Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов, Л. И. Пилецкая / Машиностроение : респ. межведомств. сб. науч. тр. ; под ред. И. П. Филонова. — Вып. 20. — Минск : Технопринт, 2004. — Т. 1. — С. 147—152.
10. *Спиридонов, Н. В.* Триботехнические характеристики Ni-Cr-B-C-плазменных покрытий после различных методов оплавления / Н. В. Спиридонов / Машиностроение : респ. межведомств. сб. науч. тр. ; под ред. И. П. Филонова. — Минск : Технопринт, 2004. — Вып. 20, т. 1. — С. 152 — 157.
11. *Кудинов, В. В.* Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование : учеб. для вузов / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. — М. : Металлургия, 1992. — 432 с.
12. *Константинов, В. М.* Ресурсоэнергосбережение при восстановлении и упрочнении деталей диффузионно-легированными сплавами / В. М. Константинов // Мир технологий. — Минск : Технопринт, 2003. — № 1. — 83 с.
13. Размерная электрическая обработка металлов : учеб. пособие / Б. А. Артамонов [и др.] ; под ред. А. В. Глазкова. — М. : Высш. шк., 1978. — 336 с.

14. Кузнецов, Э. Г. Исследование восстановления автомобильных деталей типа «вал—штулка» с использованием электрофизических способов обработки : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Э. Г. Кузнецов. — М. : [б. и.], 1979. — 16 с.
15. Способ электроэрозионной обработки : а. с. 270157 СССР : МПК7 B23P1 / Ю. И. Сенин, А. Б. Сосенко, В. Е. Лебедев, М. Л. Левит ; дата публ. 07.08.1981.
16. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / Б. А. Артамонов [и др.] // Обработка материалов с применением инструмента : в 2 т. ; под ред. В. П. Смоленцева. — М. : Высш. шк., 1983. — Т. 1. — 247 с.
17. Узунян, М. Д. Высокопроизводительное шлифование безвольфрамовых твёрдых сплавов / М. Д. Узунян, Ю. С. Краснощек. — М. : Машиностроение, 1988. — 80 с.
18. Крымов, В. В. Алмазное шлифование деталей из титановых сплавов и жаропрочных сталей / В. В. Крымов, В. А. Горелов. — М. : Машиностроение, 1981. — 61 с.
19. Шумов, Е. Г. Электроэрозионное шлифование / Е. Г. Шумов, Е. А. Деев. — М. : Машиностроение, 1977. — 48 с.
20. Немилев, Е. Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов / Е. Ф. Немилев — Л. : Машиностроение, 1989. — 164 с.
21. Шлифование покрытий, наплавленных износостойкими самофлюсующимися сплавами / П. И. Ящерицын [и др.] // Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин и приборов : тез. докл. конф. — Пенза : [б. и.], 1986. — С. 97.
22. Коновалов, Е. Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е. Г. Коновалов, Г. С. Шулев. — Минск : Наука и техника, 1967. — 125 с.
23. Шулев, Г. С. Физико-механические основы обработки деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г. С. Шулев ; ФТИ АН БССР. — Минск : [б. и.], 1965. — 22 с.
24. Ящерицын, П. И. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын, Л. М. Кожуро, А. П. Ракомсин. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 1997. — 127 с.
25. Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов ; под ред. Н. Н. Подлекарева. — Минск : Навука і тэхніка, 1995. — 232 с.
26. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. — Минск : Наука и техника, 1988. — 272 с.
27. Бойко, Н. И. Шлифование наплавленных деталей / Н. И. Бойко // Вестн. машиностроения. — М. : Машиностроение, 1990. — № 3. — 73 с.
28. Размерная электрическая обработка металлов : учеб. пособие / Б. А. Артамонов [и др.] ; под ред. А. В. Глазкова. — М. : Высш. шк., 1978. — 336 с.
29. Комаров, О. С. Технология конструкционных материалов / О. С. Комаров. — Минск : Дизайн ПРО, 1998. — 405 с.
30. Абразивная и алмазная обработка материалов : справ. / под ред. А. Н. Резникова. — М. : Машиностроение, 1977. — 391 с.

31. Юшков, В. В. Опыт внедрения абразивной и алмазной обработки при восстановлении деталей машин / В. В. Юшков. — М. : Машиностроение, 1989. — 64 с.
32. Шумов, Е. Г. Электроэрозионное шлифование / Е. Г. Шумов, Е. А. Деев. — М. : Машиностроение, 1977. — 48 с.
33. Де Барр, А. Е. Электрохимическая обработка : пер. с англ. / А. Е. Де Барр, Д. А. Оливер. — М. : Машиностроение, 1973. — 184 с.
34. Румянцев, Е. М. Влияние основных режимов ЭХО стали ЭИ958 при непрерывной подаче электрода-инструмента на производительность процесса / Е. М. Румянцев, А. В. Туманов, И. Ю. Шуляева // Электрофизические и электрохимические методы обработки. — М. : НИИМаш, 1979. — Вып. 3. — 14 с.
35. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле // Ящерицын П. И. [и др.]. — Минск : Наука и техника, 1988. — 272 с.
36. Кожуро, Л. М. Повышение эксплуатационных свойств деталей машин, упрочнённых электромагнитной наплавкой с поверхностным пластическим деформированием / Л. М. Кожуро, А. П. Ракомсин, М. И. Сидоренко // Прогрессивные технологии обработки материалов. — Минск : БГПА, 1998. — С. 90—91.
37. Фотеев, Н. К. Технология электроэрозионной обработки / Н. К. Фотеев. — М. : Машиностроение, 1980. — 184 с.
38. О влиянии слабого импульсного электромагнитного поля на реальную структуру твёрдых тел / Г. И. Дистлер [и др.] // Докл. Акад. наук СССР, 1985. — № 3. — С. 591—593.
39. Кащеев, В. Д. Электрохимическое полирование малогабаритных шарикоподшипников / В. Д. Кащеев, А. М. Филиппенко // Электрофизические и электрохимические методы обработки. — М. : НИИМаш, 1980. — Вып. 5. — 13 с.
40. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. — Л. : Машиностроение, 1986. — 176 с.
41. Калина, В. Н. Качество поверхности высокоточных шариков при магнитно-абразивной обработке / В. Н. Калина, В. Г. Рыбаков // Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин и приборов : тез. докл. конф. — Пенза : [б. и.], 1986. — 97 с.
42. Способ шлифования деталей из ферромагнитных материалов : а. с. 542631 СССР : МПК7 В24В21 / В. Г. Сафонов, В. Н. Львов ; дата публ. 11.02.1977.
43. Шлифование покрытий, наплавленных износостойкими самофлюсующимися сплавами / П. И. Ящерицын [и др.] // Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин и приборов : тез. докл. конф. — Пенза : [б. и.], 1986. — 97 с.
44. Моднов С. И. Характеристика поверхностного слоя закалённых инструментальных сталей, обработанных абразивом в магнитном поле / С. И. Моднов // Прогрессивные методы отделочной обработки деталей машин и приборов : тез. докл. конф. — Пенза : [б. и.], 1986. — 97 с.
45. Масловский, В. М. О механизме влияния слабого электромагнитного поля на структуру конденсированных сред / В. М. Масловский, С. Н. Постников // Обработка импульсным магнитным полем (метод и техника) :

материалы 4-го Междунар. науч.-техн. семинара с междунар. участием по нетрадиционным технологиям в машиностроении — София : Горький : [б. и.], 1989. — 133 с.

46. *Постников, С. Н.* Электрические явления при трении и резании / С. Н. Постников. — Горький : Волго-Вят. кн. изд-во, 1975. — 280 с.

47. Применение избирательного переноса в узлах трения машин : тез. докл. науч.-техн. семинара. — М. : ВИСМ, 1976. — Т. 1. — С. 7—12.

48. *Ландау, Л. Д.* Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М. : Наука, 1982. — 620 с.

49. Влияние импульсной магнитной обработки инструмента на характеристики процесса резания жаропрочного сплава / Н. В. Бычков [и др.] // Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов. — Уфа : [б. и.], 1982. — С. 175—182.

50. *Якубов, Ф. Н.* Вопросы термодинамики контактных процессов и износа инструмента при резании металлов / Ф. Н. Якубов // Физика и химия обработки материалов. — 1985. — № 3. — С. 128—131.

51. *Якунин, Г. И.* Влияние локальных магнитных полей на стойкость режущего инструмента и возможность их практического использования / Г. И. Якунин, Н. Г. Молчанова // Электрические явления при трении резании и смазке твёрдых тел. — М. : Наука, 1973. — С. 128—132.

52. Магнитная обработка режущего инструмента и дальнейшие перспективы развития этого метода / под ред. С. Н. Постникова. — М. : ВДНХ СССР, 1978. — 32 с.

53. *Мальгин, Б. В.* Промышленные испытания повышения долговечности режущего инструмента при помощи намагничивания / Б. В. Мальгин, Ю. Я. Вакуленко // Электронная обработка материалов. — 1986. — № 3. — С. 79—81.

54. *Шулев, Г. С.* Повышение износостойкости деталей из нержавеющей стали / Г. С. Шулев, В. М. Кенько, Э. И. Дмитриченко // Трение и износ. — 1986. — Т. 7. — № 6. — С. 1086—1090.

55. Перестройка дефектных комплексов в кристаллических твёрдых телах под действием магнитных полей до пороговых энергий / С. Н. Постников [и др.] // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Статика и динамика деформируемых систем. — Горький : Горьк. ун-т., 1980. — С. 138—143.

56. *Мальгин, Б. В.* Повышение стойкости режущего инструмента при помощи намагничивания / Б. В. Мальгин, Ю. Я. Вакуленко. — Изв. вузов. Машиностроение. — 1985. — № 3. — С. 124.

57. *Дмитриченко, Э. И.* Технологическое упрочнение поверхностей деталей машин / Э. И. Дмитриченко, Л. В. Шестак / *Материалы, оборудование, ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 21—22 апр. 2005 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. — Могилёв : [б. и.], 2005. — Ч. 1. — 434 с.*

58. *Дмитриченко, Э. И.* Упрочнение поверхностей деталей машин магнитно-электрическим шлифованием / Э. И. Дмитриченко // *Высокоэффективное оборудование и технологические процессы упрочнения*

режущих инструментов и деталей машин : тез. докл. респ. науч.-техн. конф., Могилёв, 20—21 нояб. 1990 г. — Минск : Белкнига, 1990. — 119 с.

59. *Марков, Ю. Н.* Влияние электромагнитного поля на структурные изменения в кремнистом железе при температуре отжига выше точки Кюри / Ю. Н. Марков, Р. А. Адамеску // Физика металлов и металловедение. — 1971. — Т. 32, вып. 4. — С. 800—804.

60. *Кишкин, С. Т.* Эффекты электрического и магнитного воздействия на ползуемость металлов и сплавов / С. Т. Кишкин, А. А. Клыпин. — Докл. Акад. наук СССР. — 1973. — № 2. — Т. 211. — С. 325—327.

61. *Довгалев, А. М.* Упрочнение деталей деформируемыми элементами в управляемом магнитном поле / А. М. Довгалев // Современные технологии, материалы, машины и оборудование : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 2002 г., МГТУ. — Могилёв : [б. и.], 2002. — 467 с.

62. *Кривоглаз, М. А.* Закалка стали в магнитном поле / М. А. Кривоглаз, В. Д. Садовский, Е. А. Фокина. — М. : Наука, 1977. — 120 с.

63. *Пустовойт, В. Н.* Особенности строения  $\alpha$ -мартенсита при закалке в постоянном магнитном поле / В. Н. Пустовойт. — М. : Металлы, 1978. — С. 122—126.

64. *Клубникин, В. С.* Плазменное напыление покрытий в активных средах / В. С. Клубникин, М. В. Карасёв, Г. К. Петров. — Л. : О-во «Знание» РСФСР : ЛО : ЛДНТП, 1990. — 20 с.

65. *Киселев, М. Г.* Электроэрозионная обработка материалов / М. Г. Киселев, Ю. Ф. Ляшук, В. Л. Габец. — Минск : Технопринт, 2003. — 112 с.

66. *Грановский, Э. Г.* Исследование износостойкости алмазных инструментов для выглаживания / Э. Г. Грановский // Алмазы. — 1969. — № 1. — С. 28—32.

67. *Шулев, Г. С.* Исследование обрабатываемости упрочнённых поверхностей деталей контактным магнитно-электрическим способом / Г. С. Шулев, Э. И. Дмитриченко // Трение и износ. — 1987. — № 8. — 938 с.

68. *Дмитриченко, Э. И.* К вопросу о механизме разрушения обрабатываемой поверхности при магнитно-электрическом шлифовании / Э. И. Дмитриченко, М. П. Кульгейко, Е. Э. Дмитриченко // 5-я науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, Брест, 1998 г. : в 2 ч. ; под ред. М. В. Голуба. — Брест : БПИ, 1998. — Ч. 1. — 54 с.

69. *Шулев, Г. С.* Исследование обрабатываемости упрочнённых поверхностей деталей машин контактным магнитно-электрическим способом / Г. С. Шулев, Э. И. Дмитриченко // Машиностроение : респ. межведомств. сб. — Минск : Выш. шк., 1985. — Вып. 10. — 145 с.

70. *Дмитриченко, Э. И.* Особенности формирования микрогеометрии поверхности при магнитно-электрическом шлифовании / Э. И. Дмитриченко, М. П. Кульгейко, Е. Э. Дмитриченко // Материалы. Технологии. Инструменты. — 2000. — № 3. — 74 с.

71. *Ящерицын, П. И.* Шлифование металлов / П. И. Ящерицын, Е. А. Жалнерович. — Минск : Беларусь, 1970. — 464 с.

72. *Крымский, М. Л.* Терминология магнитно-абразивной обработки / М. Л. Крымский, А. Е. Крымская // Вестн. машиностроения. — 1987. — № 1. — С. 53—54.

73. *Дмитриченко, Э. И.* Влияние напряжённости электромагнитного поля в зоне обработки на механизм разрушения стружки при МЭШ / Э. И. Дмитриченко // 6-я науч.-техн. конф. ГПИ : тез. докл. — Гомель : ГПИ, 1992. — С. 28.

74. *Дмитриченко, Э. И.* Обеспечение твёрдости поверхности при магнитно-электрическом шлифовании / Э. И. Дмитриченко, Л. В. Шестак // Материалы, оборудование, ресурсосберегающие технологии : материалы Международ. науч.-техн. конф., Могилёв, 2004 г. : в 2 ч. — Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2004. — Ч.1. — 322 с.

75. *Киреева, Л. Е.* Описание и изучение области оптимума методом центрального ротатабельного планирования второго порядка : метод. указания / Л. Е. Киреева, В. У. Огнев, А. А. Пучков. — Гомель : ГПИ, 1983. — 53 с.

76. *Борисов, Ю. С.* Плазменные порошковые покрытия / Ю. С. Борисов, А. Л. Борисова. — Киев : Навук. думка, 1985. — 321 с.

77. Теория и практика нанесения упрочняющих покрытий / П. А. Витязь [и др.]. — Минск : Беларус. навука, 1998. — 583 с.

78. *Спиридонов, Н. В.* Физико-математическая модель изнашивания газотермических покрытий на опорных поверхностях прессовых валов в условиях фреттинг-коррозии / Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов, Л. И. Пилецкая // Машиностроение : респ. межведомств. сб. науч. тр. БНТУ. — 2007. — Вып. 22. — С. 174—178.

79. *Кучин, В. Л.* Магнитогидродинамическая теория электрического разряда / В. Л. Кучин, А. К. Шастова // Материалы 4-й Всесоюз. конф. по ЭКО труднообрабатываемых материалов. — Запорожье : ЗПИ им. Чубаря, 1973. — С. 5—8.

80. *Пахалин, Ю. А.* Алмазное контактно-эрозионное шлифование / Ю. А. Пахалин. — Л. : Машиностроение, 1985. — 178 с.

81. *Маслов, Е. Н.* Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов — М. : Машиностроение, 1974. — 320 с.

82. *Ящерицын, П. И.* Теория резания : учеб. / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. — Минск : Новое знание, 2005. — 512 с.

83. *Чачин, В. Д.* Профилирование алмазных шлифовальных кругов / В. Д. Чачин, В. Д. Дорофеев. — Минск : Наука и техника, 1974. — 160 с.

84. *Чейс, У.* Электрический взрыв проводников : пер. с англ. / У. Чейс. — М. : Мир, 1965. — С. 7—11.

85. *Артамонов, Б. А.* Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / Б. А. Артамонов // Обработка материалов с использованием высококонцентрированных источников энергии : в 2 т. ; под ред. В. П. Смоленцева. — М. : Высш. шк., 1983. — Т. 2. — 208 с.

86. *Бирюков, Б. Н.* Электрофизические и электрохимические методы размерной обработки / Б. Н. Бирюков. — М. : Машиностроение, 1981. — 160 с.

87. Ящерицын, П. И. Роль связки шлифовального круга в работе сил трения и в теплообразовании / П. И. Ящерицын, Э. С. Бранкевич // Магнитно-абразивное полирование деталей. — Минск : [б. и.], 1976. — С. 3—9.

88. Стационарное электромагнитное ускорение плазмы во внешнем асимметричном магнитном поле // Плазменные ускорители. — М. : Машиностроение, 1973. — С. 61—65.

89. Матвеев, А. Н. Электродинамика / А. Н. Матвеев. — М. : Высш. шк., 1980. — 383 с.

90. Самохвалов, Г. В. Электрические печи черной металлургии / Г. В. Самохвалов, Г. И. Черныш. — М. : Металлургия, 1984. — 232 с.

91. Масловский, В. М. О механизме влияния слабого электромагнитного поля на структуру конденсированных сред / В. М. Масловский, С. Н. Постников // Обработка импульсным магнитным полем (метод и техника) : материалы 4-го Междунар. науч.-техн. семинара с междунар. участием по нетрадиционным технологиям в машиностроении. — София : Горький : [б. и.], 1989. — 133 с.

92. Кибец, И. Н. Физика : справ. / И. Н. Кибец, В. И. Кибец. — Харьков : Фолио ; Ростов н/Д : Феникс, 1997. — 479 с.

93. Арцимович, Л. А. Плазменные ускорители / Л. А. Арцимович ; под ред. Л. А. Арцимовича. — М. : Машиностроение, 1973. — 312 с.

94. Волчков, Г. В. Особенности перемещения дуг в поперечном магнитном поле с неплавящимся электродом / Г. В. Волчков // Сварочное производство. — 1973. — № 7. — С. 26—28.

95. Дмитриченко, Э. И. Роль режимов магнитно-электрического шлифования на теплообразование в зоне контакта / Э. И. Дмитриченко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф. : в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилёв обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Беларуси, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл.ред.) [и др.]. — Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2006. — Ч. 1. — С. 50—51.

96. Лифшиц, Л. С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л. С. Лифшиц, А. Н. Хакимов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 1989. — 336 с.

97. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников — М. : Машиностроение, 1981. — 279 с.

98. Кожуро, Л. М. Исследование износостойкости покрытий, сформированных электромагнитной наплавкой с различными конструкциями магнитных систем / Л. М. Кожуро, Ж. А. Мрочек, А. В. Миранович / Машиностроение : респ. межведомств. сб. науч. тр. ; под ред. И. П. Филонова. — Минск : Технопринт, 2004. — Вып. 20, т. 1. — С. 118—123.

99. Крайко, С. Э. Влияние толщины поглощающего покрытия на распределение микротвёрдости при лазерной термообработке / С. Э. Крайко / Машиностроение : респ. межведомств. сб. науч. тр. ; под ред. И. П. Филонова. — Минск : Технопринт, 2004. — Вып. 20, т. 1. — С. 124 — 127.

100. *Дмитриченко, Э. И.* Особенности формирования микрогеометрии поверхности при магнитно-электрическом шлифовании / Э. И. Дмитриченко, М. П. Кульгейко, Е. Э. Дмитриченко / Материалы. Технологии. Инструменты. — Гомель : ИММС НАНБ, 2000. — № 3. — 74 с.

101. *Спиридонов, Н. В.* Особенности магнитно-электрического шлифования газотермических покрытий / М. В. Нерода, Н. В. Спиридонов // Вестн. БНТУ. — 2007. — № 4. — С. 31—34.

102. *Blagodarny, V.* Electromagnetic Grininding of Gas-Termal Sprayed Coating / V. Blagodarny, M. Niaroda // Manufacturing engineering. — 2006. — Vol. 79, № 3. — P. 9—12.

103. *Нерода, М. В.* Физическая сущность процесса магнитно-электрического шлифования (МЭШ) защитных газотермических покрытий / М. В. Нерода // Молодежь — производству : Междунар. науч.-техн. конф. : сб. ст. — Витебск : ВГТУ, 2006. — С. 208—210.

104. *Спиридонов, Н. В.* Способ магнитно-электрического шлифования газотермических покрытий / Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода // Становление современной науки—2006 : материалы 1-й Междунар. науч.-практ. конф. — Днепропетровск : Наука и образование, 2006. — Т. 1. — С. 68—71.

105. *Майоров, С. А.* Методика исследования влияния режимов магнитно-электрического шлифования при обработке упрочнённых поверхностей / С. А. Майоров, М. В. Нерода / Содружество наук. Барановичи—2006 : материалы науч.-практ. конф., Барановичи, 27 апр. 2006 г. / редкол. В. В. Таруц (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи : БарГУ, 2006. — С. 353—354.

106. *Высоцкий, В. А.* Влияние технологического тока на теплообразование в зоне обработки при магнитно-электрическом шлифовании / В. А. Высоцкий, М. В. Нерода / Содружество наук. Барановичи—2007 : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 24—25 мая 2007 г. / редкол.: В. Н. Зуев, В. В. Таруц (гл. ред.). — Барановичи : РИО БарГУ, 2007. — С. 68—69.

107. *Нерода, М. В.* Установка для магнитно-электрического шлифования на базе горизонтально-фрезерного станка / М. В. Нерода, В. А. Майстров // Содружество наук. Барановичи—2005 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, Барановичи, 22 февр. 2005 г. : в 2 ч. / редкол.: В. И. Кочурко (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи : БарГУ, 2005. — Ч. 2. — С. 279—281.

108. *Гончарик, Д. В.* Магнитная система для магнитно-электрического шлифования / Д. В. Гончарик, М. В. Нерода // Содружество наук. Барановичи—2006 : материалы науч.-практ. конф., Барановичи, 27 апр. 2006 г. / редкол. В. В. Таруц (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи : БарГУ, 2006. — С. 351—352.

109. *Niaroda, M.* Technological and physical features of magnetic – electric grinding process / M. Niaroda, V. Blagodarny / INFOTECH 2007. Moderní informační a komunikační technologie ve vzdělávání, Moravské vysoké skola. — Olomouci, 2007. — DÍL. 2. — P. 734—737.

110. *Дмитриченко, Э. И.* Влияние электромагнитной силы на выброс продуктов шлифования / Э. И. Дмитриченко, М. В. Нерода / Содружество наук. Барановичи—2005 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых

исследователей, Барановичи, 22 февр. 2005 г. : в 2 ч. / редкол.: В. И. Кочурко (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи : БарГУ, 2005. — Ч. 2. — С. 289—291.

111. *Спиридонов, Н. В.* Теплофизические особенности процесса магнитно-электрического шлифования газотермических упрочняющих покрытий / Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода, И. О. Соколов // Вестн. БНТУ. — 2008. — № 3. — С. 26—29.

112. *Blagodarny, V.* Termal Influence and Termal Zones of Magnetic-electric Grinding of Gas-thermal Sprayed Coatings / V Blagodarny, M. Niaroda // Manufacturing engineering. — 2007. — Vol. 121, № 4. — P. 8—11.

113. *Струков, М. Г.* Термические циклы на поверхности обработки при магнитно-электрическом шлифовании / М. Г. Струков, М. В. Нерода // Содружество наук. Барановичи—2006 : материалы науч.-практ. конф., Барановичи, 27 апр. 2006 г. / редкол.: В. В. Таруц (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи : БарГУ, 2006. — С. 356—357.

114. *Нерода, М. В.* Термическое влияние основных режимов магнитно-электрического шлифования на газотермические упрочняющие покрытия / М. В. Нерода, Н. В. Спиридонов / Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы VII Междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 3—4 мая 2007 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. — Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. — С. 97—100.

115. *Субботин, М. В.* Оптимизация величины технологического тока при магнитно-электрическом шлифовании газотермических упрочняющих покрытий / М. В. Субботин, М. В. Нерода / Содружество наук. Барановичи—2007 : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 24—25 мая 2007 г. / редкол.: В. Н. Зуев, В. В. Таруц (гл. ред.). — Барановичи : РИО БарГУ, 2007. — С. 75—76.

116. *Нерода, М. В.* Влияние технологических режимов магнитно-электрического шлифования на теплообразование в зоне обработки / М. В. Нерода // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч. техн. конф. : в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Могилёв. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Беларуси, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. — Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. — Ч. 1. — С. 211—212.

117. *Нерода, М. В.* Влияние электрофизических режимов магнитно-электрического шлифования на съём материала и микрогеометрию поверхностного слоя твёрдых покрытий / М. В. Нерода / Техника и технологии: инновации и качество : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 23—24 нояб. 2007 г. / редкол.: В. В. Таруц (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи : РИО БарГУ, 2007. — С. 21—25.

118. *Чеботарь, А. П.* Финишная обработка газотермического упрочняющего покрытия СР4 с использованием механической, электрической и магнитной энергий / А. П. Чеботарь, Т. В. Лыженков, М. В. Нерода // Содружество наук. Барановичи—2008 : материалы IV Междунар. науч.-

практ. конф., Барановичи, 21—25 мая 2008 г. : в 2 ч. / редкол.: В. Н. Зуев (гл. ред.), В. В. Таруц. — Барановичи : РИО БарГУ, 2008. — Ч. 1. — С. 68—69.

119. *Нерода, М. В.* Оптимизация режимов магнитно-электрического шлифования упрочнённых поверхностей деталей / М. В. Нерода / Машиностроение : респ. межведомств. сб. науч. тр. / под ред. Б. М. Хрусталёва. — Минск : [б. и.], 2007. — Вып. 22. — С. 37—42.

120. *Дмитриченко, Э. И.* Влияние электрофизических режимов магнитно-электрического шлифования на производительность при обработке покрытий / Э. И. Дмитриченко, М. В. Нерода / *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф.* — Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2004. — Ч.1. — С. 163—165.

121. *Нерода, М. В.* Определение эффективности обработки магнитно-электрическим шлифованием поверхностей шеек валов / М. В. Нерода / *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Респ. науч.-техн. конф. ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол. И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.].* — Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2006. — С. 60.

122. *Нерода, М. В.* Основы формирования поверхности при магнитно-электрическом шлифовании / М. В. Нерода / *Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых учёных / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.].* — Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. — С. 31.

123. *Дмитриченко, Э. И.* Исследование влияния технологических режимов магнитно-электрического шлифования на качество упрочнённых поверхностей / Э. И. Дмитриченко, М. В. Нерода // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч. техн. конф., Могилёв, 21—22 апр. 2005 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. И. С. Сазонов [и др.].* — Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. — Ч. 1. — С. 150—151.

124. *Высоцкий, В. А.* Влияние основных технологических режимов МЭШ на микротвёрдость поверхностного слоя газотермических покрытий ПГ-СР4, ПГ-СР2 / В. А. Высоцкий, М. В. Нерода // *Содружество наук. Барановичи—2009 : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, Барановичи, 21—22 мая 2009 г. : в 2 ч. / редкол. : В. Н. Зуев, (гл. ред.) [и др.], — Барановичи : РИО БарГУ, 2009. — Ч. 1. — С. 11—12.*

125. Влияние технологических режимов магнитно-электрического шлифования на микроструктуру газотермических Ni-Cr-B-Si-покрытий / Н. В. Спиридонов [и др.] // *Вестн. БНТУ.* — 2009. — № 4. — С. 16—19.

126. *Спиридонов, Н. В.* Применение концентрированных потоков энергий для упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов, А. А. Баркун // *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : науч.-техн. конф. : сб. : в 3 т. / под общ. ред. П. А. Витязя, С. А. Астапчика.* — Новополоцк : ПГУ, 2009. — Т. III. — С. 3—6.

127. *Спиридонов, Н.В.* Сравнительный анализ методов упрочнения напылённых покрытий / Н. В. Спиридонов, И. О. Соколов, А. А. Баркун / *Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : науч.-техн. конф. : сб. : в 3 т. / под общ. ред. П. А. Витязя, С. А. Астапчика.* — Новополоцк : ПГУ, 2009. — Т. III. — С. 6—9.

128. *Коновалик, А. В.* Оценка износостойкости поверхностного слоя газотермического упрочняющего покрытия ПГ–СР4 после МЭШ / А. В. Коновалик, М. В. Нерода / *Содружество наук. Барановичи—2009 : материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, Барановичи, 21—22 мая 2009 г. : в 2 ч. / редкол.: В. Н. Зуев (гл. ред.) [и др.].* — Барановичи : РИО БарГУ, 2009. — Ч. 1. — С. 18—19.

129. Способ шлифования газотермического упрочняющего покрытия : пат. 10934 Респ. Беларусь : МПК В24В1/00 / М. В. Нерода : дата публ. 30.08.2008.

### **Перечень нормативных документов**

1н. ГОСТ 9013-59 *Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу* [Электронный ресурс] // StandartGOST.ru — открытая база ГОСТов. — URL: [http://standartgost.ru/g/ГОСТ\\_9013-59](http://standartgost.ru/g/ГОСТ_9013-59). Дата обращения: 10.11.2014.

2н. ГОСТ 19300-86 *Средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Профилографы-профилометры контактные. Типы и основные параметры* [Электронный ресурс] // StandartGOST.ru — открытая база ГОСТов. — URL: <http://standartgost.ru/>. Дата обращения: 10.11.2014.

3н. ГОСТ 2789-73 *Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики* [Электронный ресурс] // StandartGOST.ru — открытая база ГОСТов. — URL: <http://standartgost.ru/>. Дата обращения: 10.11.2014.

4н. ТУ 14-22-33-90 *Порошки самофлюсующихся сплавов для газотермического напыления и наплавки. Технические условия* [Электронный ресурс] // СтандартИнформ. URL: <http://www.standards.ru/document/3261592.aspx>. Дата обращения: 10.11.2014.

5н. ГОСТ 4543-71 *Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия* [Электронный ресурс] // StandartGOST.ru — открытая база ГОСТов. — URL: <http://standartgost.ru/>. Дата обращения: 10.11.2014.

## РЕЗЮМЕ

Целью работы является технологическое обеспечение качества поверхности и производительности обработки упрочняющих покрытий МЭШ.

При выполнении работы использован современный математический аппарат: пакет математических программ MathCad, встроенная статистическая система Microsoft Excel. Для достижения поставленной цели в качестве специальных методов исследования применены математическое моделирование, металлографические исследования, исследование износостойкости покрытий, исследование твёрдости покрытий, исследование температурных изменений в зоне обработки, исследование влияния технологических режимов МЭШ на шероховатость поверхности по полученным профилограммам.

Спроектированы и изготовлены опытно-промышленные установки, реализующие технологические процессы МЭШ на базе горизонтально-фрезерного станка НГФ-100 и универсально-заточного станка 3Е642Е. Получены опытные образцы с различными свойствами поверхностного слоя покрытий. Рассмотрены физические закономерности процесса МЭШ. На основе разработанной методики проведены эксперименты и получены математические модели влияния технологических режимов МЭШ на качество поверхности и производительность обработки, что позволило определить оптимальные режимы шлифования упрочняющих покрытий из материалов марок ПГ-СР4, ПГ-СР2 и сормайтa. Воздействие технологического тока и магнитной индукции на обрабатываемую поверхность газотермических упрочняющих покрытий увеличивает производительность обработки в 1,5...2,0 раза. Взаимодействие электрофизических и кинематических режимов при МЭШ позволяет достигать шероховатости поверхности 0,4...0,5 мкм.

Разработан и внедрён способ МЭШ для обработки рабочих поверхностей деталей «Упор направляющей ленточной пилы» и «Плита» с газотермическим упрочняющим покрытием из материала ПГ-СР4, что позволило повысить их долговечность в 3 раза.

## РЭЗІЮМЭ

Мэтай работы з'яўляецца тэхналагічнае забеспячэнне якасці паверхні і прадукцыйнасці апрацоўкі ўмацоўваючых пакрыццяў МЭШ.

Пры выкананні работы быў выкарыстаны сучасны матэматычны апарат: пакет матэматычных праграм MathCad, убудаваная статыстычная сістэма Microsoft Excel. Для дасягнення пастаўленай мэты ў якасці спецыяльных метадаў даследавання былі выкарыстаны матэматычнае мадэляванне, металаграфічныя даследаванні, даследаванне зносаўстойлівасці пакрыццяў, даследаванне цвёрдасці пакрыццяў, даследаванне тэмпературных змяненняў у зоне апрацоўкі, даследаванне ўплыву тэхналагічных рэжымаў МЭШ на шурпатаць паверхні па атрыманых прафілаграмах.

Спраектаваны і выраблены доследна-прамысловыя ўстаноўкі, што рэалізуюць тэхналагічныя працэсы МЭШ на базе гарызантальна-фрэзернага станка НГФ-100 і ўніверсальна-заточнага станка 3Е642Е. Атрыманы доследныя ўзоры з разнастайнымі ўласцівасцямі паверхневага слою пакрыццяў. Разгледжаны фізічныя заканамернасці працэса МЭШ. На аснове распрацаванай метадыкі былі праведзены эксперыменты і атрыманы матэматычныя мадэлі ўздзеяння тэхналагічных рэжымаў МЭШ на якасць паверхні і прадукцыйнасць апрацоўкі, што дазволіла вызначыць аптымальныя рэжымы шліфавання ўмацоўваючых пакрыццяў з матэрыялаў тыпу ПГ-СР4, ПГ-СР2, сармайт. Уздзеянне тэхналагічнага току і магнітнай індукцыі на апрацоўваемую паверхню газатэрмічных ўмацоўваючых пакрыццяў павялічвае прадукцыйнасць апрацоўкі ў 1,5...2,0 разы. Узаемадзеянне электрафізічных і кінематычных рэжымаў МЭШ дазваляе дасягаць шурпатасці паверхні 0,4...0,5 мкм.

Распрацаваны і выкарыстаны спосаб МЭШ для апрацоўкі рабочых паверхняў дэталей «Упор накіравальніка стужачнай пілы» і «Пліта» з газатэрмічным ўмацоўваючым пакрыццём ПГ-СР4, што дазволіла павысіць іх даўгавечнасць у 3 разы.

## SUMMARY

The modern mathematical apparatus is used while carrying out the work: the package of the mathematical programs MathCad, built-in statistical system Microsoft Excel, etc. Some special research methods are applied to achieve the object: the mathematical modeling, the metal-graphic researches, the research of the wear resistance of coatings, the research of hardness of coatings, the research of temperature changes in a processing zone, the research of the influence of the technological modes of MEG on a surface roughness according to the received profilogrammes.

The trial industrial installations realizing MEG process on the basis of the horizontal-milling machine tool NGF-100 and the universal-tool-grinding machine tool 3E642E have been designed and made. The experimental models with various properties of a coating blanket have been received. The physical laws of MEG process have been considered. On the basis of the developed technique the experiments have been made and the mathematical models of the influence of the technological modes of MEG on the quality of a surface and the productivity of processing have been received. It allows to define optimum grinding modes of the strengthening coatings of material PG-SR4, PG-SR2 types, sormite. The influence of the technological current and the magnetic induction on a processed surface of the gas-thermal strengthening coatings increases the productivity of processing by 1,5...2.0 times. The interaction of electrophysical and kinematic modes at MEG allows to reach the surface roughness 0,4...0,5 microns.

MEG technology for processing of working surfaces of the details “The stress of a directing tape saw” and “Pallet”, with the gas-thermal strengthening coating PG-SR4, have been developed and adopted. It allows increasing the durability by 3 times.

*Научное издание*

**Нерода Михаил Владимирович**  
**Спиридонов Николай Васильевич**  
**Сокоров Игорь Олегович**

**ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ  
УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ  
МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ  
ШЛИФОВАНИЕМ**

Монография

Ответственный за выпуск Е. Г. Хохол  
Технический редактор А. Ю. Сидоренко  
Компьютерная вёрстка С. М. Глушак  
Корректор С. А. Березнюк

Подписано в печать 18.11.2015. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 13,30. Уч.-изд. л. 7,20. Тираж 140 экз. Заказ 966.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Барановичский государственный университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий № 1/424 от 02.09.2014.  
Ул. Войкова, 21, 225404 г. Барановичи.  
Тел. 8 (0163) 45 46 28, e-mail: gio@barsu.by .